

ACADEMIA DAS CIÊNCIAS DE LISBOA
MONOGRAFIAS • VOLUME 2

ENERGIA:
Perspetivas a médio e longo prazo
Parte 1

Rui Vilela Mendes (Editor)



LISBOA • 2024

Título: Energia: Perspetivas a médio e longo prazo

Editor: Rui Vilela Mendes

Série: Monografias da Academia das Ciências de Lisboa — Vol. 2

Edição: Academia das Ciências de Lisboa (<https://www.acad-ciencias.pt/>)

Data de edição: dezembro de 2024

ISBN: 978-972-623-417-3

DOI: <https://doi.org/10.58164/wnfv-bz25>

ENERGIA:
Perspetivas a médio e longo prazo
Parte 1

Rui Vilela Mendes (Editor)

INDICE

Parte 1

PREÂMBULO – <i>José Luís Cardoso</i>	III
SÍNTESE DO GRUPO DE TRABALHO	V
1. CONTEXTO DA PROBLEMÁTICA DA ENERGIA	
Reflexão sobre Sociedades Modernas e Energia	1
<i>João Caraça</i>	
Energia, Clima e Crises	13
<i>Filipe Duarte Santos</i>	
2. FONTES DE ENERGIA	
Contribuição para o tema Energias Renováveis. Implicações para uma abordagem mais profunda do tema da Energia	59
<i>Manuel Collares Pereira</i>	
Energia Nuclear de Cisão	141
<i>José G. Marques e M. Felizardo</i>	
Energia Nuclear de Fusão	169
<i>Bruno Soares Gonçalves</i>	
Metais na Transição Energética	209
<i>Fernando Barriga</i>	
A Energia Geotérmica: um parceiro incontornável na transição energética	227
<i>Luís Oliveira e Silva e Amílcar Soares</i>	
Hidrogénio Renovável H ₂ (V) Um combustível para a Transição Energética	239
<i>José João Campos Rodrigues</i>	

Parte 2

3. TECNOLOGIAS DA ENERGIA

Regulação do Setor Elétrico 1

João Santana

Segunda Eletrificação 11

Pedro Carvalho

Transição Energética: A Contribuição da Geologia 29

Cristina Rodrigues, Henrique Pinheiro e Manuel Lemos de Sousa

O Papel da Indústria do Petróleo e Gás na
Transição Energética 61

Amílcar Soares

4. ANÁLISES JURÍDICO-ECONÓMICAS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Introdução e Enquadramento
Tecnologia e Sociedade com Soc. & Tec. 10 anos depois 69

Jorge Braga de Macedo com Miguel Rocha de Sousa

Modelo de referência para avaliação do esforço necessário
para a redução das emissões de CO₂: Emissões Globais, emissões
dos seis maiores poluidores e emissões de Portugal 99

José Manuel Belbute e Alfredo Marvão Pereira

Descarbonização da Economia Portuguesa:
Desafios e Oportunidades 123

Alfredo Marvão Pereira e Rui Pereira

Ambiente e Mercado Voluntário Carbono:
dilemas jurídico-económicos 135

Miguel Rocha de Sousa e António Goucha Soares

A economia política da transição energética:
enquadramento europeu e políticas nacionais 159

Annette Bongardt e Francisco Torres

Transição energética e direito da política
pública da energia 185

Maria da Glória Garcia

PREÂMBULO

A presente monografia, integrada na coleção de publicações digitais da Academia das Ciências de Lisboa (ACL), permite concretizar e dar novo ímpeto a um objetivo essencial da ACL desde a sua criação: a demonstração da relevância do conhecimento científico para a construção de um mundo melhor. A ciência pode e deve contribuir para a definição de políticas públicas que contribuam para a felicidade humana num planeta que carece de cuidados urgentes.

Os decisores políticos necessitam de fundamentação rigorosa das orientações estratégicas e das opções de curto prazo a que têm de responder e de corresponder. Cada vez mais se reconhece que o êxito das orientações e o sucesso das políticas dependem da qualidade do aconselhamento científico, sobretudo nas matérias em que, como é o caso da energia, as decisões têm de ser tomadas com base em informação técnica precisa e conhecimento rigoroso. Perante atitudes negacionistas acerca da relevância da ciência, a missão dos cientistas empenhados em contribuir para a concretização de objetivos de desenvolvimento sustentável adquire um estatuto de enorme responsabilidade cívica e política.

No caso da temática aqui em apreço, trata-se de confirmar que a desejável e indispensável transição energética, que permita diminuir a dependência de combustíveis fósseis e encontrar soluções eficientes de produção e distribuição de energia com recurso crescente a fontes renováveis, exige um conhecimento consolidado sobre as alternativas que podem ser objeto de exploração.

É frequente ouvirmos exclamações de preocupação ou de pânico sobre os riscos associados a alterações climáticas provocadas pela persistente e crescente deterioração da relação entre o homem e o meio ambiente. A evidência demonstrada pelos dados sobre emissão de gases com efeito de estufa, ou sobre o aquecimento a uma escala global de continentes e oceanos, é um alerta que não pode ser ignorado nem escondido, especialmente

quando está em causa a definição de soluções eficientes e sustentáveis de mobilização de fontes energéticas.

Imbuída deste espírito, animada por este propósito, a ACL aposta numa atuação que mobilize os cientistas a partilharem os seus saberes com públicos mais alargados, contribuindo para o aprofundamento do debate sobre matérias como esta em abordagem no conjunto de textos que aqui se apresentam. O grupo de trabalho coordenado por Rui Vilela Mendes, que integra sócios e não-sócios da ACL, produziu um relatório circunstanciado, composto por contribuições que procuram dar resposta às perguntas que fazemos sobre a inevitabilidade da transição energética e as soluções de modernização tecnológica que lhe estão associadas.

A todos os autores agradeço, em nome da ACL, as valiosas contribuições que deram. E espero e desejo que este exemplo sirva de inspiração para outros estudos, quer sobre a temática da energia, quer sobre outras matérias que, numa perspetiva de definição e execução de políticas públicas, carecem do aconselhamento científico independente que a ACL procura promover e que inscreve nos seus objetivos programáticos.

novembro de 2024

José Luís Cardoso

Presidente da Academia das Ciências de Lisboa

SÍNTESE DO GRUPO DE TRABALHO

1. A utilização intensiva de energia por meio de combustíveis fósseis, iniciada na Revolução Industrial do século XVIII, gerou um novo paradigma energético que melhorou muito o bem-estar e a prosperidade econômica média a nível mundial, especialmente nos últimos dois séculos, embora sem resolver ou mesmo intensificando o fosso socioeconômico global Norte-Sul. A disponibilidade dos combustíveis fósseis e o seu preço relativamente baixo, associados aos avanços científicos, tecnológicos e socioeconômicos contribuiu para uma melhoria da saúde pública e para um aumento da esperança de vida e da fertilidade, em muitas regiões do mundo, embora de forma diferenciada. Esta situação conduziu a um aumento por um fator de 7,8 da população mundial de 1800 a 2019. Além disso, a primeira Revolução Industrial e as seguintes sustentaram um crescimento econômico global exponencial, que permitiu aumentar por um fator de 33 o PIB mundial per capita, entre 1800 e 2006. O consumo global de energia primária aumentou de 20 EJ (Exajoule= 10^{18} J) em 1800 para 584 EJ em 2019 — um crescimento por um fator de 3,7 do consumo de energia primária per capita. A dependência global nos combustíveis fósseis tem sido da ordem dos 80% nos últimos 50 anos e foi de 82% em 2021 e 81,8% em 2022. Esta situação revela o paradigma do uso intensivo de energia que suporta o desenvolvimento da atual civilização globalizante (*Reflexão sobre sociedades modernas e energia*).

2. Porém, a partir da primeira metade do século XIX vários investigadores, Fourier (1827), Tyndall (1863), Arrhenius (1896, 1908) e Plass (1956) descobriram que a utilização intensiva de combustíveis fósseis tem um efeito colateral, não intencional, no clima global que consiste na intensificação do efeito de estufa resultante da emissão de gases com efeito de estufa (GEE), especialmente de CO_2 e CH_4 , em algumas atividades humanas. Esta intensificação do efeito de estufa, de acordo com as leis da física, provoca alterações climáticas que se caracterizam pelo aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície (TMGAS), geralmente designado por aquecimento global. As outras principais características e efeitos das alterações climáticas são o aumento da frequência e intensidade dos eventos

meteorológicos e climáticos extremos, resultante do excesso de energia térmica acumulada no sistema climático, e ainda a subida do nível médio global do mar (*Energia, Clima e Crises*).

3. A concentração atmosférica dos gases com efeito de estufa, com origem em várias atividades humanas, especialmente no setor da energia, tem subido sistematicamente desde o início da primeira Revolução Industrial até ao presente, não obstante os esforços da comunidade internacional no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (CQNUAC), e dos Protocolos e Acordos subsequentes, bem como das conferências das partes em vista da sua implementação.

As projeções atuais indicam um provável aumento da TMGAS próximo de 3 °C, relativamente ao período pré-industrial. Este aumento, caso se venha a realizar, irá provocar impactos adversos graves especialmente nos países mais vulneráveis. Um dos aspetos mais preocupantes da situação atual resulta das retroações positivas no sistema climático provocadas pelo aquecimento global já verificado, cujo controlo está fora do alcance humano. É o caso da chamada amplificação da temperatura no Ártico e mais recentemente na Antártida, provocada pela redução da área de gelo oceânico e do aumento das emissões de metano nas zonas húmidas dos trópicos e das latitudes altas resultante da maior produtividade de matéria orgânica vegetal e animal induzida pelo aumento da temperatura.

4. É, pois, urgente descarbonizar a economia mundial (*Contribuição para o tema Energias Renováveis. Implicações para uma abordagem mais profunda do tema da Energia*) e simultaneamente procurar novas fontes primárias de energia de carbono (i.e., dióxido de carbono) baixo (*O papel fundamental da Energia Geotérmica na transição energética; Energia Nuclear de Cisão; Energia Nuclear de Fusão*).

A transição energética de um sistema dominado pelos combustíveis fósseis para um sistema de energia de carbono baixo tornar-se-ia menos abrupta e mais viável com a utilização de formas benignas de geoengenharia, especialmente a captação do CO₂ em fontes pontuais intensas ou diretamente da atmosfera. O CO₂ captado pode ser usado para vários fins, tais como a produção de combustíveis sintéticos em conjugação com o hidrogénio verde, ou ser sequestrado em formações geológicas (*Transição Energética: A*

Contribuição da Geologia) sendo que na União Europeia a sequestração geológica de CO₂ encontra-se legalmente suportada desde 2009, pela Diretiva 2009/31/EC. Sabemos também que os cenários que têm como objetivo a menor subida de temperatura global no final do século (1,5°C ou pelo menos menor do que 2°C) só são possíveis se a descarbonização do setor energético for realizada de forma combinada com a remoção explícita de GEE da atmosfera (tecnologias de captação direta do ar).

A indústria pesada mundial, especialmente a produção de aço, cimento e produtos químicos, fundamental para sustentar o nosso modo de vida, é responsável por quase 40% das emissões globais de CO₂. É um dos setores mais difíceis de descarbonizar devido a fatores técnicos, como a necessidade de temperaturas muito elevadas e ter “emissões de processo”, como é o caso na produção de cimento. Há também fatores económicos adversos para a descarbonização, como margens de lucro baixas, intensidade de capital elevada e a longa vida útil dos ativos. Contudo, existem soluções tanto para os problemas técnicos como económicos. No primeiro caso estão a desenvolver-se novas tecnologias com potencial elevado de redução de emissões de GEE e de captação de CO₂. Um exemplo no setor da construção de edifícios é o novo paradigma de construção com base em materiais naturais, como a madeira, e na prefabricação.

5. É previsível que a procura mundial de energia continue a aumentar. Nos cenários de descarbonização mais lenta da IEA (*International Energy Agency*) prevê-se que a procura de fontes primárias de energia duplique até 2050 atingindo valores da ordem de 1000 EJ, admitindo uma população global de 9,7 mil milhões nesse ano. Porém, a descarbonização da economia mundial também reduz a procura final de energia primária fóssil, com um impacto contabilístico grande, dada a eficiência baixa associada aos processos de conversão de energia térmica em energia elétrica final, processos que não são relevantes quando se considera a maior eficiência da conversão direta em energia elétrica no caso das energias renováveis. Uma descarbonização mais rápida poderia reduzir a procura de energia final em 40% por ano durante o período em que se efetua. A eficiência energética, ou seja, o uso de menos recursos energéticos para assegurar as mesmas funcionalidades nas

casas, edifícios, indústria, transportes e outros setores, é um pilar fundamental da transição energética. Sem um maior esforço global para melhorar a eficiência energética, a descarbonização global torna-se muito mais difícil ou mesmo impossível. Além da eficiência energética advoga-se um novo paradigma de suficiência energética que consiste na redução deliberada e estruturada do consumo de energia. A sua prática influencia as utilizações da energia e promove mudanças de comportamento, tanto a nível individual como coletivo, que contribuem para facilitar a transição energética.

Em termos de procura de energia e de emissões de CO₂ há no mundo duas tendências diferenciadas de crescimento que se acentuaram desde o princípio deste século. As emissões de CO₂ do conjunto de países da OCDE seguem uma trajetória compatível com o Acordo de Paris da CQNUAC (cenário RCP2.6), enquanto o conjunto de países fora da OCDE segue uma trajetória correspondente a um aumento da TMGAS superior a 3 °C (cenário RCP8.5). Esta polarização revela as dificuldades que o fosso Norte-Sul gera no caminho para a descarbonização global.

6. A transição energética está em curso em praticamente todos os países do mundo, embora progrida com ritmos diversos e tenha diferentes pontos de partida e especificidades. Chegou-se a uma fase em que globalmente há um empenho crescente na descarbonização. Contudo, é importante reconhecer que há vários tipos de obstáculos no caminho:

6.1. A energia desempenha um papel central na geopolítica devido à necessidade imprescindível de garantir a segurança energética global. Esta define-se como a influência de fatores geográficos, especialmente os que se referem à distribuição dos centros de oferta e procura, nas ações estatais e não estatais para garantir um abastecimento adequado, acessível e fiável de energia. A transição energética está também a introduzir novas problemáticas na segurança energética global resultantes da dependência nos minerais críticos para a implementação da referida transição, prevenendo-se escassez de alguns metais a médio prazo. O valor do cobre, níquel, cobalto e lítio poderá, nos próximos vinte anos, ser comparável ao valor da indústria petrolífera nos últimos vinte anos (*Metais na transição energética*). As atuais tensões e conflitos geopolíticos e geoestratégicos estão a gerar novos desafios para a

segurança energética ao nível global, regional, em particular na EU, e nacional, alguns relacionados com sanções e formas de protecionismo que dificultam a otimização económica e tecnológica da transição à escala global.

6.2. A transição energética tem impactos colaterais sobre a conservação da natureza e da biodiversidade difíceis de resolver, tais como alterações no uso dos solos para geração de energia renovável e explorações mineiras que, contudo, se podem atenuar.

6.3. A transição energética tem atualmente uma elevada dependência em minerais críticos difícil de suportar, mas que poderá ser aliviada por meio da aplicação dos princípios da economia circular e de mais investigação e inovação tecnológica.

6.4. O setor dos recursos hídricos e sobretudo da agricultura coloca maiores desafios por ser dos mais vulneráveis aos impactos das alterações climáticas, podendo colocar em risco a segurança alimentar global. Por outro lado, é um setor que contribui de forma significativa para o aumento das emissões de GEE. Este aumento é impulsionado pelas mudanças nas dietas alimentares e pelo aumento da população. O setor das florestas tem uma grande importância no processo de descarbonização por contribuir para a captação biológica do CO₂ atmosférico (neste caso designada de fixação ou mesmo abatimento). Porém, estamos em presença de outro exemplo de retroação positiva provocada pelas alterações climáticas. Estas favorecem uma série de perturbações que ameaçam a saúde das florestas, tais como o aumento das secas, da temperatura, da incidência de pragas, de espécies invasoras, do risco de incêndios florestais e da violência das tempestades, que diminuem a capacidade de captação de CO₂ pela floresta.

6.5. A transição deve ser social e economicamente justa a nível nacional e internacional. Neste último caso é imprescindível que as economias avançadas cooperem e ajudem os países em desenvolvimento, especialmente aqueles cuja economia depende muito da exploração de combustíveis fósseis, a efetuar a transição (*O Papel da Indústria do Petróleo e Gás na Transição Energética*).

6.6. A transição energética irá envolver uma transformação nos processos de produção e consumo de bens e serviços em todos os setores socioeconómicos e nos materiais utilizados nesses processos a fim de determinar onde

está localizado o emissor de dióxido de carbono e qual o melhor método para o remover dos ciclos de vida dos bens e serviços. A eletrificação, ou seja, o processo de substituição das tecnologias que utilizam combustíveis fósseis por tecnologias que utilizam a energia elétrica como fonte de energia é uma das estratégias mais importantes para a descarbonização, embora não seja suficiente para a atingir e imponha desafios importantes à manutenção da fiabilidade e segurança das redes de transporte e distribuição.

Uma vez eletrificados os processos, os desafios da transição energética passam a ser, não apenas desafios relacionados com a garantia de suficiência da oferta de energia, mas também desafios relacionados com a manutenção dos equilíbrios entre a oferta e a procura de energia em tempo real, isto é, desafios relacionados com os balanços de potência. Pequenos desvios nos balanços não se podem manter por muito tempo sem pôr em risco a integridade do sistema de transporte e distribuição. É, por isso, necessário dispor de recursos energéticos para fechar balanços no tempo e, portanto, de capacidade de armazenamento. Sendo o sistema elétrico do futuro suportado por recursos renováveis cuja disponibilidade depende em grande medida de condições meteorológicas, não controláveis, são esperados desvios cada vez maiores nos balanços e, portanto, necessidades de armazenamento cada vez mais significativas.

Embora não seja aqui tratado em detalhe o problema do armazenamento, é importante salientar que este é um desafio importante na transição energética, que deve merecer particular atenção. O problema do armazenamento energético é analisado fundamentalmente em duas vertentes, nomeadamente o armazenamento de energias renováveis e o armazenamento de hidrogénio (H_2). O primeiro caso, embora ainda não resolvido, tem, nas últimas décadas, apresentado desenvolvimentos significativos. O hidrogénio, particularmente o hidrogénio verde, é considerado como a pedra angular para atingir a neutralidade climática até 2050. Faz-se, porém notar que o armazenamento de hidrogénio propriamente dito não é um problema, tendo sido abordado por diferentes autores desde o início deste século. O desafio reside no armazenamento de hidrogénio a grande escala, necessário no caso da produção do hidrogénio verde (i.e., com a utilização de energias

renováveis), situação, aliás, considerada a mais viável, económica e tecnologicamente, em termos de armazenamento geológico (*Transição Energética: A Contribuição da Geologia*).

Uma parte da eletricidade renovável vai ser produzida de forma descentralizada, criando novas oportunidades para os cidadãos que se podem tornar produtores e consumidores. Contudo, a descentralização, por si só, não contribui para a melhoria da fiabilidade e segurança das redes, nem evita o enorme investimento que é necessário fazer nas redes para a satisfação do crescimento do consumo resultante da eletrificação (*Regulação do Setor Elétrico; Rede Elétrica e Segunda Eletrificação*).

O sucesso da descarbonização em tempo útil irá depender de avanços tecnológicos em vários domínios tais como a produção de combustíveis sintéticos, novas fontes de energia de carbono baixo e desenvolvimento da computação e da inteligência artificial. Importa salientar que o uso cada vez mais intensivo das TICs está a aumentar exponencialmente o uso de energia e as emissões de GEE dos centros de processamento de dados (para o processamento e para o arrefecimento das instalações). Estima-se que as emissões globais destes centros são já superiores às da aviação civil mundial.

7. A UE lidera a nível mundial o processo de descarbonização. De acordo com o atual Roteiro da Comissão Europeia para reduzir as emissões em 90% até 2040 e atingir a “neutralidade climática em toda a economia” até 2050 será necessário investir cerca de 1,5 milhões de milhões de euros por ano entre 2031 e 2050. Como se irá operacionalizar este plano e como se irá ele refletir em Portugal? Um dos setores críticos é o dos transportes. Em 2017, os transportes foram responsáveis por mais de 30% do consumo final de energia na União Europeia e mais de 37% em Portugal. Outro setor crítico é a agricultura. Face à pressão política gerada pelos protestos dos agricultores a versão final do Roteiro enquadra a agricultura numa perspetiva de menor exigência em comparação com os projetos anteriores. Já não inclui uma referência a um objetivo de redução de 30% nas emissões de CH₄, N₂O e CO₂ provenientes da agricultura. Também foram suavizadas as recomendações para que os cidadãos façam mudanças no seu comportamento, tais como comer menos carne de ruminantes e novas iniciativas para acabar com

os subsídios aos combustíveis fósseis. Estas dinâmicas revelam a dificuldade do processo de descarbonização na região do mundo onde está mais avançada e a ser levada mais a sério.

8. É cada vez mais importante criar condições e incentivos para potenciar a investigação e a inovação tecnológica no setor da energia. Este aspeto é particularmente relevante para a energia nuclear de cisão (*Energia Nuclear de Cisão*) e de fusão (*Energia Nuclear de Fusão*). À escala global a energia nuclear irá continuar a ter um papel importante para a sustentabilidade energética mundial no século XXI e seguintes. É provável que no final do século comece a ser possível comercializar o uso da energia de fusão nuclear. Outro aspeto importante é o desenvolvimento de fontes geotérmicas de energia (*O papel fundamental da Energia Geotérmica na transição energética*).

9. No setor da energia também há os novos desenvolvimentos ou novas técnicas às quais é necessário estar atento no setor da energia. A mais recente são os depósitos geológicos de hidrogénio natural. O primeiro exemplo foi o depósito de Bourabougou no Mali que emite gases para a atmosfera com uma percentagem de 98% de H_2 e está a ser explorado desde 2012 sem baixar a intensidade do fluxo de gás proveniente do subsolo. Recentemente fez-se uma avaliação positiva das potencialidades de exploração de H_2 na mina subterrânea de cromite de Bulqizë na Albânia. O hidrogénio natural, também designado hidrogénio geológico, hidrogénio branco ou hidrogénio nativo, pode ser uma fonte primária de energia sustentável não-carbónica. Ainda não se compreende completamente como o H_2 se forma, migra e acumula de modo que a sua exploração seja economicamente viável. Contudo sabe-se que o hidrogénio natural se produz sempre que a água subterrânea reage com minerais de ferro a temperaturas e pressões elevadas. Há um interesse crescente pelo hidrogénio geológico e muitas *startups* estão a investir na sua exploração. Já se conhecem dezenas de ocorrências de hidrogénio nativo com concentrações superiores a 10% (*Hidrogénio Renovável*).

10. A transposição para a ordem jurídica interna das diferentes diretivas adotadas no âmbito da política de energia e clima da EU, tem dado uma contribuição determinante, para a política pública da energia e clima em

Portugal, o que evoca a necessidade de garantir o nosso futuro comum através duma cidadania universal. É necessário não esquecer a responsabilidade empresarial no dever de diligência para com os objetivos de sustentabilidade que constam do pacote *Fit for 55* apresentado pela Comissão Europeia em 2021, contendo um grande número de propostas legislativas para a concretização do Pacto Ecológico Europeu. Alcançada a compaginação entre o direito fiscal e a economia na transposição das diretivas da UE para a legislação nacional, falta assegurar a vontade e exequibilidade política, que depende da estabilidade social, da paz económica e da boa governação (*Análises jurídico-económicas da transição energética*).

É importante reconhecer que o Comércio de Emissão Livre de Emissões/*European Trading System* (CELE/ETS) e o mercado voluntário de carbono são essenciais para alinhar incentivos de duplo e triplo dividendo, de modo a descarbonizar eficientemente Portugal e o mundo. A baliza mínima de valores para o preço de carbono em Portugal é 90€/ton de carbono sem reciclagem de receita fiscal e de 120€/ton de reciclagem de receita. Não há futuro da energia e reconversão com preço de energia barato.

Os seis maiores emitentes de CO₂ representam cerca de 60% das emissões globais de CO₂, mas bastará um processo coordenado dos 3 maiores emitentes para se conseguir, caso cheguem a acordo no G20 ou, eventualmente, nas COPs ou num outro fórum global, uma verdadeira viragem consistente na descarbonização. A UE tem um papel de liderança pelo exemplo neste processo.

Não será fácil atingir a neutralidade carbónica da UE em 2050, de modo a cumprir o Acordo de Paris da CQNUAC. Porém, o alerta da sociedade científica, interdisciplinar, para a sociedade civil e política, faz parte da responsabilização, enquanto investigadores, e participantes num estado de direito e democrático. Ao ligar o tempo futuro à ação presente, a sustentabilidade tornou-se um valor que responsabiliza todos a exercer os seus direitos sem lesar os das gerações vindouras – equidade inter-geracional. Perante a complexidade da ação daqui resultante, a economia, baseada no direito, em incentivos políticos e em modelos matemáticos, tem também de se aliar na ética. Daí a importância e a necessidade de percorrer um caminho

de transformação, para atingir um desenvolvimento sustentável, fundado em instituições e formas de energia sustentáveis.

A energia e as políticas públicas

Uma política pública informada e atenta aos problemas atuais e futuros a que a nossa sociedade será exposta, é uma condição essencial para a adoção das soluções ou formas de mitigação adequadas. Os textos que compõem o relatório deste grupo de trabalho recomendam, quer implícita quer explicitamente, um certo número de boas práticas em relação à política energética. Incluímos aqui apenas algumas dessas recomendações:

A – A eficiência energética, o uso de menos recursos energéticos para assegurar as mesmas funcionalidades nas casas, edifícios, indústria, transportes e outros setores, é um pilar fundamental da transição energética. Dever-se-á, portanto, encorajar com incentivos, não só formas sustentáveis de produção e eficiência energética, como também novas técnicas industriais e de construção mais sustentáveis. Será conveniente a realização de campanhas publicitárias que orientem os consumidores para uma melhor e mais eficiente utilização energética, bem como premiar as empresas que, no âmbito da respetiva responsabilidade social e ambiental, adotem recursos e metodologias de produção benéficos à transição energética.

B – É indispensável promover a suficiência e eficiência energéticas, a eletrificação, a substituição e penalização do uso de combustíveis fósseis, a criação de incentivos ao desenvolvimento de combustíveis sintéticos, as energias renováveis, os novos paradigmas de construção, as tecnologias de armazenamento de energia e a extensão das redes elétricas. Porém a descarbonização da economia não deverá ser feita sem ter em atenção os outros valores sociais e ambientais. Por exemplo, a instalação de novos parques solares não deverá ter apenas como critério o ponto mais conveniente de recolha da energia, mas também ter em atenção a preservação de terrenos com potencial agrícola e o ecossistema. Ou a generalização do uso da madeira na construção deverá ser feita em paralelo com uma reflorestação sustentável, etc.

C – Há que prever, planear e executar a tempo as infraestruturas que no futuro virão a ser necessárias na transição energética. Por exemplo, as atuais redes elétricas não têm capacidade para suportar as alterações de consumo decorrentes da eletrificação da economia. É, pois, importante planear e transformar a tempo estas infraestruturas para que elas não constituam um entrave à transição energética. Pode e deve ser fomentada a flexibilização de alguns consumos se, com isso, se conseguir suavizar o ritmo de transformação das redes elétricas. Mas a flexibilização deve ser usada como paliativo, enquanto esclarecemos a necessidade de realizar investimentos, não para atrasar a transformação das redes no que sabemos hoje ser necessário.

D – Na transição energética muitos equipamentos se tornarão obsoletos e muitos materiais novos serão necessários para os novos instrumentos de produção, utilização e mobilidade. Para além do grande consumo de materiais, alguns deles críticos, haverá também muitos resíduos, alguns deles com nefastos impactos ambientais. É, portanto, importante, na fase da transição, incentivar fortemente a reciclagem e quando possível a reutilização direta dos equipamentos velhos através, por exemplo, dos combustíveis sintéticos ou substituição parcial por componentes elétricos.

E – Uma vez que as políticas públicas relativas à transição energética estão sujeitas a uma normatividade mais fluída que exige uma interpretação metodológica eficiente e eficaz, apelando a princípios jurídicos, que ao mesmo tempo põem em confronto múltiplas entidades, públicas e privadas, recomenda-se que os trabalhadores da Administração Pública que lidam com esta nova forma de realizar o direito tenham cursos de formação adequados.

F – Desempenhando a ciência um papel essencial na evolução tecnológica para o futuro, deverão ser criadas condições excecionais para o seu crescimento. É também importante manter e preservar as competências técnicas, com pessoal e instituições preparadas, para poder beneficiar em tempo útil dos novos desenvolvimentos e técnicas relevantes para a produção e utilização de novas formas de energia ou novos métodos. A título de exemplo mencionamos: o desenvolvimento de baterias com materiais mais sustentáveis que o lítio, a utilização do ciclo do tório na fissão nuclear, a fusão nuclear, a geotermia profunda.

G – Uma vez que o desenvolvimento económico, antes fundamentalmente orientado pela liberdade juridicamente enquadrada, se deve hoje orientar por uma ética de responsabilidade, recomenda-se, nos diferentes graus de ensino, o uso de uma pedagogia que acentue a responsabilidade dos alunos, que exercite o seu pensamento crítico, que lhes transmita gosto em participar no bem comum e que os forme para a confiança na vida em sociedade e para a construção de conhecimento.

O GRUPO DE TRABALHO

Fernando Barriga (*Academia das Ciências*), José Manuel Belbute (*Universidade de Évora*), Annette Bongardt (*Universidade Católica Portuguesa*), João Caraça (*Academia das Ciências*), Pedro Carvalho (*Instituto Superior Técnico/ULisboa*), Manuel Collares Pereira (*Academia das Ciências*), Maria da Glória Garcia (*Academia das Ciências*), Bruno Soares Gonçalves (*Instituto Superior Técnico/ULisboa*), Jorge Braga de Macedo (*Academia das Ciências*), José G. Marques (*Instituto Superior Técnico/ULisboa*), Rui Vilela Mendes (*Academia das Ciências*), Alfredo Marvão Pereira (*William and Mary, Williamsburg*), Rui Marvão Pereira (*William and Mary, Williamsburg*), Cristina Rodrigues (*Academia das Ciências*), José João Campos Rodrigues (*AP2H2*), João Santana (*Instituto Superior Técnico/ULisboa*), Filipe Duarte Santos (*Academia das Ciências*), Luís Oliveira e Silva (*Academia das Ciências*), António Goucha Soares (*Instituto Superior de Economia e Gestão/ULisboa*), Amílcar Soares (*Instituto Superior Técnico/ULisboa*), Manuel Lemos de Sousa (*Academia das Ciências*), Miguel Rocha de Sousa (*Universidade de Évora*), Francisco Torres (*Universidade Católica Portuguesa*).

Reflexão sobre Sociedades Modernas e energia

JOÃO CARAÇA

A alvorada da Modernidade correspondeu à difusão e afirmação de uma nova cultura, de tendência crítica e base experimental, que tomou corpo apoiando-se nas experiências das extraordinárias descobertas de novas terras desconhecidas, de novas plantas, de novas gentes, e o que mais é (dizia Pedro Nunes) de novos céus e de novas estrelas. Um novo quadro de mundos insuspeitos surgia aos olhos dos navegantes. A grandeza e os feitos, a arte e a poesia, não vinham só dos Antigos; o saber não se encontrava só nos livros, mas, sobretudo, surgia a partir da experiência dos Modernos.

O primeiro quartel do século XVI assistiu ao crescimento e importância, no comércio e na economia, das grandes navegações oceânicas para oriente e para ocidente, bem como à primeira circum-navegação do globo, provocando uma autêntica revolução geográfica e cartográfica, terrestre e celeste. A Terra e o Universo foram sempre pares um do outro: o estado da Terra implicando um estado dos céus e, concomitantemente, o estado dos céus dando uma perspetiva do que se passava na Terra. O uso de tabelas e de instrumentos na navegação generalizou-se ao longo do século. A mecânica, a astronomia e a óptica prosperaram.

O século XVI assistiu também a crises profundas e conflitos em grandes domínios — no da religião, com a reforma protestante e a contra-reforma; no da economia, com a mudança do eixo do comércio de longo-curso do Mediterrâneo para o Atlântico; no da sociedade, com a ascensão da importância política de uma nova classe, a burguesia; no relacionamento com o real, com o valor atribuído à experiência; no da moral, com a redescoberta do corpo humano e com a progressiva substituição da noção de alma pela de intelecto.

Este período pareceu aos seus contemporâneos como que assombrado e complexo, coberto por um véu em que tudo parecia estar interligado. Antigas verdades eram postas de lado, em seu lugar surgiam novidades em torrente que extravasavam os limites do senso comum vigente.

Novos conceitos de espaço e de tempo, a supremacia nas artes da guerra, bem como o aparecimento de novas instituições, delimitaram assim um intervalo dotado de grande complexidade que funcionou como passagem de um pequeno mundo feudal, cristão, para um mundo moderno, de alcance planetário. As transformações sociais que nele irromperam e se reforçaram vieram basear as ideias e as construções dos europeus nos campos da cultura, da política, da economia e da sociedade durante a Modernidade.

O novo mundo moderno — o globo terrestre, não apenas os territórios que se acolhiam à beira do Mediterrâneo — alimentou-se da separação entre o espaço e o tempo, e dos novos conceitos criados sob o império das leis da natureza. O espaço tornou-se apropriável até ao infinito e o tempo tornou-se linear.

As explicações e representações do mundo são cruciais para criar um quadro que guie a ação dos humanos no quotidiano, coerente e inteligível, que os permita crescer, regular-se e multiplicar-se como acontece com as outras espécies biológicas. Possuindo, no entanto, um sofisticado meio de comunicação (a linguagem verbal) a coesão das comunidades dos humanos só pode ser encontrada com base numa expressão comunicacional organizada, isto é, na sua cultura. Que engloba necessariamente uma articulação dos aspetos políticos, económicos, sociais e morais ligados à sua existência.

A maior e mais pertinente heresia face às visões religiosas que se repartiam pelo mundo constitui-se, a partir do século XVII, na visão que os novos conquistadores europeus e os seus governantes adoptaram. Na realidade, o Renascimento, a descoberta de novos mundos pelos navegadores portugueses e espanhóis e a perceção do gigantesco número de novos problemas suscitados, bem como a violência das guerras religiosas e a consequente afirmação de novas potências na Europa, veio revelar a magnitude do que antes era desconhecido. As espantosas descobertas dos astrónomos,

resultantes da utilização de novos instrumentos ópticos, vieram reforçar ainda mais este facto. Os céus sempre foram o espelho da Terra.

Envolvendo todas estas transformações, a nova cultura, de tendência crítica e base experimental, que levava à unificação geográfica do planeta e lhe dera a dimensão da sua nova realidade, fizera nascer novos domínios do saber que iam habituando os europeus a ver o mundo como uma construção, como uma corporização das percepções e decisões tomadas e cada vez menos como um reflexo da vontade divina.

As sociedades europeias dominantes foram desenvolvendo uma organização política e económica altamente sofisticada, regulando-se por leis e regimentos intrincados, favorecendo a argumentação. O tempo ia deixando de ser cíclico, pela perda de parte do seu carácter orgânico, passando a ser assumido como um parâmetro linear e reversível: o tempo dos mercadores e dos fabricantes de relógios. A Europa civilizada, possuindo uma sociedade baseada em leis, impunha assim à natureza, “propriedade do homem”, que revelasse ela própria as suas leis. E quando Galileu a interrogou, a natureza respondeu que era como que um grande livro escrito em linguagem matemática.

Segundo Gaston Bachelard, este constitui o corte epistemológico da Modernidade: a passagem de uma natureza construída a partir de mitos e alegorias para uma realidade descrita por uma linguagem matemática. Aparece assim uma nova grande visão do mundo, que vem dotada de uma índole “geométrica”, espacial, em perpétuo movimento. Nesta visão característica da modernidade a questão central é a de encontrar as grandes simetrias que correspondem a princípios de invariância, essenciais na descrição do universo e que dão origem às leis da natureza, imutáveis, absolutas, eternas. A criação do tempo fora um acidente: o mundo tinha começado como espaço. Uma distância conceptual enorme estava criada entre a natureza e o próprio homem.

Esta visão geométrica, apoiada na ciência moderna e na sua nova ordem para o mundo, imperou, triunfante, no decurso dos últimos séculos, guiando as palavras e os gestos civilizadores dos europeus e dos seus seguidores pelo globo. Mas, no decurso do século XX, sobretudo a partir da sua segunda

metade, mercê dos enormes avanços tecnológicos e científicos alcançados e da patologia suicidária que se apoderou da condução política das potências europeias, apercebemo-nos progressivamente dos perigos e da inutilidade do alargamento do fosso entre o natural e o humano e da absoluta necessidade, afinal, de o colmatar.

As sociedades europeias que aderiram e assimilaram o projecto da modernidade, partindo da utilização de novos métodos de observação (o uso de instrumentos científicos), da experiência e da publicação das novas ideias científicas e dos seus resultados, foram construindo uma nova cultura que trouxe no seio a nova ciência, a ciência moderna, cuja finalidade era descobrir as leis da natureza e proporcionar um novo sentido, uma nova ordem ao mundo.

A nova ordem legitimou o processo cumulativo de desenvolvimento dirigido à obtenção de cada vez maior riqueza material e bem-estar, inventando a noção de progresso. Durante os dois séculos do “milagre europeu”, o XVIII e o XIX, a modernidade prosperou e (quase) dominou o globo. Não sem grandes lutas e vitórias, horrores e iniquidades, como sabemos. Mas a sua influência sobre os outros povos e civilizações veio tornar admissível encarar uma métrica única para o governo do mundo, apesar da sua diversidade. A razão dos europeus era universal...

As cidades foram os faróis deste espírito de modernidade. E novas Academias e Sociedades eram criadas para guardar e alimentar este espírito. A autoridade da visão geométrica ainda era absoluta no século XIX: Paul Cézanne, por exemplo, afirmava que todas as formas da natureza se podiam reverter à esfera, ao cone e ao cilindro. E uma “separação” com pesadas consequências foi a que (maquiavelicamente) se operou entre “política” e “ética”, significando que na realidade os fins justificam os meios, ou seja, política sem ética não passa de administração.

O século XVIII assistiu à separação progressiva entre ciência e filosofia. Igualmente, as novas instituições no domínio da economia, companhias, empresas, mercados, bolsas, incrementando o comércio com base em novas oportunidades que iam surgindo, criavam riqueza que alimentava o sucesso da modernidade. O conceito de progresso surge então.

A ciência moderna permitiu às nações europeias que a adoptaram exaltar a nova visão do mundo, beneficiando da transformação continuada da natureza, usufruindo de cada vez mais bens materiais. Porém, como em todos os projectos, a sua duração não era infinita e a sua transformação foi-se mostrando imperiosa. A alteração das condições materiais da vida em sociedade provoca necessariamente grandes mudanças, obrigando a reconhecer a existência de patamares de estabilidade dinâmica, associados ao volume de recursos e à demografia das comunidades em jogo. A organização societal não pode ser a mesma, quando se evolui da família para o clã, da localidade para o país nacional. E as bifurcações que foram seguidas no passado jamais voltam a aparecer do mesmo modo: basta pensar como em tempos mais recentes as cidades se transformaram irreversivelmente com o advento da eletricidade, ou como as comunicações à distância se transfiguraram com a introdução das tecnologias eletrónicas.

Nos inícios do século XVIII foram criados os primeiros bancos centrais e durante o seu decurso surgiram as instituições parlamentares. Perto do seu final, duas revoluções, a americana, em 1776, e a francesa, em 1789, foram intérpretes de uma transformação radical nos campos político e social: a soberania passou a ser entendida como residindo no povo e não em monarcas por direito divino — sendo exercida através de órgãos constitucionais representativos. Foi também neste quadro que a Declaração dos Direitos do Homem e do Cidadão irrompeu à luz do dia.

A utilização decidida do carvão como fonte de energia promove os primeiros passos das revoluções industriais no Reino Unido e também no centro da Europa. Este século (“as Luzes”) caracterizou-se por ímpetos de cosmopolitismo e internacionalismo firmados sobre um património humanista renascentista, no espírito de uma comunidade de interesses, de passados e de esperanças. Mas a competição feroz que se perfilava na conquista dos territórios do outro lado dos oceanos, para a apropriação dos seus recursos, bem como no estabelecimento e funcionamento dos novos mercados em expansão, com a entrada do século XIX, depressa os transfiguraram em diferenças e oposições acirradas e violentas.

O Estado-nação foi-se afirmando no campo político. Novas e profundas transformações estavam igualmente em curso e, no dizer de Karl Polanyi, uma enorme mudança tem lugar na sociedade — *A Grande Transformação*, uma modificação que consistiu basicamente na troca de estatuto hierárquico entre o campo económico e o campo social.

Até então, os mercados tinham tido uma existência própria, específica, promovendo em geral as permutas e trocas a nível local. O crescimento da atividade económica, através da introdução intensiva de máquinas, alimentada por fontes de energia concentradas fósseis (inicialmente, o carvão e, no fim do século XIX, o petróleo), promovido pela expansão dos seus mecanismos de financiamento, induziu um sistema de controle da economia tendo como padrão o mercado. Daqui resultaram consequências fundamentais para toda a organização da sociedade, que passou a funcionar como uma adjunta, um acessório, do mercado. Em vez de a economia estar inserida no contexto das relações sociais, as relações sociais passaram a estar inseridas na economia.

A inversão da posição hierárquica entre sociedade e economia teve uma profunda importância na evolução societal dos países em industrialização, bem como repercussões enormes naqueles outros que sofisticamente foram designados como “em desenvolvimento”. As transformações e turbulências associadas foram-se sucedendo no quadro do liberalismo e das revoluções liberais. A actividade financeira globalizou-se por volta de 1860.

Esta mudança, de um conjunto de mercados isolados e regulados para uma economia de mercado, auto-regulada, mas apoiada por um sistema inter-Estados garantindo a sua viabilidade e continuidade, foi crucial. Imaginou-se ingenuamente que este desenvolvimento era o resultado natural da expansão dos mercados. Tanto para bem e como para mal. Não se aperceberam de que este engranar dos mercados num sistema auto-regulado investido de um tremendo poder não era uma tendência imanente, mas antes o desfecho de uma combinação de transformações provocadas na sociedade pela introdução massiva de máquinas na produção industrial de bens e mercadorias. O aumento rápido da

população mundial exigia igualmente que este esforço de produção material fosse ampliado continuamente.

As questões de natureza económica foram progressivamente capturando a atenção primordial na política, na guerra, nas comunicações, nos costumes, na moral: o impacto da mercantilização (tudo tem um preço) foi atingindo todos os escalões da sociedade, de forma diferenciada e polarizadora. A monarquia e o direito divino de governar ocultaram a existência de desigualdade — pois todos eram súbditos, iguais perante o rei. Porém, o mercado vem estabelecer e consolidar o conceito de desigualdade, pois possui um carácter de mecanismo “sobre-humano”, avesso às ideologias e às emoções; e vai-se afirmando sob o signo da desigualdade no mundo.

A noção de “crescimento”, que aparece como transfiguração do conceito de progresso praticamente desde o início do pensamento económico moderno, acompanhado as mudanças na agricultura, na mobilidade dos trabalhadores e na acumulação de capital, é fruto de uma conjunção de empreendedorismo com invenções e inovações radicais em máquinas e equipamentos na produção, nos transportes, nas comunicações e no comércio. Em *As Time Goes By* (2001), Christopher Freeman e Francisco Louçã afirmam que o crescimento económico não é um processo possuído por uma aceleração constante, mas antes procede por impulsos que desencadeiam novas vagas de procedimentos técnicos e económicos. Estas vagas, que os autores designam por “paradigmas tecno-económicos”, iniciam-se quando uma conjugação de inovação, investimento, produção e difusão dá um decidido salto em frente.

A primeira vaga de crescimento económico desenvolve-se a partir dos anos 1780 e é designada por “Mecanização hidráulica da indústria”. A partir desta vaga outras quatro se sucederam até hoje. Por que razão? A competição entre empresas que se foi tornando cada vez mais forte ao longo deste período, motivada pelo alargamento e intensificação dos mercados nos setores chave em que arrancou esta revolução industrial (os têxteis e a maquinaria associada, as construções em ferro fundido, a construção de canais) levou a limitações de escala no controle dos processos de produção.

Soluções oferecendo possibilidades de aumentar a produtividade através de novos equipamentos e organização fabril, bem como limitações inerentes à força-motriz-hidráulica, desencadeou na sequência das crises de 1830–1840 o desenvolvimento de uma segunda vaga, designada por “Mecanização pelo vapor, da indústria e dos transportes”.

E o processo de crescimento económico continuou, com alterações, transformações, novas soluções, até que nova crise sistémica (que é inerente a este mecanismo) viesse provocar um novo impulso e um retomar do caminho. Assim aconteceu com a crise de 1870–1880, à qual se seguiu uma terceira vaga (“Eletrificação da indústria, transportes e aglomerações urbanas”); com a crise de 1930–1940, à qual se seguiu uma quarta vaga (“Motorização do transporte, da economia e da guerra”); com as crises do petróleo de 1973–1979, às quais se seguiu uma quinta vaga (“Computerização de toda a economia”) de que estamos agora a observar possivelmente a transição para uma nova vaga, pressagiando uma crise sistémica na próxima década.

Estas vagas e crises ressuscitaram a atenção e o interesse dos economistas nos anos 1980–1990 devido à importância assumida pela tecnologia e pela inovação na condução política global e na vida quotidiana. Mas é fundamental retermos a noção da ocorrência de crises sistémicas na economia, entrecortadas por paradigmas tecno-económicos diferentes. Mas uma grande questão ficou pendente: qual era a estratégia para o desenvolvimento dos países não industrializados? Seguir o caminho encetado pelos mais avançados usando intensivamente fontes primárias de energia fóssil, ou...? A verdade é que não havia plano para o desenvolvimento.

Cada transformação societal ocorrida foi simultaneamente possibilitada e impulsionadora do aumento da energia consumida pelos humanos.

É fundamental debruçarmo-nos sobre a questão da energia. A energia é tudo, tudo o que existe. O universo, as partículas, os campos e a sua propagação, a vida. Uma definição geral de energia pode formular-se como “aquilo que é preciso fornecer ou retirar a um sistema material para o transformar ou deslocar”.

Tomemos o caso do comércio como exemplo. A energia desempenha

um papel fundamental no domínio das trocas, pois é sobre o valor de troca destinado ao mercado que se fundam as atividades com elas ligadas. Ora o comércio, por definição, opera uma deslocação dos bens no espaço. A transformação em mercadoria só é possível pelo consumo da energia necessária para o seu transporte.

Durante a maior parte da existência da nossa espécie sobre a Terra (duzentos a trezentos mil anos) o modo de vida adotado foi baseado na caça e na coleção. O terreno que habitavam era muito bem conhecido assim como as características da sua população animal e vegetal (inclusivamente para fins curativos). Mas a riqueza material estava limitada à capacidade de transporte individual.

Com o estabelecimento do período climático interglacial há cerca de doze mil anos, a subida do nível da água dos oceanos veio motivar certamente migrações e pressões mais frequentes de incidência territorial. Uma revolução social, dos costumes e dos valores, adivinhava-se. Com a introdução da agricultura ocorre na vida dos humanos uma mutação sem precedentes. À característica, única sobre a Terra, que detinham, de possuir linguagens sofisticadas para comunicar, proporcionando modos de representação da realidade — o domínio da informação e, portanto, do conhecimento e da cultura — juntou-se então a capacidade singular de produção dos próprios alimentos — o uso da energia solar como provimento da subsistência. As grandes civilizações conhecidas foram produto dos vários tipos de agricultura que, por razões locais e contextuais, foram praticadas na superfície da Terra. Assim como a construção das grandes religiões.

Com a introdução da agricultura inicia-se um período de evolução das sociedades humanas em que as grandes revoluções sociais (e económicas) são baseadas na utilização da energia — como se disse, a agricultura traduzindo a capacidade de converter utilmente a energia solar.

A partir de então o caminho seguido foi o de uma intensificação e diversificação da componente energética utilizável, em que a energia mecânica (hidráulica, eólica) assume um papel central: a substituição e multiplicação do trabalho humano físico. A esta luz, os tempos da modernidade surgem

apoiados no uso crescente em intensidade de formas de energia química (a artilharia) e eólica (a navegação oceânica). E a sua revolução industrial inicia-se com um incremento poderoso no campo das formas de energia hidráulica (bombas, turbinas) e térmica (combustão do carvão). O século XX acelerou esta tendência de consumo intensivo de energia através da expansão da eletrificação e a construção de vastas infraestruturas para a sua produção e distribuição, bem como utilizando a combustão do petróleo e do gás natural e mais recentemente a energia nuclear.

Quer dizer, as necessidades de cada vez mais máquinas para produzir mais em menos tempo, assim como de avanços na comunicação para potenciar este esforço e de infraestruturas para os suportarem, provocaram um uso cada vez mais intenso das fontes de energia primária para sustentar a industrialização dos países mais avançados e a sua expansão. O aumento significativo das populações e as necessidades alimentares emolduraram esta forte tendência. Mais recentemente, os meios de comunicação eletrónicos, as redes, as plataformas, as bases de dados e a inteligência artificial, a expansão das cidades e a necessidade de novas infraestruturas, continuaram a forçar este aumento. As fontes primárias de energia fóssil foram instrumentais para alimentar toda esta evolução.

Porém, duas questões centrais se põem neste caminho: (i) a combustão intensiva de combustíveis fósseis altera a composição da atmosfera e a ocorrência significativa de acontecimentos extremos frequentes tais como tempestades, secas prolongadas, inundações catastróficas, mostram que o clima não é estável e vai ser necessário adaptarmo-nos às alterações e mitigarmos as devastações provocadas; (ii) o consumo de combustíveis fósseis representa hoje cerca de 85% do total das fontes de energia primária que utilizamos, valor que, por outro lado, não se encontra repartido uniformemente pelo globo, além de ser submetido ao mosaico de divisões políticas em que as sociedades têm vivido. A transição energética, que se mostra inevitável, significa um enorme esforço científico, tecnológico, financeiro, moral e político, conjugado, necessário para se poder encarar globalmente como diminuir esta dependência ou como substituir uma parcela significativa do seu presente contributo.

E devemos também pensar que qualquer solução tecnológica nova, seja no domínio das fontes renováveis, no domínio da fusão nuclear, da geotermia, no domínio das comunicações, ou no da colonização do espaço, vai representar, à partida, um acréscimo considerável da energia utilizada. A gestão global da energia é, pois, fulcral para que se consiga uma transição energética que torne sustentáveis as sociedades humanas, porque ao concretizar-se levará certamente a uma enorme transformação cultural, social e política, que devemos aspirar a que traga uma nova esperança para nós e para a vida no planeta.

A presente situação que se vai arrastando, de crises “entrelaçadas” que interagem fortemente, motivando causas e consequências múltiplas: alterações climáticas, necessidades de fornecimento de energia, pandemias, guerras crónicas — mostram as dificuldades de qualquer previsão credível e indiciam que vivemos uma bifurcação em que um novo paradigma tecnológico se está a sobrepôr ao anterior que até aqui nos conduziu... isto é, a transição energética que se reclama é um enorme desafio societal global. Vai envolver seguramente uma transformação nos materiais utilizados, na inteligência artificial, na importância dos fenómenos quânticos, da biologia sintética, dos oceanos, do espaço.

E, talvez, uma mudança de liderança. Habitámo-nos nos últimos séculos a que as nações hegemónicas fossem de origem europeia ocidental (Reino Unido, depois Estados Unidos da América). Que eram simultaneamente líderes tecnológicos. A feroz competição científica e tecnológica a que assistimos nos tempos de hoje pode provocar uma alteração na liderança tecnológica, que influenciará por sua vez a emergência de uma nova hegemonia. Mas qual será? A hegemonia de uma nação? A continuação da liderança norte-americana ou o surgimento de uma nova liderança? (Qual?). Ou então uma liderança por dois grandes blocos, uma nova “guerra fria”? Ou ainda uma “guerra gelada”, melhor, uma “guerra permanente” — como no conhecido livro *1984* de George Orwell — em que três grandes blocos se guerreiam em permanência, alterando periodicamente as suas alianças? Não sabemos. É esta a complexidade do nosso tempo.

Não podemos, portanto, inquirir qual é o futuro. Mas devemos, antes, prospectivá-lo, perguntar como transformar os nossos sonhos, as nossas aspirações, em realidades. Em realidades que terão de responder ao pulsar fundo da humanidade. Não será fácil, mas é o nosso caminho, o de todos nós. Uma coisa é certa: sem ciência, contra a ciência, não haverá futuro.

REFERÊNCIAS

- J. Caraça, *Science et Communication*, coll. Que sais-je? n°3502, Presses Universitaires de France, Paris 1999.
- J. Caraça, "The problem of machinism revisited" in *Machine Ethics*, L. M. Pereira and A. B. Lopes, Springer Cham, 2020.
- J-C Debeir, J-P Deléage et D. Hémerly, *Les Servitudes de la Puissance*, Flammarion, Paris 1986.
- C. Freeman and F. Louçã, *As Time goes by*, Oxford University Press, Oxford 2001.
- K. Polanyi, *The Great Transformation*, Beacon Press, Boston, 1957.

Energia, Clima e Crises

FILIFE DUARTE SANTOS

INTRODUÇÃO

No curto espaço de 36 anos, desde a criação em 1988 do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) das Nações Unidas, as alterações climáticas globais, provocadas por algumas atividades humanas, tornaram-se um desafio inquestionável que ameaça o bem-estar e a prosperidade de grande parte da população mundial. Embora o problema tenha alguma complexidade, a sua principal causa tem sido a utilização intensiva e crescente, à escala global, de combustíveis fósseis, primeiro o carvão, depois o petróleo e finalmente o gás natural, iniciada na Revolução Industrial há cerca de 250 anos. O consumo intensivo de energia fóssil, aliado ao progresso da ciência e da tecnologia e à expansão e exploração ultramarina liderado inicialmente por alguns países Europeus, criou na Europa e depois nos EUA, Canadá, Austrália, Japão, e em alguns outros países atualmente industrializados, bem como em alguns países produtores de combustíveis fósseis do Médio Oriente, como a Arábia Saudita e os Emiratos Árabes Unidos, uma prosperidade económica e uma riqueza material sem paralelo que os distinguiu do resto do mundo.

Criou-se assim um fosso económico entre o Norte Global e o Sul Global, incluindo as regiões tropicais. Note-se que tanto o Norte Global como o Sul Global são conceitos que não estão bem definidos, são fluidos, evoluem e por vezes são contraditórios. Porém, hoje em dia, são expressões incontornáveis, com um grande e crescente poder político nas relações internacionais, alimentado pela convicção de muitos no Sul Global, cuja liderança é

simbolizada pela aliança Brics+, de que este se defende de um Norte Global considerado colonialista, militarista e arrogante. O fosso entre ambos está a ser alargado pelos impactos cada vez mais graves das alterações climáticas, resultantes do aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície (TMGAS), de fenómenos meteorológicos e climáticos extremos mais frequentes e intensos, tais como vagas de calor, secas, precipitação intensa em intervalos de tempo curtos, ciclones tropicais e tempestades extratropicais mais intensas e destrutivas e ainda da subida da média global do nível do nível do mar. Estes impactos manifestam-se em todo o mundo, mas a vulnerabilidade é maior no Sul Global do que no Norte Global devido principalmente à menor capacidade de adaptação. Recordem-se os impactos dos eventos extremos que atingiram todo o mundo em 2022, incluindo a Europa e Portugal, onde uma seca severa até outubro foi seguida de repetidas inundações durante o mês de dezembro na região de Lisboa e noutros locais, causadas por precipitação muito intensa. As consequências humanitárias e económicas dos fenómenos extremos de 2022 foram muito mais graves no Sul Global do que no Norte Global.

No Paquistão, a monção involuntariamente intensa do verão desse ano provocou inundações que causaram 1 730 mortos, incluindo mais de 600 crianças, afetaram 33 milhões de pessoas, 8 milhões de deslocados, 1,8 milhões de casas danificadas ou destruídas, centenas de milhares de cabeças de gado perdidas e culturas agrícolas arruinadas, criando uma situação grave para a segurança alimentar do país nos meses seguintes (NDMA, 2022; UNEP, 2022). As perdas económicas causadas pelas inundações foram estimadas em 30 mil milhões de dólares (EUA) (UNDP, 2022) e o país não consegue suportar estas perdas sem ajuda externa devido aos seus limitados recursos financeiros e económicos. No Corno de África, que inclui a Etiópia, Eritreia, Somália, Sudão do Sul e Quênia, cerca de 26 milhões de pessoas enfrentaram o risco de subnutrição extrema (FAO, 2022) após quatro estações chuvosas sucessivas que falharam. A sua sobrevivência depende da ajuda humanitária fornecida maioritariamente pelos países do Norte Global através do Programa Alimentar Mundial (WFP – World Food Programme) das Nações Unidas.

Em 2023 registou-se uma TMGAS de $14,98 \pm 0,17$ °C (Copernicus, 2024), o valor mais elevado jamais observado desde o início dos registos de séries de temperatura em meados do século XIX, tendo o anterior valor anual mais elevado sido registado em 2016. Março de 2024 foi o décimo mês consecutivo em que a média mensal da TMGAS bateu recordes. Em 2023, a TMGAS foi $0,60 \pm 0,12$ °C mais elevada do que a média do período de 1991–2020 e $1,45 \pm 0,12$ °C mais elevada do que o valor pré-industrial (WMO, 2024). Porém, o que interessa mais são as médias decadais da TMGAS dado que subtraem em parte o efeito da variabilidade interanual. Na década de 2014–2023 a média da TMGAS foi $1,20 \pm 0,12$ °C acima do valor pré-industrial. Este último facto alerta-nos para a proximidade de atingir um aumento da TMGAS superior a 1,5 °C, o que contraria as decisões adotadas no Acordo de Paris assinado em 2015 na 21.ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (CQNUAC, UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change). A situação de El Niño – Oscilação do Sul (ENSO – *El Niño-Southern Oscillation*), estabelecida em 2023 e que se irá prolongar até meados de 2024, agravou o aumento da TMGAS observado, mas não explica completamente o seu valor muito elevado.

O ano de 2023 revelou de novo a vulnerabilidade da humanidade aos eventos meteorológicos extremos causadores de uma série de desastres naturais sem precedentes. Houve ondas de calor em várias regiões do mundo, incluindo o Sul da Europa, o Norte de África, China e Médio Oriente. Em Siracusa, na Sicília, registou-se a temperatura de 48,8 °C, em 11 de agosto. O Canadá viveu, em 2023, a época de incêndios florestais mais destrutiva alguma vez registada, com 16,5 milhões de hectares de área ardida — uma área maior do que a Grécia. Na Europa, a Grécia foi o país mais atingido pelos incêndios florestais, com uma área ardida de 174800 hectares. Na Líbia, o ciclone mediterrânico Daniel provocou chuvas torrenciais com cheias que causaram a morte de mais de 4000 pessoas e 10000 desaparecidas. Através de todo o mundo, mas sobretudo no Norte Global, têm-se adotado medidas de adaptação aos eventos extremos que

diminuem consideravelmente o número de vítimas e de perdas materiais. Secas em várias regiões do mundo, em 2023, obrigaram a substituir a utilização da hidroeletricidade por combustíveis fósseis. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) (IEA, 2024), o défice de produção de energia hidroelétrica a nível mundial provocado por essas secas, gerou um aumento das emissões de CO₂, proveniente da combustão de combustíveis fósseis, de mais 170 milhões de toneladas.

