



Statkraft

LOW EMISSIONS SCENARIO

2022

Prefácio	2
Sumário Executivo	4
Statkraft's Low Emissions Scenario 2022: A Transição Energética num mundo em conflito	6
Segurança energética é um fator determinante para o Low Emissions Scenario	8
O que é segurança energética?	12
De um sistema de energia com uso intensivo de combustível para um de uso intensivo de material	14
DEEP DIVE: Metais em energia renovável	16
Por que metais são importantes	17
Principais metais utilizados em desenvolvimentos eólicos, solares e de baterias	18
Efeitos do preço de metais no desenvolvimento de energia eólica, solar e de baterias	21
A gama de tecnologias renováveis necessárias	23
Aumento temporário no uso do carvão para alívio a curto prazo do gás fóssil	26
Precisaremos de menos energia primária em 2050 do que hoje	28
A eletrificação reduz emissões e economiza energia	29
Descarbonização do setor de construção com bombas de calor e uma utilização mais eficiente da energia	29
Descarbonização do setor de transportes com eletricidade e hidrogênio	31
Descarbonização do setor da indústria	34
Políticas de segurança energética impulsionam a transição energética	36
DEEP DIVE: Possíveis caminhos do plano europeu REPowerEU para reduzir a dependência russa de gás até 2030	38
Diferentes caminhos climáticos para 2050 – cenários para ambições do plano REPowerEU	40
A eletrificação reduz a demanda de gás fóssil	40
A meta do REPowerEU para o hidrogênio precisa ser apoiada por políticas	40
A eliminação progressiva de gás fóssil aumenta a demanda de carvão	41
Aumento substancial das energias renováveis necessárias em todos os cenários	42
A energia solar fotovoltaica e as bombas de calor são as vencedoras	42
A independência do gás russo é ambiciosa, mas está ao alcance	45
A flexibilidade no sistema de energia é crucial para a transição energética	46
DEEP DIVE: Energia hidrelétrica e flexibilidade	50
A energia hidrelétrica fornece flexibilidade cada vez mais importante para o sistema de energia global	52
O papel da energia hidrelétrica no sistema energético nórdico e europeu	55
Energia hidrelétrica no contexto mais amplo de sustentabilidade: pegada de carbono e controle de inundações	56
O hidrogênio renovável é necessário para atingir as metas climáticas, proporcionando uma flexibilidade importante	58
Política climática em um mundo fragmentado	60
Países estão se comprometendo com metas net zero	62
O preço do carbono é uma das formas mais eficientes de atingir as metas climáticas	63
Contrato de carbono por diferença (CCfDs) reduz risco de investimento em tecnologias limpas	63
Evitar a fuga de carbono entre mercados é importante	63
Investimentos em tecnologias limpas estão aumentando – mas é preciso muito mais	64
DEEP DIVE: O Low Emissions Scenario em um contexto do IPCC	66
As emissões de gases de efeito estufa estão aumentando, mas a um ritmo mais lento	67
O orçamento de carbono está quase gasto	67
Comparando o Low Emissions Scenario com cenários do IPCC	68
Um ano de desafios sem precedentes pode acelerar a transição energética	75
ANEXOS	76
Anexo 1: Parâmetros-chave Low Emissions Scenario em comparação com IEA e BNEF	76
Anexo 2: Premissas e visão geral das emissões abrangidas No Low Emissions Scenario	77
Anexo 3: Modelo de Transição Energética Statkraft (ETM)	77
Referências	78



A rapidez é fundamental

CHRISTIAN RYNNING-TØNNESEN

No momento em que se conclui este relatório, o sistema global de energia enfrenta imensa pressão. A Europa está em crise. A Rússia de Vladimir Putin está espremendo o fornecimento de gás. O risco de um déficit de energia provocou o aumento e a volatilidade dos preços do gás na Europa, que posteriormente levaram a um aumento dramático nos preços da energia. Isso levou muitos consumidores vulneráveis para a pobreza energética e reduziu a atividade industrial. Dada a natureza global dos mercados de energia fóssil, as ramificações desses desenvolvimentos foram sentidas em todo o mundo.

Ao mesmo tempo, a mitigação das mudanças climáticas é mais urgente do que nunca. A temperatura global já subiu 1,1°C acima dos tempos pré-industriais, e estamos sentindo os efeitos na forma de furacões, incêndios florestais e inundações violentas. Nos níveis atuais de emissões, o orçamento de emissões restante (para ficar dentro de 2°C de aquecimento e o mais próximo possível de 1,5°C) está diminuindo em ritmo acelerado, aumentando o risco de danos climáticos potencialmente catastróficos.

Pelo sétimo ano consecutivo, estamos lançando o Statkraft's Low Emissions Scenario 2022 – nossa análise do sistema global de energia até 2050.

Os sistemas de energia do futuro devem fornecer energia acessível sem comprometer a segurança do abastecimento ou a sustentabilidade. O nosso futuro depende disto. Em Low Emissions Scenario anteriores, a mudança climática foi um tema central. Na análise deste ano, mostramos que a crise energética que enfrentamos atualmente pode se tornar um catalisador para a transição para a energia verde. A principal solução para obter segurança e independência energética é desenvolver energia limpa e eficiente em um ritmo mais rápido do que antes.

O aumento do uso de energia renovável, aliado a soluções tecnológicas disponíveis para garantir maior flexibilidade, são pilares da transição energética. A energia solar superará amplamente os concorrentes fósseis e se tornará a fonte dominante de eletricidade, enquanto as soluções de armazenamento de energia, como as baterias, serão essenciais para manter o equilíbrio no sistema mais intermitente. A energia hidrelétrica e o hidrogênio continuarão a crescer em importância como recursos livres de emissões e flexíveis, enquanto os sistemas de energia cada vez mais interconectados também fornecerão a flexibilidade necessária no sistema de energia dominado pelas renováveis do futuro. O plano REPowerEU da União Europeia, que visa eliminar a

dependência da União em relação à energia russa e, ao mesmo tempo, atingir metas climáticas difíceis, acelerará a transição energética da Europa.

No Low Emissions Scenario deste ano, mostramos que, embora desafiador, é possível que a Europa se torne totalmente independente do gás russo antes de 2030 – sobretudo através do uso de tecnologias limpas maduras, como bombas de calor, energia solar e eólica, mas também mais eficiência energética e diversificação da oferta de gás. Embora o plano inclua metas ambiciosas para a produção de hidrogênio, nossa análise mostra que alcançar as ambiciosas metas de hidrogênio da UE é muito desafiador e exigirá um desenvolvimento político substancial aliado a um forte impulso político.

O comércio e a cooperação internacionais são fundamentais para uma transição energética bem-sucedida. Em uma extensão cada vez maior, o sistema global de energia passará do consumo intensivo de combustível para uso intensivo de materiais. Proteger a cadeia de suprimentos de tecnologias limpas será cada vez mais importante. Embora existam abundantes reservas de metais no mundo, esses recursos devem ser disponibilizados por meio de investimentos pontuais de forma sustentável. Atualmente, grande parte das cadeias de suprimentos de metais críticos para tecnologias limpas está concentrada em apenas alguns países, o que aumenta a vulnerabilidade e ressalta a necessidade de diversificação.

A edição de Statkraft's Low Emissions Scenario 2022 ainda é um cenário otimista, mas realista, alinhado com o forte crescimento contínuo do mercado de energia renovável. As tendências em desenvolvimento antes consideradas otimistas passam a fazer parte do mainstream.

Nossa análise mostra que, apesar da pandemia e da pressão que a guerra da Rússia contra a Ucrânia coloca nas cadeias de suprimentos globais, as energias renováveis continuam aumentando sua competitividade em comparação com os combustíveis fósseis. As emissões de CO2 relacionadas à energia que agora prevemos para 2050 são menores do que em relatórios anteriores, o que coloca nosso cenário em um caminho desafiador, mas realista, de 2°C.

No caminho para o net zero, cada molécula de CO2 evitada conta, e é o carbono no final dessa jornada que será o mais caro e desafiador para reduzir. Para limitar os efeitos nocivos do aquecimento global, devemos acelerar a transição energética. Não temos tempo a perder.



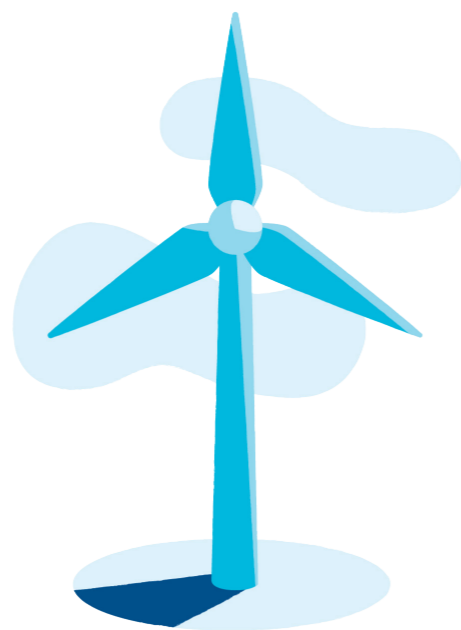
SUMÁRIO DO Statkraft's Low Emissions Scenario 2022

A incerteza nos mercados de energia aumentou, a confiança ocidental no regime russo está quebrada e a autossuficiência energética está agora no topo da agenda política.

Na análise deste ano, mostramos que desenvolver energia limpa e eficiente em um ritmo maior do que antes é a principal solução para garantir a segurança energética e preços de energia acessíveis.

Desenvolver sistemas de energia renovável e aumentar a eficiência energética é a solução a longo prazo, tanto para a atual crise energética quanto para a crise climática.

No entanto, a geopolítica global caracterizada por rivalidade e conflito poderia torná-lo mais difícil coordenar a resposta global às alterações climáticas e construir confiança.



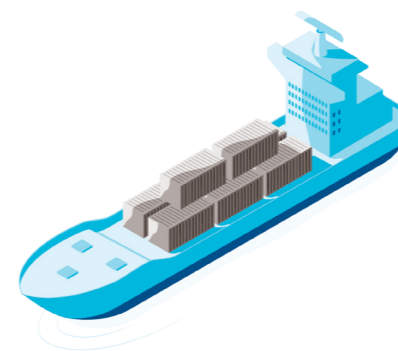
Resolver o desafio da flexibilidade de forma econômica e ecologicamente correta é a chave para o desenvolvimento de um sistema de energia dominado pelas energias renováveis. Existem muitas soluções de flexibilidade diferentes que cobrem curtos períodos de tempo e enfrentarão alta concorrência.



A energia hidrelétrica é hoje a maior fonte de energia renovável do mundo e a maior fonte de armazenamento de eletricidade com 99,9% da capacidade global. A energia hidrelétrica é uma das poucas soluções capazes de cobrir os requisitos de flexibilidade em períodos de tempo mais longos, como dias e semanas inteiros, e desempenhará um papel importante no sistema global de energia até 2050.



A demanda de carvão e gás diminuirá substancialmente – carvão e gás no mix de energia será reduzido em 75% e 23% respectivamente.



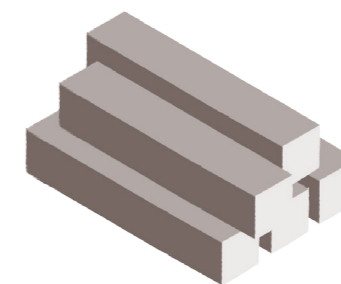
Existem recursos metálicos abundantes, mas as cadeias de fornecimento de metais críticos para a transição energética estão concentradas em poucos países. Investimento insuficiente e diversificação da capacidade produtiva podem adiar a transição energética.



A energia solar será a vencedora global na transição energética, com a produção aumentando por um fator de 26 a partir de hoje, para mais de 21.000 TWh em 2050. Com este valor poderíamos cobrir mais de 80% da demanda global de energia hoje.

6%

A demanda de energia primária será cerca de seis por cento menor em 2050 do que hoje.



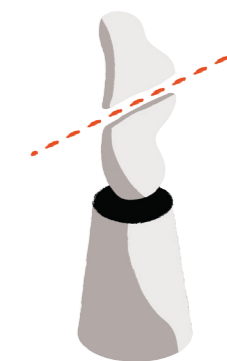
Os preços elevados temporários dos metais aumentaram os custos da energia solar e eólica, mas isso não afetou a competitividade em comparação com as tecnologias de energia fóssil, pois os preços do petróleo, gás e carvão aumentaram em um ritmo muito maior desde o início de 2020.



A frota global de veículos de passageiros será totalmente elétrica em 2050, com alguns carros movidos a hidrogênio com célula de combustível em aplicações de nicho – deslocando mais de 20 milhões de barris por dia de demanda de petróleo até 2050.



A eletrificação reduz as emissões de CO2 e aumenta a independência energética. A demanda global de energia mais que dobrará até 2050 e a energia solar e eólica fornecerá cerca de dois terços.



No Low Emissions Scenario, as emissões anuais de CO2 relacionadas à energia são reduzidas de 32 gigatoneladas hoje para 12 em 2050, firmemente no caminho para um aquecimento global de 2°C em comparação com o período pré-industrial. Para uma via de 1,5°C, a transição precisa acontecer substancialmente mais rápida e ir ainda mais longe.

2/3

Achamos que é viável, mas desafiador, para a UE atingir seus objetivos duplos: tornar-se totalmente independente do gás russo até 2030, reduzindo as emissões – aumentando a participação das energias renováveis de eletricidade para dois terços.

Statkraft's Low Emissions Scenario 2022

A Transição Energética num mundo em conflito

A atual crise energética colocou em teste o sistema global de energia. A invasão da Ucrânia pela Rússia resultou em grandes interrupções nos sistemas globais de energia e no comércio, destacando a dependência mundial dos voláteis mercados de energia fóssil.

Enquanto os olhos do mundo estão voltados para a segurança energética e as interrupções no fornecimento, as emissões globais continuam aumentando. As emissões globais de CO2 se recuperaram para o nível mais alto da história em 2021, após caírem durante a pandemia de COVID-19 – o maior aumento anual já registrado.

O aquecimento global já aumentou 1,1°C em relação aos níveis pré-industriais, e já estamos experimentando os efeitos disso¹

Talvez seja difícil ser otimista no momento, mas o Statkraft's Low Emissions Scenario 2022 mostra que não precisamos escolher entre resolver a crise energética em curso ou a crise climática, e vemos várias tendências positivas de longo prazo, apesar da situação atual.

Existem sinergias claras entre um mundo de baixas emissões e a segurança. Uma transição de combustíveis fósseis para energia renovável implica, em muitas regiões, uma transição da dependência de importação de energia para uma maior autossuficiência energética baseada em energia sustentável, confiável e limpa.

Statkraft's Low Emissions Scenario 2022 é otimista em termos de tecnologia, mas realista para a transição energética global de hoje até 2050. Esse cenário pressupõe que política, mercados e tecnologia conduzam conjuntamente a transição energética para a descarbonização.

É um cenário que não começa com uma determinada meta climática, mas é nossa visão do que o mundo alcançará se o impulso existente para tecnologias limpas e políticas climáticas continuar. O cenário também leva em consideração a atual crise energética e a situação geopolítica global.

O setor de energia está no meio de uma grande transformação com uma rápida mudança para tecnologias renováveis. As novas adições de capacidade são dominadas por energia solar e eólica, que mostraram um crescimento recorde por vários anos consecutivos. A energia solar e eólica superam outras tecnologias em termos de custo e benefícios para o clima, ao mesmo tempo em que tornam os países e regiões menos dependentes das importações de combustíveis fósseis.

Metas climáticas mais duras aumentam a pressão sobre a indústria, transporte e edificações para reduzir as emissões. Para atingir nossas metas globais de clima e de sustentabilidade, é imperativo usar a energia de forma mais eficiente. O uso de eletricidade renovável é, na maioria dos casos, muito mais eficiente do que a queima de combustíveis fósseis, o que significa que menos energia é necessária para produzir o mesmo calor, luz ou trabalho. Com um setor de energia mais renovável, o uso direto de eletricidade será uma medida climática econômica em setores de uso final, economizando energia e reduzindo a poluição local e as emissões globais de efeito estufa no processo.

Em setores onde o uso direto de eletricidade não é viável, o uso de energia renovável indiretamente por meio de hidrogênio verde livre de

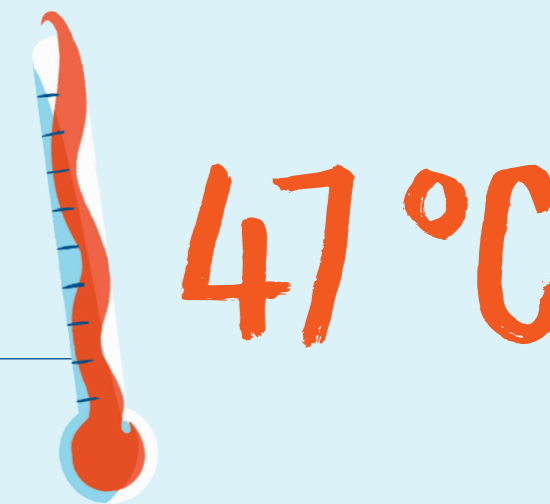
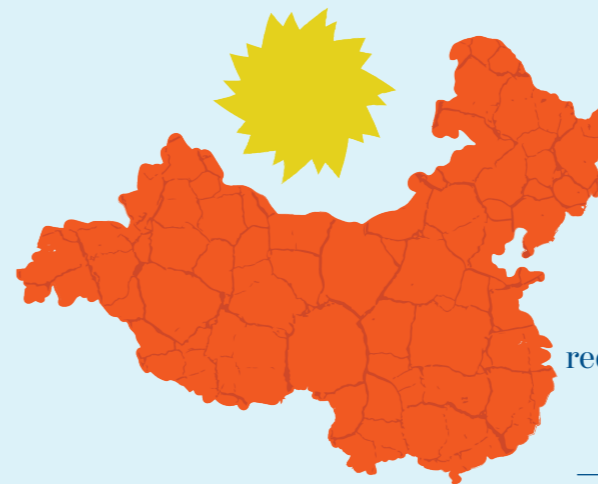
emissões torna-se cada vez mais atraente.

Esse uso indireto e direto de energia renovável conecta os diferentes setores por meio do acoplamento de setores, proporcionando a flexibilidade necessária ao sistema energético. O acoplamento da indústria pode reduzir a necessidade de produção flexível de energia fóssil e apoiar o investimento em tecnologias renováveis intermitentes, como eólica e solar.

A energia hidrelétrica também desempenha e continuará a desempenhar um papel importante no fornecimento de flexibilidade e confiabilidade de baixa emissão para um sistema de energia renovável variável. Embora haja um enorme potencial para a energia hidrelétrica globalmente, ela só é viável sob certas condições e em certas áreas do mundo. A produção de energia mais dependente do clima exige melhores sistemas de energia integrados em todas as regiões, a fim de se beneficiar das diferenças em cada sistema de energia e aumentar o acesso a soluções flexíveis.

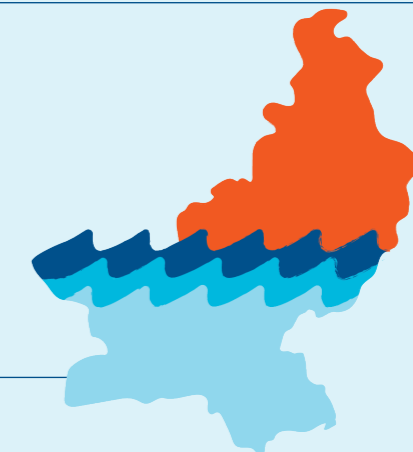
Embora existam várias tendências positivas, esforços devem ser acelerados para atender às ambições climáticas, e já temos as tecnologias que nos permitem fazê-lo. De acordo com o IPCC, temos apenas 400 bilhões de toneladas (400 Gt) de carbono restantes no orçamento de carbono para limitar o aquecimento a 1,5°C - com 67% de probabilidade.² Dadas as emissões médias anuais de 39,4 Gt CO2 na última década,³ o orçamento mundial de carbono será gasto nos próximos 10 anos se o nível atual de emissões for mantido.

Este ano, as piores ondas de calor já registradas na Europa causaram incêndios florestais, a pior seca em mais de 500 anos e mais de 50.000 mortes em excesso, com temperaturas superiores a 40°C no Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Portugal, Eslovênia e Espanha. A temperatura mais elevada foi registrada em Pinhão, Portugal (47 °C)⁴



Durante o verão, a pior onda de calor da história chinesa, talvez a mais severa registrada em qualquer lugar, varreu o país. Em várias regiões foram registradas altas temperaturas recordes, trazendo secas intensas, matando lavouras e causando incêndios florestais - secando o rio Yangtze e reduzindo a geração de energia hidrelétrica em 50%, resultando em uma grave crise de energia nas regiões afetadas.⁵

Desde junho de 2022, chuvas extremas de monções e derretimento de geleiras após uma onda de calor severa resultaram em inundações repentinas, colocando um terço do Paquistão sob as águas, afetando 33 milhões de pessoas.⁶



Portanto, é necessária uma ação forte e imediata para nos manter dentro das metas climáticas.

Para mitigar os riscos associados ao aquecimento global, precisamos eletrificar a indústria, os transportes e as edificações, ao mesmo tempo que aceleramos os investimentos na produção de energia limpa. Nós precisamos agir agora.

Indústria, navios, usinas de energia e infraestrutura têm uma expectativa de vida de 30 anos ou mais, potencialmente bloqueando as emissões no futuro. Portanto, é vital que os formuladores de políticas forneçam um sinal claro aos mercados para se afastarem dos combustíveis fósseis o mais rápido possível.

A precificação do carbono é uma

maneira eficiente e transparente para os formuladores de políticas direcionarem investimentos de combustíveis fósseis para renováveis. Para garantir um ritmo suficiente, a precificação do carbono terá que ser complementada com outras políticas que estimulem o desenvolvimento tecnológico e mais investimentos em tecnologias limpas.

A escala e a velocidade necessárias para limitar o aquecimento global é um desafio monumental. No curto prazo, várias tecnologias limpas maduras estão prontamente disponíveis para serem dimensionadas rapidamente. Geração de energia solar e eólica, bombas de calor, veículos elétricos, aparelhos mais eficientes, melhor isolamento, reaproveitamento de calor, bem como bioenergia

e hidrogênio renovável podem contribuir para reduzir as emissões já antes de 2030, reduzindo a demanda por combustíveis fósseis caros. A longo prazo, os 10-20 por cento finais de redução das emissões necessários para atingir net zero nas partes de "difícil redução"¹ da indústria e do transporte serão desafiadores. Portanto, é importante desenvolver tecnologias promissoras e menos maduras em paralelo, como hidrogênio limpo, captura e armazenamento de carbono (CCS) e tecnologias de remoção de carbono.

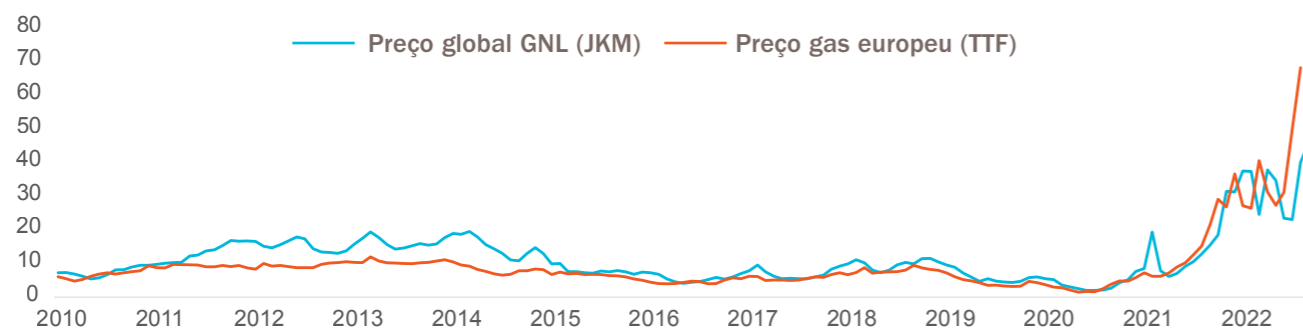
¹ Os setores de "difícil redução" são os setores onde os cortes de emissões são mais onerosos, muitas vezes baseados em tecnologias que ainda não estão maduras. Esses setores são, por exemplo, transporte pesado, transporte marítimo, aviação, ferro e aço, cimento, químicos, etc.

SEGURANÇA ENERGÉTICA É UM FATOR DETERMINANTE PARA O STATKRAFT'S LOW EMISSIONS SCENARIO 2022

A atual crise energética está colocando o sistema energético global à prova. Este capítulo examina como a segurança energética subiu na agenda política com o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e como a energia renovável e a eficiência energética podem mudar os fluxos de comércio de energia e os saldos de energia. Os custos da tecnologia de energia solar fotovoltaica e eólica continuam a superar as tecnologias de combustível fóssil em cada vez mais regiões. A mudança para um sistema de energia renovável reduzirá a dependência de um pequeno número de grandes exportadores de commodities. Ao mesmo tempo, a vulnerabilidade nas cadeias de suprimentos está mudando ao mudar para um sistema mais intensivo em material.

A atual crise energética

1 Preços mensais históricos do gás para GNL global e Europa, Jan 2010 – Set 2022 (USD/mmbtu)



Os preços do gás fóssil e da eletricidade atingiram níveis recordes em 2021 na Europa e atingiram máximos históricos após a invasão russa da Ucrânia. A invasão interrompeu os mercados globais de energia e agravou os altos preços da energia. Há alta incerteza nos mercados de energia e risco de novas interrupções no fornecimento de gás. Os preços extremos do gás têm efeitos indiretos nos preços da eletricidade, nos níveis de inflação, nos custos de produção da indústria e no custo de vida. O aumento dos custos levou milhões de pessoas à pobreza energética e está afetando a estabilidade macroeconômica geral na Europa e no mundo.



Já no segundo semestre de 2021, a Rússia começou a diminuir o fluxo de gás fóssil por gasoduto para a Europa. O gás russo cobriu cerca de 40% da demanda de gás na Europa. Isso caiu para cerca de 9% no momento em que a Rússia explorou sua posição no mercado, apertando o mercado europeu. Os baixos fluxos de gás russo resultaram em maior demanda europeia de GNL, desviando cargas para a Europa e espalhando a crise energética globalmente.



Ondas de calor extremas e secas causaram baixa produção de energia hidrelétrica na Europa e na China. Além disso, há uma produção nuclear francesa baixa histórica devido a problemas técnicos e altas temperaturas do rio, que resultou em resfriamento insuficiente.



Uma solução de curto prazo para equilibrar o sistema elétrico é usar mais energia de carvão. A Alemanha e outros permitiram que as reservas de carvão e lignita voltassem ao mercado. A maior demanda de carvão e a proibição parcial do carvão russo resultaram em preços mais altos do carvão. Na Europa, os custos de transporte também aumentaram devido aos baixos níveis de água em muitos rios.



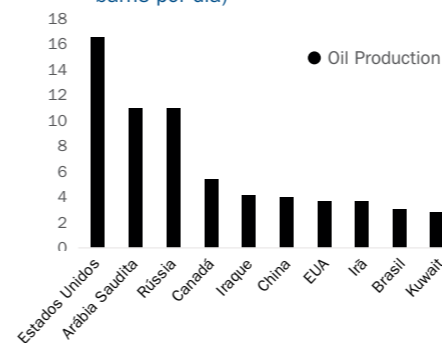
Respostas políticas rápidas e unificadas na UE para se tornar independente do gás russo antes de 2030. Acordo sobre níveis obrigatórios de armazenamento de gás, redução da demanda de gás e aceleração da construção de energias renováveis, bombas de calor e hidrogênio. Intervenções de projeto do mercado de energia para reduzir o estresse no sistema elétrico europeu estão na mesa.



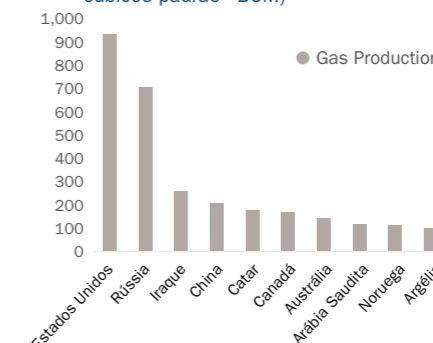
Repercussões negativas da guerra na Ucrânia, mas também outros choques, como novos surtos de COVID-19 e bloqueios na China, atingiram a economia mundial. Vemos inflação acima do esperado em todo o mundo e condições financeiras mais apertadas em muitos países.

Atual dependência das importações de combustíveis fósseis

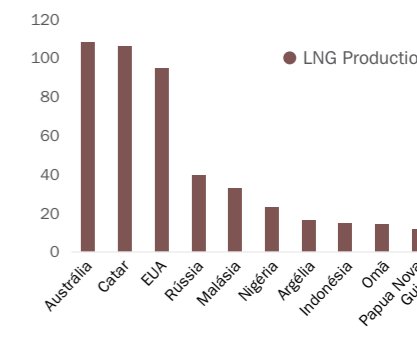
2 Os dez maiores produtores de petróleo por produção (2021) (milhões de barris por dia)



3 Os dez maiores produtores de gás por produção (2021) (Bilhões de metros cúbicos padrão - BCM)



4 Os dez maiores produtores de GNL por produção (2021) (BCM)



Cerca de 80% da demanda de energia primária do mundo é coberta por petróleo, gás ou carvão. O setor de energia é dominado por carvão e gás, respondendo por quase 60% da geração global de energia. Cerca de 70% da demanda de petróleo, 25% da demanda de gás fóssil e 20% do carvão são comercializados, globalmente ou inter-regionalmente⁷. Em suma, isso torna o mundo muito dependente de combustíveis fósseis, e muitos países expostos aos preços voláteis dos mercados globais de commodities.

Os maiores produtores de petróleo do mundo são os EUA, a Arábia Saudita e a Rússia (Fig. 2), representando mais de 40% da oferta global de petróleo. Se incluirmos o restante da OPEP, eles compõem quase 60 por cento. No total, as Companhias Nacionais de Petróleo (NOCs) respondem por mais de 60% das reservas globais de petróleo, dando poder de mercado a apenas alguns países. Os maiores produtores de gás incluem os EUA e a Rússia (Fig.3) – com os maiores recursos de gás localizados no Irã.⁸

A produção de petróleo e gás é finita e, à medida que os reservatórios se esgotam ao longo do tempo, há um declínio natural na produção de petróleo e gás. Para o petróleo, uma taxa de declínio da média global comumente assumida é de 3% ao ano. Isso significa que são necessários investimentos em produção nova e existente para fornecer fornecimento estável. Os maiores campos de petróleo e gás do mundo tiveram uma média de 5,5 anos desde a descoberta até a primeira produção. Isso torna o investimento oportuno em combustíveis fósseis importante em um sistema intensivo de combustíveis fósseis, tornando-o propenso a ciclos de investimento insuficiente e excessivo e preços voláteis com maior incerteza em relação à demanda futura.

O petróleo é uma commodity comercializada globalmente, o que significa que é mais fácil diversificar as fontes de abastecimento. Para o gás, no entanto, apenas uma pequena parte da oferta é comercializada no mercado global. O gás fóssil não é muito denso em termos de energia, dificultando o transporte em navios e tanques na forma de gás. Cerca de 60 por cento do comércio inter-regional de gás fóssil do mundo é feito através de gasodutos, o que torna os países e regiões fortemente dependentes dos grandes exportadores de gás fóssil nas proximidades. Um bom exemplo é a Europa, que responde por mais de 50% das importações globais de gasodutos fósseis, principalmente da Rússia.⁹

O Gás Natural Liquefeito (GNL) possibilita o transporte de gás fóssil

por navio. No entanto, isso é mais caro, pois o GNL requer grandes instalações tanto para liquefazer o gás próximo ao local de produção quanto para regaseificar próximo aos centros de consumo. Muitas regiões e países estão construindo instalações de regaseificação para diversificar o fornecimento, mas a nova capacidade de liquefação normalmente leva de dois a cinco anos antes de entrar em operação. Além disso, há apenas um punhado de países globalmente que exportam GNL, sendo os quatro maiores, Catar, Austrália, EUA e Rússia, respondendo por cerca de 65% do mercado (Fig.4). EUA, Catar e Rússia estão entre os mais ambiciosos em aumentar a capacidade daqui para frente.¹⁰ No entanto, com intervalo de tempo antes que novos projetos de GNL entrem em operação e o aumento projetado na demanda de GNL da Europa para substituir as importações russas, o mercado espera preços de gás altos e voláteis nos próximos anos em comparação com os preços das últimas duas décadas.

