



# A MITIGAÇÃO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: OPÇÕES E ESTRATÉGIAS

As metas definidas pelo Acordo de Paris implicam transformações muito significativas para os diversos tipos de economias no mundo. As estratégias nacionais de mitigação das alterações climáticas e de transição energética revelam mudanças nos últimos anos, no sentido da diversificação das abordagens e de novas opções tecnológicas.

A redução das emissões de CO<sub>2</sub> necessárias para que a temperatura média do planeta não ultrapasse os 2°C (acima dos níveis pré-industriais), em 2050, vai exigir uma evolução radical nas economias. A este propósito, a Agência Internacional de Energia (IEA, em inglês) publicou, em 2021, o relatório “Net zero by 2050 – a Roadmap for the energy sector”, tendo sido editada nova versão em 2023. De acordo com este roteiro, o grupo das economias avançadas atingirão as emissões zero antes das economias emergentes e em desenvolvimento, chegando a emissões líquidas negativas em 2050. Destaca-se o papel principal das necessárias reduções de emissões pelo setor produtor de eletricidade, que constitui uma infraestrutura base da generalidade das economias. Num segundo grupo – em que são exigidas reduções muito significativas – incluem-se os setores dos transportes e o setor residencial. Estas são reduções muito mais pronunciadas do que as que seriam exigidas para o setor industrial (Figura 1).

Estas reduções setoriais de emissões têm consequências potenciais na produção de e carvão, petróleo e gás natural, com uma radical redução na respetiva produção no horizonte 2050, em várias regiões (Figura 2). No que respeita ao carvão, as reduções de produção exigidas incidirão na Ásia Pacífico, enquanto as reduções de produção de petróleo incidirão no Médio Oriente e, em menor escala, na América do Norte e na Eurásia; por sua vez, as reduções de produção de gás natural incidirão na América do Norte, Eurásia e Médio Oriente. O roteiro da IEA é muito claro sobre o modo como encara a transição energética, ou seja, como um processo que envolve uma redução drástica na utilização dos designados “combustíveis fósseis”, em contrapartida da utilização de outras fontes de energia primária e/ou inovações

na transformação energética, que deverão desenvolver-se até 2050 (Figura 3).

## As estratégias nacionais de mitigação das alterações climáticas e as suas opções tecnológicas – ou as “várias cores do verde”

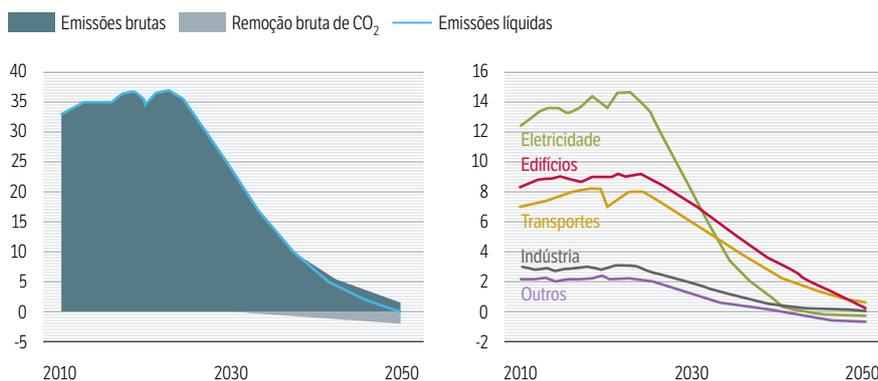
O Acordo de Paris comprometeu a comunidade internacional a atuar no sentido de, até 2050, ter em curso um processo de redução drástica das emissões de CO<sub>2</sub> que permitisse controlar a elevação da temperatura do planeta, situando-a abaixo dos 2°C. Este acordo internacional deixou a cada Estado a responsabilidade de definir estratégias para atingir a sua quota parte nesse esforço, naturalmente sem qualquer indicação acerca das tecnologias disponíveis e a desenvolver para poder atingir essas metas. Os países têm de definir estratégias nacionais, fora de qualquer coordenação em termos do desenvolvimento, em parceria, de novas tecnologias. As transformações que as metas definidas exigem e/ou implicam são muito significativas para os diversos tipos de economias mais relevantes no crescimento da economia mundial, em que se distinguem: (a) as economias desenvolvidas; (b) as grandes