A resolução do problema das alterações climáticas exige uma transição energética em que os combustíveis fósseis sejam, em grande medida, substituídos à escala global por fontes de energia descarbonizadas. A transição é dificultada pelas características do processo humano inato do desconto temporal que valoriza muito mais o imediato e o curto prazo do que o médio e longo prazo (Santos, 2021; 2022; 2024; 2024a). Esta dificuldade reflete-se no facto de o cumprimento da meta de aquecimento de 1,5 °C do Acordo de Paris exigir um investimento anual global de mais de 3 biliões (10¹²) de dólares (EUA) no sistema energético mundial que teria de ser parcialmente desviado do objetivo de curto prazo de otimizar imediatamente, e tão rapidamente quanto possível, o crescimento económico global (Timperley, 2021; Gallagher, 2022). No entanto, os impactos das alterações climáticas resultantes de objetivos de mitigação pouco ambiciosos a curto prazo serão muito mais onerosos a médio e longo prazo, especialmente após 2050. Esta problemática foi amplamente discutida por muitos autores, entre os quais se destacam Stern (2007) e Nordhaus (2007; 2017).

FINANCIAMENTO CLIMÁTICO NO MUNDO MAIS FRAGMENTADO

O Sul Global tem uma capacidade de adaptação aos impactes das alterações climáticas geralmente inferior à do Norte Global, devido ao nível relativamente baixo do seu desenvolvimento socioeconómico. As emissões históricas totais e as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) *per capita* do Sul Global são inferiores às do Norte Global. De facto, o Sul Global contribuiu menos do que o Norte Global ao longo da história para gerar o

problema das alterações climáticas que confronta todos, embora seja geralmente mais vulnerável aos seus impactos adversos. Perante esta situação de injustiça climática, os países industrializados aceitaram finalmente na COP27 a constituição de um fundo de perdas e danos (*loss and damage*), um conceito inicialmente proposto pela Associação dos Pequenos Estados Insulares (AOSIS). Este conceito foi mencionado pela primeira vez nas negociações da COP13 em Bali, em 2007, e suscitou uma forte oposição dos países industrializados. Na COP15, em Copenhaga, em 2009, os países desenvolvidos comprometeram-se a ajudar os países em desenvolvimento a combater as alterações climáticas por via da mitigação e da adaptação com um financiamento anual de 100 mil milhões de dólares (EUA), mas este montante teve grande dificuldade em ser atingido. Estima-se que em 2019 tenha totalizado 80 mil milhões de dólares (EUA) (Timperley, 2021) e atingido os 100 mil milhões em 2022. Atualmente as necessidades financeiras para a mitigação e a adaptação nos países em desenvolvimento atingem os biliões. Segundo a OCDE deveriam ser cerca de 2,4 biliões de dólares por ano a partir de 2026. Outro problema é o facto de a maior parte da ajuda financeira ser constituída por empréstimos e não por subvenções. Os empréstimos representaram dois terços da ajuda em 2021.

As implicações negativas da divisão Norte-Sul são preocupantes quando se trata de mitigação, uma vez que esta é a ação que pode travar a alteração climática global. A maioria dos países do Sul Global não pode efetuar a transição energética sem o apoio tecnológico e o financiamento público e privado dos países industrializados e dos Bancos Multilaterais de Desenvolvimento (BMD). Precisam de apoio porque a sua primeira prioridade é implementar a agenda de desenvolvimento socioeconómico que satisfaz a sua legítima ambição de atingir um nível de bem-estar e prosperidade económica comparável ao dos países industrializados. Para tal, com o atual modelo de economia *mainstream*, dominante à escala mundial, o consumo de energia *per capita* terá de aumentar consideravelmente para níveis comparáveis ao consumo atual nos países industrializados. As formas de energia que lhes são mais facilmente acessíveis do ponto de vista económico são

os combustíveis fósseis. Muitos dos países em desenvolvimento pretendem seguir o modelo da China, que registou um crescimento económico notável nas últimas quatro décadas. Este crescimento baseou-se no grande aumento do consumo de energia, que no caso da China foi sustentado principalmente pelo carvão. Nas duas primeiras décadas deste século, a China emitiu 195 mil milhões de toneladas de CO_{2e} (CO₂ equivalente) para a atmosfera (Climate Watch, 2022). O PIB nominal da China cresceu de 1,029 biliões de dólares (EUA) em 1998, para 17,96 biliões de dólares (EUA) em 2022 (WB, 2024), tirando centenas de milhões de pessoas da pobreza. Se os países em desenvolvimento seguirem o padrão da Europa, dos EUA e da China, cujo PIB cresceu primeiro com a ajuda dos combustíveis fósseis e mitigarem depois, será impossível cumprir o objetivo do Acordo de Paris de manter a TMGAS abaixo de 1,5 °C ou 2 °C. Estes objetivos exigem emissões líquidas nulas (ELN) de GEE em 2050 ou 2070, respetivamente, evitando assim a gravidade crescente dos impactos futuros das alterações climáticas. ELN de GEE é a situação em que as emissões de GEE (incluindo todos os GEE com emissões antropogénicas, sendo os principais CO₂, CH₄ e N₂O) para a atmosfera são inteiramente compensadas pela remoção da atmosfera de uma quantidade equivalente desses GEE. A neutralidade carbónica é um conceito diferente e significa que as emissões de CO₂ são inteiramente compensadas pela captura de CO₂ da atmosfera por processos naturais ou tecnológicos, sendo, portanto, um objetivo mais restrito.

As emissões globais de CO₂ atingiram 40,6 GtCO₂ (Giga ou 10⁹ toneladas de CO₂) em 2022, impulsionadas pelas emissões do setor da energia e indústria, que atingiram um máximo histórico de 36,6 GtCO₂, correspondendo a um aumento de 1% em relação a 2019 (IEA, 2022) e de 1,3% relativamente a 2021. Em 2023, as emissões globais de CO₂ do setor da energia e indústria cresceram 410 milhões de toneladas, o que corresponde a um aumento de 1,1%, e atingiram um novo máximo histórico de 37,4 Gt (IEA, 2024). Entre 2019 e 2023, as emissões totais de CO₂ do setor da energia e indústria aumentaram cerca de 900 milhões de toneladas. Sem a crescente implantação de cinco tecnologias-chaves de energia descarbonizada desde 2019 — solar

fotovoltaica, eólica, nuclear, bombas de calor e veículos elétricos — o crescimento dessas emissões teria sido três vezes maior ou seja cerca de 2,7 GtCO₂ (IEA, 2024). Em conclusão as referidas novas tecnologias conseguiram reduzir as emissões no referido período de tempo de 1,8 GtCO₂. Este facto salienta bem uma das maiores dificuldades da transição energética que consiste no aumento da procura de energia à escala global impulsionado principalmente pelos países fora da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE). Note-se que nas duas primeiras décadas do século atual o consumo global de combustíveis fósseis aumentou 40%. As energias renováveis estão longe de conseguirem satisfazer este crescimento da procura de energia, suportado na sua maior parte pelos combustíveis fósseis.

Para limitar o aquecimento a 1,5 °C é necessário que as atuais emissões globais anuais de CO₂ sejam reduzidas para cerca de metade até 2030. Attingir este objetivo seria muito disruptivo para a economia mundial devido à rapidez da transição, e conseqüentemente é praticamente impossível de pôr em prática. Não seria possível que essa transição fosse justa, ou seja, que salvaguardasse os equilíbrios de interesses socioeconómicos e as expectativas de desenvolvimento em todos os países do mundo. No entanto, há também boas notícias no que respeita à mitigação global. O aumento médio anual das emissões de CO₂ provenientes do uso de combustíveis fósseis e da indústria diminuiu de 3% na década de 2000 para cerca de 0,5% na década seguinte. Além disso, a IEA prevê que a procura de carvão atingirá o seu pico na década de 2020, a de gás natural no final da década e a de petróleo em meados da década de 2030 (IEA, 2022). Mais recentemente, a IEA confirmou um aumento da procura de energia elétrica proveniente de energias renováveis, prevendo que estas cobrirão quase todo o crescimento da procura global dessa forma de energia até 2025, tornando-se nessa altura a principal fonte de energia elétrica do mundo (IEA, 2023). O sucesso da transição energética à escala global requer um esforço muito maior de eficiência energética e a substituição das energias fósseis pelo conjunto de todas as fontes primárias de energias alternativas, no *mix* mais adequado e aceitável a cada país. Esse *mix* contempla principalmente as energias renováveis, com

a necessária maior eletrificação do setor da energia, os combustíveis de baixo carbono, incluindo os combustíveis sintéticos, a energia nuclear de fissão e fusão e outras fontes primárias alternativas que eventualmente surjam. O desafio é de tal modo crítico para humanidade que se torna necessário aproveitar criteriosamente a contribuição que qualquer das fontes alternativas de energia pode dar.

Desde 1990, o crescimento das emissões tem sido dominado por países sem objetivos de limitação das emissões e com emissões per capita relativamente baixas, tais como a China e a Índia e pelos EUA e Canadá, que não ratificaram o Protocolo de Quioto (Pedersen et al., 2020). A tendência histórica das emissões de GEE nos países da OCDE está mais próxima da gama de cenários de emissões médio-baixo e baixo do IPCC, mas mais próxima da gama de cenários médio-alto e alto do IPCC nos países que não pertencem à OCDE (Pedersen et al., 2020; Pedersen et al., 2021). Por outras palavras, a OCDE está no bom caminho para cumprir os limites de temperatura do Acordo de Paris, mas os países não pertencentes à OCDE seguem uma trajetória de emissões que se situa entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Atualmente, há cerca de vinte países em desenvolvimento com populações em crescimento, taxas de crescimento económico relativamente elevadas e grande dependência dos combustíveis fósseis. Consequentemente têm e terão no futuro trajetórias de forte aumento de emissões de GEE se não forem ajudados pelos países industrializados a fazer a transição energética, através da assistência às políticas energéticas e de várias formas de financiamento público, privado e filantrópico, envolvendo os BMD e uma variedade de instituições financeiras. Entre eles contam-se o Bangladesh, Índia, Indonésia, Irão, Paquistão, Cazaquistão, Filipinas, Tailândia, Vietname, Argélia, Egito, Etiópia, Nigéria, Tanzânia, Uganda, República Democrática do Congo, África do Sul e México (Gallagher, 2022), para além dos casos específicos da China, Rússia, Arábia Saudita e de outros países produtores de combustíveis fósseis do Médio Oriente. Na África do Sul, 87% da eletricidade do país é fornecida pelo carvão. Para resolver este problema, os governos da África do Sul, França, Alemanha, Reino Unido e Estados

Unidos, juntamente com a UE, comprometeram-se a atribuir um financiamento inicial de 8,5 mil milhões de dólares (EUA) para ajudar a uma transição energética justa, em que o carvão é substituído por energia eólica e solar, sem prejudicar o crescimento económico do país (JETP, 2022). Existem planos semelhantes para outros países, como o Vietname e a Indonésia, mas a capacidade destes planos para reduzir significativamente as emissões do conjunto dos países em desenvolvimento terá de aumentar. Os países menos desenvolvidos necessitarão de grandes quantidades de energia para se desenvolverem e alcançarem maior bem-estar e prosperidade económica, e para suportarem simultaneamente as consequências mais gravosas dos impactos das alterações climáticas.

Os EUA desempenham um papel central no processo de transição energética global devido à sua forte dependência histórica dos combustíveis fósseis, ao seu domínio sobre a política internacional, resultante do seu poder económico e militar global, e também porque lideram o grupo de democracias da OCDE. Em 2021 os EUA foram o maior produtor mundial de petróleo com 18,9 milhões de barris por dia, seguido da Arábia Saudita com 10,84 e da Rússia com 10,78 milhões de barris (EIA, 2022). Foram também o maior consumidor de petróleo do mundo em 2021, com 19,89 milhões de barris por dia, seguido pela China, com 14,76 milhões de barris (EIA, 2022). Os EUA são também o maior produtor de gás natural, com 932,04 mil milhões de m³ em 2021, seguidos pela Rússia, com 643,61 mil milhões de m³ (EIA, 2022), e o maior consumidor mundial, com 771,46 mil milhões de m³. Estes posicionamentos relativos mantiveram-se em 2022 e 2023. A dependência histórica e atual da economia dos EUA do petróleo, do gás natural e em menor grau do carvão é suscetível de tornar a transição energética particularmente difícil nesse país. Apesar das iniciativas do atual governo, em especial a Lei de Redução da Inflação (*Inflation Reduction Act, Public Law 117-169*) de 16 de agosto de 2022, que constitui o maior investimento na transição energética feito pelo Congresso na história do país. No que respeita ao carvão, em 2021 os EUA eram o quarto maior produtor, com 544 milhões de toneladas, depois da China, da Índia e da Indonésia, com,

respetivamente, 3942, 767 e 550 milhões de toneladas, e o terceiro consumidor de carvão, depois da China e da Índia (GD, 2022).

Recorde-se que em 1997, pouco antes da COP3 de Quioto, onde foi aprovado o Protocolo de Quioto, o Senado dos EUA aprovou por unanimidade a Resolução Byrd-Hagel, que proíbe o governo dos EUA de assinar um tratado internacional de mitigação que obrigue o país a reduzir as suas emissões de GEE sem obrigar também os países em desenvolvimento, especialmente as grandes economias emergentes, a reduzir as suas emissões, pois isso prejudicaria a economia americana. O ponto de vista dos EUA era que os principais países em desenvolvimento com emissões elevadas deveriam reduzi-las, mesmo que o seu nível de desenvolvimento socioeconómico fosse ainda incipiente e as suas emissões per capita muito inferiores às dos EUA e às de outros países da OCDE. Esta visão do mundo não tolera a emergência de novas potências económicas concorrentes, como a China. Passados 15 anos a posição dos EUA em relação à China no que diz respeito às alterações climáticas foi suavizada na presidência de Barack Obama, numa reunião com o Presidente chinês Xi Jinping, em 25 de setembro de 2015, em que os dois países concordaram em colaborar na ação climática e em envidar esforços comuns para alcançar a mitigação global. No entanto, esta colaboração terminou com o Presidente Donald Trump e não recuperou totalmente com o Presidente Joe Biden. Nas eleições intercalares para o Congresso dos EUA em novembro de 2022, houve um recuo nas políticas climáticas, apesar dos esforços do Presidente para cumprir o Acordo de Paris. A probabilidade de os EUA cumprirem a meta que estabeleceram de atingir ELN de GEE em 2050 é evanescente. A trajetória de redução das emissões necessária para atingir as ELN em 2050 é abrupta e disruptiva tanto para os EUA como para a EU, mas muito mais para os EUA.

A responsabilidade dos EUA pela atual situação climática do mundo é inquestionável. Até à data, emitiu mais CO₂ do que qualquer outro país, representando cerca de um quarto das emissões globais históricas de CO₂ desde 1751, que ascendem a 1,5 biliões de toneladas de CO₂ (Friedlingstein et al., 2022). A UE(27) mais o Reino Unido não ficam muito

atrás, com 22%, e a China representa 13% e esta percentagem está a aumentar rapidamente. Os EUA defenderam durante décadas o consumo de combustíveis fósseis sem investir em energias renováveis, mas atualmente parte do *establishment* político apoia uma rápida transição energética. O país poderia liderar o processo global de financiamento da luta contra as alterações climáticas e, em especial, reformar os BMD, de modo a que estes contribuam mais para um esforço coordenado a nível mundial, envolvendo os setores público, privado e filantrópico, destinado a financiar indústrias, meios de produção e consumo de bens e serviços e fontes de energia com baixas emissões de carbono. Cerca de metade das economias em desenvolvimento e emergentes com potencial para um elevado crescimento das emissões aprovaram objetivos de ELN de GEE para meados do século, mas não dispõem de um bom modelo político para assegurar o crescimento económico, que consideram prioritário, com baixas emissões de carbono.

Para alcançar esse modelo, precisam de incentivos de mercado estáveis para as indústrias com baixo teor de carbono e de apoio financeiro e político, em especial por parte das duas maiores economias do mundo. No entanto, estes dois países estão envolvidos numa competição geoestratégica, política, económica, tecnológica e militar em que as preocupações de segurança dos EUA reafirmaram a sua primazia sobre as forças do mercado livre. Razões geoestratégicas forçaram os EUA a deixar de ser o campeão do comércio livre para se tornar um defensor do protecionismo, tornando-se a economia avançada mais protecionista. O novo ambiente nacionalista e protecionista dificulta a cooperação internacional necessária para realizar a transição energética global (Santos et al., 2024; 2024a).

É difícil acompanhar o financiamento da mitigação das alterações climáticas a nível mundial. As melhores estimativas atuais concluem que o financiamento anual da ação climática global aumentou de 364 milhões de dólares (EUA) no período de dois anos de 2011–2012 para 632 milhões de dólares (EUA) em 2019–2020, sendo 571 para a mitigação, 46 para a adaptação e 15 para utilizações duplas (CPI, 2021). Infelizmente, estes custos são comparáveis aos subsídios que os combustíveis fósseis receberam

entre 2017 e 2019, estimados em 646 milhões de dólares (EUA) anuais (OECD, 2021). Em 2020, devido à pandemia de COVID- 19, aqueles subsídios diminuíram para 362,4 milhões, mas quase duplicaram em 2021 para 697,2 milhões (OECD, 2021).

Para não se ultrapassar um aumento de temperatura de 1,5 °C, os fundos anuais para a mitigação devem aumentar rapidamente. As estimativas feitas em 2018 previam que, a nível mundial, entre 2020 e 2024, as necessidades médias anuais de investimento em energia hipocarbônica e em eficiência energética na utilização final, no âmbito de uma via compatível com Paris, eram cerca de 1,4 biliões de dólares (EUA) por ano (Rogelj et al., 2018; McCollum et al., 2018). Estimativas mais recentes indicam que o financiamento anual global da mitigação tem de aumentar rapidamente para valores mais elevados, entre 3 e 4 biliões de dólares, até 2030, e atingir 6 biliões de dólares (EUA) em 2040, para evitar um aquecimento superior a 1,5 °C (Timperley, 2021; Gallagher, 2022). Esta revisão resulta principalmente do constante aumento da procura de energia que é quase integralmente suportado pelos combustíveis fósseis. As vias de financiamento da mitigação mais favoráveis para a mitigação global são descritas no sexto relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2022). No entanto, o IPCC não abordou a questão de como afetar os custos da mitigação às diferentes regiões e países. Trabalhos mais recentes sobre a forma de distribuir os custos do investimento na mitigação entre as diferentes regiões, de acordo com o princípio das responsabilidades comuns, mas diferenciadas, mostram que os fluxos da América do Norte e da Europa para as regiões menos desenvolvidas teriam de aumentar substancialmente em relação aos níveis atuais, para cumprir os objetivos do Acordo de Paris (Pachauri et al., 2022). Os fluxos inter-regionais anuais para mitigação do Norte Global para o Sul Global devem aumentar, a curto prazo, de 250 mil milhões de dólares (EUA) PPP (Paridade de poder de compra) para 570 mil milhões de dólares (EUA) PPP (Pachauri et al., 2022). A concretização deste objetivo exige novas políticas de investimento no Norte Global, de modo a proporcionar novos tipos de seguros que permitam ultrapassar os obstáculos financeiros, em particular

os riscos cambiais e de dívida dos mercados emergentes, bem como as restrições associadas às notações de crédito (*credit-ranking*). É desejável que os acionistas dos BMD tenham à sua disposição veículos de redução dos riscos de investimento privado de modo a sentirem-se confortáveis ao contribuírem para evitar os cenários climáticos futuros mais gravosos. A aplicação dos princípios ESG (ambiental, social e governação) no investimento em mitigação tem progredido nos últimos anos, mas existe também uma reação anti-ESG promovida por alguns setores empresariais ligados ao partido Republicano dos EUA (ICN, 2023).

Um estudo recente realizado em vários mercados e geografias (Christophers, 2024) conclui que o investimento privado em energia eólica e solar é estruturalmente pouco lucrativo porque o negócio é muito competitivo e os lucros são baixos, voláteis e difíceis de prever, em parte devido à questão da intermitência e da variabilidade. Acresce que, embora o custo de geração de energia elétrica eólica e solar sejam baixos e tenham diminuído muito nas últimas décadas, os respetivos parques de geração de energia ocupam em geral áreas extensas, o seu uso está sujeito a uma competição elevada, e estão em geral distantes dos centros de consumo de energia elétrica, o que aumenta o custo da rede de distribuição. No caso dos combustíveis fósseis as centrais térmicas podem ser instaladas relativamente próximas dos centros de consumo. Face a estes condicionalismos o sistema bancário retrai-se e torna os financiamentos privados da energia eólica e solar menos acessíveis. A narrativa de que a eletricidade barata gerada a partir dessas fontes de energia renovável irá inevitavelmente desbloquear a transição energética é difícil ou mesmo impossível de compatibilizar com o sistema atual da economia *mainstream* baseado na perspectiva de rentabilidades elevadas e confiáveis para os investidores particulares. O investimento é orientado pelo lucro e não pelo preço. Consequentemente a exploração de parques eólicos e solares é um negócio marginal que continua a depender do apoio financeiro do Estado. Uma solução possível é o Estado assumir mais o ónus do desenvolvimento das energias renováveis através de vários tipos de mecanismos (Christophers, 2024).

MITIGAÇÃO NO CONTEXTO DE CRISES MUNDIAIS SIMULTÂNEAS

Desde o início de 2020, o mundo tem sido confrontado com uma série de crises globais que se sobrepõem, com impactos e respostas altamente diferenciadas por parte dos países de todo o mundo. A reação à pandemia de COVID-19, responsável por mais de sete milhões de mortes até janeiro de 2024 (WHO, 2024), aumentou a despesa global com a saúde para 9 bilhões de dólares (EUA) em 2020, ou seja, 10,8% do PIB mundial, mas a distribuição deste custo foi muito desigual entre os países pertencentes a diferentes grupos de rendimento (WHO, 2022). Os países de rendimento elevado, embora representem apenas 15% da população mundial, foram responsáveis por 80% das despesas totais com a saúde em 2020, sendo os EUA responsáveis por 44% de todas as despesas. Os países de rendimento médio-alto, os países de rendimento médio-baixo e os países de baixo rendimento representaram 16%, 4% e 0,2%, respetivamente, do total das despesas de saúde em 2020, embora representassem 33%, 43% e 8% da população mundial. A distribuição da despesa global em saúde foi semelhante em 2019 e 2020, o que revela a sua grande estabilidade apesar da gravidade da pandemia (WHO, 2022).

Para além dos impactos na saúde, a pandemia criou uma crise económica global, provavelmente a maior em mais de um século (WB, 2022), e provocou um grave aumento da desigualdade socioeconómica no interior e entre países, através do mundo. Ao contrário de crises pandémicas anteriores, as vacinas contra a COVID-19 foram desenvolvidas em tempo recorde em países Ocidentais e os impactos da pandemia foram enfrentados com uma forte resposta a nível político e económico. A maioria dos países com economias avançadas reagiu prontamente com instrumentos de estímulo económico que foram utilizados através dos seus sistemas fiscais. Os pacotes de recuperação económica, no final de agosto de 2020, ascendiam a 12,2 bilhões de dólares (EUA), 80% dos quais provenientes do grupo de países da OCDE (Andrijevic et al., 2020). Este investimento é cerca de 10 vezes superior ao investimento médio anual em energia com baixo teor de carbono e eficiência energética na utilização final, que seria necessário

nessa altura para atingir a trajetória de 1,5 °C (Andrijevic et al., 2020). Esta comparação revela a prioridade previsível de manter um crescimento económico global estável e sustentado acima de todas as outras preocupações, em particular a necessidade de mitigação global das alterações climáticas. Apesar da gravidade da crise económica desencadeada pela pandemia de COVID 19, o PIB mundial real diminuiu 3,4% entre 2019 e 2020, mas recuperou aumentando 5,8% em 2021 (OECD, 2021a). Um sinal de que o conjunto das medidas de estímulo à economia foram bem-sucedidas. A recuperação da crise pandémica foi muito mais lenta em termos de rendimento e de meios de subsistência no Sul Global do que no Norte Global. Este atraso aumentou a desigualdade de rendimentos a nível mundial, invertendo alguns dos progressos alcançados desde 2000. Além disso, a pandemia fez com que a dívida global total atingisse o nível mais elevado em meio século.

A invasão russa da Ucrânia, em 24 de fevereiro de 2022, criou o que parece ser uma longa crise de guerra com um impacto transformador na geopolítica e geoestratégia mundial, nas relações entre o Norte e o Sul, na segurança alimentar, na economia e no sistema financeiro. A guerra criou inicialmente uma grave crise de escassez de alimentos em vários países do Sul Global, especialmente cereais, gerou uma crise energética europeia, perturbou ainda mais as cadeias de abastecimento de bens e serviços à escala mundial, já tensas devido à crise da COVID-19, e gerou um aumento da inflação praticamente em todo o mundo, e com implicações políticas bem visíveis no Ocidente. As políticas securitárias e protecionistas decorrentes sobretudo da guerra e das preocupações de segurança aumentaram a probabilidade de um crescimento económico mais lento na Europa e nos EUA. Os rendimentos reais na maioria das economias avançadas estão a cair de uma forma comparável à segunda metade da década de 1970, quando a inflação era muito elevada em resultado de políticas monetárias que financiavam défices orçamentais massivos.

No que diz respeito à redução progressiva da utilização de combustíveis fósseis e, em particular, do petróleo, a guerra está a ter efeitos mistos. Na

UE, está a contribuir para acelerar a transição para as energias renováveis de modo a evitar a anterior dependência do gás e do petróleo russos. Porém, este movimento está a afetar negativamente as economias Europeias, muito especialmente a economia da Alemanha que deixou de ter acesso ao gás natural russo relativamente barato e tem atualmente uma situação de grande fragilidade económica relativamente ao passado pré-crisis. A nível mundial, o estabelecimento de sanções e de um limite máximo para os preços do petróleo e dos produtos petrolíferos russos pelos EUA, pela UE e por outros países, juntamente com a reabertura da economia chinesa após o abandono da política de saúde “zero COVID-19” e a esperada retoma da economia mundial, teve o duplo efeito de diminuir a oferta de petróleo e de aumentar a sua procura mundial. Em consequência, os preços e as receitas do petróleo aumentaram consideravelmente. A guerra e a crise energética contribuíram para que as maiores empresas produtoras de petróleo e gás natural do Ocidente tivessem lucros de cerca de 200 mil milhões de lucros em 2022. As receitas do petróleo nunca foram tão lucrativas, embora o aumento das receitas não resulte da capacidade de gestão de nenhuma empresa em particular. Foi apenas fruto da situação internacional decorrente da guerra na Europa. Note-se que na crise de COVID-19, pelo contrário, os lucros das grandes companhias petrolíferas tiveram quedas muito acentuadas. Em meados de abril de 2020, o preço do barril do West Texas crude desceu abaixo dos zero dólares, por que os vendedores tinham de pagar para armazenar o petróleo que não conseguiam vender.

Em 2022, as mesmas grandes companhias disponibilizaram menos petróleo para o mercado com o objetivo de aumentar os preços e os lucros, dado que a procura era muito elevada. O Presidente Joe Biden, no seu discurso sobre o Estado da União, em 2022 (TWH, 2022), e em outras intervenções ao longo desse ano, exigiu que as empresas investissem os seus lucros na produção de mais petróleo e no aumento da capacidade de refinação de modo a baixar os preços, mas sem sucesso. As empresas preferiram adotar uma política de remuneração dos acionistas, em particular com o mecanismo de recompra de ações. A Chevron e a ExxonMobil dos EUA

anunciaram, em fevereiro de 2023, um plano de recompra de ações no valor de 75 e 35 mil milhões de dólares, respetivamente.

A longo prazo a principal consequência do aumento das receitas dos acionistas é as empresas petrolíferas abrandarem a transição para as energias renováveis (Sengupta, 2023), embora anteriormente tenham começado a diminuir a sua produção de petróleo e gás. Perante a incerteza quanto ao futuro preferem recomprar as suas próprias ações, recompensando os seus CEO e acionistas na esperança de que estes continuem a acreditar na longevidade do petróleo e do gás natural e que a procura de petróleo continue a aumentar, pelo menos a curto prazo. Os lucros dos acionistas das empresas produtoras de carvão também aumentaram com o forte aumento da procura impulsionada pelos preços elevados da energia fóssil resultantes da guerra na Ucrânia. A empresa suíça de extração mineira e comércio de mercadorias Glencore mais do que triplicou os seus lucros em 2022 em relação ao ano anterior, atingindo 34 mil milhões de dólares, mais de metade dos quais provenientes da venda de carvão (Hook, 2023).

O consumo de carvão é uma questão particularmente difícil. Para seguir as trajetórias do IPCC de 1,5 °C (IPCC, 2022), é necessário que a utilização do carvão seja progressivamente eliminada na Índia, na China e na África do Sul, a um ritmo duas vezes mais rápido do que em qualquer das transições energéticas históricas anteriores (Muttitt et al., 2023). À escala global o mercado dos combustíveis fósseis está a adaptar-se de forma extraordinariamente rápida ao contexto novo de guerra na Europa e dos novos equilíbrios geopolíticos. O petróleo e o gás russo continuam a encontrar uma elevada procura a preços relativamente baixos na China, Índia e em outros países.

Um sinal interessante e recente no Ocidente é as empresas dos combustíveis fósseis, especialmente do sector do petróleo e do gás natural, estarem a perder pessoal qualificado e a ter dificuldade em atrair novos talentos, porque têm vindo a perder credibilidade na situação atual de crescente crise climática (Augustine and Soppe, 2023). Esta tendência, designada por “climate quitting” poderá criar novos desafios ao setor mas é ainda cedo para

o poder afirmar. Muitas empresas do sector da energia optam por uma retórica na qual se dilui a sua responsabilidade de descarbonização em vez de investirem na ação climática. Para os trabalhadores do sector do petróleo e do gás preocupados com o clima é mais fácil ultrapassarem o seu sentimento de conflito de valores mudando de ideias do que mudar o emprego. Mas com o crescimento do sector das energias renováveis, há cada vez mais oportunidades nesse setor para os especialistas em energia.

A despesa militar global tem vindo a aumentar sistematicamente desde 2015. De 2021 para 2022 aumentou 3,7% atingindo um máximo histórico de 2,24 biliões de dólares em 2022 (SIPRI, 2023). Na década de 2013–2022 aumentou 19%. Os EUA continuam a ser o país com maior orçamento militar. Este atingiu 905,5 mil milhões de dólares em 2023, mais do que os 15 países seguintes juntos, incluindo a China, que se situou em segundo lugar com 219,5 mil milhões de dólares, e a Rússia, em terceiro. Os países da NATO foram responsáveis por cerca de 55% das despesas militares mundiais em 2022. Na maioria dos países, os aumentos dos orçamentos militares, ditados pelas atuais tensões geopolíticas e conflitos armados, enfrentam um ambiente financeiro e económico difícil, criado pela recuperação financeira e económica pós-COVID-19, pelo peso da dívida, pelo efeito da inflação e por um crescimento económico mais lento. A eventualidade de um conflito armado entre os EUA e a China, que provavelmente arrastará todos os países da OTAN, criará no Ocidente uma economia de guerra.

Ao massacre que o Hamas (movimento islamita sunita palestino que governa partes da Faixa de Gaza) provocou em Israel, em 7 de outubro de 2023, matando 1.139 israelitas e estrangeiros, incluindo 764 civis, e fazendo 248 reféns, seguiu-se, com os contínuos bombardeamentos israelitas, a morte em Gaza de dezenas de milhares de vítimas palestinianas que no início de abril totalizavam 32.845 pessoas, cerca de 70% das quais mulheres e crianças. Desencadeou-se assim uma nova guerra que dá poucos sinais de se extinguir, e tem características de limpeza étnica (Tharoor, 2024). Os Hutis, nome mais frequente do movimento político-religioso separatista Ansar Allah, que se encontra em guerra civil há mais de uma década no Iémen e é apoiado pelo

Irão, lançaram, desde 19 de novembro de 2023, dezenas de ataques com mísseis e drones contra navios comerciais Ocidentais que apoiam Israel e afirmam que irão continuar a fazê-lo até se chegar a um cessar-fogo em Gaza. Uma parte das companhias de navegação passaram a evitar a rota do Canal do Suez e a viajar à volta de África, o que aumentou o custo do transporte marítimo de mercadorias entre a Ásia e a Europa. Em média, o custo do transporte da China para a Europa mais do que duplicou desde dezembro de 2023 a fevereiro de 2024. Cerca de 12% do comércio mundial passa pelo Canal do Suez, representando 30% de todo o tráfego mundial de contentores e mais de 1 bilião de dólares de mercadorias por ano. A situação atual de insegurança nas proximidades do estreito de Bab el-Mandab começa a afetar a economia mundial e a provocar de novo um aumento da inflação. No que respeita à energia, cerca de 9% do comércio mundial de petróleo passa pelo Canal de Suez. Em 11 de janeiro de 2024, os EUA e o Reino Unido começaram a realizar ataques aéreos contra alvos Huti no Iémen e, em 25 de janeiro, o preço do petróleo bruto tipo Brent ultrapassou os 80 dólares por barril. Desde então o preço tem tido uma tendência de crescimento lento atingindo mais de 91 dólares por barril em 5 de abril de 2024.

A fratura Norte-Sul está a ser exacerbada pelas guerras na Europa e no Médio Oriente, especialmente a última (Kepel, 2024). Em Israel, após o 7 de outubro, ao islamismo radical do Hamas sunita e dos seus aliados xiitas do Irão opõem-se os judeus supremacistas e os judeus Haredi que asseguram a sobrevivência do governo de Netanyahu. O conflito israelo-palestiniano exemplifica e agrava a divisão Norte-Sul, com Israel identificado como o Norte e a Palestina como o Sul. Do Iémen ao Líbano, este confronto intensifica as tensões regionais e tem repercussões mundiais. Assume a aparência de uma guerra contra o Ocidente e os seus valores, colocando o apartheid contra a Shoah. O Sul tenta apropriar-se da palavra genocídio com a África do Sul a levar Israel ao Tribunal Internacional de Justiça (TIJ) em 29 de dezembro de 2023, enquanto o Norte tenta por todos os meios evitar essa palavra. A 1 de março de 2024, a Nicarágua intentou uma ação contra a Alemanha no TIJ, alegando que Berlim violou a Convenção sobre o

Genocídio de 1948, devido ao seu apoio diplomático e venda de armas a Israel e à sua decisão de suspender os fundos destinados à agência de ajuda palestina UNRWA (*United Nations Relief and Works Agency*), devido a alegações de que o seu pessoal é cúmplice do terrorismo contra Israel.

A humanidade tem vindo a enfrentar as crises da pandemia e de duas guerras, bem como a crise global da dívida, a crise das alterações climáticas, a crise da biodiversidade e a crise da fome, que atingiu um máximo histórico de 49 milhões de pessoas em 46 países em risco de cair em condições de subnutrição grave ou extrema (FAO-WFP, 2022). Em 2023, a fome no mundo atingiu um máximo histórico. De acordo com o WFP das Nações Unidas mais de 300 milhões de pessoas enfrentaram uma insegurança alimentar aguda nesse ano.

A maior parte destes desafios conjugados de sustentabilidade global, têm origem em tendências de longo prazo que dificilmente poderão ser invertidas apenas com a ajuda da ciência e da tecnologia, porque estão enraizadas na natureza humana (Santos et al., 2024; 2024a). A atenuação e eventual resolução das crises atuais requer uma abordagem multidisciplinar que transcenda as visões setoriais estritamente geoestratégicas, religiosas, políticas, económicas, financeiras, científicas ou tecnológicas, e permita interpretar a história passada, a situação presente e futura da sociedade humana mundial a médio e longo prazo. Do ponto de vista económico e financeiro, as crises pandémica e bélica exacerbaram uma tendência anterior de passagem da insuficiência da procura para a insuficiência da oferta. Provocaram o fim da liquidez ilimitada dos bancos centrais e criaram uma maior fragilidade nos mercados financeiros. As desigualdades crescentes entre o Sul e o Norte Global e os desafios agrícolas, alimentares e ambientais que o mundo enfrenta não podem ser ultrapassados se a Organização Mundial do Comércio (OMC) for descredibilizada e posta de lado. Atualmente, o bloqueio dos EUA às nomeações para o Órgão de Recurso (Appellate Body), que está no centro do mecanismo de resolução de litígios da OMC, impossibilita os países membros de cumprirem as obrigações da OMC (Lester, 2022). A prática dos EUA de substituir a globalização pela regionalização e

pela *friend shoring* ou *reshoring* é particularmente prejudicial para os países que não pertencem aos grandes blocos regionais e dificulta a resolução dos problemas da dívida, da mudança climática, da perda biodiversidade e da crise da fome em alguns países do mundo. A aplicação das políticas comerciais de *friend shoring* pode também ser prejudicial para os próprios países que as incentivam. Ao ignorar as forças de mercado com regulamentos que redirecionam os fluxos comerciais internacionais, os mercados tendem a ser menos eficientes e os países podem sofrer custos acrescidos (Harput, 2022).

As políticas protecionistas sob a forma de mercantilismo prevaleceram até ao século XVIII e foram amplamente utilizadas no final desse século pelos EUA, no período da fundação do país, para desenvolver a sua industrialização. O protecionismo foi também a ideologia económica dominante nos EUA e na Europa Ocidental durante grande parte dos séculos XIX e XX, até que os EUA aderiram ao comércio livre no período que se seguiu à Segunda Guerra Mundial (Bairoch, 1995) e ajudaram a estabelecer o Acordo Geral sobre Pautas Aduaneiras e Comércio e, mais tarde, a OMC. Há um consenso consolidado de que o comércio livre melhora a eficiência da produção e aumenta o crescimento económico e a prosperidade global. O modelo ocidental moderno vai um pouco mais longe e parte do princípio de que a prosperidade económica conduz à democracia liberal, com as liberdades de expressão e de culto religioso, e que não há praticamente risco de guerra entre as democracias liberais (Weede, 1995). O facto de a China, após o seu notável crescimento económico nas últimas três décadas, não ter seguido a narrativa ocidental é visto pelo Ocidente como um desenvolvimento ameaçador. Além disso, o modelo da China atraiu a atenção e está a ser emulado por algumas economias emergentes e em desenvolvimento.

Desde o início do século XXI, tem-se observado uma erosão da democracia e uma autocratização dos regimes políticos à escala mundial. A percentagem da população humana que vive em regimes de democracia liberal ou eleitoral diminuiu de 52,6%, em 2000, para 29,3% em 2021 (V-dem, 2022). Em 2022, 72% da população mundial — 5,7 mil milhões de pessoas — vive em autocracias (V-dem, 2023). Os avanços nos níveis

globais de democracia registados nos últimos 35 anos foram anulados. A Europa de Leste e a Ásia Central, bem como a América Latina e as Caraíbas, voltaram aos níveis registados no final do fim da Guerra Fria (V-dem, 2023). Será esta tendência um sinal de fraqueza na narrativa de que a aplicação bem-sucedida da economia mainstream para aumentar a prosperidade económica conduz necessariamente à democracia liberal? Ou será um sinal de que esse modelo económico está a ter dificuldades crescentes de satisfazer as expectativas de prosperidade económica, especialmente nos países com economias menos avançadas?

O atual regresso do Ocidente ao protecionismo é uma reação defensiva que tende a aumentar a fragmentação e as desigualdades em todo o mundo. Parece estar a desenvolver-se um fosso global crescente entre um Ocidente relativamente rico e mais unido e o resto do mundo mais pobre, muito mais populoso, mais diverso, e com uma dinâmica forte de crescimento económico. Esta evolução é suscetível de gerar mais incerteza quanto ao resultado dos esforços para resolver as crises globais persistentes que afetam um mundo onde a população mundial continua a aumentar, embora mais lentamente do que no passado. O modelo económico global dominante da economia mainstream baseia-se essencialmente na valorização do interesse próprio e na maximização da utilidade, um objetivo que Simon (2000) considera ser a teoria formal da racionalidade mais desenvolvida. Será esse modelo capaz de enfrentar com êxito as crises globais atuais?

No que respeita às alterações climáticas, tanto o protecionismo, como a limitação do comércio a países com valores e interesses comuns (*like minded*), bem como as sanções com motivações geopolíticas e geoestratégicas, não favorecem nem a transição energética global rápida nem a ação climática a nível mundial. Pelo contrário, existe o risco da mitigação se tornar uma arma no confronto geopolítico. A Lei de Redução da Inflação dos EUA inclui um recorde de 369 mil milhões de dólares para políticas climáticas e energéticas. É saudada como uma contribuição muito importante dos EUA para a mitigação das alterações climáticas. No entanto, os grandes subsídios e créditos fiscais concedidos às empresas que investem nas tecnologias das energias

renováveis, tais como baterias, painéis solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, veículos elétricos, incluindo as várias componentes desses sistemas, só se aplicam quando a produção dos equipamentos se faz no território dos EUA ou no território de uma possessão americana. Esta condição confere às empresas americanas uma vantagem injustificada relativamente às empresas da UE, da Coreia do Sul e de outras partes do mundo que produzem equipamentos semelhantes, mas sem aqueles subsídios e créditos. Os requisitos de produção local para obter os subsídios e créditos fiscais são incompatíveis com as regras da OMC. Estas têm o objetivo de evitar a discriminação de produtos com base no seu país de origem. A nova legislação americana determina também que os minerais críticos para as tecnologias de energia renovável devem ser adquiridos nos EUA, a fim de dissuadir o abastecimento em países considerados de alto risco, como a China. A Lei de Redução da Inflação iniciou uma “corrida às armas no domínio das energias renováveis”, à qual a UE respondeu com o Plano Industrial do Pacto Ecológico para reforçar a competitividade da indústria europeia de transição energética destinada a atingir atempadamente as ELN de GEE. Entretanto, no final de janeiro de 2023, pelo menos 20 fábricas europeias de produção de equipamentos destinados à utilização de energias renováveis anunciaram a sua mudança para os EUA, de acordo com a American Clean Power Association (Chu et al., 2023).

IMPLEMENTAR A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Energia acessível e abundante é essencial à civilização humana pós-revolução industrial. É a força motriz da economia global e está na base das forças e do equilíbrio geopolítico. A transição energética irá contribuir para redesenhar o sistema energético mundial e a ordem geopolítica que lhe está associada. Atingir a neutralidade global do CO₂ vai ser difícil porque cerca de 80% das fontes primárias de energia mundiais ainda são combustíveis fósseis e esta energia alimenta a maior parte das infraestruturas mundiais: edifícios de habitação e serviços, centrais térmicas,

siderurgias, cimenteiras, fábricas de produção de alumínio, de indústrias químicas e de transformação de matérias-primas, telecomunicações, automóveis, comboios, navios, aviões e muitas outras instalações e equipamentos de produção e consumo de bens e serviços. Cada um destes objetos físicos deverá funcionar no futuro sem emissões de GEE no seu ciclo de vida, o que constitui uma transformação muito exigente. Os EUA são um país crítico neste processo devido à grande dimensão da sua economia, ao consumo final de energia per capita muito elevado e à sua profunda dependência dos combustíveis fósseis. A implementação da Lei de Redução da Inflação vai perturbar o sistema económico e enfrentará a oposição da indústria dos combustíveis fósseis e de parte dos seus acionistas. Não restam dúvidas de que a mitigação já começou e está a progredir rapidamente nos EUA. Porém, resta saber se haverá apoio público e determinação política suficientes para alcançar as ELN de GEE, em 2050, no atual ambiente político altamente polarizado no que respeita às energias renováveis? O perigo não é que nada seja feito, mas sim que não se faça o suficiente para atingir as ELN em 2050 ou 2070. A UE(27) está numa posição mais favorável porque tem vindo a aplicar políticas climáticas e energéticas desde 1990 e tem fontes de energia fóssil relativamente pequenas no seu território. As emissões de GEE diminuíram 32,5% entre 1990 e 2022. O sector mais difícil de descarbonizar é o sector dos transportes, cujas emissões aumentaram 7% no mesmo período. As políticas já assumidas pelos governos dos países da UE(27) asseguram uma redução líquida das emissões de 41% até 2030, mas o novo objetivo acordado na Lei Europeia do Clima é de 55%. O sucesso das políticas de mitigação da UE(27) reduziu a sua contribuição para as emissões globais de GEE de 17,0%, em 1990, para 7,5% em 2021, o que mostra que a solução do problema climático global exige a cooperação de todos os países e é arruinada pelos *free-riders* ou parasitas.

Atingir ELN de GEE em 2050 ou 2070, exige a implantação à escala global de tecnologias energéticas descarbonizadas que dependem da disponibilidade atempada de minerais críticos, como o cobre, níquel, lítio, cobalto,

manganês e terras raras. A construção dos novos sistemas de energia e de transporte descarbonizados, como centrais solares fotovoltaicas, parques eólicos, baterias e veículos elétricos, requer mais minerais do que os seus equivalentes de combustíveis fósseis. De acordo com a Agência Internacional da Energia, uma central eólica terrestre e um veículo elétrico médio necessitam respetivamente de nove e seis vezes mais recursos minerais do que os seus equivalentes convencionais (IEA, 2023a). Até 2040, é provável que as tecnologias relacionadas com a energia renovável representem 40%, 60-70% e 90% da procura mundial de cobre, terras raras e lítio, respetivamente. Prevê-se que, até 2040, os veículos elétricos e as suas baterias aumentem a procura de lítio por um fator de 40, enquanto a procura de minerais críticos utilizados em turbinas eólicas e painéis solares deverá aumentar por um fator de 3 a 7 (IEA, 2023a). Para satisfazer esta procura em tempo útil, com disponibilidade e fiabilidade de aprovisionamento, a fim de evitar a volatilidade do mercado e preços elevados que comprometeriam a transição energética, as empresas mineiras precisam de expandir rapidamente a sua capacidade de produção. No entanto, os processos de procura e avaliação, financiamento, licenciamento e construção de novos projetos mineiros para produzir minerais críticos podem demorar mais de dez anos. Além disso, é necessário ter em conta as prováveis tensões, no que respeita aos direitos humanos e à sustentabilidade, entre as populações e os governos dos países onde se encontram os recursos de minerais críticos e as empresas mineiras que os pretendem explorar. Todos estes problemas podem ser resolvidos através de compromissos políticos e ambientais a médio e longo prazo, do planeamento e da cooperação internacional.

Esta última é provavelmente a questão mais difícil, tendo em conta a atual tendência para a desglobalização, definida como um movimento em direção a um mundo menos conectado e solidário, mais fragmentado e multipolar, dominado por fortes tensões ou conflitos geopolíticos, que promove o nacionalismo, defende o protecionismo, reduz o investimento direto estrangeiro, desvaloriza as instituições globais, os tratados de âmbito multilateral e a livre circulação de pessoas, bens e serviços. Porém, há muitas

forças que travam a desglobalização dado que esta prejudica os mercados financeiros, trava o crescimento económico a nível global e nacional, e diminui as margens de lucro das empresas. É impossível prever as formas futuras de equilíbrio mas é provável que se acentue a divisão ou polarização entre o Ocidente, liderado pelos EUA, que defende o *friend shoring*, o *reshoring* e as redundâncias nas cadeias de abastecimento ditadas pela preocupação do *just-in-case*, e o resto do mundo unido por meio de um reflexo reativo. No caso dos minerais críticos, estas apreensões são particularmente visíveis no caso da China, que refina cerca de 68% e 59% do níquel e do lítio a nível mundial e tem atualmente 78% e 84% da capacidade mundial de fabrico de baterias de lítio e painéis solares respetivamente (Castillo e Purdy, 2022). A transição energética promoverá o aparecimento de vencedores e perdedores geopolíticos, em função da abundância de fontes de energia renováveis, da capacidade tecnológica para as utilizar e da capacidade para estabelecer normas de infraestruturas e de certificação (Bordoff e O'Sullivan, 2022). Vencedores e perdedores irão também emergir da distribuição geográfica mundial dos recursos de minerais críticos. Estes desenvolvimentos constituem um risco potencial de segurança nacional que pode afetar o equilíbrio geoestratégico (Blondeel et al., 2021; Vakulchuk et al., 2020). Os países que são fornecedores dominantes de combustíveis fósseis, em especial os EUA, Rússia e os países produtores de petróleo e gás natural do Médio Oriente, poderão beneficiar de preços elevados e de uma maior influência geopolítica antes que a queda da procura causada pela transição energética os afete irreversivelmente. Entretanto, surgirão fornecedores dominantes de energia descarbonizada, introduzindo novos riscos e incertezas. É provável que durante a transição energética os poucos países que fornecem a grande maioria dos minerais críticos se tornem atores geopolíticos importantes. Atualmente, mais de metade do fornecimento mundial de cobalto, lítio e terras raras provém da República Democrática do Congo, da Austrália e da China, respetivamente (Bordoff e O'Sullivan, 2022).

SOLUÇÕES COMPLEMENTARES E ALTERNATIVAS PARA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Foram brevemente apresentados e discutidos os principais obstáculos à implementação do Acordo de Paris para resolver o desafio das alterações climáticas (Santos, 2021), que exige ELN de GEE até 2050 ou 2070. Dada a urgência da situação e considerando que a insuficiência das medidas de mitigação realizadas até agora está a diminuir a probabilidade de ficarmos abaixo dos limites de temperatura do Acordo de Paris, a probabilidade de cenários extremos de alterações climáticas deve ser levada a sério (Kemp et al., 2022). Perante esta possibilidade, as respostas são a mitigação, a adaptação e a geoengenharia. Em 2009, a Sociedade Americana de Meteorologia fez uma declaração política sobre a geoengenharia do sistema terrestre (AMS, 2009), na qual define três respostas para reduzir os riscos das alterações climáticas antropogénicas: 1) mitigação, 2) adaptação e 3) geoengenharia, definida como “a manipulação deliberada de aspetos físicos, químicos ou biológicos do sistema terrestre”, com o objetivo de neutralizar as consequências adversas das crescentes emissões de GEE.

ADAPTAÇÃO E AUMENTO DA RESILIÊNCIA

As sociedades devem adaptar-se para reduzir a sua vulnerabilidade aos efeitos gravosos e destrutivos das alterações climáticas, de modo a poderem proteger as suas comunidades, os seus bens e os seus recursos naturais. Devem tornar-se mais resilientes aos impactes das alterações climáticas. A adaptação planeada é uma estratégia proactiva indispensável para responder à necessidade de reduzir os riscos das alterações climáticas, e que é complementar da mitigação. Os riscos podem também resultar de respostas inadequadas de adaptação e de mitigação às alterações climáticas, tais como os riscos resultantes da má adaptação (*maladaptation*) ou de opções de mitigação conflitantes com a adaptação ou com valores sociais, económicos ou ambientais importantes. A adaptação é necessária em todos os países.

Constitui uma resposta muito importante às alterações climáticas nos países de rendimento médio superior, médio inferior e baixo, uma vez que estes são mais vulneráveis aos impactos gravosos das alterações climáticas por terem em geral menor capacidade de adaptação. Esta característica reflete-se no facto de aquele grupo de países ter incluído a componente de adaptação nas INDC (Intended National Determined Contributions – Contribuições Nacionalmente Determinadas Pretendidas) como nas NDC (National Determined Contributions – Contribuições Nacionalmente Determinadas) subsequentes, mais do que os países de rendimento elevado da OCDE e de fora da OCDE. Os relatórios de síntese de 2022 e 2023 sobre os NDC da CQNUAC (UNFCCC, 2022; 2023), publicados para preparar as COP27 e COP28, mostram que, em comparação com os NDC anteriores, mais países estão a aumentar a atividade no processo de formulação e implementação de planos nacionais de adaptação, incluindo objetivos de adaptação quantificados e calendarizados e quadros de indicadores associados. As NDC dos países desenvolvidos são incondicionais, uma vez que podem ser implementadas com os seus próprios recursos e capacidades. No entanto, 136 países em desenvolvimento condicionaram parcial ou totalmente as suas NDC à obtenção do apoio dos países desenvolvidos para o financiamento da mitigação e adaptação às alterações climáticas, para a transferência de tecnologias e para o reforço das capacidades na área da energia e clima. 89 países representando 50% da população mundial, estimam que, para implementar as suas NDC, necessitam de 4,3 biliões de dólares de ajuda: 2,7 biliões de dólares para a mitigação; 1,1 biliões de dólares para a adaptação; e 475 mil milhões de dólares não especificados (Fransen et al., 2022).

Há um esforço crescente para associar a adaptação aos esforços para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 das Nações Unidas, bem como os objetivos do Quadro de Sendai para a Redução do Risco de Catástrofes, da Convenção sobre a Diversidade Biológica, da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, da Convenção de Ramsar sobre as Zonas Húmidas e ainda para identificar e explorar os cobenefícios entre a adaptação e a mitigação. Foram

identificados condicionalismos e limites à adaptação para diferentes regiões, sectores, riscos e agentes (Dow et al., 2013; Klein et al., 2014; Ber-rang-Ford, L. et al. 2021). O relatório do IPCC sobre as vantagens de não ultrapassar 1,5 °C (IPCC, 2018) concluiu que os riscos para a segurança alimentar relacionados com o clima aumentarão de moderados para elevados se se passar de 1,5 °C para 2 °C. Acima de 1,5 °C, as opções de adaptação disponíveis serão menos eficazes, surgindo limites à adaptação em regiões e sectores vulneráveis. Limitar o aquecimento a 1,5 °C resultará em menores reduções da produtividade das principais culturas agrícolas, em impactos menos graves na pecuária, na fertilidade dos solos, na produtividade laboral e económica, na disponibilidade de água e na redução da morbilidade e mortalidade associada aos impactos da mudança climática na saúde (Santos et al. 2022). Um limite de adaptação pode ser definido como “uma situação em que um determinado agente já não consegue proteger os seus objetivos valiosos da incidência de um risco intolerável, por meio de ações adaptativas” (Dow et al. 2013). A noção de limite implica a ausência de opções de adaptação a partir de um determinado horizonte temporal (Klein et al. 2014), tanto nos sistemas socioeconómicos como nos sistemas naturais. Os riscos podem ser agrupados em riscos aceitáveis, toleráveis ou intoleráveis. Os últimos incluem as ameaças a objetivos sociais fundamentais, como a saúde e a segurança públicas, o bem-estar, a continuidade das práticas tradicionais, a segurança e o cumprimento das normas jurídicas (Dow et al. 2013; Klein et al. 2014).

Se for impossível encontrar uma solução em Paris para o problema das alterações climáticas (Santos et al. 2022), a ciência prevê que a humanidade será confrontada com um clima global progressivamente mais agressivo (Kemp et al., 2022). À medida que a TMGS aumenta, os limites à adaptação serão mais frequentes e generalizados geograficamente, as perdas e danos mais frequentes e onerosos, especialmente em regiões vulneráveis. O desenvolvimento socioeconómico será cada vez mais prejudicado, reduzindo os recursos financeiros disponíveis para a mitigação global, o que, por sua vez, aumenta a gravidade dos impactos das alterações climáticas a médio e longo

prazo. Esta retroação positiva ou “ciclo da ruína” climática (Laybourn et al., 2023) é potencialmente perigosa. África será provavelmente um dos Continentes onde esse ciclo se poderá observar. De acordo com o African Development Bank Group, África tem vindo a perder anualmente 5 a 15% do crescimento do seu PIB per capita devido aos impactos cada vez mais nefastos das alterações climáticas, embora contribua apenas com 3% das emissões globais de GEE (ADBG, 2022). Por outro lado, África precisa de cerca de 1,6 biliões de dólares (EUA) entre 2022 e 2030 para cumprir as suas NDC condicionais, mas recebeu apenas 18,3 mil milhões de dólares (EUA) em financiamento climático do Norte Global entre 2016 e 2019. No Norte Global, a situação é muito menos extrema, mas existem diferenças regionais significativas em termos de vulnerabilidade. No caso da UE, existe uma clara divisão geográfica Norte-Sul (Ciscar et al., 2018). Os impactos em percentagem do PIB tornam-se geralmente mais elevados à medida que se passa do Norte para o Sul da Europa. Em particular, a mortalidade humana relacionada com as ondas de calor, a produtividade do trabalho, os recursos hídricos, a agricultura, a perda de habitats e de biodiversidade, a procura de energia para refrigeração e os incêndios florestais são mais fortemente afetados pelas alterações climáticas no Sul da Europa. A única exceção é que os danos costeiros são relativamente mais elevados no Norte da Europa, no Reino Unido e na Irlanda (Ciscar et al., 2018). Em cenários climáticos de aquecimento global elevado, o sector agrícola torna-se particularmente vulnerável no Sul da Europa. Os países com maior vulnerabilidade às alterações climáticas devem desenvolver e aplicar planos de adaptação robustos o mais cedo possível para criar resiliência.

A década de 2021–2030 será crucial para evitar que se feche a janela de oportunidade para ficar abaixo de 1,5 °C. Atingir este objetivo ainda é fisicamente possível, mas exige uma profunda mudança global transformadora a nível político, social, económico e tecnológico. As mudanças incrementais serão provavelmente insuficientes, dada a magnitude do desafio que resultou dos atrasos acumulados durante as últimas três décadas. A mudança transformacional para uma mitigação rápida é possível, mas exige um forte

grau de empenhamento por parte da sociedade e dos governantes que dificilmente será compatível com as crises atuais, especialmente a rutura da cooperação geoestratégica entre as grandes potências. Aqueles que concluem que 1,5°C está perdido não ignoram necessariamente que as sociedades terão enormes dificuldades em lidar com os impactos resultantes das alterações climáticas em todo o mundo, especialmente nos países mais vulneráveis. No entanto, este tipo de argumentação não prevalecerá sobre a prioridade dada aos interesses geoestratégicos e ao crescimento económico. A saída simplista e indesejável para esta situação é explorar tecnologias de geoengenharia mais arriscadas, com efeitos secundários em grande parte desconhecidos e perigosos, mas que garantem o arrefecimento global.

GEOENGENHARIA

Existem fundamentalmente três tipos de geoengenharia climática para contrariar parcialmente os efeitos da alteração climática antropogénica (Santos, 2021). A remoção de dióxido de carbono (CDR – Carbon Dioxide Removal), ou emissões negativas, visa a remoção direta de CO₂ da atmosfera utilizando sumidouros naturais ou processos de engenharia química (IPCC, 2012). Outros métodos são a gestão da radiação solar (SRM – Solar Radiation Management ou Solar Radiation Modification) ou modificação do albedo e a gestão da radiação infravermelha emitida (IRM – Infrared Radiation Management ou CCT – Cirrus cloud thinning) pela superfície da Terra e pela atmosfera para o espaço exterior (NASEM, 2021). Os dois últimos métodos consistem em modificar propositadamente o balanço energético na atmosfera para reduzir ou anular parte das consequências climáticas das alterações climáticas atuais numa métrica específica, como a TMGAS, a precipitação ou outras. A injeção de aerossóis estratosféricos (SAI – Stratospheric Aerosol Injection) é uma forma de geoengenharia SRM que consiste no lançamento de aerossóis na estratosfera para aumentar a reflexão da radiação solar incidente sobre a Terra. Consiste na injeção de precursores lançados por avião, balão ou artilharia, como o dióxido de enxofre (SO₂) ou

o sulfureto de hidrogénio (H_2S) para formar aerossóis de ácido sulfúrico e sulfatos, (Robock et al., 2019). A geoengenharia SAI, ao simular o efeito de grandes erupções vulcânicas, que lançam milhões de toneladas de SO_2 até atingirem a estratosfera, produzirá de forma fiável um arrefecimento global da troposfera. A erupção do vulcão Pinatubo nas Filipinas, em 15 de junho de 1991, diminuiu a TMGAS de $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ nos dois anos seguintes (Parker et al., 1996). A geoengenharia SAI tem fiabilidade e um custo económico relativamente baixo, pelo que está a atrair mais investigação e investimento do que outras formas de geoengenharia SRM (Izrael et al., 2009; Keith, 2010; 2017). Controlaria a subida da TMGM sem necessidade de reduzir rapidamente as emissões antropogénicas de GEE. Tem sido defendida como uma medida temporária para ganhar tempo de modo a conseguir realizar a transição energética e simultaneamente eliminar um pico ou máximo (*peak-shave*) da TMGS demasiado elevado e perigoso, isto é, bastante acima de $2\text{ }^\circ\text{C}$ (Irvine et al., 2019). Do ponto de vista económico, os custos anuais da implementação da SAI foram estimados em vários milhares de milhões de dólares (EUA), enquanto os custos anuais globais de mitigação para manter a temperatura abaixo de $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ são estimados em mais de três biliões de dólares americanos.