Comparado ao gás, uma parcela ainda menor do mercado de carvão é comercializada globalmente - menos de 20%. Este mercado é menos líquido e transparente em comparação com os mercados de gás e petróleo. Existem grandes diferenças quando se trata de qualidades físicas e preços do carvão, mas muitas vezes o preço do carvão térmico europeu é usado como referência.¹¹ O mercado de carvão térmico marítimo é fortemente influenciado pelas políticas do governo chinês relacionadas a importações, oferta interna e controle de preços. O mercado do Pacífico e a Ásia estão impulsionando a demanda e dominando o mercado de carvão comercializado, enquanto a participação de mercado do Atlântico é inferior a 15% hoje e está em declínio. Atualmente, a forte demanda global e a proibição europeia do carvão russo resultaram em um mercado global restrito para carvão de alta qualidade e preços mais altos.¹²

A segurança energética é um tema importante na agenda política chinesa. Atualmente, 75% da demanda chinesa de petróleo e 40% da demanda de gás são importados. A China tem enormes recursos domésticos de carvão, mas sua dependência do carvão como fonte primária de energia colocou uma enorme pressão sobre o sistema ferroviário. O carvão também está contribuindo para a poluição do ar urbano, chuva ácida e mudanças climáticas. Aumentar a segurança energética com eficiência energética e energias renováveis, reduzir a participação de combustíveis fósseis no consumo de energia e diminuir a poluição do ar são pilares do plano quinquenal da China a partir de 2021.¹³

O uso mais eficiente de energia, mais energia renovável e uso mais direto de eletricidade para substituir petróleo, carvão e gás reduzirão a dependência das importações de combustíveis fósseis.



O que é segurança energética?

Existem muitas definições diferentes para segurança energética, e o termo pode ter diferentes interpretações de acordo com várias partes interessadas, regiões e prazos. A IEA define segurança energética como a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço acessível.¹⁴ Esta definição pode referir-se à segurança energética a longo prazo através de investimentos pontuais para fornecer energia em consonância com a evolução econômica e as necessidades ambientais, bem como a segurança energética a curto prazo, a fim de fazer face a alterações repentinas no equilíbrio entre oferta e procura.

A segurança energética muitas vezes implica em limitar as vulnerabilidades nos sistemas de energia, diversificando a oferta, reduzindo a dependência de importação, melhorando a infraestrutura para aumentar a resiliência de um

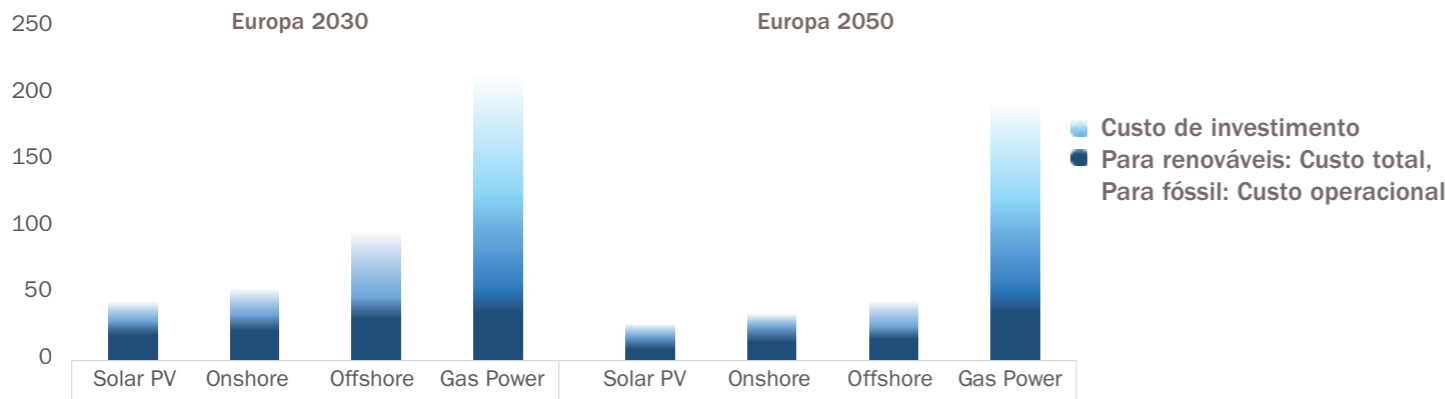
sistema, garantindo a adequação do sistema, garantindo cadeias de suprimentos robustas e fortalecendo a preparação para emergências.

Conflitos e maior ênfase na independência energética e segurança do abastecimento podem ser um catalisador para a transição verde. A dependência de suprimentos de energia importados expõe países e regiões a riscos econômicos e geopolíticos significativos. O uso mais eficiente de energia, mais energia renovável e uso mais direto de eletricidade para substituir petróleo, carvão e gás reduziriam a dependência das importações de combustíveis fósseis e o impacto

de preços de commodities voláteis – aumentando a segurança energética e a resiliência econômica.¹⁵ Se os atuais preços extremos de energia estimularem mais investimentos em energia renovável, a crise atual pode eventualmente acelerar a transição verde.

Por outro lado, uma mudança de combustíveis fósseis para renováveis não é uma solução única. A mudança da dependência dos grandes exportadores de combustíveis fósseis para uma maior dependência dos países que controlam a cadeia de valor da tecnologia limpa dá origem a outros desafios – como mudar os fluxos de comércio de energia e mudar o equilíbrio de poder.

5 Custo nivelado de energia (LCOE) para diferentes tecnologias de produção de energia na Europa em 2030 e 2050 (EUR/MWh)



De um sistema de energia com uso intensivo de combustível para um de uso intensivo de material

Uma grande vantagem de um sistema de energia renovável é que os países e regiões assumem mais controle sobre seu próprio fornecimento de energia e reduzem a dependência de um pequeno número dos grandes exportadores de commodities e dos altos e voláteis preços dos combustíveis fósseis. Um sistema de energia renovável é parte da solução, pois tornará países e regiões mais autossuficientes em energia, fornecendo às suas populações energia acessível, confiável e limpa, ao mesmo tempo em que reduz as emissões. Os sistemas de energia baseados em geração renovável variável são vulneráveis a flutuações no fornecimento de eletricidade causadas pelo clima, e as soluções de flexibilidade precisam ser dimensionadas para lidar com essas flutuações.

No entanto, uma transição para um sistema de energia renovável não implica que países ou regiões se tornem ilhas de energia. A transição implicará uma mudança de um sistema intensivo de combustível para um sistema intensivo de material, o que provavelmente resultará em uma reorganização maciça dos padrões de comércio de energia. A transição energética pode alterar o cenário geopolítico, transferindo o poder de países com altos recursos de petróleo, gás e

carvão para países que lideram a corrida por tecnologia limpa e controlam materiais críticos. Países providos de metais e outros recursos naturais críticos para a transição energética podem ter vantagem competitiva se explorados adequadamente.

Os recursos existem, mas devem ser disponibilizados por meio de investimentos pontuais. O subinvestimento em matérias-primas críticas para a tecnologia eólica, solar e de baterias pode adiar ou, na pior das hipóteses, inviabilizar a transição energética.

Energia solar e eólica permanecem competitivas apesar do recente aumento de custos

As adições de capacidade renovável estão registrando um crescimento recorde, apesar dos desafios da cadeia de suprimentos relacionados à pandemia, atrasos na construção e preços elevados de matérias-primas. Em 2021, as adições anuais de capacidade renovável aumentaram para quase 300 GW, um aumento de 6% em relação a 2020, de acordo com a IEA. A China está impulsionando esse crescimento, respondendo por 46% das adições de capacidade renovável em todo o mundo, seguida

pela UE e pelos Estados Unidos.¹⁶ Para a China, há sinergias claras na política de exportação, bem como em nível econômico, estratégico e de segurança nacional, para a mudança para energia renovável. A eletrificação com energia limpa reduz a necessidade de carvão sem aumentar a dependência de petróleo e gás importados.

Os custos da energia eólica caíram mais de 50% desde 2010 e as reduções de custos excedem 80% para a energia solar fotovoltaica, o que levou as tecnologias de energia limpa a dominar os investimentos em energia.¹⁷ As políticas climáticas ajudaram a reduzir o custo da energia renovável, que, em se tornando mais barata, reduziu o custo de atingir as metas climáticas. Isso criou uma dinâmica poderosa em todo o mundo, na qual a energia fóssil está sendo superada pela energia renovável. Espera-se que os custos continuem a diminuir e a instalação de nova produção de energia renovável está se tornando mais barata do que os custos operacionais das usinas de carvão e gás existentes em cada vez mais lugares ao redor do mundo (Fig.5).

A competitividade das energias renováveis em relação à geração de energia fóssil foi reforçada pelos altos preços dos combustíveis fósseis na maioria dos mercados

↓ Em 2021, as adições anuais de capacidade renovável aumentaram para quase 300 GW, um aumento de 6% em relação a 2020, de acordo com a IEA. A China está impulsionando esse crescimento, respondendo por 46% das adições de capacidade renovável em todo o mundo.



no último ano, embora também tenhamos visto um aumento nos custos das tecnologias renováveis.

Os custos de muitas matérias-primas e frete aumentaram substancialmente desde o início de 2021 (Fig.6), resultando em custos mais altos de fabricação e transporte de turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos. O aumento dos custos em matérias-primas críticas resultou em um aumento dos custos do módulo solar em mais de 25% e turbinas eólicas onshore e offshore em cerca de 10% e 12%, respectivamente.

No entanto, esses custos mais altos não afetaram negativamente a competitividade da energia solar e eólica em comparação com as tecnologias de energia fóssil, pois os preços do petróleo, gás e carvão aumentaram em um ritmo muito maior desde o último trimestre de 2021.

A China assumiu um papel de liderança na corrida de tecnologia industrial limpa globalmente, investindo grandes somas em cadeias de valor de tecnologia renovável, tanto no mercado interno quanto no exterior. Grande parte da produção e refinação de matérias-primas críticas para tecnologias renováveis está concentrada na China, pois eles construíram cadeias de suprimentos para muitas tecnologias renováveis.

Atualmente 90 por cento da capacidade de produção de baterias, mais de 80% da cadeia global de fornecimento de painéis solares e mais de 50% da capacidade de processamento de lítio, cobalto e grafite estão localizados na China. Além disso, 50 por cento da produção global de turbinas eólicas é encontrado na China.¹⁸ Isso dá à China uma vantagem estratégica à medida que o mundo

se torna cada vez mais dependente de tecnologia limpa chinesa barata para atingir suas metas climáticas. Tanto os EUA quanto a UE responderam a isso com políticas, tarifas e iniciativas de taxonomia para destacar o desenvolvimento sustentável da cadeia de suprimentos e oferecer maior apoio aos fabricantes locais e regionais

Para reduzir a vulnerabilidade nas cadeias de fornecimento de tecnologias limpas, será fundamental construir capacidade de processamento, aumentar a reciclagem e diversificar a fonte de metais e minerais. Uma ênfase mais forte nas cadeias de abastecimento locais e regionais pode reduzir a vulnerabilidade, mas também pode aumentar o custo das energias renováveis e a transição energética, o que pode retardar a disseminação da inovação além-fronteiras.

Metais em energia renovável



6 Preços de metais, normalizados para 2015²⁰ (minério de ferro, aço, alumínio, cobre, terras raras e silício metálico)



A demanda por metais deverá aumentar acentuadamente devido à transição energética. Isso exige uma grande e mais sustentável construção de novas capacidades de mineração, processamento, refinamento e reciclagem. O Deep Dive examina as atuais interrupções no fornecimento de metal, o impacto nos custos de energia solar fotovoltaica, eólica e de bateria, e também a perspectiva de longo prazo de demanda e oferta no contexto da transição energética.

Porque os metais são importantes

Os metais são cada vez mais importantes para os mercados de energia à medida que o mundo faz a transição para mais energia renovável. Os metais são críticos para a implantação de energia eólica, energia solar fotovoltaica, baterias, veículos elétricos e infraestrutura de rede de transmissão. Deixar de garantir um suprimento suficiente e sustentável de metais pode desacelerar o crescimento dessas tecnologias, limitando assim a capacidade do mundo de acelerar o desenvolvimento de tecnologias limpas. Os metais, como todas

as commodities, experimentam volatilidade e ciclos de preços impulsionados por desequilíbrios de oferta e demanda. As atuais interrupções no fornecimento de metais são visíveis desde o início de 2020, quando a pandemia do COVID-19 atingiu o mundo, restringindo as cadeias de suprimentos globalmente. Os preços elevados foram sustentados por mais interrupções no fornecimento da guerra russa contra a Ucrânia (Fig. 6).

Após o verão, os preços caíram e, no futuro, espera-se que os preços caiam para níveis mais normais. As altas margens já estão impulsionando o aumento da oferta,

e os principais metais têm amplas reservas conhecidas. Ainda assim, espera-se que a demanda por certos metais aumente acentuadamente devido à transição energética, o que exigiria uma construção grande e mais sustentável de nova capacidade de mineração, processamento e refinamento. A reciclagem também será importante a longo prazo. A capacidade de mineração, processamento e refinamento de metais-chave está concentrada em alguns países frequentemente associados a questões de direitos humanos e sustentabilidade, adicionando risco às cadeias de suprimentos. Por exemplo, a China controla mais de 80% da cadeia de valor da energia solar fotovoltaica



← O aço é usado para torres de turbinas eólicas, nacele da turbina e fundações, bem como para o rack de montagem dos módulos solares.

(polissilício, lingotes, wafers, células e módulos), uma participação que deve crescer para quase 95% nos próximos anos com base na capacidade de fabricação em construção.¹⁹ A UE e os EUA, portanto, estabeleceram recentemente planos para garantir o acesso a metais críticos por meio da Lei de Matérias-Primas Críticas (UE), da Lei de Redução da Inflação e da Lei de Produção Defensiva (EUA), a fim de diversificar a oferta e garantir a capacidade de produção doméstica.

Principais metais usados no desenvolvimento de energia eólica, solar e de baterias

AÇO

O aço é usado para torres de turbinas eólicas, nacele das turbinas e fundações, bem como para o rack de montagem dos módulos solares e para as torres da rede de transmissão. Espera-se que menos de 5% da demanda global de aço em 2040 venha do uso da transição energética, já que a maioria será usada nos setores de construção e transporte.²² A oferta de aço mais que dobrou nos últimos 20 anos, sem nenhum efeito duradouro sobre o preço. A maior parte da produção está concentrada na China (Fig.7). As reservas de minério de ferro cobrem cerca de 100 anos de uso nos níveis de produção atuais. O maior

risco estrutural de preços, além de possíveis desequilíbrios de curto prazo, são os custos de energia e emissão da produção intensiva de carbono. A partir de agora, o hidrogênio limpo, assim como a reciclagem, parece ser a opção mais viável para descarbonizar o aço, com custos adicionais para o primeiro. Mesmo assim, espera-se que esse custo fique bem abaixo dos atuais níveis elevados de preços.

ALUMÍNIO E COBRE

O cobre e o alumínio são amplamente utilizados na transição energética, principalmente para redes de transmissão e distribuição. Além disso, o alumínio é usado para estruturas de módulos solares, enquanto o cobre é usado como condutor elétrico em geradores de turbinas eólicas, em cabos que conectam turbinas eólicas e módulos solares à rede e em baterias. A construção da transição energética pode representar um quarto da demanda global de alumínio e quase metade da demanda global de cobre até 2040.²³ Quase um terço dos custos do alumínio estão relacionados à energia. Os altos preços da eletricidade levaram a paralisações temporárias da produção na China e na Europa, causando um desequilíbrio na oferta e demanda em 2022. Isso ficou ainda mais

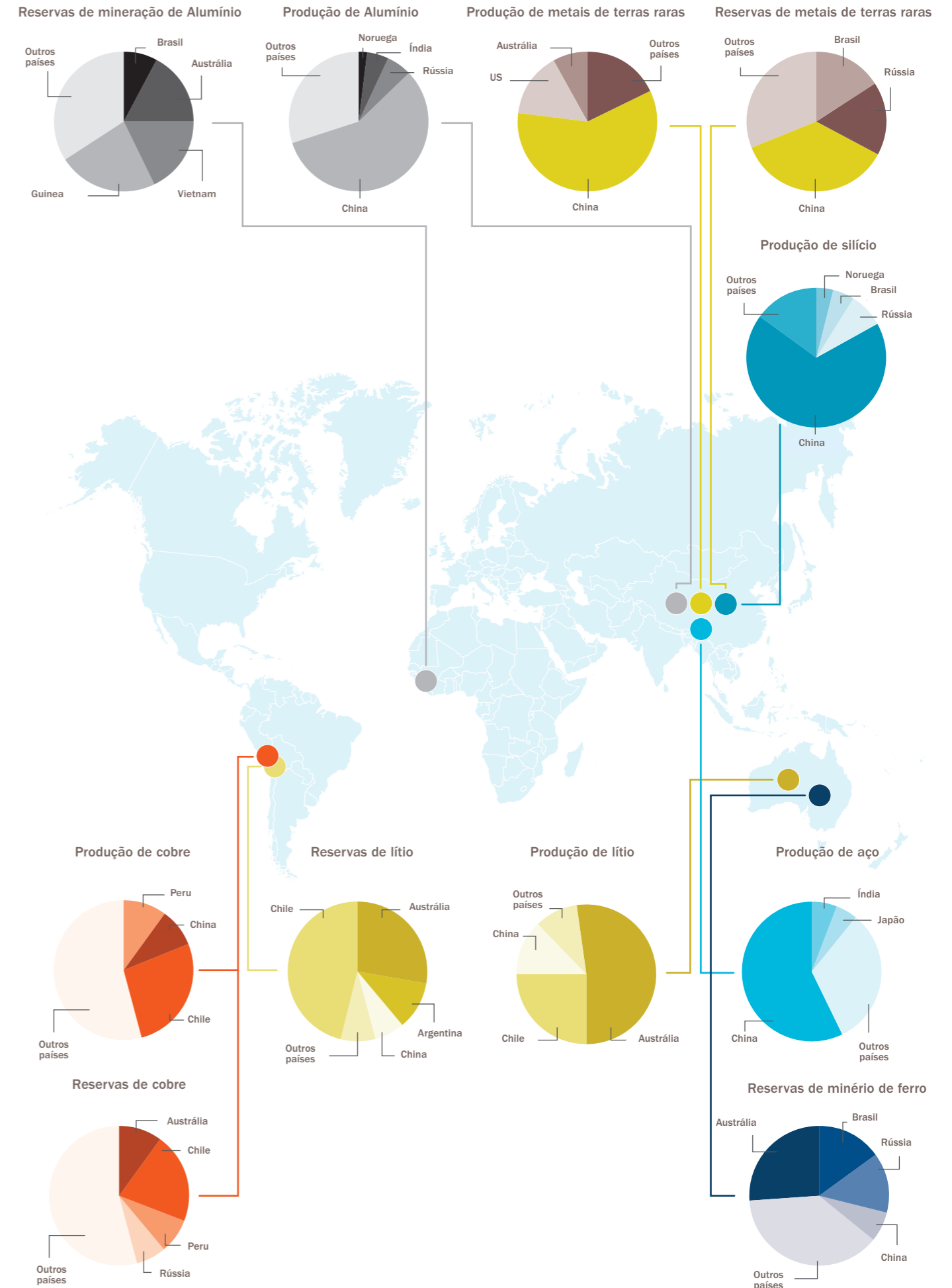
evidente quando a capacidade da Ucrânia foi encerrada, aumentando o risco de preço de curto prazo. O cobre precisa ser extraído das minas e purificado, e os custos aumentaram à medida que o teor de cobre nos minérios foi caindo nos últimos anos. Isso foi um pouco compensado por métodos de produção aprimorados. Investidores estão ligeiramente relutantes em investir em novas capacidades de mineração devido à menor pureza do minério e à forte dependência do Chile e do Peru, que detêm 36% da oferta global de cobre (Fig.7).

SILÍCIO

O silício é usado em módulos solares para converter a radiação solar em eletricidade. Embora o silício seja o metal primário nas células solares, espera-se que se o enorme crescimento da energia solar seja responsável por cerca de um décimo da demanda global de silício até 2040 (um pouco mais se os produtos químicos da bateria contendo silício forem incluídos).²⁴ O silício é usado principalmente para a produção de alumínio, produtos farmacêuticos e semicondutores - sendo este último altamente importante também para outras partes da transição energética.

Devido ao alto crescimento da demanda, o silício de grau solar está atualmente em falta, mas espera-se que isso melhore já no início de 2023, quando 70% da nova

7 Produção e reservas de aço, lítio, metais de terras raras, cobre, silício e alumínio por país²¹





capacidade entrará em operação. Os principais desafios estão relacionados ao alto consumo de energia e ao uso de combustíveis fósseis, mas isso pode ser compensado pelo uso de eletricidade limpa.

A China controla quase toda a produção global de silício de grau solar, o que demonstrou criar alguns riscos de entrega durante a pandemia (Fig. 7).

TERRAS RARAS

Os elementos de terras raras consistem em 17 metais, quatro dos quais são usados para geradores e motores elétricos. Estes são neodímio, praseodímio, disprosio e térbio. Os ímãs de neodímio são os ímãs permanentes mais fortes disponíveis e são usados em geradores de turbinas eólicas e motores EV.

O praseodímio contribui para a força

magnética, enquanto o disprosio e o térbio melhoram a resistência à desmagnetização, particularmente a altas temperaturas.²⁵

Os metais de terras raras são relativamente abundantes na crosta terrestre, mas as concentrações mineráveis são menos comuns do que para a maioria dos outros metais. Eles geralmente são agrupados, o que significa que vários metais de terras raras são extraídos simultaneamente. Isso faz com que alguns metais tenham preços mais baixos devido ao excesso de oferta, enquanto outros metais de terras raras podem ser muito caros.

Existe um risco substancial de fornecimento em relação aos metais de terras raras, pois a maior parte da mineração e refino está na China e na Rússia (Fig.7).²⁶

Há também preocupações

ambientais, pois muitos minérios de terras raras contêm elementos radioativos, e a extração e o processamento podem ser prejudiciais ao solo, à água e à saúde humana.²⁷

No entanto, há pesquisas em andamento para produzir ímãs sem térbio e disprosio caros, e também existem tipos de geradores alternativos disponíveis que eliminam a necessidade de ímãs todos juntos.

A transição energética está impulsionando o crescimento da demanda por muitos desses metais, e até metade da demanda global por neodímio pode vir de carros elétricos. As turbinas eólicas podem responder por mais da metade da demanda de térbio em 2040.²⁸

LÍTIO, COBALTO E NÍQUEL

Lítio, cobalto e níquel são matérias-

primas críticas para baterias de íons de lítio (o níquel também é usado em turbinas eólicas onshore e offshore). As baterias são usadas para veículos elétricos, que serão o principal motor para o crescimento da demanda por esses materiais daqui para frente. Lítio, sulfato de cobalto e sulfato de níquel são usados no cátodo da bateria.

O lítio pode ser usado para a maioria das baterias, mas os dois últimos materiais são mais dependentes de tipos específicos de tecnologias de íons de lítio.

O lítio experimentou um aumento de preço em 2021, mas com a nova capacidade entrando em operação nos próximos anos, não se espera que a oferta seja uma restrição no futuro. Os maiores mineradores de lítio estão na Austrália, Chile e China, com novas capacidades também

provenientes da Argentina, Canadá, Mali, México e Zimbábue, criando um mix de oferta mais diversificado (Fig.7).

Fabricantes de automóveis e fabricantes de baterias identificaram o cobalto como um risco importante para suas cadeias de suprimentos. As principais razões são os picos históricos de preços e o fato de que 70% da produção está concentrada na República Democrática do Congo, onde há problemas generalizados relacionados a padrões de saúde e segurança, trabalho infantil e corrupção (Fig.7).²⁹

Como consequência, as empresas estão reduzindo o conteúdo de cobalto em suas químicas de bateria, mudando para mais cátodos de níquel e maior absorção de baterias de lítio-ferro-fosfato (LFP), reduzindo assim as expectativas de crescimento da demanda global por

↑ Existe um risco substancial de fornecimento em relação a metais de terras raras, pois a maior parte da mineração e refino está na China e na Rússia



← Os preços elevados dos metais nos últimos meses aumentaram os custos dos módulos solares em mais de um terço desde o início de 2020

cobalto daqui para frente. A mudança para cátodos de níquel levou a um mercado de níquel mais apertado, que deve permanecer assim, já que as minas de níquel normalmente têm prazos de entrega de dois a cinco anos, tornando importante o investimento oportuno em nova capacidade. A capacidade de refinamento de níquel é mais rápida de construir, por isso espera-se que o mercado permaneça equilibrado, mas pode potencialmente apertar até 2030. A Indonésia é o centro do crescimento da produção de níquel e espera-se que a nova oferta reduza o risco associado à participação de mercado de 20% da Rússia para níquel de bateria.

Há, no entanto, uma ampla gama de questões de sustentabilidade na extração e processamento de níquel que devem ser abordadas. As emissões de dióxido de sulfeto, arsênico, cloro e flúor estão ligadas à extração e refino de corpos de minério de sulfeto. As minas de laterita estão frequentemente espalhadas por grandes áreas tropicais, afetando florestas tropicais, e os rejeitos dos processos de lixiviação podem conter metais pesados.³⁰

Efeitos dos preços dos metais no desenvolvimento de energia eólica, solar e de baterias
Os metais desempenham um papel importante no desenvolvimento da geração eólica e solar. Os preços elevados dos metais em 2021 e

2022 aumentaram os custos das turbinas eólicas onshore em cerca de um décimo em comparação com os níveis pré-pandemia, e as turbinas eólicas offshore ainda mais, pois há mais metais de terras raras no gerador. Os aumentos de custos em materiais não metálicos, como resinas e fibra de vidro para as pás das turbinas, frete e mão de obra resultaram em um aumento de 20 a 25% nos preços das turbinas desde o início de 2020.

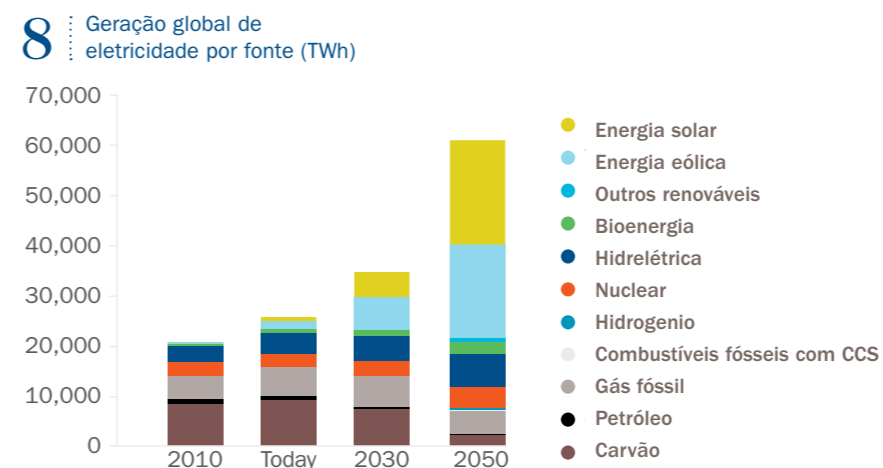
A energia solar fotovoltaica é ainda mais dependente do metal do que a energia eólica devido à menor escala e à produção menos intensiva em mão de obra. Os preços elevados do metal nos últimos meses aumentaram os custos dos módulos solares em mais de um terço desde o início de 2020. Mesmo assim, os preços de mercado dos módulos solares aumentaram apenas 25% à medida que a eficiência dos materiais melhorou e as margens dos fornecedores estão apertadas.

Para baterias, os preços de níquel, lítio e cobalto aumentaram em 2021 devido a um rápido aumento na demanda por baterias. Esse aumento foi agravado pelo efeito da cadeia de suprimentos da guerra na Ucrânia, pressionando os preços das baterias. Os custos das matérias-primas aumentaram cerca de 120% para a maioria das químicas de cátodo e mais de 330% para as baterias LFP de baixo custo (fosfato de ferro-lítio).³¹ Como resposta aos altos preços, as montadoras estão

migrando para alternativas de baixo custo (LPF), ou químicas de bateria com maior teor de níquel.

Outros itens de custo também aumentaram durante a pandemia, por exemplo, fundações de turbinas eólicas, cabos, equipamentos elétricos como transformadores e inversores, edifícios no local, combustível para transporte, instalação e muito mais. Juntos, isso significa que os preços estão atualmente muito mais altos do que antes da pandemia, o que pode ter um impacto negativo de curto prazo na velocidade da transição verde. Isso pode ser contrariado pelos governos, desde que novos níveis de custo sejam refletidos em esquemas de apoio e leilões para energia eólica e solar até que os custos retornem a níveis mais normais. No entanto, os atuais altos preços dos combustíveis fósseis preservaram e melhoraram a competitividade das tecnologias renováveis em comparação com as tecnologias fósseis.

Embora existam vários tipos de riscos de fornecimento para materiais de tecnologia limpa, há, em geral, amplos recursos disponíveis para cobrir o crescimento futuro da demanda. Dados os sinais de preço corretos, juntamente com o apoio do governo, investimentos suficientes estimularão o crescimento da oferta. Longos prazos de produção podem resultar em preços voláteis de metais nos próximos anos, mas provavelmente não o suficiente para inviabilizar a transição energética.



A gama de tecnologias renováveis necessárias

No Low Emissions Scenario, vemos uma duplicação da demanda de energia em 2050 em relação a hoje, da qual 80% vem de fontes renováveis. A energia solar fotovoltaica é a maior tecnologia de geração de energia, aumentando 26 vezes a partir de hoje, seguida pela eólica onshore, eólica offshore e hidrelétrica.

No Low Emissions Scenario, o mundo precisa de energia limpa para reduzir as emissões em todos os setores e a eletrificação deve começar paralelamente à descarbonização do setor elétrico. Além disso, mais de 700 milhões de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade em todo o mundo, e os altos preços dos combustíveis fósseis levaram milhões à pobreza energética.³² Reduzir as emissões da geração de energia enquanto fornece a eletricidade necessária no futuro é um enorme desafio.

Em suma, isso resulta em aproximadamente uma duplicação da demanda de energia em 2050 em comparação com hoje (Fig.8). Para atender à necessidade de combustíveis fósseis do setor de energia, todas as tecnologias renováveis são necessárias e, de acordo com o Cenário de Baixas Emissões, essas tecnologias renováveis crescerão consideravelmente até 2050. A energia renovável constituirá quase 80% da geração total de energia em 2050, com a energia eólica e solar cobrindo dois terços.

Isso reduzirá a geração de energia a carvão e a gás em 75% e 23%, respectivamente.

Alcançar esses altos níveis de energia renovável é tecnologicamente viável, mas a transição requer um ato de equilíbrio político. Uma transição global tão rápida exigirá apoio público, disponibilidade de terras, capacidade de fabricação suficiente, mão de obra qualificada, acesso a matérias-primas sustentáveis, infraestrutura de rede forte, tudo isso mantendo um sistema de energia flexível e seguro. No entanto, espera-se que caminhos climáticos alternativos sejam ainda mais desafiadores, menos eficientes e mais caros.

A energia hidrelétrica é hoje a maior fornecedora de eletricidade renovável do mundo e terá um papel fundamental na transição energética daqui para frente. No Cenário de Baixas Emissões, a geração global de energia hidrelétrica crescerá 1,6% ao ano em média de hoje até 2050, tornando-se a quarta maior tecnologia de geração de energia do mundo depois da energia solar fotovoltaica, eólica onshore e offshore.

No Low Emissions Scenario, a produção de energia solar aumenta 26 vezes para mais de 21.000 TWh até 2050 e será a maior fonte de geração de energia a partir de 2035. Isso é possível porque a energia solar é competitiva em termos de custo e flexível em termos de localização, rápida e fácil de

construir em comparação com outras tecnologias.

Isso a torna uma tecnologia adequada para escalar rapidamente. A energia solar fotovoltaica é, portanto, uma tecnologia principal promovida pela UE que pode ajudar a reduzir a dependência do gás russo por meio do plano REPowerEU.

A energia eólica onshore é atualmente a fonte de energia mais acessível em muitas partes do mundo. A geração de energia eólica onshore crescerá quase oito vezes e culminará em quase 11.500 TWh até 2050 no Cenário de Baixas Emissões. O tamanho da turbina para a energia eólica terrestre continuará a crescer de 1 MW em 2000, 4 MW hoje para cerca de 10 MW em 2050. A energia eólica terrestre pode afetar uma parcela significativa da terra e a resistência local atrasou o crescimento da capacidade eólica terrestre em algumas regiões. No plano REPowerEU, a Comissão Europeia pretende resolver isso identificando "áreas de acesso" para encurtar e simplificar os processos de licenciamento para alcançar as ambições de crescimento maciço para a energia eólica onshore.

Em comparação com a energia eólica onshore, a eólica offshore é geralmente mais cara, mas tem algumas outras vantagens, como produção mais estável, turbinas maiores e mais eficientes e, muitas vezes, menos resistência local.