economias emergentes da Ásia; (c) as economias energéticas – ou seja, as que têm na exportação de hidrocarbonetos a sua principal fonte de receitas externas. Para cada um desses tipos de economias, a obtenção da neutralidade carbónica terá diferentes exigências e consequências a nível nacional.

No caso das economias desenvolvidas, o encerramento de atividades, de instalações industriais e de infraestruturas energéticas exigidas pela redução das emissões traduzir-se-á num processo de destruição de capital, numa escala e num intervalo de tempo que só costumava acontecer em guerras entre grandes potências. Além disso, supõe, ao mesmo tempo, um investimento maciço em novas infraestruturas e equipamentos necessários para atingir a neutralidade carbónica, para não gerar uma queda significativa do nível de atividade nessas economias. No caso das economias emergentes, nomeadamente da Ásia (China e Índia), significará um grande desvio de investimento – que, de outro modo, seria orientado para o crescimento e para a melhoria do nível de vida das populações – em favor da substituição de infraestruturas e

**FIGURA 1. EXIGÊNCIAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES COM EFEITO DE ESTUFA POR SETORES DE ATIVIDADE, PARA ATINGIR AS EMISSÕES LÍQUIDAS ZERO (NET ZERO) ATÉ 2050 – ROTEIRO DA IEA.**

Fonte: IEA, “Net zero by 2050- a Roadmap for the energy sector”, 2023.  
Nota: Valores em Gt CO<sub>2</sub> = Gigatoneladas de dióxido de carbono.



de instalações industriais e energéticas já existentes, com destaque para as que envolvam queima de carvão (que é o recurso energético mais abundante nos seus territórios).

Relativamente às economias energéticas – da Rússia às economias do Médio Oriente, da Ásia Central ou da África –, a estratégia proposta pela IEA poderá significar uma quebra muito significativa de receitas obtidas no exterior, com base nas quais são financiados os respetivos orçamentos nacionais.

Existirão, naturalmente, diferentes estratégias nacionais a nível dos Estados, em cada um destes tipos de economias. Neste contexto, por um lado, considerou-se que todas as estratégias nacionais irão incluir uma componente muito significativa de recurso às energias renováveis e ao avanço na armazenagem da eletricidade produzida pelas energias renováveis. Por outro lado, considerou-se que as estratégias nacionais irão divergir em torno de duas questões:

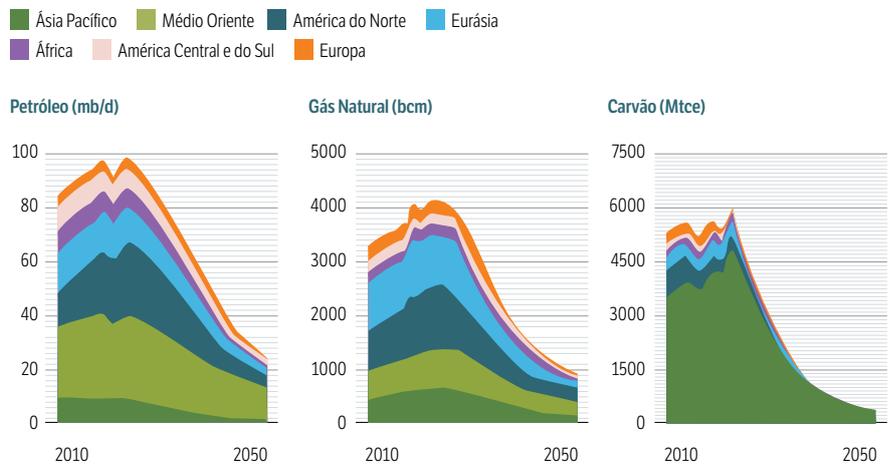
- Em primeiro lugar, divergência na abordagem que os países terão quanto à inclusão da energia nuclear, quer sob forma das novas soluções da 4ª geração dos reatores de fissão nuclear, quer pela antecipação no tempo da fusão nuclear compacta. Esta divergência consiste, portanto, na aceitação versus a rejeição do nuclear.
- Em segundo, lugar, divergência na abordagem que esses países terão relativamente aos hidrocarbonetos – nomeadamente do gás natural – utilizando-os para substituir o carvão em várias das suas presentes utilizações, ou optando também pelo seu uso para a obtenção de hidrogénio, sem emissão de CO<sub>2</sub>. Esta divergência materializa-se, assim, no contraste entre uma substituição versus uma reformulação do uso dos hidrocarbonetos.