As consequências globais, regionais e locais desta dupla interferência no sistema climático são naturalmente mais difíceis de modelizar e projetar no futuro. Assim, a geoengenharia SAI aumenta significativamente a incerteza quanto à evolução do clima global e aos seus impactos nos vários setores socioeconómicos às escalas global, regional e local. Os efeitos secundários da SAI alteram a física, a química e a circulação geral da atmosfera, aumentando a probabilidade de chuvas ácidas, a deterioração da camada de ozono e produzindo céus menos azuis de coloração esbranquiçada. Além disso, modificam o ciclo hidrológico global, reduzem a precipitação média global em cerca de $4,5\%$, alteram os padrões regionais de precipitação, desencadeiam secas e reduzem as monções o que diminui o rendimento das culturas e reduz a amplitude do ciclo sazonal da temperatura nas latitudes elevadas (Bala et al. 2008; Tilmes et al. 2008, 2013; 2020; Jiang et al. 2019). As

consequências da combinação da injeção antropogénica de GEE na atmosfera com a geoengenharia SAI para a saúde e mortalidade humanas, a segurança alimentar e hídrica, os ecossistemas e a conservação da biodiversidade não são bem conhecidas. A implementação da tecnologia SAI é suscetível de gerar “ganhadores e perdedores” entre os países pelo que tem consequências geopolíticas que deveriam exigir negociações prévias sobre a governabilidade da SAI. Outro grande desafio da injeção de aerossóis na estratosfera é o facto de ter de ser efetuada durante décadas para produzir o efeito desejado, uma vez que o tempo de vida do SO_2 é de cerca de dois anos, em comparação com os séculos do CO_2 . A SAI também apresenta riscos geopolíticos e geoestratégicos e pode criar tensões e conflitos entre os países que utilizam a tecnologia e os outros, especialmente se estes ficarem a perder em termos de impactos climáticos adversos e indesejados.

Desde o princípio do século, a investigação sobre a geoengenharia SAI tem estado confinada a um número muito reduzido de instituições académicas, mas atualmente existem projetos em vários países, como os EUA, Canadá, Reino Unido, UE, Austrália, Índia e África do Sul, e outros com um investimento total de várias dezenas de milhões de dólares (EUA). Os EUA têm liderado esta investigação através do financiamento providenciado por bilionários e fundações filantrópicas ligadas à tecnologia e às finanças, como as doações feitas por Bill Gates a partir da sua Fundação e fundos pessoais, as subvenções da Fundação William e Flora Hewlett, a Open Philanthropy e a SilverLining, entre outras. O valor deste apoio financeiro ultrapassou o financiamento dos grupos de reflexão (think tanks) cééticos sobre a mudança climática, que defendem o uso dos combustíveis fósseis e são apoiados pela respetiva indústria (Brulle, 2013). Recentemente, o Governo dos EUA começou a financiar a investigação sobre a geoengenharia SRM por meio de um plano quinquenal no valor de 200 milhões de dólares (OSTP, 2022). Existe uma probabilidade pequena, mas não nula, de a geoengenharia SAI ser apresentada como permitindo uma descarbonização global incremental que não seja disruptiva da economia, discretamente liderada pelos EUA e pelos países Ocidentais que partilham as mesmas ideias (Surprise e Sapinski, 2022).

De acordo com esta narrativa a SAI evitaria a eliminação abrupta e disruptiva dos combustíveis fósseis e o abrandamento do crescimento do PIB mundial que provavelmente iria causar. Evitaria também os impactos das alterações climáticas resultantes de não se ter provocado o *peak shaving* da TMGAS por meio de um arrefecimento global controlado.

Há ainda uma grande incerteza quanto ao futuro da geoengenharia SAI. Tanto quanto é do conhecimento público não se realizaram ainda experiências científicas de SAI na atmosfera (field experiments) cujos resultados tenham sido relatadas em publicações científicas, para além da experiência de Izrael et al. (2009). Novas experiências são essenciais para uma eventual implementação da tecnologia. Contudo, tais experiências poderão ter-se já iniciado ou estar em preparação, conforme se refere num inventário elaborado pelo ETC Group e pela Fundação Heinrich Boell (ETC, 2024). No Reino Unido, foi feito o lançamento de um balão meteorológico de alta altitude no sudeste de Inglaterra, em 2022, para testar a viabilidade do equipamento de injeção de aerossóis na estratosfera. Nos EUA, a empresa comercial Make Sunsets, fundada por Luke Iseman, fez já 30 lançamentos de balões meteorológicos que transportam SO₂ e o depositam na estratosfera, financiados pela venda de “créditos de refrigeração” aos clientes.

Um número significativo de opiniões considera que os Estados devem chegar a acordo sobre um regime de governação internacional para as experiências de SAI antes de começarem a ser realizadas. Esse regime deverá ter a capacidade de impedir que as empresas e os países realizem experiências e acabem por obter vantagens estratégicas e de negócio económico e financeiro com a implementação da geoengenharia SRM sem haver previamente um quadro jurídico internacional para as autorizar (Temple, 2022). Várias instituições estão a abordar as questões da governação da geoengenharia SRM, tais como a Carnegie Climate Governance Initiative (C2G), que procura catalisar o desenvolvimento de uma governação eficaz para as tecnologias que alteram o clima. A Climate Overshoot Commission tem estado a analisar os impactos resultantes de se exceder 1,5 °C e espera delinear opções de governação para a geoengenharia SRM. A Degrees Initiative,

sediada no Reino Unido e financiada por um grupo de fundações, tem estado a informar e a tentar convencer os países em desenvolvimento das vantagens da geoengenharia SRM.

Outros investigadores argumentam contra a crescente normalização da geoengenharia SRM e consideram que, com o atual sistema político internacional altamente fragmentado e conflituoso, a geoengenharia SRM não é governável de uma forma justa e eficaz (Biermann et al., 2022). Este grupo de investigadores defende, através de uma Carta Aberta publicada em 2021 (INUASG, 2021), a aprovação de um Acordo Internacional de Não Utilização da Geoengenharia solar destinado a estabelecer um regime internacional especificamente direcionado a evitar o desenvolvimento e a utilização de tecnologias de geoengenharia solar. O autor é signatário dessa Carta Aberta. Se estes esforços falharem, a implantação da geoengenharia SAI será mais provável por volta de 2050, uma vez que nessa altura pode tornar-se evidente não ser possível manter o aumento da TMGAS abaixo dos 2 °C e os impactos das alterações climáticas serem avassaladores, em especial devido à perigosa diminuição potencial do PIB mundial.

Há uma outra forma de geoengenharia SRM cuja eficácia e viabilidade técnica e económica é menor do que a SAI, sobre a qual incide atualmente um esforço crescente de investigação, em parte porque tem a aparência de ser mais benigna em termos da perceção social. A tecnologia consiste na injeção na troposfera de sal marinho pulverizado de modo a aumentar a concentração de aerossóis em nuvens marinhas de baixa altitude que se encontram na camada limite, um conceito importante em meteorologia definido como a parte inferior da troposfera que é diretamente influenciada pela superfície da Terra. O objetivo é os aerossóis aumentarem a refletividade da luz solar pelas nuvens, ou seja, aumentar o albedo. Esta tecnologia, proposta inicialmente por John Latham (1990), é designada por branqueamento de nuvens marinhas (MCB – Marine Cloud Brightening). A importância da MCB resulta de que a extensão e as características da cobertura de nuvens sobre o oceano é determinante para o clima global.

A história desta tecnologia dá-nos um exemplo adicional da interferência humana sobre o sistema climático e de como agora a “solução tecnológica” para evitar os efeitos adversos desse conjunto de interferências é produzir novas interferências tecnológicas destinadas a contrariar as anteriores. Sabe-se desde 1966 (Conover, 1966), por meio da análise de dados do satélite TIROS VII, que os navios deixam nos campos de nuvens da camada limite, rastros lineares brilhantes que refletem mais a radiação solar, chamados “rastros de navios” (*ship tracks*). Estes rastros, facilmente observáveis por detecção remota, resultam da emissão de SO_2 pelas chaminés dos navios, especialmente os porta-contentores, resultantes do funcionamento dos seus motores de combustão interna movidos com combustíveis derivados do petróleo. As emissões de SO_2 produzem aerossóis de sulfato que refletem a radiação solar. Funcionam ainda como núcleos de condensação na nucleação, isto é, na formação de nuvens, o que contribui para refletir ainda mais a radiação solar.

Porém, o SO_2 é um poluidor da atmosfera com efeitos adversos sobre a saúde humana e o ambiente, ao provocar chuvas ácidas. As emissões anuais de SO_2 provenientes do transporte marítimo aumentaram de cerca de 6 Mt SO_2 (milhões de toneladas de SO_2) na década de 1970 para mais de 10Mt SO_2 por ano nas décadas de 2000 e 2010. Esta situação levou a Organização Marítima Internacional (IMO – International Maritime Organization) a adotar a norma IMO 2020 a partir de 1 de janeiro de 2020, que obriga a reduzir o limite máximo global do teor de enxofre no fuelóleo dos navios de 3,50% para 0,50%. A aplicação da IMO 2020 teve sucesso, as emissões de SO_2 baixaram cerca de 10% desde 2020, mas o albedo do oceano também diminuiu, contribuindo para aumentar o aquecimento global. Este aumento foi diminuto e não contribuiu de modo significativo para explicar a elevada TMGAS observada no ano de 2023, como se chegou a pensar. Note-se, porém, que as emissões antropogênicas globais de SO_2 para a atmosfera geram um poderoso forçamento radiativo negativo, ou seja, arrefecem o sistema climático. Este efeito compensa ou mascara parcialmente o aquecimento global resultante da emissão de GEE. As emissões altamente

poluidoras de SO_2 para a atmosfera provêm em cerca de 66% das centrais térmicas alimentadas com combustíveis fósseis e em 29% de fontes industriais (Knuckles et al., 2010). Estamos perante uma situação de tipo Catch 22, sem saída aparente. Se despoluirmos a atmosfera acabando com as emissões antropogénicas de SO_2 agravamos significativamente as alterações climáticas. De acordo com o IPCC, sem a máscara da poluição atmosférica por SO_2 , a temperatura média global já teria aumentado 1,6 °C acima dos níveis pré-industriais, em lugar de 1,2 °C (IPCC, 2021)

A geoengenharia CMB substitui injeção de SO_2 para a camada limite, pelas chaminés dos barcos de transporte marítimo, pela injeção de sal marinho natural pulverizado em pequeníssimas partículas nas nuvens da camada limite de modo a formar aerossóis que aumentam a refletividade das dessas nuvens e assim arrefecem o sistema climático. A maior refletividade resulta principalmente da interação direta dos aerossóis de sal marinho com a radiação solar (Feingold et al., 2024). A forma como uma nuvem responde a uma tentativa de aumentar a sua refletividade depende subtilmente das condições meteorológicas e dos aerossóis que já se encontram na nuvem. Note-se ainda que a dimensão e quantidade ideal das partículas injetadas dependem das propriedades das nuvens, e estas podem mudar rapidamente enquanto flutuam no ar. Trata-se, pois, de uma tecnologia complexa, associada a uma logística exigente e a um consumo relativamente elevado de energia. Haywood et al., (2023) compararam as geoengenharias SAI and CMB no que respeita à capacidade de contrariarem efetivamente o aquecimento global e aos respetivos efeitos colaterais adversos, utilizando os modelos G6sulfur e G6MCB, respetivamente. Concluíram que ambas as tecnologias podem atingir o objetivo de redução do aquecimento global para níveis moderados e ambas têm efeitos secundários indesejáveis e bastante semelhantes, tais como o sobrearrefecimento dos trópicos e o aquecimento residual das latitudes médias e altas. Este impacto contribuiria para diminuir o gradiente latitudinal de temperatura e teria efeitos significativos sobre a circulação geral da atmosfera e sobre os padrões de precipitação em várias regiões do mundo

(Haywood et al., 2023). Contudo, há ainda muita incerteza, tanto na geoengenharia SAI, como na CMB, sendo necessário muito mais investigação usando vários modelos para compreender melhor as limitações e os perigos que resultariam da implementação de tais tecnologias.

Apesar destas incertezas, recentemente, a 2 de abril de 2024, investigadores da Universidade de Washington realizaram a primeira experiência de geoengenharia CMB na atmosfera a partir do porta-aviões desativado USS Hornet, ancorado no porto de Alameda na Califórnia (Hiar, 2024; Flavelle, 2024). A experiência resulta de um projeto de CMB que dura há vários anos, liderado pelo físico Armand Neukermans, que envolveu David Keith e Ken Caldeira, e é aparentemente financiado pela SilverLining e pelo fundo FICER, apoiado pela Fundação Bill & Melinda Gates. O instrumento agora testado, chamado CARI (Cloud Aerosol Research Instrument), ao impelir o ar a uma pressão extremamente elevada através de uma série de bocais, consegue criar força suficiente para pulverizar os cristais de sal em partículas extremamente pequenas com o tamanho adequado para formar aerossóis que otimizam a capacidade de reflexão da luz solar quando atingem o topo das nuvens.

Embora o atual governo dos EUA esteja a financiar a investigação em geoengenharia SRM, e em particular a CMB, a Casa Branca distanciou-se da experiência realizada na Califórnia, enviando uma declaração ao New York Times onde se diz que: “O governo dos EUA não está envolvido na experiência de Gestão da Radiação Solar (SRM) que está a decorrer em Alameda, CA, ou em qualquer outro lugar”. Uma vez iniciadas as experiências de geoengenharia SRM na atmosfera com apoio governamental indireto, será muito improvável que não conduzam eventualmente à implementação das tecnologias SRM. Note-se que no contexto da narrativa contemporânea dominante, na qual a tecnologia tem a capacidade de “resolver” todos os problemas humanos, por mais difíceis que pareçam, esse desfecho torna-se inevitável. Contudo, todos nós devemos perseverar na via de uma transição energética rápida que proporcione uma solução de Paris para o problema das alterações climáticas (Santos et al., 2021),

porque esse objetivo continua a estar ao nosso alcance e evita a utilização das tecnologias perigosas de geoengenharia.

Este texto foi inicialmente terminado em 23 de fevereiro de 2023 e posteriormente atualizado em 10 de abril de 2024.

REFERÊNCIAS

- ADBG (2022) Africa loses up to 15% of its GDP per capita annually because of climate change – African Development Bank Group Acting Chief Economist Kevin Urama. <https://www.afdb.org/en/news-and-events/press-releases/africa-loses-15-its-gdp-capita-annually-because-climate-change-african-development-bank-acting-chief-economist-kevin-urama-54660>
- AMS (2009) AMS Policy Statement on Geoengineering the Climate System. Boston, MA.
- Andrijevic M, Schleussner CF, Gidden MJ, McCollum DL, Rogelj J., 2020, COVID-19 recovery funds dwarf clean energy investment needs. *Science*. 2020 Oct 16;370(6514):298-300. doi: 10.1126/science.abc9697
- Augustine, G. and B. Soppe, 2023, Why young workers are leaving fossil fuel jobs – and what to do if you feel like ‘climate quitting’, *The Conversation*.
- Bairoch, Paul, 1993, *Economics and World History: Myths and Paradoxes*, University of Chicago Press.
- Bala G, Duffy PB, Taylor KE (2008) Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proc Natl Acad Sci* 105:7664–7669. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711648105>
- Berrang-Ford, L.; Siders, A.R.; Lesnikowski, A.; Fischer, A.P.; Callaghan, M.W.; Haddaway, N.R.; Mach, K.J.; Araos, M.; Rahman Shah, M.A.; Wannowitz, M. et al, 2021, A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nat. Clim. Chang.* 2021, 11, 989–1000. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01170-y>.
- Biermann, F., Oomen, J., Gupta, A., Ali, S. H., Conca, K., Hajer, M. A., Kashwan, P., Kotzé, L. J., Leach, M., Messner, D., Okereke, C., Persson, Å., Potočník, J., Schlosberg, D., Scobie, M., & VanDeveer, S. D., 2022. Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. *WIREs Climate Change*, 13(3), e754. <https://doi.org/10.1002/wcc.754>

- Blondeel, M.; Bradshaw, M.J.; Bridge, G.; Kuzemko, C. The geopolitics of energy system transformation: A review. *Geogr. Compass*, 2021, 15, e12580. <https://doi.org/10.1111/gec3.12580>. <https://www.v-dem.net/vdemds.html>
- Bordoff, J. and M. L. O'Sullivan, 2022, Green upheaval. The new geopolitics and energy, *Foreign Affairs*, January/February.
- Brulle, R. J., Institutionalizing delay: foundation funding and the creation of U.S. climate change counter-movement organizations, *Climatic Change*, 122, 681-694. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1018-7>, 2014.
- Castilho, R. and C. Purdy, 2022, China's Role in Supplying Critical Minerals for the Global Energy Transition, LTRC, Brookings Institute.
- Christophers, Brett, 2024, *The Price is Wrong: Why Capitalism Won't Save the Planet*, Verso Books.
- Chu, A., Brower, D. and Williams, A., 2023, US touts Biden green subsidies to lure clean tech from Europe, *Financial Times*, January 23.
- Ciscar, J. C., D. Ibarreta, A. Soria, A. Dosio, A. Toreti, A. Ceglar, D. Fumagalli, F. Dentener, R. Lecerf, A. Zucchini, L. Panarello, S. Niemeyer, I. Pérez-Domínguez, T. Fellmann, A. Kitous, J. Després, A. Christodoulou, H. Demirel, L. Alfieri, F. Dottori, M.I. Voudoukas, L. Mentaschi, E. Voukouvalas, C. Cammalleri, P. Barbosa, F. Micale, J.V. Vogt, J.I. Barredo, G. Caudullo, A. Mauri, D. de Rigo, G. Libertà, T. Houston Durrant, T. Artés Vivancos, J. San-Miguel-Ayanz, S.N. Gosling, J. Zaherpour, A. De Roo, B. Bisselink, J. Bernhard, L., Bianchi, M. Rozsai, W. Szewczyk, I. Mongelli and L. Feyen, 2018, *Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project*, EUR 29427 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-79-97218-8. doi:10.2760/93257, JRC112769.
- Climate Watch, 2022. www.climatewatchdata.org
- J. H. Conover, Anomalous cloud lines. *J. Atmos. Sci.* 23, 778-785 (1966).
- Copernicus, 2024, *Climate Change Service*, Copernicus:2023 is the hottest year on record with global temperatures close to the 1.5 °C limit, European Commission.
- CPI, Climate Policy Initiative. 2021. *Global Landscape of Climate Finance*.
- Dow, K.; Berkhout, F.; Preston, B.L., Klein, R.J.T., Midgley, G., & Shaw, M.R., Limits to adaptation. *Nat. Clim. Chang.* 2013, 3, 305-307. <https://doi.org/10.1038/nclimate1847>.
- EIA, 2022, U.S. Energy Information Administration, *International Energy Statistics*. <https://www.eia.gov/>
- ETC, 2024, *Geoengineering Map*, ETC Group and the Heinrich Boell Foundation. <https://map.geoengineeringmonitor.org/>.

- FAO-WFP, 2022, Hunger hotspots. FAO-WFP early warning on acute food insecurity, Food and Agriculture Organization and World Food Program.
- FAO, 2022, Hunger Hotspots, October 2022 to January 2023 Outlook, Food and Agriculture Organization.
- Feingold G., Ghatge V., Russell L., et al., 2024, Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening. *Science Advances*, 10 (12). DOI: 10.1126/sciadv.adi8594
- Flavelle, Christopher, 2024, Warming Is Getting Worse. So They Just Tested a Way to Deflect the Sun, *New York Times*, April 2.
- Fransen, T., R. O’Connoor, N. Alayza and M. Caldwell, 2022, 9 things to know about national climate plans (NDCs), World Resources Institute.
- Friedlingstein, P., et al., 2022, Global Carbon Budget 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811-4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Gallagher, K. S., 2022, The coming carbon tsunami, *Foreign Affairs*, 101(1), 151-164.
- GD, 2022, Global Data, www.globaldata.com
- Harput, H., 2022, The hidden cost of friend-shoring, Hinrich Foundation. <https://www.hinrichfoundation.com/research/article/us-china/the-hidden-costs-of-friend-shoring/>
- Haywood, J. M., A. Jones, A. C. Jones, P. Halloran, P. J. Rasch, 2023, Climate intervention using marine cloud brightening (MCB) compared with stratospheric aerosol injection (SAI) in the UKESM1 climate model. *Atmos. Chem. Phys.* 23, 15305-15324.
- Hiar, Corbin, 2024, Geoengineering test launched with salt flecks and secrecy, E&ENews Politico, April 4. <https://www.eenews.net/articles/geoengineering-test-launched-with-salt-flecks-and-secrecy/>
- Hook, Leslie, 2023, Glencore profits hit record \$34 bn driven by soaring coal demand, *Financial Times*, February 15.
- ICN, 2023, *Republicans are primed to take on ‘woke capitalism’ in 2023, with climate disclosure rules for corporations in their sights*, *Inside Climate News*. <https://insideclimatenews.org/news/03012023/republicans-disclosure-rules-esg/>
- IEA, 2024, *CO2 Emissions in 2023*, International Energy Agency.
- IEA, 2022, *World Energy Outlook 2022*, International Energy Agency.
- IEA, 2023, *Electricity Market Report*, International Energy Agency.
- IEA, 2023a, *The role of critical minerals in clean energy transitions*. Critical Minerals, International Energy Agency.
- IPCC, 2012, Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering; IPCC: Geneva, Switzerland.

- IPCC, 2018, Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change.
- IPCC: Geneva, Switzerland, 2018.
- IPCC, 2022, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, P. R. Shukla et al., Eds., Cambridge Univ. Press, 2022.
- Irvine, P., Emanuel, K., He, J., Horowitz, L. W., Vecchi, G., & Keith, D., 2019, Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards. *Nature Climate Change*, 9(4), 295–299. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0398-8>
- Izrael, Y.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N. et al. Field studies of a geo-engineering method of maintaining a modern climate with aerosol particles. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 34, 635-638 (2009). <https://doi.org/10.3103/S106837390910001X>
- JETP, 2022, Joint Energy Transition Partnership. <https://ukcop26.org/12-month-update-on-progress-in-advancing-the-just-energy-transition-partnership-jetp/>
- Jiang J, Cao L, MacMartin DG, et al (2019) Stratospheric Sulfate Aerosol Geoengineering Could Alter the High-Latitude Seasonal Cycle. *Geophys Res Lett* 46:14153-14163. <https://doi.org/10.1029/2019GL085758>
- Keith, D. Engineering the Planet. In *Climate Change Science and Policy*; Schneider, S., Mastrandrea, M., Eds.; Island Press: Washington, DC, USA, 2010; pp. 493-501.
- Keith, D.W. Toward a Responsible Solar Geoengineering Research Program. *Sci. Technol.* 2017, 33, 71-77.
- Kemp L, Xu C, Depledge J, Ebi KL, Gibbins G, Kohler TA, Rockström J, Scheffer M, Schellnhuber HJ, Steffen W, Lenton TM. 2022, Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proc Natl Acad Sci U S A*; 119(34): e2108146119. doi: 10.1073/pnas.2108146119
- Kepel, Gilles, 2024, *Holocaustes*, Ed. Plon.
- Klein, R.J.T., Midgley, G.F., Preston, B.L., Alam, M., Berkhout, F., Dow, K. & Shaw, M.R., *Adaptation Opportunities, Constraints, and Limits*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK.; New York, NY, USA, 2014; pp. 899-943.

- Knuckles TL, Stanek LW and Campen MJ. Air Pollution and Cardiovascular Disease, 2010, In *Comprehensive Toxicology* 2nd Edition. M.J. Campen and M.K. Walker, Eds. Elsevier Ltd.
- Latham, J., 1990, Control of global warming? *Nature* 347, 339-340.
- Lester, Simon, 2022, Ending the WTO Dispute Settlement Crisis: Where to from here, International Institute for Sustainable Development?
- Laybourn L., Throp H. and Sherman S., 2023, 1.5°C – dead or alive?: The risks to transformational change from reaching and breaching the Paris Agreement goal, IPPR and Chatham House. <http://www.ippr.org/research/publications/1-5c-dead-or-alive>
- McCollum, D. L. et al., 2018, Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Energy* 3, 589-599, doi:10.1038/s41560-018-0179-z (2018).
- Muttitt, G., Price, J., Pye, S. et al., 2023, Socio-political feasibility of coal power phase-out and its role in mitigation pathways. *Nat. Clim. Chang.* 13, 140-147, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01576-2>
- NASEM. Reflecting Sunlight: Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance; National Academies Press: Washington, DC, USA, 2021.
- NDMA, 2022, Floods SITREP – 2022 (Daily SITREP No 158 Dated 18th November, 2022), Government of Pakistan. <https://cms.ndma.gov.pk/storage/app/public/situation-reports/November2022/N2n1eEarMt6q6Rb8ZYwn.pdf>
- Nordhaus, W.D., 2007, A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. *J. Econ. Lit.*, 45, 686-702.
- Nordhaus, W.D., 2017, Revisiting the social cost of carbon. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 114, 1518-1523.
- OECD, 2021, OECD Inventory of support measures for fossil fuels. <https://www.oecd.org/environment/support-for-fossil-fuels-almost-doubled-in-2021-slowing-progress-toward-international-climate-goals-according-to-new-analysis-from-oecd-and-iea.htm>
- OECD, 2021a, OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19), The territorial impact of COVID-19: Managing the crisis and recovery across levels of government.
- OSTP, 2022, Request for Input to a Five-Year Plan for Research on Climate Intervention, White House Office of Science and Technology Policy. <https://www.whitehouse.gov/ostp/legal/>

- Pachauri, S., Pelz, S., Bertram, C., Kreibiehl, S., Rao, N.D., Sokona, Y., & Riahi, K., 2022, Fairness considerations in global mitigation investments Current mitigation finance flows are inadequate and unfair, *Science* 378 (6624) 1057-1059. DOI: 10.1126/science.adf0067
- Parker, D. E., H. Wilson, P. D. Jones, J. R. Christy, and C.K. Folland, 1996: The impact of Mount Pinatubo on world-wide temperatures. *Int. J. Climatol.*, **16**, 487-497.
- Pedersen, Jiesper Strandsbjerg Tristan, Detlef P. van Vuuren, Bruno A. Aparício, Rob Swart, Joyeeta Gupta, Filipe Duarte Santos, 2020, Variability in historical emissions trends suggests a need for a wide range of global scenarios and regional analyses, *Communications Earth & Environment – Nature*, 1,41. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00045-y>
- Pedersen, Jiesper Strandsbjerg Tristan; Filipe Duarte Santos; Detlef van Vuuren; Joyeeta Gupta; Ricardo Encarnação Coelho; Bruno A. Aparício; Rob Swart, 2021, An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports, *Global Environmental Change*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102199>
- Robock, A.; Marquardt, A.; Kravitz, B.; Stenchikov, G. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophys. Res. Lett.* 2009, 36. L19703. <https://doi.org/10.1029/2009GL039209>.
- Rogelj, J., et al., 2018, in *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, G. Flato et al., Eds. (IPCC/WMO, Geneva, Switzerland, www.ipcc.ch/report/sr15/), pp. 93-174.
- Rogoff, K., 2023, Too soon for global optimism, Project Syndicate, January 31–
- Santos, F. D., 2021, *Time, Progress, Growth and Technology. How Humans and the Earth are Responding*. Springer, The Frontiers Collection, 703 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55334-0>
- Santos, F.D.; Ferreira, P.L.; Pedersen, J.S.T. *The Climate Change Challenge: A Review of the Barriers and Solutions to Deliver a Paris Solution*, 2022, *Climate*, 10, 75. <https://doi.org/10.3390/cli10050075>
- Santos, F.D., O’Riordan, T., Rocha de Sousa, M., Pedersen, J.S.T., 2024, The Six Critical Determinants That May Act as Human Sustainability Boundaries on Climate Change Action. *Sustainability*, 16, 331. <https://doi.org/10.3390/su16010331>

- Santos, F.D., O’Riordan, T., de Sousa, M.R. et al., 2024a, Unveiling global sustainability boundaries: exploring inner dimensions of human critical determinants for sustainability. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01462-0>
- Sengupta, Somini, 2023, A lawsuit against Big Oil gets personal, *New York Times*, February 10
- INUASG, 2021, Open Letter, We Call for an International Non-Use Agreement on Solar Geoengineering. <https://www.solargeoeng.org/non-use-agreement/open-letter/>
- Simon, H. A., 2000, Bounded rationality in social science: Today and tomorrow. *Mind & Society* 2000 1:1 1, 25-39.
- SIPRI, 2023, Trends in world military expenditure, 2022, Stockholm International Peace Research Institute.
- Stern, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2007.
- Surprise, K. and Sapinski, J. P., 2022, Whose climate intervention? Solar geoengineering, fractions of capital, and hegemonic strategy. *Capital & Class*, online first, 1-26. <https://doi.org/10.1177/03098168221114386>
- Temple, J., 2022, A startup says it’s begun releasing particles into the atmosphere, in an effort to tweak the climate, *MIT Technological Review*, December 24.
- Tharoor, Ishaan, 2024, Israeli calls for Gaza’s ethnic cleansing are only getting louder, *Washington Post*, January 5.
- Tilmes S, Muller R, Salawitch R (2008) The Sensitivity of Polar Ozone Depletion to Proposed Geoengineering Schemes. *Science* 320:1201-1204. <https://doi.org/10.1126/science.1153966>
- Tilmes S, Fasullo J, Lamarque J-F, et al (2013) The hydrological impact of geoengineering in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J Geophys Res Atmos* 118:11,036-11,058. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50868>
- Tilmes, S., MacMartin, D. G., Lenaerts, J. T. M., van Kampenhout, L., Muntjewerf, L., Xia, L., Harrison, C. S., Krumhardt, K. M., Mills, M. J., Kravitz, B., and Robock, A., 2020, Reaching 1.5 and 2.0°C global surface temperature targets using stratospheric aerosol geoengineering. *Earth Syst. Dynam.*, 11, 579-601. <https://doi.org/10.5194/esd-11-579-2020>
- Timperley J., 2021, The broken \$100-billion promise of climate finance – and how to fix it. *Nature* 598(7881), 400-402. doi: 10.1038/d41586-021-02846-3. PMID: 34671142.

- TWH, 2022, President Joe Biden State of the Union Address, The White House, March, 1.
- UNEP, 2022, Pakistan: Flood Damages and Economic Losses Over USD 30 billion and Reconstruction Needs Over USD 16 billion, United Nations Development Programme, October 27.
- UNFCCC, 2022, 2022 NDC Synthesis Report.
- UNFCCC, 2023, 2023 NDC Synthesis Report.
- V-Dem Data, 2022, Democracy Report 2022, Autocratization Changing Nature? <https://www.v-dem.net/vdemds.html>, 2022
- V-Dem Data, 2023, Evie Papada, David Altman, Fabio Angiolillo, Lisa Gastaldi, Tamara Köhler, Martin Lundstedt, Natalia Natsika, Marina Nord, Yuko Sato, Felix Wiebrecht, and Staffan I. Lindberg. 2023. Defiance in the Face of Autocratization. Democracy Report 2023.
- University of Gothenburg: Varieties of Democracy Institute (V-Dem Institute). <https://www.v-dem.net/vdemds.html>
- Vakulchuk, R., Overland, I., Scholten, D. Renewable energy and geopolitics: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 122, 109547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109547>.
- WB, 2022, World Development Report 2022, Finance for an equitable recovery, World Bank.
- WB, 2024, World Bank. <https://data.worldbank.org/>
- WB, 2022, COP 27: The African COP and the risk of a global U turn to the Paris Agreement, World Bank. <https://blogs.worldbank.org/africacan/cop27-african-cop-and-risk-global-u-turn-paris-agreement>
- Weede, Erich, 1995, Economic policy and international security: rent-seeking, free trade and democratic peace, *European Journal of International Relations*, 1(4):519-537. doi.org/10.1177/1354066195001004006
- WHO, 2022, Global spending on health: rising to the pandemic's challenges. Geneva: World Health Organization; 2022. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- WHO, 2024, COVID-19 epidemiological update, 19 January.
- WMO, 2022, Greenhouse gas monitoring supports Earth observations, World Meteorological Organization, 14 November.
- WMO, 2024, State of the global climate 2023, World Meteorological Organization, N° 1347.

Contribuição para o tema Energias Renováveis. Implicações para uma abordagem mais profunda do tema da Energia^{a1}

MANUEL COLLARES PEREIRA*

RESUMO

O Desenvolvimento Sustentável (DS) é uma necessidade urgente para um Planeta com mais de 8000 milhões de habitantes e a sua produção de gases de efeito de estufa (GEE), sobretudo os que estão associados à energia — a partir do consumo de combustíveis fósseis — com a produção de CO₂ para a atmosfera, mas também por causa da desflorestação, que contraria o seu sequestro. As alterações climáticas que daí resultam, estão a ocorrer a um ritmo acelerado e que urge controlar. Dos 1,5 °C de aumento da temperatura média que os cientistas tinham estabelecido como toleráveis até ao fim do século, já se usou 1,2 °C.

O DS, que, no fundo, não é mais do que a necessidade da gestão do facto de que vivemos num Planeta finito e que nos impõe limites — de recursos e de capacidade de resposta por parte da Natureza na absorção dos excessos — que estamos perto de ultrapassar; as alterações climáticas resultantes da acumulação dos GEE na atmosfera, implicam que o DS tem de passar pela **descarbonização da economia**, reduzindo e, a prazo, acabando com o uso dos combustíveis fósseis.

* Professor Catedrático e Investigador Coordenador, aposentado, Consultor Científico da #Vanguard Properties, Membro da Academia das Ciências de Lisboa.

¹ Texto predominantemente baseado no e-book *Decarbonising the Economy Energy and the Future* (english version, Vanguard Properties edition): https://www.vangproperties.com/media/6491/decarbonising-the-economy-energy-and-the-future_manuel-collares-pereira.pdf; *A Descarbonização da Economia a Energia e o Futuro* (versão portuguesa, Vanguard Properties Edition): https://www.vangproperties.com/media/6492/a-descarbonizacao-da-economia-a-energia-e-o-futuro_manuel-collares-pereira.pdf.

Assim, esta questão do DS, é abordada na perspetiva da energia, discutida nas vertentes da suficiência e eficiência energética, mas, e sobretudo, da transição energética para fontes de energia que correspondem a baixas emissões de GEE, mas também a partir da adoção de novos materiais (a madeira, por exemplo) e novas práticas capazes de reverter, por si só, a pegada positiva de emissão de GEE dos sectores de atividade convencional (por exemplo, o da construção), e a economia circular.

A transição energética é apresentada como podendo ocorrer, mais rápida e facilmente, através da **eletrificação crescente** da economia, não só pelo impacte que a eletricidade permite ter sobre a energia útil (com forte redução de consumo) como pelo facto de a eletricidade poder ser produzida por fontes de energia limpas, como as energias renováveis, e que hoje constituem a forma mais barata de fazer essa produção. A energia nuclear para a produção de eletricidade também é discutida, mas sublinhando que, entre muito aspetos, pelos seus elevados custos (diretos e escondidos), pela sua insustentabilidade inerente, pela dificuldade e tempo de instalação de um reator nuclear, não constitui uma solução para o curto e médio prazo e pode mesmo acontecer que perca relevância no futuro.

A forte evolução da tecnologia e a grande variedade de práticas e soluções existentes já hoje, permitem perspetivar que o problema da eliminação dos combustíveis fósseis – energia primária fóssil – está verdadeiramente ao nosso alcance. Mas a mudança de paradigma exige dos cidadãos uma mudança de cultura, para deixarem de ser parte do problema e passarem a ser parte fundamental da solução. O famoso custo da transição energética e da adoção de novas práticas de sustentabilidade é apresentado como sendo, não um custo, mas um investimento, numa nova economia, com forte retorno potencial e muitas vantagens do ponto de vista da qualidade de vida, mas a exigir uma vontade política e cívica de afrontar os poderosos interesses instituídos e resistentes à mudança.

NOTA INTRODUTÓRIA

Estão disponíveis um grande número de relatórios da União Europeia, da Agência Internacional de Energia (IEA), do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), de Entidades Privadas (sobretudo as ligadas aos sectores dos Seguros, das Finanças, dos Fundos de Investimento, etc.), explicando as questões da energia, a sua relação com as alterações climáticas e fazendo previsões para o futuro, em diferentes cenários no contexto de políticas energéticas urgentes e específicas. Em Portugal, os documentos mais importantes sobre o tema são o PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima e o RNC – Roteiro Nacional de Carbono.

Não pretendo substituir-me a nenhum desses escritos, ou repetir por repetir o que anunciam. O meu objetivo com este texto é outro: trazer o ponto de vista do Físico, que sempre dedicou a sua vida académica e profissional a estas questões, procurando enquadrar o problema, apresentar os principais constrangimentos que temos, procurando evitar o que possa corresponder a uma postura de carácter mais ideológico.

Ideologia é algo que facilmente temos tendência a deixar que se imiscua nestas questões, por anos da habituação a uma forma de estar “na energia” que não é mais possível (e mudar é sempre difícil e ninguém quer mudar!) e por anos de verdadeira propaganda que nos habituamos a ouvir, sobre esta ou aquela forma de resolver o problema e que, com frequência, não tem adesão à realidade. No entanto, é obvio que quando encaramos qualquer política energética que necessitamos de definir e depois impor, política que nos vai condicionar o comportamento, na oferta e na procura de energia, a linha entre realidade científica e ideologia pode parecer mais ténue... Procurarei, ainda assim, não a ultrapassar, embora afirme, com frequência, que devemos seguir este caminho e não aquele... por conhecimento e análise dos factos.

Procurarei também ser sintético, já que muita da discussão — por exemplo, sobre as alterações climáticas — está feita e pode ser dada como adquirida. Pretendo apenas ajudar a compreender, a explicar, qual a tecnologia

que temos e que chega para resolver o problema (sem prejuízo de esta estar sempre a evoluir e de trazer novas oportunidades e soluções a cada instante). Mas também pretendo explicar que isso não chega, que cada um de nós está no fim da linha do consumo de energia, tem de dar uma forte ajuda, com a aceitação da necessidade de mudança para a transição energética, mas também para as mudanças no nosso comportamento, o lado social e cultural que é condição *sine qua non* para que a solução seja **atempada (isto é, ocorra nos próximos anos)!**

Para os cidadãos, a mudança, a transição energética apresenta-se, hoje, mesmo como uma obrigação moral⁵².

A sustentabilidade está crucialmente dependente do reconhecimento de que há limites para tudo o que se quer e pode fazer, e essa é uma percepção que não é ainda a percepção que tem a maioria das pessoas. Há limites nos recursos, há limites na capacidade que a Natureza possui para absorver (em tempo!) os impactes que temos sobre ela e a cultura vigente tende a acreditar precisamente no inverso, o que prejudica o caminho para um desenvolvimento que não seja mais sem limites, mas que se possa sustentar nas condicionantes físicas de que depende.

Uma dificuldade grande, advém do facto de a crise climática não resultar de um só evento, verdadeiramente global e catastrófico, a ditar uma resposta consentânea, em ato contínuo. Mas, em contraste, é algo que vai acontecendo de uma forma quase invisível, por deltas incrementais, apesar de haver consequências momentâneas, mais visíveis e bem fortes, mas separadas no tempo e no espaço... É mesmo quase como se nada estivesse a acontecer... E, sem drama, não há resposta... e não há percepção intuitiva para a urgência da mudança de cultura, de atitude, etc.

Isto exige uma informação de qualidade e a sua interiorização, um processo cultural lento e difícil, sobretudo nas sociedades de menor literacia. **Os cientistas podem e devem produzir essa informação e ajudar na sua compreensão, verdade e consequências!**

Por último, o caso de Portugal estará no centro da análise, um caso concreto onde a mudança pode acontecer e já está a acontecer.

1. ALGUNS FIOS DA MEADA

O Desenvolvimento Sustentável impõe-se num Planeta com mais de 8000 milhões de habitantes, com um consumo crescente de recursos finitos e com impactes sobre a Natureza cada vez mais perto dos limites de capacidade que esta tem para lidar com eles em tempo útil.

Um exemplo é da produção dos gases de efeito de estufa (GEE), sobretudo os que estão associados à energia — a partir do consumo de combustíveis fósseis — com a produção de CO₂ para a atmosfera e à desflorestação, que condiciona o seu sequestro. As alterações climáticas que daí resultam, estão a ocorrer a um ritmo acelerado e que urge controlar. Dos 1,5 °C de aumento da temperatura média que os cientistas tinham estabelecido como toleráveis até ao fim do século, já usámos 1,2 °C. Com mais umas décimas, atingimos os chamados pontos sem retorno (ou sem regresso) com consequências devastadoras, e que levarão centenas, senão mesmo milhares de anos a corrigir. Isso afetará a vida de todos neste Planeta, incluindo a dos nossos próprios descendentes diretos.

A solução passa por **descarbonizar a economia**, reduzindo e, a prazo, acabando^{1,b} com o uso dos combustíveis fósseis.

Assim, falamos da necessidade de uma transição energética, o que quer dizer recorrer a fontes de energia que não causem emissões de GEE. As emissões de CO₂ são diretamente provenientes da queima dos combustíveis fósseis, correspondem a cerca de 80% do total das emissões de GEE. (ver o Anexo 1 para definições e maior detalhe).

A dificuldade está no facto de termos construído durante o último século, uma dependência quase total dos combustíveis fósseis, uma forma de energia (química) extraordinária na sua conveniência, concentrada (alta densidade) e estável à temperatura ambiente, facilmente transportada e transformada em eletricidade, em energia mecânica para os transportes, em calor e frio para a indústria e edifícios, etc.

^b Em rigor, deveríamos chegar a um uso de combustíveis fósseis (todos os fins, incluindo a indústria química) entre 1/6 e 1/7 do que temos hoje, para atingirmos uma neutralidade carbónica (consumo/emissões = absorção/sequestro) que seria aceitável [IPCC].

Em termos técnicos falamos de Energia Primária, que se trata agora de fazer desaparecer de cena, das estatísticas e do próprio discurso da energia. Esta questão das estatísticas da energia é importante, pois sem ser compreendida nestes termos, a solução parece muito mais difícil e complicada do que é.

O que pretendemos é Energia Final, isto é, aquela que está disponível antes do ato final de transformação em Energia Útil. Ou seja, por exemplo, aquela que está na rede que alimenta a tomada a que se liga o candeeiro, antes de este ser acendido para dar luz.

A Energia Primária é um conceito que nos permite perceber que a energia do carvão, queimado na central térmica, permite produzir a eletricidade que depois será transportada até à tomada que alimenta o candeeiro. Nesse processo há muitas perdas (para a produção de uma unidade de energia elétrica são necessárias ~3 unidades de energia térmica — um fator 3 de perdas — já que o rendimento da central térmica a carvão se situa entre 30 e 40%^c) aumentado ainda por mais perdas (entre 8 e 12% mais de perdas em linha) até viajar e alcançar o ponto de consumo.

No caso do petróleo, temos de considerar a energia necessária para a sua extração, refinação e transporte, até ao posto de abastecimento.

Quando falamos de uma fonte renovável capaz de produzir eletricidade diretamente, o conceito de energia primária deixa de ser relevante. Até mesmo as perdas em linha poderão não ter de ser consideradas, quando a eletricidade é produzida de forma descentralizada, por exemplo, no telhado das nossas casas.

Quando se substitui eletricidade de origem fóssil por outra que o não é, o impacto sobre a redução em energia primária é importante e é-o também pelo passo final de conversão em energia útil, como se pode ver no caso dos transportes ou da transformação térmica.

Por exemplo, o combustível, uma vez no depósito do nosso carro (Energia Final), tem um rendimento de conversão em movimento (Energia Útil),

^c Se for uma central térmica a gás natural, o rendimento está mais próximo de 50% e, portanto, há apenas um fator 2 de perdas.

de cerca de 20%. O mesmo veículo, se se deslocar com um motor elétrico, obtém a mesma unidade de movimento com um rendimento de 95%. O impacto sobre a redução de energia primária é agora muito grande (um fator superior a 5), se a energia elétrica em causa não for de origem fóssil. Mas, mesmo que a eletricidade seja obtida por via fóssil térmica, o balanço, neste caso, em comparação com o uso direto de combustível, continua favorável (1 para 3, em vez de 1 para 5).

Quando se tem em conta estes aspetos, percebe-se que, à medida que vamos retirando energia primária fóssil do panorama – estatística – da energia, vamos realmente avançar, sem falar mais nos termos de sempre da energia (a primária). Isto é, sem termos de dar ouvidos ao discurso das transições lentas e demoradas, como as que assistimos do carvão para o petróleo e deste para o gás, discurso que se ouve, com frequência, a propósito da transição para as Renováveis, por exemplo.

A conclusão importante é a de que o discurso do futuro vai passar a dever ser feito em termos de Energia Final.

2. DESCARBONIZAR, MAS COMO?

Vamos continuar a analisar a questão da energia, em busca de alternativas, mas sem perder o ponto de vista mais importante, que é o da descarbonização da economia.

Reduzir, a ritmo acelerado, o consumo dos combustíveis fósseis, vai exigir a ampla consideração de alternativas no âmbito da energia (2.1), mas vai conduzir à consideração de outras possibilidades com impacto muito grande. São sobretudo a questão dos materiais e a sua utilização (2.2) e a discussão em torno dos temas da reciclagem e da economia circular (2.3). A questão cultural (2.4), em particular o comportamento dos consumidores é uma parte muito importante do problema e tem de passar a ser parte da solução, já.

A energia acaba por estar implícita em todos eles, mas os pontos de vista são específicos e, por isso, faremos um tratamento em separado.

Uma análise mais completa levaria a considerar as questões da energia e dos impactes ambientais associada a outros aspetos concretos como o da produção de alimentos (agricultura e pecuária). Estas áreas exibem hoje uma evolução fortíssima, muito para lá das mudanças dos hábitos e dos procedimentos que já vão acontecendo, capazes de ter consequências importantes a médio e/ou longo prazo. Cito apenas a possibilidade da produção de carne através do recurso às células estaminais^{2,d}.

2.1 A Energia

2.1.1. A Suficiência e a Eficiência Energéticas

Antes de entrar no tema das alternativas (**oferta** de energia), é essencial introduzir os conceitos de suficiência e eficiência energéticas, já que, em qualquer cenário, devemos gerir o que se chama a **procura** de energia, no fundo evitando o consumo (suficiência energética) e, depois, velando pela utilização mínima de energia para obtenção de um determinado objetivo (serviço) e que designamos por eficiência energética.

Este tema da gestão da procura é essencial. Por si só permite reduzir o consumo de combustíveis fósseis, e faz entrar na equação o consumidor, cuja atitude (em termos individuais ou coletivos) é a causadora do problema que queremos resolver.

Exemplos para falar de suficiência energética, há muitos e variados. Desde a adoção de práticas de construção que privilegiem o isolamento térmico, o recurso a vidros duplos (ou mais!), à orientação correta dos edifícios para tirar partido da ventilação natural, dos ganhos solares, etc., até ao planeamento das cidades que minimize deslocações, à redução do uso dos transportes individuais em favor dos transportes coletivos, encontramos muitas formas para evitar consumir energia, sem sacrifício da nossa qualidade de vida.

Esta preocupação faz parte cada vez mais importante da abordagem ao sector dos edifícios, por exemplo. Temos a certificação energética dos

^d We Tasted the World's First Cultivated Steak, No Cows Required, TIME, Aryn Baker/Rehovot Israel, November 2022.

mesmos, cada vez mais exigente (DGEG – Direção Geral de Geologia e Energia, ADENE – Agência Nacional de Energia e o programa ELPRE) e a obrigar a uma evolução que condicionará o nosso comportamento, conforto e mesmo o valor, isto é, a rentabilidade, dos investimentos neste sector, no futuro próximo!

A Eficiência Energética, através da evolução do comportamento energético dos equipamentos e da consideração de processos (por exemplo, na indústria) cada vez mais eficientes, ganha também um enorme terreno, todos os dias.

A legislação europeia, e a nossa própria, neste sector, é cada vez mais apertada. Pretende induzir reduções de consumo de 32,5% até 2030. Restamos encarar isso como uma forma eficaz de nos ajudar a mudar o nosso comportamento em termos de procura de energia.

Afinal, há muito que podemos e devemos ir fazendo: como melhorar o comportamento térmico das nossas casas, pensar em sermos produtores de energia com fotovoltaico ou solar térmico nos nossos telhados, substituir o fogão a gás e/ou caldeira por equipamentos elétricos (ver 2.4, adiante), etc., mas, se formos empurrados pela legislação, não teremos alternativa, mais tarde ou mais cedo.

E se conseguirmos controlar a ânsia de consumir (bens de consumo) característica da sociedade de consumo sem limites em que vivemos, também lograremos algo com impacte muito relevante.

2.1.2. As alternativas à energia dos combustíveis fósseis

Depois de aprendermos e praticarmos a gestão da procura que discutimos acima, temos, finalmente, de encarar o recurso às alternativas à energia dos combustíveis fósseis.

Há essencialmente duas possibilidades a considerar: as Energias Renováveis e a Energia Nuclear.

Na primeira incluímos a Solar, a Hídrica, a Eólica, a Bioenergia, a das Ondas e Marés e a Geotérmica. Esta última não é estritamente renovável, mas é prático considerá-la como tal. Na segunda teremos de falar de fissão

e fusão nucleares.

As primeiras podem ser utilizadas (sobretudo a Energia Solar) para a produção de eletricidade, e para a produção direta de combustíveis, bio-combustíveis e os ditos sintéticos (como o H₂ e outros), bem como calor e frio. As segundas, salvo aplicações especiais, sobretudo no domínio militar, são propostas apenas para a produção de eletricidade.

A grande alteração/evolução tecnológica dos últimos anos aconteceu precisamente no domínio das Energias Renováveis, sobretudo com a Eólica e a Solar que, hoje, constituem a forma mais barata de energia elétrica que é possível encontrar no mercado. Mais barata, versátil, implementável em prazos curtos e usando recursos abundantes, distribuídos, em todo o Mundo.

Enquanto isto, a Energia Nuclear foi ficando progressivamente mais cara, sobretudo por questões ligadas à segurança (depois dos grandes acidentes de Chernobyl e Fukushima e de muitos acidentes menores que foram e vão acontecendo) e à consciência crescente dos seus chamados custos escondidos.

A diferença é enorme. Para a quantificar basta dizer que o custo do Wpico^e para uma grande central solar fotovoltaica de hoje, pode situar-se entre 0,3 e 0,4 €/Wp e o do Nuclear, para uma central nova, embora oferecido aos seus potenciais compradores entre 3 e 4 €/Wp, na prática, acaba por custar ainda muito mais (8,5 €/Wp (central de Oilikuoto-3, na Finlândia, e >17 €/Wp, em Flammanville, França, etc.^{4,f}). Um fator 10 de diferença à partida, que, depois, pode atingir valores superiores a 50! (ver Anexo 2)

Voltaremos a esta¹³ questão quando analisarmos um pouco mais a Energia Nuclear, mas, para já, prosseguimos com a análise do interesse e da importância da produção de energia, sobretudo a elétrica, por fontes alternativas.

2.1.3. A eletrificação da economia

e Potencia de produção – *rating* – de uma determinada tecnologia; no caso do painel fotovoltaico corresponde à produção que pode ter quando transforma 1000W/m² – radiação solar ao meio-dia solar de um dia de céu claro.

^f In 2022, nuclear power's future looks grimmer than ever, *Renew Economy*, Jim Green, 11 January 2022 77.

A Figura 1 mostra a distribuição da Energia Final, eletricidade uso final, calor (inclui calor e frio no sector dos edifícios, mas também calor de processo na indústria) e transportes, na União Europeia.

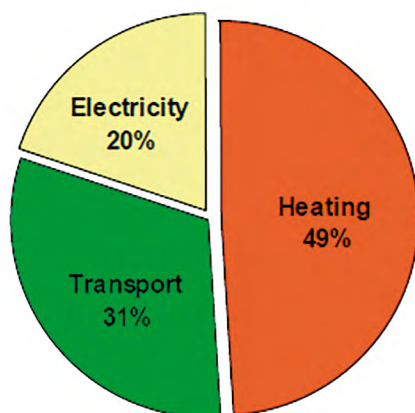


Figura 1. Energia Final na União Europeia.

Vimos o grande impacto que pode ter sobre a Energia Primária, a eletrificação, por exemplo, dos veículos. Mas também poderíamos ter referido a possibilidade de substituição do gás para cozinhar alimentos por placas elétricas (com uma poupança de energia que facilmente atinge um fator 2), ou a substituição dos sistemas de aquecimento nas nossas casas por bombas de calor, cujo comportamento energético permite, com uma unidade de energia elétrica, produzir 4 ou 5 unidades de calor (ou frio), em contraste com os rendimentos inferiores a 1 das caldeiras a gás, ou ainda o crescimento da sua utilização na indústria, aliás até associada à possibilidade de produção própria descentralizada (fotovoltaico, por exemplo).

Isto é, temos um forte incentivo em eletrificar cada vez mais toda a atividade económica, desde que possamos produzir eletricidade que não seja por via fóssil.

Acontece ainda que, ao pretendermos recorrer às Energias Renováveis, a forma mais barata, imediata, direta e impactante de o fazer, é precisamente na produção de eletricidade.

Perspetiva-se que a fatia amarela da pizza da Energia Final aumente de

20% para pelo menos 40% nos próximos 20 anos, com um impacto muito forte sobre a energia primária fóssil, aumentando a sua penetração no sector dos Transportes (coletivos e individuais) e no sector do Calor.

Mas as Renováveis poderão ter uma contribuição acrescida, quer para fins térmicos - a biomassa/resíduos e o solar- quer para a produção de combustíveis alternativos, os sintéticos, incluindo o H2 verde e os biocombustíveis, em menor grau, como se verá.

2.1.4. Energia Elétrica em Portugal

Antes de avançar com mais considerações sobre o futuro e o papel das alternativas, é útil apresentar a situação atual do sector para a produção de eletricidade, em Portugal.

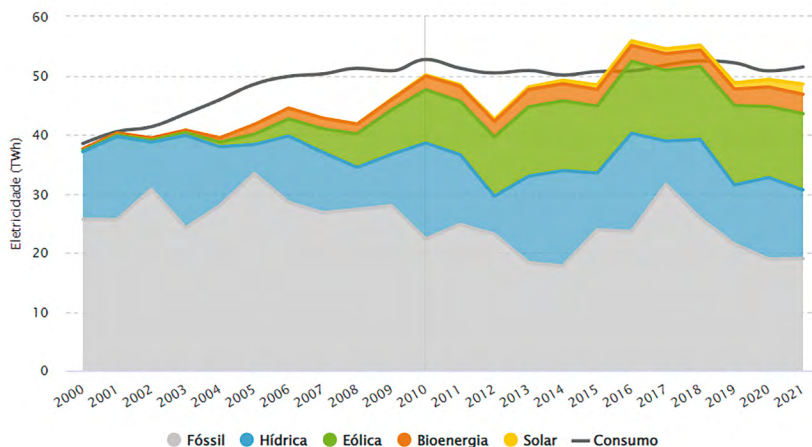


Figura 2. Evolução da produção de eletricidade em Portugal (REN – Rede Elétrica Nacional. Fonte, Análise, APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis).

Verifica-se (ver Figura 3) que há cerca de 20GW de potencia instalada, dos quais 7,1GW em centrais hidroelétricas, 5,6GW eólicos, 4,5GW em centrais a gás natural, 1,8GW fotovoltaicos e 0,7GW em centrais de biomassa.

O pico do consumo situa-se um pouco acima de 10GW em alguns dias de Inverno, pelo que se pode apreciar que existe uma capacidade instalada folgada.

Como se pode ver, a produção atribuída às Renováveis ronda os 60% e

a dependência dos combustíveis fósseis tem vindo a diminuir, atualmente sendo exclusivamente de gás natural.

Obs: Este texto foi escrito no início de 2023. No início de 2024 (APREN) foi possível contabilizar uma contribuição das Energias Renováveis de 70,7%.

O consumo, em alguns anos e em muito dias, pode ser excedido pela produção (equivale a haver exportação de energia elétrica). Também ocorre importação de energia elétrica, num exercício frequente de balanço recíproco.

A contribuição do solar (fotovoltaico) é ainda muito diminuta, em comparação com a hídrica e eólica. Este facto teve consequências importantes nestes últimos anos de menor precipitação (seca) e menor disponibilidade da eólica, reduzindo a contribuição potencial para valores que teriam sido muito maiores com uma maior capacidade instalada de solar, já que o recurso solar tende a aumentar nessas circunstâncias. Esta situação está em vias de ser alterada, com o aumento substancial da contribuição do solar que se prevê. (ver abaixo)

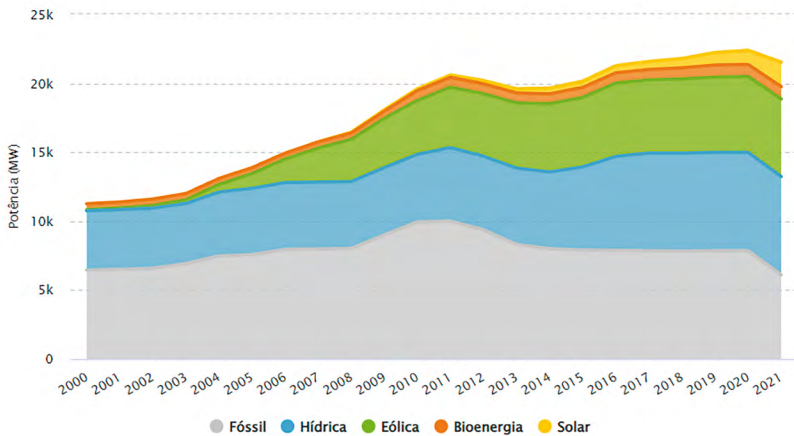


Figura 3. Capacidade instalada para produção de eletricidade em Portugal. (Fonte DGEG, análise APREN).

De acordo com o PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima 2030, estima-se que o sistema eletroprodutor nacional evolua para uma capacidade instalada de cerca de 30 GW, onde as renováveis representarão cerca

de 80% do total, ou seja, 24 GW. Destes, 9 GW serão energia hídrica, entre 8 e 9,2 GW energia eólica e, entre 8,1 e 9,9 GW energia solar.

Esta evolução está em linha com a necessidade de uma crescente eletrificação da economia, explicada acima. Note-se o grande reforço da presença do solar que está em curso!

2.1.5. As Energias Renováveis

2.1.5.1. Características e limitações

Este escrito não é certamente um local para uma explicação técnica sobre estas várias formas de energia e dos equipamentos empregues na sua transformação e aproveitamento[§], mas tão somente para relevar alguns aspetos mais salientes e que ajudem a compreender o tipo de papel que vão ter no nosso futuro.

Todas têm uma origem solar, mais ou menos direta do Sol que está presente no dia a dia do Planeta em que vivemos, e isso é o que lhes confere o seu carácter renovável, sem limites no tempo da nossa escala de tempo.