Tecnologias para uso eficiente da terra

As tecnologias renováveis são relativamente intensivas em terra. O uso da terra para a produção de energia implicará em compromissos entre o uso alternativo local e as necessidades climáticas e de segurança energética nacionais e globais. As externalidades negativas precisam ser minimizadas, as comunidades locais precisam ser envolvidas e o uso da área precisa ser otimizado. Felizmente, existem várias tecnologias disponíveis que minimizam as necessidades totais de uso da terra para energia renovável.

Rooftop solar (telhado solar): A montagem de painéis solares em telhados ou integrados em edifícios é a prática mais comum para geração de energia solar de área eficiente, e cerca de 40% da capacidade solar no Low Emissions Scenario é de telhado ou outro solar residencial.

Co-localização de geração solar e eólica:

A co-localização de geradores eólicos e solares tem vários benefícios. O óbvio é que eles podem dividir a terra com painéis solares entre as turbinas. Além disso, a energia solar e a eólica podem compartilhar conexão à rede, equipamentos, procedimentos de licenciamento e trabalhadores. Tudo isso enquanto maximizam a capacidade da rede com complementação da produção.

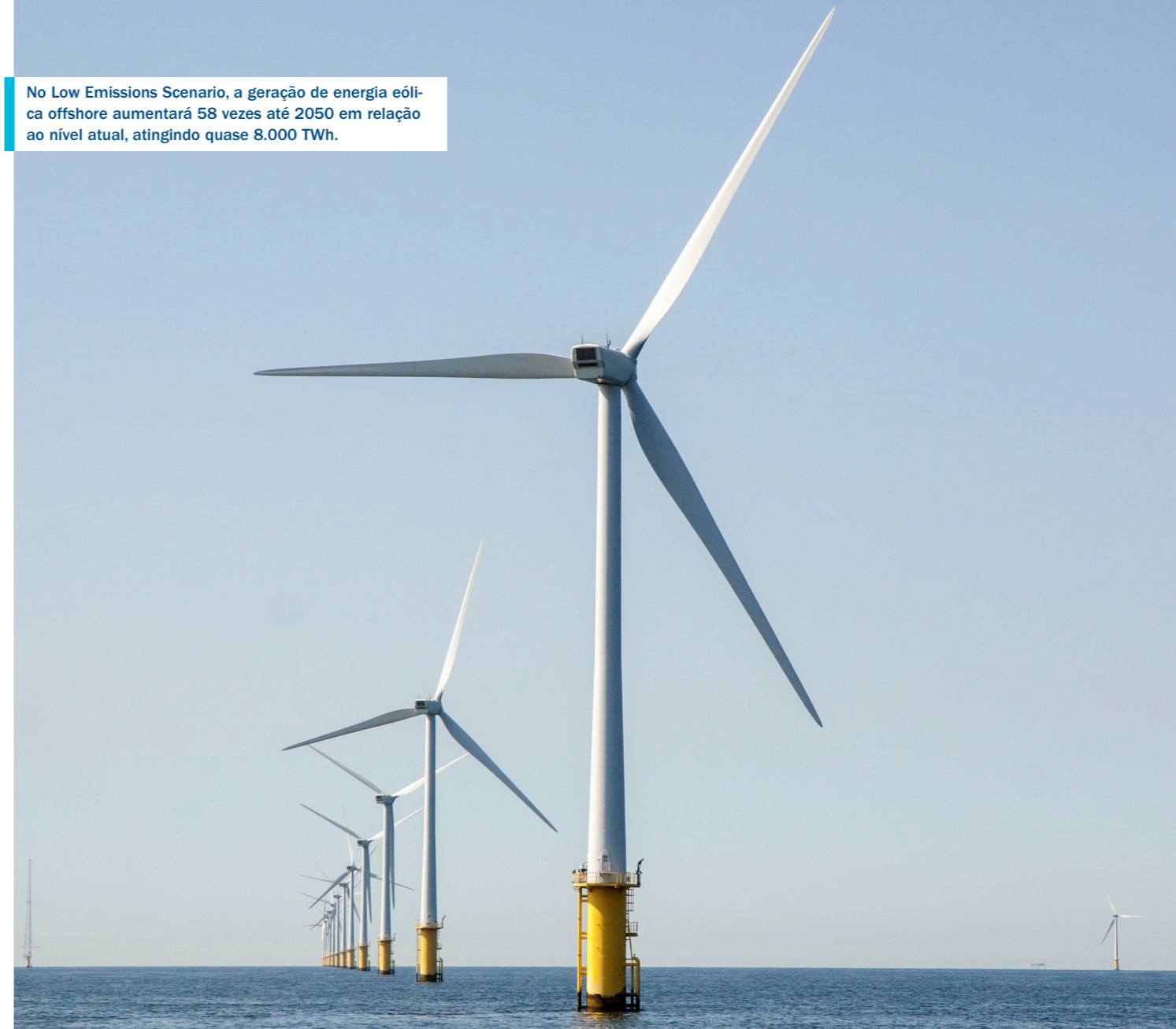
Solar flutuante: A geração solar também pode ser instalada na água. FV flutuante pode ser instalado em lagos, reservatórios e outros corpos d'água artificiais com pouco uso. O solar flutuante não

só tem vantagens no uso da terra, mas também é geralmente mais eficiente em comparação com o solar terrestre, uma vez que a água reduz a temperatura sob os painéis. A energia fotovoltaica flutuante em reservatórios hidrelétricos existentes oferece benefícios adicionais devido à complementaridade de perfis de produção, redução de conexão à rede e custos de infraestrutura, além de reduzir a evaporação de água dos reservatórios, conservando assim os recursos hídricos para geração de energia hidrelétrica.³³

Agrivoltaicos: A geração solar combinada com a agricultura também é possível. Isso envolve a montagem dos painéis solares em palafitas, permitindo que máquinas agrícolas trabalhem sob eles. As colheitas sob os painéis são parcialmente sombreadas durante o dia à medida que o sol se move. Algumas culturas lidam bem com isso e, em condições muito secas, isso pode resultar em maiores rendimentos. Assim como a energia solar flutuante, os agrovoltaicos podem ter benefícios de eficiência devido ao efeito de resfriamento da vegetação abaixo dos painéis.³⁴

Eólica offshore: A solução para a energia eólica é construir a geração completamente fora da terra. As velocidades do vento são geralmente mais fortes no mar e a velocidade e direção do vento também são mais consistentes. No entanto, o vento offshore pode entrar em conflito com a vida selvagem e a pesca. Além disso, é especialmente importante em áreas densamente populacionais do mundo.

No Low Emissions Scenario, a geração de energia eólica offshore aumentará 58 vezes até 2050 em relação ao nível atual, atingindo quase 8.000 TWh.



As maiores turbinas offshore planejadas na costa da China, que entrarão em operação em 2026, têm capacidade prevista de 16 MW, com altura superior a 260 metros e diâmetro de rotor superior a 240 metros.³⁵ Os fabricantes ocidentais estão atualmente prototipando turbinas de 14 e 15 MW, e espera-se que o crescimento das turbinas continue.

A tecnologia mais madura e econômica para a energia eólica offshore é a fixada no fundo (bottom-fixed). Essa tecnologia é adequada para áreas com águas bastante rasas e ventos fortes, por exemplo, as partes do sul do Mar do Norte e áreas na costa leste dos EUA e da China. No entanto, para grande parte das partes densamente povoadas do mundo, a energia eólica offshore flutuante será importante para

descarbonizar a produção de energia. A tecnologia flutuante ainda está em fase piloto e representa apenas 0,1 GW da capacidade instalada de hoje, em comparação com cerca de 53 GW da capacidade eólica offshore total instalada globalmente.³⁶ Cerca de 80% do potencial eólico offshore global e europeu está em águas mais profundas e requer tecnologia flutuante.³⁷ Para alguns países, a porcentagem é ainda maior, como Noruega, sul da França, Escócia, Irlanda, Espanha, Portugal, Grécia, Itália, Coreia do Sul, Japão, Austrália, Taiwan e costa oeste dos EUA. O interesse de governos e desenvolvedores é recorde, com vários leilões para tecnologias de energia flutuante planejados no curto prazo. Muitas dessas regiões contêm grandes centros populacionais que podem se beneficiar da energia eólica offshore e, assim, contribuir

para o avanço do desenvolvimento tecnológico. Além disso, a velocidade e a estabilidade do vento costumam ser maiores em áreas flutuantes, o que é positivo para a produção.

No Low Emissions Scenario, a geração de energia eólica offshore aumentará 58 vezes até 2050 em relação ao nível atual, atingindo quase 8.000 TWh. Isso fará com que a energia eólica offshore seja a terceira maior tecnologia de geração de energia do mundo, depois da energia solar fotovoltaica e da energia eólica onshore.

Aumento temporário no uso de carvão para alívio de curto prazo do gás fóssil

Os combustíveis fósseis e a energia nuclear continuarão a desempenhar um papel no setor de energia nas próximas décadas. A rápida recuperação da pandemia e os altos preços do gás no ano passado levaram ao maior aumento na produção de energia a carvão de todos os tempos. No longo prazo, tanto a energia a carvão quanto a gás fóssil sofrerão um declínio estrutural, e acabaremos com quatro por cento de carvão inabalável e oito por cento de gás fóssil no mix de geração de energia em 2050, de acordo com o Low Emissions Scenario. A energia nuclear será impulsionada em alguns países, resultando em um aumento de 60% a partir de hoje.

A geração de gás e carvão são hoje as maiores fontes de geração de energia globalmente, responsáveis por 23 e 35 por cento do mix de energia, respectivamente. O alto crescimento da demanda de eletricidade na Ásia durante a recuperação do COVID-19 resultou em um retorno ao aumento do uso de carvão no setor de energia em 2021. Isso levou ao maior aumento na demanda de energia de carvão já registrado, depois de diminuir 7% de 2018 a 2020.³⁸

Com um crescimento recorde de demanda de energia, o consumo de carvão na China aumentou 4,6% em 2021. Apesar desse aumento, a participação do carvão no mix de geração de energia diminuiu 11 pontos percentuais desde 2010.³⁹

Os altos preços do gás e as preocupações com a segurança do abastecimento na Europa tornaram o carvão mais aceitável no curto prazo. Em resposta ao corte no fornecimento de gás à Europa, Áustria, Alemanha e Holanda, anunciaram que permitiriam o aumento da geração de energia a carvão em 2022.⁴⁰

O gás fóssil na geração de energia é o mais flexível dos combustíveis fósseis e vem aumentando constantemente na última década - reduzindo as emissões substituindo a geração de energia a carvão. Mas com o aumento dos preços do gás, o crescimento esperado da demanda por gás foi atingido. Isso, combinado com a queda dos custos das tecnologias renováveis, resulta em uma demanda de gás fóssil 23% menor no setor de energia em 2050 em comparação a hoje, de acordo com o Low Emissions Scenario. Com a invasão russa da Ucrânia e a atual crise do preço do gás, espera-se que a Europa esteja mais relutante em construir novas usinas a gás e a demanda de gás do setor de energia diminuirá mais rapidamente. Ainda assim, espera-se que picos de gás eficientes tenham um papel na Europa nas próximas décadas, até que tecnologias flexíveis limpas, como picos de hidrogênio, se tornem mais prontamente disponíveis.

O impulso da política global para eliminar o carvão está aumentando. Em novembro de 2021, nas negociações climáticas anuais da ONU, COP26, quase 200 países concordaram em “acelerar os esforços” para eliminar gradualmente os subsídios “ineficientes” aos combustíveis fósseis e a “redução gradual” do consumo ininterrupto de carvão.⁴¹ Este é um marco nas negociações internacionais, mesmo que sejam necessárias maiores ambições e compromissos para um caminho net zero.

Em 2050, a energia do carvão permanece em alguns países carboníferos da Ásia, incluindo China, Índia e Indonésia. Como o carvão é parte integrante da sociedade nesses países, criando empregos e aumentando a segurança energética, é necessário mais apoio e regulamentação do governo para que esses países se diversifiquem e se

afastem do carvão inabalável.

A captura e armazenamento de carbono (CCS) é uma alternativa possível para os grandes países carboníferos. Mas o carvão é uma fonte de energia ineficiente e contribui para a poluição do ar local, além de ser muito intensivo em carbono. Em 2050, espera-se que o CCS tenha um papel insignificante no setor de energia, pois os custos serão altos em comparação com outras alternativas livres de emissões. No entanto, espera-se que desempenhe um papel na redução das emissões da indústria.

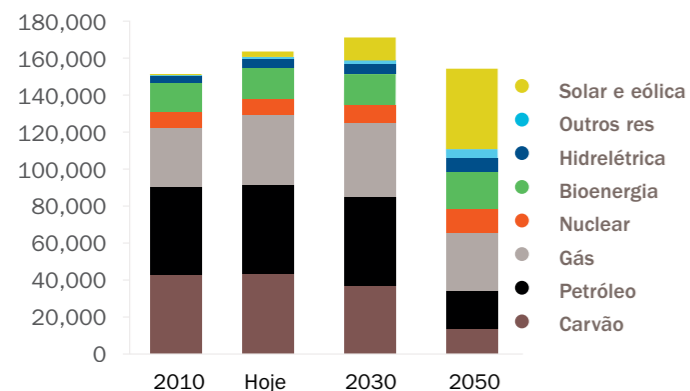
Em 2050, ainda teremos quatro por cento de carvão inabalável e oito por cento de gás fóssil no mix global de geração de energia e o gás fóssil continua sendo uma solução fundamental em muitos países, necessária para equilibrar a crescente participação de energias renováveis intermitentes até 2050. No entanto, as horas de funcionamento da energia a gás são substancialmente reduzidas.

A geração de energia nuclear está passando por um renascimento em alguns países, como Japão, França e Coreia do Sul.⁴² O aumento dos preços dos combustíveis fósseis, juntamente com a segurança nacional e as preocupações climáticas, voltou a colocar os holofotes na energia nuclear. No entanto, muitos projetos nucleares foram atormentados por custos excessivos e start-ups adiados nas últimas décadas e atualmente enfrentam uma escassez de pessoal qualificado. No Low Emissions Scenario, acabamos com mais energia nuclear no mix, um aumento de 60% em 2050 em relação a hoje, impulsionado principalmente pelo crescimento na Ásia.

Os altos preços do gás e as preocupações com a segurança do abastecimento na Europa tornaram o carvão mais aceitável no curto prazo.



9 Demanda de energia primária por fonte de energia 2010-2050 no Low Emissions Scenario. A demanda de energia primária é menor em 2050 como hoje, com mais energia renovável no mix (TWh)



Precisaremos de menos energia primária em 2050 do que hoje

Pela primeira vez, nossas análises mostram menor demanda de energia primária em 2050 em relação a hoje, mesmo com crescimento significativo da economia e da população mundial. A matriz energética é significativamente diferente, com mais energias renováveis e menos emissões.

A energia primária refere-se à energia total necessária, incluindo perdas de transformação e distribuição ao converter em eletricidade, derivados de petróleo e outras formas de energias úteis que podem ser usadas nos setores de uso final.

Em 2050, a tendência atual de dissociar crescimento econômico e energia continuará. Isso significa que o mundo precisará de menos energia primária para fornecer o mesmo valor em comparação com hoje. Esse

desacoplamento acontece em três níveis:

Eletrificação:

O uso direto de eletricidade requer menos energia em comparação com a queima de combustíveis fósseis na maioria dos casos, o que significa que você precisará de menos energia para produzir o mesmo serviço, trabalho ou calor.

Eficiência energética:

Menos derramamento de energia, uso mais eficaz de materiais e reciclagem, e mudanças comportamentais em todos os setores.

Crescimento menos intenso em energia:

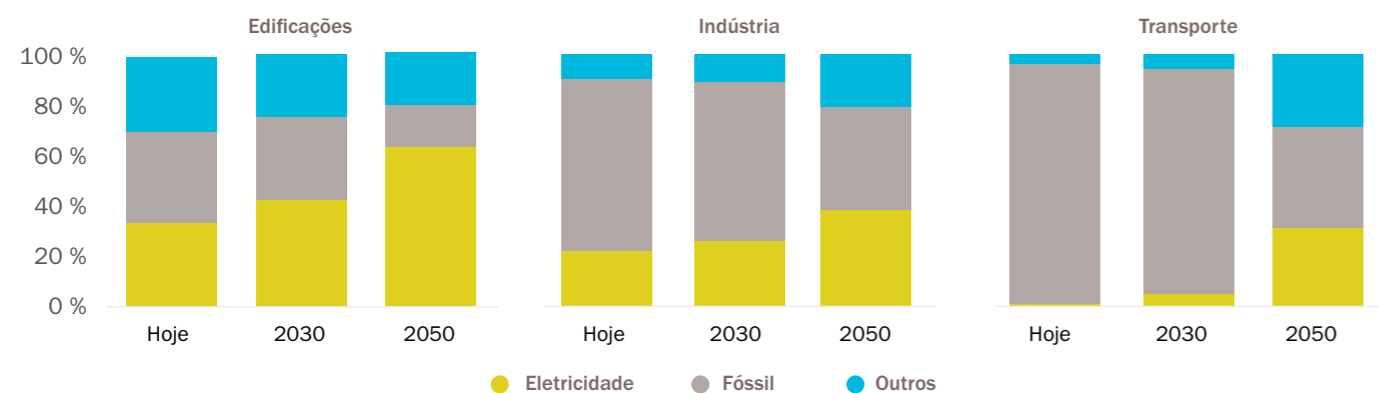
À medida que a economia mundial se torna mais desenvolvida, o crescimento econômico será mais

impulsionado pelo setor de serviços menos intensivo em energia. Além disso, a energia gerada a partir de fontes renováveis requer menos energia primária em comparação com a energia gerada a partir de carvão e gás.¹ Em suma, isso faz com que a demanda de energia primária seja um pouco menor em 2050 com uma matriz energética diferente e menos emissões, em comparação a hoje, mesmo com um crescimento significativo da economia e da população mundial (Fig.9).

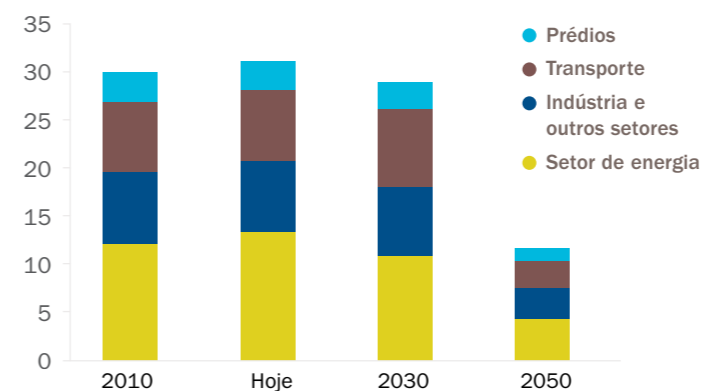
¹ O Low Emissions Scenario usa o método de cálculo da IEA. Nos cálculos de energia primária, as perdas zero são, portanto, assumidas para energia renovável. Com um método alternativo que assume aproximadamente a mesma perda para a produção de energia fóssil e renovável (38%), os combustíveis fósseis cobrirão cerca de 30% da energia primária em 2050, em vez de quase 50%.

No entanto, a quantidade absoluta de combustíveis fósseis permanecerá inalterada, independentemente do método de cálculo.

10 Parcela de eletricidade e combustíveis fósseis em edificações, indústria e transportes (%)



11 Emissões globais de CO2 relacionadas à energia por setor (Gt CO2)



Eletrificação reduz emissões e economiza energia

Eficiência energética, eletricidade, hidrogênio limpo e bioenergia reduzem as emissões e a dependência de combustíveis fósseis nos setores de uso final. O uso direto da eletricidade combinado com a eficiência energética são considerados as formas mais rentáveis, sempre que possível. Como exemplo, as bombas de calor podem fornecer duas a cinco vezes mais calor do que a eletricidade que consomem, consequentemente reduzindo as emissões, energia e custos.

Tanto o transporte como a indústria dependem hoje fortemente de combustíveis fósseis (Fig.10). O petróleo é, de longe, o combustível mais preferido no transporte, e a indústria é intensiva em combustível fóssil. Embora os edifícios tenham uma parcela menor de fósseis, o setor de aquecimento depende fortemente do gás fóssil. Muitos países do mundo dependem da importação de combustíveis fósseis, portanto, a substituição de combustíveis fósseis por eletricidade é um passo importante no caminho para a independência energética, resultando em menor exposição aos preços voláteis dos combustíveis fósseis, além de reduzir as emissões.

No Low Emissions Scenario, as emissões são reduzidas em mais de 60% até 2050 (Fig.11). Eficiência energética, eletricidade, hidrogênio limpo e bioenergia são

meios para reduzir as emissões e a dependência de combustíveis fósseis nos setores de uso final. O uso direto da eletricidade junto com a eficiência energética são consideradas as formas mais econômicas de reduzir as emissões sempre que possível. A eletricidade é um transportador de energia eficiente, pois reduz as emissões, fornece flexibilidade ao sistema de energia e melhora a qualidade do ar.

Descarbonizar o setor de edificações com bombas de calor e uma utilização mais eficiente da energia

Dez por cento das emissões globais de CO2 relacionadas à energia são devidas ao uso de combustíveis fósseis no aquecimento e cozimento em edifícios.⁴³ O gás fóssil é amplamente utilizado para aquecimento de ambientes, água quente e cozimento em muitas partes do mundo. Em algumas partes, óleo e até carvão também são usados. A biomassa tradicional é normalmente usada em países mais pobres (por exemplo, queima de madeira ou cozimento em fogo aberto).

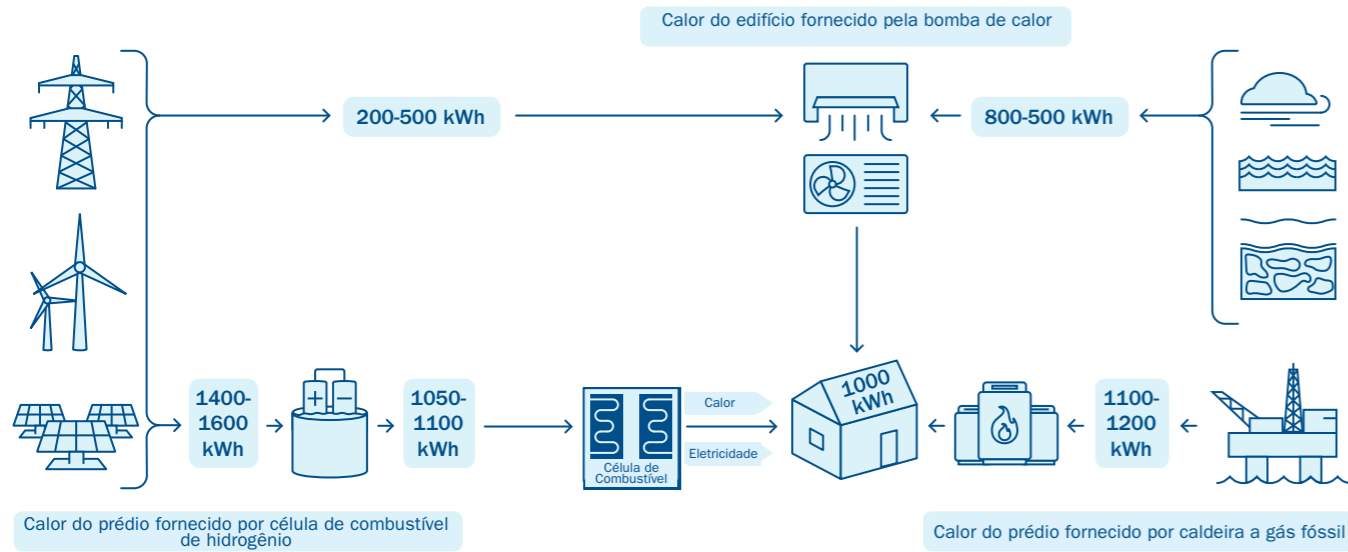
A energia para aquecimento é a principal fonte de emissões no setor de edificações. Para descarbonizar o aquecimento, a eletricidade pode ser usada diretamente para gerar calor

através de aquecedores elétricos ou caldeiras, ou através de bombas de calor, substituindo assim os combustíveis fósseis. A eficiência energética nos edifícios, quer no isolamento da massa do edifício, quer nos aparelhos elétricos, quer na utilização de bombas de calor, é uma contribuição importante e rentável para a redução das emissões de gases com efeito estufa.

BOMBAS DE CALOR SÃO UMA FERRAMENTA EFICIENTE PARA CORTE DE EMISSÕES E USO DE GÁS FÓSSIL EM EDIFÍCIOS

As bombas de calor são muito eficientes devido à sua capacidade de extrair calor do ar, da água ou do solo, fornecendo mais calor em geral do que através da eletricidade direta. Dependendo do conteúdo de calor no ambiente, as bombas de calor podem fornecer duas a cinco vezes mais calor do que a eletricidade que consomem, reduzindo ambas as emissões, energia, e consequentemente, os custos.(Fig.12) Os grandes ganhos de energia e cortes de emissões combinados com os atuais altos preços da energia estão levando a uma revolução na bomba de calor na Europa. O setor de edificações representa um terço do gás utilizado na UE e as bombas de calor são uma ferramenta importante no plano REPowerEU para reduzir a dependência do gás russo.⁴⁴

12 Ilustração da energia necessária para fornecer 1000 kWh de calor com base em hidrogênio, bombas de calor e caldeiras a gás fóssil.



↓ A eficiência energética nos edifícios, tanto no isolamento da massa do edifício, nos eletrodomésticos como na utilização de bombas de calor, é uma contribuição importante e rentável para a redução das emissões de gases com efeito de estufa.

CHAVE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA REDUÇÕES DE EMISSÕES NO SETOR DE EDIFICAÇÕES

Os investimentos em medidas de eficiência energética em edifícios aumentando. Os investimentos cresceram mais de 11% na Europa em 2020 para cerca de US\$ 184 bilhões, principalmente devido ao apoio governamental da UE.⁴⁵ No entanto, o montante de investimento necessário globalmente é muito maior. Só a meta de renovação da UE exige 275 mil milhões de euros em apoio extra a cada ano, de acordo com o Green Finance Institute.⁴⁶ O investimento suficiente na modernização da massa de edificações precisará de apoio do governo, bem como códigos e padrões atualizados. No entanto, isso não elimina a necessidade de grandes mudanças comportamentais no setor de construção em relação a quando e quanta energia é usada.

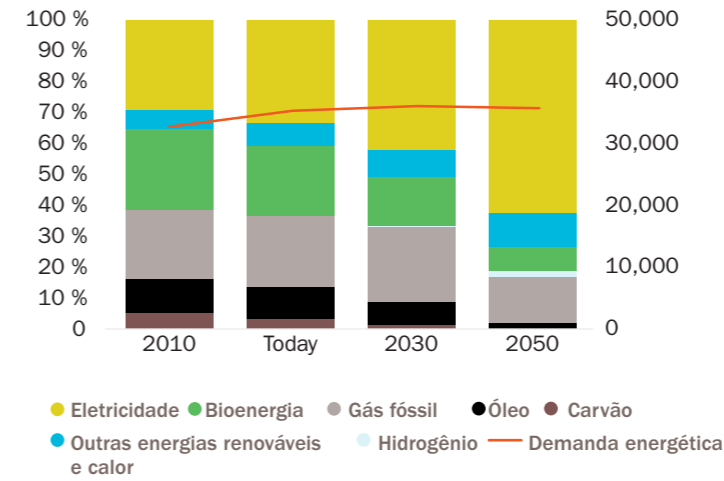
O LOW EMISSIONS SCENARIO CORTA EMISSÕES COM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ELETRIFICAÇÃO

Apesar do crescimento econômico, da maior urbanização e do maior acesso à energia, a utilização cada vez mais eficiente da energia resulta num nível de procura energética constante nos edifícios ao longo do período até 2050. A procura de eletricidade do setor de edificações quase duplica no mesmo período, substituindo o carvão, o gás, óleo e uso de biomassa tradicional (Fig. 13). Isso resulta em um declínio nas emissões de CO2 de 55% de hoje até 2050, enquanto a participação da eletricidade na demanda final de energia aumenta de 33 para 63%.

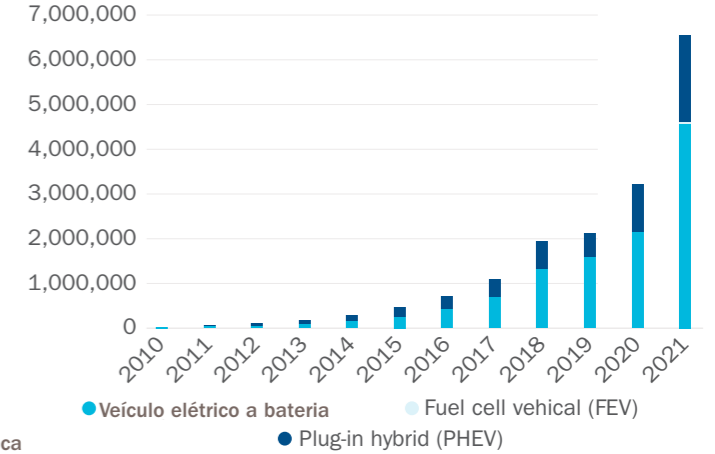


O hidrogênio limpo é uma medida de descarbonização menos eficiente em edifícios, e espera-se que a absorção seja limitada. No entanto, o hidrogênio limpo pode ser uma solução de nicho em áreas onde a infraestrutura da rede é fraca ou onde a infraestrutura de gás existente pode ser reutilizada para hidrogênio.

13 Demanda global de energia para edifícios por transportador de energia (%) e demanda total de energia (TWh)



14 Vendas globais anuais históricas de carros elétricos (veículos)⁵⁰

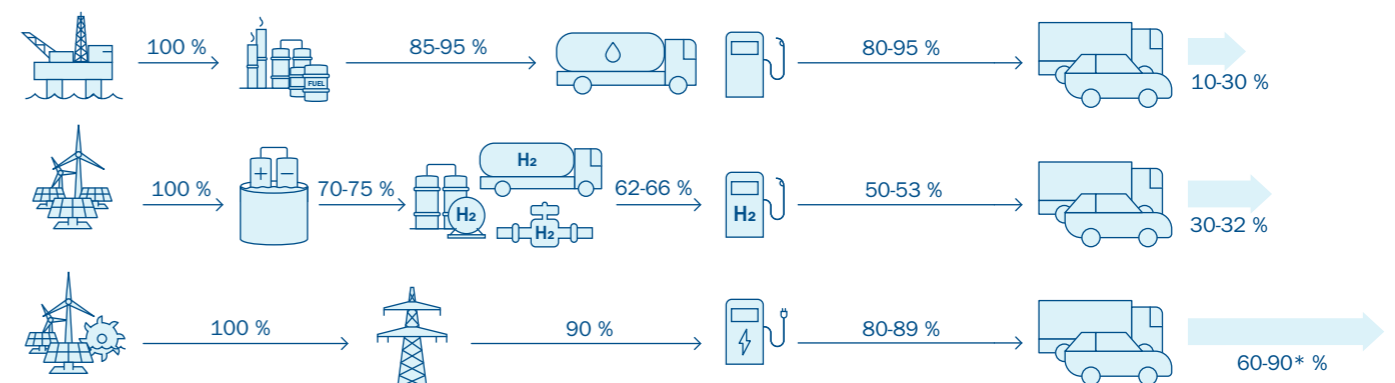


Descarbonizar o setor dos transportes com eletricidade e hidrogênio

Atualmente, o transporte é responsável por aproximadamente 20% das emissões globais de CO2 relacionadas à energia, sendo o transporte rodoviário responsável por cerca de três quartos das emissões de transporte. As emissões de transporte restantes são de transporte marítimo, aviação e ferrovia. Mais da metade das emissões do transporte rodoviário são provenientes de veículos leves de passageiros.⁴⁷ Esperamos uma aceitação acelerada de carros elétricos de passageiros em todo o mundo, resultando em carros de passeio se tornando predominantemente livres de emissões até 2050.