Numa primeira aproximação às opções de um conjunto de Estados ou de organizações de Estados (EUA, Japão, Reino Unido, UE, China, Índia, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos), obteve-se a distribuição dos países por quadrantes, constante da Figura 4, no que respeita ao mix de energias primárias que esses países incluem nas suas estratégias de mitigação das alterações climáticas e na mudança para um novo paradigma energético mundial – designado de “os vários caminhos do verde”.

### FIGURA 2. REDUÇÕES NA PRODUÇÃO DE CARVÃO, PETRÓLEO E GÁS NATURAL NO HORIZONTE 2050 EXIGIDAS PELAS REDUÇÕES DE EMISSÕES, POR MACRO REGIÕES NO MUNDO

Fonte: IEA, “Net zero by 2050- a Roadmap for the energy sector”, 2023.

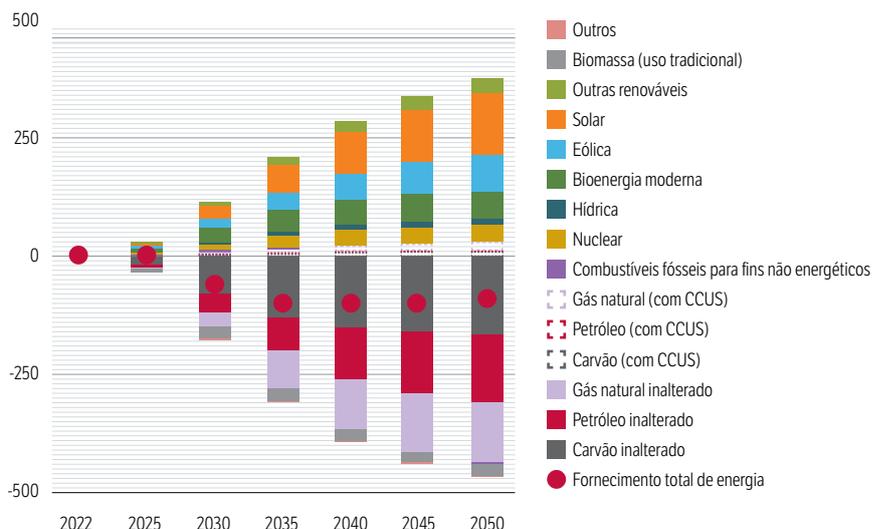
Notas: mb/d = milhões de barris por dia; bcm = mil milhões de metros cúbicos; Mtce = milhões de toneladas de carvão equivalente.



### FIGURA 3. FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVAS EM CONTRAPARTIDA DAS REDUÇÕES NA PRODUÇÃO DE CARVÃO, PETRÓLEO E GÁS NATURAL (abordagem da IEA)

Fonte: IEA, “Net zero by 2050- a Roadmap for the energy sector”, 2023.

Nota: CCUS = captura, armazenamento e reutilização do carbono. O gás natural, petróleo e carvão inalterados referem-se ao uso destes combustíveis para fins de combustão sem CCUS.