Em termos de abundância, a potência ($\sim 1000\text{W}/\text{m}^2$ num plano perpendicular à direção Terra-Sol, ao nível do mar) que nos chega do sol em cada instante, é $\sim 10\,000$ vezes superior às nossas necessidades instantâneas. Em termos de disponibilidade é que temos de considerar algumas questões específicas: a alternância dia e noite e a sazonalidade-estações do ano, com impacte sobre a quantidade de energia solar disponível, de um dia para o outro, mas também da precipitação, do regime de ventos, variações que têm de ser integradas na equação geral da utilização do solar, da hídrica, da

[§] Como já se referiu houve uma evolução científica e tecnológica nos últimos anos (e continua a haver) que nos permite dispor de painéis solares — ditos fotovoltaicos — e de coletores térmicos, com ou sem concentração da radiação vinda do sol, bem como de geradores eólicos e muitos outros equipamentos, que nos proporcionam a forma mais barata de produzir energia elétrica, por exemplo. Outras tecnologias estão em franca evolução, por exemplo, a da energia das ondas e a das marés, que aumentarão no futuro a disponibilidade de energia renovável, contribuindo ainda mais para a nossa segurança de abastecimento.

eólica, etc.

Contudo, esta variabilidade de disponibilidade tem uma característica muito importante e que é a da coincidência no tempo das várias formas de energia. A ausência de sol no período noturno pode ser compensada pela presença de vento, ou pelo aumento da precipitação que, por sua vez, nos traz a disponibilidade da energia hídrica.

A outra característica importante é a disponibilidade no espaço. No norte do país (e da Europa) chove mais ou há mais disponibilidade de vento do que no sul. Com o solar será o contrário, sobretudo pensando em termos europeus^h. Essa variação está associada a uma oportunidade muito importante quando se considera a produção de eletricidade e um mercado comum europeu da energia: a eletricidade pode ser produzida num local (país) e transportada para ser consumida noutro. Há uma evolução da legislação europeia para facilitar/melhorar/aumentar as interconexões entre países, precisamente para explorar este facto. A gestão das simultaneidades!

O mercado ibérico da eletricidade e as frequentes trocas entre os dois países, Portugal e Espanha, são exemplos claros disso.

A tecnologia trouxe-nos outro mecanismo para atenuar o problema: é o tema do armazenamento explícito de energia.

2.1.5.2. Armazenamento de Energia

Uma primeira forma de armazenamento é o da simbiose entre a hídrica e as demais fontes como a eólica, ou a solar.

A hídrica, associada a albufeiras, permite armazenar energia, praticando o que se designa por funcionamento reversível, que consiste em bombar de volta à albufeira, água que já passou e produziu energia elétrica; isto quando há um excesso de energia eólica, por exemplo, sem consumo nesse momento e que, em vez de ser perder, pode assim ser armazenada. O número de aproveitamentos hidroelétricos com barragem e funcionamento reversível

^h Ao contrário do que se possa pensar, a disponibilidade de energia solar entre o sul (Faro, por exemplo) e o norte do país (Porto, por exemplo) é inferior a 20%.

já é significativo em Portugal, e está já próximo de 3,5 GW (DGEG, EDP), em 2022. O rendimento associado a este processo, incluindo os dois sentidos, situa-se entre 75 e 80% (pode atingir 90% em cada sentido), pelo que, as perdas desta estratégia são aceitáveis, aliás, potencialmente inferiores às do armazenamento de energia elétrica em baterias, cujos ciclos carga-descarga se situam em rendimentos globais entre 60 e 70% (80% em cada sentido).

Nota: a questão da energia hídrica não deve ser vista de forma isolada da questão da água, num país que caminha para um clima, em média, mais seco no seu futuro. Não é este o local para discutir esta questão, mas o aumento da capacidade em hídrica, previsto até 2030 (cerca de 1 GW mais) é uma boa notícia para ambos os problemas: energia e água.

As albufeiras permitem um armazenamento na escala de dias, mas também, em teoria, uma gestão de produção numa escala sazonal, algo que ainda não se está a praticar, também por causa da complicação associada ao problema da gestão da água.

Uma segunda forma de tratar a questão do armazenamento é através da tecnologia das baterias, já referida acima.

Há muitos tipos de baterias e é uma tecnologia em franca evolução. As baterias dos veículos elétricos estão hoje centradas no recurso ao lítio⁴ⁱ. A evolução tecnológica, da extração à configuração das baterias (densidade, kWh/m³ ou kWh/kg) e as reservas de Lítio conhecidas, permitem satisfazer a procura crescente por muitos mais anos (2035–2040).

Entretanto surgirão outras tecnologias, para esta e outras aplicações importantes, baseadas em outros materiais como o Sódio, o Enxofre, o Alumínio^{5j}, abundantes e aliviando a pressão sobre a questão da escassez, face à escala de utilização. Para as baterias dos veículos, serão adoptadas

ⁱ Metals & Mining Practice Lithium mining: How new production technologies could fuel the global EV revolution April 2022 © Xenia4ka/Getty Images Lithium is the driving force behind electric vehicles, but will supply keep pace with demand? New technologies and sources of supply can fill the gap. by Marcelo Azevedo, Magdalena Baczyńska, Ken Hoffman, and Aleksandra Krauze (McKinsey & Company).

^j Ver por exemplo “Aluminium, sulphur and salt batteries. Cheaper than lithium-ion, for homes and EV charging stations” September 7, 2022, by David Chandler.

tecnologias de reutilização (segunda vida) em aplicações estacionárias, por exemplo, menos exigentes.

Em paralelo, temos tecnologias sobretudo para aplicações estacionárias, em baterias de grande capacidade de armazenamento, em nós de rede, em grandes utilizadores, etc., e que surgem associadas também a outros materiais. Um exemplo é o das baterias de fluxo, com recurso ao Vanádio (Vanádio Redox^{6,k}).

Uma tecnologia alternativa e em desenvolvimento é a do armazenamento da energia sob a forma de calor, com produção de eletricidade só no momento da satisfação da procura. É o que se pretende alcançar pela via do solar de concentração (CSP), termoelétrico, em centrais que reproduzem em absoluto as centrais térmicas convencionais, com a energia solar durante o dia a ser armazenada sob a forma de calor (em sais fundidos, a 560 °C), para uma produção de energia desfasada no tempo, à noite ou nos dias seguintes. Esta tecnologia é desenvolvida em Portugal, em colaboração com outros países da União Europeia (sobretudo na Cátedra das Energias Renováveis da Universidade de Évora^{7,l}).

O armazenamento de energia pode ser encarado de outras formas. Por exemplo, um sistema fotovoltaico numa aplicação residencial, pode ter o “excesso” de energia em determinado momento do dia, se consumido em casa, canalizado para fazer funcionar o ar condicionado ou o sistema de aquecimento, tratando a casa como armazenador de energia sob a forma térmica, para fins de conforto e também para conservação da própria casa-controlo de humidade.

A produção de um combustível como o H₂ por via renovável, pode ser

^k Projecto PVCROPS – Building Integrated PV, Projecto financiado pela União Europeia com a participação da Universidade de Évora, Instalação e ensaio de uma bateria de fluxo Vanádio Redox, Adélio Mendes, FEUP, LEFABE e o desenvolvimento de baterias de fluxo Vanádio Redox.

^l M. Collares-Pereira, D. Canavarró, L.L. Guerreiro, *Linear Fresnel reflector (LFR) plants using superheated steam, molten salts, and other heat transfer fluids*, Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology, ISBN: 978-0-08-100516-3, Pages 339-352, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00015-0>

encarada como uma forma de armazenar energia. O H₂ verde e outros combustíveis sintéticos (ver adiante) são vetores energéticos, armazenando energia entre a produção e o seu consumo (tipicamente desfasado no tempo).

2.1.5.3. A produção de energia no futuro

2.1.5.3.1. Eletricidade

Como ficou explícito, a produção de eletricidade Renovável em Portugal está hoje dominada pela hídrica e pela eólica.

Como se indicou, no futuro próximo, a energia solar aumentará significativamente a sua penetração, pelo que, em Portugal, nos aproximaremos de uma repartição muito mais perto de 30% para cada uma destas formas de energia.

Outras Renováveis poderão a vir a entrar no mix — a das ondas, por exemplo — mas a tecnologia não está ainda no mesmo grau de maturação. O importante é perceber que não estamos dependentes de isso acontecer para termos uma presença dominadora das Renováveis.

No caso da energia eólica, com uma presença em Portugal que já tem uns anos e uma indústria associada (o processo de instalação dos geradores eólicos iniciou-se há 20 anos), passará por uma evolução interessante: i) substituição de geradores das gerações anteriores pelos geradores de maior dimensão (> 3MW) de hoje, uma evolução que aproveita as infraestruturas já desenvolvidas e permite produzir mais em cada local (*Repower*) e ii) a possibilidade de se estender a produção ao *offshore*, explorando a nossa costa com médias de disponibilidade de vento mais elevadas.

Alguns dados sobre a energia eólica (Wind Energy IEA, September 2022⁸) a nível mundial são: ~830 GWp instalados, até 2021, para uma produção de 1870 TWh e um crescimento até 3200 GWp, para uma produção de 8000 TWh no Cenário Net Zero de 2030.

No caso da energia solar fotovoltaica (PV), a produção de painéis solares faz-se hoje sobretudo com o domínio de empresas chinesas, em quantidades e custos que dificilmente são hoje possíveis noutros sítios do Mundo.

A China (IEA Solar PV, 2021⁹) foi responsável pelo aumento de 38% da

capacidade de produção de PV no mundo, seguida pelos EUA (17%) e pela UE (10%).

A capacidade instalada de PV no Mundo aproxima-se de 1000 GWp (uma produção de 1000 TWh) e deverá (IEA – Net Zero Scenario¹⁰) atingir 5000 GWp (para uma produção de 7400 TWh), em 2030. Os rendimentos de conversão anunciados no mercado para a tecnologia mais comum — o Silício cristalino — excedem hoje os 20%, i.e., > 200 Wp/m².

A hegemonia comercial chinesa tende hoje a ser recuperada por outros países (por exemplo, os Estados Unidos e a UE) sobretudo para si próprios. Há também inúmeros desenvolvimentos para nichos de mercado em aplicações especiais: vidros ativos semitransparentes, telhas ativas, etc.

Contudo, onde haverá mais evolução, será na forma da oferta. Para lá da produção centralizada, em centrais que emulam a produção centralizada convencional, as Renováveis, em geral, mas sobretudo o solar fotovoltaico, permitem a produção descentralizada.

Esta vai crescer muito e, em Portugal, por exemplo, partilhar uma fatia importante dos 9,9 GW referidos acima para o fotovoltaico. Trata-se da colocação de painéis solares nas nossas casas e nos edifícios, em geral, bem como na indústria, transformando os consumidores clássicos em produtores de energia (*consumers* e *prosumers*, na terminologia inglesa). Quando em excesso para o consumo próprio (autoconsumo), a energia produzida pode ser injetada na rede e ser absorvida por esta, para consumo por outro consumidor. A novidade em franco desenvolvimento é que, em vez de simplesmente se injetar o excesso na rede, este pode ser gerido numa perspetiva de Comunidade Energética (CER), uma gestão em conjunto com a produção de outros *prosumers*, potenciando grandemente o valor da energia produzida, frente à sua compra simples e direta pela rede, com um valor muito baixo.

A legislação portuguesa ^{11,m} nesta matéria tem sido particularmente feliz e avançada.

Vários operadores estão disponíveis neste novo mercado das

^m Por exemplo Decreto lei 15/2022.

CER-Comunidades de Energias Renováveisⁿ. Um dos tipos de proposta que as CER fazem aos seus membros, é o de não necessitarem fazer o investimento no sistema fotovoltaico que ocupará os telhados de cada um, e apenas fazerem um contrato de aquisição de energia com a CER, a uma tarifa muito mais baixa que a convencional (valores até 40% mais baixos) fixa por um período de 15 anos e com várias opções possíveis para os sistemas nos 15 anos seguintes.

2.1.5.3.2. Calor

Já se fizeram algumas referências ao solar térmico, nomeadamente para a produção de eletricidade. Adiante a bioenergia será tratada em capítulo próprio.

Falta referir o papel importante para a produção de calor (e frio) que pode ser desempenhado pela energia solar. Desde logo por via dos ganhos solares em edifícios (solar passivo), mas também para aplicações como águas quentes domésticas, aquecimento e arrefecimento (tecnologia da absorção) e, sobretudo, com os avanços tecnológicos de hoje em calor de processo para a indústria (por exemplo, produção de vapor entre 180 °C e 250 °C). Ao longo dos anos tem havido muito investigação em Portugal nesta área^{12.o} e até indústria de fabrico de concentradores solares e outros coletores. Mais uma vez, o centro principal de I&D hoje em Portugal está na Cátedra de Energias Renováveis da Universidade de Évora.

A energia Solar permitirá, por via elétrica e por via térmica direta, substituir uma parte do consumo dos combustíveis fósseis, muito em especial o gás natural, em aplicações industriais e domésticas.

2.1.5.4. A disponibilidade de recursos para a produção de tecnologias

ⁿ Greenvolt/Energias Unidas, Cooperativa Copérnico, etc.

^o Por exemplo, D. Canavarro, J. Chaves, M. Collares-Pereira, Improved design for linear Fresnel reflector systems, *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, ISBN: 978-0-08-100516-3, Pages 45-55, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00003-4>.

renováveis

2.1.5.4.1. Consumo de energia no fabrico

Com frequência ainda se escuta a afirmação de que os painéis fotovoltaicos necessitam de muita energia (de origem fóssil?!) para a sua fabricação, pelo que não seriam uma resposta adequada às questões de energia do futuro. Já em 2004, o NREL – National Renewable Energies Laboratory (EUA) publicava por encomenda do DoE – Department of Energy (EUA), uma análise PV FAQs^{13,P} sobre esta questão e concluía que, com a tecnologia daquela altura, as várias tecnologias (do Silício Cristalino ao Silício Amorfo e outros filmes finos) recuperavam, com a sua produção de energia, a energia investida na fabricação entre 4 anos (Si-C) e 1 ano (outros-filmes finos). Os cálculos foram, então, feitos para 12% de rendimento de conversão. Hoje, no caso do Si-C, os valores do rendimento de conversão estão bem acima de 20% de rendimento, pelo que, estes cálculos dariam (sem mais considerações sobre a própria tecnologia de fabrico, menor espessura dos painéis, etc.) um resultado entre 0,5 anos e 2 anos. Isto é, este é um “não problema”, para uma tecnologia que já mostrou operar pelo menos por 30 anos.

Cálculos semelhantes, com resultados semelhantes, têm sido feitos para os geradores eólicos (1 ano de produção para recuperação da energia usada no fabrico: EricK Lantz, NREL¹⁴).

Mas, e muito importante, este tipo de preocupação assume ainda menos importância à medida que a energia elétrica empregue no fabrico vai sendo cada vez mais de origem renovável.

2.1.5.4.2. Materiais: recursos, a questão das Terras Raras e de outros elementos

Quanto aos materiais propriamente ditos para a produção de painéis fotovoltaicos, falamos sobretudo de Silício, um dos elementos mais abundantes na Terra. Mas, é verdade que os painéis fotovoltaicos e os geradores

^P NREL (2004) PV FAQs.

eólicos usam quantidades diminutas de elementos menos abundantes, entre os quais se incluem materiais da categoria genérica das Terras Raras (TR)⁹. No caso dos geradores eólicos há o recurso ao Neodímio para os ímãs, por exemplo. Um sem número de outros objetos/sistemas que usamos na nossa vida de todos os dias também. Por exemplo: a eletrónica em veículos de todos os tipos, discos rígidos dos computadores, baterias, fibras óticas, telemóveis, etc.

Vale a pena registar alguns aspetos mais salientes. Chamam-se “raras”, mas não são assim tão pouco abundantes: o que se quer dizer é que existem concentrações que, com muita frequência, não viabilizam a sua mineração (algo que também é relativo, evolui com o tempo). As reservas mundiais totais de TR situam-se cima de 120 milhões de toneladas¹⁵. Em 2030, estima-se uma exploração de 280 000 t/ano. Com um consumo desta natureza estamos a falar de centenas de anos de duração do recurso. Nota: há elementos mais abundantes do que outros e esta é uma estimativa feita para todos, em conjunto.

A China é hoje o maior produtor a nível mundial dos TR e tem entre um terço e um quarto das reservas mundiais. Uma das razões para o domínio que tem do mercado está diretamente relacionada com o baixíssimo custo de produção que tem, com um enorme desrespeito pelo ambiente.

Mas esta produção poderia ser feita noutros termos, mais equilibrados, mas também mais caros. Isto é, a busca permanente da redução de custo a qualquer preço, tem aqui uma linha vermelha de sustentabilidade: teremos que pagar mais para reduzir os impactes. Mas não muito mais, já que falamos de quantidades pequenas, produto a produto.

Esta ideia pode e deve aplicar-se mesmo no caso do fotovoltaico, pois fica hoje já aparente que são mais baratos do que poderiam/deveriam ser!, i.e., pode bem continuar a ser, de longe, a forma mais barata de produzir

⁹ As 17 TR são: lanthanum (La), cerium (Ce), praseodymium (Pr), neodymium (Nd), promethium (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb), lutetium (Lu), scandium (Sc), and yttrium (Y).¹⁵

energia elétrica hoje, e tolerar um custo ligeiramente superior e que reflita uma produção limpa destes materiais. O mesmo se poderá dizer para todos os componentes da indústria eletrónica.

Contudo sublinhe-se que o fotovoltaico não está criticamente dependente como estão os geradores eólicos (ou os veículos elétricos, por exemplo) das TR. O Silício é o material esmagadoramente dominante na produção mundial atual de células solares e o metal de uso predominante é a prata para os contactos metálicos. Mas existem alternativas à Prata que provavelmente prevalecerão no futuro, independentemente destas questões de eventual escassez. Contudo, é verdade que há algumas tecnologias de células solares que usam um leque de *minor metals* que incluem Índio, Gálio, Selénio, Cádmiio, Telúrio, que são, em geral, subprodutos da refinação de metais básicos como o Cobre, Níquel, o Zinco, e que hoje não causam preocupação importante neste contexto.

Um aspeto essencial e a que deveremos dar a máxima importância, é o de que, em fim de vida, os produtos da eletrónica, tendem ainda a não ser reciclados, basta pensar na quantidade de aparelhos de tudo e mais um pouco, que temos em casa e que não deitamos fora. É evidente que o que deverá acontecer é a sua reciclagem, numa perspetiva de economia circular. Reciclar vai ter que ser a prática comum. Será mais caro? Não necessariamente, numa perspetiva global, já que se reduzem os impactes ambientais da exploração destes recursos, fazem-se durar mais os recursos e tudo isso tem o seu valor próprio.

Por outro lado, há uma evolução tecnológica forte que conduzirá a formas (para lá da reciclagem) de combater uma eventual escassez de TR dentro de algumas dezenas de anos, quer para as células fotovoltaicas quer para as baterias, por exemplo, como comentámos.

2.1.5.4.3. A disponibilidade de terrenos (áreas) para a instalação equipamentos

Durante muito tempo a instalação de geradores eólicos teve de lutar contra a subjetividade negativa dos cidadãos, confrontados com a presença destes no alto dos montes. Essa questão coloca-se hoje cada vez menos, pois vai-se ficando habituado a vê-los na paisagem. E, para as soluções *offshore*, esta questão não tem expressão.

A objeção que hoje aparece com mais insistência é contra as centrais fotovoltaicas, sobretudo pela suposta competição com a ocupação de terrenos de aptidão agrícola. Tenderá também a desaparecer porque há muito terreno disponível com menor ou nula aptidão agrícola e, por outro lado, crescem as aplicações ditas agrivoltaicas, uma simbiose de tecnologias e objetivos que provam que este acabará por ser também um não problema. Claro que, entretanto, poderá haver abusos, sobretudo no contexto de leilões para a atribuição de potência fotovoltaica em terrenos com acesso direto à rede elétrica. Questões que não são do foro da técnica, mas da política.

Dois outras situações merecem destaque neste escrito:

1. O chamado fotovoltaico flutuante, em albufeiras de barragens ou em lagos, uma utilização muito lógica de áreas disponíveis, bem como de ligações à rede.



Figura 3. PV flutuante, Alqueva.

2. Fotovoltaico em coberturas – telhados.

A colocação ideal para painéis solares estacionários para maximizar a produção anual é a de uma inclinação à latitude do lugar menos 5° , e com azimute sul. Praticamente nenhum telhado satisfaz estas condições e, por isso, é frequente ver estruturas inclinadas e desalinhadas com as águas dos telhados, sem qualquer necessidade para isso.

A penalização por desvio da situação ideal é muito pequena, o que minimiza este problema e permite abordar a situação da descentralização de produção via fotovoltaico com muito mais liberdade e sem recurso a estruturas e outras situações complicadas.

A Figura 4 mostra o valor da penalização para várias inclinações e azimutes.

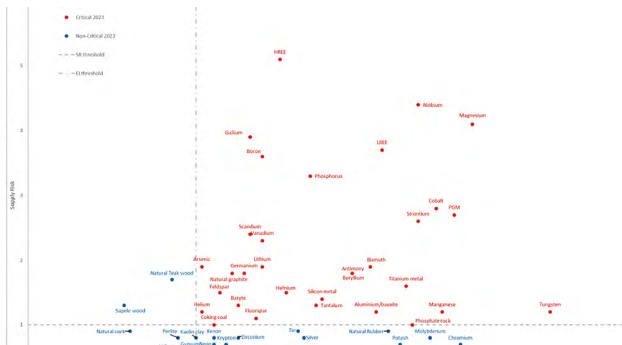


Figura 4. Penalização da energia disponível, em termos anuais, sobre uma superfície plana, por efeito da orientação e inclinação¹⁶ (Manuel Collares-Pereira “Energias Renováveis: a opção inadiável” (1998)), em relação com o valor máximo (inclinação a latitude menos 5° e azimute 0°); o gráfico foi feito para a latitude $38,75^\circ$ (Lisboa).

Como se pode observar na Figura 4, por exemplo, a adoção de uma colocação horizontal^r — em terraços — introduz apenas uma penalização de 12%!

Os painéis fotovoltaicos têm um peso da ordem de 12 kg/m^2 , pelo que podem ser colocados diretamente na maior parte das coberturas, incluindo

^r A colocação estritamente horizontal não se recomenda; é necessário introduzir sempre alguma inclinação (10° a 15°) por razões limpeza dos painéis e a sua relação com a precipitação.

as coberturas fabris. Terraços planos também podem ser diretamente utilizados para este efeito, e outras áreas, como as de parques de estacionamento, podem ter coberturas com painéis fotovoltaicos.

2.1.5.5. Bioenergia

Um tema vasto. Inclui biomassa sólida (lenha, etc.), biocombustíveis (bioetanol, biodiesel), biometano, para aplicações que vão da pura produção de calor, à produção de eletricidade em centrais térmicas e aos transportes. Uma consulta aos textos da UE sobre este assunto (site *Energy* e, por exemplo¹⁷, *Renewable Energy Directive* 2108/2001) mostra como é complexo e implica com outras políticas^{18,s}, nomeadamente as da Agricultura e as da própria Sustentabilidade. Uma exigência a destacar é que as centrais térmicas a biocombustíveis, devem demonstrar emissões diretas de gases de efeito de estufa, 65% abaixo da alternativa relevante em combustível fóssil. Se for biomassa sólida, esta exigência sobe para 70% (80%, em 2026).

Dos biocombustíveis espera-se (2050) uma contribuição significativa (até 14% para a área dos transportes, por exemplo). Atualmente os biocombustíveis líquidos correspondem a cerca de 5%, misturados na gasolina (etanol, até 10%) e biodiesel (até 5%).

Um problema particularmente importante na queima dos combustíveis líquidos, é o que se relaciona com os transportes aéreos e marítimos, consumidores de cerca de 20% do total dos combustíveis, mas com impactes de peso superior nas emissões, sobretudo os transportes marítimos com uma forte dependência dos óleos pesados¹⁹.

A mistura de combustíveis bio nos combustíveis fósseis é uma forma de atenuar o impacte das emissões.

Estes dois sectores, transportes marítimos e aéreos, necessitarão de uma evolução forte, com mais combustível bio, mas também com os novos combustíveis (sintéticos, H₂), tratados no próximo capítulo.

Ainda sobre a biomassa sólida (matéria-prima de origem vegetal,

^s Report, The use of woody biomass for energy production in the EU, Maio 2020.

queimada ou usada para produção de eletricidade, como a madeira, resíduos de madeira, plantações para a energia, resíduos agrícolas e industriais e domésticos), interessa destacar que a IEA (*Net Zero Scenario by 2050*)¹⁰, refere que o uso tradicional de biomassa deve ser diminuído a partir de 2030. Por biomassa tradicional entende lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, excrementos de animais secos para cocção e aquecimento no sector residencial, em processos com rendimentos muito baixos (inferiores a 20%) e dependentes de fornecimentos irregulares/desflorestação de biomassa. Simultaneamente considera que a parte que cabe à bioenergia dita “moderna” (cerca de 6,6% no cômputo total da energia no mundo de hoje) deverá alcançar 13,1%, em 2030, e 18,75%, em 2050.

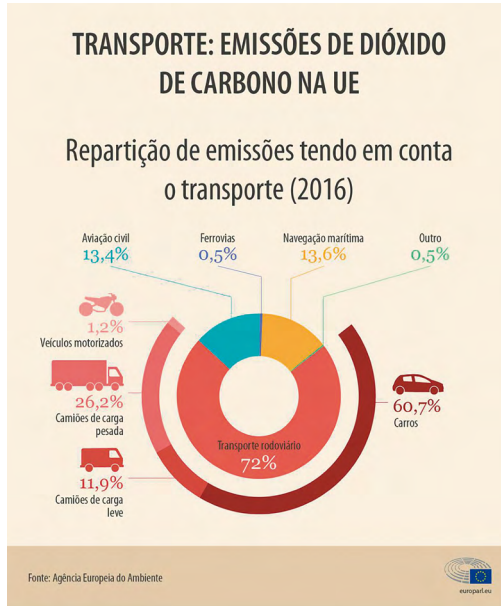


Figura 5. Emissões de CO₂ na UE, transportes.

A terminar este capítulo importa notar que muitos especialistas^{t,51} da área da sustentabilidade e do ambiente, olham de forma muito cética para o

^t Peter Fairley, The biofuel course correction, The circular economy, Scientific American, January 2023.

verdadeiro impacto do desenvolvimento deste sector dos biocombustíveis, sobretudo quando se faz o balanço completo do carbono, entre a capacidade do solo de o fixar e consequências a nível de emissões GEE do cultivo intensivo de novas espécies. Com frequência o resultado pode ser, e é, negativo. Assim, as metas traçadas e os métodos empregues, exigem um controlo muito mais apertado do que está a acontecer sobre a desflorestação, sobre a competição entre a produção de culturas para combustíveis *versus* a cultura para produção de alimentos, recurso descontrolado a fertilizantes, abandono de técnicas tradicionais de pousio e ou de alternância de culturas, etc.

2.1.5.6. As energias renováveis e o futuro, no resto do mundo

Existe uma enorme assimetria entre países ricos e pobres. Números redondos, 4/5 da Humanidade consomem apenas 1/3 da Energia. O eufemismo de países em vias de desenvolvimento, reflete a necessidade de um aumento significativo de consumo de energia per capita. Aliás, a erradicação da pobreza tem como condição necessária o aumento do consumo de energia *per capita*.

Para os mais de 1000 milhões que vivem abaixo do limiar de pobreza, trata-se de poder ter energia no mínimo para cozinhar, ter uns litros de água potável e alguma capacidade de ter luz e energia para um radio, uma TV, etc. Com estas condições asseguradas, estes cidadãos melhoram a saúde, iniciam o acesso à cultura (luz para estudar...) e a alguma atividade de produção própria, geradora de rendimento...

É evidente que não será sustentável alterar essa situação com os combustíveis fósseis que se pretende reduzir/eliminar. É necessário trazer a necessidade da descarbonização da economia, para as economias, no fundo as novas economias de desenvolvimento de todos esses países.

Tudo o que se disse sobre suficiência energética e eficiência energética continua igualmente válido aqui, mas as energias renováveis são incontornáveis e únicas, porque possuem várias características que são essenciais:

- Estão naturalmente distribuídas e até mais abundantes no chamado *Sun Belt* — entre trópicos — onde vive a maior parte das pessoas;
- Produção de energia junto ao consumo, pelo que não haverá a

mesma pressão que houve nas economias dos países desenvolvidos para o desenvolvimento de infra-estruturas (de transporte e distribuição).

É possível esperar que se passe com a energia o que se passou e passa com a realidade wireless das telecomunicações, tornando-as rapidamente viáveis e acessíveis, onde há 20 ou 30 anos se encarava o problema insolúvel do custo da extensão de uma rede com cabos para resolver o problema. E há telemóveis hoje por todo o continente africano, por exemplo! Isto é, as renováveis poderão vir a ser como os telemóveis da energia...

Claramente a Energia Nuclear, o seu elevadíssimo custo, exigência tecnológica a ela associada, dependência de abastecimento de combustível nuclear e o facto de a produção centralizada exigir uma rede de transporte e distribuição apropriadas de energia elétrica, não vai poder ser a alternativa massiva para o mundo em desenvolvimento.

É natural que, de todos os combustíveis fósseis, seja o gás natural o que terá um papel dominante na transição energética (aliás, em todo o mundo): por ser mais abundante que o petróleo, estar mais distribuído (mais fontes, mais dispersas, reduzindo a hegemonia de certos países e grandes empresas da energia) e ser de queima mais limpa (do ponto de vista do ambiente).

Há uma enorme dependência da lenha (biomassa sólida e outros resíduos) nos países em vias de desenvolvimento, sobretudo nos meios rurais e suburbanos. A queima, com rendimentos baixíssimos, tem dois efeitos nefastos: sobre o ambiente, através da desflorestação associada e sobre a saúde (doenças respiratórias, doenças do foro ocular, etc.) que urge contrariar com urgência. Sobretudo com novas tecnologias de equipamentos de queima, equipamentos de baixo consumo de eletricidade solar para necessidades básicas e de equipamentos para a cocção de alimentos. Este último é um tema onde tem havido investigação^{20,u} e desenvolvimento industrial^v em Portugal.

^u M. Collares Pereira, J.P. Almeida, J. Correia de Oliveira, "Description and testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics", ISES Solar World Congress, Goteborg, June 2003.

^v SUN CO; SUN OK.

2.1.6. A Energia Nuclear

Este tema tem vindo a ser referido ao longo do texto, sobretudo em contraste com a alternativa das Renováveis. Mas, alguns aspetos importantes, merecem ainda destaque, sobretudo sobre a Energia Nuclear de Fissão.

A contribuição do Nuclear para produção de Energia Elétrica no Mundo hoje, situa-se em torno de 10% (IAEA – *International Atomic Energy Agency*, PRIS 2019)²¹, com um parque de 443 reatores. Há muito reatores que estão a atingir o seu fim de vida e a ser encerrados e, alguns países como o Japão e, sobretudo, a Alemanha, decidiram abandonar a Energia Nuclear. Em 2019, começou a registar-se uma diminuição de capacidade total instalada. Algumas dezenas de reatores (54, em 2019) estão em construção. A IEA – *International Energy Agency*, nas suas previsões para o futuro, mantém o valor de ~10% para a contribuição do nuclear até 2050, o que corresponde a algum aumento da capacidade instalada (IEA – *World Energy Outlook*, 2022)²². Esta previsão, na opinião do autor, resulta, em boa parte, do próprio ADN da Agência na sua relação com a Energia Nuclear.

Serão muito grandes as dificuldades que terão de ser enfrentadas para este resultado. Há um conjunto de razões. Destacam-se:

- O enorme custo do nuclear, mesmo sem considerar os custos escondidos, por comparação com o das alternativas (*too expensive to matter?!*);
- A questão não resolvida do armazenamento dos resíduos;
- Os enormes custos de desmantelamento dos reatores que atingem o fim da sua vida (a esmagadora maioria dos existentes);
- A dependência tecnológica e a dependência de fornecimento de matéria-prima associada (urânio enriquecido^w);
- Uma opinião pública cada vez mais contrária ao nuclear;
- Um período longuíssimo entre a decisão e a entrada em funcionamento do reator (>10 anos, hoje mesmo, >15 anos, em vários casos muito recentes);

^w O Urânio U235 existe na natureza com teores abaixo de 1% (hoje, em média, 0,5%); ora, as tecnologias de fissão mais comuns, exigem um teor de U235 (urânio enriquecido) da ordem de 3,5%, um processamento que exige uma competência tecnológica própria e, hoje, praticado em apenas alguns países, que o fornecem aos demais.

– O facto de não aparecer como o mesmo carácter de indispensável como se pensava que seria, há alguns anos atrás, face à alternativa das Energias Renováveis, limpas, de muito mais baixo custo, e presentes em todo o lado, no mundo habitado de hoje.

No Anexo 3, apresenta-se uma discussão deste tema com maior detalhe (adaptada do livro “Jeremias e o Desenvolvimento Sustentável”, Manuel Collares-Pereira, ISBN 978 972 241978 9, Livros Horizonte, que integra o Plano Nacional de Leitura²³) incluindo uma abordagem às novas tecnologias que estão a ser propostas de reatores ditos de pequena dimensão (SMRs), em alternativa ou para resolver os problemas dos de maior dimensão.

O Anexo 3 também aborda o tema da fusão nuclear, tecnologia que ainda necessita de dezenas de anos de desenvolvimento, até eventualmente poder apresentar-se com propostas comerciais.

2.1.7. Combustíveis sintéticos, H₂

Uma vez mais estamos perante um tema muito vasto e cujos desenvolvimentos dão hoje os primeiros passos.

Para esta resenha de tecnologias e caminhos para o futuro, destacam-se duas vias importantes:

– A dos combustíveis sintéticos, com *input* de energia solar térmica (em desenvolvimento);

– O H₂, por via da eletrólise da água ou mesmo da sua termólise.

Um caminho para os primeiros é o da pirólise da biomassa, com um input térmico da queima da própria biomassa, mas, sobretudo, com energia solar térmica de concentração, com capacidade de produção das temperaturas (centenas de grau Celcius) necessárias, na ausência (total ou parcial) de oxigénio.

Um resultado é o chamado gás de síntese (CO+H₂) que pode ser usado diretamente ou transformado em combustíveis líquidos convencionais, hidrocarbonetos líquidos (processo Fisher-Tropsch).

O caminho para o segundo, o H_2 verde^{24,x}, percorre-se hoje pela via da eletrólise, recorrendo a eletricidade não fóssil, sobretudo a solar. O recurso dominante às renováveis justifica-se pelo custo mais baixo que proporcionam na produção de eletricidade.

O rendimento e o custo dos eletrolisadores são os fatores dominantes na futura economia do H_2 ^{25,y}.

Aos valores de hoje (custos de eletrolisador, energia, água, etc.) o H_2 verde situa-se entre 3 e 4 €/kg^{26,z}. Estima-se que alcance 1,5 €/kg, já em 2030, por evolução da tecnologia e custo dos eletrolisadores e pela redução do custo da energia (de 3 para 2 c€/kWh com o PV).

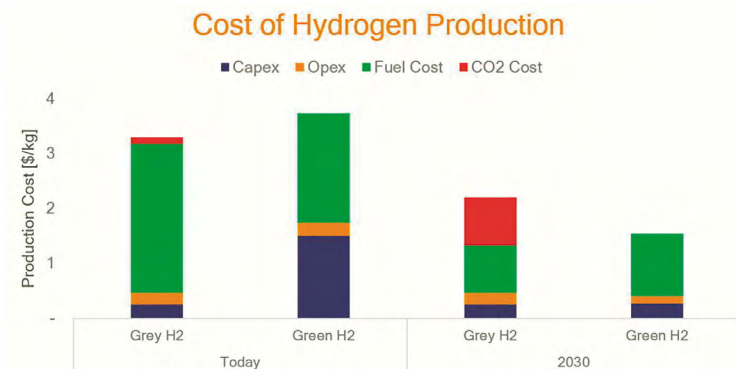


Figura 6. Custos de produção do H_2 (Harry Morgan²⁶).

A estes valores o H_2 adquire competitividade com o H_2 de base fóssil e com os combustíveis convencionais, para muitas aplicações, na indústria e nos transportes.

Enquanto se vão desenvolvendo aplicações, precursoras das utilizações futuras em escala muito superior, a tecnologia continuará a desenvolver-se, englobando também outros aspetos essenciais para a economia do H_2 verde: o seu transporte e armazenamento.

^x Green Hydrogen, a guide to policy making (IRENA-2020)

^y Green Hydrogen: reducing the cost needs scaling up of electrolyser plants March 15, 2021 (IRENA report) by Herib Blanco and Emanuele Taibi.

^z Harry Morgan, Why market dynamics will reduce the average price of green hydrogen to \$1.50/kg by 2030, Energy Transition, September 2022.

Um aspeto relevante é o facto de hoje não se usar ainda água do mar (ou águas salobras) para a electrólise referida acima.

O recurso a estas exige a dessalinização prévia, o que acrescenta ao custo do H_2 produzido. No entanto, já há investigação no sentido do recurso direto à água do mar^{27,aa}.

Quanto ao armazenamento do H_2 verde, faz-se sobretudo em tanques pressurizados (muitas centenas de bar). Mas há várias outras formas de armazenamento^{28,ab}, liquefeito, em mistura com outros gases, em sólidos (por exemplo, em hidretos metálicos) e em combinação química com outros elementos (como o Azoto, N) sob a forma de compostos como a amónia (NH_3). Esta última possibilidade é particularmente interessante, havendo muitas propostas nela baseadas^{29,ac}.

Uma nota mais sobre a produção de H_2 verde: a via da termólise da água (iluminação direta), na presença de catalisadores, pode fazer-se a temperaturas em torno de 800 °C, temperaturas perfeitamente alcançáveis por concentradores solares. Rendimentos > 5% (energia solar para H_2) já foram alcançados e está-se no caminho para valores na ordem de 20%^{30,ad}.

O H_2 verde prevê-se que vá desempenhar um papel importantíssimo na economia do futuro, na substituição dos combustíveis fósseis para a sua descarbonização.

Nota final: O ser verde depende 100% da energia eléctrica utilizada não ser de origem fóssil, nomeadamente de ser renovável! Não haverá dúvidas sobre isso se a electrólise for feita através de um sistema fotovoltaico ou eólico dedicado! Mas, se a energia vier da rede, enquanto a penetração das

^{aa} The Open Fuel Cells Journal, 2010, 3, 1-7 1 1875-9327/10 2010 Bentham Open Open Access Hydrogen Production Using Sea Water Electrolysis H.K. Abdel-Aal*, K.M. Zohdy and M. Abdel Kareem Higher Technological Institute, Tenth of Ramadan City, Egypt

^{ab} Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (DoE): Hydrogen Storage

^{ac} Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy A Study of Issues Related to the Use Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage U.S. Department of Energy

^{ad} Drop-in Fuels from Sunlight and Air - Remo Schäppi, David Rutz, Fabian Dähler, Alexander Muroyama, Philipp Haueter, Johan Lilliestam, Anthony Patt, Philipp Furler and Aldo Steinfeld, Nature, vol. 601: no. 7891, pp. 63-68, London: Nature, 2021.

renováveis não se aproximar de valores percentuais muito elevados, o balanço do H₂ para as emissões é muito diferente. Este é um tema sobre o qual há uma discussão grande no contexto da União Europeia, já que os proponentes do H₂ afirmam que, se não houver tolerância para a alimentação da eletrólise por fontes não renováveis (e também em períodos de ausência de fornecimento de energia renovável) a tecnologia do H₂ levará muito mais tempo a desenvolver-se^{31,ae}.

2.2. Os materiais e a descarbonização da economia

A evolução tecnológica permite encarar de uma outra forma a possibilidade de se promover a descarbonização da economia. Está associada ao recurso a novas práticas e procedimentos proporcionados pelo recurso a novos materiais, que têm uma relação completamente diferente com as questões da energia e do ambiente. O caso paradigmático é o da madeira no sector da construção.

2.2.1. A madeira e a sustentabilidade

A construção habitual, hoje, tem como base materiais como o cimento sob a forma de betão (juntando o aço ao cimento) e a alvenaria de tijolo ou de blocos de betão.

Estes materiais têm uma pegada positiva forte na produção de GEE — gases de efeito de estufa — aquando da sua produção e não são de todo sustentáveis.

As emissões associadas ao sector dos edifícios têm duas componentes³² que constituem ~40% da totalidade das emissões e estão repartidas entre ~28% para o seu funcionamento/operação e 11% para sua construção.

Considerando apenas a produção de cimento, esta é responsável por entre 8 e 9% das emissões totais de CO₂ a nível mundial³⁴. As razões são duas: um processo de fabrico energia intensivo e hoje ainda dependente dos

^{ae} Marta Lovisolo Keith Whiriskey, “Cannibalising the Energiewende? 27 Shades of Green Hydrogen,” Bellona Europa 2022 <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2021/06/Impact-Assessment-of-REDII-Delegated-Act-on-Electrolytic-Hydrogen-CO-2-Intensity.pdf>

combustíveis fósseis e um processo químico de fabrico do cimento que é, ele próprio, emissor/libertador de CO_2 .

Estes valores são suficientes para se pensar que é muito importante atuar por esta via para a redução das emissões. Na realidade a indústria do cimento está preocupada com esta questão e faz hoje um esforço sério para reduzir a sua pegada. Mas há uma alternativa poderosa que é a de considerar a construção sobretudo com madeira e outros materiais naturais (ex.: a cortiça, o bambu, resíduos, fibras, etc.). A razão é a de que o carbono constituinte da madeira é um produto direto do sequestro de CO_2 da atmosfera feito pelas árvores que a produzem, através do efeito da fotossíntese.

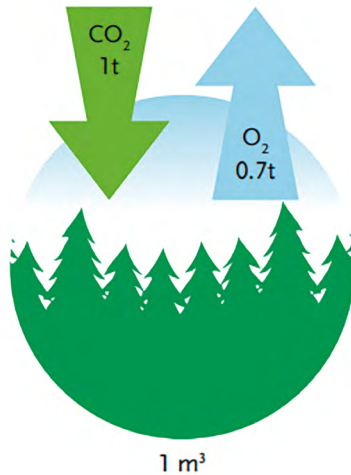


Figura 7. Incorporação (sequestro) de CO_2 em 1 m^3 de madeira².

Em média, por cada tonelada de madeira usada na construção em vez de outros materiais não naturais, há uma redução de emissões de CO_2 de ~2 toneladas³³.

Assim, a madeira tem sobre a atmosfera um efeito contrário ao da produção dos materiais convencionais. Falamos numa **pegada de carbono negativa**. É esta a grande vantagem do recurso a estes materiais naturais, poderosos na sua capacidade de combate direto às alterações climáticas².

No tema das vantagens ambientais devem apontar-se ainda outros aspetos muito positivos do uso da madeira. Em particular, o facto de a madeira proporcionar ao edifício um comportamento térmico excelente, quer em

termos das necessidades de arrefecimento, quer de aquecimento, por ser um isolante natural e facilmente combinável com outros isolantes naturais, como a fibra de celulose, a cortiça, etc., que têm a capacidade de reforçar, em muito, as suas características térmicas. Este facto, por sua vez, vai facilitar a sua combinação com soluções de arquitetura bioclimática, de suficiência e eficiência energética e junção de coletores solares fotovoltaicos e térmicos, para produção de edifícios NZEB – *Net Zero Energy Buildings*, uma ajuda brilhante para a transição energética e para o caminho do desenvolvimento sustentável. Tudo isto sem alterar, aliás mesmo a melhorar o conforto que se exige.

É claro que a utilização em larga escala da madeira que se prevê para o futuro, vai de mãos dadas com uma gestão da floresta, repondo cada árvore cortada, por outra ou outras, uma gestão que pode mesmo aumentar a capacidade de sequestro de CO₂ associada à floresta que seja simplesmente entregue a si própria. Por outro lado, esta valorização da floresta vai ser muito importante na redução de incêndios que ocorrem com maior incidência todos os anos (fruto das alterações climáticas).

2.2.2. Uma nova tecnologia da madeira



Figura 8. Edifício de 18 andares, na Noruega, inteiramente em madeira.

Nos próximos anos vamos assistir a uma revolução, com a utilização crescente da madeira e de outros materiais orgânicos no sector da construção, não só como mais um material presente nos edifícios convencionais ou em pequenas casas, pré-fabricadas, que hoje já nos são propostas, mas numa escala de verdadeira alternativa à construção tradicional, inclusive em edifícios de muitos andares³⁵.

Neste texto, quando se fala em madeira para a construção, não se está a pensar nas formas tradicionais da construção em madeira, com troncos de uma só peça, como em muitas situações tradicionais que nos são familiares. Está-se, sim, a pensar, entre outras, em componentes para a construção de edifícios que resultam de uma forte evolução tecnológica recente e que têm nomes como CLT, Woodframe, Glulam.

E o que são? Explicando um pouco:

– O CLT – *Cross Laminated Timber* (madeira lamelada cruzada), obtém-se sobrepondo camadas sucessivas de tábuas, com cada camada colada de forma ortogonal à da camada anterior, até se atingir a espessura desejada. Dependendo desta espessura, o conjunto terá uma determinada resistência, com um resultado perfeitamente equivalente ao de uma laje clássica fabricada em betão armado com entre 1/4 e 1/5 do seu peso;



Figura 9. Imagem de uma laje de CLT, em colocação no edifício.

- Uma componente *Woodframe*, é uma moldura de madeira enquadrando na sua espessura isolamento térmico (cortiça, fibras de celulose, etc.) com espaços para passagem de canalizações, cabos elétricos, etc.;

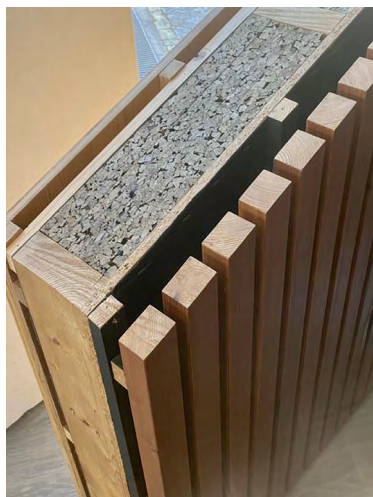


Figura 10. Imagem de um sistema *Woodframe*.

- Um Glulam (madeira lamelada colada) é feito de lâminas de madeira coladas umas às outras, para ser utilizado como vigas e pilares em sistemas porticados (ex.: cobertura do Pavilhão Atlântico no Parque das Nações, Lisboa), vãos, etc., com a orientação apropriada à da resistência pretendida.



Figura 11. Imagem de um Glulam (madeira lamelada colada).

A madeira que se utiliza é a que tipicamente existe por toda a Europa, como o abeto, o pinho, o eucalipto, entre outras, com um tipo de crescimento mais bem adaptado à gestão da floresta para este fim.

Estas componentes são produzidas em fábrica e permitem um outro tipo de evolução tecnológica que é o da **pré-fabricação**. Esta situação, por si só, permite reduzir de forma muito significativa os impactes ambientais associados à construção convencional, bem como os tempos de construção e um melhor controlo de qualidade construtiva.

A produção destas componentes^{af} pode fazer-se com o recurso a Energias Renováveis: ao processamento do tronco das árvores para a produção das tábuas, segue-se uma operação de secagem com consumo de energia térmica. Esta pode ser produzida pela queima dos desperdícios associados da matéria-prima. No resto do processamento utiliza-se energia elétrica que pode ser, por exemplo, de origem fotovoltaica na cobertura da instalação fabril.

A legislação da UE e de alguns países, já está a evoluir para impor e acelerar a transição para a madeira no sector da construção. Por exemplo, em França, em novos edifícios a partir de agora, tem de haver uma incorporação de pelo menos 50% de madeira. (Guide RE2020 – 49% de redução de emissões em todo o sector da construção, até 2030)⁵³.

Este tema da pegada carbónica dos edifícios é abordado de forma mais detalhada, no Anexo 4.

2.3. Reciclagem e a economia circular

(adaptado do livro "Jeremias e o Desenvolvimento Sustentável", Manuel Collares Pereira, Livros Horizonte, 2020)

A Reciclagem é um conceito chave do desenvolvimento sustentável. Por todo o lado se têm dado passos nesta matéria, como com a separação do

^{af} Em Portugal estão a ser dados passos importantes neste caminho. Entre outros, um grande promotor imobiliário, a Vanguard Properties, investe neste sector, tendo decidido concentrar toda a sua construção futura em edifícios de madeira e decidindo investir em toda a fileira, da floresta, à produção de componentes e à pré-fabricação (Kozowood Industries, SA, Esposende); a madeira a que recorrerá será de origem nacional, pinho produzido no continente e Criptoméria japónica vinda das ilhas dos Açores.

lixo, por exemplo. A reciclagem tem, em geral, uma poupança significativa de energia, a daquela que é necessária para transformar as matérias-primas de origem (por exemplo, o minério bauxite no caso da produção de Alumínio) no produto final que usamos. Ora, se, em vez de iniciar o processo com a matéria-prima de origem, podermos reciclar e começar a partir do produto reciclado, poupamos muita energia. Alguns valores são: 40 a 60% reciclando papel para produzir papel, 25% se for cartão, 10-15% no caso do vidro, 70% no caso do ferro e do aço, e 94% se reciclarmos as “latas” de cerveja, coca-cola, etc., para fazer outras a partir daquelas...”.

Qualquer poupança de energia vai traduzir-se por menos combustíveis fósseis a serem queimados, logo, menos CO₂, menos efeito de estufa, menos alterações climáticas.

Este é o tipo de raciocínio está por detrás da muito falada economia circular. E não é só pelas questões da energia e do seu impacte climático, mas por muitas outras razões. Muitos dos próprios recursos, como já dissemos, são finitos e faz sentido tentar gastá-los mais devagar. E, ao mesmo tempo, contribuir para resolver a questão da acumulação de lixo! Mas o termo circular não é um termo preciso. Não é possível dar a volta completa e chegar ao mesmo ponto de partida. Há uma realidade que a física nos ensina: há sempre perdas no processo, chama-se irreversibilidade. É a segunda lei da termodinâmica... No limite nunca teremos um círculo (regresso ao mesmo ponto) mas mais algo como uma espiral. Talvez ficasse assim um conceito menos intuitivo, mais complicado e a imagem do circular é o que se tem adoptado.

Uma abordagem mais completa ao tema da economia circular^{ag,51} passa pela consideração dos três “R”, reduzir, reutilizar, reciclar, por esta ordem de importância. A ideia é a de que a primeira e principal atuação é a de reduzir consumos, não utilizar, se possível. Depois vem o conceito de não “deitar fora”, não descartar o que pode ser ainda utilizado e, por fim, a reciclagem propriamente dita. Um exemplo complexo é o dos plásticos, com

^{ag} The circular economy, Scientific American, January 2023.

impactes enormes sobre o ambiente, cadeia alimentar, etc., mesmo quando hoje se fala de poderem ser produzidos a partir de fontes bio (em vez de fontes fósseis) com algum grau de degradabilidade, a sua acumulação previsível e pernicioso, é de tal forma grande, que os três “R” têm de ser determinantes na abordagem a seguir. Outro exemplo, muito importante, é o das componentes eletrônicas da enorme e crescente profusão de equipamentos que nos rodeiam, a causarem múltiplos impactes, da extração dos metais que as integram, ao ambiente impactado pela sua presença descontrolada e à saúde pública, sobretudo dos países para onde alguma atividade de reciclagem é destinada, feita em condições de verdadeira exploração abusiva de mão de obra, em processos manuais, de baixa tecnologia.

Há outros recursos que, sendo renováveis, também devem ser conservados e reciclados, quando possível. Por exemplo, a água doce. Por razões do clima, já escasseia em muitos locais... noutros, ainda habituados a ter água em abundância ou suficiência, as alterações climáticas vão trazer uma situação de mingua crescente... Será necessário saber lidar com isso e procurar poupar e reutilizar o mais possível. Por exemplo, a gestão da água na agricultura ou a construção de casas com a preocupação da reutilização da água: águas de banhos, podem ser reutilizadas nas descargas da sanita, o conceito das águas cinzentas... Mas o tema água não é o que se está a tratar neste contexto.

Em resumo: a reciclagem é importante, mas não pode ser vista como uma solução única. Tem de estar precedida de um forte antídoto à sociedade do consumismo desenfreado, “do usa e deita fora!” em que nos habituámos a viver. Temos de pensar cada vez mais em novas formas de nos comportarmos, de reduzir consumos.

Devemos pensar ^{36,ah} em caminhar para um contexto de desenvolvimento que acabe por conduzir a uma tendência inversa à atual,

^{ah} Manuel Collares Pereira “Energia e Ambiente num Mundo com muita Gente” – capítulo do livro “Despertar para a Ciência, Novos Ciclos de Conferências”, Gulbenkian Foundation, GRADIVA, Lisboa, dezembro 2007.

“desglobalizando” a própria economia em termos materiais, vivendo mais, sobretudo, do que temos à nossa volta, reduzindo e mesmo eliminando o desperdício, deixando a globalização para outras realidades como a do conhecimento, da cultura, do virtual na transmissão de informação e das comunicações...

2.4. Entretanto: a mudança de comportamentos, o caminho para o futuro

Afinal, toda a energia que é utilizada, tem os cidadãos consumidores no fim da linha. Este consumo, i.e., os cidadãos, são, por esta razão, parte do problema. Pode e devem, desde já, fazer parte da solução, sem estar à espera que evolução tecnológica e a adoção das políticas energéticas referidas acima, resolvam, por si, todo o problema.

Algumas das possibilidades ao alcance imediato dos cidadãos são apresentadas de seguida. Muitas nem sequer exigem grandes investimentos. Correspondem a simples mudança de atitude e de hábitos nocivos.

A) Oportunidades de baixo custo:

1. Deixar de cozinhar com o fogão gás. Custa o mesmo (ou até menos) cozinhar com placa elétrica;
2. Substituir o velho esquentador a gás por um cilindro elétrico ou por uma bomba de calor;
3. Substituir os velhos eletrodomésticos por novos, no mínimo classe A;
4. Melhorar as janelas, passando a usar vidros duplos;
5. Isolar a cobertura da casa, isolando o forro do telhado, por exemplo;
6. Quando há um aquecimento central (ar condicionado), regular o termostato para um ou dois graus Celcius menos; não se notará grande diferença, e, também, deve evitar-se aquecer a casa toda, só as divisões onde se está habitualmente;
7. Iluminar a casa com lâmpadas mais eficientes e não deixar tudo ligado, nas divisões da casa onde que não se ocupam e quando se sai de casa;
8. Recorrer o mais possível a transportes públicos e andar a pé ou em veículos de duas rodas;
9. Reduzir o uso do veículo (gasolina ou diesel) ao que é mesmo necessário; **conduzir mais devagar e evitar os arranques bruscos**, por

exemplo, e não deixar o motor ligado quando se para momentaneamente. Aliás tudo isto são excelentes formas de encaixar, com vantagem, as permanentes subidas dos preços dos combustíveis...

10. Ir para o estrangeiro em turismo? É melhor viajar antes dentro do país, vendo primeiro o que está perto e que ainda não conhece;

11. Evitar os cruzeiros marítimos em cidades flutuantes que constituem um desastre energético e ambiental;

12. Recusar o consumo pelo consumo, p. ex.: fazer durar mais o guarda-roupa, não o renovando todos os anos, e/ou recorrendo a roupa em segunda mão e bom estado;

13. Procurar uma alimentação à base de produtos produzidos mais perto de nós (sim, carne e peixe nacionais, por exemplo) e também dos verdes e fruta de estação, em vez de se comer, todo o ano, as mesmas coisas, que terão de chegar vindas do outro lado do mundo... com produção desnecessária de emissões de gases de efeito de estufa;

14. Ter em atenção a redução de todo o desperdício, a separação dos lixos, as medidas de poupança de água, etc.

B) Oportunidades a exigir uma maior mobilização de meios:

1. Substituir a sua caldeira a gás, por uma bomba de calor que dará calor no Inverno e frio no Verão; o custo energético será muito mais baixo do que tem hoje e o conforto acrescido, e fornecerá água quente sanitária;

2. Investir na produção da energia elétrica própria — autoconsumo — com painéis solares fotovoltaicos. Recorrer ao conceito de Comunidades Energéticas, cooperativas de produção e autoconsumo. Recorrer também a coletores solares térmicos para a produção de águas quentes sanitárias. Com investimento próprio e, em ambos os casos, o tempo de recuperação do investimento é de poucos anos, pela energia que deixa de se ter de comprar. E os painéis/coletores solares duram mais de 20 anos. É muito, muito melhor, do que ter o dinheiro parado no banco ou em investimentos tradicionais;

3. Fazer, logo que possível, a transição para o veículo elétrico. Em Portugal, 60% da eletricidade já é de origem renovável (e o plano do Governo é o de chegar a 80%, em 2026);

4. Se pensar em construir uma nova casa ou em remodelar substancialmente a atual, pense nas soluções solares passivas, associadas à boa orientação da mesma, à ventilação natural, aos ganhos solares (úteis de Inverno, a evitar no Verão)...

5. Na escolha dos materiais a utilizar, pensar que não são todos iguais, há materiais com um ciclo de vida muito mais sustentável do que outros. Pense, por exemplo, numa casa em madeira, em vez de recorrer à construção convencional!

Em resumo:

Estes são alguns dos passos importantes para o combate às alterações climáticas e que só dependem de cada cidadão. E não estão associados a menos conforto ou a severas limitações da qualidade de vida habitual de cada um. Pelo contrário: esta aumentará e haverá mais conforto e menos gastos. E uma consciência tranquila por se estar a fazer o que se deve fazer!

Esta nova atitude será também uma forma de dizer à juventude de hoje, que já começa a padecer do que se designa por “ansiedade climática”, que é ainda possível transitar para um Mundo Sustentável, mais justo e inclusivo e muito, muito melhor.

3. EM CONCLUSÃO

Os documentos de política energética a que se foram aludindo, traçam inúmeros caminhos para se alcançarem os objetivos da neutralidade carbónica em 2050 e 1,5 °C apenas, no fim do século.

Este escrito foi produzido com a intenção de mostrar que já há tecnologia, hoje, que permite alcançá-los. E que muito mais desenvolvimento tecnológico está a acontecer para melhorar e ajudar a concretizar a capacidade de resposta.

Está então resolvido? Vamos conseguir?

Seria possível, mas não está a acontecer como seria necessário.

A transição energética que terá de acontecer (é um imperativo de sobrevivência para a Humanidade tal como a conhecemos) tem um sentido claro

de urgência^{52,ai}. Contudo, o seu acontecimento está também profundamente dependente dos cidadãos, consumidores, da sua cultura e do seu comportamento), nomeadamente também em relação à política e aos políticos que elege.

Este problema deve ser contemplado também à luz de um tema que não foi ainda explicitamente abordado, o da segurança de abastecimento de energia (*Energy Security*) (ver Anexo 5).

Portugal está num caminho correto, traçado em documentos como o PNEC e RNC.

Ainda existem muitos obstáculos, legislação contraditória (experimente-se colocar um painel fotovoltaico num edifício com cobertura de telha...!?) (e se tiver algum carácter histórico ainda é mais difícil, mesmo quando não se vê o telhado de lado nenhum?!), decisões e hesitações incompreensíveis (quando acabamos com a visita de gigantes de cruzeiro a Lisboa, verdadeiros desastres ecológicos flutuantes?) e um controlo fraco ou nulo sobre o que se vai passando...