SINAIS POSITIVOS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS APESAR DA PANDEMIA E GUERRA

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

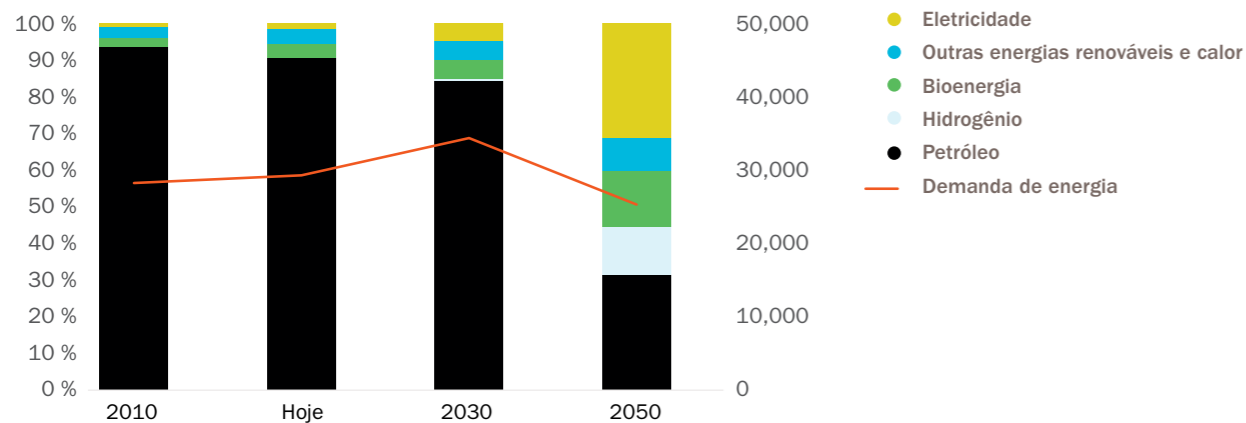


*extremidade inferior é sem modo de recuperação nos carros elétricos

As cadeias de suprimentos interrompidas pela pandemia global de COVID-19 e a guerra na Ucrânia impactaram significativamente a indústria automobilística. No entanto, ainda existem vários sinais positivos para o crescimento futuro das vendas de veículos elétricos (VE). Em 2021, os gastos públicos com subsídios e incentivos econômicos quase dobraram em relação a 2020. Muitas montadoras têm metas ambiciosas para implementações de VEs, e o número de modelos de VEs disponíveis aumentou cinco vezes desde 2015.⁴⁸ Em 2021, os novos carros elétricos mais que dobraram em relação ao ano anterior, resultando em 6,5 milhões de novos carros elétricos nas estradas (Fig.14). Carros elétricos representaram 9% das vendas globais de carros em 2021. A China está na liderança, triplicando suas vendas de carros elétricos e respondendo por mais de 50% das

vendas globais, seguida pela Europa e América do Norte. A maior parte das vendas de carros elétricos no ano passado foi na Noruega, com 72%, e na Suécia e Holanda, com 45 e 30%, respectivamente. As vendas globais de carros elétricos continuaram a crescer nos dois primeiros trimestres de 2022, mais de 60% em comparação com o ano anterior.⁴⁹ No Low Emissions Scenario, espera-se que os custos dos carros elétricos continuem caindo, apesar dos problemas atuais da cadeia de suprimentos para matérias-primas em baterias. Com o declínio contínuo dos custos das baterias, esperamos que os veículos elétricos movidos a bateria atinjam a paridade de custos nos próximos anos, com alguma variação entre regiões, tipos e modelos de carros. Espera-se que isso acelere ainda mais as vendas de veículos elétricos.⁵¹

16 Demanda global de energia do setor de transporte por transportador de energia (%) e demanda total de energia (TWh)



CORTE DE EMISSÕES E DEPENDÊNCIA DE PETRÓLEO NO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

De acordo com o Low Emissions Scenario, a frota global de veículos de passageiros será totalmente elétrica em 2050, com alguns carros movidos a hidrogênio com células de combustível em aplicações de nicho. Como um carro elétrico usa apenas cerca de um terço da energia de um motor de combustão interna tradicional (Fig. 15), os carros elétricos deslocam cerca de 20 milhões de barris por dia de demanda de petróleo até 2050. Para referência, a demanda global total de petróleo é de cerca de 97 milhões de barris por dia, com o transporte respondendo por cerca de 60% dessa demanda.

HIDROGÊNIO NECESSÁRIO EM TRANSPORTE RODOVIÁRIO PESADO, TRANSPORTE E AVIAÇÃO

No entanto, o óleo não é usado apenas em carros de passeio. Também é usado no transporte rodoviário pesado, na navegação e na aviação, que combinados são responsáveis por mais de 40 por cento das emissões de CO2 do transporte hoje.⁵² O transporte rodoviário pesado pode mudar para veículos elétricos a bateria para distâncias mais curtas e áreas urbanas. Mas as baterias não fornecerão alcance suficiente para o transporte rodoviário de longa distância, quando será necessário hidrogênio limpo ou biocombustível. No Low Emissions Scenario, metade

dos novos caminhões será livre de emissões em 2050, enquanto a parcela restante deverá ser uma mistura de caminhões movidos a combustível híbrido, misturas biológicas e algum gás fóssil.

O hidrogênio limpo também será importante para reduzir as emissões na aviação e no transporte marítimo, provavelmente na forma de amônia limpa ou e-combustíveis. No Low Emissions Scenario, esperamos que o setor marítimo se descarbonize pela troca de combustível de óleo combustível pesado por GNL, biocombustíveis, eletricidade, amônia limpa e e-combustíveis combinados com medidas operacionais e de eficiência. A amônia provavelmente se tornará uma solução fundamental para o frete marítimo de longa distância até 2050, enquanto os e-combustíveis, como o e-metanol, desempenham um papel fundamental na aviação. Tanto para o setor de transporte marítimo quanto para o setor de aviação, rotas locais e regionais mais curtas podem ser eletrificadas.

A ELETRIFICAÇÃO REDUZ EMISSÕES E USO DE ENERGIA NO TRANSPORTE

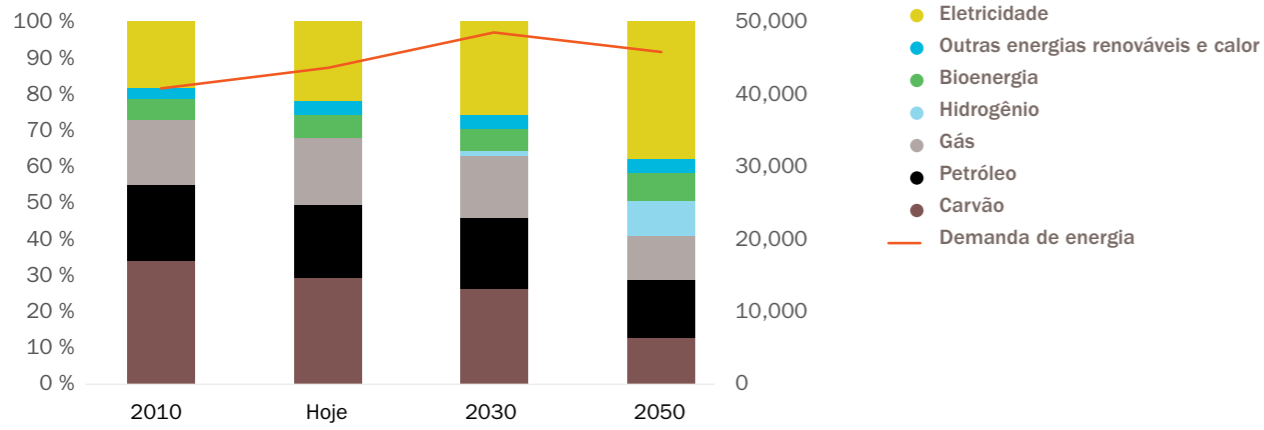
Até 2050, as emissões do setor de transporte serão reduzidas em cerca de 63% em relação a hoje, enquanto a participação da eletricidade na energia final aumenta de 1% para 31% no Low Emissions Scenario (Fig.16). Todos os segmentos de transporte se tornarão mais eficientes. Menos

energia será exigida para transportar os mesmos bens e pessoas, enquanto a demanda subjacente por mobilidade deverá crescer. Os veículos de passageiros, incluindo os menores de 2/3 rodas, serão predominantemente elétricos e livres de emissões, e as emissões restantes virão do transporte de longa distância entre países e continentes.



Em 2021, os novos carros elétricos mais que dobraram em relação ao ano anterior, resultando em 6,5 milhões de novos carros elétricos nas estradas.

17 Demanda global de energia do setor industrial por transportador de energia (%) e demanda total de energia (TWh)



Decarbonização o setor industrial

O setor industrial é intensivo em energia e emissões e é responsável por cerca de 24% das emissões, relacionadas à energia globalmente.^{i,53} Partes do setor industrial estão desafiando a descarbonização por meio do uso direto de eletricidade e são consideradas difíceis de reduzir. No setor industrial, a parte de difícil abatimento são principalmente processos industriais pesados que demandam calor acima de 500°C, como os setores de cimento, ferro e aço e químico.

Hidrogênio limpo, bioenergia e CCS, além de eficiência energética e de materiais, são necessários para reduzir as emissões nos setores difíceis de reduzir, enquanto as tecnologias para processos eletrificantes de alto calor estão apenas em fase de desenvolvimento.

USO DIRETO DE ELETRICIDADE PARA CALOR DE BAIXA TEMPERATURA

Cerca de metade do calor utilizado na indústria pode ser classificado como de baixa temperatura (abaixo de 200°C). Nesses casos, existe uma variedade de opções de descarbonização. Bombas de calor e caldeiras elétricas podem substituir processos térmicos comuns em muitas indústrias. Este equipamento pode ser adaptado a máquinas existentes e sistemas híbridos podem ser instalados.

A eletrificação usando bombas de calor sempre que possível também melhorará a eficiência.

RECICLAGEM E USO MAIS EFICIENTE DE MATERIAIS E ENERGIA

Em geral, os ganhos de eficiência de materiais e energia são as formas mais econômicas de reduzir as emissões relacionadas à energia e o consumo de energia na indústria. Extensões de vida útil de edifícios, design aprimorado e técnicas de fabricação, juntamente com peso leveⁱⁱ estão entre outras medidas importantes.

A reciclagem está bem estabelecida em metais, plástico, vidro e papel. O plástico reciclado economiza de 50 a 60% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com a produção normal de plástico. Para o aço reciclado produzido usando fornos elétricos a arco, todo o processo usa apenas 20-25 por cento da energia usada para produzir aço primário. Se a eletricidade usada para o forno for renovável, poderia ser praticamente livre de emissões.

HIDROGÊNIO, CCUS E BIO SUSTENTÁVEL PARA SETORES DIFÍCEIS DE ABATER

Para a produção de ferro e aço, a substituição de carvão e gás fóssil por hidrogênio livre de emissões pode levar a um processo mais eficiente e reduzir as emissões relacionadas à energia e ao processo ao mesmo tempo. Para o cimento,

uma possibilidade é mudar do carvão para a bioenergia sustentável ou usar o CCUS (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono) para reduzir as emissões. O CCS junto com a bio sustentável resultará em emissões negativas, um requisito para atingir o net zero. Para a indústria química, o uso de hidrogênio limpo para a produção de amônia pode substituir o hidrogênio fóssil em uso hoje, estimulando assim as cadeias de valor de amônia limpa para também alimentar o setor de transporte no futuro.

SÃO NECESSÁRIAS NUMEROSAS TECNOLOGIAS PARA CORTAR EMISSÕES NA INDÚSTRIA

No Low Emissions Scenario, o consumo de energia no setor industrial está caindo após 2030, apesar do crescimento econômico subjacente (Fig. 17). Isso é resultado de ganhos de eficiência energética, uso mais eficiente de materiais e alta participação de reciclagem. Combinado com eletrificação, hidrogênio livre de emissões e alguns CCUS, há uma redução nas emissões relacionadas à energia da indústria de 55% até 2050 em relação a hoje.

A eletrificação da indústria levará tempo globalmente, e o Low Emissions Scenario pressupõe uma eletrificação gradual até 2050. Até 2050, 38% da demanda global de energia da indústria será atendida pelo uso direto de eletricidade.



← No setor industrial, a parte de difícil abatimento são principalmente processos industriais pesados que demandam calor acima de 500 °C, como os setores de cimento, ferro, aço e químico.

O hidrogênio limpo também será uma ferramenta importante para descarbonizar a indústria, cerca de 10% da demanda de energia atendida pelo hidrogênio livre de emissões até 2050. Isso substituirá o gás e o carvão para matérias-primas químicas, produção de aço e outro calor de alta temperatura. O tempo é importante para as tecnologias limpas, pois as plantas industriais que estão sendo construídas hoje correm o risco de bloquear as emissões pelos próximos 40 anos.

No Low Emissions Scenario, a dinâmica entre políticas climáticas e energéticas, mercados e custos de tecnologia estão impulsionando a descarbonização nos setores de edificações, transporte, indústria e energia. Atualmente, a segurança energética subiu na agenda política em todo o mundo e desempenhará um papel fundamental daqui para frente. O papel da segurança energética na condução da transição é discutido no próximo capítulo, onde também analisamos a Europa e o plano REPowerEU com mais detalhes.

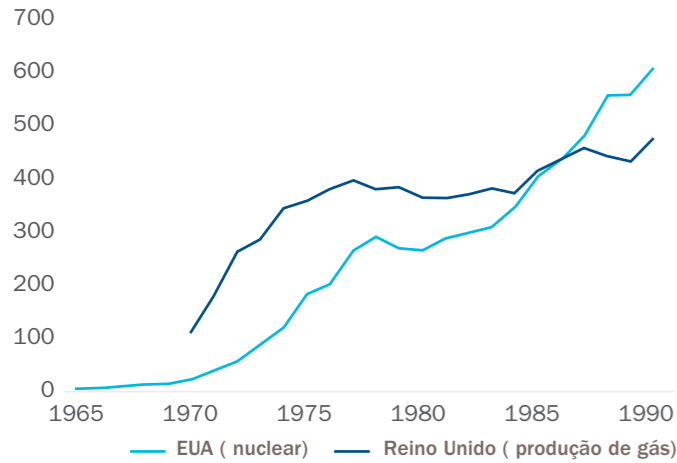
ⁱ Isso inclui emissões da combustão e produção de calor para processos industriais. As emissões incluem emissões da produção de ferro e aço, indústria química e petroquímica, cimento e indústria de papel e celulose.

ⁱⁱ Reduzir o peso de carros e caminhões para reduzir o material necessário.

↓ A reciclagem está bem estabelecida em metais, plástico, vidro e papel. O plástico reciclado economiza de 50 a 60% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com a produção normal de plástico.



2022



As políticas de segurança energética impulsionam a transição energética

A segurança energética sempre teve um papel fundamental na política energética. Com a atual crise energética e a guerra na Ucrânia, a segurança energética voltou a subir na agenda política em todo o mundo. Na Europa, isso se materializou no plano REPowerEU, que inclui as ambições duplas de se tornar 100% independente do gás fóssil russo e atingir a meta climática de 55% até 2030.

A segurança energética tem um papel importante na política energética, e as crises energéticas anteriores foram um dos principais impulsionadores da formação do mundo energético que vemos hoje. Em resposta à crise energética global da década de 1970, muitos países fizeram grandes mudanças em seus investimentos em energia (Fig. 18).⁵⁵ A implantação da energia nuclear foi acelerada e os EUA investiram em quase todas as fontes de energia imagináveis - desde carvão, produção nuclear e não convencional de petróleo e gás até painéis solares, turbinas eólicas e tecnologias de eficiência energética. O Reino Unido quebrou sua dependência do carvão fazendo grandes investimentos em gás do Mar do Norte. Da mesma forma, uma crise energética da magnitude de hoje pode mais uma vez desencadear uma poderosa mudança nos sistemas de energia globalmente para recursos renováveis de baixo custo que estão prontamente disponíveis.

Uma mudança muito poderosa pode ocorrer na Europa com o plano REPowerEU, lançado em maio de 2022. O plano é uma resposta de emergência à invasão russa da Ucrânia

e aos preços elevados do gás. Baseia-se no Pacto Verde da UE e no pacote legislativo “Fit for 55” que fornece a estratégia e o quadro para alcançar as metas climáticas de 2030 e 2050. Isto em si é uma enorme transformação dos sistemas energéticos europeus.⁵⁶ O Plano REPowerEU é um plano de emergência para reduzir rapidamente a dependência da Europa das importações de gás russo, diversificando a oferta e acelerando a eficiência energética, eletrificação, hidrogênio e implantação de energias renováveis. Isso serve tanto para a segurança energética quanto para as metas climáticas.

O plano REPowerEU é seguido por várias iniciativas dos Estados-Membros. A França aumentou suas ambições de expansão nuclear para reduzir sua dependência da energia russa. A Alemanha deu uma reviravolta política, suspendendo o novo gasoduto entre a Rússia e a Alemanha (Nord Stream 2) e, em vez disso, construindo quatro unidades flutuantes de regaseificação (FSRU) para importar GNL e diversificar seu mix de fornecimento de gás. A Alemanha também planeja se tornar 100% renovável até 2035 no setor de energia, com a participação de energia eólica e solar chegando a 80% até 2030. O ministro das Finanças alemão, Christian Lindner, referiu-se às fontes de eletricidade renováveis como “a energia da liberdade”.⁵⁷

⁵⁴ 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 emissões da UE (ETS), metas de redução de emissões de estatísticas membros para setores não-ETS, setor de transporte, eficiência energética, energia renovável, emissões do uso da terra, um fundo social climático, tributação de energia e um Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono (CBAM).



REPowerEU – possíveis caminhos europeus para reduzir a dependência do gás russo até 2030



A Comissão Europeia lançou o plano REPowerEU apenas algumas semanas depois que as forças russas entraram na Ucrânia em fevereiro de 2022. Aqui analisamos diferentes caminhos para a UE se afastar do gás fóssil russo antes de 2030. Todos os cenários mostram um rápido aumento de energia solar e eólica e maior participação no uso de eletricidade na indústria, edifícios e transporte em comparação com as expectativas do pré-guerra. Além disso, a importação de gás fóssil de outros países e a demanda por carvão aumentam em comparação com um cenário pré-guerra. A ambição de atingir dez milhões de toneladas de hidrogênio verde doméstico em oito anos parece extremamente desafiadora e exigirá um impulso e apoio político significativo, de acordo com nossas análises.

A invasão russa da Ucrânia resultou em altos preços dos combustíveis fósseis e na ameaça de escassez e racionamento de energia. Isso levou a um impulso político na Europa por meio do plano REPowerEU, para acelerar a transição energética e reduzir a dependência da energia russa. Para esclarecer como a Europa pode se afastar totalmente da dependência russa de gás fóssil, analisamos vários caminhos possíveis para 2030. Esses caminhos são então comparados com o status atual, com as expectativas do pré-guerra e com as metas propostas do REPowerEU, conforme delineado pela Comissão Europeia.⁵⁸

O plano REPowerEU visa aumentar a segurança do abastecimento da UE, concentrando-se nos seguintes três pilares:

- **Diversificando os suprimentos de gás**

Isso inclui aumentar as importações de gasodutos de fornecedores não russos (por exemplo, Azerbaijão e Noruega), aumentar as importações de GNL, compra conjunta de gás, um plano de ação para biometano e aumentar a meta de hidrogênio.

- **Lançamento acelerado de energia renovável**

O aumento maciço e a aceleração da energia renovável na produção de energia, indústria, edifícios e transporte. Isso inclui um enorme

lançamento de energia solar fotovoltaica, com foco em painéis solares montados em edifícios. As áreas de entrada de energia renovável para um ou mais tipos de fontes de energia renovável estão planejadas para acelerar o processo de concessão de licenças. A UE propõe aumentar a meta de energias renováveis para 2030 de 40 para 45 por cento.

- **Economia de energia**

Com foco em mudanças comportamentais, melhorias de eficiência energética e eletrificação de edifícios (com bombas de calor), transportes e indústria. Propõe-se que a meta de 2030 para a eficiência energética aumente de 9% para 13%.⁵⁹

Em 2021, as importações de gás fóssil da Rússia foram de 155 bcm, cobrindo cerca de 40% da demanda anual de gás da UE. As importações variam ao longo do tempo e chegaram a 195 bcm em 2019.⁶⁰ Além disso, a produção doméstica de gás da UE está diminuindo, aumentando assim a necessidade de importações. Comparado com o Green Deal e o pacote “Fit for 55” apresentado pela Comissão Europeia, o REPowerEU visa ir mais rápido e mais longe com projetos de energia limpa. No entanto, é muito difícil eliminar importações de gás russo durante a noite.

O plano REPowerEU é, portanto, dividido em medidas de curto, médio e longo prazo.

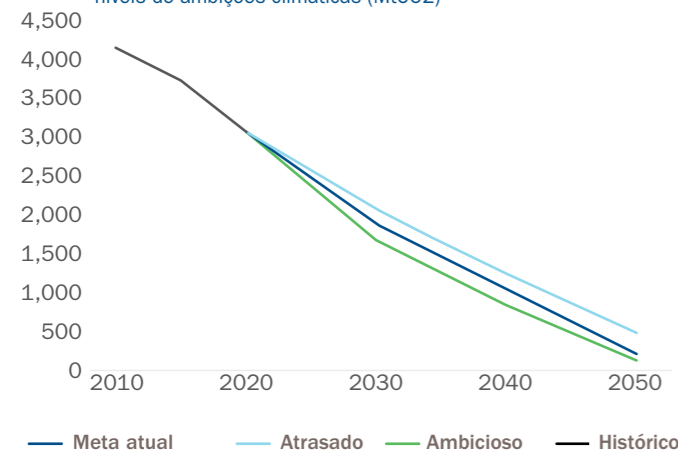
Curto-prazo: As medidas começarão imediatamente e se concentrarão na diversificação do gás e nas ações do lado da demanda: aumento das importações de GNL e oleodutos não russos, energia de carvão e extensão nuclear, troca de combustível e eficiência energética (bombas de calor e economia de desligamento do aquecimento). Redução da indústria, se necessário.

Médio-prazo: As medidas cobrem o período até 2027 e incluem investimentos em novas infraestruturas, como GNL, gasodutos, desenvolvimento de rede e reforços. Eletrificação com grandes adições fotovoltaicas e eólicas e uso de biomassa para produção de energia, armazenamento de baterias, eficiência energética, ainda mais bombas de calor, produção e uso de biometano sustentável.

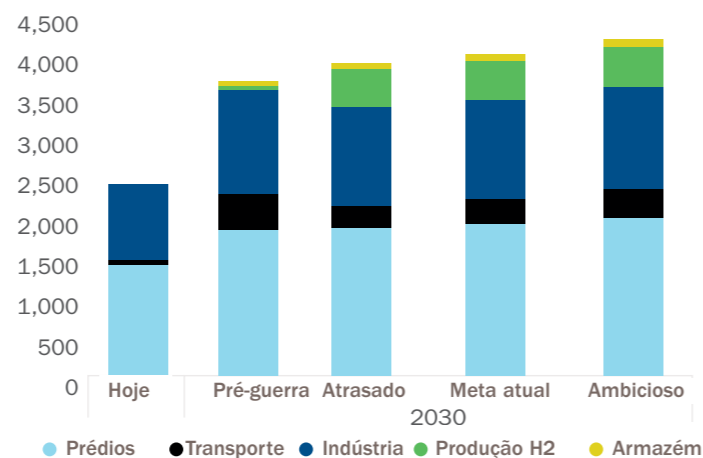
Longo-prazo: Cadeias de valor de hidrogênio com sistemas de produção e distribuição de hidrogênio renovável.

ⁱ bcm = Bilhões de metros cúbicos de gás natural. Bcm é uma unidade de energia, frequentemente utilizada em relação à produção e distribuição de gás natural e equivale a 10,47 TWh incluindo as importações de GNL.

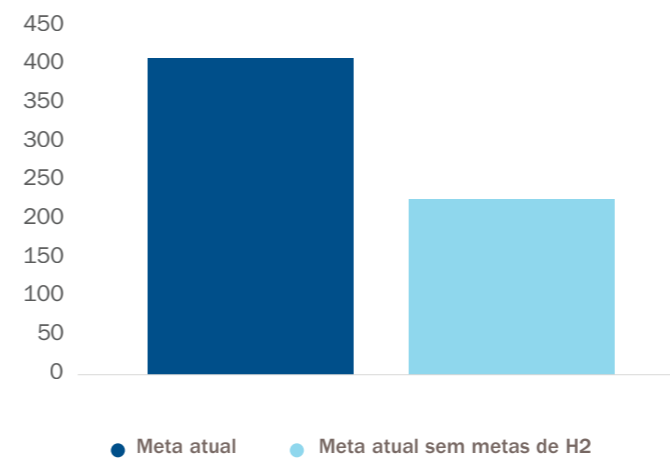
19 Emissões históricas de CO2 da combustão de combustíveis fósseis para UE27, Noruega, Suíça e Balcãs (2010 – 2020), juntamente com caminhos de emissão que mostram diferentes níveis de ambições climáticas (MtCO2)



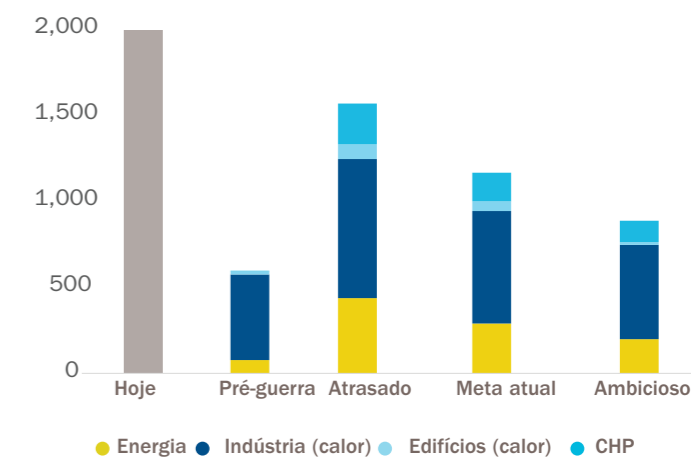
20 Uso de eletricidade (em TWh) por setor para cada cenário comparado aos valores atuais



21 O uso de hidrogênio para energia no cenário-alvo atual com e sem restrições de hidrogênio (TWh). O uso de hidrogênio para matérias-primas não está incluído



22 Demanda total de carvão em 2030 (TWh)



Diferentes caminhos climáticos para 2050 – cenários para as ambições do REPowerEU

As medidas REPowerEU são baseadas na meta da UE para 2030 de reduzir as emissões em 55% em comparação com o nível de 1990 e atingir net zero em 2050. Para entender melhor as diferentes soluções para a transição energética europeia entre os setores, analisamos três caminhos diferentes de emissões: i) uma meta de redução de emissões de 55% em 2030 ('Meta atual'), ii) 60% de redução de emissões em 2030 ('Ambicioso') e iii) uma meta atrasada com 50% de redução de emissões em 2030 ('Atrasado') (Fig.19).ⁱ

Ao longo desses três caminhos de emissões, adicionamos as ambições da REPowerEU de se tornar totalmente independente das importações russas de gás fóssil antes de 2030.⁶¹ Além disso, analisamos um cenário econômico do pré-guerra para reduzir as emissões em 55%, sem quaisquer metas de redução de gás fóssil ('pré-guerra'). Com isso em mente, modelamos e analisamos quatro cenários (Pré-guerra, Alvo atual, Ambicioso e Atrasado) e, em seguida, comparamos os resultados com os alvos propostos no REPowerEU, conforme descrito pela Comissão Europeia ('REPowerEU').

A eletrificação reduz a demanda por gás fóssil

Nossas análises mostram que a mudança de combustíveis fósseis para uso direto de eletricidade ("eletrificação") é um fator chave para atingir a meta de redução de emissões de 2030, mas também a maneira mais econômica de reduzir a dependência do gás fóssil, juntamente com a eficiência energética. Para todos os cenários, significativamente mais eletricidade é usada em 2030 em comparação com hoje (entre 54% e 76% a mais) – reduzindo a demanda de gás nos diferentes setores de uso final. Para se tornar totalmente independente do gás russo, o maior aumento na demanda de eletricidade pode ser encontrado no setor industrial e no setor de edificações em comparação com hoje, principalmente devido ao aumento do uso de bombas de calor (Fig.20).

A meta de hidrogênio do REPowerEU precisa ser apoiada por políticas

Embora seja preferido o uso direto de eletricidade no setor de uso final, aumentar o uso de hidrogênio renovável é essencial para reduzir as emissões nos casos em que a eletrificação não é viável. Sem impulso político, é esperado que

o hidrogênio verde como solução climática comece a acelerar depois de 2030.

As novas metas para o hidrogênio verde no REPowerEU são ambiciosas com 10 milhões de toneladas (Mt) de produção doméstica e 10 Mt de importações (verde e azul) cobrindo uma demanda anual total de 20 Mt de hidrogênio já até 2030. Este é um aumento de quatro vezes em relação às ambições pré-guerra. A entrega no REPowerEU exigirá uma capacidade de eletrolisador doméstico entre 65 a 80 GW, onde o spread se deve ao número de horas de funcionamento assumidas para os eletrolisadores instalados. O restante precisa ser importado e pressupõe investimentos em hidrogênio azul e verde fora da UE, incluindo transporte.ⁱⁱ

Em nossa modelagem, o hidrogênio verde importado e produzido nacionalmente é usado principalmente para a indústria, substituindo o gás fóssil no aquecimento, como matéria-prima, substituindo o hidrogênio de base fóssil e diretamente nas caldeiras. O hidrogênio é, em certa medida, também usado para o setor de transporte, enquanto uma parcela insignificante vai para a produção de energia. Em nossa análise, limpar o hidrogênio substituirá o gás fóssil em vez do petróleo em todos os

cenários REPowerEU em comparação com o pré-guerra, mudando assim o uso de hidrogênio limpo do setor de transporte para o setor industrial. O hidrogênio geralmente é uma maneira menos eficiente de reduzir as emissões em comparação com o uso de eletricidade. Ao modelar um caminho europeu com ótima relação custo-benefício, a meta ambiciosa de 20 Mt para o hidrogênio da UE não é por si só ótima em termos de custos e, por conseguinte, não será alcançada sem uma vontade política e apoio significativos da UE.

Se compararmos o cenário de meta atual com e sem as ambiciosas metas de hidrogênio do REPowerEU, vemos uma diferença significativa no uso de hidrogênio (Fig. 21), especialmente para reduzir a demanda de gás na indústria. Com uma meta de hidrogênio mais ambiciosa – menos eletrificação é necessária em todos os setores. No entanto, no total, isso leva a uma maior demanda de energia e custos gerais mais altos, pois há perdas de eficiência na produção e uso de hidrogênio.

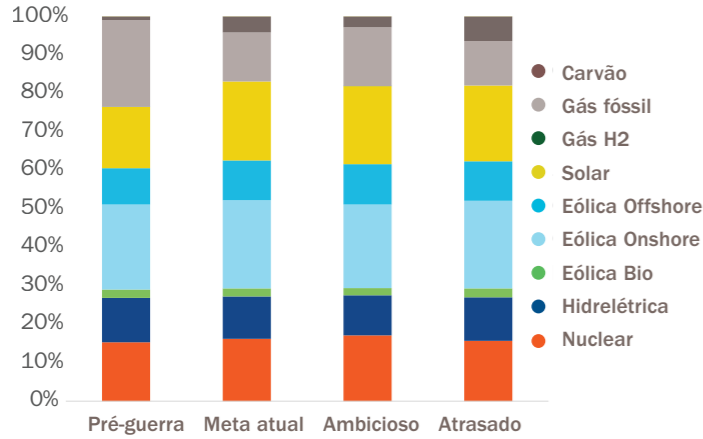
A eliminação de gás fóssil aumenta a demanda por carvão

As medidas REPower contribuirão para uma eliminação mais rápida do gás fóssil russo, mas terão um efeito

significativo no sistema energético europeu. No total, a demanda por carvão aumenta até 2030 em comparação com as premissas pré-guerra em todos os setores e em todos os cenários em nossa modelagem (Fig. 22).

A eletrificação projetada e a produção de hidrogênio renovável aumentam a demanda de energia entre 9% e 14% em comparação com o pré-guerra. Juntamente com o objetivo duplo de eliminar gradualmente o gás fóssil russo e reduzir as emissões, isso exigirá um grande aumento na capacidade de energia renovável. No entanto, com uma grande quantidade de capacidade renovável variável e menos gás fóssil disponível no mix, mais carvão é usado como provedor de flexibilidade no setor de energia até 2030 nos três cenários em comparação com o pré-guerra. Para atingir as metas climáticas, o uso de carvão aumenta a necessidade de capacidade renovável, eletrificação e hidrogênio para compensar o aumento das emissões do uso de carvão.

ⁱ Consulte o Anexo 3 para descrição do modelo



Aumento substancial das energias renováveis necessário em todos os cenários

A eliminação progressiva do gás russo, juntamente com o aumento do uso de energia de carvão, eletrificação e hidrogênio verde, aumentará substancialmente a capacidade de energia instalada e a participação renovável no setor de energia.