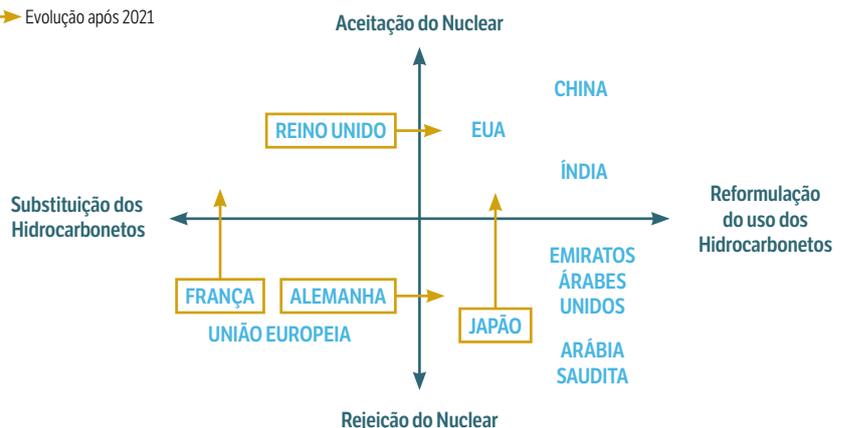


### FIGURA 4. DISTRIBUIÇÃO DOS PAÍSES PELAS SUAS ESTRATÉGIAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, POR QUADRANTES, COM A EVOLUÇÃO NAS ABORDAGENS PÓS-2021

(países selecionados)

Fonte: Elaborado pelo autor.

→ Evolução após 2021



Conforme observado na Figura 4 (sem considerar as linhas/setas a amarelo), conclui-se que:

- Os países do 1º e 2º quadrantes – duas economias desenvolvidas (EUA e Japão), duas economias emergentes (China e Índia), uma economia energética (Arábia Saudita, com tecnologia do Japão) – estão a optar por incluir no seu novo mix a reformulação na utilização do gás natural e do petróleo, nomeadamente utilizando-os para extrair hidrogénio ou obter amónia para exportação.
- O que distingue o 1º e o 2º quadrante é a inclusão do nuclear; neste caso, os EUA e as duas economias emergentes da Ásia (China e Índia) partilham da mesma vontade de recorrer ao nuclear (incluindo os reatores de 4ª geração) e, no caso dos EUA, de incluir igualmente o avanço para a criação de um setor industrial de fusão nuclear, compacta.
- No 4º quadrante, o Reino Unido inclui na sua estratégia o nuclear de 4ª geração, em combinação com as energias renováveis.
- No 3º quadrante, a União Europeia começou por rejeitar quer o nuclear quer a extensão e reformulação no uso do gás natural e, desse ponto de vista, contrasta com os restantes quadrantes, centrada como está nas energias renováveis e no hidrogénio (desde que verde, ou seja, obtido por eletrólise da água, utilizando eletricidade de fontes renováveis).

### Um aprofundamento de estratégias possíveis, no sentido da diversificação das abordagens

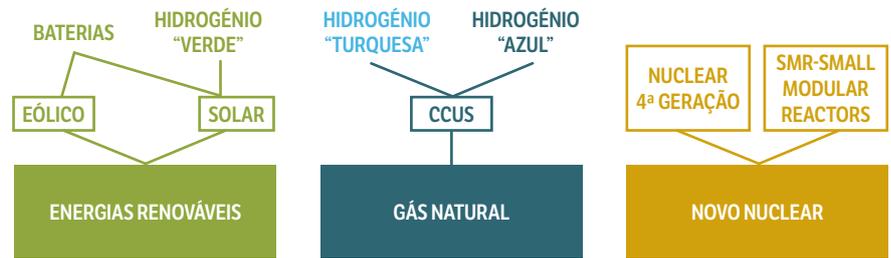
A Figura 5 resume vetores possíveis para serem combinados nas Estratégias Nacionais, enriquecendo-as.