Por outro lado, no nosso país, e a nível mundial, falta uma verdadeira capacidade para se contrariar os interesses instituídos, quer os que estão por detrás dos combustíveis fósseis e de outras formas de energia, quer os representantes do capitalismo selvagem da sociedade de consumo sem limites, que tratam por todos os meios travar a transição e até negar a sua necessidade.

Quando seremos capazes de encarar os tão propalados custos trilionários da transição energética, não **como custos** (propaganda!), mas **como investimentos**, com rentabilidade assegurada, geradores de uma nova economia, capaz de fazer aparecer um número enorme de novos agentes, aliás,

^{ai} Desenvolvimento Sustentável, Verdade e Consequências, Manuel Collares Pereira, coordenador e apresentador, Prefácio de Viriato Soromenho Marques, autores: Alfredo M. Pereira, Cristina Conceição, Elsa Lamy, Fernando Capela e Silva, João Manuel Bernardo, José M. Belbute, José Manuel Martins, Manuel Collares Pereira, Manuel Vilhena, Margarida Simões, Maria Ilheú, Maria Raquel Lucas, Mariana Valente, Miguel Rocha de Sousa, Editora DOCUMENTA 2022, ISBN: 978-989-8833-86-0.

com consequências muito interessantes sobre a própria capacidade de democratização do sector da energia?

E quando seremos capazes de perceber que o caminho da transição energética terá consequências espantosas sobre a qualidade de vida coletiva, com melhor ar para respirar e mais conforto, benefícios que a abordagem tradicional não nos proporciona de todo ou só a alguns e a grande custo?

Mas, o que não está certamente nos planos dos documentos referidos e que contêm as melhores escolhas e intenções da política ambiental e energética em evolução, são os acontecimentos incontroláveis e de consequências imprevisíveis, como o da invasão da Ucrânia pela Rússia. Consequências tremendas sobre a economia, mas, também e diretas, sobre as questões da energia e do ambiente.

Isto é, assim não há bons planos que resistam! A dependência que a Europa tem do gás, do petróleo e também do urânio enriquecido russos (um facto que passado ao lado do público!), têm levado a uma reação menos firme e mais hesitante da União Europeia e a única consequência positiva, até agora, é a decisão da UE em apressar a transição para as Energias Renováveis. Outras consequências, como a de ressuscitar o nuclear onde já se tinha decidido acabar com ele (Alemanha), ou de reforçar o recurso ao carvão em vez de se iniciar já a sua regressão (Polónia), são retrocessos que agravam a situação dramática em que já nos encontramos.

A nossa política energética portuguesa mostrou-se eficaz no controlo dos custos de produção de eletricidade e outros, com os cerca de 60% de peso das renováveis que já temos e uma escassa, ou mesmo nula, dependência do gás e petróleo russos (Eurostat).

Mas contrariar todo o *greenwashing* a que vamos assistindo e os esforços poderosos dos interesses instituídos, esforços financiados por muito dinheiro investido a suportá-los, é muito difícil. Exige muita coragem e firmeza política, que não está ainda bem presente.

As Nações Unidas e o seu secretário-geral, António Guterres, fazem o discurso certo todos os dias. Propõem medidas à escala global que seriam muito eficazes se fossem implementadas. Como, por exemplo, acabar de

imediatamente com os subsídios enormes, diretos e indiretos, de que beneficiam os combustíveis fósseis e acabar com a prospeção de petróleo e de gás, já que as reservas conhecidas e o petróleo já produzido, permitem satisfazer as necessidades por mais anos do que aqueles que queremos. O fim dos subsídios e qualquer nova prospeção banida, ajudariam muito a concretizar os objetivos.

Greta Thunberg e os jovens que a emulam, mesmo quando alguns, por vezes, não pareçam entender, a fundo, as implicações e as consequências do que reivindicam têm razão no que pretendem: um Mundo futuro, onde todos possam viver melhor e que não se alcançará, de todo, com o “business as usual”. E o Mundo do futuro é, será o deles!

REFERÊNCIAS

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
2. We Tasted The World’s First Cultivated Steak, No Cows Required, TIME, Aryn Baker/Rehovot Israel, November, 2022.
3. In 2022, nuclear power’s future looks grimmer than ever, Renew Economy, Jim Green, 11 January, 2022,77.
4. by Marcelo Azevedo, Magdalena Baczyńska, Ken Hoffman, and Aleksandra Krauze, Metals & Mining Practice Lithium mining: How new production technologies could fuel the global EV revolution April 2022 Xenia/Getty Images Lithium is the driving force behind electric vehicles, but will supply keep pace with demand? New technologies and sources of supply can fill the gap. (McKinsey & Company)
5. “Aluminium, sulphur and salt batteries. Cheaper than lithium-ion, for homes and EV charging stations” September 7, 2022 by David Chandler.
6. Projecto PVCROPS – Instalação e ensaio de uma bateria de fluxo Vanadio Redox, Building Integrated PV, Projecto financiado pela União Europeia com a participação da Universidade de Évora.
7. M. Collares-Pereira, D. Canavarro, L.L. Guerreiro, Linear Fresnel reflector (LFR) plants using superheated steam, molten salts, and other heat transfer fluids, Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology, ISBN: 978-0-08-100516-3, Pages 339-352, 2017.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00015-0>

8. IEA Wind Energy, September 2022.
9. IEA Solar PV, 2021.
10. IEA-Net Zero Scenario, 2022.
11. Decreto-Lei 15/2022.
12. D. Canavarro, J. Chaves, M. Collares-Pereira, Improved design for linear Fresnel reflector systems, *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, ISBN: 978-0-08-100516-3, Pages 45–55, 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00003-4>.
13. NREL PV FAQs, 2004.
14. NREL EricK Lantz.
15. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022 – Rare Earths.
16. Manuel Collares Pereira, “Energias Renováveis: a opção inadiável”. Editor SPES (1998).ISBN: 9729585431.
17. Energy, Renewable Energy Directive 2108/2001.
18. Report, The use of woody biomass for energy production in the EU, Maio 2020.
19. European Environmental Agency, 2017. Transporte: emissões de CO2 na EU.
20. M. Collares Pereira, J.P. Almeida, J. Correia de Oliveira “ Description and testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics” ISES Solar World Congress, Goteborg, June, 2003.
21. IAEA – International Atomic Energy Agency, PRIS 2019.
22. IEA World Energy Outlook, 2022.
23. M. Collares Pereira “Jeremias e o Desenvolvimento Sustentável”, Livros Horizonte 2020, ISBN:978 972 241978 9.
24. Green Hydrogen, a guide to policy making (IRENA-2020).
25. Herib Banco, Emanuele Taibi, Green Hydrogen: reducing the cost needs scaling up of electrolyser plants March 15, 2021(IRENA report).
26. Harry Morgan, Why market dynamics will reduce the average price of green hydrogen to \$1.50/kg by 2030, *Energy Transition*, September 2022.
27. H.K. Abdel-Aal* K.M. Zohdy and M. Abdel Kareem, Hydrogen Production Using Sea Water Electrolysis *The Open Fuel Cells Journal*, 2010, 3, 1-7 1 1875-9327/10 2010 Bentham Open Open Access, Higher Technological Institute, Tenth of Ramadan City, Egypt.
28. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (DoE): Hydrogen Storage.
29. Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy A Study of Issues Related to the Use Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage, Report, U.S. Department of Energy.

30. Remo Schächpi, David Rutz, Fabian Dähler, Alexander Muroyama, Philipp Haueter, Johan Lilliestam, Anthony Patt, Philipp Furler and Aldo Steinfeld, Drop-in Fuels from Sunlight and Air, *Nature*, vol. 601: no. 7891, pp. 63-68, London: Nature, 2021.
31. Marta Lovisolo Keith Whiriskey, “Cannibalising the Energiewende? 27 Shades of Green Hydrogen,” *Bellona Europa* 2022 <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2021/06/Impact-Assessment-of-REDII-Delegated-Act-on-Electrolytic-Hydrogen-CO2-Intensity.pdf>.
32. Global Status Report, 2018, EIA
33. Elias Hurmekoski E., “How can wood construction reduce environmental degradation?”, 2017, ISBN 978-952-5980-33-2 (printed).
34. Wikipedia – Environmental impact of concrete.
35. Jorge M. Branco, Casas de madeira. Da tradição aos novos desafios ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães – Seminário Casas de Madeira.
36. Manuel Collares Pereira “Energia e Ambiente num Mundo com muita Gente” – Chapter of publication “Despertar para a Ciência, Novos Ciclos de Conferências”, Gulbenkian Foundation, GRADIVA, Lisbon, December 2007.
37. Filipe Duarte Santos, “O Sector dos Transportes na Descarbonização da Economia de Portugal”. Artigo de Opinião, Novembro de 2019.
38. Woodhouse, Michael. Brittany Smith, Ashwin Ramdas, and Robert Margolis. 2019. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72134.pdf>.
39. Wikipedia Hinkley Point; Wikipedia .Flamanville (FR).
40. Manuel Collares Pereira, Capítulo do livro “Almaraz e outras coisas más” Coordenação de António Eloy ISBN978 989 98835-5-0 Cooperativa Editorial Caldense, Dezembro 2017.
41. Fthenakis – 2007.
42. Linda Perez Gunter, No use in the climate crisis, *Beyond Nuclear International*, Nov. 27, 2022.
43. Small Modular Reactors cost overruns: the same problems haunt new nuclear in Utah, David Schlissel, Nov. 25, 2022 (IEEFA).
44. Stanford-led research finds smaller modular reactors will exacerbate challenges of highly radioactive nuclear waste, *Stanford News*, Mark Shwartz, May 30, 2022.

45. David Kramer “National Ignition Facility surpasses long-awaited fusion milestone” *Physics Today*, December 2022.
46. Isabelle Bouboulon, *Soleil trompeur, ITER ou le fantasme de l’énergie illimitée*.
47. Celia Izoard, *Enquête en 3 volets – (Reporterre)_18 juin 2021*. https://reporterre.net/spip.php?page=memeauteur&id_origine=23062.
48. David Chandler, *New superconducting magnet breaks magnetic field strength records, paving the way for practical, commercial, carbon-free power*. MIT-News, MIT – designed project achieves major advance toward fusion energy, MIT News Office, September, 2021.
49. <https://www.scientificamerican.com/article/fusions-false-dawn/> (2010).
50. Eduardo J.C. Martinho, Jaime M. da Costa Oliveira *Reactores nucleares de Cisão o que são e como funcionam*, LNETI, Instituto da Energia, 1980.
51. elements.visualcapitalist.com, Nicholas Lapan, *Rare Earth Elements: Where in the World Are They?* 2021.
52. *The circular economy*, *Scientific American*, January, 2023.
53. *Desenvolvimento Sustentável, Verdade e Consequências*, Manuel Collares Pereira, coordenador e apresentador, Prefacio de Viriato Soromenho Marques, autores: Alfredo M. Pereira, Cristina Conceição, Elsa Lamy, Fernando Capela e Silva, João Manuel Bernardo, José M. Belbute, José Manuel Martins, Manuel Collares Pereira, Manuel Vilhena, Margarida Simões, Maria Ilhéu, Maria Raquel Lucas, Mariana Valente, Miguel Rocha de Sousa, Editora DOCUMENTA 2022, ISBN: 978-989-8833-86-0.
53. *Guide RE2020*.

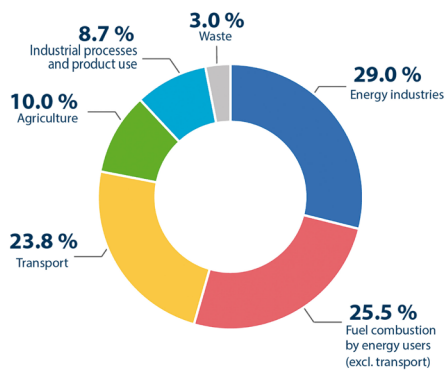
ANEXO 1

Gases de Efeito de Estufa.

Os três principais gases de efeito de estufa (GEE) com emissão antropogénica, são o CO_2 , CH_4 e N_2O , que têm vindo a aumentar³⁷ — Filipe Duarte Santos “O Sector dos Transportes na Descarbonização da Economia de Portugal” Artigo de Opinião, novembro de 2019] na atmosfera de forma significativa, respetivamente 46%, 254% e 21% em relação aos valores pré-industriais (séc. XVIII).

Seguindo ainda a apresentação referenciada³⁷, as principais atividades humanas que contribuem para a sua acumulação na atmosfera podem ser classificadas nas grandes áreas da energia, transporte, agricultura, processos industriais e resíduos. A Figura 1 mostra o peso relativo¹⁹ (*European Environmental Agency, 2017*) das diversas fontes, na emissão dos gases efeito de estufa.

Share of EU greenhouse gas emission by source, 2017



Energy industries: Emissions from fuel combustion and to a certain extent fugitive emissions from energy industries, for example in public electricity, heat production and petroleum refining.

Fuel combustion by users (incl. transport): Emissions from fuel combustion by manufacturing industries and construction and small scale fuel combustion, for example, space heating and hot water production for households, commercial buildings, agriculture and forestry.

Transport: Emissions from fuel combustion of domestic and international aviation, road transport, railways and domestic navigation.

Agriculture: This includes among others emissions from livestock enteric fermentation – greenhouse gases that are produced when animals digest their food, emissions from manure management and emissions from agricultural soils.

Industrial processes: Emissions occurring from chemical reactions during the production of e.g. cement, glass etc.

Waste: Emissions from landfills, wastewater treatment and composting among others.

Data including international aviation, excluding indirect CO₂ emissions and land use, land use change and forestry.

Source: European Environment Agency

Figura 1. Fontes de emissão de gases de efeito de estufa na UE (GEE), em 2017.

Em Portugal, e segundo os dados do Portal do Estado do Ambiente (REA), o sector dos transportes contribuiu, em 2017, com 24,3% do total de

78 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e). Esta unidade traduz a quantidade de CO₂ que produziria o mesmo efeito que produz a mistura de GEE que realmente existe. Define-se o que se chama GWP – *Global Warming Potential* (um índice de “forçamento” radiativo). Tomando o CO₂ como referência (1 unidade de GWP) o GWP do metano (CH₄) é 25 e o do Óxido Nitroso (N₂O) é de 298.

Em termos físicos a presença de CO₂ na atmosfera mede-se em ppm (partes por milhão) e tem hoje um valor de 415 ppm. A de CH₄ mede-se em ppb (partes por bilião) com um valor, em 2017, da ordem de 1800 ppb. A de N₂O mede-se em ppb com um valor da ordem de 270 ppb, em 2017.

Em 2017, na UE, as emissões totais rondaram as 4000 Mt de CO₂e, das quais ~3250Mt de CO₂e foram de CO₂, ~400 Mt de CO₂e foram de CH₄ e ~200 Mt CO₂e foram de N₂O.

ANEXO 2

Comparação do custo de produção de eletricidade por via nuclear e por via de fontes renováveis, em particular o fotovoltaico (PV).

Centrais fotovoltaicas já foram leiloadas em Portugal abaixo de 1,4 cêntimos de euro/kWh (14 euro/MWh), um valor muito baixo, provavelmente não refletindo apenas o próprio custo baixo do fotovoltaico hoje, mas também outras questões como a valorização da atribuição de um ponto de acesso à rede.

Contudo, é seguro dizer que, mesmo incluindo muitos outros sítios no mundo, estamos definitivamente a valores entre 20 e 30 euro/MWh para o PV, estabelecendo um custo de produção de energia fixo, pelo menos por 25 anos^{38,aj}.

Quanto ao custo de investimento propriamente dito, e para a produção centralizada, pode ser tão baixo hoje quanto entre 0,3 e 0,4Meuro/MWp em grandes centrais.

Na produção descentralizada praticam-se custos hoje entre 0,7 e 1,0 euro/Wp em sistemas de dimensão intermédia e talvez mais 20% a 30% em sistemas de pequena dimensão (instalação individual no sector doméstico).

Estes valores são hoje os mais baixos para novos investimentos em comparação com os de qualquer outra forma de energia.

A Energia Nuclear apresenta valores completamente diferentes, que a situam num patamar de custos que é o mais alto de todos. Nunca foi barata (*too cheap to meter*, como se dizia nos anos 60) e só se desenvolveu à custa de grandes subsídios, como é habitual para uma tecnologia emergente

^{aj} Michael Woodhouse, Brittany Smith, Ashwin Ramdas and Robert Margolis, 2019. Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72134.pdf>.

(como aconteceu, por exemplo, nos EUA e em França). Contudo, esta ideia contribuiu de forma significativa para a criação do mito do baixo custo da Energia Nuclear.

A indústria nuclear apresenta o investimento numa nova central do tipo EPR entre 3 e 4 Meuro/MWp (mesmo assim, e à partida, 10 vezes mais que o fotovoltaico); contudo, na prática, os valores finais de reatores em construção são muito mais elevados: entre 5 a 6 vezes superiores, i.e., situando-se acima de 120 a 150 Meuro/MWp (i.e., mais de 50 vezes os do fotovoltaico) (ver Anexo 3).

No quadro abaixo resumimos estes valores.

Quadro 1. Quadro comparativo de valores de investimento (Nuclear e Fotovoltaico): reatores em construção.

Nuclear	Oferta inicial (investimento) (Meuro/MW)	Valor atual (investimento) (Meuro/MW)	Tempo entre decisão e fornecimento de energia (anos)	Custo de produção da energia (Euro/MWh)
Hikley Point (UK)	2.3	> 13	10-15	127
Flammanville (FR)	2.0	> 18	10-15	----
Vogtle (US)				----
PV				
Centralizado	0.3-0.4	0.3-0.4	1-2	14-30
Descentralizado	0.7-1.0	0.7-1.0	<1	

É o caso dos EPR em Flammanville (França) ou do de Hickley Point (RU). Os valores para os reatores em Vogtle (EUA) são igualmente elevados (Jim Green, In 2022, nuclear power's future looks grimmer than ever, *Renew Economy* Jan. 2022, 77)³; Wikipedia: Hynkley Point; Wikipedia: Flamanville (FR)³⁹.

Estes valores não incluem, não refletem, uma série de outros custos, como os de desmantelamento da central no fim da sua vida, do armazenamento de todos os resíduos radioativos, de toda a fileira da mineração ao processamento do combustível, dos seguros contra acidentes (que, aliás, só cobrem uma parte muito pequena das consequências de grandes acidentes), etc. Quem pagará estes custos? Certamente os consumidores, possivelmente

dentro e fora da tarifa elétrica, por decisão política, claro.

Isto é, o custo da energia nuclear é esmagadoramente superior ao das energias renováveis. É, aliás, por isso, que tem havido muito pouco investimento recente no sector... e que muitos países decidiram abandonar o nuclear.

Quanto à energia produzida, os contratos aparecem com valores mínimos garantidos para a venda da energia à rede (ver, por exemplo, os ~127 euro/MWh exigidos em Hyckley Point, RU), garantidos por muitos anos, para poderem ter um mínimo de rentabilidade, não contando a quantidade de subsídios e outros apoios de que beneficiam.

É caso para se dizer que a Energia Nuclear é mesmo *too expensive to matter*.

ANEXO 3

A energia nuclear: uma opção ultrapassada!?

Na sequência abordam-se alguns aspetos mais relevantes da Energia Nuclear, fissão (ou cisão)⁵⁰ e fusão, para efeitos da análise feita neste documento.

3.1. Fissão (cisão) Nuclear

A ideia da energia nuclear (fissão nuclear) estimula a nossa imaginação e expectativas. Mas, à medida que se estuda o tema, surgem aspetos preocupantes em torno das questões do custo, da segurança das centrais, da gestão dos resíduos nucleares e outros, a temperar o entusiasmo...

O princípio: um átomo de Urânio (U_{235}), i.e., com um núcleo em que o número de prótons e neutrões é 235, absorve mais um neutrão de baixa energia (dito lento) que vem contra ele, e passa a ser U_{236} ... um outro isótopo de urânio. Este novo isótopo não é estável e vai cindir-se ou fissionar-se, i.e., partir-se em dois outros átomos que constituem um par, que se batiza genericamente de par (X, Y) — já que podem existir várias pares possíveis — e emitir mais neutrões. Se se colocar o isótopo inicial no prato de uma balança e, no outro, o par (X,Y) que resultou da cisão (e outros neutrões que também se libertam), verificar-se-á que a massa inicial do isótopo de Urânio é maior que a soma de todas as outras massas que resultam da cisão! A diferença de massa entre os dois pratos, pequeníssima que é, aparece agora transformada em energia (é a velha fórmula de Einstein da transformação de massa em energia)^{ak}. Essa é a energia nuclear de fissão ou cisão.

Para produzir eletricidade recorre-se ao princípio de funcionamento das centrais termoelétricas. O calor associado permite produzir vapor e este passa na turbina que faz girar o gerador.

^{ak} $E=mc^2$ (nota do autor).

Algumas dificuldades surgem de imediato: os neutrões que se produzem, se não forem devidamente controlados, vão encontrar outros átomos de U_{235} e produzir mais cisão e mais energia e novos neutrões, numa reação dita em cadeia, que pode levar, em caso de descontrolo total, a uma enorme explosão. É assim que funcionam as bombas atómicas. Felizmente que existem formas de controlar o processo para que a produção de energia seja a que necessitamos, apenas na central termoelétrica.

É importante que o processo se mantenha controlado para não ser perigoso e há várias formas de o fazer.

A tecnologia foi-se desenvolvendo ao longo dos últimos 70 anos, tendo-se iniciado de forma altamente subsidiada, com a promessa de que seria uma forma de energia barata e inesgotável (*too cheap to meter!*), o que nunca aconteceu.

Ora, verifica-se hoje, que: 1) a energia nuclear^{40,al}, que agora é comercial (i.e., a que se propõe no mercado), não é “inesgotável”, está baseada no isótopo de Urânio (U_{235})^{am}, que é muito pouco abundante na natureza (Atlas de l’Uranium, janeiro 2022 e IEA – World Energy Outlook, 2006), o que a torna uma solução insustentável, pois depende de um recurso com escassas dezenas de anos de duração e, ainda menos, se fosse alargada, como se propõe, a sua utilização, e 2) por outro lado, fazer uma nova central, a valores de hoje, é a forma mais cara de produzir eletricidade^{an} (ver Anexo 2) sem contar com o facto que não haver nenhuma solução comercial para a disposição dos resíduos radioativos em fim de vida da central, nem para o desmantelamento destas, algo que se estima poder custar tanto quanto construí-las de raiz...

A realidade deste “novo” custo, está a agora a chegar aos contribuintes de países como os do Reino Unido ou da Espanha. A indústria nuclear

^{al} Ver, por exemplo, Manuel Collares Pereira, Capítulo do livro “Almaraz e outras coisas más”. Coordenação de António Eloy, Cooperativa Editorial Caldense, dezembro 2017. ISBN: 978 989 98835-5-0.

^{am} U_{235} com uma abundância média da ordem de 0,5% em relação à do isótopo U_{238} , o mais abundante.

^{an} Ver os valores do último contrato da AREVA (francesa) para a central que contratou para ser construída no Reino Unido.

sempre afirmou que teria dinheiro para cobri-lo, mas, agora, verifica-se que isso não é verdade e será o contribuinte a ter de pagar. Por outras palavras, a Energia Nuclear nunca foi intrinsecamente barata^{ao}. Toda a que se produz nas centrais a funcionar hoje, de início foi subsidiada e, no fim da sua vida, terá de o ser fortemente, também. Sem falar ainda do perigo e do custo que está associado aos grandes acidentes...

Fukushima, Three Miles Island, Chernobyl e as consequências dos seus terríveis acidentes, geram custos elevadíssimos que não fazem parte dos custos da operação normal das centrais, nem estão cobertos pelos seguros que possuem! Estão também na base de uma reação forte contra a Energia Nuclear, por todo o mundo.

É legítimo perguntar porque se continua então a considerar o nuclear como uma verdadeira alternativa. Algumas razões são: i) porque foram investidas quantias enormes no seu desenvolvimento e se criaram grandes grupos de interesses ao seu redor, ii) porque esses interesses vão ter dificuldade em dar-se por vencidos por alternativas muito mais baratas, limpas e benignas, que, entretanto, apareceram, iii) porque, e sobretudo, esta indústria está ligada a outra, mortal, a das armas nucleares e os governos que as fabricam e detêm, não abdicarão delas facilmente (um eufemismo).

Mesmo em Portugal, há ainda quem insista em propor esta tecnologia para o nosso país... A opinião do autor, alicerçada em tudo o que ficou explicado acima, é a de que, embora se esteja a lidar com uma solução de grande elegância e beleza — a da Física Nuclear — esta forma de energia não terá viabilidade sem forte protecionismo e/ou corrupção, nas economias de mercado de países democráticos. E, apesar do que se poderá ouvir dizer aos proponentes do nuclear, não parece fazer falta para o futuro que teremos pela frente, com todas as tecnologias renováveis que foram

^{ao} A energia elétrica produzida nas centrais nucleares em funcionamento pode realmente ser vendida hoje a muito baixo custo, pois elas foram muito subsidiadas aquando da sua construção; o custo do subsídio acabou por ser pago pelos contribuintes, a partir de outro bolso, isto é, o consumidor inglês ou francês, não sentiu diretamente este custo extra, no custo na tarifa da eletricidade lá em casa.

referidas, com os seus custos muito mais baixos, a riscos nulos e a sua enorme e rápida capacidade de resposta (*deployment*) para a transição energética. E, também, porque as redes elétricas do futuro, com as renováveis, serão de uma natureza muito distinta, com grande flexibilidade entre várias fontes diferentes e estilos de produção diferentes (pequena escala e grande escala, centralizado e descentralizado,...) e o Nuclear tende a monopolizar, introduzindo uma rigidez muito grande, centralizando, com a sua grande escala e condições de operação em contínuo, uma forma de funcionar que não tem nada que ver com o funcionamento flexível e de resposta rápida que se prevê para a produção e redes do futuro. Assim, a previsão que faz o autor é a de que o Nuclear irá ficando progressivamente no passado (mesmo quando a IEA teima em a conservar, no futuro, com a percentagem que hoje tem de ~10%). O mesmo se passará com os combustíveis fósseis, cujo destino será o de ficarem, também, e cada vez mais, como coisa do passado! Quanto ao nuclear, alguns países como a Alemanha, já deram sinais claros neste sentido, decretando o fim de funcionamento de todas as suas centrais nucleares, com as últimas a encerrar em 2030.

Entretanto, os proponentes do nuclear na UE, têm usado de todos os meios ao seu alcance para conseguirem fazer aprovar a classificação da Energia Nuclear, dentro do conjunto das tecnologias que são ecologicamente sustentáveis, invocando que causam menor produção (desprezável?!) de gases de efeito de estufa.

Contudo, há também uma produção de gases de efeito de estufa, já que há todas as atividades relacionadas com as centrais nucleares, desde a extração de urânio na mina, ao processamento do minério, ao que será a construção e desmantelamento das centrais, à construção dos repositórios de resíduos quando existirem e ao processamento e transporte de resíduos, tem um consumo de combustíveis associado, grande, logo com produção de CO₂... Apesar de tudo, reconhece-se que isso é menos do que emitiria uma central a Gás Natural da mesma potência^{ap}...

Mas a verdadeira razão pela qual o Nuclear não é ecologicamente sustentável, tem dois outros grandes motivos: i) tem um impacte muito forte

^{ap} Emissões (CO₂) de uma central a gás natural 185g/kWhe; os estudos para o nuclear (todo o ciclo de vida) resultam em valores entre 16 e 55 g/kWhe (CO₂ equivalente) para os Estados Unidos (Fthenakis-2007).

sobre o ambiente, da mineração ao armazenamento de resíduos por conta da radioatividade que produz e liberta e porque os resíduos radioativos continuarão a sê-lo por milhares de anos e, ii) como já se referiu, as reservas de Urânio U235 são bastante limitadas.

Entretanto, importa referir que se financiam e estudam hoje alternativas nucleares ao nuclear convencional.

É possível considerar alternativas à fissão comercial com base no U_{235} , através de outros combustíveis nucleares (o U_{238} , o Tório – Th_{232})^{aq}, muito diferentes das tecnologias comerciais atuais (*fast breeders* ou reatores regeneradores). Estas alternativas, com recurso a matéria-prima muito mais abundante, seriam potencialmente mais sustentáveis, pois poderiam estar disponíveis por um prazo muito mais longo. Há, também, outros conceitos em exploração: reatores mais pequenos (SMR) e presumivelmente mais seguros (com segurança dita passiva) e reatores capazes de utilizar os resíduos de outros reatores, como forma de os “reciclar”, logo de contribuir para a resolução do problema dos resíduos.

Os chamados pequenos reatores SMR — *Small Modular Reactors* — introduziriam o conceito da pré-fabricação (um aspeto positivo), potencialmente contribuindo para uma redução de custo, por maior garantia de qualidade consequência do fabrico em ambiente industrial e por possibilidade de redução dos tempos de produção de um reator, em contraste com o das centrais convencionais que levam mais de uma dezena de anos a construir. Não existem reatores destes em demonstração, pelo que ainda há muito mais perguntas do que respostas, em relação à realidade da tecnologia.

Por outro lado, o recurso a esses novos combustíveis nucleares contém uma alteração profunda da tecnologia, já que agora se tem de usar neutrões rápidos (muito mais energéticos) e que não podem ser moderados da forma simples, nem a energia diretamente extraída com recurso à água, como se pode fazer nos reatores convencionais. A tecnologia dos reatores ditos regeneradores ou reprodutores exige, por exemplo, metais líquidos (sódio) ou sais fundidos, para a realização destas funções.

^{aq} Os reatores ditos regeneradores (*breeders*, em inglês).

Assim, o interesse atual destas soluções está prejudicado, à partida, por vários motivos: i) até serem comerciais, se alguma vez o forem, estas novas soluções de reatores regeneradores, necessitarão de 20 ou mais anos de desenvolvimento, ii) não se pode esperar tanto tempo, para se ter uma solução em grande escala^{42ar}, e iii) estas soluções não se vislumbram que venham a ter um custo muito diferente (pelo contrário!) do custo da fissão comercial atual^{43,as,at}, continuando a ser dificilmente competitivo com as energias renováveis e limpas de que falámos^{au}. E, em qualquer caso, a questão dos custos de desmantelamento e armazenamento dos resíduos, em fim de vida das centrais, será a mesma para estas novas soluções^{44,av}!! Tudo aponta para que estas ideias, se alguma vez forem bem-sucedidas (um grande “se”!), são um pouco como pensar em resolver o problema de todos os possíveis transportes individuais, recorrendo só a carros de luxo! O que seria apenas uma solução de muito ricos, para os muito ricos.

Em conclusão: a Energia Nuclear de Fissão, há uns anos, parecia ser uma necessidade, algo inevitável e, de repente, não resolveu os seus problemas de forma satisfatória, e aparece ultrapassada pela evolução profunda e alternativa das Renováveis. Aliás, estas últimas, muito mais adaptadas a resolver o problema da energia para todos, em todo o Mundo, como já se referiu.

3.2. Fusão Nuclear

A elegância deste conceito talvez não tenha rival em toda a área da energia. Trata-se de reproduzir o que se passa no Sol, fundindo dois núcleos

^{ar} No use in the climate crisis, Linda Perez Gunter, Beyond Nuclear International, Nov. 27, 2022.

^{as} Small Modular Reactors cost overruns: the same problems haunt new nuclear in Utah, David Schlissel, Nov. 25, 2022 (IEEFA).

^{at} Os reatores atuais convencionais situam-se entre 900 MW e 1600 MW; têm vindo a aumentar de tamanho com a ideia de quanto maiores, menos peso teriam os seus custos fixos; os SMR aparecem propostos em torno de potências inferiores a 300 MW e contradizem essa evolução nesse aspeto dos custos.

^{au} Provavelmente, também investidores famosos como o Sr. Bill Gates, não esperavam, quando começaram a investir, que o custo das Renováveis baixasse tanto e tão depressa.

^{av} Stanford-led research finds smaller modular reactors will exacerbate challenges of highly radioactive nuclear waste, Stanford News, Mark Shwartz, May 30, 2022.

de Hidrogénio e obtendo um núcleo de Hélio, com uma diferença de massa que corresponde a energia, transformável, por exemplo em eletricidade. Tudo a partir do átomo mais abundante, o de Hidrogénio.

Há dezenas de anos que se investiga este conceito. A questão do confinamento dos núcleos de Hidrogénio é crucial e as duas grandes vias, a mecânica (*lasers* bombardeando por todos os lados, os núcleos a fundir) e a magnética (confinamento conseguido por poderosos campos magnéticos) têm conhecido evoluções importantes.

O recente resultado obtido no LLNL - *Lawrence Livermore National Laboratory* (USA) (Ignition Fusion) [45]^{aw} foi noticiado, por todo o mundo, como um resultado que iria, finalmente, trazer-nos energia elétrica ilimitada, limpa e barata.

O resultado foi muito interessante do ponto de vista da Física, mas sem qualquer impacto visível na capacidade de produção da dita energia limpa e barata.

É verdade que se conseguiu, finalmente, um processo de fusão em que a energia fornecida pelos lasers responsáveis pelo confinamento do plasma de átomos de isótopos de Hidrogénio e sujeitos à sua fusão em átomos de Hélio com libertação de energia, se verificou ter um balanço positivo, isto é, houve mais energia no *output* do que no *input*. Os números referidos foram de 2 MJ no input para 3 MJ no output, um ganho de um fator 1,5. Extraordinário, sim! Até agora, esta relação tem sido inferior a 1. Mas esta não é a realidade toda. Ela omite a energia que foi necessária para fazer funcionar os lasers: pelo menos 300 MJ. Isto é, o balanço total continua a ser muito inferior a 1, neste caso, 0,01!!!. E isto para um instante só, sem haver ainda preocupação com assegurar a continuidade de produção de energia. Em abono da verdade, este não era o objetivo da experiência (o objetivo estava centrado sobre as questões de manutenção de armamento nuclear) e não foi reportada pelos cientistas de LLNL exatamente nestes termos.

^{aw} David Kramer “National Ignition Facility surpasses long-awaited fusion milestone”, *Physics Today*, December 2022.

A tecnologia mais desenvolvida na Europa culmina hoje no ITER, um reator de demonstração de cerca de 500 MW (Portugal participa com o IPFN-IST nesta investigação), pela via do confinamento magnético, com o conceito de reator do tipo Tokamak. Um reator de demonstração comercial nunca acontecerá antes de 2050.

O ITER pretende demonstrar que o plasma confinado e confinante se auto alimenta (o objetivo é o da produção de energia elétrica comercial que deverá ser em contínuo!). Está pensado para uma primeira produção de energia positiva, com um fator de amplificação de 10, 50 MW de input para 500 MW de resultado. Contudo este é o objetivo e não tem em conta, mais uma vez, toda a potência necessária para os equipamentos das funções auxiliares [46]^{ax}. Isto é, o ITER estará ainda a muitos anos do resultado de produzir significativamente mais do que consome energeticamente, prevendo-se que necessite uma potência total de, pelo menos, entre 300 e 500 MW, para desejavelmente produzir 500 MW, quando iniciar o seu funcionamento em 2035^{ay}.

Em teoria, o ponto de *breakeven* acontece acima de um fator 3, já que produzir eletricidade por via térmica tem um rendimento baixo, tipicamente da ordem de 0.3 a 0.4 (rendimento termodinâmico de conversão). Mas esse *breakeven* não chega, necessitamos pelo menos do tal fator 10, para poder dizer que temos uma energia limpa, já que a eletricidade que estará na base do processo, se tiver uma origem fóssil, tem de estar presente em quantidades muito diminutas.

Entretanto, chegam notícias de outras abordagens à configuração e à produção dos campos magnéticos necessários, com o recurso a supercondutores e a uma eventual simplificação e redução de custos.^{48,az}

Em qualquer caso, as dificuldades do processo, ainda a nível de conceito e, depois, as dezenas de anos necessárias para haver um produto comercial (a engenharia dos seus múltiplos aspetos é realmente muito complexa, ver

^{ax} Isabelle Bouboulon, Soleil trompeur, ITER ou le fantasma de l'énergie illimitée.

^{ay} Reporterre, Enquête en 3 volets – Celia Izoard (Reporterre) 18, juin, 2021.

^{az} MIT-News, MIT-designed project achieves major advance toward fusion energy New superconducting magnet breaks magnetic field strength records, paving the way for practical, commercial, carbon-free power. David Chandler | MIT News Office, September 2021.

por exemplo [49]^{ba}), adiam a eventual solução da Fusão Nuclear comercial muito para lá de 2060.

A ênfase está na palavra “eventual”, já que está ainda por determinar a que custos se conseguirá fazer tudo isto. Será suficientemente baixo? Mais provavelmente, e mais uma vez, será uma solução de muito ricos, para muito ricos...

^{ba} <https://www.scientificamerican.com/article/fusions-false-dawn/> (2010).

ANEXO 4

A pegada de carbono dos edifícios do presente e do futuro

(in Renováveis Magazine, Dezembro de 2023).

O sequestro de CO₂ da atmosfera e o armazenamento de carbono

As alterações climáticas são uma realidade. O controlo da subida da temperatura média até ao fim do século (não mais de 1,5 °C) é já um imperativo da União Europeia que se traduzirá em normativas a adoptar por todos os países membros.

Resolver o problema das alterações climáticas é praticamente sinónimo de descarbonização da economia^{bb}, i.e., reduzir drasticamente/acabar com o consumo dos combustíveis fósseis. Mas não é só. A questão é mais complicada. Mesmo que hoje acabássemos por completo com o consumo de combustíveis fósseis, em todo o mundo, não resolvíamos o problema, já que cada molécula de CO₂ emitida, tem um tempo de vida média na atmosfera de mais de 100 anos. Isto é, fica lá a causar o efeito de estufa por todo esse tempo. Conclusão: tem de haver algum meio de retirar o CO₂ da atmosfera! Fala-se em sequestro de carbono e este aparece proposto sob muitas formas. Entre todas, a que é mais realista e simples à escala global e verdadeiramente impactante, baseia-se na fotossíntese e na **produção de madeira** e outros materiais naturais para utilizações de longa duração (1 m³ de madeira armazena 1 tonelada de CO₂). Por exemplo, no **sector da construção**.

Esta abordagem constitui uma proposição verdadeiramente útil, não só pela sua escala, mas porque se insere num sector económico de relevância predominante. E, ela própria, gera atividade económica, em forte contraste

^{bb} O CO₂ e o CH₄ não são os únicos gases causadores do efeito de estufa (GEE) mas dominam de forma esmagadora; uma análise mais fina teria de incluir os demais GEE, mas isso não seria particularmente relevante para o sector da habitação.

com outras soluções que só têm viabilidade com base em grandes investimentos cujo retorno económico é basicamente nulo.

A construção convencional

O sector dos edifícios¹, sozinho, é responsável por ~40% das emissões totais de CO₂ no Mundo, das quais 11% na fase de construção dos edifícios e 29% durante a sua vida e funcionamento. Na União Europeia apenas, os valores são mais elevados: 40% da Energia Final é consumida no sector dos edifícios e, sozinha, é responsável por 36% das emissões totais.

Um aspeto importante é que os edifícios são responsáveis pela emissão de GEE (Gases de Efeito de Estufa) mesmo antes de serem utilizados, por via do CO₂ resultante da energia consumida no processo produtivo e no que é libertado no próprio processo produtivo de alguns dos materiais de que são construídos. Apenas no fabrico de cimento — o material base para a produção de betão — são produzidos 8% das emissões totais no Mundo.

Neutralidade carbónica

O enquadramento na União Europeia para este tema pode ser apreciado na *European Climate Law*, que consagra na legislação europeia “... *the target of economy-wide climate neutrality by 2050 at the latest, the aim of achieving and establishing a binding Union domestic reduction commitment of net greenhouse gas emissions (emissions after deduction of removals) of at least 55% below 1990 levels by 2030.*”

O sector da construção parece destinado a ter um papel muito importante nesta matéria. Em termos comparativos, e só do lado das emissões, basta pensar que se deixássemos em terra todos os aviões que hoje estão a voar, estaríamos a reduzir as emissões totais de GEE, na ordem dos 3%, enquanto abordar o sector dos edifícios, é “afinar o tiro” a um potencial superior a 40%.

Para que se perceba bem, há três questões em jogo:

- Sequestro e armazenamento de carbono (pegada de CO₂ negativa!);
- **Zero emissões** no funcionamento dos edifícios (**NZEBs** – Net ou *Nearly Zero Energy Buildings*);

– Edifícios “**carbono neutros**”, ou “**carbono zero**”, num contexto da discussão da neutralidade carbónica.

Há uma certa ambiguidade ainda por esclarecer. Fala-se em “GWP – *Global Warming Potential* de todo o ciclo de vida do edifício”, incluindo construção. Ora isto, para carbono zero, só pode significar estar-se a fazer referência a edifícios novos, incorporando grandes percentagens de materiais naturais. Quanto aos edifícios convencionais e/ou existentes, o que se pode fazer é apenas reduzir, com suficiência e eficiência energéticas, as emissões associadas ao seu funcionamento e, depois, fornecer a energia necessária com fontes renováveis (sobretudo o fotovoltaico colocado no próprio edifício), para atingir um comportamento de NZEB. Passarão a ser edifícios **zero emissões**, mas não serão **carbono neutros**!

Novos edifícios e uma pegada de carbono negativa.

Para procurar explicar as nuances desta questão, usaremos um exemplo concreto da abordagem do promotor Vanguard Properties: uma residência construída integralmente em madeira e outra, absolutamente idêntica, construída de forma convencional, betão e alvenaria.



Figura1. Moradia tipo, Aldeia da Muda – Comporta.

Consideremos uma residência concreta, projetada para a Aldeia da Muda na Comporta (gabinete Architects Office, LX – AOLx). Estas

residências têm um aspeto genérico como o da Figura 1. A planta da moradia analisada pode ser vista na Figura 2, correspondendo a um T5 com uma área de implantação de 384 m².



Figura 2. Planta tipo T5, Aldeia da Muda – Comporta.

A construção em madeira considerada, baseia-se em componentes fabricadas pela Kozowood (Esposende) e compreende duas placas em CLT de pinho (para soalho e cobertura) e um conjunto de paredes externas e internas em Woodframe. A casa assenta num conjunto de estacas helicoidais metálicas (49 unidades). Os níveis elevados de isolamento (fibra de madeira em painel e fibra de celulose injetada), o conjunto de pérgolas e proteções solares, conferem à casa um comportamento térmico excecional, categoria A+. Os vidros são duplos e de baixa emissão (1,3 W/m² e °C), com fator solar entre 0,29 e 0,60. São projetados 55 m² de painéis solares fotovoltaicos, para produção de eletricidade (climatização e AQS com bombas de calor e recuperação de calor + carregamento de veículo elétrico) colocados na cobertura, transformando a moradia num edifício NZEB.

O cálculo das emissões de CO₂ em ambos os casos, é complexo^{2,3,5,6,7}.

Importa, por exemplo, decidir, se se quer fazer uma análise de ciclo de vida (*cradle to grave*) ou simplesmente até à construção (*cradle to gate*, na obra). Importa também considerar a parte de eletricidade nos processos de

fabrico (o que varia de país para país)^{bc}. Nesta análise decidimos não incluir o ciclo de vida completo e fizemos correções para a situação de produção de eletricidade final em Portugal, quando possível. No caso da construção em obra procurámos incluir valores que nos situem os materiais em obra. Também não incluímos muitos aspetos de acabamentos, carpintaria de limpos etc, admitindo que impactam por igual as duas construções (mas com valores relativamente baixos) em relação ao valor do balanço final.

Nesta nota não é relevante incluir o detalhe dos cálculos feitos, mas alguns valores ficam refletidos nos valores incluídos na Tabelas 1 e 2.

Antes de apresentarmos os resultados importa referir que⁹ 1 m³ de madeira sequestra 1 tonelada de CO₂. No entanto, a madeira tem que ser extraída da floresta, transportada, serrada e seca, antes de chegar às instalações da Kozowood para fabrico das componentes utilizadas. Uma análise da extensa documentação disponível e consultada, estabelece um valor entre 0,3 toneladas de CO₂/m³ e 0,1 toneladas de CO₂/m³ de madeira incorporada. No caso da Kozowood, com produção de eletricidade própria (PV) em fábrica e recurso aos seus desperdícios de madeira para processos térmicos e climatização, poderemos situar-nos mais perto de 0,1 toneladas do que 0,3 toneladas de CO₂/m³. Contudo, para fins da comparação com carácter genérico que se pretende fazer, assumiremos o valor mais elevado.

Construção em madeira:

Tabela 1. Casa Muda – construção em Madeira.

	Quantidade	Q u a n t i d a d e armazenada	Q u a n t i d a d e (produção)	Ton CO ₂
Madeira	265 m ³	-1tonCO ₂ /m ³	+0,3 tonCO ₂ /m ³	-185
Aço	1 ton	-----	2.7tonCO ₂ /ton	+2.7
Vidro	1,2 ton	-----	+ 0,8 ton/1 ton	+1
PV	55m ²	-----	0,55ton CO ₂ /m ²	+30
Balanço	-----	-----	-----	- 151

^{bc} Por exemplo, em Portugal, hoje, com 60% de renováveis para produção de energia final elétrica e o resto através, sobretudo, de Gás Natural, em média, temos ~100gCO₂/kWh, no Brasil ~40gCO₂/kWh, e noutros países da UE podem atingir-se valores muito mais elevados, até da ordem de 800g/kWh, fruto do mix energético na produção de eletricidade com mais ou menos combustíveis fósseis.

Os valores obtidos para as pegadas respetivas podem ser apresentados por m² de área de construção: -0.4 tonCO₂/m² para a casa de madeira e + 0.4 tonCO₂/m² para a mesma casa em construção convencional.

Tabela 2. Casa Muda – Construção Convencional.

	Quantidade	Emissões	TonCO ₂
Betão	110,22 m ³	250kgCO ₂ /m ³	+27,6
Aço	18,7 ton	2,7 tonCO ₂ /ton	+50,5
Alvenaria	264m ² (int.)+188m ² (ext.)	0,29tonCO ₂ /ton	+44,3
Vidro	1.2ton	0,8tonCO ₂ /ton	+1
PV	55m ²	0,55tonCO ₂ /m ²	+30
Balanço	-----	-----	+153,4

CONCLUSÃO

Esta abordagem simplificada mostra que a pegada negativa de uma casa, é idêntica em valor absoluto à pegada positiva da outra. Como dissemos a pegada negativa da construção em madeira pode ser ainda mais negativa, mas também a pegada positiva da construção convencional pode ainda ser reduzida (ver ^{3,8}, por exemplo) com betão menos emissor, aço reciclado, outro tipo de paredes, etc. O que nunca poderá ser é **“carbono neutro”**, longe disso! Embora possa ser **NZEB!**

Em 2021, o Governo francês, estabeleceu que os novos edifícios públicos deverão incorporar **50% de madeira** na sua construção. Os resultados obtidos justificam aquele valor. Um edifício assim fica **“carbono neutro”!** E com **“zero emissões”** se recorrer a um sistema fotovoltaico adequado. E isso é o mínimo que será exigido, em geral, para todos os edifícios, no futuro (antes de 2050).

É importante que o Governo comece a explicar como pretende, desde já, abordar esta matéria e inicie o desenvolvimento de uma metodologia que permita a análise da pegada carbónica dos edifícios, feita em moldes simples, não exaustivos, ao estilo da atual certificação energética.

REFERÊNCIAS

1. Manuel Collares Pereira, “Descarbonização da Economia, Energia e Futuro” (e-book), edição Vanguard Properties, 2023, versões em português e inglês. Português: https://www.vangproperties.com/media/5949/ebook_c_cv_pt.pdf Inglês: https://www.vangproperties.com/media/5948/ebook_c_cv_en.pdf
2. Sergio Fernandes Tavares, Luís Bragança- “Índices de CO₂ para materiais de construção em edificações brasileiras” – SBE Series, 16, Vol. 2.
3. Valter Antonio Martins Henriques, “Impacte Ambiental de Estruturas de Edifícios – A produção de CO₂” – Tese de Mestrado – IST, Academia Militar. 2011.
4. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics, NREL, November 2012.
5. Estratégias corporativas de baixo carbono: sector do vidro, Confederação Nacional da Indústria. – Brasília: CNI, 2016.
6. Iasmini Borba da Cunha, “Quantificação das emissões na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais” – Tese de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 2016.
7. Cassia Laire Kozloski, “Emissão de CO₂ de Materiais de Construção Civil no Brasil: estimativas da etapa processual das edificações” –Tese de mestrado – Universidade Federal Santa Maria. 2020.
8. Joana Sousa Coutinho “Betões eco eficientes com resíduos” -1.ª Jornadas de Materiais de Construção, 2011.
9. Elias Hurmekoski, “How can wood construction reduce environmental degradation?”, 2017, ISBN 978-952-5980-33-2 (printed).

ANEXO 5

Energia, Segurança Energética e o Futuro

As alterações climáticas, a chamada transição energética, requerem energia e políticas ambientais, frequentemente apresentadas como se estivessem desligadas de muitos outros aspetos que constituem um pano de fundo que não pode ser ignorado.

Questões que influenciam os caminhos da energia no futuro (em particular, a Segurança na disponibilidade-oferta de energia) emergem em torno de tópicos como a soberania, o nível de autossuficiência de fornecimento que é desejável e aceitável para os cidadãos europeus, questões que estão profundamente ligadas à cultura, às implicações que têm para as várias democracias, a nível nacional e europeu, etc.

Segurança Energética é definida pela IEA 2023 como sendo “a disponibilidade ininterrupta de fontes de energia a um preço aceitável”. Quanto estaremos dispostos a aceitar para o custo da energia? Quanto estaremos dispostos a pagar pelos impactes ambientais associados? Mesmo argumentando que não fazer nada para fazer face às alterações climáticas, terá custos muito mais elevados no futuro, poderemos não estar a querer antecipar já um custo mais elevado para a energia...? Ou para a sustentabilidade? Ou para acabar com o nosso consumismo excessivo?

Para contribuir para esta discussão essencial, é feita uma reflexão tendo em conta este pano de fundo, procurando estabelecer uma relação com as tecnologias referidas no corpo deste texto, com o objetivo de alargar a visão sobre como podem ser implementadas.

1. Ponto de partida

O ponto de partida é o da sustentabilidade, em conjunto com a necessidade de se reagir de forma apropriada às alterações climáticas. Estes aspetos não podem ser de forma nenhuma comprometidos no caminho para o

futuro, i.e., têm de estar sempre presentes na base de tudo que se proponha e faça.

Um outro aspeto é o de se perceber que a forma tradicional (*old thinking*) de pensar as questões da energia, não vai ser capaz de nos conduzir muito longe e, portanto, trata-se de adoptar uma nova forma de as pensar (*new thinking*). Mais adiante, neste texto, ficará mais claro o que se pretende afirmar.

Neste texto, também, a palavra “nós”, refere-se a “nós, os cidadãos” e não diretamente, ou necessariamente, aos políticos (escolhidos por nós, certo?) ou mesmo aos cientistas especialistas do tema energia.

E “nós, os cidadãos” não estamos realmente preocupados com energia em si. O que queremos é conforto, boa saúde, boa qualidade de vida, etc. ou, indo mais fundo, queremos a nossa cultura, as nossas democracias...

Segurança significa, para nós, ausência de ameaças, militares ou outras, ausência de catástrofes climáticas, etc. Os peritos da energia e os políticos deveriam ser capazes de explicar a “nós, os cidadãos” que as cada vez mais frequentes catástrofes ambientais e as alterações climáticas estão verdadeiramente associadas com o nosso comportamento, em particular, ao uso dominante dos combustíveis fósseis.

Há muitas soluções tecnológicas para o problema, mas implicam a adoção de novos valores (sustentabilidade, mitigação dos efeitos das alterações climáticas) e adoção de novos comportamentos.

Mensagem importante: isto pode ser feito sem comprometer a qualidade de vida atual, pelo contrário, melhorando-a até (isso faz parte do *new thinking*).

O discurso frequente sobre “catástrofe ambiental eminente” não ajuda. Aliena e reforça o risco de se entrar em desespero e de desmobilizar.

Assim, informação, informação de qualidade, portadora de esperança, é chave principal.

E como energia é uma condição necessária para tudo, é necessário discutir energia. Contudo esta discussão deverá ser feita tendo em conta vários aspetos.

2. Primeiro e importantíssimo tópico: *suficiência energética (por outras palavras e simplificando, consumo evitado de energia).*

Há muito a ganhar na prática sistemática da suficiência energética, capaz de reduzir a pressão sobre a capacidade e quantidade de tecnologia e de novas formas de energia que necessitamos para nos libertar do domínio dos combustíveis fósseis em que ainda vivemos.

Tal como se discute no texto, um excelente exemplo é o do sector dos edifícios: melhores edifícios (inclui arquitetura bioclimática, conceções solar-passivas, etc.) têm um comportamento energético superior e isso reduzirá a procura (29% de toda a Energia Final, é consumida na operação de todos os edifícios a nível mundial). Melhores edifícios quer hoje dizer ainda a nova possibilidade de serem carbono neutros ou mesmo carbono negativos, se construídos com materiais como a madeira. Isso constitui ainda uma solução economicamente viável para o necessário sequestro de CO₂ da atmosfera e armazenamento de carbono e reduz ainda mais a energia necessária para a sua operação (mais suficiência energética). Um *no brainer*, certo? É que a produção de cimento por si só, é responsável por entre 7-8% de emissões de CO₂ a nível mundial, a que devemos associar as emissões para fabrico de aço para betão, cerâmica para alvenaria, etc., para um total de 11% das emissões totais atribuíveis ao sector da construção.

Outros tópicos frequentemente descurados dentro deste tema são puras questões de planeamento urbano, com vista a reduzir as necessidades de mobilidade, a cidade dos 15 minutos, etc.

É obvio que, depois, é fundamental referir as questões da eficiência energética. Pelas mesmas razões e em todas as suas múltiplas formas, dos equipamentos aos processos (exemplos: bombas de calor, cocção elétrica, organização adequada de sequências fabris e dos próprios processos, etc.).

3. Segundo tópico: *combustíveis fósseis e o conceito de energia primária (old thinking)*

Sim, os combustíveis são recursos (e finitos, na realidade!) e daí o conceito de energia primária. Por si sós não têm utilidade: o seu conteúdo energético tem de ser transformado em Energia Final (calor, movimento,

eletricidade, etc.). Conforme se explica no texto, a transformação, genericamente, é térmica com um rendimento baixo (um motor convencional tem um rendimento na ordem de 20%).

Carnot e a segunda lei da termodinâmica! E não se pode evitar. Mas o que é mesmo importante é a Energia Final, que pode ser obtida de muitas formas diferentes (com Renováveis, por exemplo, para as quais este conceito de energia primária é basicamente irrelevante). Um motor elétrico num veículo idêntico tem um rendimento de 95%. Se a eletricidade vier de uma fonte renovável, evita o consumo de combustível fóssil por um fator da ordem 5 ou superior (porque há outras perdas envolvidas).

Assim, e isto faz parte do *new thinking*, há alternativas e tecnologia para se obter Energia Final, independentes dos combustíveis fósseis e com muitas vantagens significativas e quantificáveis.

Se a contabilidade avassaladora dos combustíveis fósseis no seu domínio da energia primária (85% da energia primária no Mundo, hoje, apenas já só 70% em Portugal) nos assusta, importa pensar que uma boa parte da questão é apenas contabilística e que pode desaparecer em breve.

Contudo, a negação de que isto será até alguma vez possível, tem sido um *talking point* de negacionistas e da indústria dos combustíveis.

Caso concreto: ainda no sector dos edifícios. Ver-se-á a energia primária a tender para zero, com zero emissões na produção de energia útil (fotovoltaico e os edifícios NZEB), e também serem neutros em carbono, ou mesmo ter pegada negativa, com redução substancial de emissões que resultarão do uso de materiais como a madeira e outros. *New thinking!*

O mesmo no sector da indústria? Sim e em inúmeras situações. Tudo o que se referiu acima pode ser aplicado aos edifícios e às operações industriais.

Ao tópico das Renováveis para a produção de eletricidade final, pode-se acrescentar os novos combustíveis (hidrogénio, biocombustíveis, outros combustíveis solares e a Energia Solar Térmica, frequentemente esquecida, fornecendo diretamente calor como para as AQS e para o calor de processo em países com bom recurso solar.

E ainda, uma quantidade de outras tecnologias associadas com calor, como o recurso ao *district heating*.

Um comentário final sobre combustíveis fósseis: o mercado da energia não está nivelado! O seu custo não reflete (internaliza) os seus impactes ambientais e são ainda altamente subsidiados.

4. Preocupações geradas no contexto das novas tecnologias da energia; a segurança de abastecimento de materiais envolvidos

Haverá materiais com a abundância necessária para suprir as novas (e enormes) necessidades?

Esta é uma preocupação genuína, mas não pode ser abordada da mesma forma como se abordaram as preocupações com a disponibilidade de energia primária (este tipo de abordagem rapidamente desliza para *old thinking*). Claro que se têm de considerar as quantidades de cada recurso que se conhecem, mas é necessário incluir algo extra e crucial: desenvolvimento científico e tecnológico em progresso permanente!! (*new thinking*). Sem nunca perder de vista o objetivo: o da produção de energia final.

Um caso concreto: lítio para baterias. Ainda agora se começou a exploração deste e surgem vozes de alarme para reservas que se estimam na ordem de 15 anos. Outro *talking point* típico dos negacionistas. E então? 15 anos é um tempo longo e, entretanto, aparecerão usos mais eficientes de lítio (baterias de lítio metal, por exemplo) e baterias feitas de outros materiais, mais abundantes e até mais baratos, como explicámos.

Assim, a aposta mais segura para obter Segurança Energética é a de se **investir em Ciência!**

5. E, entretanto, há o problema do impacte ambiental

A extração de minério é uma atividade com alto impacte ambiental potencial. É preciso ter cuidado aqui!

Considere-se o caso dos chineses e a mineração que fazem com relevância para a produção de painéis fotovoltaicos. A forma como o fazem é frequentemente alarmante e desnecessária. O objetivo é o da redução de custo dos painéis a qualquer preço, mas estes procedimentos põem em risco as premissas sobre sustentabilidade e equilíbrio ambiental que deveriam estar

presentes. Nos leilões recentemente efectuados em Portugal para a realização de grandes sistemas PV, foram atingidos valores tão baixos quanto 1,45 euro cêntimos/kWh, quando os especialistas esperavam o aparecimento de valores entre 2-3 euro cêntimos/kWh, valores ainda fantásticos, muito abaixo dos valores para qualquer outra tecnologia produtora de eletricidade... E, no entanto, os valores foram ainda mais baixos: talvez porque os painéis não devessem ter um custo tão baixo, porque teria sido importante acautelar os impactes ambientais referidos, aceitando valores mais elevados numa perspetiva de sustentabilidade e de equilíbrio.

Estas são consequências severas e no limite geram insegurança.

6. *A questão do custo da energia.*

Normalmente existe este objetivo de busca de um custo da energia cada vez mais baixo. Mas, na realidade, talvez fosse importante haver disponibilidade para pagar um pouco mais pela energia no futuro, em vez da busca incessante por se pagar menos. A justificação reside nos valores que é necessário defender. Isso pode querer dizer algum investimento (*capex*) para melhorar a suficiência energética, sem sequer sacrificar e, até, melhorar a qualidade de vida. Por exemplo: um apartamento aquecido com uma bomba de calor reduz a conta do aquecimento ambiente por um fator 4 vezes inferior do que seria o aquecimento feito por uma resistência elétrica. Será que assim já seria aceitável que a eletricidade pudesse ser um pouco mais cara (*opex*)? Assim parece, sendo necessário...

Esta forma de pensar faz parte do *new thinking*!