O plano REPowerEU tem um valor indicativo de 69% de energias renováveis como meta para 2030, o que representa um aumento significativo em relação aos 38% atuais. Isso é um pouco maior do que nossa análise, mostrando uma participação renovável de 61 a 67% nos quatro cenários, a participação mais baixa é o resultado das expectativas pré-guerra, enquanto cerca de dois terços da participação renovável são alcançados nos três cenários REPowerEU. Mesmo que a demanda total de energia e a capacidade renovável aumentem de acordo com metas climáticas mais altas, a participação de energia renovável no mix de geração de energia permanece bastante estável nos três cenários. É rentável reduzir as emissões de bombas de calor elétricas em edifícios a partir de energia a gás, em vez de usar gás para aquecimento. Além disso, a construção de nova capacidade renovável leva tempo e o gás fóssil ainda é necessário na UE em 2030 para equilibrar os sistemas de energia dominados por renováveis. A participação do carvão na energia aumenta de 2% a 5% em comparação com as expectativas pré-guerra. Em todos os casos, a energia solar fotovoltaica e a eólica terrestre tornam-se as duas fontes dominantes de geração de eletricidade. Há também um aumento substancial na capacidade eólica offshore. Consequentemente, as reduções de emissões no setor de energia são

impulsionadas predominantemente por essas tecnologias (Fig. 23). A energia hidrelétrica continua sendo a terceira maior tecnologia de geração de eletricidade renovável em todos os casos.

A energia solar fotovoltaica e as bombas de calor são as vencedoras

A meta REPowerEU indica uma triplicação da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica e eólica na UE até 2030. Nossas análises mostram que é necessário substancialmente mais energia solar em todos os nossos cenários em comparação com as expectativas do pré-guerra. Embora 2021 tenha sido um recorde histórico para a energia solar europeia, com uma adição de capacidade de cerca de 26 GW na UE, vemos um aumento anual de 45 a 52 GW de capacidade necessária até 2030, significativamente maior do que os 33 GW por ano esperados antes da guerra. Em comparação com outras tecnologias, é mais fácil aumentar rapidamente a capacidade solar fotovoltaica na Europa, uma vez que o tempo médio de desenvolvimento e construção é normalmente inferior a dois anos. Além disso, o mercado de energia solar fotovoltaica já possui uma cadeia de suprimentos global eficaz, embora fortemente dominado pela China. As metas anunciadas de REPower para energia eólica não são alcançadas em nossos cenários. Mesmo em nosso cenário ambicioso, atingimos apenas uma capacidade de energia eólica de cerca de 17% abaixo da meta da UE, já que a energia solar fotovoltaica é a preferida em nossa modelagem. Para atingir a capacidade de energia eólica desejada, os governos devem priorizar adições de capacidade e aumentar drasticamente os esforços de licenciamento.

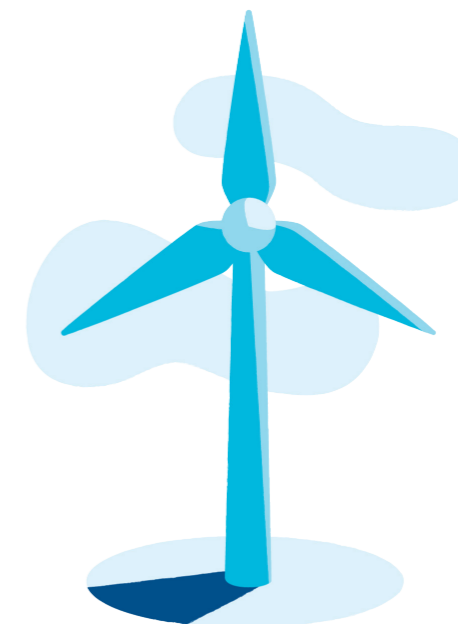
Aumento anual da capacidade até 2030	Meta indicativa REPower	Resultados de modelagem Statkraft	Ilustração
Energia solar (GW)	49 GW anuais de acréscimos de capacidade (levando a 600GW instalado em 2030)	33 a 52 GW capacidade anual de adições	<p>Solar – Meta RepowerEU</p>
Energia eólica (GW)	32 GW anuais de acréscimo de capacidade (levando a 510 GW em 2030)	18 a 26 GW capacidade anual de adições	<p>Energia Eólica – Meta RepowerEU</p>
Bombas de calor (milhões)	30 milhões de novas bombas de calor eletrônicas instaladas antes de 2030	20 a 42 milhões de novas bombas de calor eletrônicas instaladas em 2030	<p>Bombas de calor – Meta RepowerEU</p>

ⁱ Assumindo capacidade média de bomba de calor, De 11.9 kW.

Atualmente, a Europa é líder global no desenvolvimento de energia eólica offshore, e esta tecnologia representa uma grande oportunidade não só para reforçar a segurança do abastecimento, mas também para atingir metas climáticas ambiciosas, mantendo a liderança industrial e criando empregos.

Em muitas áreas, o custo da energia eólica onshore é menor do que as tecnologias de combustíveis fósseis concorrentes. Não são necessariamente os custos que limitam a expansão, mas sim as restrições relacionadas à aceitação local, uso da terra e permissões. O aumento dos preços da energia e a guerra na Ucrânia podem aumentar a aceitação local de tecnologias renováveis, especialmente em comparação com a dependência de regimes instáveis para o fornecimento de energia. No entanto, em muitos mercados europeus, a obtenção de uma licença de energia eólica onshore pode levar até sete anos, o que normalmente é a parte mais longa do processo de desenvolvimento. Simplificar os processos de licenciamento é uma das principais prioridades do plano REPowerEU.

A energia eólica offshore só pode ser aumentada se as cadeias de suprimentos forem fortalecidas e expandidas rapidamente. Além disso, normalmente leva cerca de seis a dez anos para desenvolver e construir um projeto eólico offshore, tornando-o menos adequado para escalar até 2030. Atualmente, a Europa é líder global no desenvolvimento de energia eólica offshore, e esta tecnologia representa uma grande oportunidade não só para reforçar a segurança do abastecimento, mas também para



atingir metas climáticas ambiciosas, mantendo a liderança industrial e criando empregos.

A bomba de calor é uma tecnologia eficiente para reduzir a demanda de gás no setor de construção e indústria e é uma prioridade fundamental no plano REPowerEU. A meta REPowerEU para edifícios é 50% maior do que o número ideal de bombas de calor no cenário pré-guerra em nossa modelagem. No entanto, em dois dos três cenários REPowerEU, acabamos com mais bombas de calor necessárias em comparação com a meta REPower para atingir o objetivo duplo de reduzir as emissões e o uso de gás fóssil. Além disso, com ambições climáticas mais altas, surge uma maior necessidade de bombas de calor nos edifícios. No cenário Ambicioso, a demanda de gás das caldeiras a gás é reduzida em 609 TWh em comparação com o pré-guerra, enquanto o calor produzido pelas bombas de calor aumenta em 524 TWh. Ao usar apenas 163 TWh de eletricidade para produzir esse calor, isso mostra o enorme potencial das bombas de calor para reduzir o uso de gás fóssil em edifícios, usando a eletricidade de forma mais eficiente.

A independência do gás russo é ambiciosa, mas ao alcance

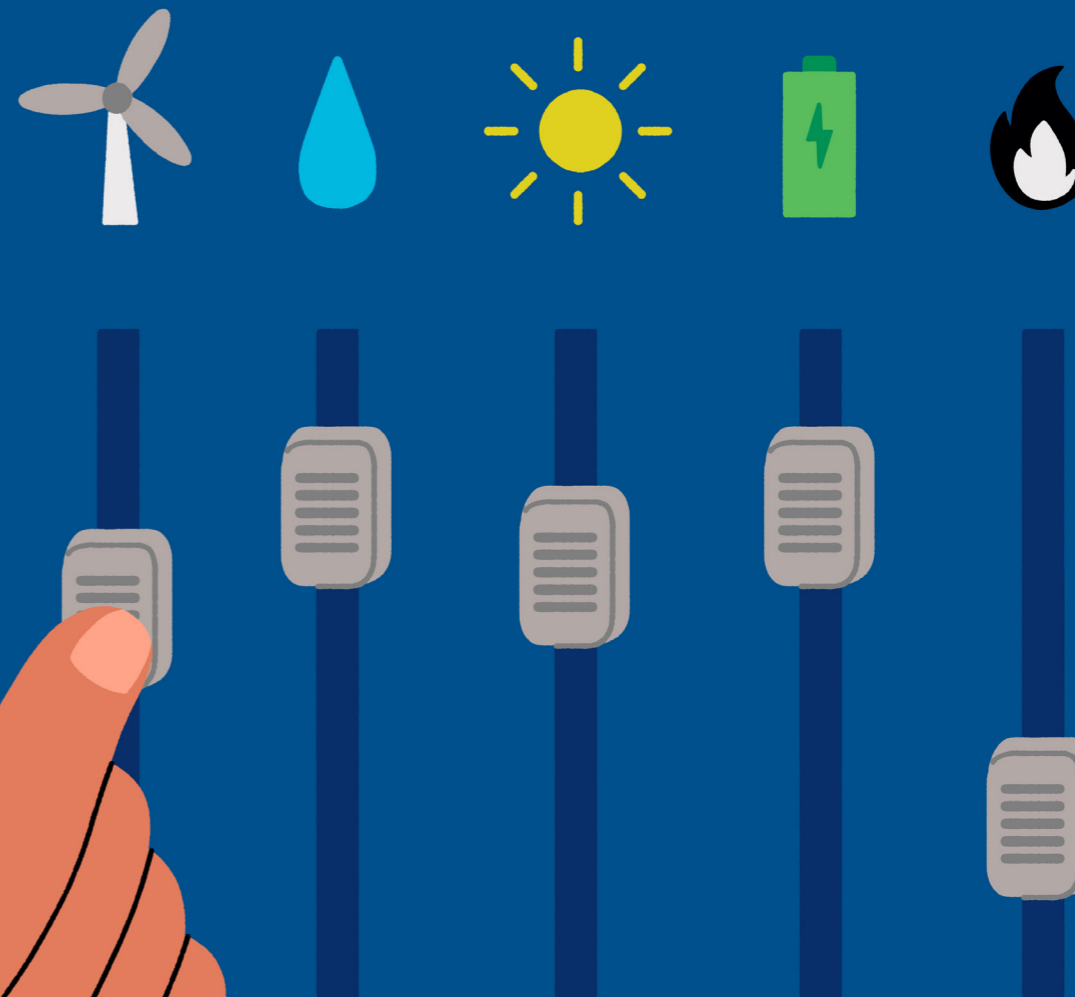
No geral, achamos que é viável,

embora desafiador, atingir as metas duplas da UE ser totalmente independente do gás russo até 2030, reduzindo as emissões em 55%.

Isso exigirá uma rápida construção de capacidade renovável, com energia solar fotovoltaica e eólica onshore como as maiores tecnologias de geração de eletricidade. A utilização direta de eletricidade na indústria, edifícios e transportes é a forma mais rentável de descarbonizar a utilização final, juntamente com a eficiência energética, enquanto a produção de hidrogênio renovável terá de ser forçada através de políticas e apoio para atingir os níveis previstos pela UE.

Deslocar o uso de gás fóssil da indústria será especialmente desafiador e exigirá a transferência de algum hidrogênio do transporte para a indústria, bem como o aumento da demanda de carvão. Em nossa análise, as metas climáticas ainda são alcançadas, pois o aumento da demanda por carvão é contrabalançado por mais eletricidade e hidrogênio limpo nos setores de uso final e renováveis no setor de energia.

A FLEXIBILIDADE NO SISTEMA DE ENERGIA É CRUCIAL PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA



Para atingir as metas climáticas e fortalecer a segurança energética, precisamos aumentar os investimentos em energias renováveis mais rápido do que nunca. Uma grande parcela de renováveis mais baratas e variáveis reduzirá os custos, mas também introduzirá novos desafios para equilibrar oferta e demanda. Aqui, analisamos mais profundamente os diferentes desafios e soluções de flexibilidade em um sistema de energia renovável. As soluções existem do lado da oferta, do lado da procura e de uma maior integração entre setores e geografias. Por fim, vemos como a energia hidrelétrica terá um papel cada vez mais importante como provedor de flexibilidade na transição energética.



← Em geral, é rentável expandir a energia solar e eólica em regiões com alta participação de energia renovável variável, pois os recursos eólicos e solares geralmente se complementam.

No Low Emissions Scenario, a participação de energia renovável intermitenteⁱ aumentará de cerca de 10% hoje para 65% em 2050 globalmente. Esta é uma média global; algumas regiões integrarão uma parcela ainda maior. A produção de energia solar e eólica varia de acordo com o clima e as estações do ano. Além disso, seus custos marginais de produção de eletricidade são baixos, o que reduz os preços da eletricidade em horas de vento e sol.

À medida que a participação das energias renováveis intermitentes aumenta, também aumenta a necessidade de flexibilidade de outras gerações, transmissão e distribuição, e demanda. Geografia, recursos, clima mix de oferta, demanda e interconectores criam variação regional em termos de necessidades de flexibilidade. Os sistemas de energia

hoje são bastante flexíveis e podem responder às variações na demanda, interrupções inesperadas das usinas e à variabilidade existente na produção eólica e solar fotovoltaica. No entanto, com a participação gradualmente maior de energia solar fotovoltaica e eólica no mix de produção e o fechamento de usinas fósseis, a necessidade de flexibilidade em outras partes do sistema aumenta, estendendo-se de sub-segundos a vários dias ou semanas.

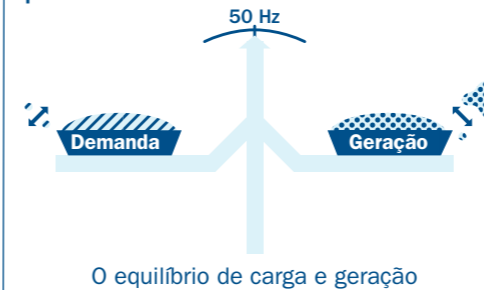
Em geral, é rentável expandir a energia solar e eólica em regiões com alta participação de energia renovável variável, como recursos eólicos e solares muitas vezes se complementam. Isto é especialmente verdadeiro para regiões maiores com boas interconexões. Em geral, os sistemas de energia interconectados reduzem a necessidade de outras soluções

de flexibilidade, pois o sistema maior se beneficia das diferenças em cada sistema de energia e aumenta o acesso a soluções flexíveis. Por exemplo, um sistema de energia com alta participação de energia eólica e um sistema de energia com grandes reservatórios hidrelétricos funcionarão de maneira mais otimizada se estiverem conectados por meio de uma infraestrutura de rede comum, permitindo que o sistema se beneficie das diferenças entre períodos de vento forte ou fraco e alta ou baixa precipitação.

ⁱ Geração de energia renovável intermitente: A natureza flutuante ou variabilidade dos recursos solares e eólicos, que resulta em mudanças rápidas na produção de energia solar fotovoltaica e eólica.

SOLUÇÕES DE FLEXIBILIDADE PODEM SER AGRUPADAS EM TRÊS CATEGORIAS

Serviços do sistema - fornecendo inércia, frequência e balanceamento para a rede



Para manter a frequência e o equilíbrio na rede, são necessárias rampas rápidas em segundos e inércia física. As baterias podem reagir imediatamente a desequilíbrios no sistema, a chamada resposta de frequência rápida. Muitas das baterias construídas hoje são usadas para essa finalidade. No entanto, isso não é suficiente. A inércia física é necessária para a resposta momentânea de desequilíbrio para manter o sistema de energia estável. Historicamente, quase todas as usinas de energia são movidas por uma turbina rotativa e podem fornecer inércia, inclusive hidrelétrica, mas esse não é o caso da energia eólica e solar. No futuro, outras tecnologias, como estabilizadores de grade rotativa, também serão necessárias para fornecer estabilização de grade.

Flexibilidade intradiária de curto prazo

Países com alta participação de energia solar e eólica variável exigirão mais flexibilidade de curto prazo em um dia. Espera-se que soluções de flexibilidade que cobrem curtos períodos de tempo atendam a alta concorrência. Além da energia hidrelétrica, as baterias podem fornecer flexibilidade por curtos períodos de tempo de uma ou algumas horas, e os custos devem cair rapidamente de acordo com o número cada vez maior de baterias produzidas. A eletrificação dos transportes é o principal fator de custo. O carregamento inteligente de carros elétricos será uma importante fonte de flexibilidade de curto prazo no lado da demanda no futuro, pois eles ficam parados em média 95% do tempo. Portanto, o carregamento inteligente de veículos elétricos, mas também as baterias do sistema de veículo à rede e outras respostas à demanda, como a produção flexível de hidrogênio verde, fornecerão flexibilidade de curto prazo. Essas soluções podem explorar as futuras diferenças de preços durante o dia com maior participação de energia solar fotovoltaica no mix de energia, reduzindo assim a volatilidade de curto prazo.

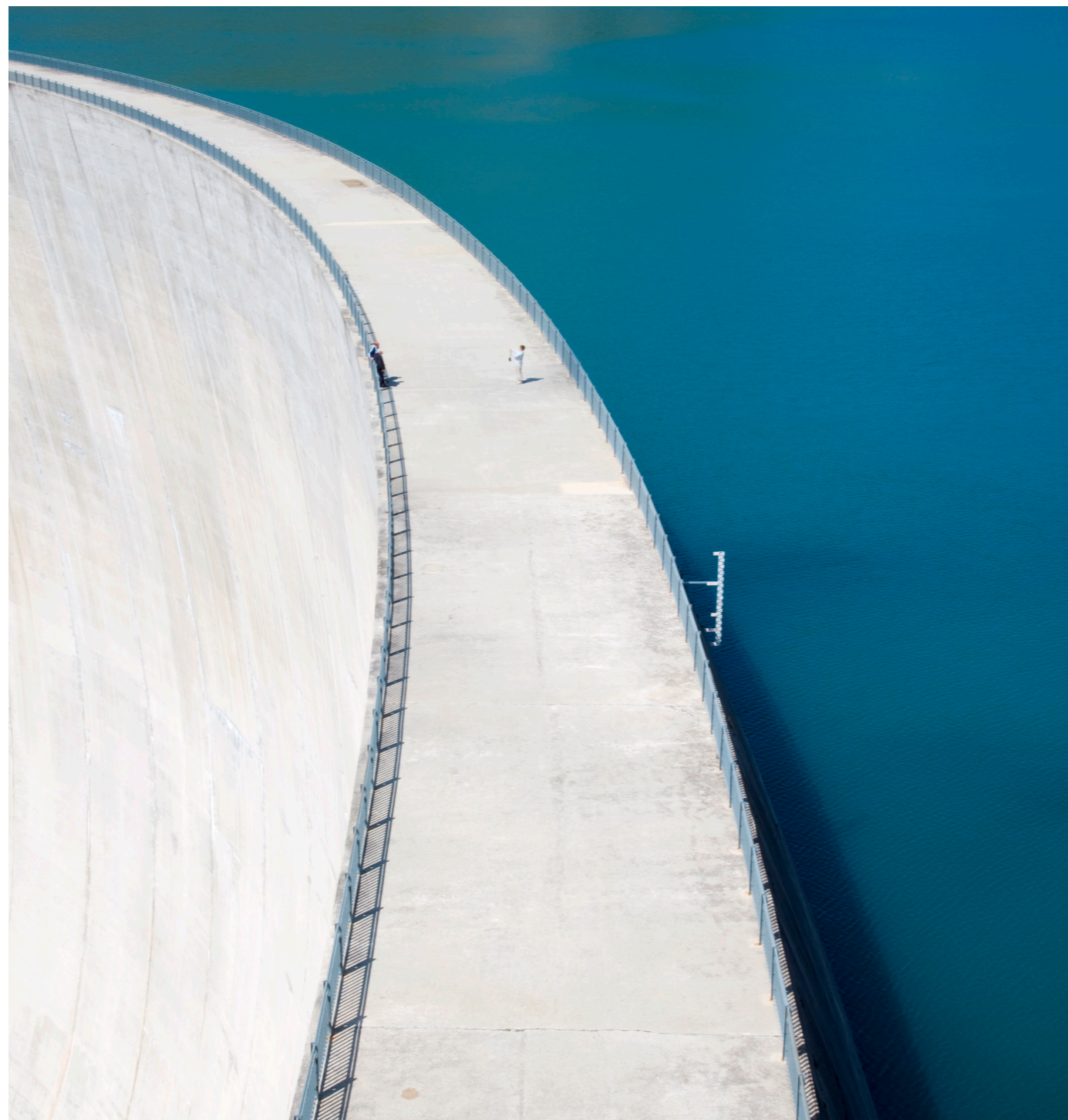
Flexibilidade de longo prazo cobrindo dias, semanas e meses

A flexibilidade de longo prazo entre semanas, meses e estações também é cada vez mais importante para poder lidar com condições como períodos mais longos sem vento, maior demanda de inverno ou diferenças de demanda e oferta entre meses e até anos. Há menos soluções para resolver os requisitos de flexibilidade de longo prazo. Atualizar e expandir a capacidade da energia hidrelétrica existente é uma das opções de emissão zero mais atrativas economicamente para cobrir as necessidades de flexibilidade de longo prazo nos sistemas de energia.

Os países sem acesso à energia hidrelétrica flexível devem recorrer a outras soluções de emissão zero mais caras, como o hidrogênio. Se a infraestrutura e o armazenamento forem construídos, o hidrogênio poderá fornecer o mesmo tipo de flexibilidade de longo prazo que a energia hidrelétrica. Esta é uma solução mais cara devido ao custo de armazenamento e à perda de eficiência na produção de energia a partir do hidrogênio. Até 70 por cento da energia é perdida ao gerar energia a partir de hidrogênio verde. Os primeiros 20-30% da energia são perdidos no eletrolisador ao produzir hidrogênio verde e outros 40% são perdidos na geração de energia.ⁱⁱ O hidrogênio para geração de energia é, portanto, assumido apenas para fornecer energia livre de emissões nos períodos de pico até 2050, quando não houver alternativas. O custo de investimento das turbinas de hidrogênio é relativamente modesto em comparação com soluções alternativas, o que é fundamental para tecnologias de pico de energia com horas de funcionamento limitadas.

ⁱⁱ Usar o calor residual e utilizá-lo em outros setores, como aquecimento urbano, reduzirá a perda de energia em ambos os processos.

Hidrelétrica e flexibilidade



A energia hidrelétrica é a maior fornecedora de eletricidade renovável do mundo e continuará a crescer até 2050. O potencial de armazenamento dos reservatórios hidrelétricos cobre hoje 99,9% do armazenamento global de eletricidade. Enquanto o armazenamento da bateria cobre apenas 0,05%, com mais de 90% localizado em veículos elétricos. O rápido crescimento da energia renovável é necessário para atingir as metas de segurança climática e energética. A energia hidrelétrica será vital no futuro, com sua capacidade única de fornecer segurança energética e estabilidade do sistema, mesmo em regiões com baixa participação hidrelétrica em seu mix de eletricidade.

A energia hidrelétrica é a maior fornecedora de eletricidade renovável globalmente e gera quase 80% mais eletricidade do que a energia solar e eólica combinadas. Mesmo assim, isso é apenas um quarto da eletricidade gerada por combustíveis fósseis hoje. Portanto, todas as tecnologias renováveis são essenciais para eliminar gradualmente os combustíveis fósseis no setor de energia, sendo a hidrelétrica uma peça vital para garantir o equilíbrio do sistema.

Fornecer flexibilidade é uma qualidade única para a energia hidrelétrica em comparação com outras tecnologias renováveis. Mesmo em regiões com baixa participação de hidrelétricas no mix de eletricidade, a hidreletricidade ainda pode ser um grande

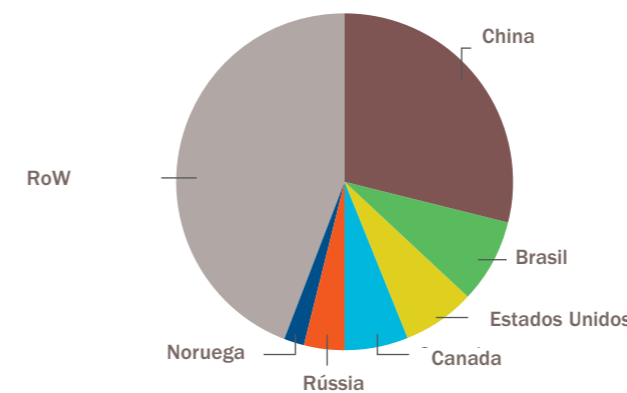
contribuinte para a segurança e a estabilidade do sistema na região. Hoje, a energia hidrelétrica existe em 160 países. Existem grandes diferenças geográficas e dez países são responsáveis por mais de 70 por cento da geração global de energia hidrelétrica, pois há limitações em termos de locais com sistemas fluviais adequados e diferenças de altura (Fig.25).⁶²

Ainda há um potencial de crescimento significativo para a hidrelétrica globalmente. O potencial tecnoeconômico indica que a capacidade poderia (em teoria) crescer de duas a cinco vezes em relação aos níveis atuais, mas isso antes de levar em consideração outras considerações ambientais.^{1,63} Em 2021, a capacidade hidrelétrica global aumentou cerca de 30

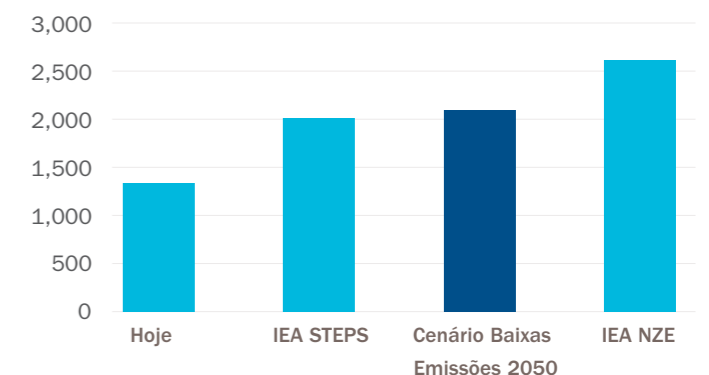
GW, impulsionada principalmente pelo crescimento na Ásia. No Cenário de Baixas Emissões, a energia hidrelétrica continuará a crescer de cerca de 1.360 GW hoje e ultrapassará 2.000 GW em capacidade e 7.000 TWh em produção globalmente até 2050 (Fig.26), tornando-se a quarta maior tecnologia de geração de eletricidade globalmente depois da energia solar fotovoltaica, eólica onshore e offshore.

¹ São necessários estudos de viabilidade minuciosos específicos do local para obter o potencial técnico-econômico da energia hidrelétrica e, com isso em mente, estima-se que o potencial seja cerca de duas a cinco vezes a produção hidrelétrica atual. A maior parte do potencial está na Ásia e na África, que verão um alto crescimento da demanda de energia e apenas uma parte do potencial é realisticamente viável para considerações ambientais e outras.

25 Capacidade hidrelétrica global por país (cinco principais mais Noruega e Resto do Mundo (RoW))⁶⁴



26 Capacidade hidrelétrica global (GW) hoje e em 2050 em Low Emissions Scenario em comparação com IEA ⁶⁵



	Flexibilidade para força				Flexibilidade para energia		
	Serviços do sistema				Intradiário (curto prazo)	Longo prazo	
	Sub-segundos (resposta de frequência rápida)	Sub-segundos (sistema, inércia)	Segundos	Minutos	Horas	Dias, semanas	Meses (arbitragem sazonal)
Reservatório Hídrico		✓	✓	✓	✓	✓	✓
A fio d'água		✓					
Hidrelétrica bombeada		✓	✓	✓	✓	✓	
Bateria	✓		✓	✓	✓		
Energia a gás/carvão		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Resposta da demanda (incluindo eletrolisador e carregamento inteligente)			✓	✓	✓	✓	
Hidrogênio para energia (H2P)						✓	✓

A energia hidrelétrica fornece flexibilidade cada vez mais valiosa para o sistema de energia global

A energia hidrelétrica pode fornecer produção de eletricidade sem carbono, combinada com flexibilidade e segurança de fornecimento devido às seguintes propriedades principais:

Energia renovável – energia bruta gerada e entregue ao sistema de energia.

Flexibilidade – energia quando necessário: a capacidade de mover a geração de eletricidade no tempo armazenando (e possivelmente bombeando) água e, assim, fornecendo energia para o sistema quando necessário. Reservatório e capacidade instalada são fatores-chave.

Serviços do sistema – para estabilizar a rede: a capacidade de fornecer inércia, energia reativa ou outros serviços do sistema em segundos e minutos para manter a frequência de rede necessária.^{i,66}

A energia hidrelétrica é a única solução renovável hoje que pode fornecer flexibilidade em um intervalo de segundos a dias, além de armazenar energia por semanas, meses ou anos (Fig.27). Devido à

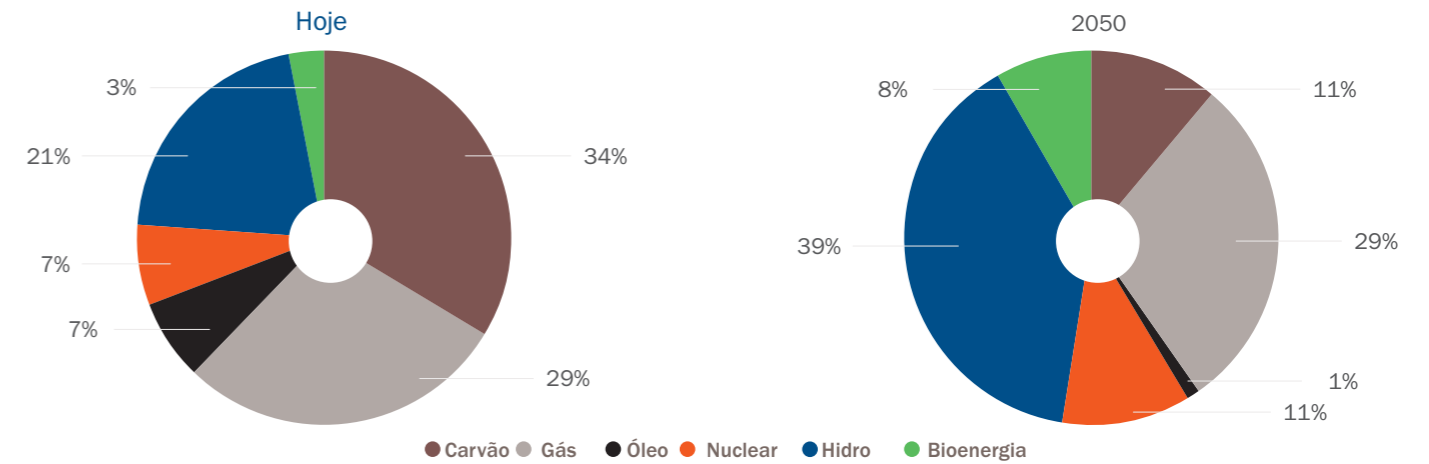
eliminação do carvão despachável e nuclear, a hidrelétrica terá um papel cada vez mais importante como provedor de flexibilidade daqui para frente, quase dobrando sua participação na capacidade flexível global até 2050, superando a energia a carvão e a gás (Fig.28).

O potencial de armazenamento de energia dos reservatórios hidrelétricos existentes em todo o mundo é único, cobrindo mais de 1.500 TWh de energia. Isso cobre 99,9% do armazenamento global de eletricidade hoje. A energia pode ser armazenada e descarregada a qualquer momento, dependendo das necessidades do sistema de energia e do tamanho do reservatório. Em comparação, o armazenamento de baterias cresceu exponencialmente nos últimos anos, mas ainda cobre apenas 0,05% do potencial global de armazenamento de reservatórios hidrelétricos (Fig. 29).⁶⁹ Além do mais, mais de 90% da capacidade de armazenamento de bateria globalmente está em veículos elétricos. Isso faz a chave de carregamento inteligente desbloquear o potencial de flexibilidade para o sistema de baterias.⁷⁰ O valor do armazenamento de energia e a flexibilidade das usinas hidrelétricas aumentarão em um futuro sistema de energia com mais energia intermitente.

As usinas hidrelétricas têm uma vida

útil média de 50 a 100 anos. Em muitos mercados maduros, a maior parte do potencial hidrelétrico já está construída e a frota global está envelhecendo. Mais de 50% da frota hidrelétrica tem mais de 40 anos e precisa de grandes atualizações. Usinas hidrelétricas ainda mais jovens podem precisar de grandes atualizações se não tiverem passado por processos de manutenção de qualidade.⁷² Aqui, atualizações e extensões de plantas existentes podem adicionar flexibilidade valiosa ao sistema de energia. As usinas hidrelétricas existentes podem ser redesenhadas aumentando a capacidade instalada, aumentando as hidrovias e a capacidade de armazenamento, instalando novas turbinas e digitalizações. Juntos, isso aumentará a flexibilidade com aceleração e desaceleração mais rápidas, além de fornecer energia adicional. O aumento da capacidade instalada normalmente permitirá que as usinas funcionem de forma mais flexível, deslocando a produção para períodos com pouco vento ou sem sol ou alta demanda, enquanto a produção anual absoluta de eletricidade permanece essencialmente a mesma se a capacidade de armazenamento e as hidrovias não forem alteradas.