Em primeiro lugar, destaca-se o armazenamento de eletricidade obtida a partir de energias renováveis – solar e eólica. A expansão da utilização destas fontes de energias renováveis deveria ser acompanhada por um investimento que permitisse ultrapassar três das suas maiores limitações: serem formas de energia difusa e não densa, serem intermitentes e não de uso permanente, e não serem armazenáveis na forma de energia primária. Tal deve avançar em paralelo com a sua difusão, com o investimento na armazenagem em larga escala da eletricidade obtida.

Um dos exemplos são os EUA, que deverão acrescentar 14,3 gigawatts de arma-

**FIGURA 5. VETORES POSSÍVEIS A INTEGRAR NAS ESTRATÉGIAS NACIONAIS, TENDO EM CONTA TECNOLOGIAS EM DESENVOLVIMENTO**

Fonte: Elaborado pelo autor.



zenamento em baterias, o que representa 23% de toda a nova capacidade das centrais elétricas a instalar no país. Os analistas do clima há muito que apelam a uma expansão maciça do armazenamento para facilitar a mudança para a energia com baixo teor de carbono – e isto está, finalmente, a começar a acontecer. O aumento do número de baterias nos EUA, em dois dos estados, Califórnia e Texas, sublinha o facto de o armazenamento de energia em baterias ser uma parte cada vez mais importante do sistema de eletricidade do país. De entre os sistemas de armazenamento de eletricidade em curso de instalação nos EUA pode destacar-se um novo tipo de baterias, originalmente desenvolvidas pela NASA e atualmente fabricadas pela ELESTOR, que podem também ser utilizadas numa grande variedade de aplicações industriais.

Em segundo lugar, o investimento em sistemas de captura, armazenamento e reutilização do carbono emitido na economia (CCUS), sendo o Japão um exemplo desta abordagem. A Organização Japonesa para os Metais e Segurança Energética (JOMEC) selecionou sete projetos iniciais em todo o território, para começar a armazenar o carbono emitido no Japão até 2030. A reciclagem de carbono, que reformula o papel do carbono como um recurso a ser aproveitado de forma correta, é considerada pelo Japão como uma tecnologia chave para atingir o seu objetivo da neutralidade carbónica.

Em terceiro lugar, prevê-se um papel significativo para o hidrogénio. Neste sentido, pretende-se recorrer ao hidrogénio como carrier energético ou como combustível nas suas diversas “cores” (ou seja sob os diversos modos de o obter). São estas, (i) o Hidrogénio Verde, obtido por eletrólise da água, realizada com o recurso a eletricidade produzida com base em energias renováveis; o Hidrogénio Azul, obtido a partir do petróleo e do gás natural por processos

químicos, que podendo libertar CO2 em quantidades limitadas, contam com a captura e armazenamento do carbono, como complemento; e o Hidrogénio Turquesa, obtido por pirólise do gás natural, obtendo em paralelo carbono no estado sólido, em forma de pó. Recorde-se que o hidrogénio pode ser utilizado para produzir eletricidade e água com o recurso aos diversos tipos de células de combustível, ou pode servir para acionar microturbinas que sirvam para fazer funcionar geradores de eletricidade.

Em quarto lugar, destacam-se os novos materiais, como o grafeno. Os materiais derivados do carbono vão desempenhar no futuro um papel central no sistema económico, quer em termos de materiais estruturais quer de materiais funcionais, incluindo fibras de carbono, nanotubos de carbono e grafeno. O grafeno é uma tecnologia disruptiva, cujas aplicações vão desde a energia à biomedicina, a eletrónica, as membranas e os sensores. Uma das formas de obtenção de grafeno que está em desenvolvimento nos EUA é a sua obtenção partir do gás natural.