Mas aqui é importante introduzir considerações de ordem social. É necessário informar e discutir com “nós, os cidadãos” e encontrar também formas de ajudar com novas formas de conferir capacidade de fazer investimentos para aqueles que mais necessitam. Um exemplo de preocupações sociais que não foram acauteladas pode ser visto no que se passou em França com os “coletes amarelos”.

Mais uma vez, no sector da habitação, há situações que surgem na reabilitação de edifícios quando os seu proprietários e/ou arrendatários não tenham acesso a fundos para investir nem, muitas vezes, conhecem as oportunidades (técnicas e financeiras) ao seu dispor...

Para novos edifícios estas questões podem ser muito mais simples de resolver com legislação equilibrada e cumprimento dos novos regulamentos.

Uma sugestão para cobrir estes investimentos será certamente dedicar-lhes uma parte (ou mesmo a totalidade) das taxas de carbono e os fundos que geram.

Falta de compreensão para este new thinking e falta de adesão de “nós os cidadãos” é uma ameaça para a segurança energética e isto deve ser tido em conta.

7. Redes, transporte e distribuição de eletricidade

A rápida penetração das Energias Renováveis ocorre com a crescente eletrificação da economia, através de energia final elétrica renovável: new thinking!

Trata-se de pelo menos duplicar o consumo de energia elétrica nos próximos 25 anos, passar de um pouco mais de 20% hoje, até ~50%, um enorme desafio!

As Comunidades Energéticas, sob muitas formas e feitios, estão a aparecer por todo o lado. Consumidores e Produtores (*Prosumers*) têm os seus papéis cada vez mais misturados (outra manifestação do *new thinking*). Há muitas variantes a considerar: cidadãos *prosumers*, empresas *prosumers*, *prosumer* públicos, ... aumento da produção para autoconsumo, ...etc.

Trata-se de produção descentralizada que é muito menos vulnerável (mais segura) que a do estilo de produção centralizada do passado *old thinking*.

Mas a vulnerabilidade não desaparece completamente com a descentralização. Há a ameaça dos ataques informáticos atingirem qualquer tipo de rede, centralizada ou descentralizada. Este é um tópico onde a IA pode ajudar de forma significativa na gestão, mas também na prevenção e defesa das redes.

Um outro aspeto que gera uma insegurança substantiva é a necessidade futura de redes maiores, que tardam a ser implementadas e têm um custo elevado. A Europa necessita também de estar mais interconectada entre os Estados Membros. Quem pagará isso e como?

Criar um Mercado Comum Europeu de eletricidade é crucial. E isso não existe ainda, pelo menos no mesmo sentido em que existe na Península Ibérica, entre Portugal e Espanha. Energia elétrica solar e eólica do sul deveria poder fluir facilmente para o Centro e Norte da Europa e vice-versa.

Desta forma, muitos dos problemas associados com insegurança, como a questão da intermitência das Renováveis, serão muito significativamente reduzidas. Há uma probabilidade favorável de compensação (fator de simultaneidade) espacial e temporal que não pode ser ignorada *old thinking*.

E poderá certamente ser interessante discutir a questão da solidariedade energética neste contexto, com maior partilha a nível europeu, para lá da visão de hoje que está muito centrada nos interesses nacionais.

Neste contexto ainda (*new thinking*): poderão os países com menos sol ou vento investir para a sua prestação renovável interna, em países onde esses recursos são mais abundantes?

Por exemplo, será possível a República Checa pensar em *offshore wind* no oceano Atlântico como fazendo parte da sua política energética? Claro que muitas questões sobre segurança nacional, soberania, etc., surgiriam de imediato... Mas não seria isto também uma motivação forte para a própria Europa repensar a sua atual natureza e a sua evolução para o futuro? (*new thinking*)

8. Comentário sobre a possibilidade de novas centrais nucleares e segurança energética

Em termos mundiais, a Energia Nuclear representa hoje menos de 10% de toda a eletricidade. Na Europa esse valor é ~20%.

O Nuclear é responsável por várias ameaças à segurança. Uma central de grandes dimensões é vulnerável a vários tipos de ataque, escassez de combustível (na Europa a maioria do combustível vem da Rússia (!) e de alguns dos países satélites) e até às alterações climáticas (como se pôde constatar em França, onde chegou a haver falta de água em rios usados como fonte fria para algumas das suas centrais, ditando o encerramento das mesmas).

Conforme se explicou, a eletricidade nuclear de novas centrais é muito mais cara que a que tem origem PV ou eólica, mesmo sem ter em conta os

custos escondidos (desmantelamento, armazenamento, transformação e transporte de resíduos, seguros, etc.).

Centrais nucleares novas não são mesmo uma solução até 2040, já que são necessários até 15 anos para as construir, licenciar e arrancar. E não se pode esperar tanto tempo. Para além disso, durante este tempo, ter-se-ão desenvolvido muitas outras formas de energia e respetivas tecnologias, e não será que acabará por ficar irrelevante o investimento no novo nuclear?

Por serem muito caras, muitos países não poderão/quererão investir nelas. Mas, se o fizerem, o esforço financeiro para isso corre o risco de “secar” outros investimentos, muito mais produtivos noutras fontes sustentáveis e respetivas tecnologias alternativas.

Quanto aos reatores ditos pequenos (SMR) ainda não existem. Alguns propõem mesmo tecnologia diferente (reatores regeneradores/*breeders*), com um combustível diferente (por si só um problema, com implicações sobre a segurança de abastecimento), não certificada ainda, etc. Isto é, tardarão ainda por muitos anos e não aparentam ser mais baratos (como se explicou).

Claramente, o mesmo se aplica à fusão, provavelmente, não disponível nos próximos 50 anos, sem qualquer garantia de vir a ser competitiva.

Na realidade, a energia nuclear não deveria estar classificada como sustentável em virtude dos seus impactes a longo prazo (resíduos radioativos) e corresponder a uma grande insegurança associada com a possibilidade de acidentes, ter impactes sociais e económicos que não deveriam ser ignorados, etc.

Na verdade, ainda se dispõe da frota de reatores atualmente em operação que vai envelhecendo e ir substituindo um reactor que termine a sua vida, aqui e ali, por um reactor novo, nos países onde o nuclear tem mais expressão, poderá fazer mais sentido.

Assim, será importante, desde já, modelar o nosso futuro sem um crescimento significativo do nuclear, incluindo até, a consideração do seu declínio progressivo, com um reforço significativo (*new thinking*) da suficiência e eficiência energéticas e das muitas formas das renováveis.

No futuro, poderemos conviver, aceitar algum combustível fóssil como o gás natural, para o necessário complemento até aos 100% das contribuições renováveis. Até 1/7 do consumo de combustível fóssil pode encontrar compensação em sumidouros de carbono naturais?! Isto é o objetivo de “net” carbono zero pode não ter mesmo de ser zero carbono...

Não haver energia nuclear no futuro terá também de ser articulado com os militares que têm sido os principais responsáveis por não deixar que nuclear desapareça do nosso leque de opções.

Esta é uma questão principal de segurança!

Consideração final: vai ser necessário explicar a “nós os cidadãos” que desmantelar os reatores e armazenar os resíduos radioativos tem um custo elevado que todos terão de pagar. Estes custos são externalidades, que terão de ser, de alguma forma, suportadas pelos cidadãos, direta ou indiretamente. Isso poderá dar origem a protestos, com consequências sobre a segurança energética. Os dias da energia nuclear subsidiada e barata ficarão muito no passado.

9. Circularidade

É um tema muito importante, mas “nós os cidadãos” ainda olhamos para ele como se fosse ficção científica. Contudo será muito importante insistir neste tema e ser particularmente inteligente com novos regulamentos e exigências que condicionarão comportamentos de uma forma aceitável no âmbito do que é já hoje a perceção que se vai tendo dele.

10. Em conclusão

O *new thinking* é crucial, e foram apresentados vários exemplos.

Promover a suficiência energética é uma questão essencial.

Envolver os “nós, os cidadãos” tão cedo quanto possível é absolutamente necessário. Para lá de se discutirem os valores e a necessidade de se caminhar para um futuro sustentável, tem que se incluir na discussão todas as formas de externalidades a que damos origem e quais os seus custos para que possam ser compreendidas e resolvidas tão depressa quanto possível.

Do ponto de vista da segurança energética as várias formas de energia não equivalentes! Assim não podem ser tratadas de forma igual!

Reduzir a dependência da energia primária fóssil é perfeitamente possível desde que haja vontade de o fazer.

O tópico da Economia, a atitude de consumismo dominante e o tipo de sobreconsumo que resultam dos conceitos vigentes associados à noção de crescimento constante do atual capitalismo dos acionistas, não foi diretamente considerado neste curto texto.

Uma discussão que será demorada sobre isto também é necessária, mas, felizmente, há muito que se pode fazer, entretanto. São boas notícias! Um exemplo concreto pode ser o facto de “nós, os cidadãos” querermos comprar casas e outras coisas que podem ser feitas carbono negativas. E podemos fazer isso acontecer com regulamentação adequada, etc. Veículos elétricos? Passa-se o mesmo...

Tudo isto terá impacto na economia? Uma nova economia pode ser tão boa ou melhor, até! Criando mais e novos empregos, etc.

Mas a necessidade para arranque com novos investimentos (*capex*) e eventuais subsídios, deve ser aceite com naturalidade: afinal os combustíveis fósseis estão a ser subsidiados — algo que hoje é incompreensível. Tudo isto sem esquecer o tópico da pobreza e da justiça distributiva, na Europa e no resto do Mundo!

Energia Nuclear de Cisão

JOSÉ G. MARQUES E M. FELIZARDO*

INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia libertada a partir de reações nucleares de cisão, vulgarmente designada “energia nuclear”, é reconhecido como importante para a mitigação das emissões de CO₂ e de outros gases com efeito de estufa (GEE)¹. No entanto, a energia nuclear está inserida numa complexa matriz social, política e económica que tem influenciado a sua evolução^{2,3}. Na década de 1950 houve um enorme entusiasmo com a potencial dimensão da energia nuclear e os seus reduzidos custos. O Almirante Lewis Strauss, presidente da Comissão Atómica Americana, afirmou que a eletricidade produzida por via nuclear “seria tão barata que não seria necessário medi-la”⁴. Mais tarde, na década de 1970, Alvin Weinberg apontava para um custo de 2 USD/MWh⁵. Não obstante, diversos fatores fizeram com que estas perspetivas não fossem viáveis.

A Figura 1 mostra a evolução do número de reatores de cisão construídos e em operação desde a década de 1950. Os anos de ocorrência dos 3 maiores acidentes nucleares, Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) e Fukushima-I (2011) são igualmente indicados. Foram construídos e ligados à rede elétrica mais de 600 reatores de cisão, estando em operação 413 reatores no fim de 2023, correspondentes a uma potência (elétrica) de 369 GW. Adicionalmente, estavam em construção 56 reatores, dos quais 21 na China⁶. O número de reatores em operação tem permanecido relativamente constante ao longo das últimas três décadas, com novos reatores compensando

* Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares, Instituto Superior Técnico.

as saídas de reatores em fim de vida ou parados por outras razões. O parque atual de reatores de cisão tem sido responsável pela geração de 10-17% da eletricidade, a nível mundial, nas últimas décadas⁷.

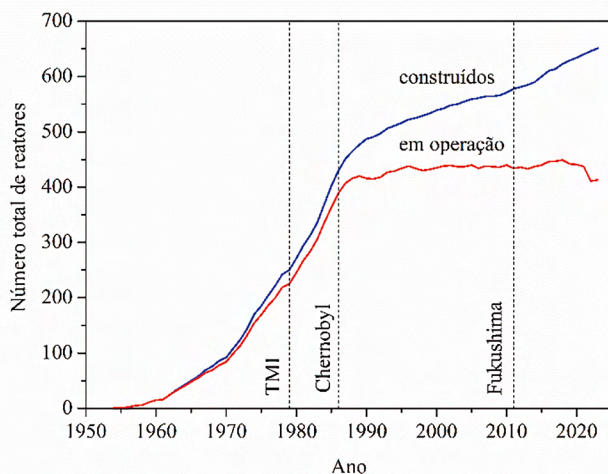


Figura 1. Evolução do número de reatores de cisão construídos e em operação entre 1950 e 2020. As linhas a tracejado indicam a ocorrência dos acidentes de Three Mile Island (TMI), Chernobyl e Fukushima-I.

As décadas com maior crescimento da energia nuclear foram claramente as de 1970 e 1980 e uma boa parte dos reatores atualmente em exploração foram construídos nestas décadas. Se a crise do petróleo no início da década de 1970 foi grande impulsionadora do crescimento da utilização de energia nuclear, o acidente de Three Mile Island funcionou como um moderador efetivo deste crescimento⁸, o qual foi novamente reduzido depois do acidente de Chernobyl, ocorrido apenas 7 anos depois. Embora tenha sido considerado que Chernobyl não teve impacto relevante do ponto de vista tecnológico nos reatores de origem ocidental, contribuiu decisivamente para terminar a implementação das alterações técnicas induzidas pelo acidente de TMI e levou à introdução de importantes convenções internacionais sobre a utilização de energia nuclear. Depois de 25 anos sem ocorrências significativas, o acidente de Fukushima-I veio, uma vez mais, marcar negativamente a imagem da energia nuclear de cisão, embora as consequências deste acidente tenham sido mais limitadas do que as de Chernobyl⁹.

A maioria dos reatores nucleares de cisão atualmente em uso é de dois tipos: reatores a água pressurizada (“Pressurized Water Reactor”, PWR) e reatores a água ebuliente (“Boiling Water Reactor”, BWR). Estes dois tipos de reatores correspondem atualmente a 83.5% do total de reatores em exploração⁶, com tendência para aumentar a sua importância nas próximas décadas à medida que reatores de outros tipos (nomeadamente os moderados a grafite) atingem o fim de vida. Contudo, os atuais reatores consomem efetivamente apenas cerca de 1% do urânio necessário ao seu funcionamento e geram resíduos radioativos que têm de ser armazenados durante milhares de anos.

O futuro da energia nuclear de cisão depende sobretudo da implementação de soluções tecnológicas que tenham impacto na utilização de recursos naturais e na gestão de resíduos, os quais têm grande peso económico, social e político, respeitando os princípios de segurança e não-proliferação de materiais nucleares.

Nas seções seguintes são apresentados quatro tópicos, cujas fronteiras não são estanques, dada a sua íntima ligação, com influência no futuro da energia nuclear de cisão: gestão de recursos naturais, gestão de resíduos radioativos, tecnologia de cisão, e fatores externos. São, finalmente, apresentadas conclusões, suscetíveis de servir de base para uma discussão.

1. RECURSOS NATURAIS

A esmagadora maioria dos atuais reatores de cisão exige o recurso ao isótopo U-235, cuja abundância é apenas cerca de 0,7% do urânio natural. Nestes reatores, esta fração é aumentada para 3-5%, de modo a que se possa usar água natural como meio moderador. Os neutrões libertados na cisão, com energia média de 2 MeV (sendo, portanto, neutrões rápidos) são termalizados, sendo as novas cisões maioritariamente causadas por neutrões térmicos.

A Figura 2. mostra uma vareta genérica de combustível e um elemento de combustível para reatores BWR, numa matriz de 9×9, que contém

tipicamente 63 varetas¹⁰. Os reatores PWR usam matrizes maiores, tipicamente, 17×17, com 264 varetas segundo o padrão da Westinghouse. A vareta é geralmente de uma liga de zircônio e contém no seu interior pastilhas cilíndricas de UO₂, com cerca de 1 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura, sendo usado He (a cerca de 3 atm) para melhorar a transferência de calor entre as pastilhas e a vareta. No topo das varetas existe uma zona sem pastilhas, destinada a acomodar os produtos gasosos (fundamentalmente produtos de cisão) que se libertam do combustível durante o funcionamento do reator. Um núcleo típico de um PWR com potência (elétrica) de 1 GW tem 193 elementos de combustível, com cerca de 51 mil varetas contendo 18 milhões de pastilhas de UO₂. Um reator de cisão com uma potência (elétrica) de 1 GW requer aproximadamente 20 t de urânio enriquecido por ano. Para a sua produção, é necessária uma quantidade de urânio natural cerca de 10 vezes superior^a, dadas as características do processo de enriquecimento. Com efeito, não é viável extrair todo o U-235 do urânio natural, dado que o trabalho de separação dos isótopos U-235 e U-238, aumenta de forma não linear à medida que a quantidade de U-235 no material de base diminui.

O estado dos recursos de urânio é periodicamente atualizado no “Red Book” da Agência Internacional de Energia Atômica e da Agência para a Energia Nuclear¹¹. Os recursos uraníferos convencionais seguros estão avaliados em 4,7 Mt, aos quais se poderão juntar 3,3 Mt com existência presumida, mas não verificada. Adicionalmente, será possível recuperar 9,2 Mt urânio a partir de fosfatos (os quais contêm 50-200 ppm de U) usando tecnologia existente. Os recursos totais que podem ser assumidos são assim de 15 Mt.

Os recursos de urânio identificados em Portugal estão estimados em 7 kt¹¹, o que representa menos de 0,1% dos recursos convencionais identificados a nível mundial. Até 2001, altura em que cessou a exploração de urânio em Portugal, foram extraídos 3,7 kt em cerca de 60 minas de urânio¹¹. Os recursos identificados seriam suficientes para alimentar um reator

^a Para comparação, uma central a carvão com potência de 1 GW (elétrica) requer cerca de 4 milhões de toneladas de carvão por ano

nuclear com potência (elétrica) de 1 GW durante aproximadamente 35 anos (considerando 200 t/ano, em média). Não obstante, seria necessário proceder ao enriquecimento do urânio e fabrico dos elementos de combustível fora de Portugal. Adicionalmente, é de referir que o minério conhecido é relativamente pobre em urânio; o teor médio de U_3O_8 (“yellow cake”) no minério de Nisa é de 0.12%¹², enquanto que nas melhores minas, como a de Cigar Lake (Canadá) é de 16.5%¹³.

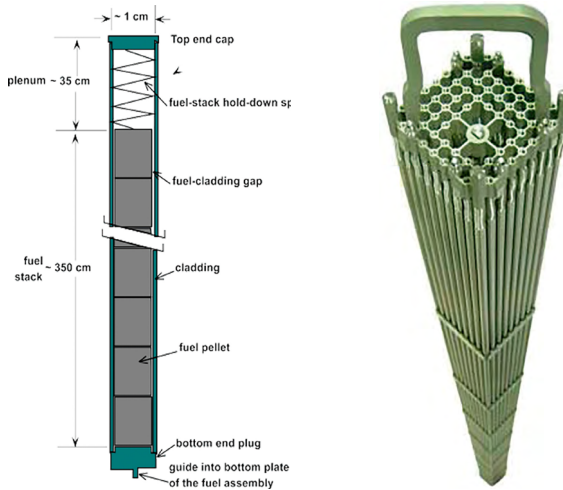


Figura 2. Representação genérica (a) de uma vareta de combustível, e (b) de um elemento de combustível para um reator BWR com as varetas dispostas numa matriz 9×9 [10].

O consumo mundial de urânio nas últimas décadas tem sido de 60-70 kt por ano¹⁴. A estes níveis e sem alterações tecnológicas, existe urânio suficiente para 70 anos se considerarmos apenas os recursos seguros, e para cerca de 200 anos se considerarmos todos os recursos. Para melhorar esta janela temporal é necessário introduzir alterações tecnológicas significativas. Embora parte do U-238, isótopo maioritário do urânio, seja convertida em Pu-239 e posteriormente cindida durante o funcionamento dos atuais reatores, a utilização efetiva deste isótopo por cisão direta requer sistemas em que os neutrões não sejam moderados — os designados reatores a neutrões rápidos —, dado que a reação de cisão tem um limiar de energia a aproximadamente 1 MeV.

Nas décadas de 1940 e 1950 pensava-se que as reservas de urânio natural eram muito menores, pelo que foram realizados importantes estudos daqueles reatores, os quais poderiam até gerar mais material cindível do que o consumido. O célebre relatório de M.K. Hubbert em 1956¹⁵, que previa a ocorrência de um pico de produção para os combustíveis fósseis, seguido de um declínio, considerava que a energia nuclear era uma alternativa com mais futuro, recorrendo a reatores a neutrões rápidos. Contudo, a descoberta de maiores quantidades de urânio permitiu o estabelecimento de uma lógica puramente economicista e de curto prazo, que levou ao encerramento da maioria dos reatores a neutrões rápidos¹⁶, dado que estes são tecnicamente mais complexos e têm maiores custos de exploração.

Por outro lado, poucos países implementaram processos de reciclagem do urânio usado e, na maior parte dos casos, o urânio nos elementos de combustível é considerado um resíduo depois de irradiado. Se for possível aumentar significativamente a utilização do U-238, introduzindo reatores a neutrões rápidos, então poder-se-á passar para uma escala temporal da ordem das dezenas de milhares de anos de utilização da energia nuclear de cisão. Simultaneamente, a quantidade de resíduos a armazenar poderá ser drasticamente reduzida. Há ainda a considerar a utilização de tório, elemento químico que é 3-4 vezes mais abundante que o urânio¹⁷. O único isótopo natural do tório, Th-232, pode ser convertido em U-233, o qual é cindível.

2. RESÍDUOS RADIOATIVOS

Os atuais reatores BWR e PWR foram geralmente concebidos para ciclos de recarregamento de 12 a 18 meses. Tipicamente, 1/4 ou 1/3 dos elementos de combustível presentes no núcleo são substituídos por elementos frescos a cada 12 a 18 meses; os restantes elementos são reposicionados no núcleo, de modo a atingir uma utilização (vulgarmente designada “queima”, por analogia com a combustão) mais uniforme. Ao ser retirado do núcleo ao fim de 3-4 anos, o combustível de um reator PWR ou BWR atinge uma queima média no intervalo 30-50 MWd/kgMP. A Figura 3. mostra a evolução com a queima

da quantidade de U-235, produtos de cisão, plutónio total e actínídeos menores, em g por kg de metal pesado inicial, em elementos de combustível UO₂ com um enriquecimento de 4%, obtida com o programa ORIGEN2¹⁸.

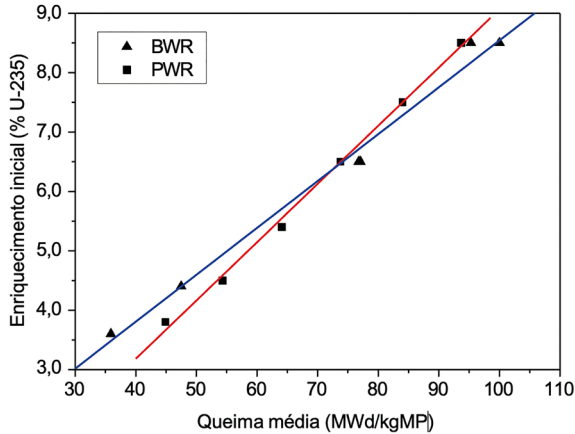


Figura 3. Variação com a queima das quantidades de U-235, produtos de cisão (PC), Pu-total e actínídeos menores (AM), em g por kg de metal pesado (urânio) inicial, para elementos de combustível UO₂ com um enriquecimento inicial de 4%. Calculado com o programa ORIGEN2¹⁸.

A quantidade de U-235 consumida não varia linearmente com a queima, devido à contribuição das cisões dos isótopos de plutónio (maioritariamente o Pu-239); na ausência destas cisões, o U-235 seria consumido a uma taxa de 1,25 g/MWd. Quando é atingida uma queima de 40 MWd/kgMP, restam ainda 20% do U-235 inicial (94,7% do urânio total inicial). Adicionalmente, encontra-se 9 g de Pu por kg de U inicial, bem como 3 g de actínídeos menores por kg de U inicial, formados a partir do U-238. O coeficiente de conversão deste tipo de reatores é da ordem de 0,3-0,5, refletindo o facto da quantidade consumida de isótopos cindíveis (U-235, Pu-239, Pu-241) ser 2-3 vezes superior à criada (Pu-239 e Pu-241). A criação de produtos de cisão é linear com a queima, sendo de aproximadamente 1 g/MWd por kg de U inicial. O valor médio da queima para um reator PWR era cerca de 30 MWd/kgMP em 1980, tendo aumentado para cerca de 45 MWd/kgMP em 2000¹⁹. Este aumento claro do valor médio da queima resulta essencialmente de melhoramentos introduzidos no fabrico de elementos de combustível,

que diminuam a taxa de falhas destes e permitiram o seu uso durante períodos progressivamente mais longos.

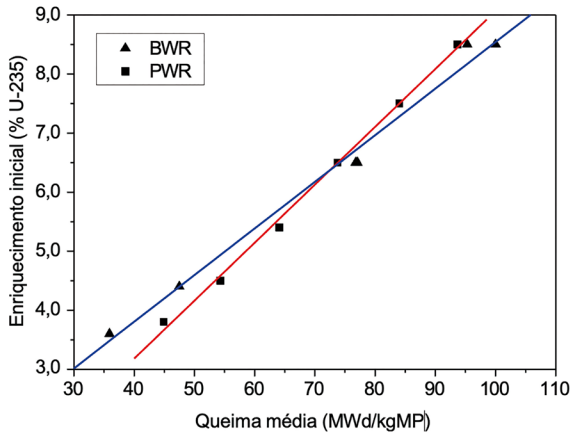


Figura 4. Relação entre enriquecimento inicial do combustível usado em reatores BWR e PWR e queima média atingível. Adaptado da referência²⁰.

A Figura 4 mostra a relação entre o enriquecimento inicial do urânio e o valor médio da queima atingível, na prática, em reatores BWR e PWR. As ligeiras diferenças entre as duas curvas são devidas aos diferentes tipos de elementos de combustível e respetivos esquemas de rotação. Nas condições atuais, usando urânio enriquecido a menos de 5%, podem ser atingidas queimas da ordem de 50 a 60 MWd/kgMP [20], sendo esses valores os esperados para os novos reatores da Geração III+²¹.

Para atingir queimas superiores a 60 MWd/kgMP é necessário aumentar o enriquecimento inicial do urânio para valores superiores a 5%. Contudo, este aumento coloca problemas importantes. O enriquecimento inicial do combustível tem sido sempre inferior a 5% porque este limite garante que não é formada uma massa crítica, com qualquer quantidade de material, na ausência de meio moderador. Embora com menos impacto que os acidentes em reatores nucleares, estão documentados diversos acidentes de criticidade [22], dos quais o mais recente ocorreu em Tokaimura (Japão) em 1999. A eventual alteração deste limite em reatores BWR e PWR tem implicações em

todo o atual ciclo de combustível. As necessárias adaptações teriam custos elevados que, eventualmente, não compensariam os ganhos²⁰. É de notar que são fabricados elementos de combustível com enriquecimento superior a 5%, nomeadamente para reatores de investigação (19.75% e, em alguns casos, 93%), embora a escalas muito menores. Para além de considerações de carácter económico, existem limites do ponto de vista físico. Embora a evolução do combustível de UO_2 com a irradiação seja genericamente conhecida até queimas da ordem de 100 MWd/kgMP²³, ainda não há consenso quanto aos mecanismos que levam às modificações estruturais observadas²⁴. Outro aspeto que merece atenção é a possibilidade de libertação de produtos de cisão, por rutura na bainha do combustível. Nas condições atuais de operação, em média, menos de uma em cada 100 mil varetas de combustível falha por ano. Contudo, espera-se que esta taxa aumente significativamente para queimas acima de 60 MWd¹⁰. As consequências de uma rutura limitada são sobretudo económicas, já que uma eventual paragem de um reator para substituição de um elemento de combustível com fuga (sem impacto significativo na segurança) tem um custo da ordem de 1 M€/dia. O conjunto destes fatores fazem com que a queima fique, na prática, limitada a 50-60 MWd/kgMP com o atual parque de reatores BWR e PWR.

O armazenamento a longo prazo de resíduos radioativos é um dos principais obstáculos à aceitação da energia nuclear de cisão. A solução preconizada para este problema é o seu armazenamento em depósitos geológicos profundos. A viabilidade desta solução foi, indiretamente, demonstrada pelos reatores naturais de Oklo²⁵, onde os produtos de cisão migraram apenas alguns metros durante milhões de anos de armazenamento, mesmo sem barreiras tecnológicas. Diversos países implementaram laboratórios a alta profundidade para estudar problemas relacionados com o armazenamento de resíduos em depósitos geológicos nas últimas décadas²⁶. Embora com atraso em relação ao inicialmente planeado, os primeiros depósitos geológicos devem começar a ser usados na década de 2020, com destaque para a Finlândia²⁷.

O tempo de isolamento da biosfera é normalmente definido recorrendo ao conceito de radiotoxicidade. A Figura 5 mostra a evolução com o tempo da radiotoxicidade dos resíduos radioativos relativamente ao urânio natural, para combustível UO_2 com uma queima de 51 MWd/kgMP²⁸. Os produtos de cisão são os principais contribuintes para a radiotoxicidade nas três primeiras décadas. Depois os actínideos tornam-se os principais contribuintes e, a partir de 100 anos de decaimento, são quase inteiramente responsáveis pela radiotoxicidade. Após cerca de 250 mil anos de decaimento, esta radiotoxicidade (por via de ingestão) é equivalente à do urânio natural e seus produtos de decaimento, tomando em conta a massa requerida para fabricar o combustível.

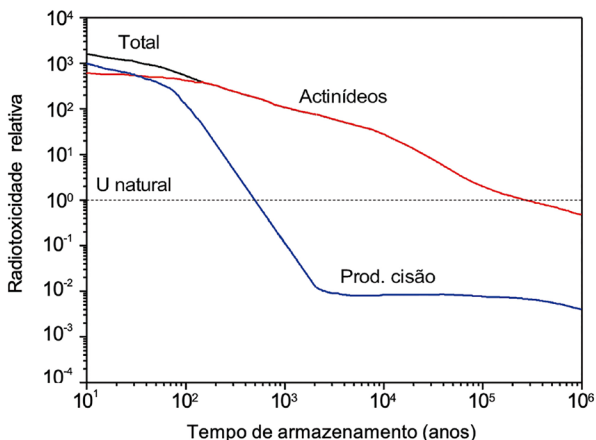


Figura 5. Radiotoxicidade dos resíduos radioativos relativamente ao urânio natural para combustível UO_2 com uma queima de 51 MWd/kgMP. Adaptado da referência [28].

Nos EUA, onde não está implementada a separação e reciclagem, são descarregadas 2,1 kt de elementos de combustível por ano, provenientes de 104 reatores²⁹. Se tomarmos uma queima de 40 MWd/kgMP, podemos estimar que estão incluídos 15-20 t de plutónio (total) e aproximadamente a mesma quantidade de U-235 nos resíduos a armazenar nos EUA, por ano. Por outro lado, a capacidade do depósito geológico na montanha Yucca é 70 kt, estimando-se que a quantidade de elementos de combustível que

aguarda armazenamento definitivo já tenha atingido este valor³⁰. Assim, será necessário aumentar a capacidade de armazenamento na montanha de Yucca, ou encontrar alternativas.

Impõe-se assim trabalhar em dois pontos básicos: (i) redução do tempo de armazenamento, e (ii) redução do volume a armazenar.

No tocante ao tempo de armazenamento, a Figura 5 indica claramente que este pode ser drasticamente reduzido se os actínideos forem completamente separados e apenas forem armazenados os produtos de cisão. A separação e reciclagem têm ainda um impacto significativo na redução do volume de resíduos a armazenar, já que o urânio representa mais de 90% do volume que seria armazenado sem reciclagem. Para além disso, permite também reduzir a quantidade de urânio natural necessária para o parque de reatores.

Sem separação, o impacto do aumento da queima reflete-se no volume a armazenar, mas não no tempo de armazenamento, uma vez que a composição é essencialmente a mesma. Efetivamente, ao passar de uma queima de 40 para 60 MWd/kgMP, há uma extensão em 50% da vida útil do combustível. No caso em que é usado um ciclo aberto, sem separação e posterior reciclagem, esta extensão traduz-se imediatamente numa redução por um fator de 1,5 no volume de resíduos (combustível irradiado) a armazenar. No tocante à redução do material de base necessário para produzir uma nova carga de combustível, esta seria pelo mesmo fator se o enriquecimento inicial do material já permitisse atingir a queima de 60 MWd/kgMP. Se for necessário aumentar o enriquecimento, por exemplo de 4% para 5%, então é necessário mais 30% de material de base, pelo que a redução se ficaria pelos 16%. No tocante ao conteúdo do combustível irradiado, considerado enquanto resíduo, nem todas as quantidades aumentam de 50%, tal como a Figura 3. indicia, devido ao aumento da quantidade de plutónio cindido. Assim, enquanto a quantidade de produtos de cisão aumenta 50%, a de actínideos menores aumenta 41% e a de plutónio total aumenta apenas 21%.

O custo unitário do urânio separado é, grosso modo, o dobro do custo do urânio natural³¹. Um estudo para França, considerando os custos de

transporte, armazenamento (de elementos de combustível ou de resíduos após reciclagem) e eventual reciclagem, aponta para um custo global apenas 2% superior para um ciclo com reciclagem, quando comparado com um ciclo aberto³². Neste caso, o aumento imposto pela reciclagem é praticamente compensado pelo decréscimo nos custos de armazenamento de uma menor quantidade de resíduos.

Um combustível com um enriquecimento inicial de 4% fica com o mesmo reduzido a 0,85% ao atingir uma queima de 40 MWd/kgMP, o que é marginalmente superior ao valor no urânio natural. O urânio separado pode ser re-enriquecido, embora sejam normalmente necessárias instalações distintas das usadas para proceder ao enriquecimento a partir do urânio natural, para evitar contaminações de toda a cadeia³³. A composição típica do urânio separado inclui, para além de U-238, U-232 (0,1-0,3 ppm), U-234 (0,01-0,03%), U-235 (0,5-1%), U-236 (0,4-0,7%), e vestígios de Tl-208³⁴. Os isótopos U-232 e U-236 não existem no urânio natural e são introduzidos pelo ciclo de combustível³³. O Tl-208 resulta do decaimento do U-232 e tem emissão gama a 2,6 MeV, a qual dificulta o manuseamento e transporte do urânio separado. O U-236 é essencialmente um absorvedor de neutrões num reator a neutrões térmicos e tem de ser compensado com um ligeiro aumento de U-235, diminuindo assim o valor do urânio reprocessado.

O urânio separado pode também ser usado em reatores CANDU, sem necessidade de ser re-enriquecido, mas este tipo de aproveitamento ainda não foi licenciado. Um reator CANDU típico da Geração II consome 100 t de urânio natural por ano, pelo que a frota destes reatores no Canadá poderia consumir até 2800 t de urânio separado por ano³³.

A separação do plutónio é polémica, dada a sua possível aplicação militar. O urânio e o plutónio são separáveis dos produtos de cisão usando o processo químico PUREX (ou variações deste), desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial³⁵. Embora o plutónio obtido em períodos de irradiação longos, típicos dos reatores PWR e BWR, tenha uma fração demasiado elevada de Pu-240 (com cisão espontânea 10 mil vezes superior à do Pu-239) para ser considerado de “qualidade militar”, pode mesmo assim ser

usado³⁶. Isto leva a que diversos países não façam reciclagem do combustível usado³⁷. Procura-se, nos reatores da Geração IV, que não seja necessário usar o plutônio separadamente, de modo a minorar este problema³⁸. Como alternativa, pode ser usado o processo UREX, no qual o urânio e o tecnécio são separados num primeiro passo, sendo possível remover depois cério e estrôncio, bem como separar os actínídeos restantes dos lantanídeos (com elevadas secções eficazes de captura de neutrões), de modo a viabilizar a cisão posterior dos actínídeos¹⁰.

O plutônio separado pode ser cindido em reatores especialmente concebidos para este fim³⁹, ou usado em elementos de combustível "Mixed OXide" (MOX) nos atuais reatores. Na prática, a utilização de MOX tem correspondido a um ciclo de combustível apenas parcialmente fechado, já que atualmente não é feita qualquer reciclagem deste combustível. A utilização de combustível MOX nos reatores atuais, normalmente limitada a cerca de 1/3 do núcleo para preservar as margens de segurança⁴⁰, leva a uma poupança da ordem de 15% do urânio natural necessário ao funcionamento do reator⁴¹. O combustível MOX não requer urânio enriquecido, sendo normalmente utilizado urânio empobrecido, o qual, de outra forma, seria um resíduo. Adicionalmente, a utilização de 1/3 de MOX no núcleo torna um reator quase neutro quanto à produção de plutônio, já que a quantidade consumida é quase igual à produzida. Em cada elemento MOX são consumidos cerca de 9 kg de plutônio (considerando 4% de plutônio cindível inicial e uma queima de 40-50 MWd/kgMP), e evita-se a formação de cerca de 5 kg de plutônio, que ocorreria num elemento de combustível apenas com UO₂. Em contraste, num reator com potência (elétrica) de 1 GW são produzidos cerca de 200 kg de plutônio por ano só com combustível UO₂.

O combustível MOX tem custos adicionais relativamente ao combustível UO₂, dado que a manipulação de plutônio é necessariamente feita em condições mais restritivas que a de urânio. No mercado Europeu, onde existem instalações construídas nas últimas décadas, o custo de fabricação do combustível MOX é de 1000-1500 USD/kgMP, enquanto o do combustível UO₂ é 200-300 USD/kgMP³². Nos EUA, onde não é atualmente usado combustível

MOX, o custo para fabricar este tipo de combustível foi estimado em 1500 USD/kgMP, em contraste com 240 USD/kgMP para combustível UO₂ para PWR e 290 USD/kgMP para combustível UO₂ para BWR^{41,42}. Contudo, grande parte do custo estimado para fabricar o combustível MOX é devido ao investimento para construção de uma instalação para esse fim⁴².

Para os actínídeos menores, a solução preconizada é a sua cisão em reatores a neutrões rápidos (por vezes, abusivamente designada “incineração”). Alternativamente, poderão ser usados sistemas híbridos reator-acelerador, designados “Accelerator Driven Sub-critical system” (ADS), nos quais são obtidos neutrões adicionais por ação de um feixe de protões de alta energia. Esses neutrões extra permitem a operação de um reator com combustíveis contendo actínídeos menores (e alguns produtos de cisão com períodos de semi-desintegração longos) que não seria possível usar em reatores convencionais. Tudo indica que a instalação MYRRHA no SCK-CEN (Bélgica) será o primeiro sistema ADS a ser testado na década de 2020^{43,44}.

Existem assim diversas soluções tecnológicas que permitirão reduzir significativamente tanto o volume de resíduos radioativos como o tempo de armazenamento.

3. TECNOLOGIA DOS REATORES DE CISÃO

A tecnologia dos reatores de cisão continua fortemente marcada por opções tomadas nas décadas de 1940 e 1950. A Figura 6 ilustra a evolução das gerações de reatores de cisão, desde os protótipos dos anos 50, considerados como Geração I, até aos reatores da Geração IV, ainda em desenvolvimento.

Foi cedo demonstrado que a utilização de água pesada como moderador permitia estabelecer uma reação em cadeia usando urânio natural, sendo que o mesmo não acontecia com água natural, devido às capturas parasitas no hidrogénio⁴⁵. A escassez inicial de água pesada no início da década de 1940 levou a estudar a utilização de carbono como moderador, tendo os primeiros testes sido realizados no Canadá por George Laurence a partir de 1940⁴⁶. Este conceito só foi provado em dezembro de 1942, com a primeira

“pilha atômica” de Enrico Fermi (posteriormente designada “Chicago Pile 1”, ou CP-1) que usou 385,5 t de grafite e 35,4 t de urânio natural, sob a forma de urânio metálico e óxidos de urânio, com maior pureza do que conseguido anteriormente ⁴⁷.

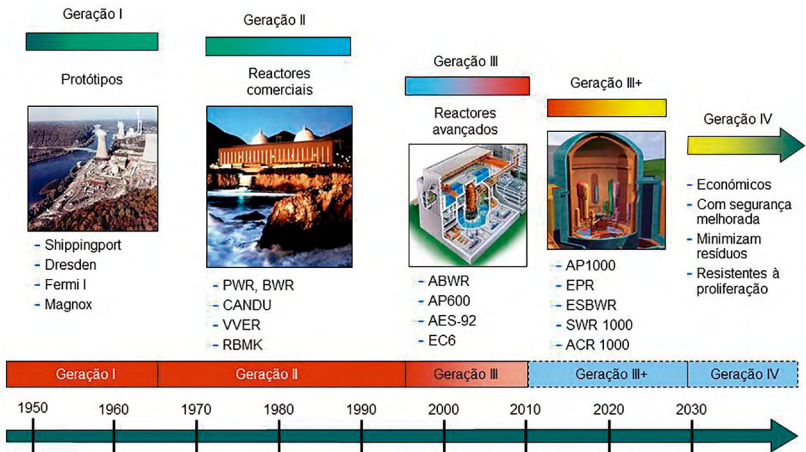


Figura 6. Evolução das gerações de reatores de cisão, desde os protótipos da década de 1950 até à Geração IV, em desenvolvimento. Adaptado da referência³⁸.

O primeiro reator usando água pesada foi construído apenas em 1944⁴⁸, tendo sido decidido, a nível político, continuar o desenvolvimento desta linha de reatores no Canadá⁴⁶. Nos anos seguintes, os primeiros reatores em diversos países foram implementados segundo uma ou outra destas linhas, dado não existir urânio enriquecido disponível para este fim e, também, pelo interesse na obtenção de plutônio para armas nucleares. Contudo, na primeira conferência “Átomos para a Paz” em Genebra, em 1955, foram discutidos cerca de uma centena de conceitos de reatores, número esse reduzido para doze na segunda destas conferências, em 1958⁴⁹.

A linha de reatores moderados a grafite e usando urânio natural representa atualmente menos de 1% do total de reatores⁶, com tendência para desaparecer. Os reatores Magnox foram desenvolvidos no Reino Unido (RU) para geração de eletricidade e produção de plutônio⁵⁰, tendo o último deste tipo de reatores sido encerrado em 2015⁵¹. Em França foram igualmente

desenvolvidos reatores seguindo o mesmo princípio, os quais foram abandonados ainda na década de 1970 em favor de reatores PWR, construídos sob licença da Westinghouse⁵². Tanto o RU como a Rússia mantêm reatores moderados a grafite, mas que usam combustível ligeiramente enriquecido: os “Advanced Gas Reactor” (AGR) no caso do RU e os “Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny” (RBMK) no caso da Rússia. No entanto estes tipos de reatores serão abandonados, no caso do RU até 2028⁵¹ e, no caso da Rússia, em 2034⁵³.

O Canadá introduziu a linha de reatores CANDU que usa urânio natural e água pesada como moderador e fluido de arrefecimento. Neste tipo de reatores não há um vaso de pressão, mas centenas de tubos de pressão, no interior dos quais é colocado o combustível e circula o fluido de arrefecimento. O moderador é mantido a baixa temperatura e baixa pressão num vaso com um diâmetro da ordem de 6 m, a calandra, que contém os tubos de penetração dispostos numa matriz regular. Esta opção tecnológica deve-se ao facto do Canadá não ter inicialmente capacidade de produzir vasos de pressão com grandes dimensões, já que o núcleo de um reator moderado a água pesada é maior do que o núcleo de um reator moderado a água natural. Não obstante os CANDU terem sido exportados para diversos países, não têm sido anunciadas novas construções deste tipo de reatores, nem no Canadá, nem em outros países, embora a Índia prossiga a construção de reatores com algumas semelhanças no seu programa nacional⁵⁴.

Os atuais reatores PWR tiveram a sua origem numa proposta de Alvin Weinberg em 1946⁵⁵, que foi depois tomada no programa de propulsão naval dos EUA liderado pelo Almirante Hyman Rickover. A importância estratégica da utilização de energia nuclear na propulsão naval foi reconhecida ainda na década de 1940⁵⁶. No entanto, nenhum dos tipos de reatores então existentes era apropriado para propulsão naval. Era necessário reduzir drasticamente o volume do reator, de modo a ser possível a sua integração num submarino e, sem grandes adaptações, num navio. No tocante ao meio moderador e de transferência de calor do reator naval, foi decidido testar duas alternativas: um reator usando água natural, a qual seria mantida a

alta pressão para não entrar em ebulição, a ser construído pela Westinghouse, e um reator usando sódio líquido, a ser construído pela General Electric. Os dois conceitos foram provados, respetivamente, nos submarinos “USS Nautilus” (1954) e “USS Seawolf” (1956), tendo sido decidido que o reator moderado a água era o mais adequado, embora o reator usando sódio líquido fosse ainda mais compacto⁵⁷. Vingou assim a linha de reatores PWR, usando urânio enriquecido colocado dentro de varetas de uma liga de zircónio, que evitam a corrosão na água a alta temperatura e apresentam uma reduzida absorção parasítica de neutrões térmicos. O primeiro PWR ligado à rede elétrica em 1956, com apoio do governo federal dos EUA, foi o reator de Shippingport, que se destinava a um porta-aviões, entretanto cancelado⁵⁸. Na competição entre as grandes potências, a URSS tinha já ligado à rede, em 1954, o reator AM-1, em Obninsk; tratava-se de um protótipo dos RBMK, com uma potência elétrica de apenas 5 MW⁵⁹. A URSS só lançou em 1964 a sua linha de reatores do tipo PWR, designada “Vodo- Vodyanoi Energetichesky Reactor” (VVER)²¹.

Os reatores BWR resultaram da competição entre a Westinghouse e a General Electric pela construção do primeiro reator comercial para geração de eletricidade. A competição foi vencida em 1960 pela General Electric com o reator “Dresden”, um híbrido no qual a água podia, ou não, entrar em ebulição. O “Dresden” provou o conceito de reator a água ebuliente e conduziu à linha dos atuais BWR nos quais o vapor é gerado já no vaso de pressão⁵⁸.

O programa americano de desenvolvimento de reatores navais teve um profundo impacto também na adoção de estratégias de segurança, dado não ser possível num navio ou submarino garantir a segurança da tripulação apenas por isolamento e distância. É de salientar que os sistemas de controlo têm de garantir três funções básicas de segurança: controlo da potência e da reatividade, arrefecimento do combustível e confinamento dos produtos de cisão. A fiabilidade destes sistemas é aumentada implementando diversidade e redundância de meios em todos os pontos críticos. A complexidade dos sistemas de controlo aumentou à medida que a potência térmica dos

reatores aumentou, desde a ordem de 100 MW nos protótipos iniciais, até cerca de 4000 MW nos reatores mais recentes. Este aumento foi impulsionado por razões económicas, já que a duplicação da potência de um reator onera, em média, o seu custo de construção em apenas 46%³². Razões económicas também impulsionaram a construção de diversas unidades na mesma localização, com partilha de diversas estruturas comuns.

Os reatores atualmente em exploração são maioritariamente da Geração II. O Japão foi pioneiro na introdução de reatores da Geração III, com três unidades do “Advanced Boiling Water Reactor” (ABWR), a primeira das quais entrou em exploração em 1996. Os reatores da Geração III e III+ recorrem a conjuntos mais alargados de seguranças ativas, como é o caso do “Evolutionary Pressurized Reactor” (EPR), desenvolvido pela Areva, ou a sistemas fundamentalmente passivos, como é o caso do AP1000, desenvolvido pela Westinghouse.

Os sistemas passivos têm a vantagem de não depender de fontes externas de água ou eletricidade, ficando virtualmente imunes a cenários como o ocorrido em Fukushima-I, em que todas as fontes externas de eletricidade e de arrefecimento falharam nas primeiras horas após o sismo e maremoto, tendo como consequência grave a fusão dos núcleos, por arrefecimento deficiente. A probabilidade de fusão do núcleo destes novos reatores é tipicamente uma ordem de grandeza inferior à dos reatores atuais, havendo ainda, na maior parte dos casos, sistemas destinados a reter e arrefecer o núcleo fundido no interior do edifício do reator, de modo a reduzir para menos de 10^{-7} por reator-ano a probabilidade de libertação de produtos de cisão para o ambiente²¹.

Não obstante, nas últimas duas décadas foram apresentados diversos projetos de reatores com baixa potência, na sua maioria de construção modular, os “Small Modular Reactors” (SMR)⁶⁰. Entre outras vantagens, é esperado que a construção deste tipo de reatores seja mais rápida, a sua inserção na rede mais simples, e que as consequências de um possível acidente sejam menos graves^{60,61}. As potências relativamente baixas fazem com que seja mais fácil implementar mecanismos de segurança intrínseca, por

exemplo, arrefecimento por convexão natural. Os SMR são sistemas de 3.^a Geração, representando um certo “regresso à origem” — com efeito uma boa parte dos SMR são PWR com geração de vapor integrada no vaso de pressão, seguindo configurações usadas em propulsão naval. Apesar de já terem sido apresentados dezenas de conceitos SMR^{60,62}, estes encontram-se com graus de maturidade distintos⁶¹. A Tabela 1 apresenta as características principais de modelos de SMR que se encontram em processo de pré-licenciamento ou licenciamento.

Tabela 1. Modelos de reatores SMR em estado avançado de prontidão.

Modelo	Tipo	Potência elétrica (MW)	Proponente	Países com licenciamento em progresso
US460	PWR	77	NuScale	EUA, Canada
SMR160	PWR	160	Holtec	EUA, Canada
BWRX-300	BWR	300	GE Hitachi	EUA, Canada
mPower	PWR	180	Babcock & Wilcox	EUA
UK SMR	PWR	440	Rolls Royce	Reino Unido

Em contraste, os reatores da Geração IV vão introduzir alterações tecnológicas significativas em relação aos reatores atuais, destacando-se o ressurgimento de reatores a neutrões rápidos e a utilização de temperaturas de operação mais elevadas para aumentar o rendimento dos reatores. Nos seis conceitos em desenvolvimento³⁸, três são reatores a neutrões rápidos, o “Sodium cooled Fast Reactor” (SFR), o “Lead cooled Fast Reactor” e o “Gas cooled Fast Reactor” (GFR). A estes juntam-se o “Very High Temperature Reactor” (VHTR) e o “Molten Salt Reactor” (MSR), a neutrões térmicos, e o “SuperCritical Water cooled Reactor”, que poderá ter um espectro de neutrões rápidos ou térmicos. Os conceitos não são inteiramente novos, já que na maior parte dos casos foram construídos protótipos no passado. Embora a construção deste tipo de reatores estivesse prevista para a década de 2030³⁸, esta meta parece ser muito ambiciosa. Nos EUA apontava-se para a construção de um tipo de reator a neutrões rápidos⁶³, estando a Westinghouse a trabalhar num SFR. Em França apostou-se essencialmente no SFR, tirando partido da experiência anterior nos reatores “Phénix” e “Super- Phénix”⁶⁴.

No entanto o projeto Francês ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration) foi cancelado em 2019, considerando-se que este tipo de reatores só será desenvolvido na 2.^a metade do século.

4. OUTROS FATORES

A energia nuclear já contribui para a redução das emissões de GEE. Embora tecnicamente os reatores nucleares não emitam GEE durante o funcionamento, podem ser calculadas emissões tomando em conta todo o ciclo referente ao combustível, bem como a construção e desmantelamento da instalação. O valor médio de 19 estudos é de 66 g C_{eq}/kWh , com valores no intervalo 1,4-288 g C_{eq}/kWh , sendo a dispersão de valores essencialmente devida a variações nos cenários considerados⁶⁵.

Se não existisse o parque atual de reatores de cisão e a eletricidade por eles produzida fosse distribuída por outras formas de produção nos países da OCDE, as emissões de GEE aumentariam cerca de 1/3, o que tornaria mais difícil atingir as necessárias reduções de emissões. Neste estudo, as emissões associadas aos reatores de cisão são 2,5-2,7 g C_{eq}/kWh , para centrais térmicas convencionais são 105-366 g C_{eq}/kWh e para fontes renováveis são 2,5-75 g C_{eq}/kWh [66]. Não obstante esta contribuição, o papel da energia nuclear tem sido frequentemente menorizado⁶⁷.

Recentes decisões de alguns países em abandonar a energia nuclear e promover a sua substituição por energias renováveis vieram reforçar, junto da opinião pública, a ideia de que a energia nuclear está em competição com estas. Contudo, as características técnicas e económicas da energia nuclear fazem com que seja adequada apenas para geração de base. O impacto da energia nuclear é atualmente limitado à produção de eletricidade, não tendo influência no sector dos transportes terrestres. Só a poderá ter se a frota automóvel passar a ser fundamentalmente elétrica ou usar hidrogénio produzido por via nuclear.

É inevitável considerar cenários de expansão da energia nuclear. Contudo, estes revelam alguns pontos fracos. Num estudo de van der Zwaan

[68], tomou-se como ponto de partida que as necessidades de energia até 2075 triplicam, enquanto as emissões de GEE apenas duplicam. Consideraram-se então duas alternativas, uma em que a potência instalada em reatores nucleares se mantém no nível atual, e outra em que aumenta gradualmente por um fator de 10 até 2075. Não foi considerado qualquer impacto no sector dos transportes. Uma expansão por um fator de 10 permitiria que mais de 50% da eletricidade fosse obtida por esta via, com uma redução de 21% das emissões de GEE em 2075, ou 15% nas emissões acumuladas até este ano. Com uma expansão realizada com reatores da Geração III/III+ a probabilidade de ocorrência de um acidente grave com libertação de produtos de cisão para o ambiente seria inferior à atual, dado que a probabilidade deste tipo de ocorrência nestes reatores é tipicamente uma ordem de grandeza inferior à dos reatores atuais²¹.

Por outro lado, se esta expansão fosse feita apenas com reatores da Geração III e III+, os recursos naturais discutidos no Capítulo 2 seriam provavelmente consumidos ainda antes de chegar a 2075, o que não é contemplado no estudo referido⁶⁸. Adicionalmente, se não fosse implementada a reciclagem de combustível em larga escala, seriam produzidos cerca de 50 kt de combustível irradiado por ano, considerando já alguma otimização em relação aos valores atuais. Para armazenar definitivamente estes resíduos seria necessário, a nível mundial, um novo depósito geológico com a dimensão do construído nos EUA a cada 18 meses. Este cenário de expansão não é sustentável nestas condições.

Uma expansão significativa só será possível com a entrada em exploração de reatores com soluções tecnológicas radicalmente diferentes, isto é, sistemas ADS, reatores de cisão da Geração IV, e/ou reatores de fusão. Em todos os casos há problemas técnicos a serem resolvidos, pelo que uma expansão será sempre limitada nas próximas 2 a 3 décadas, se apenas puderem ser usadas as soluções tecnológicas atualmente demonstradas.

5. ALTERAÇÕES NA PAISAGEM DA ENERGIA NUCLEAR

A paisagem da energia nuclear de cisão tem sofrido alterações significativas nas últimas décadas, em diversos aspetos. O primeiro é a distribuição geográfica dos reatores em operação. A Figura 7 mostra a distribuição do número de reatores nos três maiores blocos: Europa, América do Norte e Ásia, entre 1990 e 2020, com base em dados da AIEA⁶. Embora o número total de reatores não tenha sofrido grandes alterações, há um aumento claro do número de reatores em operação na Ásia, com decréscimos na Europa e na América do Norte.

O segundo aspeto é a capacidade de construção de novos reatores. Muito em consequência do aumento do número de reatores na Ásia nas últimas três décadas, a capacidade de construção está sobretudo neste continente, tanto em cadeias de abastecimento, como em experiência prática. A construção de novos reatores na Europa e nos EUA tem encontrado dificuldades inesperadas, a começar na componente de construção civil⁶⁹, as quais levaram a aumentos significativos no tempo de construção. Tendo em conta o impacto que o tempo de construção tem no preço final da eletricidade gerada, a perda de capacidade pode ser um entrave à expansão da energia nuclear fora da Ásia.

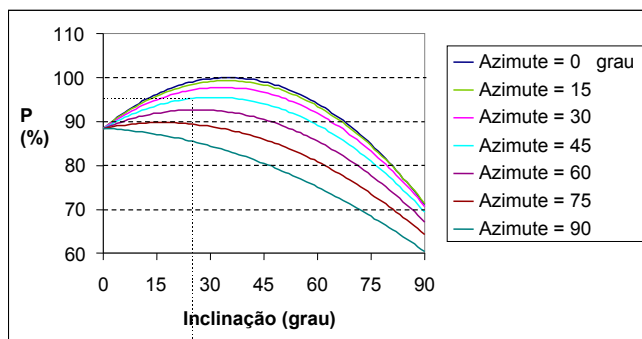


Figura 7. Evolução do número de reatores em operação na Europa, América do Norte e Ásia entre as décadas de 1990 e 2020.

A China destaca-se claramente no panorama atual⁷⁰. Tem 55 reatores em operação, na sua maioria do tipo PWR, tendo a potência instalada aumentado por um fator de 10 em apenas 20 anos. Se numa primeira fase a China importou tecnologia dos EUA, França e Canadá, rapidamente iniciou o desenvolvimento dos seus próprios reatores, para construção local e para exportação. O melhor exemplo deste crescimento é o reator “Hualong One” de Geração III⁷¹, desenvolvido na China, que integra características de reatores PWR desenvolvidos pela Areva e pela Westinghouse e que já foi aprovado para construção na União Europeia e no Reino Unido. Para além da tecnologia PWR, a China está a investir no desenvolvimento de outras tecnologias, incluindo reatores a neutrões rápidos e reatores de alta temperatura.

6. CONCLUSÕES

Os atuais reatores nucleares de cisão demonstraram claramente as vantagens da energia nuclear, mas também as suas limitações. Perante uma opinião pública nem sempre favorável, a tendência das últimas décadas tem sido para melhorar o rendimento de conversão dos atuais reatores, e aumentar a sua vida útil de 40 para 60 anos. O acidente de Fukushima veio desafiar a lógica de manutenção de reatores concebidos há mais de 50 anos, baseados em soluções tecnológicas ultrapassadas.

As metas de redução das emissões de GEE, não só a curto, mas também a longo prazo, juntamente com a redução de recursos fósseis e o previsível aumento de consumo ditam que a energia nuclear não deve ser abandonada. Reatores da Geração III/III+, mais seguros e económicos do que os atuais, devem substituir os reatores mais antigos e assegurar, pelo menos, a continuidade da energia nuclear.

Enquanto se mantiver uma frota dominada por reatores a neutrões térmicos, a reciclagem do urânio tem um pequeno impacto a nível de recursos naturais, mas um grande impacto a nível da gestão de resíduos. Embora não seja possível com os reatores da Geração III/III+ resolver simultaneamente as questões associadas aos recursos naturais e aos resíduos, é possível

implementar uma expansão moderada da utilização de energia nuclear. Uma expansão significativa só será possível com recurso a novas tecnologias de reatores de cisão.

O fim da energia nuclear foi já declarado diversas vezes. A situação na era pós-Fukushima não é substancialmente diferente das eras anteriores. Ao longo de oito décadas têm sido encontradas novas soluções tecnológicas capazes de contribuir para a nosso desejo de melhor qualidade de vida, pelo que a energia nuclear continuará a desempenhar um papel importante, mesmo que longe da utopia da década de 1950.