Atualizar e expandir a capacidade da energia hidrelétrica existente é uma das opções economicamente mais atraentes para cobrir as

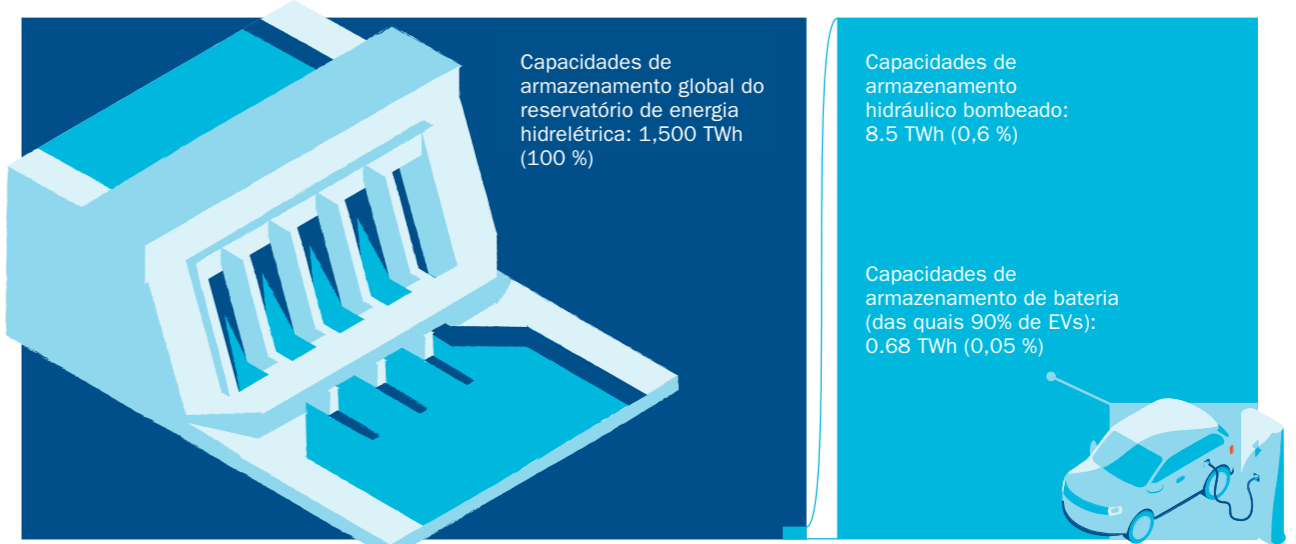


necessidades de flexibilidade de longo prazo em um sistema de energia descarbonizado.

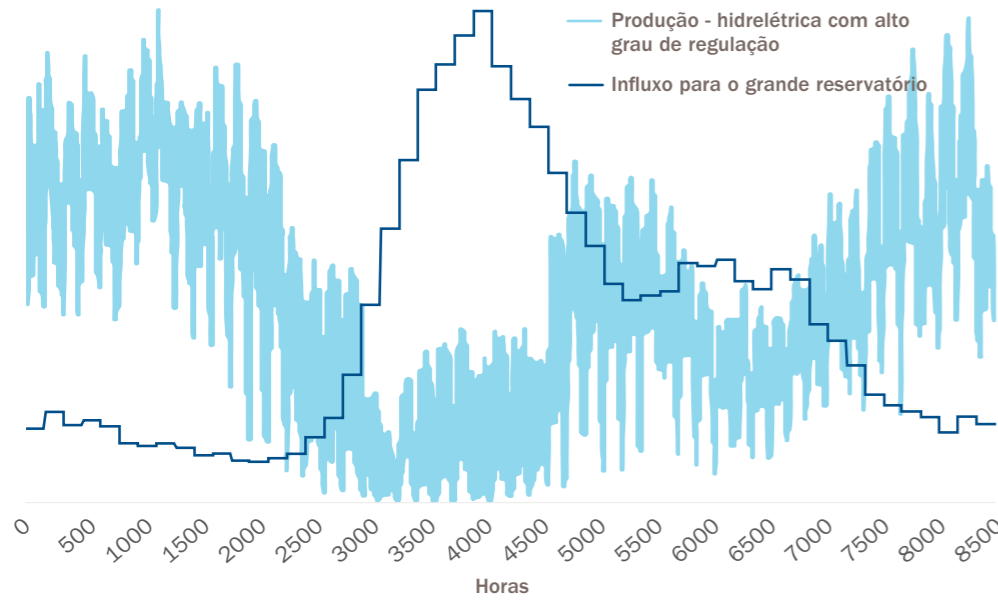
A energia hídrica é cada vez mais importante para estabilizar a rede devido à sua capacidade de fornecer inércia e alterar rapidamente a produção a custos relativamente baixos de partida e parada. Mas mesmo a energia hidrelétrica não é flexível o suficiente em todas as situações. Hoje, a energia hidrelétrica contribui para o controle de frequência por meio de mercados de reserva regulados pelos operadores do sistema de transmissão (TSOs) para garantir que a frequência no sistema de energia não se desvie mais do que

os limites permitidos.^{ii,73} No entanto, a maioria das turbinas hidrelétricas não deve operar abaixo de 60% da capacidade de produção, pois isso pode danificar as turbinas. Portanto, a pesquisa atual se concentra na utilização de todos os recursos de armazenamento e energia da planta, projetando turbinas e sistemas associados que podem suportar taxas de aceleração mais rápidas e partidas e paradas mais frequentes. É o tempo de resposta que impede que a energia hidrelétrica ofereça os mesmos serviços de flexibilidade que as baterias do sistema hoje, mas com turbinas novas ou melhoradas será possível operar usinas hidrelétricas com cargas mais baixas e aumentar o tempo de reação.^{iii,74}

ⁱEnergia: Energia e força estão intimamente relacionadas. Energia é a capacidade de causar mudanças, como o movimento mecânico de uma turbina (joule ou kWh)⁷³
ⁱⁱOs serviços de reserva para o operador da rede diferem com base em seu tempo de resposta, de um segundo a até 15 minutos (Reservas de Frequência Rápida (FFR), Reservas de Contenção de Frequência (FCR), Reservas de Restauração de Frequência automática (aFRR) e Reservas de Restauração de Frequência manual (mFRR)). A energia hidrelétrica fornece todos os serviços de reserva hoje, exceto a resposta de frequência rápida em 1 segundo.
ⁱⁱⁱRestrições mais rígidas sobre variações nos níveis de água em reservatórios, requisitos específicos para fluxo ecológico no rio ou descarga mínima através da usina podem ter um impacto significativo na capacidade de uma usina de fornecer flexibilidade e serviços do sistema e esse impacto geral do sistema precisa ser cuidadosamente avaliado com uma abordagem holística. Estudos descobriram que há pouca correlação entre a produção de energia e a contribuição dos serviços de balanceamento e flexibilidade.⁷³ Assim, a perda de produção de energia por si só não é uma boa medida para avaliar o impacto das mudanças nos regulamentos.



30 A energia hidrelétrica com armazenamento de longo prazo em grande reservatório economizará afluência no reservatório em períodos de baixo preço e demanda, e produzirá quando os preços e a demanda forem maiores, podendo otimizar o despacho de acordo com a demanda e os preços (GW por hora em um ano, Ilustração) (Statkraft analysis)



- Hidrelétrica com armazenamento de longo prazo economizará fluxo no reservatório em períodos de preços baixos e produzirá quando os preços estiverem mais altos.
- Hidrelétricas menos flexíveis seguirão o padrão de afluência e serão muito menos capazes de otimizar o despacho de acordo com os preços.
- Energia hídrica é a principal fonte de flexibilidade no sistema nórdico e beneficiará do aumento das necessidades de flexibilidade de curto e longo prazo.

AS CARACTERÍSTICAS DE FLEXIBILIDADE VARIAM DE ACORDO COM O TIPO E O PROJETO DA CENTRAL HIDROELÉTRICA

A energia hidrelétrica usa a energia da queda de água ou do fluxo de um rio para gerar eletricidade. Quanto maior a diferença de altura entre a tomada de água e a turbina, mais energia armazenada na água. Hidrelétricas vêm em muitos tamanhos diferentes⁷⁵. Cada usina é única e, portanto, os serviços de flexibilidade e a capacidade de

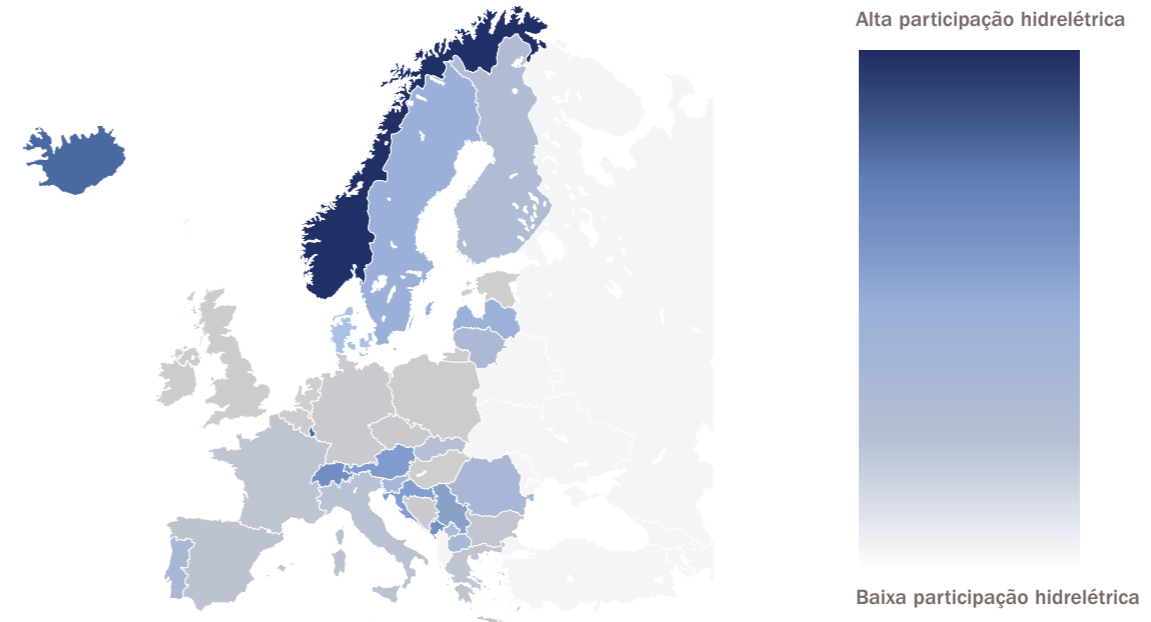
movimentar a produção no tempo variam, dependendo do tipo de turbina, projeto da usina, tamanho do reservatório, localização, etc. Cada usina é regulada de forma diferente e o valor que elas fornecem à rede e ao sistema elétrico geral não está necessariamente vinculado aos seus níveis de produção. A energia hidrelétrica flexível pode ser fundamental para lidar com os desafios da rede local e regional e para garantir a estabilidade da rede local.⁷⁶

As três principais categorias de energia hidrelétrica oferecem diferentes tipos de flexibilidade:

Usinas a fio d'água – usina hidrelétrica localizada em rios, adaptada a um grande fluxo de água, pois a pressão da água da diferença de altura é baixa.

Usinas com reservatório – usinas hidrelétricas que obtêm água de uma fonte de água mais alta, como um lago com represa – também

31 Participação da energia hidrelétrica no mix de energia europeu por país ⁷⁸



conhecidas como reservatório. Requer cursos d'água e tubulações para levar a água até a usina.

Usinas de armazenamento bombeado
Uma usina hidrelétrica com um reservatório que tem a capacidade de bombear água de volta para o reservatório, podendo gerar eletricidade quando a demanda é alta e bombear de volta e armazenar eletricidade quando a demanda e o preço são baixos.

O fio d'água é o menos flexível dos três, mas ainda é importante para o sistema, pois fornece inércia e cria uma produção estável seguindo o fluxo do rio. As usinas hidrelétricas com reservatório e hidrelétricas bombeadas podem gerar eletricidade, atuar como armazenamento e fornecer capacidade e flexibilidade. A sua contribuição para a flexibilidade também depende da disponibilidade hídrica sazonal e pode resultar em grandes variações anuais. A duração do armazenamento de plantas com reservatório normalmente varia de algumas horas a semanas ou até meses. Além disso, as hidrelétricas bombeadas podem servir como um recurso de flexibilidade do lado da demanda quando em modo de bombeamento.

O papel da energia hidrelétrica no sistema de energia nórdico e europeu

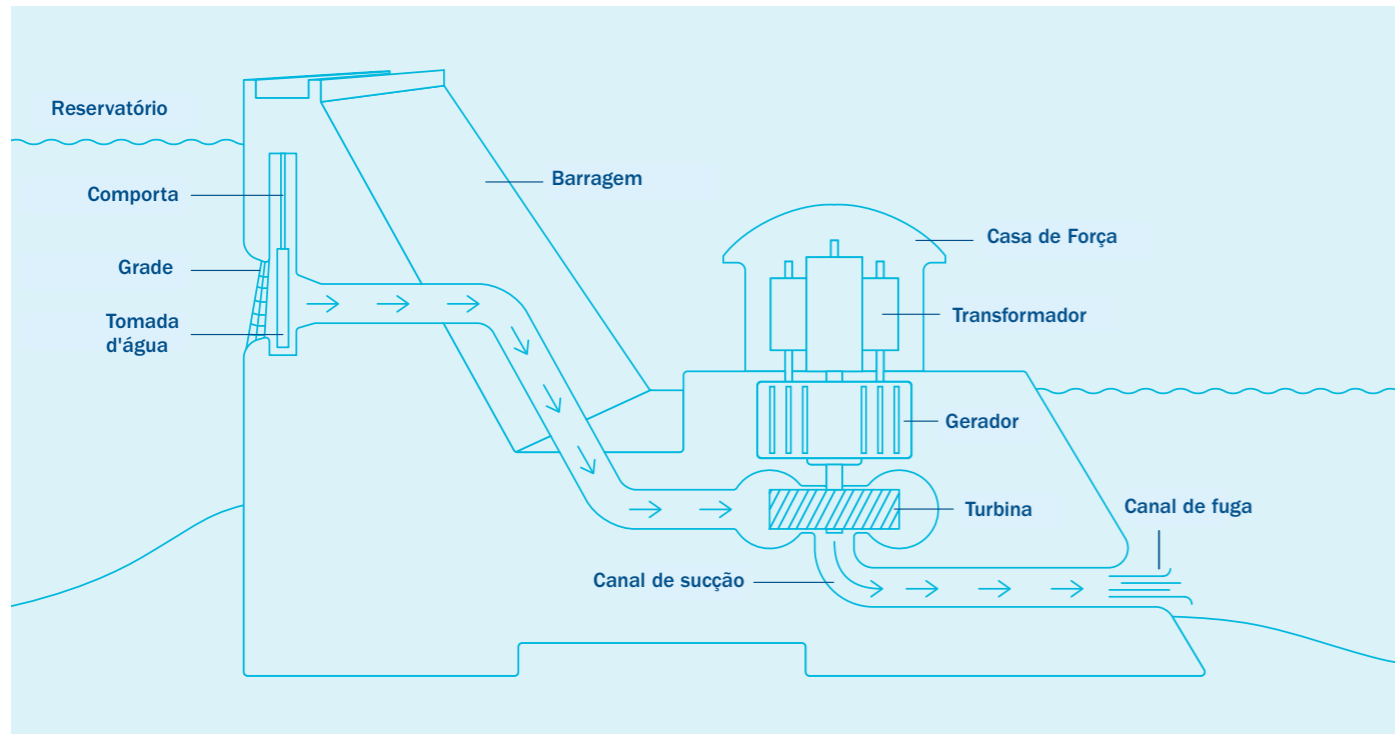
Na Europa, o recente plano REPowerEU acelerou a já forte tendência de mudar para um sistema de energia renovável que é dominado por energia solar e eólica (ver deep dive: REPower EU). Isso leva ao aumento da importância da geração despachável restante, incluindo a energia hidrelétrica. Todos os países europeus têm alguma energia hidrelétrica em seu mix de energia, no entanto, existem grandes diferenças. A energia hidrelétrica é especialmente comum nos países nórdicos e alpinos (Fig.31), e as interligações transfronteiriças podem fornecer a flexibilidade necessária ao resto da Europa.⁷⁷ Um sistema de energia como nos países nórdicos, Áustria, Suíça e Albânia, todos baseados em energia hidrelétrica flexível, tem uma capacidade única de lidar com grandes variações em outras fontes de energia renovável e manter as flutuações de preços mais baixas ao longo do tempo. A energia hidrelétrica também depende do clima e a variação na precipitação de ano para ano resulta em alta variabilidade na geração. O armazenamento em reservatórios ajuda a reduzir essa variabilidade ao longo do tempo. No entanto, em regiões hidrelétricas, vários anos secos consecutivos aumentam

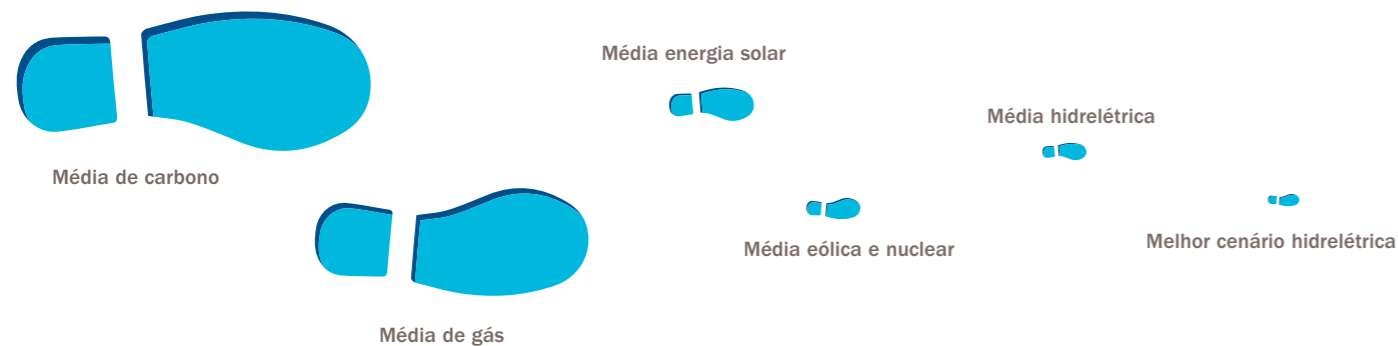
a necessidade de importação, enquanto, se houver vários anos úmidos, a maioria dos países hidrelétricos, como Suíça, Noruega, e Áustria, produzirão mais eletricidade do que precisam e que pode ser exportado para regiões vizinhas.

Em geral, combinar e conectar os pontos fortes e as características distintas de diferentes tecnologias em todas as geografias permitem um sistema de energia mais robusto. Por exemplo, a energia hidrelétrica pode complementar a energia solar fotovoltaica e eólica, fornecendo flexibilidade, armazenamento e energia durante períodos de baixa geração solar e eólica, enquanto a água pode ser armazenada em períodos ensolarados e ventosos. Isso aumenta a robustez de um sistema de energia descarbonizado. Para garantir que o sistema de energia esteja sempre em equilíbrio e tenha a qualidade certa de entrega, um futuro mercado de eletricidade deve garantir os sinais de preço corretos para os diferentes elementos do que o sistema precisa (ou seja, energia, flexibilidade e serviços do sistema).

⁷⁵Grande escala (> 10 MW, por exemplo, usina de Tokke (430 MW), pequena escala (1 - 10 MW, por exemplo, usina de Nedre Bersátvatn (4 MW)), mini (0,1 - 1 MW como usina de Mofjell (0,6 MW)) e micro (< 0,1 MW).⁷⁵

↓ Usina hidrelétrica com reservatório





A energia hidrelétrica no contexto mais amplo da sustentabilidade: pegada de carbono e controle de inundações

A capacidade da energia hidrelétrica de regular rios e lagos pode aumentar o controle de enchentes, e sua operação flexível é um facilitador para integrar mais energias renováveis intermitentes e garantir estabilidade no sistema de energia.

A energia hidrelétrica renovável tem uma pegada de carbono baixa, muito menor do que as usinas de energia fóssil, mesmo com captura de carbono, e no mesmo nível ou menor do que a eólica e solar ao analisar seus impactos completos do ciclo de vida.ⁱ A média global de emissões de energia hidrelétrica é de cerca de 18,5 gCO₂ por kWh gerado, mas como as emissões são muito mais específicas do local e do projeto do que outras tecnologias, muitas usinas hidrelétricas têm níveis de emissão ainda mais baixos (mais próximos de 6 a 11 gCO₂ por kWh).^{ii,79}

Emissões de vida útil mais altas podem ser devido a distâncias de transporte maiores que a média para materiais de construção, pois isso, em combinação com as emissões da produção de aço, pode cobrir a maior parte das emissões.⁸¹ Em regiões tropicais, as emissões de metano de reservatórios hidrelétricos também podem ser responsáveis por uma quantidade significativa das emissões.⁸²

Com o aquecimento global e o aumento das temperaturas, os padrões de precipitação estão mudando e, em algumas regiões, experimentamos influxos alterados e um risco aumentado de inundações.⁸³ Em geral, as inundações aumentarão em frequência e magnitude e se espalharão para mais regiões. Mesmo que o aquecimento global seja limitado a 1,5 graus, a precipitação pesada sobre a terra aumentará. O IPCC afirma que cada evento de 10 anos para precipitação pesada sobre a terra deve ocorrer 1,5 vezes mais frequentemente e será 10% mais úmido, enquanto em um cenário de 2 graus, isso pode acontecer duas vezes mais.^{iii,84}

A energia hidrelétrica tem um papel cada vez mais importante na prevenção de danos e perda de vidas por inundações. A energia hidrelétrica com reservatórios pode fornecer medidas importantes de controle de inundações, pois o fluxo de água pode ser gerenciado e otimizado para ajudar a reduzir as inundações a jusante. Os operadores da usina podem coletar e gerenciar a água da enchente no reservatório e controlar o fluxo de água da usina hidrelétrica para os cursos d'água abaixo, evitando assim fluxos de água e potencialmente salvando vidas e propriedades.⁸⁵

A energia hidrelétrica representa uma parte crítica dos sistemas de energia em todo o mundo e deve ser vista em conexão com usos alternativos da água (por exemplo, canais, irrigação, recreação, riscos de inundação). Devido à sensibilidade dos ecossistemas e habitats, o fluxo de água e os níveis de água são frequentemente regulados e têm um limite superior e inferior no lago ou reservatório ou no rio. É importante encontrar o equilíbrio certo entre minimizar o impacto ambiental e maximizar o valor que a energia hidrelétrica oferece na forma de eletricidade renovável, flexibilidade, mitigação climática, segurança energética e capacidades de redução de inundações para a região, bem como para o sistema energético total.

ⁱAo falar sobre o ciclo de vida de uma usina, as emissões de cada estágio da vida da usina são levadas em consideração (ou seja, emissões da extração de combustível, materiais de construção, construção, produção de energia, etc.). A pegada de carbono varia entre os projetos, várias usinas hidrelétricas estão na faixa de 10-100 gCO₂/kWh, e alguns ainda maiores.

ⁱⁱ Comparado com o período de referência de 1850 a 1900.



← A título de ilustração, durante a inundação na Noruega em outubro de 2014, Flâm e Odda registraram danos superiores a 50 milhões de euros, mas não houve danos comunicados nos cursos de água regulamentados nas vizinhas Aurland e Tyssedal.



→ A Barragem das Três Gargantas na China pode conter um nível de água de até 175 metros, mas regula a água abaixo de 165 metros para proteger contra possíveis inundações. Em 2021, a barragem restringiu a vazão de água em 19.000 metros cúbicos por segundo, mais da metade da velocidade de afluência média no reservatório (de 40.000 metros cúbicos).

O hidrogênio renovável é necessário para atingir as metas climáticas, proporcionando flexibilidade valiosa

No Low Emissions Scenario, a produção de hidrogênio renovável desempenhará um papel significativo nos sistemas de energia globalmente e será uma importante fonte de consumo de energia flexível. Nos últimos anos, houve um tremendo desenvolvimento em políticas, projetos e na indústria global de hidrogênio. No Low Emissions Scenario, a demanda de hidrogênio aumentará para três vezes o consumo atual até 2050 e se tornará 100% livre de emissões, substituindo gradualmente toda a demanda de hidrogênio fóssil existente no mundo (Fig. 33).

A energia necessária para produzir hidrogênio renovável representa cerca de 20% do aumento total da demanda global de energia até 2050, mas há grandes diferenças regionais. O aumento é possível devido à flexibilidade na produção de hidrogênio quando conectado à rede e soluções de armazenamento.

Como a demanda por hidrogênio nem sempre corresponde a períodos de sol e vento abundantes e preços de energia mais baixos, o hidrogênio precisa ser armazenado para se beneficiar da variação do preço da energia e manter baixos custos de produção.ⁱⁱ O armazenamento sazonal pode ser benéfico em mercados com diferenças significativas de preço de energia entre as estações, por exemplo, no noroeste da Europa. Espera-se que o armazenamento em cavernas de sal seja a maneira mais barata de armazenar grandes volumes por períodos mais longos, quando disponível. O armazenamento em tanques comprimidos é benéfico para otimizar a produção em poucas horas e dias. Em regiões com alta participação de energia solar fotovoltaica no mix, como no Chile, espera-se que a diferença de preço

durante o dia incentive a produção flexível de hidrogênio durante o dia combinada com armazenamento de curto prazo.

No curto prazo, devido à falta de infraestrutura de hidrogênio dedicada, espera-se que a produção esteja próxima da demanda da indústria ou do transporte. A longo prazo, espera-se que a infraestrutura de transporte de hidrogênio seja construída gradualmente. Para pequenos volumes e curtas distâncias, a forma mais econômica de transportar hidrogênio é a forma comprimida ou líquida por meio de caminhões. Para volumes maiores e distâncias médias, gasodutos de gás fóssil reaproveitados serão a opção preferida. Na Europa, os gasodutos de gás fóssil existentes têm potencial para serem convertidos em gasodutos de hidrogênio, criando um mercado de hidrogênio regional e interconectado na Europa. Para o transporte intercontinental de longa distância, a conversão em amônia e o transporte por meio de navios parecem mais promissores. No entanto, como a conversão de hidrogênio em amônia renovável e o craqueamento de volta em hidrogênio adiciona custos significativos, espera-se que o transporte por dutos seja a opção menos dispendiosa e preferida dentro de uma região. O futuro do comércio global de hidrogênio entre os continentes é mais incerto e espera-se que seja principalmente na forma de um produto final, como amônia verde ou aço verde.

Uma alternativa ao hidrogênio verde é produzir hidrogênio a partir de combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS) – hidrogênio azul. Este processo ainda emite cerca

de 5% a 10% de CO₂. Embora se espere que a produção de hidrogênio verde e azul, em geral, se complementem, os atuais altos preços do gás adicionaram incerteza às perspectivas do hidrogênio azul. A CCS já tem altos custos de investimento iniciais. O hidrogênio azul parece mais competitivo em partes do mundo que possuem recursos abundantes de gás fóssil barato e áreas adequadas para armazenar CO₂, como nos EUA e no Catar.

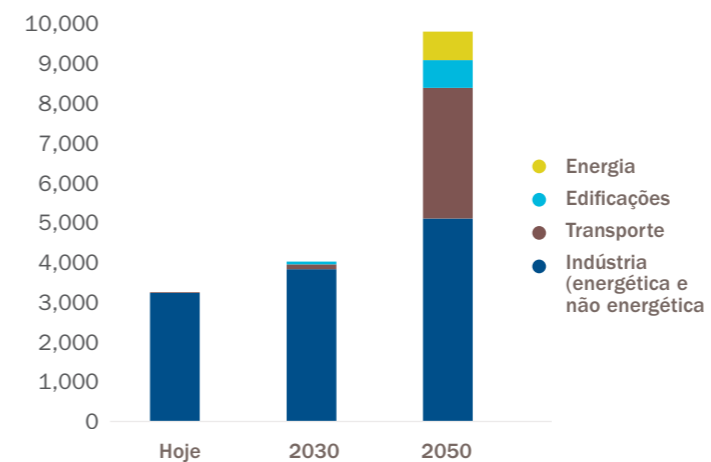
A competitividade do hidrogênio verde melhorará gradualmente em relação ao hidrogênio azul e cinza. No entanto, o momento real para quando a paridade de custo for alcançada para o hidrogênio verde em comparação com os combustíveis alternativos variará para cada aplicação e geografia.

A importância do hidrogênio renovável conectado à rede para os sistemas de energia aumenta de forma constante até 2050 e, à medida que os custos do eletrolisador caem, os preços da energia gradualmente terão mais impacto nos custos do hidrogênio (Fig. 34). Os eletrolisadores serão capazes de fornecer flexibilidade valiosa ao sistema, de minutos a horas e dias.

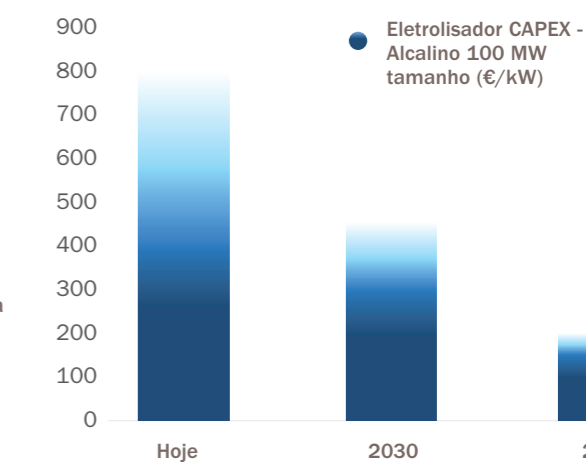
ⁱO hidrogênio renovável (ou "verde") é produzido a partir de energia renovável em eletrolisador e é livre de emissões. O hidrogênio "azul" é produzido a partir de gás fóssil com CCS e é 90-95% livre de emissões, enquanto o hidrogênio "cinza" é produzido a partir de gás fóssil sem CCS e emite 9,9 tCO₂/tH₂.⁸⁶ O hidrogênio "cinza" é produzido predominantemente a partir de gás fóssil por meio da reformação a vapor de metano (SMR), e é usado principalmente em refinarias para remover enxofre de combustíveis e na produção de amônia hoje, responsável por cerca de 2% do gás de efeito estufa global emissões.

ⁱⁱA produção flexível de hidrogênio também reduz o número de horas em que a usina precisa desligar a produção de energia variável para equilibrar a rede (redução).

33 Demanda global de hidrogênio por setor (TWh)



34 Capex do eletrolisador de hoje até 2050



↑ O armazenamento em tanques comprimidos é benéfico para otimizar a produção em poucas horas e dias. Em regiões com alta participação de energia solar fotovoltaica no mix, como no Chile, espera-se que a diferença de preço durante o dia incentive a produção flexível de hidrogênio durante o dia combinada com armazenamento de curto prazo.