Em quinto lugar destaca-se a energia nuclear de 4ª geração e os reatores SMR (Small Modular Reactors). Vários projetos e investimentos têm sido implementados nos EUA – como o NATRIUM, um projeto que aliou a Terra Power (de Bill Gates) e a GE-Hitachi com a experiência do seu reator a PRISM – e no Reino Unido – o desenvolvimento pela Rolls Royce, em parceria com a Westinghouse Electric Company UK de reatores SMR. Um reator destes permitirá gerar 470MW de energia de baixo carbono, o equivalente a 150 turbinas eólicas. Uma única central de energia SMR poderá fornecer energia a um milhão de agregados familiares e apoiar tanto os processos de eletricidade na rede (on-grid) como soluções de energia limpa fora da rede (off-grid), permitindo a descarbonização de processos industriais e

a produção de combustíveis mais limpos, como os combustíveis sustentáveis para a aviação e o hidrogénio verde, o que pode contribuir para a transição energética em setores como os transportes.

### Alterações nos programas nacionais pós-2021

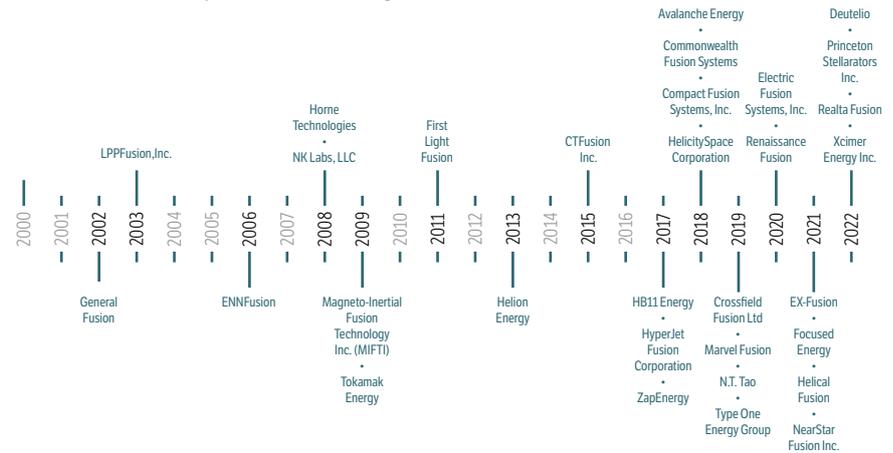
Nos últimos três anos, são de assinalar mudanças ou investigações em curso que podem vir a alterar as estratégias de transição energética de alguns dos Estados e organizações anteriormente referidas. Designadamente, em 2024, o Japão renovou o interesse pela energia nuclear como componente da sua estratégia de transição, com destaque para os SMR.

Na Europa, a União Europeia modificou a sua abordagem inicial e reconheceu que o nuclear poderá ser um componente da estratégia de transição energética compatível com as exigências climáticas. Neste contexto, a França mostrou muito interesse nos SMR, tal como acontecera com o Reino Unido. Na Alemanha, a maior empresa química (a BASF) mostrou interesse em avaliar o potencial de uma tecnologia de obtenção de hidrogénio a partir do gás natural (Hidrogénio Turquesa) e que estava a ser desenvolvida numa instituição de investigação alemã. Por sua vez, o Reino Unido reforçou a importância atribuída ao hidrogénio na sua estratégia de transição, admitindo mais do que uma via para a obtenção do hidrogénio (eletrolítica e química). Estas evoluções nos caminhos a seguir pelas estratégias nacionais de transição energética estão explanadas na Figura 4 (conforme assinalado pelas linhas/setas a amarelo).

Para cumprir até 2050 o objetivo de reduzir drasticamente as emissões de CO2, verifica-se a existência de caminhos diferenciados. Num dos caminhos possíveis, essa redução é perspetivada reduzindo de forma radical o papel dos hidrocarbonetos no mix energético mundial e substituindo-os por um novo paradigma: energias renováveis + mobilidade elétrica a baterias + hidrogénio por via eletrolítica alimentada por energias renováveis. Esta é a estratégia da União Europeia. Noutro caminho, a redução das emissões é prosseguida mudando a forma de utilização dos hidrocarbonetos, ou seja, não os queimando, mas processando-os para obter combustíveis mais ricos em hidrogénio, ou hidrogénio sem emissão de CO2 + obtenção de materiais ricos em carbono. Esta é a estratégia do Japão (ver Caixa).