REFERÊNCIAS

1. S. Fawzy, A.I. Osman, J. Doran, et al., *Strategies for Mitigation of Climate Change: A Review*, Environ. Chem. Lett. 18 (2020) 2069-2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
2. A. Abdulla, P. Vaishnav, B. Sergi, D.G. Victor, *Limits to Deployment of Nuclear Power for Decarbonization: Insights from Public Opinion*, Energy Policy 129 (2019) 1339-1346. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.039>
3. R.B. Hayes, *Nuclear Energy Myths Versus Facts Support It's Expanded Use - A Review*, Cleaner Energy Systems 2 (2022) 100009. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100009>
4. S.M. Cohn, *Too Cheap to Meter: An Economic and Philosophical Analysis of the Nuclear Dream*, State University of New York, Albany, 1997.
5. A.M. Weinberg, *Toward an Acceptable Nuclear Future*, Relatório ORAU/IEA(O)-77-31, Oak Ridge Associated Universities, 1977. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/09/398/9398571.pdf
6. International Atomic Energy Agency, *Power Reactor Information System*, <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
7. Our World in Data, <https://ourworldindata.org/grapher/elec-fossil-nuclear-renewables>
8. J.S. Walker, *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective*, University of California Press, Berkeley, 2004.
9. G. Steinhauser, A. Brandl, T.E. Johnson, Comparison of the Chernobyl and Fukushima Nuclear Accidents: A Review of the Environmental Impacts. *Science of the Total Environment* 2014, 470-471, 800-817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.029>

10. D. Olander, *Nuclear Fuels – Present and Future*, J. Nuclear Materials 389 (2009) 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.297>
11. Nuclear Energy Agency, *Uranium 2020: Resources, Production and Demand*, NEA, Paris, 2020.
12. A. Sousa, A.O. Bettencourt, J.C. Oliveira, R. Sérgio, *Centrais Nucleares em Portugal*, Projecto de Livro Branco, Ministério da Indústria e Tecnologia, Lisboa, 1978.
13. World Nuclear Association, *Uranium in Canada (updated 2022)*, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/canada-uranium.aspx>
14. World Nuclear Association, *Uranium Markets (updated 2022)*, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-markets.aspx>
15. M.K. Hubbert, *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*, Publication 95, Shell Development Company, Houston, 1956.
16. T.B. Cochran, H.A. Feiveson, W. Patterson, G. Pshakin, M.V. Ramana, M. Schneider, T. Suzuki, F. von Hippel, *Fast Breeder Reactor Programs: History and Status*, Research Report 8, International Panel on Fissile Materials, Princeton (NJ), 2011.
17. International Atomic Energy Agency, *Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges*, TECDOC-1450, IAEA, Vienna, 2005.
18. A.G. Croff, *ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials*, Nuclear Technology 62 (1983) 335-352.
19. J.G. Marques, *Evolution of Nuclear Fission Reactors: Third Generation and Beyond*, Energy Conv. Manag. 51 (2010) 1774-1780. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.043>
20. Nuclear Energy Agency, *Very High Burn-ups in Light Water Reactors*, Report 6224, NEA, Paris, 2006.
21. J.G. Marques, *Environmental Characteristics of the Current Generation III Nuclear Power Plants*, WIREs Energy Environ. 3 (2014) 195-212. <https://doi.org/10.1002/wene.81>
22. T.P. McLaughlin, S.P. Monahan, N.L. Pruvost, V.V. Frolov, B.G. Ryazanov, V.I. Sviridov, *A Review of Criticality Accidents: 2000 Revision*, LA-13638, LANL, Los Alamos, 2000.
23. D. Olander, *Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements*, TID-26711-P1, DOE, Washington, 1976.

24. V.V. Rondinella, T. Wiss, *The High Burn-up Structure in Nuclear Fuel*, *Materials Today* 13 (2010) 24-32. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70221-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70221-2)
25. L.V. Krishnan, *Oklo Natural Fission Reactor*, Chapter 7, *Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology and Applications*, J.H. Lehr, S.B. Krivit, T.B. Kingery (Eds.), Wiley, Hoboken, 2011, 51-56.
26. International Atomic Energy Agency, *The Use of Scientific and Technical Results from Underground Research Laboratory Investigations for the Geological Disposal of Radioactive Waste*, TECDOC-1243, IAEA, Vienna, 2001.
27. <https://www.posiva.fi/en/index.html>
28. Nuclear Energy Agency, *Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation*, Report 6894, NEA, Paris, 2011.
29. Nuclear Energy Agency, *Radioactive Waste Management and Decommissioning in the United States of America*, NEA, Paris, 2009. <http://www.oecd-nea.org/rwm/profiles/>.
30. M. Holt, *Nuclear Waste Disposal: Alternatives to Yucca Mountain*, Report R40202, Congressional Research Office, Washington, 2009.
31. I.A. Matthews, *Global Terrestrial Uranium Supply and its Policy Implications: A Probabilistic Projection of Future Uranium Costs*, MSc Thesis, MIT, Cambridge, 2010.
32. E. Bertel, G. Naudet, *L'Économie de l'Énergie Nucléaire*, EDP Sciences, Les Ulis, 2004.
33. G.D. Del Cul, L.D. Trowbridge, J.P. Renier, R.J. Ellis, K.A. Williams, B.B. Spencer, E.D. Collins, *Analysis of the Reuse of Uranium Recovered from the Reprocessing of Commercial LWR Spent Fuel*, TM-2007/207, ORNL, Oak Ridge, 2009.
34. E. Bertel, *Management of Reprocessed Uranium: Main Findings from an NEA Study*, TECDOC-CD-1630, IAEA, Vienna, 2009.
35. B. Goldschmidt, *Atomic Rivals*, Rutgers University Press, New Brunswick, 1990.
36. J.C. Marka, *Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium*, *Science & Global Security* 4 (1993) 111-128. <https://doi.org/10.1080/08929889308426394>
37. A. Andrews, *Nuclear Fuel Reprocessing: U.S. Policy Development*, Report RS22542, Congressional Research Office, Washington, 2008.
38. Nuclear Energy Research Advisory Committee & Generation IV International Forum, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, GIF-002-00, 2002.
39. National Academy of Sciences, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium: Reactor Related Options*, National Academy Press, Washington, 1995.
40. H.R. Trellue, *Safety and Neutronics: A Comparison of MOX vs UO₂ Fuel*, *Progr. Nucl. Energy* 48 (2006) 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.04.003>

41. Massachusetts Institute of Technology, *The Future of Nuclear Fuel Cycle*, MIT, Cambridge, 2011.
42. D.E. Shropshire, K.A. Williams, W.B. Boore, J.D. Smith, B.W. Dixon, M. Dunzik-Gougar, R.D. Adams, D. Gombert, E. Schneider, *Advanced Fuel Cycle Cost Basis*, INL/EXT-07-12107, Rev. 1, INL, Idaho Falls, 2008.
43. <https://myrrha.be/>
44. H.A. Abderrahim, P. Baeten, A. Sneyers, M. Schyns, P. Schuurmans, A. Kochetkov, G. Van den Eynde, J.-L. Biarrotte, *Partitioning and transmutation contribution of MYRRHA to an EU strategy for HLW management and main achievements of MYRRHA related FP7 and H2020 projects: MYRTE, MARISA, MAXSIMA, SEARCH, MAX, FREYA, ARCAS*, *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, 6 (2020) 33, <https://doi.org/10.1051/epjn/2019038>
45. R. Peierls, *Reflections on the Discovery of Fission*, *Nature* 342 (1989) 852-854.
46. Atomic Energy of Canada Limited, *Canada Enters the Nuclear Age*, McGill-Queens University Press, Montreal, 1997.
47. E. Fermi, *Experimental Production of a Divergent Chain Reaction*, *American Journal of Physics* 20 (1952) 536-558. <https://doi.org/10.1119/1.1933322>
48. S. Glasstone, *Nuclear Reactor Engineering*, D. Van Nostrand, Princeton, 1955.
49. R. Cowan, *Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in*, *The Journal of Economic History* 50 (1990) 541-567. <https://www.jstor.org/stable/2122817>
50. British Ministry of Defence, *Plutonium and Aldermaston: An Historical Account*, London, 2000.
51. World Nuclear Association, *Nuclear Power in the United Kingdom (updated 2023)*. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>
52. B. Goldschmidt, *The Atomic Complex: A Worldwide Political History of Nuclear Energy*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1982.
53. World Nuclear Association, *Nuclear Power in Russia (updated 2021)*. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>
54. World Nuclear Association, *Nuclear Power in India (updated 2024)*, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx>
55. A.M. Weinberg, F.H. Murray, *High Pressure Water as a Heat Transfer Medium in Nuclear Power Plants*, Report Mon-P-93, Clinton Labs, Oak Ridge (TN), 1946. <https://www.osti.gov/biblio/5092663>
56. F. Torres, B. Danzer-Kantof, *Les Atomes de la Mer - La Propulsion Nucléaire Française, Histoire d'un Outil de Dissuasion*, Le Cherche-Midi, Paris, 2022.

57. R.W. Pocock, *Nuclear Ship Propulsion*, Ian Allan, London, 1970.
58. J.W. Simpson, *Nuclear Power from Underseas to Outer Space*, American Nuclear Society, La Grange Park, 1995.
59. A. Kruglov, *The History of the Soviet Atomic Industry*, Taylor & Francis, London, 2002.
60. D.T. Ingersoll, *Deliberately Small Reactors and the Second Nuclear Era*, Prog. Nucl. Energy 51 (2009) 589-603. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.01.003>
61. Z. Liu, J. Fan, *Technology Readiness Assessment of Small Modular Reactor (SMR) Designs*, Prog. Nucl. Energy 70 (2014) 20-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.07.005>
62. International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2020 Edition)*, IAEA, Vienna, 2020
63. Department of Energy, *The U.S. Gen IV Fast Reactor Strategy*, DOE/NE-0130, DOE, Washington, 2006.
64. F. Carré, C. Renault, P. Anzieu, P. Brossard, P. Yvon, *Outlook on France's R&D Strategy on Future Nuclear Systems*, Int. Meeting on Research Reactor Fuel Management, Lyon, 2007.
65. B.K. Sovacool, *Valuing the Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power: A Critical Survey*, Energy Policy 36 (2008) 2950-2963. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
66. Nuclear Energy Agency, *Nuclear Energy and the Kyoto Protocol*, NEA, Paris, 2002.
67. F.C. Matthes, *Nuclear Energy and Climate Change*, Heinrich Böll Foundation, Berlin, 2005.
68. B.C.C. van der Zwaan, *Nuclear Energy: Tenfold Expansion or Phase-Out?*, Technological Forecasting & Social Change 69 (2002) 287-307. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(01\)00127-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(01)00127-5)
69. A. Ballesteros Avila, M. Peinador Veira, Z. Simic, *Operating Experience with Containment Buildings at Nuclear Power Plants*, JRC125565, EUR 30764 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, <https://doi.org/10.2760/161133>
70. L. Gil, *How China has Become the World's Fastest Expanding Nuclear Power Producer*, IAEA Bulletin, vol. 58, November 2017, <https://www.iaea.org/bulletin/how-china-has-become-the-worlds-fastest-expanding-nuclear-power-producer>
71. Nuclear Energy Agency, *Hualong One Working Group*, <https://www.oecd-nea.org/mdep/working-groups/hpr1000wg.html>

Energia Nuclear de Fusão

BRUNO SOARES GONÇALVES*

INTRODUÇÃO

A comunidade científica que trabalha em fusão nuclear está de olhos postos na energia do amanhã e tem feito todos os esforços para alcançar a meta o mais brevemente possível. Chegou finalmente o momento em que a fusão começa a ser encarada como uma necessidade e uma potencial solução, ainda que não imediata, a par com um forte investimento em energia renováveis.

A fusão nuclear é, há muito tempo, o desejado passo seguinte da energia nuclear, tornando esta ainda mais amiga do ambiente. A possibilidade de que a energia que chega às nossas casas possa vir de uma pequena estrela construída na Terra já esteve mais distante e poderá em breve deixar de ser ficção científica. É algo com que se sonha desde a segunda metade do séc. XX, mas a esperança é que ainda chegue a tempo de contribuir para o combate às alterações climáticas, no horizonte em que se planeia a transição energética, algures até 2050.

A fusão nuclear dará ao mundo uma fonte infinita de energia nuclear limpa, despachável e amiga do ambiente. Progressos científicos significativos abrem a perspetiva de um futuro próspero e com energia barata, ilimitada e segura, contribuindo para descarbonização e para combater a pobreza energética. A construção do ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) é fundamental para provar a viabilidade científica e tecnológica e testar a integração de muitas das tecnologias envolvidas, mas a concretização do futuro reactor demonstração DEMO é um passo essencial para

* Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

termos uma forma de produção de energia elétrica que não produz gases causadores do efeito de estufa e que sejam capazes de providenciar a eletricidade de base necessária para fazer face às intermitências das energias renováveis (eólica, solar).

O interesse em fusão tem vindo a crescer, com muito investimento público e privado a contribuir para o seu desenvolvimento. A comunidade científica que trabalha em fusão nuclear tem feito todos os esforços para alcançar a meta o mais brevemente possível e chegou finalmente o momento em que a fusão começa a ser encarada como uma necessidade e uma potencial solução. Nunca estivemos tão perto! Do ponto de vista tecnológico, estamos a entrar na era dourada dos primeiros verdadeiros avanços tecnológicos em direção aos reatores de fusão nuclear, na NIF, no ITER e nas novas máquinas que algumas start-ups estão a desenvolver. Podemos esperar deste redobrado interesse e investimento em novas ideias e novos avanços que concretizem o presságio de um dos cientistas fundadores da investigação em fusão nuclear, Lev Artsimoch: “Fusion will be ready when society needs it”.

1. ESTADO DA ARTE

As reacções de fusão ocorrem quando os núcleos têm velocidade suficiente para ultrapassar as forças repulsivas entre as suas cargas elétricas. No caso das reacções D-T, uma das reacções de fusão possíveis, são necessárias temperaturas acima de 100 milhões °C, bem acima da temperatura para a qual um gás está completamente ionizado e se torna um “plasma”. Para atingir tais temperaturas, é necessário um aquecimento significativo e as perdas devem ser reduzidas ao mínimo, devendo manter-se o plasma isolado termicamente das paredes materiais. Como um plasma apropriado para a fusão é muito quente é difícil de conter e tem de se evitar o contacto com as paredes materiais (que para além de danificá-las, também arrefece o plasma). Para tal, pode-se aproveitar o facto de o plasma ser constituído de partículas carregadas eletricamente apesar de, como um todo, o plasma

permanecer neutro. Uma das ideias mais promissoras usa campos magnéticos e correntes elétricas induzidas no plasma para desviar convenientemente as trajetórias das partículas de modo a mantê-las sempre dentro de uma região do espaço, minimizando a interação com as paredes — o chamado “confinamento magnético”.

Esta tarefa constitui um desafio, quer pelos complexos processos físicos envolvidos, quer pela necessidade de novas e sofisticadas tecnologias. O confinamento magnético do plasma é, com base no estado da arte, a opção mais promissora para produção de energia a médio prazo.

1.1. Fusão por confinamento magnético

O conceito de confinamento magnético consiste em aplicar um campo magnético elevado para confinar o movimento das partículas do plasma. O campo magnético previne as partículas de entrarem em contacto com a parede do reator, nas quais dissipariam a sua energia. Nos estudos de fusão nuclear são usados vários dispositivos com diferentes configurações magnéticas para confinamento magnético, sendo os mais comuns o *tokamak*, *stellarator* e *reversed field pinch* (RFP).

O primeiro avanço no uso pacífico da fusão como fonte de energia veio da Rússia em 1968, quando foi inventado um dispositivo de confinamento magnético com excelente capacidade de conter plasmas de alta temperatura. O dispositivo, denominado por tokamak (do russo toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami — câmara toroidal com bobines magnéticas), tem sido o foco principal das atividades de investigação em fusão desde então.

O tokamak foi desenhado em 1951 pelos Físicos Soviéticos Andrei Sakharov e Igor Tamm. No *tokamak*, um campo magnético toroidal forte (vários Tesla) é produzido por um conjunto de bobinas separadas de forma homogénea colocadas em torno da câmara toroidal do reator. A corrente elétrica é induzida no plasma por um solenoide central. Uma corrente toroidal elevada (10 a 20 milhões de Ampere num reator) é induzida por efeito de transformador no plasma e gera por sua vez um campo magnético poloidal. Como um transformador não pode gerar continuamente corrente (DC),

a corrente de plasma deve ser sustentada por outros meios. Apesar dos muitos desafios técnicos, o tokamak é considerado o design mais promissor para um reator de fusão nuclear.

O sucesso do tokamak levou à construção de grandes dispositivos que entraram em operação na primeira metade da década de 1980, como o Joint European Torus (JET) na Europa em Culham, Reino Unido e o Tokamak Test Fusion (TFTR) na Princeton Plasma Physics Laboratory, EUA. Por todo o mundo foram também construídos dispositivos e instalações complementares para investigar a ampla gama de desafios científicos, tecnológicos e de engenharia necessários para tornar a energia de fusão nuclear uma realidade.

O JET (Joint European Torus) foi, até ao final de 2023, o ponto focal do programa Europeu de Fusão e o único tokamak no mundo capaz de operar usando uma mistura de Deutério e Trítio, o combustível que será utilizado nos primeiros reatores comerciais para produção de energia elétrica baseada em fusão nuclear. Usado pelos 30 membros do consórcio EUROfusion, o JET é uma experiência coletiva desenhada para investigar o potencial da energia de fusão. Os plasmas do JET atingem temperaturas de 150 milhões de graus Celsius, dez vezes mais quentes que o centro do sol. A operação do JET é vital para preparar a operação do ITER, um dos maiores projectos científicos colaborativos da história. O JET pode atingir condições semelhantes às do ITER e às das futuras centrais de fusão, e é o único tokamak operacional no mundo onde se consegue usar a mesma mistura de combustível Deutério-Trítio (D-T) planeada para esses dispositivos. Por esse motivo esta infraestrutura única permitiu testar modelos de operação do plasma em preparação da operação do ITER. O JET foi construído e desenvolvido em Culham, Reino Unido, como um empreendimento comum da Comunidade Europeia desde 1977. A infraestrutura tem sido operada pela UKAEA desde 2000, tendo terminado o seu funcionamento em 2023. O programa de Investigação e Formação da Euratom contribuiu com aproximadamente 80% dos custos de operação do JET desde 1977 até o final de 2021.

Em dezembro de 2022, os investigadores do consórcio EUROfusion, 4800 especialistas, estudantes e técnicos vindos de toda a Europa, incluindo

investigadores do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) do Instituto Superior Técnico (Portugal), cofinanciados pela Comissão Europeia, usaram o JET para atingir um valor recorde de 59 megajoules de energia de fusão de um modo sustentado. O valor recorde foi a demonstração mais clara nos últimos 25 anos do potencial da fusão nuclear para fornecer energia de baixas emissões de carbono, segura e sustentável. Este feito mais do que duplica o anterior recorde de energia de fusão de 21,7 megajoules obtido em 1997. Em outubro de 2023, nas experiências finais com Deutério-Trítio (DTE3) realizadas no JET, uma elevada potência de fusão foi produzida de forma consistente por 5 segundos, resultando num recorde pioneiro de 69 megajoules de energia, usando apenas 0,2 miligramas de combustível. Estes resultados surgiram na sequência de campanhas experimentais concebidas pela EUROfusion com o objetivo de testar mais de duas décadas de avanços na fusão, e assim otimizar o arranque da operação do projeto internacional ITER. Os dados obtidos com estas experiências cruciais estão completamente alinhados com as previsões e representam um grande impulso para o ITER, um projeto de investigação em fusão maior e mais avançado que o JET.

Localizado no sul da França, o ITER^a está a ser construído por sete membros, China, União Europeia, Índia, Japão, Coreia do Sul, Rússia e EUA. O ITER é uma colaboração global inédita, que visa demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da energia de fusão. À medida que aumenta a pressão pública para que se combata os efeitos das alterações climáticas através da descarbonização da produção de energia, esta demonstração é um passo fundamental na demonstração da fusão nuclear como um meio seguro, eficiente e de baixas emissões para enfrentar a crise energética global. O ITER tem também como missão testar a integração de todas as tecnologias necessárias para uma central elétrica de fusão nuclear. O ITER será a maior instalação mundial de fusão. Quando concluído, será o primeiro dispositivo de fusão a produzir mais energia que a consumida

^a <http://www.iter.org/>.

para a sua operação ($P=500$ MW, $D=300$ s, $Q=10-20$), abrindo o caminho para a implementação subsequente dos reatores de fusão de demonstração (DEMO), seguidos por centrais comerciais de fusão. A Europa contribui com quase metade dos custos da sua construção, enquanto os outros seis integrantes desta parceria internacional, contribuem para o restante na mesma proporção.

1.2. Próximos dispositivos

Os dispositivos atualmente em construção e/ou projecto têm um “Technology Readiness Level” (TRL) 4 ou 5, e a maioria tem como objetivo principal demonstrar o ganho líquido de energia/multiplicação de potência ($Q>1$), com plasmas de fusão, e/ou escalas que confirmem o potencial da abordagem de fusão. Globalmente, as atividades públicas têm uma abordagem mais avessa ao risco, com esforços centrados no ITER e garantindo um controlo rigoroso sobre os vários componentes do dispositivo. Os prazos para os próximos dispositivos, resultantes do esforço de investimentos públicos na fusão, são na sua maioria longos. Ou seja, enquanto o primeiro plasma no ITER terá lugar provavelmente por volta de 2035–2036, as experiências mais importantes do ITER DT, aquelas que demonstrarão energia líquida, não terão lugar antes de 2040, na melhor das hipóteses, e possivelmente mais tarde.

Em contraste, as atividades privadas, muitas delas assentes em novos conceitos, têm prazos mais agressivos, e têm uma maior tolerância/necessidade de iteração de risco mais rápida. As principais empresas privadas de fusão anunciaram prazos para os seus próximos dispositivos nos próximos 5 anos, estes dispositivos pretendem demonstrar grandes progressos e potencial ganho líquido de energia/elevada multiplicação de potência. Pelo menos 11 das principais iniciativas privadas visam completar os próximos dispositivos antes de 2028, e com o financiamento assegurado e a construção em curso em muitos casos, há uma boa probabilidade de pelo menos algumas conseguirem cumprir os seus prazos, ou cumprirem com pequenos atrasos. Se concretizarão alguns dos objetivos e performances ambiciosas a que se propõe, é uma questão em aberto, havendo algum ceticismo da comunidade científica ligada à fusão nuclear.

1.2.1. O DEMO Europeu

O reator de DEMOnstração, geralmente designado por DEMO, refere-se ao conjunto de reatores de fusão destinados a demonstrar a produção de eletricidade com base em fusão nuclear. Na abordagem mais conservadora seguida pela comunidade fusão, o DEMO sucederá ao ITER do qual necessitará de resultados experimentais para consolidar o seu desenho. Com a transição do ITER para o DEMO, a fusão nuclear passará duma fase orientada para a ciência para uma fase orientada para a indústria e tecnologia necessária para a exploração comercial dos reatores de fusão nuclear.

As experiências de fusão atuais foram desenhadas com o principal objetivo de investigar a física de plasmas. O DEMO terá como objetivo principal a produção de eletricidade ainda que possa estar aquém, em potência e custo, do expectável para as futuras centrais comerciais. O DEMO deverá demonstrar as tecnologias necessárias para controlar um plasma muito mais potente que os existentes nos dispositivos atuais (ou dos que existirão no ITER), permitindo a geração de eletricidade de forma consistente e segura, garantindo também a fiabilidade do dispositivo e a manutenção regular e rápida de toda a infraestrutura. Um outro aspeto importante deste reator de demonstração é a capacidade para funcionar num ciclo-fechado de combustível, ou seja, com reprocessamento do Trítio produzido na camada fértil à medida que este é consumido no interior da máquina.

No dia 5 de julho de 2022, o consórcio europeu de investigação em energia de fusão nuclear, EUROfusion, anunciou o início das atividades de desenho conceptual para a primeira central europeia de demonstração de energia de fusão nuclear, DEMO. Espera-se que este dispositivo único de fusão nuclear, primeiro do seu tipo, entre em funcionamento em meados deste século e demonstre a produção de 300 a 500 MW de eletricidade proveniente de fusão nuclear e a sua ligação à rede. O projeto do DEMO da União Europeia é o mais consolidado. O desenho deste tipo de infraestrutura requer que se tenha em consideração, não só os requisitos da física, mas também as limitações tecnológicas e de engenharia. No âmbito da

EUROfusion está a ser desenvolvida a fundação para um desenho conceptual robusto. Esta fundação assenta nos seguintes aspetos principais:

- Escolha adequado da camada fértil (“Breeding Blankets”): Estes módulos são os componentes internos da parede do reator que irão absorver a energia da reação de fusão, produzir o Trítio e blindar os componentes exteriores à câmara, onde ocorre a reação, dos neutrões rápidos produzidos nas reações de fusão.
- Escolha do divisor adequado.
- Escolha do desenho adequado para a primeira parede (a parede em contacto direto com o plasma), a sua cobertura e a sua integração no dispositivo que permita sustentar a elevada deposição de calor esperada.
- Escolha da duração de pulso mínima e dos sistemas de aquecimento adequados.
- Desenho para que todas as atividades de manutenção possam ser efetuadas remotamente através de manipuladores.
- Incorporação de requisitos de segurança nuclear desde a fase de desenho conceptual do reator.

Para acelerar a transição para um reator comercial é também reconhecido que o desenvolvimento e validação de materiais sob irradiação é, não só da maior importância para o sucesso económico, mas está no caminho crítico para o uso da energia de fusão. Para ajudar a tornar o DEMO uma realidade, está em construção em Granada (Espanha) uma instalação de irradiação de neutrões para estudos e qualificação de materiais (IFMIF-DONES), integrada no roteiro europeu para eletricidade gerada por fusão.

1.2.2 Outros dispositivos de DEMONstração

Para além dos esforços da União Europeia existem muitos outros projetos que visam a construção de um reator de demonstração. Em outubro de 2019, a Agência atómica do Reino Unido anunciou o seu objetivo de construir o “Spherical Tokamak for Energy Production (STEP)”, com o

intuito de o ligar à rede elétrica em 2040. A China propôs a construção do CFETR, um dispositivo com capacidade para produção de 1 GW de eletricidade. A construção deste reator de demonstração Chinês está a ser antecipada pela construção de um outro reator, denominado Burning Plasma Experimental Tokamak (BEST), que servirá como plataforma para testar materiais, diagnósticos e tecnologias que possam ser aplicadas em reatores de fusão futuros. Também o Japão e a Coreia do Sul têm os seus projetos de DEMO. Nos Estados Unidos tem crescido o interesse do sector privado em conceitos alternativos de produção de energia elétrica com base em fusão nuclear e tem-se assistido a um crescimento do investimento de capital de risco em várias destas empresas.

A construção do DEMO é um passo essencial para abrir o caminho aos reatores de fusão comerciais.

1.3. Novos conceitos

Para além da construção do ITER, progressos no desenho do DEMO (nas várias versões seguidas por diversos países) e de projetos previstos em vários países existem também start-ups a explorar novas configurações, com lasers ou com campos magnéticos (a lista não é exaustiva):

Confinamento inercial por laser ou feixe de iões: a fusão é alcançada criando um plasma muito denso focando uma matriz de feixes de laser de alta energia ou feixes de iões num alvo pequeno (da ordem de um cm^3), que criam o calor e a densidade do combustível necessários para iniciar a reação de fusão, que é repetida num ciclo pulsado. O National Ignition Facility (NIF) nos EUA é o maior dispositivo experimental de fusão por confinamento inercial.

Confinamento inercial por projéteis: Um método diferente de comprimir a cápsula de combustível que usa um projétil de alta velocidade, que no impacto com o alvo produz as ondas de choque intensas necessárias para comprimir a cápsula de combustível Deutério-Trítio. A implosão criada pelas ondas de choque fornece a densidade de compressão e as altas temperaturas necessárias para formar um plasma confinado inercialmente, novamente executado num ciclo pulsado.

Alvo magnetizado, confinamento magnético e inercial combinado: baseado numa combinação de conceitos retirados da fusão por confinamento magnético e da fusão por confinamento inercial. Por exemplo, um plasma de Deutério-Trítio de baixa densidade é criado e confinado magneticamente num recipiente separado. Este é injetado na câmara de vácuo, onde é comprimido para atingir as condições de fusão por compressão mecânica rápida dum fluido condutor.

Confinamento magnético de configuração invertida de campo: contém o plasma no seu próprio campo magnético induzindo uma corrente elétrica toroidal dentro de um plasma cilíndrico. Um exemplo usa aceleradores de plasma para acelerar dois plasmas em direção a uma câmara central e, em seguida, aquece-os com feixes de partículas.

1.4. Desafios no desenvolvimento futuro da fusão

Existem vários desafios principais para a comercialização da energia de fusão, entre as quais se destacam:

- **Desempenho técnico:** nenhuma iniciativa de fusão até à data demonstrou ganho de energia com exceção dos resultados recentes, de fusão inercial, obtidos no final de 2022 na National Ignition Facility e corroborados com experiências adicionais em 2023. Um melhor controlo do plasma pode ajudar neste aspeto, mas outros grandes desafios técnicos relacionados com a tecnologia da camada fértil de Trítio (Tritium Breeding Blanket – TBM), ciclo do trítio, blindagem de neutrões, extração de energia e hardware (magnetos, lasers e alvos) e outros, continuam a ser importantes e difíceis de resolver. A extração da energia produzida para produção de energia elétrica também não foi demonstrada até ao momento num circuito fechado de arrefecimento. Embora seja em princípio visto como um problema fácil de resolver e expectável que o calor seja transformado em vapor que acionará uma turbina na realidade, a água como fluido de arrefecimento

poderá não ser suficientemente eficiente e será necessário considerar e testar o conceito com outros fluídos.

• **Ciclo de vida:** RAMI (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Inspeção), durabilidade e o desmantelamento da infraestrutura no seu fim de vida estão entre os desafios a longo prazo que precisam de ser enfrentados pela fusão. Na fase de instalação piloto, será necessário maior conhecimento sobre cada uma destas questões para dar confiança de que a energia de fusão é comercialmente viável. Uma preocupação que está intimamente relacionada com a durabilidade dos primeiros desenhos de centrais elétricas é como poderão estas ser mantidos para facilitar um desempenho elevado contínuo e prolongar a vida útil da máquina. Esta é uma importante consideração de conceção, em termos de acessibilidade, e também em termos de manipulação remota e/ou tecnologias robóticas que terão de ser desenvolvidas. As iniciativas públicas já estão a fazer alguns esforços no sentido de resolver estas barreiras. As primeiras instalações piloto deverão demonstrar aspetos chave. Será essencial para as primeiras instalações comerciais, assegurar a durabilidade, alta disponibilidade e baixa manutenção dos componentes, contribuindo para o sucesso da instalação e para redução dos seus custos de manutenção. No final da vida funcional, a central de fusão terá de ser desativada. Para a fissão nuclear, isto envolve o encerramento da central, a remoção do material nuclear e a restauração ambiental do local. Todo o processo é complexo e normalmente leva 20 a 30 anos a ser concluído. Neste momento, desconhece-se como o desmantelamento das centrais de fusão se compara ao desmantelamento das centrais de fissão. Por exemplo, é difícil prever qual será o impacto ambiental do funcionamento contínuo da central de fusão. O desmantelamento é um tópico que é

reconhecido como importante, mas que está atualmente na sua infância.

- **Construção:** a construção e implantação de centrais de fusão requer, entre outros, a disponibilidade da cadeia de fornecimento, que permanece ainda bastante imatura e em pequena escala, para muitos componentes chave. A inexistência de recursos humanos, altamente instruídos e com profundo conhecimento de engenharia, em quantidade suficiente é um importante estrangulamento. A primeira central de fusão DEMO será um projeto inédito e semelhante ao ITER, uma máquina altamente complexa. A construção de tal máquina requer a integração de muitos componentes altamente complexos e avançados e requer conhecimentos específicos de como integrar tudo em conjunto. A construção do ITER tem demonstrado a enorme complexidade da engenharia e esta complexidade tem-se refletido nos muitos atrasos significativos verificados. Parte deve-se à falta de um grande integrador de projetos de engenharia com a capacidade e experiência de gestão para supervisionar completamente o projeto. Não só a capacidade, mas também a ausência de conhecimento e experiência podem dificultar a realização das instalações piloto iniciais e comerciais, uma vez que poucas ou nenhuma empresa de engenharia têm experiência na construção de dispositivos de fusão.

- **Regulamentação:** existe uma necessidade de regulamentação da fusão que seja proporcional aos (menores) riscos de fusão em comparação com a fissão nuclear. Os riscos nucleares da fusão são entendidos como sendo muito menores do que os da fissão, e que por isso é apropriada uma abordagem reguladora proporcionalmente mais leve. A aplicação da mesma abordagem regulamentar que para a fissão resultaria em despesas regulamentares elevadas e desnecessárias, o que implicaria que os custos de capital para a fusão seriam provavelmente superiores aos da fis-

são, tornando-a não competitiva. Do ponto de vista regulatório, são fatores importantes de capacitação ou limitadores do desenvolvimento da fusão: i) normas de segurança e manipulação do trítio; ii) tratamento de resíduos e iii) processos de licenciamento.

• **Financiamento e custos:** o acesso ao financiamento é crucial tanto para as iniciativas públicas como privadas, e é essencial que os custos sejam mantidos em níveis economicamente competitivos para que a comercialização seja viável. O financiamento é um fator importante para a investigação relacionada com a fusão, mas também um fator chave uma vez que a tecnologia de fusão comercial inicial esteja pronta para o mercado. As primeiras centrais elétricas comerciais requerem custos de investimento muito elevados (por exemplo, o custo do DEMO está estimado em 10-20 mil milhões de euros) e continuarão a comportar um risco de investimento significativo: neste momento, a durabilidade do reator, o tempo de paragem subsequente e os custos de manutenção resultantes são ainda desconhecidos, tornando os retornos financeiros muito imprevisíveis. Existe também ainda muita incerteza sobre a viabilidade económica da fusão. O custo nivelado da eletricidade (LCOE) da fusão precisa de ser competitivo com outras fontes de energia de base, tais como a fissão e as centrais potencialmente alimentadas por combustíveis fósseis (presumivelmente com sequestração de carbono). Embora exista o alvo de 50\$/MWh para o LCOE, subsistem incertezas significativas relativamente aos custos de capital, custos de manutenção e paragem, custos regulamentares, custos de combustível e a vida útil total de uma central de fusão. Estes terão de se tornar mais claros, particularmente para os investidores, à medida que a fusão se aproxime da comercialização.

1.4.1. O desafio dos materiais

O aproveitamento da energia de fusão é um processo exigente e requer materiais que possam resistir a ambientes extremos. Os materiais (tanto estruturais como funcionais) serão os principais facilitadores dos novos dispositivos nucleares. No que diz respeito aos materiais de fusão, os três maiores desafios continuam a ser a resiliência aos efeitos prejudiciais combinados do trítio, da transmutação e do bombardeamento de neutrões, a obtenção de estratégias de irradiação adequadas para estudos de danos adequados (com uma utilização ótima da modelização como ciência complementar) e a definição da segurança dos materiais e da orientação em matéria de resíduos numa era de regulamentação em evolução. Alguns dos desafios que terão de ser enfrentados:

- Os materiais utilizados no reator de fusão deverão ter baixa atividade, o que significa que, quando os reatores são desligados, podem ser desmontados e eliminados de forma relativamente rápida, sem o risco de contaminação radioativa. Isto limita os elementos que podem ser usados, exigindo a utilização de novos materiais.
- Os novos materiais requerem geralmente qualificação nuclear e necessitam de estabelecer cadeias de abastecimento. O desenvolvimento da qualificação, da regulamentação e da cadeia de abastecimento industrial destes materiais representa um desafio fundamental para a energia de fusão comercial.
- Os desafios de engenharia da fusão exigem frequentemente um arrefecimento complexo dos componentes, a utilização de interfaces multimateriais e uma modelação complexa. Os materiais utilizados devem adaptar-se a estes requisitos de conceção avançados.
- Os materiais que enfrentam o plasma gerado durante as operações de fusão podem exigir um funcionamento prolongado a temperaturas superiores a 1000 °C.
- Os materiais no interior das bobinas toroidais de um reator de fusão podem sofrer campos magnéticos elevados (>10T) e

devem ser ensaiados para validar o funcionamento nestas condições.

- Os neutrões gerados durante a reação de fusão provocam alterações na estrutura dos materiais. Em alguns casos, os átomos são rearranjados centenas de vezes devido ao bombardeamento de neutrões durante o tempo de vida do reator.
- Os materiais que estão em contacto com o plasma sofrem forte erosão do material.
- O lítio líquido estará contido nos materiais da camada fértil para permitir a geração de trítio (combustível necessário para a reação de fusão). A exposição dos metais ao lítio líquido afeta frequentemente de forma negativa as suas propriedades.

Enfrentar com sucesso estes desafios requer o desenvolvimento de materiais especializados para o ambiente agressivo da fusão, capacidades de ensaio de materiais e componentes, capitalizando nas infraestruturas existentes para caracterização de materiais e simulação de materiais e aplicações em novas tecnologias de reatores, bem como os aspetos da regulamentação dos materiais e dos resíduos gerados pelos reatores de fusão em funcionamento.

As principais questões para os materiais que enfrentam o plasma incluem fluxos de calor muito elevados (até 20 MW m^{-2} durante longos períodos) e a erosão. No entanto, não é o desempenho sob estas condições que dita a escolha dos materiais para os tokamaks, mas sobretudo os fatores microestruturais, incluindo as transformações de fase e a formação de precipitados, que determinam a resiliência estrutural (por exemplo, mecânica) e funcional (por exemplo, supercondutividade) face a (a) deslocações múltiplas de átomos por neutrões, (b) distorções devidas à entrada, retenção e libertação de isótopos de hidrogénio (especialmente trítio) e (c) a composição evolutiva dos materiais (com o gás hélio resultante e produtos de transmutação) através da transmutação induzida por neutrões.

Os estudos de cisão, nas últimas décadas, definem uma gama típica de danos em deslocamentos por átomo (dpa) que vão desde milhares para o

combustível nuclear, até 1-10 dpa para o reator interno para 0,1 dpa/ano para as 3 cubas de pressão dos reatores. Em contrapartida, o previsto “Spherical Tokamak for Energy Production” do Reino Unido (STEP) funcionará com energias e fluxos de neutrões suscetíveis de infligir danos da ordem dos 20-200 dpa na primeira parede. O projeto DEMO (central de fusão DEMONstration 2050 da União Europeia) fixa atualmente os limiares para a seleção de materiais de base em 15 dpa por ano de potência total, para danos no aço da parede frontal de cobertura.

É evidente que será necessária uma gama especializada de materiais para responder a estes desafios. Para além dos materiais estruturais também os materiais funcionais estão a ser alvo de desenvolvimento. O espaço limitado em vários projetos de reatores de fusão levou os engenheiros a considerarem materiais de blindagem altamente eficientes para proteger as bobinas supercondutoras de alta temperatura que controlam o plasma de fusão (por exemplo, hidretos de alta entropia), bem como componentes destinados a otimizar a produção de combustível no reator de fusão para sustentar a reação de fusão. Tal inclui a utilização de componentes contendo Li, como o Li_2TiO_3 , e materiais multiplicadores de neutrões contendo isótopos de Be e Pb. Estão a ser considerados materiais eficientes de absorção de neutrões térmicos baseados em boretos (por exemplo, boretos de tungsténio), juntamente com outros materiais de elevada secção transversal de neutrões e materiais de proteção gama com valores Z elevados. O Vanádio-Crómio-Titânio (também conhecido como V44, V-4%Cr-4%Ti) é reconhecido como um material estrutural atrativo para a camada fértil de lítio líquido de um reator de fusão de demonstração (DEMO), devido aos seus bons níveis de resistência a altas temperaturas, resistência à fluência, tolerância à irradiação e uma perda de ductilidade relativamente baixa devido a defeitos induzidos por radiação. O vanádio é também um elemento de ativação muito baixa no ambiente da camada fértil o que proporciona uma vantagem significativa na desativação e no manuseamento remoto de componentes. Atualmente, não existe fornecimento industrial para este tipo de materiais.

1.4.2. O investimento necessário em recursos humanos e o papel das universidades

Um dos elementos mais significativos para o rápido desenvolvimento da energia de fusão é a disponibilidade da mão-de-obra necessária, que inclui profissões como engenheiros, cientistas e técnicos. A dificuldade em reter recursos humanos especializados tem vindo a emergir como um dos principais obstáculos para o desenvolvimento bem-sucedido e atempado da fusão. É necessário encorajar a geração mais jovem a estudar a física dos plasmas e a energia de fusão, para que mais tarde possam reforçar a força de trabalho das iniciativas públicas e privadas.

O campo da fusão exige o desenvolvimento de competências e conhecimentos específicos que foram identificados como escassos^b, nomeadamente:

- Modelação do transporte de trítio na camada fértil;
- Tecnologias de extração de trítio e Fábrica/Centrals de Produção de Trítio: Sistemas de Detritação de água e Separação de isótopos;
- Desenvolvimento e fabrico de cerâmicas com base em Li;
- Segurança da Fusão Nuclear;
- Engenharia de sistemas aplicada a centrais nucleares;
- Integração de sistemas em centrais (de fusão) nucleares e
- Manipulação de berílio, regulamentação da saúde e segurança.

O sector da energia de fusão requer pessoal de diversas áreas, tais como cientistas de dados, engenheiros de controlo e técnicos, no entanto, existe atualmente uma escassez global de pessoal qualificado em ciências exatas, engenharia, tecnologia e matemática. Várias destas áreas e competências são comuns à cisão nuclear.

As universidades desempenham um papel fundamental na inovação tecnológica, no desenvolvimento de competências formação de quadros

^b Donné T. *et al.*, (2016) Review of Human Resources in the European Fusion Landscape.

técnicos e de investigadores e como consultores independentes de ciência e de tecnologia. Os recentes desenvolvimentos internacionais na área da fusão nuclear com vista à produção de energia, tornarão o subdomínio da fusão nuclear cada vez mais importante^c, aumentando a relevância das Universidades na investigação e na formação de recursos humanos.

As universidades terão um papel fundamental na evolução e desenvolvimento de um ecossistema de fusão comercial/empresarial mais completo. 34 das 36 empresas de fusão atualmente existentes (e cujo número tem tendência a aumentar) são melhor descritas como “integradores verticais” de sistemas de energia de fusão, o que significa que o seu papel na indústria da fusão é deter e compreender o conceito holístico de toda a central elétrica de fusão.

Para além do crescimento das capacidades técnicas/científicas, as universidades serão chamadas a fornecer outros mecanismos de apoio ao ecossistema da energia de fusão incluindo consultoria técnica e científica, a análise do mercado da energia, a segurança e o licenciamento (incluindo o aconselhamento a organismos reguladores), a adaptação dos clientes e da utilização final e o impacto/aceitação societal.

1.5. Instalações-piloto

As instalações-piloto representam um progresso para TRL 5-7, sendo o principal objetivo demonstrar a produção de eletricidade. As centrais-piloto podem destinar-se apenas a funcionamento relativamente a curto prazo e/ou baixa disponibilidade, mas espera-se que demonstrem não só a produção de eletricidade, mas também como o ciclo do trítio é tratado, resiliência dos materiais, RAMI (Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Inspeção) e consideração das questões do ciclo de vida. Os prazos para os próximos dispositivos de fusão com financiamento público são muito longos, e na Europa estes baseiam-se no DEMO, cuja conceção será finalizada após as experiências do ITER com plasmas de Deutério e Trítio (DT). É expectável

^c DG Whyte *et al.*, Phys. Plasmas 30, 090604 (2023).

que o DEMO da UE esteja operacional até 2050–2055. Uma cronologia semelhante pode ser prevista para os equivalentes da DEMO no Japão e na Coreia do Sul. Por outro lado, a China planeia a construção do seu dispositivo equivalente ao DEMO, denominado CFETR já nos anos 2040, enquanto o Reino Unido também planeia uma instalação-piloto, STEP, com o objetivo de entrar em funcionamento em 2040 tendo já fundos significativos atribuídos a atividades de conceção e na criação da cadeia de fornecimento. Refletindo a ambição de construir os próximos dispositivos, existem também prazos ambiciosos para instalações piloto no sector privado, visando a conclusão de instalações de demonstração entre 2030 e meados dos anos 2030.

Estes planos para instalações-piloto são considerados mais arriscados do que para os próximos dispositivos, uma vez que dependem do sucesso destes últimos, o que não é garantido apesar das boas perspetivas. O sucesso destes projetos também estará fortemente dependente da capacidade para angariação de mais fundos; e resolução de várias questões de conceção, engenharia, aprovisionamento e construção. Apesar de muitos destes aspetos serem já tratados ou abordados para os próximos dispositivos, existem ainda muitos desafios técnicos e logísticos.

2. FINANCIAMENTO

A par com o investimento público em projetos como o ITER e o DEMO, é bastante positivo que exista atualmente um crescimento significativo das empresas privadas de fusão. As iniciativas privadas em energia de fusão ganharam financiamento e impulso significativos nos últimos 5 anos. Um relatório^d da Comissão Europeia, do final de 2022, fornece uma visão geral das várias atividades de fusão, tanto públicas quanto privadas, que ocorrem globalmente e discute cenários que fornecem previsões sobre como a energia de fusão pode desenvolver-se nas próximas décadas. O relatório identifica

^d <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/83bc3ecd-b19c-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-281356207>

que pode haver benefícios mútuos em manter laços estreitos entre projetos de fusão públicos e privados. A indústria de fusão privada não apenas está a basear-se em anos de investimento público em projetos como o ITER, mas também está a beneficiar do apoio dos governos que veem valor em apoiar estas novas ideias (por exemplo o investimento do governo do Reino Unido e do Departamento de Energia dos EUA em várias empresas). Embora estas empresas privadas exibam metas temporais agressivas, muito provavelmente irrealistas, em comparação com projetos financiados publicamente, acompanhados de um risco elevado de falharem, a dedicação de um número significativo de investigadores e engenheiros aos muito desafios tecnológicos certamente nos levará mais perto da solução.

No caminho para o DEMO ainda se anteveem desafios substanciais, também comuns em outras abordagens de fusão. Estes desafios incluem pessoal, integração (construção, engenharia, ciência da fusão) e tecnologias onde mais conhecimento é ainda essencial, como ciclo e reprodução de combustível de trítio, blindagem de neutrões, manutenção remota, controlo do plasma, geração de corrente de plasma e divisor. O DEMO será um projeto inédito (FOAK – “First-Of-A-Kind”) e à semelhança do ITER, uma máquina altamente complexa. A construção de tal máquina envolve a integração de muitos componentes altamente complexos e avançados e requer conhecimento específico de como projetar tudo junto. Mesmo após a concretização do DEMO haverá um enorme esforço industrial necessário para ampliar a implantação da energia de fusão assim que as primeiras centrais comerciais forem comprovadas. Pode levar décadas depois disso para que a fusão represente uma parte substancial da produção global de energia.

2.1. Investimento público em fusão nuclear

A investigação pública em fusão nuclear a nível mundial progrediu significativamente com vários países a desenvolver reatores de fusão e a estabelecer estratégias e programas de fusão. O ITER é a peça central dos esforços globais de fusão e da cooperação internacional entre a UE, EUA, China, Rússia, Japão, Coreia e Índia. O ITER pretendia atingir o primeiro

plasma até 2025, mas devido a múltiplas razões, tais como perturbações na cadeia de fornecimento devido à COVID-19, questões com regulamentação de segurança nuclear e possíveis perturbações na cooperação com a Rússia, é muito provável que o primeiro plasma não acontecerá antes de 2030.

Para além do ITER, foram feitos progressos noutros programas públicos de fusão. As experiências realizadas no JET no final de 2021 atingiram um recorde de 5 segundos de pulso que gerou 59MJ de energia e esperam-se novos progressos antes do seu desmantelamento (que terá início, previsivelmente, até 2025). O stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) na Alemanha, é o stellarator mais avançado a nível mundial que, em 2017, alcançou o recorde mundial do produto triplo de fusão stellarator $nT\tau$ (densidade, temperatura, tempo de confinamento) e em 2023 iniciou uma nova campanha experimental após atualizações nos sistemas de refrigeração. A National Ignition Facility (NIF) nos EUA é a maior iniciativa mundial de Fusão por Confinamento Inercial (ICF) e, em 2022, o NIF atingiu pela primeira vez a “ignição” de plasma em que o plasma é predominantemente auto-aquecido por reações de fusão no plasma. Registos de fusão em temperaturas e plasmas sustentados foram também estabelecidos pelos tokamaks KSTAR (Coreia) e EAST (China). Espera-se que o tokamak JT-60SA no Japão, uma colaboração UE-Japão no âmbito do acordo “Broader Approach”, também atinja o primeiro plasma dentro dos próximos 12 meses.

2.2. O investimento privado em fusão nuclear

A fusão nuclear, antes considerado apenas um sonho sempre a 30 anos de distância, tem atraído nos últimos anos investimento de grandes empresas de diversos sectores de capital de risco e de grandes empresas. Tudo indica que os grandes esforços nacionais e internacionais não terão sucesso suficientemente breve para permitir uma contribuição para a descarbonização, necessária para enfrentar as mudanças climáticas, embora a fusão possa se tornar uma parte fundamental da economia energética na segunda metade do século. No entanto um número considerável de empresas privadas espera ter dispositivos funcionais e acessíveis mais cedo. De acordo com

a Associação de Indústrias de Fusão (Fusion Industry Association, FIA) as empresas de fusão declararam mais de 4.8 bilhões de dólares em financiamento, um aumento de 139% em relação 2021. Estas empresas estão cada vez mais a apostar que a energia nuclear abundante, barata e limpa será uma indústria de vários trilhões de euros. A FIA afirma que pelo menos 33 empresas diferentes estão a desenvolver fusão nuclear. Estes movimentos estão a aumentar a confiança em torno das escalas de tempo em que a energia de fusão se tornará uma realidade e a FIA prevê que a fusão estará conectada à rede de energia em algum momento da década de 2030.

Enquanto os EUA e o Reino Unido acolhem a maioria das iniciativas privadas de fusão, também surgiram nos últimos anos start-ups europeias, tais como a Marvel Fusion (Alemanha), Focused Energy (Alemanha), Renaissance Fusion (França) e Deutelio (Itália). As empresas privadas também registaram novos marcos importantes em temperaturas alcançadas e demonstraram campos magnéticos e, em muitos casos, já estão a trabalhar na construção de novos dispositivos, alguns deles recorrendo a abordagens alternativas para a produção de fusão nuclear.

De acordo com a FIA, a geração de eletricidade continua a ser o principal mercado para 85% dos participantes da fusão, seguido por energia fora da rede ou produção de hidrogénio e combustíveis limpos (cada um nomeado por 27% dos entrevistados), destacando o potencial da fusão para produzir não apenas eletricidade para a rede, mas como uma forma de permitir uma profunda descarbonização em toda a economia global.

Tal como na exploração espacial, um dos benefícios de um sector privado de fusão é uma maior diversidade de abordagens alguns dos quais brevemente destacados abaixo:

Commonwealth Fusion Systems, um *spin-off* do MIT, criada em 2015, que está a construir um tokamak denominado SPARC, com o objetivo de produzir um protótipo até 2025. A ideia disruptiva da Commonwealth é uma fita de aço supercondutora de alta temperatura revestida com um composto chamado óxido de ítrio-bário-cobre que a equipa já usou para construir bobinas e irá testar num protótipo de reator chamado ARC. Em

dezembro de 2021, a empresa testou a sua mais recente superbobine, um dispositivo de 10 toneladas e 2,5 metros de altura feito de centenas de bobinas produzindo um campo magnético superior a 20 Tesla, um record dado o tamanho. 18 dessas bobines serão instaladas no tokamak SPARC, que, segundo a CFS, poderá produzir até 11 vezes mais energia do que consome e a preços mais baratos que os combustíveis fósseis. Este dispositivo gerará cerca de 100 MW de energia o que o tornará “comercialmente relevante”.

A **TAE Technologies**, fundada em 1998, usa uma abordagem, que envolve temperaturas extremamente elevadas para criar a fusão de dois elementos abundantes, hidrogénio e boro-11, criando apenas hélio. O reator linear da TAE, do tamanho de um autocarro de dois andares, é completamente não radioativo. O problema neste caso é que requer temperaturas na ordem de mil milhões de graus Celsius (dez vezes superiores ao ITER que requer “apenas” uma temperatura de 150 milhões de graus Celsius). A vantagem é que esta reação usa apenas combustível disponível em abundância e não gera neutrões que possam contaminar o reator, oferecendo custos de manutenção mais baixos e um resultado muito mais sustentável. Nos reatores TAE, o plasma é confinado dentro dum campo magnético cilíndrico criado por um solenoide, um projeto baseado em tecnologias dos aceleradores de partículas. O plasma gira em torno do eixo; essa rotação tem uma estabilidade inerente. O confinamento não requer campos magnéticos externos fortes; esses são gerados principalmente pelo próprio plasma em rotação. Para mantê-lo em rotação são injetados feixes tangenciais de boro. A TAE afirma que o seu atual reator de teste conseguiu manter o plasma estável a 75 milhões de graus Celsius, mais que o dobro da meta inicial. A empresa pretende construir uma máquina ainda maior, para fazer o teste com o dobro da temperatura e planeia começar a fornecer energia às redes até 2030, seguida por uma “comercialização mais ampla” durante a próxima década.

A **General Fusion**, sediada no Canadá, baseia-se em tecnologia originalmente desenvolvida pela Marinha dos EUA e explorada por cientistas russos para uso potencial em armas. Dentro da máquina, uma

centrifugadora, gira uma câmara cheia de chumbo fundido e lítio criando uma cavidade no metal líquido, onde é criado o plasma. Um sistema de pistões bombeia mais metal líquido para a câmara, comprimindo o plasma em algumas dezenas de milissegundos. O deutério e trítio, aquecido a temperaturas elevadas é mantido confinado por um campo magnético, preenche a esfera para criar a reação. A fusão começa; então a pressão é libertada e o processo repetido em pulsos, cerca de uma vez por segundo. O calor transferido para o metal pode ser transformado em vapor para acionar uma turbina e gerar eletricidade. Um aspeto particularmente interessante deste reator é a forma como ele gerará o combustível de trítio. O trítio será produzido quando os neutrões atingem o lítio dentro do próprio sistema de compressão de metal líquido. A General Fusion é o mais recente empreendimento a instalar-se em Culham, o centro de pesquisa de fusão do Reino Unido, onde irá instalar um dispositivo de demonstração programado para começar a operar em 2025, pretendendo a ter reatores à venda no início de 2030.

A **Magneto-Inertial Fusion Technologies**, ou MIFTI, fundada em 2008, na Califórnia, está a desenvolver um reator que usa uma conhecida como Staged Z-Pinch. Um design Z-Pinch aquece, confina e comprime o plasma usando uma corrente elétrica intensa e pulsada para gerar um campo magnético que pode reduzir as instabilidades no plasma, permitindo que a fusão persista por longos períodos temporais. Mas só recentemente os cientistas do MIFTI conseguiram superar os problemas de instabilidade. O MIFTI prevê um ganho de energia de dez a cinquenta vezes a energia usada para criá-lo.

A **Princeton Fusion Systems** de, Nova Jersey, é uma pequena empresa focada no desenvolvimento de reatores de fusão pequenos e limpos para aplicações terrestres e espaciais. O reator Princeton FRC da empresa foi construído após 15 anos de pesquisa no Princeton Plasma Physics Laboratory, financiado principalmente pelo DOE dos EUA e pela NASA, e foi projetado para fornecer entre 1 e 10 Megawatts de energia em locais fora da rede e em centrais modulares, “de aplicações industriais remotas a energia

de emergência após desastres naturais e em bases na Lua ou em Marte”. Usa o conceito usa campos eletromagnéticos de radiofrequência para gerar e sustentar a formação do plasma numa configuração denominada Configuração de Campo Invertido (FRC) dentro de uma garrafa magnética forte. A experiência em Princeton detém o recorde de maior tempo em que tal reação foi mantida de forma estável, 300 ms.

A **Tokamak Energy**, sediada no Reino Unido, anunciou em julho que seu reator tokamak ST-40 atingiu o limite de 100 milhões de graus Celsius necessário para a fusão nuclear comercialmente viável. A conquista foi possível graças ao design baseado num tokamak esférico. Esta abordagem permite que as bobines estejam mais próximas do plasma, permitindo que sejam menores e mais baratos e criem campos magnéticos ainda mais fortes. A tecnologia essencial para este dispositivo reside no novo tipo de bobines construídas de fitas de materiais supercondutores de alta temperatura, que produzirão campos magnéticos muito mais fortes do que as bobines supercondutoras convencionais (de baixa temperatura) usadas pelo ITER. A Tokamak Energy foi a primeira empresa a consegui-lo fazer com um dispositivo esférico de financiamento privado.

A **First Light Fusion**, é uma empresa saída Universidade de Oxford, no Reino Unido, em 2011, que está a seguir uma estratégia diferente, o confinamento inercial similar à abordagem seguida na National Ignition Facility (NIF) no Lawrence Livermore National Laboratory, na Califórnia. Na First Light Fusion, a onda de choque de compressão é criada não por lasers, mas usando um canhão eletromagnético para disparar um pequeno pedaço de material num alvo contendo os isótopos de hidrogénio. A empresa mantém os detalhes do processo em segredo, mas indica que para conseguir a fusão, precisará disparar o material a 50 km/s, duas vezes mais rápido do que normalmente é alcançado nas atuais experiências de ondas de choque.

A **Helion Energy**, nos EUA, propõe gerar eletricidade diretamente da fusão, em vez de usar o processo para aquecer fluidos e acionar turbinas. A técnica de Helion envolve disparar pulsos de plasma dentro de um reator linear e, em seguida, comprimir rapidamente o plasma fundido com campos

magnéticos. Quando ocorre a fusão, o plasma expande-se e o seu campo magnético interage com o que circunda o reator para induzir uma corrente elétrica. A Helion espera fundir uma mistura de Deutério e Hélio-3, que não produz neutrões como subproduto. Mas o próprio Hélio-3 terá de ser produzido pela fusão D-D. A empresa está a construir um reator de demonstração que pretende ter em operação até 2024.

O novo pacto climático do Senado dos EUA aprovado em 2022, que inclui financiamento federal e incentivos para a fusão, também acompanha o crescimento do investimento privado e apoia as empresas que estão a entrar no sector com empreendimentos que estão a explorar caminhos mais difíceis para tornar realidade a promessa da fusão. Em agosto de 2022 um estratega da Bloomberg Intelligence, Mike Dennis, estimou o eventual mercado de fusão nuclear em 40 biliões (milhões de milhões) de dólares. Mesmo que a sua contribuição inicial para a produção total de energia do mundo seja pequena a fusão poderá vir a refazer os mercados de energia da mesma forma que a Tesla refez a indústria automobilística.

A maioria das empresas está a conceber, construir e testar provas de conceitos e poderão ainda enfrentar possíveis pontos críticos com um espectro diferente dos já identificados para as abordagens mais tradicionais. No que diz respeito à via descrita pelo ITER e pelos DEMO, a passagem dos protótipos a dispositivos de centrais elétricas exigirá um esforço significativo e I&D dedicada a componentes críticos. Os projetos que ainda estão a validar as bases científicas ou as tecnologias-chave poderão deparar-se com limitações físicas. À medida que a maturidade tecnológica aumentar, os aspetos críticos poderão tornar-se mais específicos e mais claramente identificados os desafios que serão necessários superar para produzir um reator comercial. Por este motivo, embora as perspetivas sejam inegavelmente excitantes, a fusão comercial numa década pode ser excessivamente otimista. No entanto, ainda que esta meta temporal seja considerada demasiado otimista, o simples facto de haver um investimento significativo em desenvolvimento tecnológico e inovação poderá gerar ideias disruptivas e contribuir significativamente para que a fusão se torne uma realidade o mais

brevemente possível. De facto, verifica-se já uma contribuição significativa da geração de Propriedade Intelectual em resultado do investimento privado em fusão nuclear^e. A propriedade intelectual gerada por décadas de investigação em fusão nuclear contribuiu substancialmente para o desenvolvimento de áreas fora da fusão nuclear tais como ciência dos materiais, supercondutores ou hipercondutores, física dos plasmas e dos lasers e física das partículas.