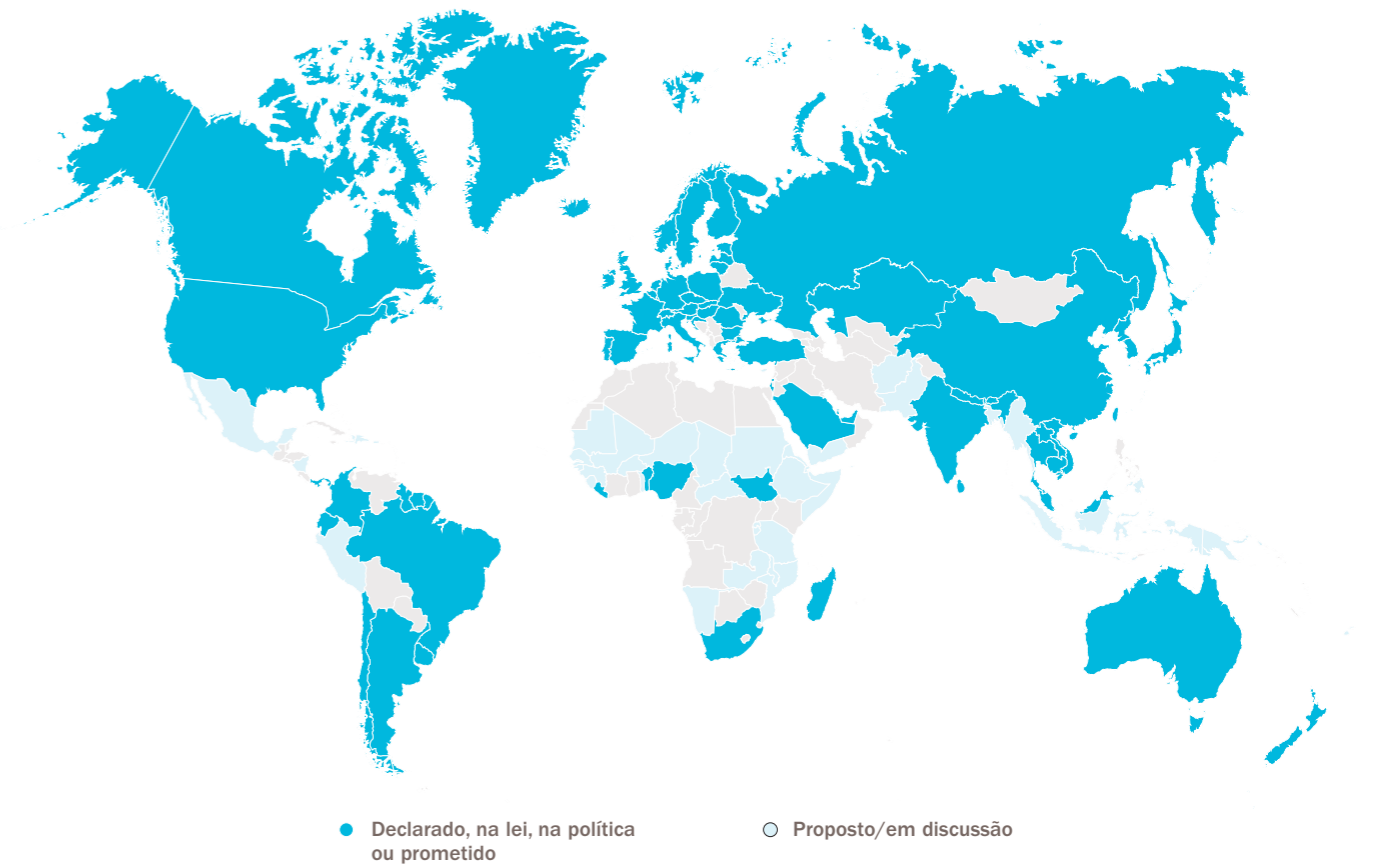
POLÍTICA CLIMÁTICA EM UM MUNDO FRAGMENTADO

Em um mundo com mais rivalidade e ênfase mais intensa no controle nacional sobre as cadeias de suprimentos, é imperativo que os países continuem a cooperar nas políticas climáticas e mantenham o impulso da transição.



← A agenda climática global foi recentemente ofuscada pela guerra na Ucrânia e pela recuperação da pandemia de COVID-19. O nível de incerteza em torno dos mercados de energia aumentou

35 Países e nações com ambições de emissões net zero⁸⁷



Os países estão se comprometendo com o net zero, enquanto o risco de uma transição desordenada aumentou

Em novembro de 2021, a Conferência Anual das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 26) concluiu o Livro de Regras do Acordo de Paris e concordou com o Pacto de Glasgow. Este último incluiu o reforço das metas nacionais no prazo de um ano e a eliminação progressiva do carvão.⁸⁸ Muitos países comunicaram metas precisas antes ou durante a reunião da COP26, principalmente a Índia, com uma meta de net zero para 2070. Agora, mais de 80% das emissões globais são cobertas por anúncios ou promessas de net zero (Fig.35). No entanto, as ambições atuais não são suficientes. A pesquisa mostra que a implementação de políticas a partir do final de 2020 levaria a 3,2°C de aquecimento, a implementação das metas atuais levaria a 2,4-2,7°C de aquecimento e uma implementação completa, incluindo todas as ambições de net zero anunciadas, poderia manter o aquecimento global em 1,8-1,9°C. O fato de os países estarem dispostos a se comprometer com esse nível de ambição é motivo

de esperança.⁸⁹ Ainda assim, a agenda climática global foi recentemente ofuscada pela guerra na Ucrânia e pela recuperação da pandemia de COVID-19. O nível de incerteza em torno dos mercados de energia aumentou e a autossuficiência energética está agora no topo da agenda política. O mundo está mais fragmentado, o que pode tornar mais difícil coordenar a resposta global às mudanças climáticas e construir confiança. A cooperação global e regional que leva a uma ação governamental acelerada e fortalecida é vital se quisermos resolver a crise climática.

Uma rivalidade mais intensa pode tornar mais difícil fazer com que as maiores economias do mundo se comprometam com metas climáticas mais rigorosas e mantenham a confiança nos compromissos para atingir as metas. Também poderia diminuir a pressão sobre os países atrasados, pois outras considerações podem superar as mudanças climáticas em importância para a diplomacia global. Até agora, a mudança climática tem sido uma das poucas áreas em que a China e os EUA conseguiram cooperar e avançar.

No Low Emissions Scenario, espera-

se que mais cadeias de suprimentos regionais surjam com o aumento da tensão geopolítica, enquanto o impulso global para resolver a crise climática é preservado apesar da tensão global em outros campos. A acessibilidade é muito discutida na transição verde – mas isso agora está sendo desafiado por tudo ter se tornado mais caro no ano passado. A crise energética atingiu especialmente os países em desenvolvimento dependentes de importações, já fortemente endividados devido à pandemia de COVID-19. Isso reduziu a capacidade dos governos de financiar projetos de energia renovável. Além disso, o alto custo de capital e os custos de empréstimos estão tornando as tecnologias de capital intensivo menos atraentes.

O mundo em desenvolvimento responde por um quinto dos investimentos em energia limpa, mas dois terços da população global. O financiamento insuficiente de tecnologias limpas em economias emergentes contribui para o risco de uma transição desordenada.

Antes da COP27 em Sharm El-Sheikh, no Egito, o foco tem sido em uma transição justa.⁹⁰ Isso inclui como os países e comunidades mais vulneráveis, em termos de

lidar com as consequências do aquecimento global, poderiam ser financiados. Os países desenvolvidos foram incentivados a cumprir os compromissos de financiamento que assumiram, bem como aumentar sua ambição pré-2030, para que os países em desenvolvimento recebam o apoio técnico e financeiro necessário para resolver a crise climática em nível global.

O preço do carbono é uma das formas mais eficientes de atingir as metas climáticas

As fortes ambições climáticas devem ser seguidas por ações e medidas concretas e imediatas para alcançar metas e objetivos. Colocar um preço no carbono é uma das medidas políticas mais eficientes para reduzir as emissões. Para países com um duplo objetivo de redução de emissões e redução de importações de combustíveis fósseis, a precificação do carbono como ferramenta política apoia a realização de ambos.

O Artigo 6 do Livro de Regras do Acordo de Paris sobre mercados de

carbono e cooperação foi acordado na COP26 no ano passado. Isso estabelece diretrizes que permitem que os países cooperem (para reduzir as emissões) trocando créditos de carbono em nível de país ou de projeto de forma transparente e responsável. Acordar regras internacionais claras para os mercados de carbono é um passo importante para ajudar os países a irem mais longe do que fariam sem cooperação, evitando dupla contagem.

Contrato de carbono por diferença reduz risco de investimento em tecnologias limpas

Embora a precificação do carbono seja vantajosa ao passar de tecnologias fósseis para tecnologias limpas, o investimento em tecnologias inovadoras de baixo carbono não é isento de riscos, incluindo altos custos iniciais. Os preços do carbono nem sempre refletem o verdadeiro custo social do carbono na economia, e os níveis futuros de preços são muitas vezes incertos e voláteis. Na maioria das

regiões, a precificação do carbono é uma das várias ferramentas políticas aplicadas para atingir as metas climáticas. Para acelerar os investimentos em tecnologias limpas, a precificação do carbono juntamente com os contratos de carbono para esquemas diferenciados podem ajudar a aumentar a previsibilidade e reduzir os riscos de investimento. Este é um mecanismo de apoio do governo que pode cobrir a lacuna entre os custos reais das tecnologias limpas e os níveis de preços do carbono. Esta pode ser uma ferramenta poderosa no desenvolvimento de tecnologias menos maduras e ajudar a mitigar a desvantagem dos primeiros para tecnologias como hidrogênio limpo para transporte.

Evitar a fuga de carbono entre mercados é importante

Atualmente, o mundo está seguindo caminhos de emissão regionalmente divergentes. Como tal, os países e regiões na liderança, como a UE, correm o risco de fuga de carbono para outros países com ambições climáticas mais fracas. Para minimizar o risco de fuga de carbono



← A crise energética impulsionou o investimento global em energia para um recorde esperado de US\$ 2,4 trilhões em 2022, segundo a IEA, um aumento de 8% em relação a 2021. Quase 60% disso é em energia limpa.

e pressionar outros países a aumentar suas próprias ambições, um Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono (CBAM) para setores-chave é proposto pela Comissão Europeia. A intenção é adicionar um preço nas importações que reflita com mais precisão seu teor de carbono. Custos de carbono semelhantes para produtos importados e para produtos produzidos na UE podem ser alcançados indexando o nível de preços de importação de carbono ao preço real do carbono na UE (EU ETS). Em um período de transição, esse mecanismo, se projetado e implementado de maneira adequada, pode ajudar as regiões a convergir para um caminho de emissões mais alinhado e ambicioso.

Os investimentos em tecnologias limpas estão aumentando – mas é preciso muito mais

A crise energética impulsionou o investimento global em energia para um recorde esperado de US\$ 2,4 trilhões em 2022, segundo a IEA, um aumento de 8% em relação a 2021. Quase 60% disso é em energia limpa. A maior parte do investimento é em energia renovável, eletrificação da mobilidade e eficiência aprimorada, impulsionada por preços de energia mais altos. Há também impulso em tecnologias novas e emergentes, com enorme crescimento no armazenamento de energia de bateria e hidrogênio limpo, este último impulsionado pela invasão da Ucrânia pela Rússia e pelas metas da UE para o hidrogênio. No entanto, os investimentos anuais não são suficientes para limitar o aquecimento global a 1,5°C,

e não são suficientes para atingir as metas climáticas anunciadas.⁹¹ Para direcionar futuros investimentos para projetos limpos e sustentáveis, a UE criou um sistema de classificação comum para “atividades econômicas sustentáveis”. A taxonomia da UE fornece uma linguagem comum e definições claras de investimentos sustentáveis. Esta pode ser uma ferramenta poderosa para mudar o capital de tecnologias fósseis para tecnologias limpas e sustentáveis no futuro.⁹²

Redirecionar capital para investimentos em tecnologias limpas com a velocidade necessária representa um grande desafio de coordenação que só pode ser resolvido por um compromisso claro com metas climáticas apoiadas por políticas de longo e curto prazo.

Nesse sentido, a aprovação do “Ato de Redução da Inflação (IRA)” pelo Congresso dos EUA é um sinal positivo de que os Estados Unidos estão comprometidos em alcançar seus objetivos sob o Acordo de Paris. O pacote inclui US\$ 386 bilhões em gastos com energia e clima, incluindo créditos fiscais para eletricidade verde, manufatura, eficiência energética e combustível e veículos limpos. Estima-se que o IRA reduza as emissões dos EUA em 40% até 2030 (em comparação com os níveis de 2005), um aumento significativo em relação às estimativas de redução anteriores de 24 a 35% pelas políticas anteriores.^{93,94}

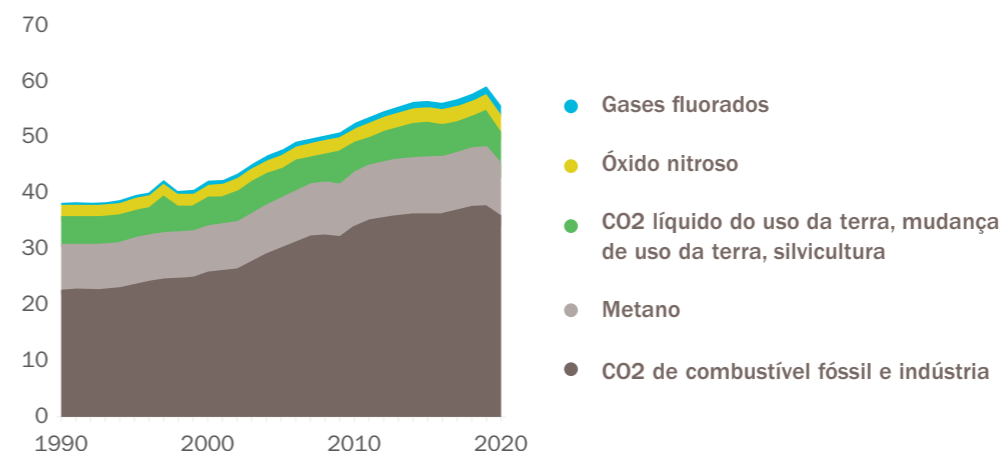


A taxonomia da UE pode ser uma ferramenta poderosa para redirecionar o capital de tecnologias fósseis para tecnologias limpas e sustentáveis.

Low Emissions Scenario em um Contexto do IPCC



36 Emissões antropogênicas líquidas globais de GEE (GtCO₂-eq) 1990–2020⁹⁸



Para permanecer dentro de um aquecimento de 1,5°C, precisamos reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% nos próximos oito anos, o que é extremamente desafiador. Aqui comparamos o Low Emissions Scenario com os últimos cenários climáticos do IPCC de acordo com o aquecimento de 1,5°C e 2°C. No Low Emissions Scenario, as emissões de CO₂ relacionadas à energia caem 60% de hoje até 2050. Isso é significativo, mas ainda não é suficiente para uma via de 1,5°C. São necessárias mais energias renováveis e uma maior participação de eletricidade na energia final para estar em linha com os cenários de 1,5°C, enquanto o hidrogênio está no mesmo nível do Low Emissions Scenario. Além disso, é necessário o uso de soluções de remoção de dióxido de carbono para se livrar das últimas e mais caras moléculas de CO₂.

Em abril de 2022, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)⁹⁵ publicou seu terceiro e último relatório principal no sexto ciclo de avaliação do estado do conhecimento relacionado às mudanças climáticas (AR6)ⁱ. Desde que o último relatório de avaliação foi publicado em 2014, ficou ainda mais claro que as atividades humanas aqueceram a atmosfera, o oceano e a terra. O relatório do IPCC conclui que o mundo já ficou 1,1°C mais quente e cada décimo de grau adicional de aumento de temperatura terá um grande efeito negativo.⁹⁶

AS EMISSÕES DE GASES DE ESTUFA ESTÃO AUMENTANDO, MAS A UM RITMO MAIS LENTO

Conforme claramente declarado no terceiro relatório do AR6, não estamos no caminho certo para limitar o aquecimento global a 1,5°C. As emissões líquidas totais de gases de efeito estufa (GEE)

antropogênicosⁱⁱ continuaram a aumentar de 1990 a 2019 (Fig.36), embora tenha havido uma taxa de crescimento mais lenta na última década em comparação com o período de 2000 a 2010.ⁱⁱⁱ Do lado positivo, há evidências de ações globais de mitigação do clima, com atualmente mais de 80% das emissões globais de gases de efeito estufa cobertas por ambições ou anúncios de net zero (fig.35).⁹⁷

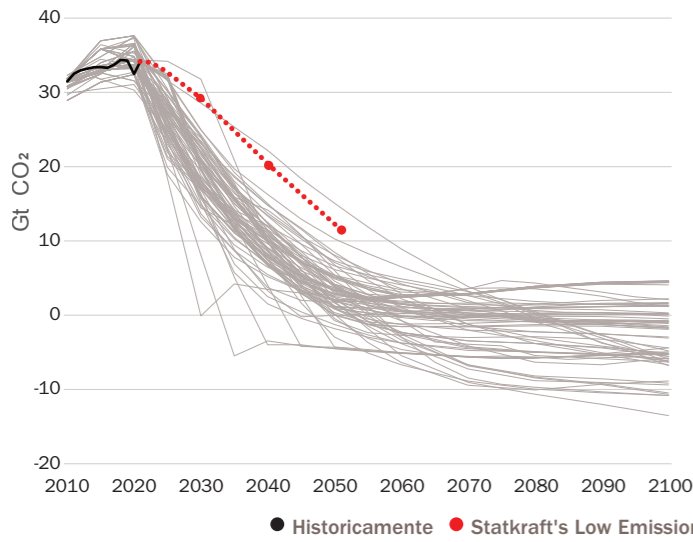
O ORÇAMENTO DE CARBONO ESTÁ QUASE GASTO

O termo balanço de carbono é, em princípio, a quantidade de dióxido de carbono que pode ser emitida durante um determinado período para manter o aumento da temperatura global dentro de certos limites. A comparação é geralmente com os tempos pré-industriais (1850-1900). Desde 1850, as emissões totais cumulativas de CO₂ ultrapassaram 2.400 GtCO₂.^{iv}

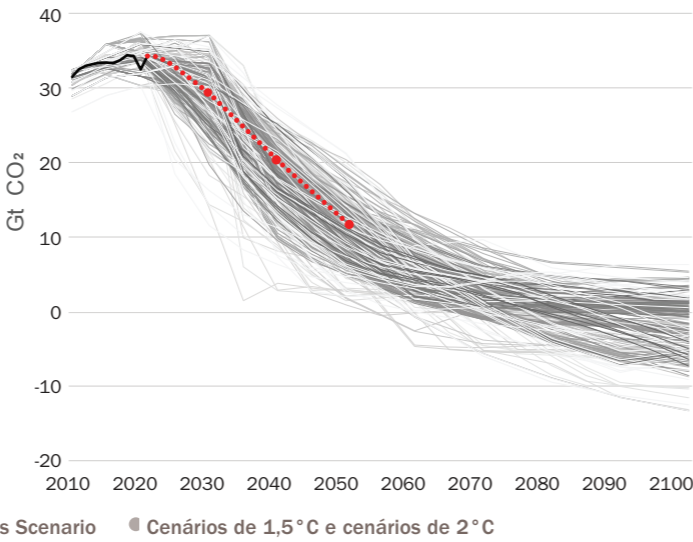
Para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C, o balanço de carbono restante é estimado em 400 GtCO₂.^v Esta é praticamente a mesma quantidade das emissões durante a última década. Para restringir o aquecimento global a 2°C, o orçamento de carbono restante é 2,9 vezes maior em 1.150 GtCO₂.^{vi} Isso significa que devemos agir imediatamente e implementar medidas de redução de emissões em todos os setores. Caso contrário, será impossível restringir o aquecimento global a 1,5°C.

Embutidos nos balanços de carbono do IPCC estão as reduções em outros gases de efeito estufa (por exemplo, CH₄, N₂O, SF₆, HFCs e CFCs) e aerossóis. O metano (CH₄) é um gás de efeito estufa muito potente, mais de 28 vezes mais potente que o CO₂ em um período de 100 anos, mas tem vida curta na atmosfera. Os aerossóis (pequenas

O Low Emissions Scenario comparado com as vias de emissão que correspondem ao aquecimento global de 1,5°C



O Low Emissions Scenario comparado com as vias de emissão que correspondem ao aquecimento global de 2°C



partículas ou gotículas no ar) têm um efeito intrínseco de resfriamento no clima, mas a principal fonte é a combustão de combustíveis fósseis, especialmente a energia do carvão, levando a um aquecimento global embutido a partir da transição energética para longe do carvão.

Um caminho de 1,5°C é mais drástico com uma necessidade de redução de 43% antes de 2030 e 84% em 2050.

Comparando o Low Emissions Scenario com os cenários do IPCC

Ao analisar os sistemas globais de energia, é natural fazer comparações entre o Cenário de Baixas Emissões e as vias de mitigação avaliadas pelo IPCC AR6. Comparamos o Cenário de Baixas Emissões com os três caminhos do IPCC a seguir: (i) Cenários de 2°C, (ii) Cenários de 1,5°C com overshoot (OS)ⁱ e (iii) Cenários de 1,5°C com limite/sem overshoot.^j Em geral, descobrimos que as mesmas soluções-chave são escolhidas para descarbonizar o sistema energético em todos os quatro casos, embora existam algumas diferenças em termos absolutos e a participação relativa das diferentes soluções.

O LOW EMISSIONS SCENARIO ESTÁ EM LINHA COM UM CAMINHO DE EMISSÕES DE 2°C

As emissões analisadas no Low Emissions Scenario são emissões de CO2 relacionadas à energia. Estas são as emissões da combustão de combustível. As emissões de CO2 relacionadas à energia representam cerca de três quartos das emissões globais de CO2.⁹⁹ No Low Emissions Scenario, as emissões globais de CO2 relacionadas à energia cairão mais de 60% entre agora e 2050, e

terminaremos com emissões anuais de cerca de 12 GtCO2 em 2050. Isso significa que as emissões de CO2 relacionadas à energia no Low Emissions Scenario estão alinhadas com as trajetórias de 2°C mais recentes do IPCC, mas ainda assim as reduções nas emissões não serão rápidas nem profundas o suficiente para alcançar um caminho de 1,5°C (Fig.37).ⁱⁱⁱ

O CENÁRIO DE BAIXAS EMISSÕES ESTÁ DE ACORDO COM OS CENÁRIOS DO IPCC PARA ELETRIFICAÇÃO

A eletrificação e a eficiência energética são as formas mais econômicas de reduzir as emissões. Essas também são as principais ferramentas de redução de emissões no Low Emissions Scenario e a participação da eletricidade na energia final está em linha com a mediana de 2°C cenários do IPCC (Figuras 38-41).^{iv}

ⁱ Um overshoot climático é um período em que o aquecimento global aumenta além da marca de temperatura antes de esfriar novamente.

ⁱⁱ Os gráficos foram elaborados em cooperação com Glen Peters, Diretor de Pesquisa, CICERO, e recuperado do último relatório AR6 e das análises da Statkraft

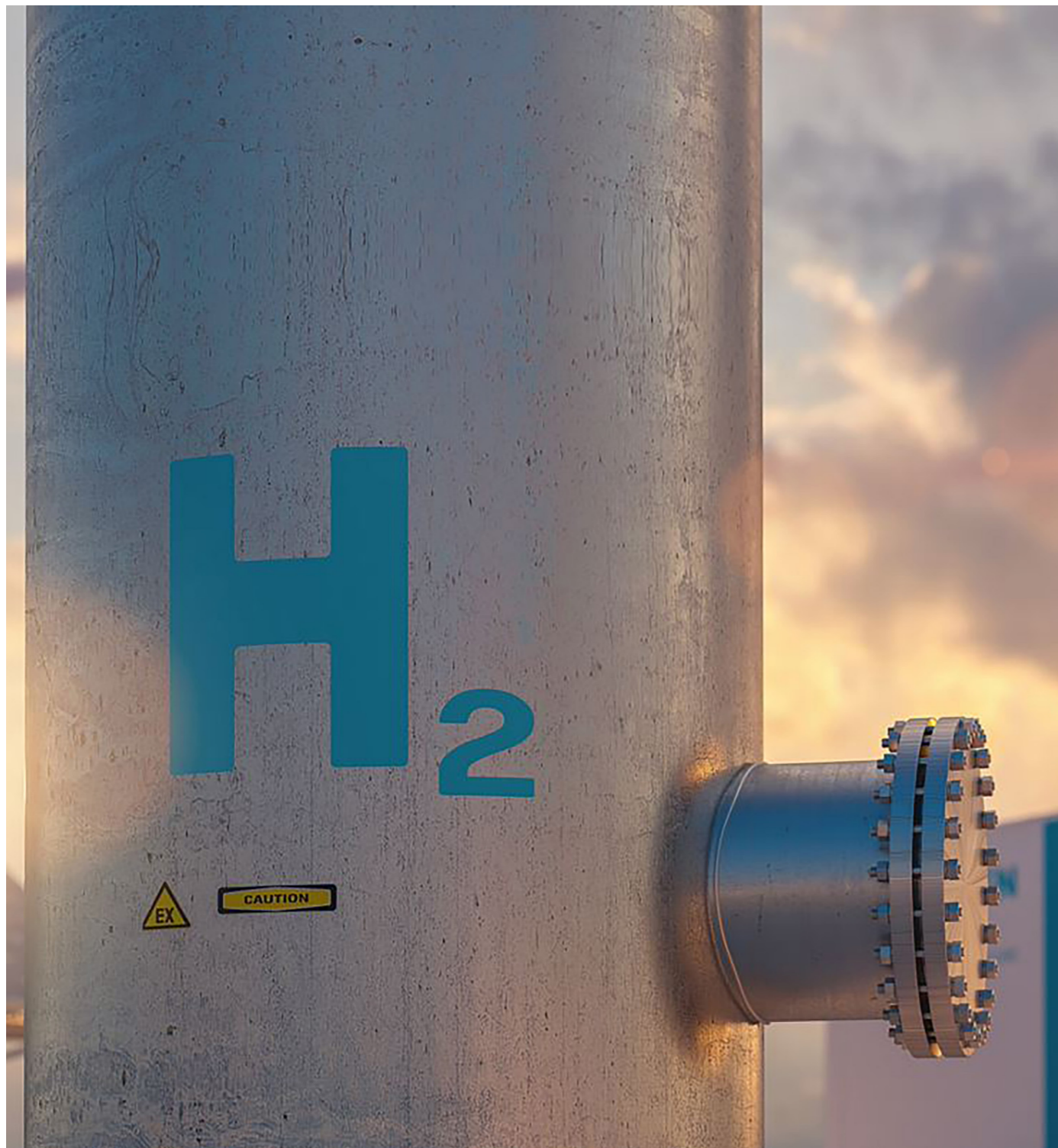
ⁱⁱⁱ Dizer que as vias de emissão correspondem ao aquecimento global de 1,5°C ou 2°C é uma simplificação. Os cenários de 1,5°C mostram as emissões de CO2 relacionadas à energia de cenários relatados ao IPCC AR6, que com 50% de probabilidade ou mais manterão o aquecimento global abaixo de 1,5°C no final do século. Mostramos apenas os cenários que relatam explicitamente as emissões de CO2 relacionadas à energia. Da mesma forma, os cenários de 2°C mostram os cenários do IPCC AR6 que, com 67% de probabilidade, limitarão o aquecimento global a menos de 2°C. A incerteza

ⁱ Mudanças Climáticas 2021: A Base da Ciência Física (AR6) Mudanças Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade (AR6II) Mudanças Climáticas 2022: Mitigação das Mudanças Climáticas (AR6III)
Estes serão seguidos pelo relatório de síntese final que deverá ser publicado em 2023.
ⁱⁱ Originado de atividades humanas
ⁱⁱⁱ O crescimento das emissões de gases de efeito estufa 2010-2020: +1,3%/ano, 2000-2010: +2,1%/ano+1,3%/ano, 2000-2010: +2,1%/ano
^{iv} Com um intervalo de confiança de 68%
^v Com uma incerteza de balanço de ± 220 GtCO2, com 67% de probabilidade.
^{vi} Com uma incerteza de balanço de ±220 GtCO2 com probabilidade de 67%

Esse efeito de aquecimento dos aerossóis reduzidos precisa ser contrabalançado por uma rápida redução de outros gases de efeito estufa, como o metano, mas geralmente são mais difíceis de limitar. De acordo com o IPCC, os caminhos de mitigação que limitam o aquecimento global a 1,5°C ou 2°C exigem que as emissões de GEE atinjam o pico antes de 2025.

Em comparação com os níveis de 2019, as emissões globais de GEE devem ser reduzidas em 27% nos próximos oito anos e 63% até 2050 para seguir caminhos de 2°C

<p>Eletricidade em energia final</p>	<p>Para 2030, a participação da eletricidade na energia final é quase idêntica nos quatro casos, enquanto para 2050, o Cenário de Baixas Emissões tem uma participação ligeiramente superior aos cenários de 2°C, mas está abaixo dos cenários de 1,5°C.</p>	<p>38 Participação da eletricidade na energia final (%) do relatório AR6III em comparação com o Low Emissions Scenario</p>
<p>Transporte</p>	<p>Os veículos elétricos serão cruciais para a redução das emissões no setor dos transportes. No Low Emissions Scenario, uma parcela de 31% da eletricidade na energia final para transporte é alcançada em 2050, o que é superior às parcelas dos três cenários do IPCC.</p>	<p>39 Participação da eletricidade no transporte (%) do relatório AR6III em comparação com o Low Emissions Scenario</p>
<p>Indústria</p>	<p>Para o setor industrial, a eletrificação é uma estratégia chave de descarbonização para indústrias “mais leves” orientadas para manufatura. Para 2030, o Low Emissions Scenario é essencialmente idêntico aos três casos do IPCC, enquanto as cotas de eletricidade para os cenários de 1,5°C com limite/sem overshoot são consideravelmente maiores para 2050.</p>	<p>40 Participação de eletricidade na indústria (%) do relatório AR6III em comparação com o Low Emissions Scenario</p>
<p>Edificações</p>	<p>A eletrificação de edifícios é geralmente uma medida de descarbonização econômica, especialmente ao utilizar bombas de calor. O Low Emissions Scenario é essencialmente idêntico aos cenários de 2°C, bem como aos cenários de 1,5°C com overshoot para 2030 e 2050. No entanto, os cenários de 1,5°C com limite/sem overshoot têm maiores participações de eletricidade em edifícios durante o período até 2050.</p>	<p>41 Parcela de eletricidade em edifícios (%) do relatório AR6III em comparação com o Low Emissions Scenario</p>



O USO DE HIDROGÊNIO NO LOW EMISSIONS SCENARIO É CONSISTENTE COM CENÁRIOS DE 1,5°C

Os transportadores alternativos de energia podem contribuir para a redução das emissões em setores que são difíceis de eletrificar diretamente (“difíceis de reduzir”). Embora atualmente não seja competitivo para aplicações em larga escala, espera-se que o hidrogênio limpo desempenhe um papel importante na descarbonização do sistema energético global. O uso de hidrogênio no Low Emissions Scenario é comparado ao espaço de resultados dos cenários do IPCC.

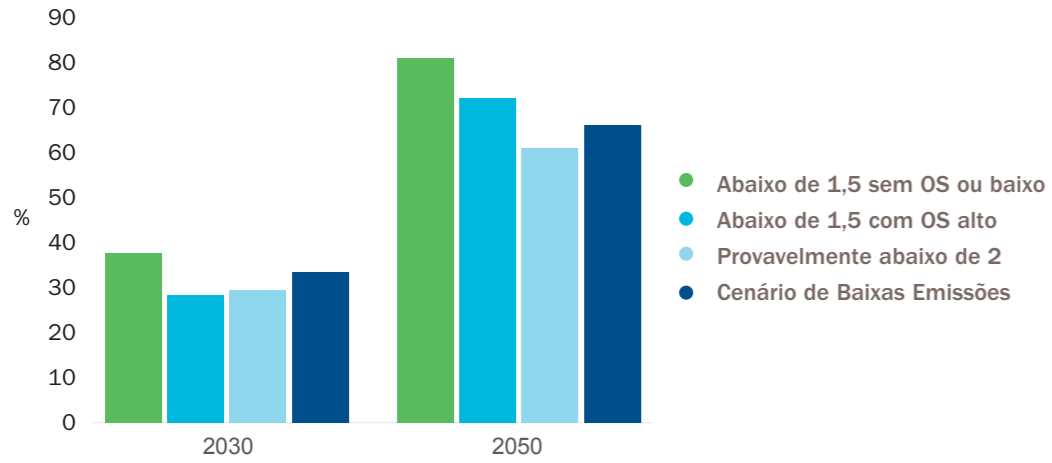
O espaço de resultados é definido como os valores nos percentis 25 e 75 em cenários que limitam o aquecimento a 2°C ou 1,5°C. Existem grandes incertezas na implantação do hidrogênio através dos diferentes cenários do IPCC. Limitar o aquecimento global a 2°C ou 1,5°C significa equilibrar as diferentes medidas. Embora o Low Emissions Scenario esteja na parte superior do espaço de resultados para o hidrogênio, também há cenários com muito mais implantação de hidrogênio necessária.

está relacionada a suposições sobre as emissões e o período de tempo que não são cobertos no Low Emissions Scenario e sobre o impacto dos gases de efeito estufa na temperatura global.