### FIGURA 6. FUSÃO NUCLEAR: UMA DINÂMICA EMPRESARIAL EM ASCENSÃO

Fonte: Fusion Industry Association.  
Nota: 1992: Princeton Fusion Systems; 1998: TAE Technologies



### Em busca de um novo paradigma energético mundial: soluções tecnológicas

Atingir a neutralidade carbónica em 2050 exige mais avanços em novas tecnologias. Existem apostas promissoras para o futuro, às quais devemos dar atenção, como é o caso das investigações em curso sobre fusão nuclear e eletrificação.

Os EUA, o Reino Unido e outros países criaram a Associação das Indústrias da Fusão Nuclear, que integra empresas desenvolvendo vários percursos tecnológicos para a fusão nuclear compacta, em parte orientados para a produção de eletricidade. Enquanto a energia nuclear atual é de fissão, ou seja, consiste na separação de uma molécula, a fusão nuclear visa juntar elementos que assim produzem quantidades enormes de energia, apresentando grandes potencialidades. Se em 2010 existiam dez empresas privadas a explorar tec-

nologias de fusão nuclear, em 2023 já eram mais de quarenta (Figura 6). A maioria são nos EUA, que pretendem ser os inovadores das novas fontes energéticas, mas também estão situadas no Reino Unido, Alemanha, França, Israel e China. A lista das empresas, a tecnologia que estão a desenvolver, qual o estádio em que se encontram e quais as dificuldades que estão a encontrar são informações disponíveis publicamente. Este é um contributo importante que os países mais desenvolvidos poderão dar para a transformação do mundo.

Em conclusão, está longe de ser claro que soluções tecnológicas acabarão por ser dominantes na obtenção das metas definidas no Acordo de Paris. Mas parece claro que a competição tecnológica em curso entre empresas e Estados será decisiva para saber que potências e Estados se irão destacar na primeira metade do século XXI. ●

### O CASO DO JAPÃO

A estratégia de mitigação prosseguida pelo Japão oferece um exemplo para conseguir realizar uma transição energética equilibrada. Há mais de quinze anos, o país decidiu apostar no hidrogénio, indo buscá-lo em parte às energias renováveis e em parte aos combustíveis fósseis. Nesse sentido, encetou uma estratégia de investigação tecnológica que lhe permite ter a tecnologia necessária para extração, armazenamento e distribuição desse hidrogénio, contido na amónia.

O país integrou na sua Estratégia do Hidrogénio a criação de parcerias com outros Estados para ampliar a base de produção de hidrogénio sem emissão de CO2 que pudesse ser utilizada, após transporte marítimo, no Japão. Assim, para além de uma primeira experiência de obtenção de hidrogénio a partir de carvão na Austrália, estabeleceu depois uma parceria com a Arábia Saudita (ao que se juntam agora outros países da região, como os Emirados Árabes Unidos), uma vez que estes países estão confrontados com a necessidade de, nas próximas décadas, reduzirem drasticamente a venda do petróleo e gás natural que produzem para queima.

O Japão tem desenvolvido as tecnologias para transformar petróleo em hidrogénio com poucas emissões e para fazer a sua captura e o sequestro, produzindo hidrogénio azul e principalmente amónia (líquida), dos quais a Arábia Saudita e outros países da região se podem tornar exportadores diretos. Esta é uma situação win-win, com benefícios mútuos. A amónia pode ser queimada “em usinas térmicas sem libertar emissões de carbono, tendo potencial para contribuir significativamente para um futuro de energia de baixo carbono acessível e confiável”, como afirma a empresa estatal ARAMCO da Arábia Saudita.