* Representa a mediana de um amplo conjunto de cenários

Hidrogênio em energia final	<p>No Low Emissions Scenario é relativamente otimista em relação ao desenvolvimento de hidrogênio limpo. Como visto, a participação do hidrogênio na energia final no Low Emissions Scenario é alguns pontos percentuais superior aos valores superiores até mesmo dos cenários mais ambiciosos do IPCC. Indo setor a setor, os resultados estão amplamente alinhados com os valores superiores dos cenários de 1,5 ° C.</p>	<p>42 Espaço de resultados para ações de hidrogênio limpo na energia final do IPCC AR6 comparado ao Low Emissions Scenario</p> <table border="1"> <caption>Data for Chart 42: Hydrogen share in final energy (%)</caption> <thead> <tr> <th>Year</th> <th>Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo</th> <th>Abaixo de 1,5 com alta OS</th> <th>Provavelmente abaixo de 2</th> <th>Baixa emissão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2030</td> <td>~0.5</td> <td>~0.5</td> <td>~0.5</td> <td>~0.5</td> </tr> <tr> <td>2050</td> <td>~6.0</td> <td>~6.0</td> <td>~4.5</td> <td>~7.5</td> </tr> </tbody> </table>	Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão	2030	~0.5	~0.5	~0.5	~0.5	2050	~6.0	~6.0	~4.5	~7.5
Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão													
2030	~0.5	~0.5	~0.5	~0.5													
2050	~6.0	~6.0	~4.5	~7.5													
Transporte	<p>Para o setor de transporte, a participação de hidrogênio no Low Emissions Scenario é essencialmente idêntica ao valor superior dos cenários de 2°C e 1,5°C em 2030. Em 2050, a participação no transporte é de 13%, alguns pontos percentuais abaixo do valor superior dos cenários de 1,5°C com limite/nenhum overshoot.</p>	<p>43 Espaço de resultados para ações de hidrogênio limpo no transporte do IPCC AR6 comparado ao Low Emissions Scenario</p> <table border="1"> <caption>Data for Chart 43: Hydrogen share in transport (%)</caption> <thead> <tr> <th>Year</th> <th>Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo</th> <th>Abaixo de 1,5 com alta OS</th> <th>Provavelmente abaixo de 2</th> <th>Baixa emissão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2030</td> <td>~0.5</td> <td>~0.5</td> <td>~0.5</td> <td>~0.5</td> </tr> <tr> <td>2050</td> <td>~13.0</td> <td>~11.0</td> <td>~8.5</td> <td>~13.0</td> </tr> </tbody> </table>	Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão	2030	~0.5	~0.5	~0.5	~0.5	2050	~13.0	~11.0	~8.5	~13.0
Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão													
2030	~0.5	~0.5	~0.5	~0.5													
2050	~13.0	~11.0	~8.5	~13.0													
Indústria	<p>Além dos transportes, a indústria é o setor em que se espera que o hidrogênio possa contribuir mais. Em 2050, a participação do hidrogênio na energia final do setor industrial chega a 9,5% no Low Emissions Scenario. Isso está um pouco atrás do valor dos cenários de 1,5°C com overshoot, mas por outro lado é mais alto que os valores superiores dos outros cenários. O uso de hidrogênio em matérias-primas da indústria vem complementar.</p>	<p>44 Espaço de resultados para ações de hidrogênio limpo na indústria do IPCC AR6 comparado ao Low Emissions Scenario</p> <table border="1"> <caption>Data for Chart 44: Hydrogen share in industry (%)</caption> <thead> <tr> <th>Year</th> <th>Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo</th> <th>Abaixo de 1,5 com alta OS</th> <th>Provavelmente abaixo de 2</th> <th>Baixa emissão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2030</td> <td>~1.0</td> <td>~1.0</td> <td>~1.0</td> <td>~1.0</td> </tr> <tr> <td>2050</td> <td>~8.0</td> <td>~10.0</td> <td>~5.0</td> <td>~9.5</td> </tr> </tbody> </table>	Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão	2030	~1.0	~1.0	~1.0	~1.0	2050	~8.0	~10.0	~5.0	~9.5
Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão													
2030	~1.0	~1.0	~1.0	~1.0													
2050	~8.0	~10.0	~5.0	~9.5													
Edificações	<p>Espera-se que o hidrogênio tenha um papel mais modesto na descarbonização de edifícios, pois um valor de aproximadamente 2% é alcançado em 2050 para o Low Emissions Scenario, que está muito próximo do valor superior dos cenários de 1,5°C com overshoot.</p>	<p>45 Espaço de resultados para ações de hidrogênio limpo na indústria do IPCC AR6 comparado ao Low Emissions Scenario</p> <table border="1"> <caption>Data for Chart 45: Hydrogen share in buildings (%)</caption> <thead> <tr> <th>Year</th> <th>Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo</th> <th>Abaixo de 1,5 com alta OS</th> <th>Provavelmente abaixo de 2</th> <th>Baixa emissão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2030</td> <td>~0.1</td> <td>~0.1</td> <td>~0.1</td> <td>~0.1</td> </tr> <tr> <td>2050</td> <td>~0.3</td> <td>~2.0</td> <td>~1.3</td> <td>~1.8</td> </tr> </tbody> </table>	Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão	2030	~0.1	~0.1	~0.1	~0.1	2050	~0.3	~2.0	~1.3	~1.8
Year	Abaixo de 1,5 sem OS ou baixo	Abaixo de 1,5 com alta OS	Provavelmente abaixo de 2	Baixa emissão													
2030	~0.1	~0.1	~0.1	~0.1													
2050	~0.3	~2.0	~1.3	~1.8													

46 Parcelas (valor mediano) de energia solar e eólica para os cenários de 1,5°C (com e sem overshoot) e o cenário provável do IPCC abaixo de 2°C comparado ao Low Emissions Scenario. A figura compara as participações de energia solar e eólica na geração de eletricidade (%)



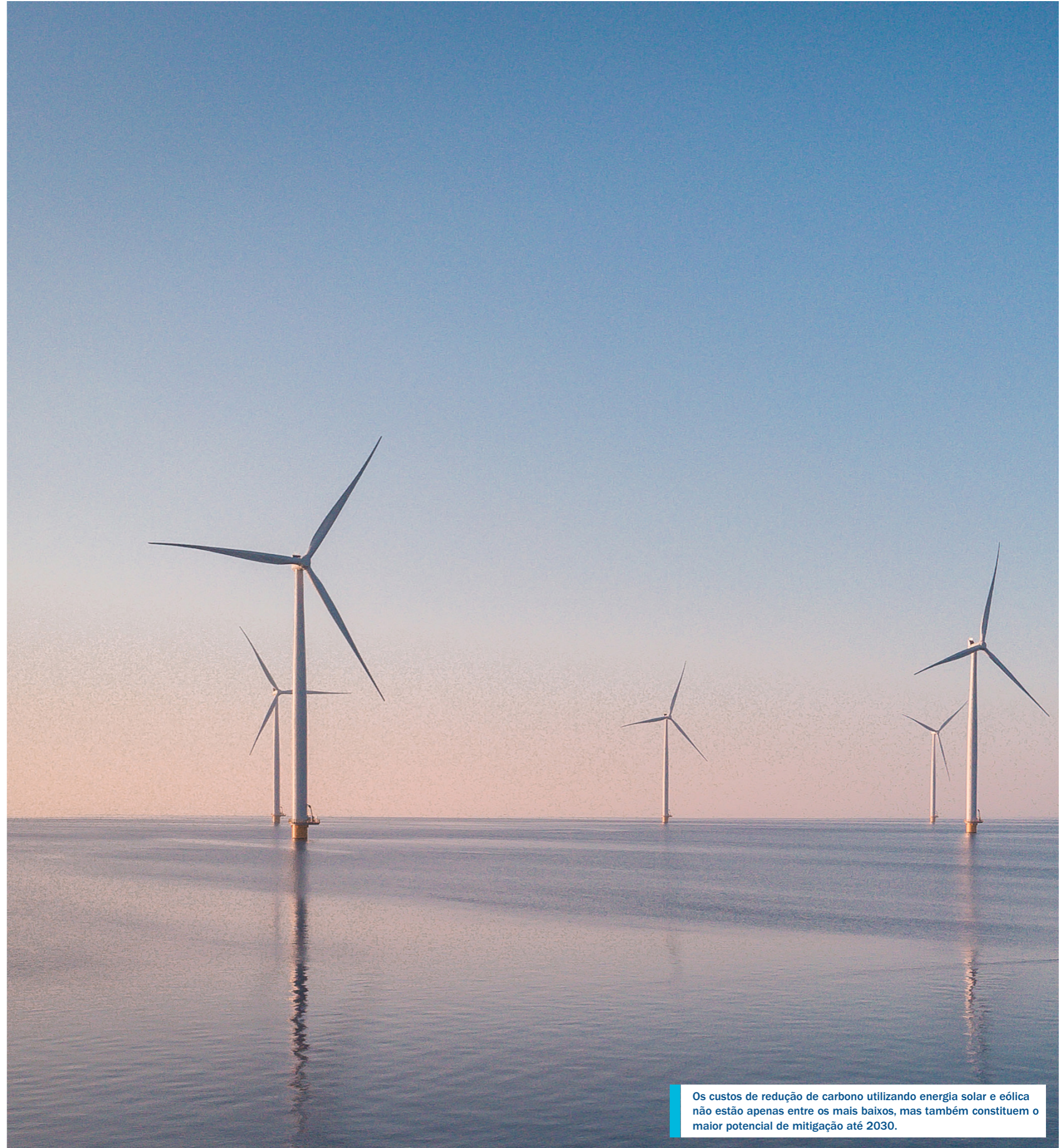
GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA NO LOW EMISSIONS SCENARIO É MAIOR DO QUE NOS CENÁRIOS 2 °C DO IPCC

Os custos de redução de carbono utilizando energia solar e eólica não estão apenas entre os mais baixos, mas também constituem o maior potencial de mitigação até 2030. De acordo com o relatório do IPCC AR6III, opções de mitigação que custam US\$ 100 ou menos por tonelada de equivalentes de CO2 removidos podem reduzir as emissões globais de GEE em mais de 50% antes de 2030, em comparação com os níveis de 2019. Além disso, metade dessas medidas custa menos de US\$ 20 por tonelada removida, incluindo uma grande contribuição da implantação de energia solar e eólica, juntamente com melhorias na eficiência energética. Para 2030, a participação da energia eólica e solar na geração de energia no Low Emissions Scenario é maior ou igual aos cenários IPCC 2°C e 1,5°C com overshoot, enquanto abaixo do mais otimista 1,5°C.

Em 2050, o Low Emissions Scenario atinge uma participação total de 66%, superior aos cenários de 2°C (Fig.46).

O LOW EMISSIONS SCENARIO VEM LONGE – MAS NÃO ATÉ 1,5 °C

No Low Emissions Scenario, o caminho das emissões é consistente com um aquecimento global de 2°C. Além disso, o nível de energia solar e eólica, eletrificação e hidrogênio limpo estão no mesmo nível de caminhos ainda mais ambiciosos do IPCC. No entanto, cada molécula de CO2 conta, portanto, para restringir o aumento de temperatura a 1,5°C, a transição precisa acelerar além do que é assumido no Low Emissions Scenario. Para chegar ao net zero, a última e mais cara molécula de CO2 precisa ser manuseada. Como essas últimas moléculas são extremamente difíceis de evitar, praticamente todos os cenários de 1,5°C incluem soluções de remoção de dióxido de carbono até 2050 e além, como florestamento, bioenergia com CCS e tecnologias de Captura Direta de Ar.



Os custos de redução de carbono utilizando energia solar e eólica não estão apenas entre os mais baixos, mas também constituem o maior potencial de mitigação até 2030.



O déficit energético europeu desafia a segurança energética e causa uma pobreza energética substancial. É necessária uma ação forte e imediata dos formuladores de políticas para mitigar os resultados mais graves no curto prazo.

Um ano de desafios sem precedentes deve acelerar a transição energética

Em tempos de guerra, com uma crise energética em curso e extrema incerteza política, prever o desenvolvimento dos mercados de energia é mais difícil do que nunca. O ritmo das decisões políticas acelerou na Europa e em outros lugares, à medida que a vulnerabilidade dos sistemas de energia baseados em fósseis se tornou dolorosamente evidente. O déficit energético europeu desafia a segurança energética e causa uma pobreza energética substancial. É necessária uma ação forte e imediata dos formuladores de políticas para mitigar os resultados mais graves no curto prazo.

A longo prazo, a crise energética mostrou que uma rápida transição para sistemas de energia dominados por energias renováveis é imperativa para melhorar a resiliência e a segurança energética, reduzindo a dependência dos países de regimes políticos instáveis e mercados voláteis de combustíveis fósseis. Está mais claro do que nunca que as energias renováveis e a eficiência energética são as principais soluções para abordar o trilema energético da sustentabilidade, acessibilidade e segurança do abastecimento. Na luta contra as alterações climáticas, a atual crise energética pode vir a ser um ponto de inflexão. Além da grave crise de energia, 2022 viu eventos climáticos extremos causarem sérios danos em muitas regiões do mundo. Esses eventos têm um impacto devastador, mas também podem aumentar a conscientização das pessoas sobre a necessidade de uma transição verde rápida. No Statkraft's Low

Emissions Scenario 2022, o impulso da opinião pública e da política de um lado, e mercados e tecnologias do outro, reforçam-se mutuamente e conduzem a transição energética para um caminho de 2 graus. A maneira mais rápida de reduzir as emissões é por meio de maior eficiência energética, investimentos em energia renovável e eletrificação do uso de energia em transportes, indústria e edificações.

A transição energética trará muitos pontos de inflexão tecnológicos nos próximos anos. As tecnologias de energia solar e eólica já são as tecnologias de geração de energia mais baratas na maior parte do mundo, e os veículos elétricos se tornarão competitivos em termos de custos com carros convencionais nos próximos anos. No Low Emissions Scenario, o hidrogênio verde torna-se competitivo em termos de custos em comparação com seu equivalente fóssil por volta de 2040. Essas mudanças para soluções mais limpas e sustentáveis, no entanto, exigem que as políticas e as forças do mercado trabalhem em conjunto e que a colaboração entre setores e países seja aprimorada. No mundo conflituoso que vemos hoje, a necessidade de uma forte cooperação internacional nunca foi tão urgente.

ANEXO 1
Parâmetros-chave no Statkraft's Low Emissions Scenario 2022, em comparação com IEA e BNEF ¹⁰¹

Setores	Statkraft's Low Emissions Scenario 2022	IEA STEPS (2021)	IEA Net zero (2021)	BNEF NEO (2021) Cenário Verde
Crescimento anual da demanda de energia primária 2020-50	-0.20 %	0.78 %	-0.27 %	-0.17 %
Setor de energia				
Demanda de energia, Crescimento anual 2020-50	2.9 %	1.87 %	3.31 %	5.41 %
Energia eólica Crescimento anual 2020-50	8.7 %	5.86 %	9.57 %	13.3 %
Energia solar, Crescimento anual 2020-50	11.5 %	8.51 %	11.8 %	11.3 %
Hidrelétrica, Crescimento anual 2020-50	1.6 %	1.47 %	2.24 %	-
Participação de fósseis no setor de energia (TWh, 2050)	11.5 %	31.9 %	0.36 %	0,0 %
Energia primária				
Consumo de petróleo: Crescimento anual 2020-50	-2.8 %	0.49 %	-4.56 %	-5.77 %
Consumo de gás: Crescimento anual 2020-50	-0.67 %	0.78 %	-6.69 %	-6.17 %
Consumo de carvão: Crescimento anual 2020-50	-3.83 %	-0.93 %	-12.06 %	-12.4 %
Emissões globais de CO2 relacionadas à energia (GtCO2) in 2050	12.0	33.9	0,0	0,0

ANEXO 2
Premissas e visão geral das emissões cobertas no Low Emissions Scenario

O Statkraft's Low Emissions Scenario estende as atuais tendências globais de energia 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 em uma projeção linear das tendências atuais, nem se baseia em uma determinada meta climática e realiza uma análise retroativa a partir desse ponto.

O Low Emissions Scenario analisa a evolução dos custos para tecnologias conhecidas até 2050, incluindo produção de energia renovável, baterias, hidrogênio livre de emissões, etc. O cenário pressupõe uma queda contínua e acentuada nos custos por MWh e um ritmo acelerado de desenvolvimento até cerca de 2030. A queda de custos então 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 Statkraft's Low Emissions Scenario 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 de mercado de energia nos países onde atuamos. Os modelos da Statkraft alimentam os mercados em detalhes, 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 se recuperará, no entanto, espera-se que a economia global e a demanda por energia permaneçam menores durante todo o período em comparação com as expectativas antes da pandemia de COVID-19 e da guerra.

QUAIS EMISSÕES SÃO ABRANGIDAS NO LOW EMISSIONS SCENARIO? As emissões analisadas no Low Emissions Scenario são as emissões de CO2 relacionadas à energia. Trata-se de emissões provenientes da combustão de combustíveis (excluindo a incineração de resíduos não renováveis. Outras emissões que não estão incluídas são emissões difusas (ou seja, emissões de vazamentos do transporte e armazenamento de combustível, etc) e emissões de processos industriais. As emissões de processo são as de reações químicas na produção de, por exemplo, produtos

ANEXO 3
Descrição do Modelo ETM

O Statkraft Energy Transition Model (ETM) foi usado para analisar diferentes caminhos europeus 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 oferta e demanda de energia. O modelo é baseado no GENeSYS- Mod desenvolvido pela Technische Universität Berlin ("Projetando um Modelo para o Sistema Global de Energia — GENeSYS-MOD: An Application of the Open Source Energy Modeling System (OSeMOSYS)" by

químicos, cimento e certos metais. Essas emissões não são provenientes da combustão e, portanto, não podem ser reduzidas usando eletricidade em vez de combustíveis fósseis. Estes não estão incluídos no Cenário de Baixas Emissões.

As emissões de CO2 provenientes do uso da terra, mudança de uso da terra e silvicultura (LULUCF) e outros gases de efeito estufa também estão excluídos do Low Emissions Scenario. As emissões são divididas no setor de energia, setor de edificação, setor de transporte, setor da indústria e uma categoria para outros setores:

- **Energia:** Emissões de usinas de energia, usinas de aquecimento e usinas combinadas de energia e aquecimento.
- **Edificação:** Emissões de edifícios residenciais, comerciais e institucionais, bem como outros edifícios não especificados. Tais emissões incluem, mas não estão limitadas a, salas de aquecimento e refrigeração, aquecimento de água, iluminação, aparelhos de cozinha e outros aparelhos.
- **Transportes:** Emissões do transporte de mercadorias e pessoas, incluindo emissões do transporte em vias públicas ou ferroviárias, transporte marítimo doméstico e transporte aéreo doméstico. Não estão incluídas as emissões do transporte de combustíveis por dutos. As emissões do transporte internacional são cobertas a nível internacional.
- **Indústria:** Emissões relacionadas com a combustão e produção de calor nas indústrias transformadoras e de construção. Isso inclui as emissões da produção de ferro e aço, indústria química e petroquímica, cimento e indústria de papel e celulose. Também estão incluídas as emissões de veículos que não são utilizados em vias públicas e aquecimento de edifícios industriais.
- **Outros setores:** Emissões do uso de energia na agricultura, além das emissões 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. A agricultura implica emissões relacionadas à energia da agricultura, silvicultura e pesca.

Konstantin Löffler, Karlo Hainsch, Thorsten Burandt, Pao-Yu Oei, Claudia Kemfert, e Christian Von Hirschhausen (2017).

Para fins de modelagem, assumimos que as importações serão usadas para cobrir a demanda de hidrogênio nas refinarias, indústria petroquímica e altos-fornos. A produção doméstica de hidrogênio é modelada para ser usada principalmente para produção de calor industrial, transporte, produção de combustíveis sintéticos, geração de energia e mistura com gás fóssil.

Referências

- 1 World Meteorological Organization's (WMO) (2022). The State of the Global Climate 2021: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>
- 2 IPCC (2021). AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- 3 CICERO (2021). Global CO2 emissions return to near pre-COVID pandemic levels: https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/files/Norway_CICERO_GCB2021.pdf
- 4 Reuters (2022). Record heatwaves drive EU's July excess deaths to 2022 high: <https://www.reuters.com/world/europe/record-heatwaves-drive-eus-july-excess-deaths-2022-high-2022-09-16/>
- 5 New Scientist (2022). Heatwave in China is the most severe ever recorded in the world: <https://www.newscientist.com/article/2334921-heatwave-in-china-is-the-most-severe-ever-recorded-in-the-world/>
- 6 UNICEF (2022). Devastating floods in Pakistan: <https://www.unicef.org/emergencies/devastating-floods-pakistan-2022>
- 7 BP (2022). Statistical Review of World Energy 2022 | 71st edition: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- 8 Ibid
- 9 Ibid
- 10 Ibid
- 11 Argus (2022). CIF ARA API 2 coal price reference definition: <https://www.argusmedia.com/en/methodology/key-prices/api-2-coal>
- 12 Wood Mackenzie (2022). Global thermal short-term outlook July 2022: <https://my.woodmac.com/document/150052916>
- 13 Reuters (2021) Column: China's five-year plan focuses on energy security: <https://www.reuters.com/article/us-column-china-energy-kemp-idUSKBN2BB1Y1>
- 14 IEA (2022). Energy Security: Reliable, affordable access to all fuels and energy sources: <https://www.iea.org/topics/energy-security>
- 15 IEA (2021). World Energy Outlook 2021 - Prices and Affordability: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/prices-and-affordability>
- 16 IEA (2022). Renewable Energy Market Update – May 2022: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022>
- 17 BNEF (2022). 1H 2022 LCOE Update: <https://www.bnef.com/insights/29271>
- 18 Wood Mackenzie (2022). China's renewables boom year poses major challenges to western markets: <https://www.woodmac.com/press-releases/chinas-renewables-boom-year-poses-major-challenges-to-western-markets/>
- 19 IEA (2022). Solar PV Global Supply Chains: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>
- 20 Bloomberg L.P (2022). Historical metal prices 01/01/2015 to 28/09/2022. Bloomberg Terminal. September 28, 2022
- 21 US Geological Survey (2022). Iron and Steel: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-steel.pdf>
- 22 Statkraft analysis
- 23 IEA (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- 24 Ibid
- 25 European Commission (2020). The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC122671>
- 26 BP (2022). Statistical Review of World Energy 2022 | 71st edition: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- 27 Harvard International Review (2021). Not So "Green" Technology: The Complicated Legacy of Rare Earth Mining: <https://hir.harvard.edu/not-so-green-technology-the-complicated-legacy-of-rare-earth-mining/>
- 28 IEA (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- 29 BNEF (2022). 1H 2022 Battery Metals Outlook: Supply Turbulence Ahead: <https://www.bnef.com/insights/29319/view>
- 30 Azevedo M., et al (2020). How clean can the nickel industry become?: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-clean-can-the-nickel-industry-become>
- 31 BNEF (2022). 1H 2022 Battery Metals Outlook: Supply Turbulence Ahead: <https://www.bnef.com/insights/29319/view>
- 32 IRENA (2022). Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2022: <https://www.irena.org/publications/2022/Jun/Tracking-SDG-7-2022>
- 33 Lee, N. et al. (2020). Hybrid floating solar photovoltaics-hydro power systems: Benefits and global assessment of technical potential: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120313252>
- 34 Gross, S. (2020). Renewables, land use, and local opposition in the United States: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2020/01/FP_20200113_renewables_land_use_local_opposition_gross.pdf
- 35 Mingyang Smart Energy (2021). Leading innovation: Ming-Yang Smart Energy launches MySE 16.0-242, the world's largest offshore Hybrid Drive wind turbine: <https://www.myse.com.cn/en/jtxw/info.aspx?itemid=825>
- 36 WindEurope (2022). Europe can expect to have 10 GW of floating wind by 2030: <https://windeurope.org/newsroom/news/europe-can-expect-to-have-10-gw-of-floating-wind-by-2030/>
- 37 GWEC (2022). New GWEC report identifies floating offshore wind's critical role in long-term global decarbonisation efforts: <https://gwec.net/report-outlines-enormous-potential-for-floating-offshore-wind-in-energy-transition/>
- 38 BP (2022). Statistical Review of World Energy 2022 | 71st edition: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- 39 Ibid
- 40 Morris, L. et al (2022). Russia's chokehold over gas could send Europe back to coal: <https://www.stripes.com/theaters/europe/2022-06-22/russia-chokehold-over-gas-europe-6426505.html>
- 41 UNFCCC (2021). Report of the conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf
- 42 World Nuclear News (2022). Macron sets out plan for French nuclear renaissance: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Macron-announces-French-nuclear-renaissance>
- 43 IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 44 European Commission (2022). Commission staff working document implementing the repower EU action plan: investment needs, hydrogen accelerator and achieving the bio-methane targets: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0230&from=EN>
- 45 Global ABC (2021). 2021 Global Status Report For Buildings And Construction: https://globalabc.org/sites/default/files/2021-10/GABC_Buildings-GSR-2021_BOOK.pdf
- 46 Green Finance Institute (2021). Unlocking the Trillions: <https://www.greenfinanceinstitute.co.uk/wp-content/uploads/2021/11/GFI-CEEB-EUROPE-REPORT.pdf>
- 47 IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 48 IEA (2022). Global EV Outlook 2022: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- 49 BNEF (2022). Electric Vehicles: <https://www.bnef.com/interactive-datasets/2d5d59acd9000014?data-hub=11>
- 50 BNEF (2022). Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales: <https://www.bnef.com/interactive-datasets/2d5d59acd9000014?data-hub=11>
- 51 IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 52 Ibid
- 53 Ibid
- 54 BP (2022). Statistical Review of World Energy 2022 | 71st edition: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- 55 Ibid
- 56 The Council of the EU and the European Council (2022). Fit for 55: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- The European Commission (2019). The European Green Deal: <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/>

- 57 Reuters (2022). Germany aims to get 100% of energy from renewable sources by 2035: <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/germany-aims-get-100-energy-renewable-sources-by-2035-2022-02-28/>
- 58 European Commission (2022). Commission staff working document implementing the repower EU action plan: investment needs, hydrogen accelerator and achieving the bio-methane targets: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0230&from=EN>
- European Commission (2022). Implementing REPowerEU Plan SWD: https://ec.europa.eu/info/publications/key-documents-repower_eu_en
- 59 European Commission. REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
- 60 European Commission (2022). Commission staff working document implementing the repower EU action plan: investment needs, hydrogen accelerator and achieving the bio-methane targets: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022SC0230&from=EN>
- 61 Ibid
- 62 IHA (2022). 2022 Hydropower Status Report: <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report>
- 63 Hoes, O. A. C. (2017). Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0171844>
- 64 IHA (2021). 2021 Hydropower Status Report: https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/60c37321987070812596e26a_IHA20212405-status-report-02_LR.pdf
- 65 IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 66 IRENA (2018). Power system flexibility for the energy transition: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf?la=en&hash=72EC26336F127C7D51DF798CE19F477557CE9A82
- 67 Statkraft analyses and IEA (2021). Hydropower Special Market Report; Analysis and forecast to 2030: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf
- 68 Statkraft analyses and IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 69 IEA (2021). Hydropower Special Market Report; Analysis and forecast to 2030: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf
- 70 BNEF (2022). Long-Term Electric Vehicle Outlook 2022: <https://www.bnef.com/flagships/ev-outlook>
- 71 Statkraft analyses and IEA (2021). Hydropower Special Market Report; Analysis and forecast to 2030: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf
- 72 EIA (2021). Hydropower explained: Hydropower and the environment: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/hydropower-and-the-environment.php>
- IEA (2021). Hydropower Special Market Report; Analysis and forecast to 2030: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf
- 73 Statnett (2021). Verdien av regulerbar vannkraft – Betydning for kraftsystemet i dag og i fremtiden: <https://www.statnett.no/contentassets/b82dcf206acc4762b2abcc3182e5bc52/verdien-av-regulerbar-vannkraft-statnett-mars-2021.pdf>
- 74 EU Horizon 2020 HydroFlex (2022). The HydroFlex project: <https://cordis.europa.eu/project/id/764011>
- 75 Mæhlum, L. & Rosvold, K. A. (2017). vannkraftverk i Store norske leksikon: <https://snl.no/vannkraftverk>
- Statkraft. Tokke power plant: <https://www.statkraft.com/about-statkraft/where-we-operate/norway/tokke-hydropower-plant/>
- Statkraft. Nedre Bersåvatn power plant: <https://www.statkraft.com/about-statkraft/where-we-operate/norway/nedre-bersavatn-hydropower-plant/>
- Statkraft. Mofjell power plant: <https://www.statkraft.com/about-statkraft/where-we-operate/norway/mofjellet-mini-power-plant/>
- 76 Statnett (2021). Verdien av regulerbar vannkraft; Betydning for kraftsystemet i dag og i fremtiden: <https://www.statnett.no/contentassets/b82dcf206acc4762b2abcc3182e5bc52/verdien-av-regulerbar-vannkraft-statnett-mars-2021.pdf>
- 77 Horizon 2020, Hydroflex (2018): Hydropower Providing Flexibility for a Renewable Energy System: Three European Energy Scenarios. A HydroFlex report: https://www.h2020hydroflex.eu/wp-content/uploads/2019/01/HydroFlex-Report_Three-European-Energy-Scenarios.pdf
- 78 Horizon 2020, Hydroflex (2018): Hydropower Providing Flexibility for a Renewable Energy System: Three European Energy Scenarios. A HydroFlex report: https://www.h2020hydroflex.eu/wp-content/uploads/2019/01/HydroFlex-Report_Three-European-Energy-Scenarios.pdf
- 79 IHA (2018). 2018 Hydropower Status Report: https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/iha_2018_hydropower_status_report_4.pdf
- UNECE (2021). Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf>
- 80 UNECE (2021). Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf>
- 81 Ibid
- 82 IHA (2021). Carbon emissions from hydropower reservoirs: facts and myths: <https://www.hydropower.org/blog/carbon-emissions-from-hydropower-reservoirs-facts-and-myths>
- 83 Benestad, R. E. et. al. (2022). Global hydro-climatological indicators and changes in the global hydrological cycle and rainfall patterns: <https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000029>
- World Meteorological Organization's (WMO) (2022). State of the Global Climate 2021: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178
- 84 IPCC (2021). AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- 85 Energi Norge (2018). Verdien av vassdragsreguleringer for reduksjon av flomskader: <https://www.energinorge.no/contentassets/368e1425713a4c3a8a47fce6dd86dffe/flomrapport-22-03-2018.pdf>
- 86 IEA (2020). IEA G20 Hydrogen report: Assumptions: https://iea.blob.core.windows.net/assets/29b027e5-fefc-47df-aed0-456b1bb38844/IEA-The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex_CORR.pdf
- 87 Climate Action Tracker (2021). The CAT Thermometer: <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>
- Energy&Climate Intelligence Unit (2022). Net Zero Tracker: <https://zerotracker.net/> (28.09.2022)
- 88 UNFCCC (2021). The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>
- 89 Climate Resource (2021). COP26 Briefing paper: Updated warming projections for NDCs: https://data.climateresource.com.au/ndc/20211109-ClimateResource-1-9C_to2-7C.pdf
- 90 European Commission (2022). Paving the way to COP 27: the Bonn Climate Change Conference: https://ec.europa.eu/clima/news-your-voice/news/paving-way-cop-27-bonn-climate-change-conference-2022-06-17_en
- 91 IEA (2022). World Energy Investment 2022: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022>
- 92 European Commission. EU taxonomy for sustainable finance: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities_en
- 93 Senate Dems (2022). Summary: The Inflation Reduction act of 2022: https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/inflation_reduction_act_one_page_summary.pdf
- 94 CRFB (2022). What's in the Inflation Reduction Act?: <https://www.crfb.org/blogs/whats-inflation-reduction-act>
- 95 The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations body for assessing the science related to climate change. IPCC was established in 1988 by the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environmental Programme (UNEP) to provide scientific information that can be used by various Governments to develop climate policies. The assessment reports provided by IPCC are the key input to the international climate change negotiations. The purpose of these reports is not to tell policymakers what to do, but instead provide a scientific foundation of the science related to climate change. The IPCC does not conduct their own research, but instead rely on already published scientific literature. A typical IPCC report is written by more than hundred authors, by reviewing and assessing more than ten thousand scientific publications. <https://www.ipcc.ch/about/>
- 96 IPCC (2022). AR6 WGII Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- IPCC (2022). AR6 WGIII Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
- 97 Climate Action Tracker (2021). The CAT Thermometer: <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>
- Energy&Climate Intelligence Unit (2022). Net Zero Tracker: <https://zerotracker.net/> (28.09.2022)
- 98 IPCC (2022). Data for Figure SPM.1 - Summary for Policymakers of the Working Group III Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/figures/summary-for-policymakers/figure-spm-1>
- Olivier J.G.J. (2021). Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: 2021 Summary report: <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2021-summary-report>
- 99 IEA (2021). Net zero by 2050 <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 100 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/models-and-data/ar6-scenario-explorer-and-database>. Other sources: Statkraft analysis, IEA WEO21
- 101 IEA (2021). World Energy Outlook 2021: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- 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/insights/26815>

LOW EMISSIONS SCENARIO
NS SCENARIO LOW EMISSIONS
LOW EMISSIONS SCENARIO
NS SCENARIO LOW EMISSIONS
LOW EMISSIONS SCENARIO
NS SCENARIO LOW EMISSIONS
NS SCEN' LOW EMISSIONS
LOW EMISSIONS SCENARIO
NS SCENARIO LOW EMISSIONS
LOW EMISSIONS SCENARIO
NS SCENARIO LOW EMISSIONS
LOW EMISSIONS SCENARIO
NS SCENARIO LOW EMISSIONS