Quer resulte das ideias desenvolvidas em empresas privadas de pequena dimensão, grandes projetos de fusão nacionais ou internacionais, ou um pouco de ambos, a realidade da fusão nuclear parece estar finalmente no horizonte.

3. CENTRAIS COMERCIAIS

Todos os intervenientes privados têm como objetivo claro a comercialização da energia de fusão, mas nesta fase apenas dão estimativas gerais sobre quando é que tal poderá ser alcançado. O principal leque de estimativas abrange o final dos anos 2030 até aos anos 2040, o vasto leque de tempo que cobre a grande incerteza nos projetos, mas também um ciclo de desenvolvimento que uma instalação comercial poderia ou deveria seguir uma instalação piloto bem-sucedida dentro de 5-10 anos. Regra geral as iniciativas de fusão com financiamento público, são muito mais cautelosas, e mostram reservas sobre quando poderá chegar a produção comercial de eletricidade até que possam confirmar todos os aspetos da tecnologia.

Existe uma forte divergência entre as ambições públicas e privadas, com o público em geral sendo mais cautelosos, e dando a impressão que têm um maior controlo e consideração de todos os desafios técnicos. A experiência prática continua a ser um indicador de performance importante a ter em mente e os programas públicos têm a vantagem de operar múltiplos dispositivos ao longo de muitas décadas. Contudo, o programa de fusão pública

^e Elias G. Carayannis and John Draper, *Fusion Engineering and Design*, Volume 173, December 2021, 112815. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112815>

está a avançar muito lentamente, e parece provável que haja mais atrasos resultantes de atrasos na construção do ITER.

A natureza dos prazos públicos, ou seja, DEMO apenas até 2045–2050 torna a comercialização irrealista antes de meados dos anos 2050, no mínimo. A lógica por detrás disto é compreensível, uma vez que os desafios e dificuldades técnicas aumentam a cada etapa, e torna-se muito difícil antecipar como estas questões muito difíceis podem ser resolvidas. Também permanece pouco claro ou mesmo impossível determinar o que poderia ser o custo nivelado da eletricidade (Levelized Cost of Electricity, LCOE) da energia de fusão, dadas as enormes e variadas incertezas. Haverá maior certeza numa calendarização para as instalações comerciais quando o primeiro conjunto de dispositivos seguintes funcionar com sucesso.

Uma questão que se relaciona com os prazos é em que ponto do ciclo de desenvolvimento da fusão a liderança para a comercialização deve passar para o sector privado. O roteiro da EUROfusion sugere que tal acontecerá após uma central pública DEMO, ou seja, os programas públicos conduzem o desenvolvimento tecnológico à beira da comercialização, altura em que se poderia esperar que o sector privado assumisse a construção de uma primeira vaga de centrais comerciais. Outros preveem que este momento ocorra após experiências bem-sucedidas de DT no ITER, em resposta ao facto de que um DEMO com financiamento público levaria demasiado tempo e o financiamento poderia ser politicamente difícil.

Se no sector privado, um punhado de empresas concluírem e operarem com sucesso os seus próximos dispositivos, este poderá ser um momento catalisador importante para o sector. Se os marcos esperados para o ganho líquido de energia forem alcançados, e o conseguirem antes do primeiro plasma do ITER, estarão criadas as condições para que a iniciativa privada tome a dianteira. Por exemplo, existe uma elevada confiança do sector que o dispositivo CFS SPARC será bem-sucedido nos seus objetivos na próxima fase de desenvolvimento do dispositivo.

A incerteza e o risco de derrapagem aumentam significativamente na fase de instalação piloto, uma vez que exige que se enfrentem desafios

técnicos mais difíceis e que se garanta um financiamento adicional maior, embora este último possa decorrer naturalmente do sucesso. O intervalo de tempo entre os próximos dispositivos e as instalações-piloto também é apertado para as iniciativas privadas e, aumenta o risco de derrapagem temporal em relação aos objetivos declarados, sendo provável que uma instalação piloto privada ainda enfrente importantes desafios técnicos a resolver. O passo para uma instalação comercial pode não ser simples. Existem atualmente vários desafios técnicos que permanecem na agenda da investigação (materiais, tecnologias do trítio, RAMI,...). Uma vez que a maioria das abordagens tecnológicas depende destes componentes técnicos, são cruciais realizações rápidas e bem-sucedidas. No entanto, é pouco provável que os próximos dispositivos resolvam estes desafios remanescentes, e também não é claro se as instalações piloto privadas tencionam abordar todas estas questões.

3.1. O custo esperado para a eletricidade

A métrica económica básica para qualquer central de geração elétrica é o custo nivelado da eletricidade (Levelized Costs of Electricity, LCOE), que representa o custo total para construir e operar uma central de energia ao longo da sua vida dividido pela produção total de eletricidade distribuída a partir da central durante esse período (normalmente o custo por megawatt-hora, MWh). Este valor tem também em conta os custos de financiamento da componente de capital. O LCOE é relevante para comparar tecnologias energéticas e avaliar a sua competitividade — mas não avalia outros critérios importantes do sistema energético que não se traduzem em custos ou receitas. Por conseguinte, objetivos estratégicos ou políticos como a segurança do aprovisionamento, impactos ambientais e independência energética, todos eles potenciais pontos fortes da fusão, são negligenciados pela LCOE.

Os principais fatores que determinam o custo do reator de fusão são a grande dimensão da central e a quantidade de matérias-primas necessárias (aço, betão, etc.), a necessidade de componentes específicos para os quais

ainda não existe uma produção normalizada (por exemplo, bobines supercondutoras, câmara vácuo, etc.)^f. É razoável esperar uma forte contribuição do custo de capital (ou seja, juros elevados sobre a dívida) devido ao risco financeiro associado aos projetos comerciais de fusão, tal como se espera para tecnologias inovadoras semelhantes, como os reatores de cisão de quarta geração^g.

Embora seja prematuro questionar a viabilidade económica (o custo da eletricidade) das centrais de fusão, independentemente da abordagem de confinamento, tem havido várias tentativas no sentido de identificar os custos aceitáveis para tornar viável esta opção. Um artigo recente sobre potenciais mercados iniciais de energia de fusão^h analisou possíveis requisitos de custos para a eletricidade gerada por fusão, calor de processo e produção de hidrogénio. Os autores concluem que poderá haver potencialmente um mercado muito grande para centrais de energia de fusão com um LCOE de US\$ 50/MWh. Além disso, a competitividade da fusão pode ser possibilitada através do armazenamento térmico integrado que pode permitir que o núcleo de fusão funcione continuamente enquanto vende eletricidade quando há preços de rede elevados. Isto garantiria um LCOE mais baixo e permitiria à fusão competir com as redes elétricas que são dominadas pela energia solar e eólica. Outros mercados, tais como a produção de calor de processo e de hidrogénio, serão de acesso complexo para a fusão numa fase inicial, principalmente devido a restrições técnicas e financeiras. Uma consideração final é que é impossível saber como a disponibilidade da fusão pode perturbar os mercados, nem exatamente como os mercados ou infraestruturas se desenvolverão no período de intervenção.

Dadas as importantes incertezas quanto às próximas fases, e

^f Meschini S, *et al.*, (2023), Review of commercial nuclear fusion projects., *Front. Energy Res.* 11:1157394, doi: 10.3389/fenrg.2023.1157394

^g Mignacca, B., and Locatelli, G. (2020). Economics and finance of molten salt reactors. *Prog. Nucl. Energy* 129, 103503. doi:10.1016/j.pnucene.2020.103503

^h Handley, M., Slesinski, D. and Hsu, S. (2021). Potential Early Markets for Fusion Energy. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-021-00306-4>

especialmente a construção e funcionamento de uma central completa, as incertezas em relação aos custos são tão elevadas que a maioria das estimativas não tem qualquer significado. No entanto, é claro que para ser competitiva no mercado o LCOE que a atingir deverá ser da ordem de USD 50/MWh. Nas estimativas de algumas iniciativas privadas os custos de capital para instalações piloto, varia entre algumas centenas de milhões de euros e até 10 mil milhões de euros. As variações são muito elevadas, baseadas não só na abordagem, mas também na dimensão e características da central, com custos de capital escalonados com a capacidade MW planeada. O custo futuro dos componentes-chave será um fator importante, muitos destes estão a níveis baixos de TRL e, portanto, podem ainda ser feitas grandes melhorias e reduções de custos, que são impossíveis de conhecer. Os custos de capital podem também variar consideravelmente entre abordagens.

Espera-se que os custos de operação e manutenção (O&M), sejam baixos, sendo o custo de capital de longe a maior parte do custo total de uma central de fusão. Os custos de combustível não são claros, no caso do trítio, existindo uma grande expectativa que para além da aquisição de uma quantidade de trítio inicial, necessário para o arranque de reatores, se produza o seu próprio fornecimento na reação de fusão. O Deutério e outros consumíveis não são considerados como sendo de elevado volume nem requisitos dispendiosos. Existem algumas preocupações atuais sobre a escassez do fornecimento de lítio. Para as abordagens de fusão inercial a produção dos alvos será um desafio em termos de volume elevado, precisão, e fabrico de alvos de baixo custo para o tornar economicamente viável. Os custos e ciclos de substituição dos principais componentes, por exemplo, as camadas férteis ou materiais de parede também não são claros, mas poderão constituir um importante elemento de custo O&M.

Um estudo de 2017 sobre os custos de capital associados às centrais de fusãoⁱ fornece um quadro de custos e uma gama de estimativas de custos de capital que podem apoiar as estimativas do LCOE quando forem

ⁱ RPA-E (2017). Conceptual Cost Study for a Fusion Power Plant based on four technologies from the DOE ARPE-E ALPHA Program. https://woodruffscientific.com/pdf/ARPAE_Costing_Report_2017.pdf

desenvolvidos dados e informações mais detalhadas sobre as diferentes tecnologias no futuro. Deste estudo destacam-se que: i) a neutrónica e a manipulação do trítio não são os principais fatores de custo de capital, mas o seu custo continuará a ser relativamente importante; ii) os sistemas de potência compreendem entre 5 e 20% do custo direto total. Por conseguinte, deve tornar-se uma área de foco em trabalhos futuros, nomeadamente para diminuir a incerteza na conceção do sistema de energia pulsada e no tempo de vida útil em condições de centrais elétricas e iii) os custos de capital inicial de uma central de fusão dependem muito provavelmente da escala da central e do equilíbrio dos seus componentes.

Embora existam muitas incertezas em relação ao LCOE esperado, é evidente que os investimentos de capital para os próximos dispositivos e instalações piloto são suscetíveis de aumentar nas próximas décadas. Com a mudança das atividades de investigação para a demonstração e implementação, os custos de capital podem atingir montantes que ascendem a vários milhares de milhões de euros. Isto também implica que os riscos financeiros das atividades de fusão tornar-se-ão cada vez mais elevados. Por conseguinte, cada vez menos investidores poderão estar dispostos e/ou aptos a participar em tais projetos. Os governos poderão ter de intervir e fornecer financiamento adicional para apoiar a implantação do sector da fusão. Esta situação já se verifica em algumas grandes infraestruturas. Esta questão é sobretudo um risco para as empresas que visam grandes instalações (por exemplo, centrais elétricas de 1GW).

4. QUANDO É QUE A FUSÃO NUCLEAR DARÁ UM CONTRIBUTO SIGNIFICATIVO?

A fusão nuclear surge como uma tecnologia alternativa com um papel potencial no futuro sistema global de energia sustentável. Num sistema energético global ameaçado pelas mudanças climáticas, esgotamento dos recursos energéticos convencionais, instabilidade crescente em regiões históricas de energia e um crescimento contínuo da procura, a fusão nuclear

surge como uma tecnologia alternativa com um papel potencial no futuro sistema global de energia sustentável. Apesar de não contribuir de todo para a transição energética na Europa e nos EUA, a fusão pode ganhar quota em contextos caracterizados por um forte crescimento da procura de eletricidade em forte crescimento, contribuindo para satisfazer as rigorosas restrições ambientais, juntamente com outras formas de produção de energia na segunda metade do século.

Para analisar esse papel potencial têm sido efetuadas análises prospetivas de longo prazo, pois não se espera que a fusão esteja disponível ou represente uma opção exequível para a descarbonização antes de 2050ⁱ e, portanto, o seu impacto deve ser discutido num horizonte temporal até 2100. A única maneira de abordar estes horizontes temporais é usando cenários, isto é, imagens do futuro que são consistentes dentro de suas suposições, com os quais pode-se explorar o impacto de diferentes medidas, políticas, novas tecnologias, escassez de combustíveis e muitas outras questões relacionadas à energia. Explorando vários cenários possíveis, as simulações da penetração da energia de fusão no mercado^k preveem que em 2100 a fusão nuclear consiga providenciar 1/3 da eletricidade mundial, assumindo a meta de 2050 para concretização da operação de um reator de demonstração capaz de produzir energia elétrica e a colocar na rede, e uma vez vencido o desafio do custo de construção de reatores comerciais com preços competitivos quando comparados com outras alternativas existentes na altura.

A fusão representa uma opção tecnológica chave para o futuro sistema de energia. O principal fator para a penetração da fusão é uma preocupação com as mudanças climáticas. A adoção de medidas ambientais, mesmo na forma mais fraca de um imposto CO₂ diferenciado entre as regiões e com uma trajetória moderada de crescimento, é suficiente para impulsionar a fusão no mercado de eletricidade no final do século sendo os resultados

ⁱ D. Lerede *et al.*, *Energy Strategy Reviews*, 49, (2023) 101144, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101144>

^k H. Cabal *et al.*, *EPJ Web of Conferences* 33, 01006 (2012), <https://doi.org/10.1051/epjconf/20123301006>

robustos contra diferentes trajetórias de crescimento económico. Apesar das simulações otimistas é necessário salientar que existem restrições económicas para a velocidade na qual a energia de fusão poderá ser implantada¹. Estes derivam do grande tamanho da infraestrutura, do grande custo de investimento e do longo tempo de construção, que impede um ciclo de inovação eficaz, e da necessidade de um investimento sem precedentes para que a fusão se afirme como uma opção de mercado. Todas estas restrições podem ser significativamente suavizadas se, por meio de avanços tecnológicos ou novos conceitos, por exemplo o reator DEMO ser de menor dimensão, mais simples e mais barato. Isto poderia potencialmente antecipar a introdução da energia de fusão em décadas. Esta discussão está sistematizada na análise SWOT apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Será que 1/3 da eletricidade em 2100 poderá ser suprida pela fusão nuclear? Uma análise SWOT da situação (adaptada de N.J.L. Cardozo, 2019. Economic aspects of the deployment of fusion energy: the valley of death and the innovation cycle. Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20170444. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0444>

Forças	Fraquezas
Todos os benefícios da fusão...	Incertezas devido aos desafios tecnológicos
(segurança, combustível ilimitado, poucos resíduos, baixo CO ₂ ,...)	Incertezas quanto aos desafios da regulamentação nuclear
	Requer um investimento sem precedentes para se tornar uma opção energética
Oportunidades	Ameaças
As alterações climáticas e taxas de CO ₂ podem estimular a adoção	Espaço ocupado por outras tecnologias
Avanços tecnológicos ou novos conceitos poderão antecipar em décadas a introdução no mercado	Restrições económicas à implantação
Outras funções potenciais para além da geração de eletricidade (dessalinização de água, aquecimento centralizado, produção de hidrogénio, uso de calor de processo para a indústria)	Dimensões da infraestrutura;
	Investimento elevado;
	Custos da regulamentação;
	Tempo de construção longo.
	Aceitação pública (é uma tecnologia nuclear...)

¹ N.J.L. Cardozo, 2019, Economic aspects of the deployment of fusion energy: the valley of death and the innovation cycle. Phil. Trans. R. Soc. A 377: 20170444. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0444>

Existem também vários caminhos que podem ser explorados recorrendo a outras funções potenciais para a fusão para além da geração de eletricidade tais como a dessalinização de água, aquecimento centralizado, produção de hidrogénio, uso de calor de processo para a indústria^m, mas que atualmente carecem de mais investigação e desenvolvimento e que poderão contribuir para uma mais rápida penetração da fusão no mercado.

5. ACEITAÇÃO PÚBLICA

O apoio amplo e duradouro da comunidade é essencial no sector de energia e, especialmente, para a energia nuclear. A abordagem para o envolvimento da comunidade deve ser capaz de gerar um apoio forte. Portanto, ganhar e garantir a confiança do público não é um evento único: o envolvimento com as partes interessadas precisa estar no centro de um processo contínuo. Quando bem feito, é comumente referido como garantia de uma “licença social para operar”. A aceitação pública da fusão nuclear será um elemento-chave para avançar com o desenvolvimento e eventual implantação da tecnologia. Uma vez que a fusão nuclear e a fissão nuclear são ambos processos que envolvem física nuclear e são semelhantes, são frequentemente confundidos pelo públicoⁿ. Assim, é importante informar e educar o público em geral sobre as diferenças entre eles, especialmente no que diz respeito aos aspetos de impacto na saúde e ambientais. Dada a perceção pública amplamente exagerada dos riscos associados à fissão nuclear, e a sua associação com desastres nucleares de Fukushima e Chernobyl, e questões de resíduos de longa duração, não é surpreendente que a energia nuclear (termo geral utilizado para se referir à fissão nuclear, mas que

^m Griffiths, T., Pearson, R., Bluck, M., and Takeda, S. (2022). The commercialisation of fusion for the energy market: A review of socio-economic studies. *Prog. Energy* 4 (4), 042008. doi:10.1088/2516-1083/ac84bf

ⁿ Turcanu, C. *et al.* (2020) Fusion energy: A deeper look into attitudes among the general public. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379620304397?via%3Dihub>

não é preciso e pode gerar confusão) seja percebida com desconfiança e baixa aceitação por muitos. No livro “Dompter le dragon nucléaire” Alain Michel afirma que manifestações às vezes violentas da população durante os projetos de construção de centrais nucleares são uma reação a decisões consideradas antidemocráticas. É possível uma resposta diferente da população, mas na era da (des)informação será importante providenciar informação credível e um forte envolvimento da sociedade civil. Além disso, dado que as tecnologias de fusão ainda não estão comercialmente prontas, a fusão é um assunto pouco conhecido e distante da vida quotidiana⁸. Reconhecendo esta dificuldade, em Portugal o Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear tem feito um forte esforço de promover a fusão nuclear através de ações de formação para professores do secundário, palestras nas escolas e para o público em geral tendo recentemente disponibilizado um livro online intitulado “Fusão Nuclear na era das alterações climáticas”⁹.

Foi demonstrado que a educação, comunicação, conformidade regulamentar e redução dos riscos associados à tecnologia não são, por si só, suficientes para obter aceitação social. Uma licença social é um processo de aquisição de ‘consentimento da sociedade’ para uma tecnologia, projeto ou esforço e vai além da educação e das relações-públicas¹⁰.

Por último, mas certamente não menos importante, é a questão da despesa pública. A fusão é uma tecnologia extremamente dispendiosa. Programas públicos como o ITER estão a ser financiados a partir do dinheiro dos impostos do público e, portanto, devem ir além das iniciativas privadas para assegurar o apoio do público à fusão. Uma melhor comunicação pública dos benefícios atuais (muitas vezes ignorados) e futuros da despesa pública com a fusão ajudaria a orientar a opinião pública no sentido de ser favorável à fusão.

⁸ https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/fusao_nuclear_alteracoes_climaticas/download.html

⁹ Hoedl, A. (2021) Social license and Ethical Review of Fusion: Methods to Achieve Social Acceptance, https://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-01/410PM_Hoedl%20PRF.pdf

6. PARTICIPAÇÃO PORTUGUESA NO PROGRAMA EUROPEU DE FUSÃO

Nesta revolução para tornar a eletricidade de fusão uma realidade, a comunidade de fusão europeia orientada para a física dos plasmas e para a tecnologia de fusão (principalmente através da Eurofusion e da F4E) terá o principal papel de consultoria científica e técnica, apoiando assim as decisões sobre as opções fundamentais de conceção. As vertentes científicas e tecnológicas do programa de fusão necessitam de uma maior convergência e integração na via da produção de eletricidade e/ou calor à escala comercial. A comunidade científica envolvida terá de se adaptar a estes novos desafios. Igualmente, Portugal deverá acompanhar esta revolução.

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN), uma unidade de investigação do Instituto Superior Técnico (IST) participa ativamente no programa Europeu de Fusão desde 1989, ano da criação da Associação Euratom-IST. Em 2014 as atividades europeias de fusão passaram a ser geridas no âmbito do Consórcio EUROfusion do qual o IPFN/IST são membros. As atividades de fusão nuclear do IPFN estão fortemente centradas no programa de trabalho estabelecido no roteiro de Fusão para H2020⁹ e na sua continuação no âmbito do programa Horizon Europe.

O ITER irá abrir novos caminhos na ciência da fusão. Para assegurar o seu sucesso, a preparação da operação no JET tem sido empreendida como principal medida de mitigação dos riscos. Para além do JET, a maioria das capacidades estão também disponíveis no ASDEX Upgrade que se espera que continue a desempenhar um papel importante na preparação de regimes avançados de funcionamento do ITER. A evolução do programa de fusão exigiu uma mudança da investigação pura para a conceção, construção e operação de futuras instalações como o ITER e DEMO. Esta transição, com uma mudança acentuada de tecnologias não nucleares para tecnologias nucleares, exigiu que o IPFN reforçasse os seus recursos de engenharia

⁹ European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy, https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf

disponíveis, aumentando as competências necessárias para a engenharia e integração de sistemas.

O IPFN integra o Programa de Fusão da UE com contribuições ativas e autónomas em atividades experimentais, teóricas, de formação de engenharia avançada e de divulgação, nas suas áreas-chave de especialização amplamente reconhecidas: engenharia e integração de sistemas (em particular, diagnósticos de micro-ondas, controlo e aquisição de dados, e manipulação remota), teoria e modelação, operação de tokamak, e caracterização de materiais. Seguindo as prioridades do roteiro, as atividades do IPFN concentram-se principalmente na contribuição para a construção e exploração do ITER, exploração dos dispositivos de atualização JET e ASDEX, e em atividades relacionadas com a DEMO. O programa de trabalho inclui atividades de formação realizadas em Portugal (principalmente relacionadas com o tokamak ISTTOK) e no estrangeiro, associadas ao desenvolvimento de sistemas, operação e exploração científica de tokamaks de grande e médio porte (JET, ASDEX Upgrade), bem como com a conceção e construção da próxima geração de dispositivos de fusão (ITER, DEMO e DTT).

Tendo o Projecto ITER como principal foco das atividades de fusão a nível mundial durante a próxima década, o plano de trabalho IPFN tem sido centrado nos 4 programas seguintes:

- **Construção do ITER:** O ITER é a instalação-chave no roteiro e o seu sucesso continua a ser o mais importante objetivo global do programa. A grande maioria dos recursos no H2020 são dedicados a garantir que o ITER seja construído dentro do tempo e do orçamento, que o seu funcionamento seja devidamente preparado, e que uma nova geração de cientistas e engenheiros seja devidamente treinada para a sua exploração. Este programa inclui todas as atividades relacionadas com a construção do ITER, atividades preparatórias de I&D que a ele conduzem, e todas as atividades de engenharia para o desenvolvimento de diagnósticos e integração em diferentes

máquinas de fusão.

- Operação do ITER: desde o imediato ao longo prazo, abrangendo todas as atividades relativas ao funcionamento do tokamak, estabelecimento da base física para o ITER, bem como atividades teóricas e de modelização preparando a comunidade de fusão da UE para a operação e exploração científica do ITER após 2025. O programa de operação do ITER abrange todas as atividades conducentes a uma melhor compreensão das questões relativas à operação de plasma, desenvolvimento de cenários e compreensão da base física, bem como ao desenvolvimento de algoritmos e modelos para análise de dados e atividades de modelização. Estas atividades serão levadas a cabo sob a coordenação do Consórcio EUROfusion, que é responsável pela ação co-financiada pela Euratom.

- Para além do ITER: visando o desenvolvimento a longo prazo da fusão como fonte de energia para a produção de eletricidade em larga escala e centrado no desenho conceptual do primeiro protótipo comercial, DEMO. Para cumprir o objetivo da demonstração da eletricidade de fusão até 2050, a construção da DEMO tem de começar no início da década de 2030, o mais tardar, para que a operação possa começar no início da década de 2040. Este programa engloba todas as atividades de I&D que estão orientadas para o desenvolvimento de soluções para as aplicações das centrais elétricas, incluindo o apoio a atividades incluídas na estratégia da “broader Approach” para a energia de fusão na Europa.

- Formação avançada e divulgação: centradas na formação duma nova geração de investigadores e engenheiros que possam contribuir ativamente para o programa de fusão, quer em instituições de investigação quer na indústria envolvida na construção do ITER.

Metais na Transição Energética

FERNANDO J.A.S. BARRIGA*

INTRODUÇÃO

O que não cresce (no sentido biológico) começa numa mina ou exploração mineral. A maioria das pessoas ignora este facto, desligando o consumo da produção. Isto é verdade a respeito dos mais variados bens e serviços, incluindo os automóveis elétricos e os geradores eólicos, bons exemplos do consumo e aproveitamento de energia verde, respetivamente. Outra gritante ignorância é a de que os veículos elétricos utilizam grandes quantidades de lítio, cobalto, terras raras e outros metais (mais plebeus) incluindo ferro (sobretudo aço) cobre, níquel, manganês e alumínio.

O recente aumento dos preços dos recursos críticos (por exemplo, lítio, cobalto, níquel e manganês) nas baterias suscitou preocupações generalizadas quanto à competitividade dos veículos elétricos num futuro próximo, assunto a abordar mais adiante.

Por outro lado, ouve-se frequentemente que este ou aquele recurso mineral está perto do esgotamento, fruto de desconhecimento dos fluxos das matérias-primas minerais. Reservas minerais definem-se geralmente como sendo materiais geológicos caracterizados, suscetíveis de extração com benefício económico, que existem num dado momento e num determinado local. Dependem de fatores intrínsecos (quantidades, teores, mineralogia, entre outros) e de fatores extrínsecos (por exemplo, custos de produção e cotações de mercado). Por vezes intervêm ainda fatores políticos e sociais. Para além das reservas, existem outras categorias de recursos,

* Prof. Cat. Dep. Geologia Fac. Ciências ULisboa (Aposentado), Investigador Integrado IDL, Academia das Ciências de Lisboa, f.barriga@fc.ul.pt.

nomeadamente recursos marginais e subeconómicos (que podem tornar-se rentáveis, se os preços subirem ou os custos baixarem) e recursos ainda desconhecidos (em regiões onde seja expectável sucesso de atividades de prospeção e pesquisa). Portanto, as reservas, apesar da diminuição causada pela mineração, podem aumentar (e muito). A prospeção exige investimentos vultuosos; quando coroada de êxito, permite recuperar tais investimentos, incluindo os dos projetos malsucedidos.

A definição de minério também vai variando ao longo do tempo, em função das disponibilidades e dos custos de extração/produção. Um metro cúbico de qualquer rocha contém quantidades analisáveis de todos os elementos naturais da tabela periódica. Transformar uma qualquer rocha em minério é sobretudo uma questão energética: quando tivermos a fusão nuclear (ver capítulo 2), e energia abundante e barata, o fornecimento de matérias-primas minerais será muito mais fácil.

Outros problemas que condicionam as reservas disponíveis são (1) o intervalo de tempo que medeia desde o início da prospeção até que a nova mina esteja em produção, frequentemente superior a uma década e (2) a distribuição geopolítica dos recursos. Com efeito, alguns aparecem fortemente concentrados neste ou naquele ponto do globo, como é o caso do cobalto e dos platinídeos. Transcreve-se um telegrama recente da Reuters (2023):

LONDRES, 20 de julho (Reuters) – O rápido crescimento da procura como resultado da transição energética pode levar a escassez de vários metais na próxima década, a menos que o investimento seja aumentado, disse um grupo global de produtores de energia, consumidores e instituições financeiras. Grandes lacunas na oferta de lítio, níquel, grafite, cobalto, neodímio e cobre poderão conduzir a preços mais elevados e atrasar o objetivo de atingir emissões “Net-Zero” até 2050, afirmou a Comissão para as Transições Energéticas (ETC) num relatório. Para reduzir o risco de escassez, as minas precisam de produzir mais, mas os projetos mineiros de grande escala podem demorar até 20 anos a entrar em funcionamento e a última década caracterizou-se por falta de investimento na exploração e na produção, afirmou a ETC. “Nalguns minerais essenciais — em especial o

lítio e o cobre — será difícil aumentar a oferta com a rapidez suficiente durante a próxima década para acompanhar o rápido aumento da procura”, afirmou o presidente do ETC, Adair Turner, no relatório (<https://www.reuters.com/business/energy/energy-transition-faces-metals-gap-unless-investment-rises-report-finds-2023-07-19/>).

Um exemplo recente é o das terras raras (REE, ver adiante). A China, em 2011, dominava completamente o panorama internacional destes metais, chegou a atingir 97% do mercado, e manifestou ser sua intenção implementar restrições às suas exportações, à revelia dos acordos internacionais. As potências ocidentais reagiram, impedindo a concretização destas intenções. Contudo, a consequência mais importante foi o aumento generalizado da prospeção e pesquisa. A China continua a liderar, mas as reservas do Brasil, por exemplo, passaram de 48.000 para 21.000.000 t de 2011 para 2014, respectivamente, enquanto as da China desciam de 55.000.000 para 44.000.000 t, de 2011 para 2022, e as reservas globais aumentaram de 110.000.000 para 130.000.000 t (toneladas de óxidos de terras raras, segundo o US Geological Survey). Atualmente as reservas de REE localizam-se sobretudo em seis países (ver Tabela 1).

Importa mencionar os metais críticos, que integram listas elaboradas pela UE e pelos EUA, revistas de três em três anos em função da oferta e da importância industrial de cada matéria-prima (quase todas metais, ver Figura 1) e também os metais estratégicos, os quais adquiriram recentemente renovado protagonismo, fruto da guerra na Ucrânia. As listas de matérias-primas críticas são elaboradas para o curto/médio prazo. Especificamente quanto à importância na transição energética vamos considerar metais críticos (REE, Li, Co) e estratégicos^a (Ni, Cu) com referências também a manganês e grafite^b.

^a Matérias-primas estratégicas são importantes do ponto de vista estratégico, incluindo o seu uso nas tecnologias de defesa e aeroespaciais e ainda pela sua importância nas transições ambiental e tecnológica.

^b De grande importância nos veículos elétricos.

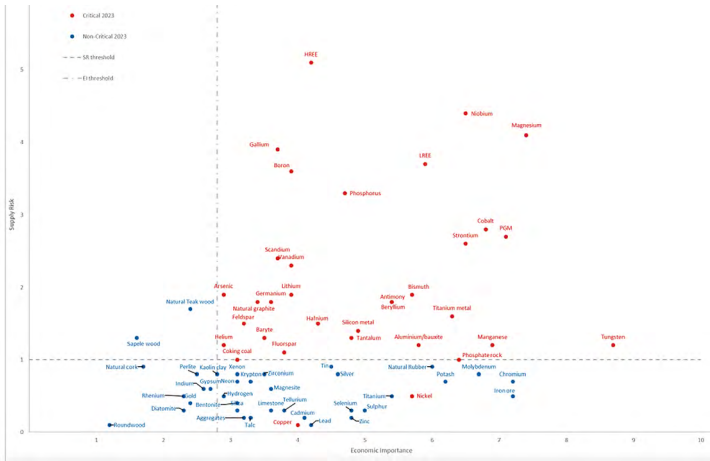


Figura 1. European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report.

Para que se avalie a escala desta questão, importa referir que, segundo a ETC, o custo (investimentos) da transição energética, entre 2023 e 2050, ascende, previsivelmente, a 110×10^{12} USD. Citamos igualmente, para os metais, projeções recentes do FMI (Fundo Monetário Internacional). Os produtores de metais, apenas com Li, Co, Cu e Ni, poderiam gerar receitas semelhantes às do sector petrolífero nos próximos 20 anos. O valor total da produção de metais mais do que quadruplicaria no período de 2021 a 2040, rivalizando com o valor total da produção de petróleo bruto. Os metais são um contributo potencialmente importante para os modelos de avaliação integrada das alterações climáticas (Boer et al., 2021).

Também importa não esquecer que a produção de veículos elétricos gera grandes quantidades de gases de estufa. A Industry Week titulava, já em 2018:

O segredo pouco limpo das baterias de lítio. Uma vez em operação, os automóveis elétricos claro que reduzem a pegada de carbono, mas o seu fabrico poderia emitir 74% mais CO₂ do que o dos automóveis convencionais.

The rapid deployment of clean energy technologies as part of energy transitions implies a significant increase in demand for minerals

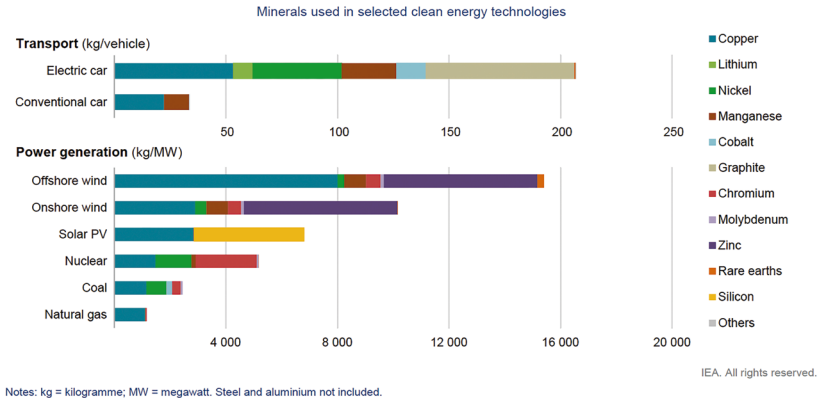


Figura 2. IEA International Energy Agency, 2021.

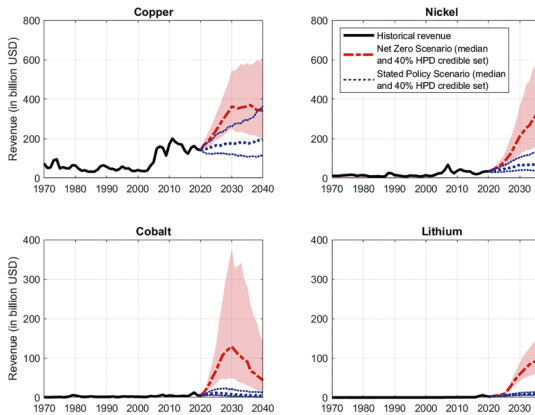


Figura 3. Receitas anuais (USD) para o cenário atual e para o cenário “net zero” com intervalos de incerteza de 40%. Boer, Pescatori and Stuermer, 2021.

Os fundos marinhos, principalmente em alto mar, contêm quantidades gigantescas de recursos minerais, principalmente nódulos e crostas ferro-manganesíferas, jazigos de sulfuretos polimetálicos, lamas ricas em terras raras e, já no domínio dos combustíveis fósseis, hidratos de gás (também conhecidos por hidratos de metano) ver adiante (Barriga, 2018; Barriga, 2019).

Lithium Batteries' Dirty Secret: Manufacturing Them Leaves Massive Carbon Footprint

Oct. 16, 2018

Once in operation, electric cars certainly reduce your carbon footprint, but making the lithium-ion batteries could emit 74% more CO₂ than for conventional cars.

[Bloomberg](#)

METAIS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Os tipos de recursos minerais mais utilizados na transição energética variam consoante a tecnologia. Lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite são cruciais para o desempenho, a longevidade e a densidade energética das baterias. Algumas terras raras (neodímio, samário, disprósio, hólmio) são essenciais para os ímanes permanentes, por sua vez vitais para as turbinas eólicas e motores de veículos elétricos. As redes de eletricidade necessitam de uma enorme quantidade de cobre e alumínio, sendo o cobre a pedra angular de todas as tecnologias relacionadas com a eletricidade. A mudança para um sistema de energia “descarbonizado” deverá conduzir a um enorme aumento das necessidades destes metais, o que significa que o sector da energia está a emergir como uma força importante nos mercados de minerais. Até meados da década de 2010, para a maioria dos metais, o sector da energia representava uma pequena parte da procura total. No entanto, à medida que as transições energéticas ganham ritmo, as tecnologias de energia limpa estão a tornar-se o segmento de crescimento mais rápido da procura. Num cenário que cumpra os objetivos do Acordo de Paris (como no Cenário de Desenvolvimento Sustentável da IEA^c [SDS]), a sua quota-parte

^c International Energy Agency, Sustainable Development Scenario.

na procura total aumenta significativamente nas próximas duas décadas para mais de 40% no caso do cobre e de algumas terras raras, 60-70% para o níquel e o cobalto e quase 90% para o lítio. Os veículos elétricos e o armazenamento de baterias já ultrapassaram a eletrônica de consumo para se tornarem o maior consumidor de lítio e deverão substituir o aço inoxidável como maior utilizador final de níquel até 2040 (IEA International Energy Agency, 2021).

ELEMENTOS DO GRUPO DAS TERRAS RARAS (REE)

As chamadas terras raras não são particularmente raras. Consistem num conjunto de 17 elementos (metais) com consideráveis afinidades entre si, os 15 lantanídeos e ainda Y (ítrio) e Sc (escândio). Devido às suas propriedades estruturais, físicas e químicas únicas, vários destes elementos são cada vez mais vitais para sectores industriais críticos, incluindo a eletrônica, os transportes, os cuidados de saúde, a defesa e as tecnologias de comunicação. Mais importante ainda, as suas aplicações em tecnologias de energia verde (por exemplo, turbinas eólicas, energia fotovoltaica, veículos elétricos e iluminação energeticamente eficiente) podem permitir a transição para uma economia de baixo carbono, reduzindo a nossa dependência em combustíveis fósseis e mitigando as emissões de CO₂ (Dang et al., 2021).

Não há escassez geoquímica de terras raras, mas sim escassez geopolítica (McLellan et al., 2014 <https://doi.org/10.1007/s00244-021-00867-7>). A China descobriu grandes jazigos numa fase em que as REE não pareciam particularmente importantes. Hoje, após uma década de quase monopólio, a prospeção fez surgir um conjunto de novas ocorrências, que alteraram radicalmente as perspetivas futuras para a economia destes metais.

Tabela 1. Em toneladas equivalentes de óxidos de terras raras (REO). US Geological Survey, 2023. Reservas totais 130 Mt. Existem ainda estimativas (USGS) de recursos medidos e indicados nos EUA (3,6 milhões de toneladas, Mt) e no Canadá (superiores a 14 Mt).

REE	Produção		Reservas	Reservas
	2021	2022	tREO	%
China	168,000	210,000	44,000,000	34
Vietnam	400	4,300	22,000,000	17
Brasil	500	80	21,000,000	16
Rússia	2,600	2,600	21,000,000	16
Índia	2,900	2,900	6,900,000	5
Austrália	24,000	18,000	4,200,000	3
EUA	42,000	43,000	2,300,000	2
Gronelândia	—	—	1,500,000	1
Tailândia	8,200	7,100	NA	NA

Níquel (Tabela 2)

É essencial na produção de baterias de alto desempenho, sobretudo no cátodo de tais dispositivos. Os principais tipos de cátodos com Ni são NiCoAl e NiMnCo, e o crescimento do parque dos automóveis elétricos está a fazer crescer muitíssimo o consumo de níquel. A maior aplicação clássica do Ni é no aço inox, cuja quota deverá diminuir dos atuais 69% para 45% em 2040, apesar do consumo continuar a aumentar. O níquel e o cobre são considerados as pedras basilares da transição energética. Conhecem-se grandes recursos nos fundos marinhos (ver adiante).

Tabela 2. Principais produtores e detentores de reservas de níquel. Em toneladas, segundo USGS, 2023.

Níquel	Produção		Reservas	%
	2021	2022		%
Austrália	151,000	160,000	21,000,000	21
Indonésia	1,040,000	1,600,000	21,000,000	21
Brasil	76,000	83,000	16,000,000	16
Rússia	205,000	220,000	7,500,000	8
Nova Caledónia	200,000	190,000	7,100,000	7
Filipinas	387,000	330,000	4,800,000	5
China	109,000	110,000	2,800,000	3
Canadá	134,000	130,000	2,200,000	2
Outros países	429,000	440,000	20,000,000	20
Total	2,730,000	3,300,000	>100,000,000	

Cobalto (Tabela 3)

O cobalto é um dos principais metais que integram as baterias recarregáveis de íons de lítio. A procura de cobalto está a crescer mais depressa que a identificação de novos recursos (Tabela 3, fortemente concentrados em apenas dois países, Austrália e, sobretudo, Congo (Kinshasa). Deste chegam repetidos relatos de explorações artesanais e pequenas minas em condições deploráveis, nomeadamente com mão-de-obra infantil. Notar que o único país europeu detentor de reservas importantes de cobalto é França, através da Nova Caledónia, a sua possessão no Pacífico, onde se situa o jazigo de Ni-Co de Goro, com recursos estimados em mais de 130,000 toneladas de Co (NS Energy Mining, 2023). Existem recursos adicionais importantes em terra^d, alguns em países da Tabela 3, outros em Cuba, Zâmbia e países insulares próximos da Austrália. Os fundos marinhos contêm recursos muito grandes de cobalto, superiores a 120 Mt de Co contido (ver adiante).

Tabela 3. Principais produtores e detentores de reservas primárias de cobalto (toneladas). Acrescem outros recursos em vários países, totalizando 25 Mt em vários tipos de jazigos (em terra). (Minerals USGS gov, 2023).

Cobalto	Produção primária		Reservas	Reservas%
	2021	2022		
Congo (Kinshasa)	119,000	130,000	4,000,000	48
Austrália	5,295	5,900	1,500,000	18
Indonésia	2,700	10,000	600,000	7
Cuba	4,000	3,800	500,000	6
Filipinas	3,600	3,800	260,000	3
Rússia	8,000	8,900	250,000	3
Canadá	4,361	3,900	220,000	3
China	2,200	2,200	140,000	2
Madagáscar	2,800	3,000	100,000	1
EUA	650	800	69,000	1
Papua Nova Guiné	2,953	3,000	47,000	1
Turquia	2,400	2,700	36,000	0
Marrocos	2,300	2,300	13,000	0
Outros	4,567	5,200	610,000	7
Total	165,000	190,000	8,300,000	

^d Presumivelmente subeconómicos. Minerals USGS gov, 2023. Commodity Statistics and Information. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.

A escassez de cobalto afigura-se inescapável no curto e médio prazo (2028–2033), mesmo no cenário tecnologicamente mais otimista (Zeng et al., 2022).

Cobre

O cobre é incontornável sempre que se consideram sistemas energéticos à base de eletricidade. Substituir o parque automóvel atual por uma infraestrutura elétrica, nova, à escala mundial, terá custos financeiros e ambientais dramáticos. A Bloomberg publicou recentemente a seguinte análise:

Nova Iorque e Londres, 2 de março de 2023 – As redes de eletricidade são a espinha dorsal da transição energética, mas as redes que temos hoje não estão preparadas para o futuro. É preciso investir pelo menos US\$ 21.4 triliões (10^{12}) na rede elétrica até 2050 para apoiar uma trajetória “net-zero” para o mundo, de acordo com um novo relatório da BloombergNEF (BNEFe). O relatório *New Energy Outlook: Grids*^f, publicado nesta data, fornece uma análise mais detalhada da rede elétrica que a apresentada no *New Energy Outlook 2022 Net Zero Scenario* da BNEF. O investimento total inclui 4,1 triliões de dólares (10^{12}) para manter a rede existente e 17,3 triliões de dólares para expandir a rede para novos consumos e produção de eletricidade. O investimento anual triplica de 274 mil milhões de dólares, em 2022, para 871 mil milhões de dólares por ano na década anterior a 2050. É necessária uma intervenção política significativa para concretizar esta escala de investimento na rede. Este facto começa a aparecer em algumas análises. Procuram-se já soluções diferentes, nomeadamente os chamados e-combustíveis (eletrocombustíveis) produzidos a partir de misturas de H_2 (verde) e CO_2 , este extraído diretamente da atmosfera, ou impedido de a ela chegar. Os e-combustíveis derivam dos combustíveis Fischer-Tropsch (FT), conhecidos desde meados do sec. XX. Procura-se atualmente reduzir o preço de produção dos e-combustíveis, estando demonstrada a neutralidade do carbono no processo, desde que o hidrogénio envolvido seja produzido a partir de fontes solares, eólicas ou nucleares. Esta abordagem é particularmente atraente, em termos

^e BloombergNewEnergyFinance.

^f <https://about.bnef.com/blog/global-net-zero-will-require-21-trillion-investment-in-power-grids/>.

ambientais e económicos, pois permite utilizar a infraestrutura atualmente em uso, incluindo automóveis e estações de abastecimento, e tornando desnecessária a densa rede de cabos de cobre e outros dispositivos metálicos que será necessário instalar em todas as regiões habitadas.

As reservas de cobre são muito elevadas (Tabela 4. Cobre: produção primária, de refinação e reservas, em milhares de toneladas de cobre contido (Minerals USGS gov, 2023).) mesmo sem considerar recursos marginais que em 2015 o USGS (Minerals USGS gov, 2023) estimava em 2.1 biliões de toneladas. Quanto a recursos ainda por descobrir, a mesma fonte previa 3.3 biliões de t. A procura derivada da mobilidade elétrica vai rapidamente alterar a situação (ver Introdução.)

Tabela 4. Cobre: produção primária, de refinação e reservas, em milhares de toneladas de cobre contido (Minerals USGS gov, 2023).

Cobre	Produção primária (mina)		Refinação		Reservas	Reservas%
	2021	2022	2021	2022		
Alemanha	—	—	615	620	—	—
Japão	—	—	1,510	1,600	—	—
Coreia do Sul	—	—	647	660	—	—
Chile	5,620	5,200	2,270	2,100	190,000	21
Austrália	813	830	385	380	97,000	11
Peru	2,300	2,200	336	290	81,000	9
Rússia	940	1,000	981	1,100	62,000	7
México	734	740	473	470	53,000	6
EUA	1,230	1,300	971	1,000	44,000	5
Congo (Kinshasa)	1,740	2,200	1,450	1,700	31,000	3
Polónia	391	390	578	590	30,000	3
China	1,910	1,900	10,500	11,000	27,000	3
Indonésia	731	920	290	300	24,000	3
Casaquistão	510	580	500	510	20,000	2
Zâmbia	842	770	354	350	19,000	2
Canadá	550	530	287	310	7,600	1
Outros	2,850	3,400	3,170	3,000	200,000	22
Total	21,200	22,000	25,300	26,000	890,000	100

Lítio

Apresentam-se as principais produções e reservas de lítio (tabela 5):

Tabela 5. Principais produtores e detentores de reservas de lítio, em toneladas de lítio contido (Minerals USGS gov, 2023).

Lítio	Produção		Reservas	Reservas%
	2021	2022		
Chile	28,300	39,000	9,300,000	36
Australia	55,300	61,000	6,200,000	24
Argentina	5,970	6,200	2,700,000	10
China	14,000	19,000	2,000,000	8
EUA	W	W	1,000,000	4
Canada	—	500	930,000	4
Zimbabwe	710	800	310,000	1
Brasil	1,700	2,200	250,000	1
Portugal	900	600	60,000	0
Outros	—	—	3,300,000	13
Total	107,000	930,000	26,050,000	100

Segundo a USGS (2023), crescem cerca de 98Mt de outros recursos identificados de lítio, resultantes de prospeção mineral de grande sucesso:

Bolívia, 21 Mt; Argentina, 20 Mt; EUA, 12 Mt; Chile, 11 Mt; Austrália, 7.9 Mt; China, 6.8 Mt; Alemanha, 3.2 Mt; Congo (Kinshasa), 3 Mt; Canada, 2.9 Mt; México, 1.7 Mt; Chéquia, 1.3 Mt; Sérvia, 1.2 Mt; Rússia, 1 Mt; Peru, 880,000 t; Mali, 840,000 t; Brasil, 730,000 t; Zimbabwe, 690,000 t; Espanha, 320,000 t; Portugal, 270,000 t; Namíbia, 230,000 t; Ghana, 180,000 t; Finlândia, 68,000 t; Áustria, 60,000 t; e Cazaquistão, 50,000 t.

Os jazigos da Bolívia, em particular, têm gerado grande interesse. Não estão em produção principalmente porque, sendo salaars (lagos salgados) encontram-se a grande altitude, o que impossibilita uso da tecnologia normal nos salaars, a evaporação, semelhante às salinas noutros locais.

Finalmente, chegam notícias de investimentos vultuosos na produção de lítio a partir da água do mar (Coreia do Sul, Reino Unido, Arábia Saudita), inclusive como subproduto de dessalinização de água do mar.

Portugal é, há já longos anos, um produtor de lítio, principalmente a partir de lepidolite, para fundente na indústria cerâmica. Recentemente, com o enorme aumento da procura derivada da transição energética,

aumentou o interesse de operadores internacionais no lítio europeu, e as modestas reservas portuguesas, estimadas em 60,000 toneladas, são ainda assim as mais importantes reservas europeias[§].

Muito recentemente (outubro de 2023) o consórcio liderado pela empresa britânica Savannah Resources PLC obteve da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) uma Declaração de Impacte Ambiental favorável (DIA) para o seu projeto “Lítio do Barroso” (próximo de Boticas). O recurso totaliza 17.7 Mt, com o teor médio de 1.05% de lítio, equivalente a 84459 toneladas de lítio. Ver <https://www.savannahresources.com/pt/projeto/projeto-litio-do-barroso-portugal/>.

No Norte e Centro do país existem outras áreas favoráveis para jazidas de lítio (ver Oliveira *et al.*, 2018). A produção portuguesa e a primeira área para a qual foram definidas reservas foi Gonçalo-Seixo Amarelo, no distrito da Guarda (Ramos *et al*, 1994; Ramos, 1999).

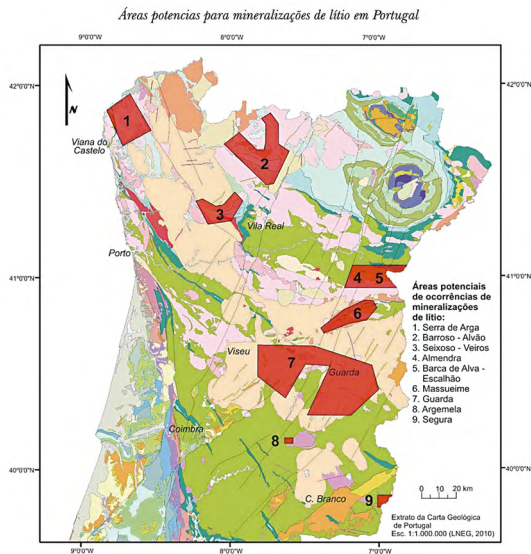


Figura 5. Carta de Áreas potenciais para mineralizações de lítio em Portugal (Oliveira *et al.*, 2018).

[§] Existem na Europa outros recursos, hipotéticos e especulativos, mas não reservas (ver Minerals USGS gov, 2023. Commodity Statistics and Information. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>).

desenvolvimento, na Austrália, Canadá, China, Coreia do Sul, EUA, Islândia e Noruega. As dificuldades em reduzir o teor de CO₂ na atmosfera, ou até de diminuir significativamente a taxa de crescimento deste teor estão a conduzir à reavaliação das possibilidades. Outra abordagem é a conjugação com o objetivo de armazenamento do CO₂ para posterior utilização em e-combustíveis.

A descarbonização implica um enorme aumento do consumo de metais, incluindo metais raros (ver Figura 2). O fabrico das baterias de iões de lítio, além do já citado aumento de consumo de metais, implica produção de grandes quantidades de CO₂, a ponto de os primeiros anos de circulação do automóvel elétrico serem totalmente contabilizados como compensação da produção de CO₂ no fabrico das baterias.

Numa publicação da FCUL e IDL (Univ. Lisboa, novembro de 2023), o seu autor, António Vallera, defende que o futuro dos transportes elétricos passa pela troca de baterias. Tal permitiria, segundo Vallera, utilizar a capacidade de carregamento elevada não utilizada pelo sistema atual (Vallera, 2023).

E OS FUNDOS MARINHOS?

A mineração, nos continentes e nos oceanos, tem sido alvo de críticas, muitas delas injustas. Se é verdade que esta indústria tem um passado nem sempre invejável, não é menos verdade que hoje se rege por normas estritas de respeito pelo ambiente e pela biodiversidade. As operações que não pratiquem este respeito terão de ser encerradas. Entre a indústria e os ecossistemas não há escolha possível, precisamos de ambos. E a indústria tem de respeitar a natureza.

Esta é uma afirmação que considero pacífica. Ninguém duvida da imperiosa necessidade das pescas, por exemplo, mas foi preciso quase despoarmos os oceanos para que surgissem normas robustas que contrariem a sobrepesca. Mesmo assim, muitas espécies piscícolas estão extintas, e outras ameaçadas, incluindo, por exemplo, o bacalhau (ver Barriga, 2022). Factos igualmente preocupantes aplicam-se à agricultura. No entanto, a oposição

à mineração é maior. Creio que a principal razão desta discrepância reside na menor consciência dos cidadãos da necessidade dos recursos minerais que, contudo, é extremamente elevada.

Conforme já ficou sublinhado acima, matérias-primas críticas são aquelas cujo abastecimento pode ser dificultado num futuro não muito longínquo, seja por escassez física, seja por limitações impostas pelos (poucos) fornecedores. A Europa produz menos de 10% das matérias-primas que a sua indústria consome, pelo que se sente agudamente a necessidade de novas fontes. Os fundos marinhos aparecem como sérios candidatos, para cobalto, níquel, cobre, manganês, terras raras, e outros ainda. Cite-se um exemplo: existe uma concentração gigantesca de nódulos polimetálicos no oceano Pacífico, entre o Hawaii e o México (Zona de Clarion-Clipperton), com cerca de 12,5 milhões de km², na qual se situa a quase totalidade das concessões de prospecção e pesquisa para nódulos, que totalizam 60000 km², para exploração em 20 anos, ou seja, menos de 0,5% da área com interesse económico. O futuro passa pela mineração submarina. A BBC News titulava recentemente que o futuro dos automóveis elétricos depende dela (Shukman, 2019).

Por enquanto as explorações minerais incidem quase exclusivamente sobre jazigos em terra, alguns *offshore* perto de terra (mas não no alto-mar, exceto diamantes na Namíbia e África do Sul). Contudo, há duas circunstâncias que podem alterar este estado de coisas: a escassez de reservas minerais, e a escassez de países fornecedores. Precisamos de criar prontidão para futuras operações mineiras em mar profundo, com um custo ambiental mínimo ou nulo. Não precisamos ainda de minerar em larga escala os fundos marinhos, mas precisamos de o poder fazer em caso de necessidade, pois é previsível que tal venha a acontecer em breve. As principais classes de recursos da crosta oceânica profunda, para além de petróleo e gás natural, são (1) nódulos e crostas ferromanganesíferos (Co, Ni, Cu), (2) sulfuretos maciços (Cu, Au, Ag, Zn) (3) hidratos de gás, (4) micróbios e biomoléculas e (5) terras raras em sedimentos abissais.

E nós, portugueses? O potencial do Mar Português é grande, mas estamos numa fase embrionária do conhecimento dos nossos fundos

marinhos, sobretudo quanto a recursos minerais. Mesmo o conhecimento básico, a batimetria de alta resolução, é ainda menor que 60% da ZEE (Zona Económica Exclusiva) e da ZEPC (Zona de Extensão da Plataforma Continental). O que resta fazer, até 2030, poderá custar algo como 15 milhões de euros, recurso superior às expectativas do Instituto Hidrográfico e da EMEPC (Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental). Mas sem conhecimento não é possível definir políticas, quaisquer que elas sejam, inclusive contrárias à mineração. Sigamos as pisadas da Noruega, país turístico que soube aproveitar os seus recursos petrolíferos sem destruir o ambiente.

REFERÊNCIAS

- Barriga, F.J.A.S., 2018. Deep-Sea Mining: a Manageable Necessity or a Curse?, in: Bebianno, M.J., Guerreiro, J., Carvalho, T., Gameiro, M.I. (Eds.), Sustainable Development of the Ocean: A Necessity. Universidade do Algarve, pp. 235-244.
- Barriga, F.J.A.S., 2019. Mineração Sustentável e Responsável em Ambiente Marinho Profundo, Colóquio Contaminação Ambiental. Academia das Ciências de Lisboa, pp. 3-28.
- Barriga, F.J.A.S., 2022. Mineração nos Fundos Marinhos e Protecção Ambiental: Comentário. Memórias da Academia das Ciências de Lisboa C-48, 7-9.
- Boer, L., Pescatori, A., Stuermer, M., 2021. Energy Transition Metals. International Monetary Fund Working Paper WP/21/243.
- Dang, D.H., Thompson, K.A., Ma, L., Nguyen, H.Q., Luu, S.T., Duong, M.T.N., Kernaghan, A., 2021. Toward the Circular Economy of Rare Earth Elements: A Review of Abundance, Extraction, Applications, and Environmental Impacts. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 81, 521-530. doi.org/https://doi.org/10.1007/s00244-021-00867-7.
- IEA International Energy Agency, 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris.
- McLellan, B.C., Corder, G.D., Golev, A., Ali, S.H., 2014. Sustainability of the Rare Earths Industry. Procedia Environmental Sciences 20, 280-287. doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.035.

- Minerals USGS gov, 2023. Commodity Statistics and Information. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.
- NS Energy Mining, 2023. Goro Nickel-Cobalt Mine. <https://www.nsenergybusiness.com/projects/goro-nickel-cobalt-mine/>.
- Oliveira, D.P.S., Lisboa, J.V., Carvalho, J.M.F., Salgueiro, R.M.M., Inverno, C.M.C., Leite, M.R.M., 2018. Lítio em Portugal: Enquadramento, Geologia e Mineralogia. *Boletim de Minas* 52, 75-93.
- Ramos, J.F., Ribeiro, A., Barriga, F.J.A.S., 1994. Mineralizações de Metais Raros de Seixo Amarelo - Gonçalo (Guarda), *Boletim de Minas*. pp. 101-115.
- Ramos, J.M.F., 1999. Mineralizações de Metais Raros de Seixo Amarelo - Gonçalo (Guarda), *Geology*. Universidade de Lisboa, Lisboa, p. 792.
- Shukman, D., 2019. Electric car future may depend on deep sea mining 13 November 2019. BBC News.
- Vallera, A.M., 2023. The transition: Why we need battery swapping for the future energy and transport systems. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal.
[doi.org/https://doi.org/10.56526/10451/5527](https://doi.org/10.56526/10451/5527)
- Zeng, A., Chen, W., Rasmussen, K.D., 2022. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages. *Nature Communications* 13, 1341.
[doi.org/https://doi.org/10.1038/s41467-022-29022-z](https://doi.org/10.1038/s41467-022-29022-z).

A Energia Geotérmica: Um parceiro incontornável na transição energética

LUIS OLIVEIRA E SILVA* E AMILCAR SOARES**

1. ENERGIA GEOTÉRMICA: UMA FONTE INESGOTÁVEL DE ENERGIA ACESSÍVEL EM QUALQUER PARTE DO PLANETA.

A energia geotérmica tem origem no calor no interior da terra. Em termos médios o gradiente térmico do globo terrestre é de 33 °C por quilómetro de profundidade. Dada a grande heterogeneidade geológica e estrutural da crosta terrestre, existem locais muito superficiais com temperaturas superiores a 150 °C que têm sido aproveitados para a produção de energia elétrica desde o início do século XX. No entanto, estas ocorrências são raras.

Dado que o custo de furação de poços a grandes profundidades é elevado, a energia geotérmica para produção de energia elétrica tem sido confinada aos poucos locais de alta temperatura a baixa profundidade. E por esta razão não tem sido considerada prioritária como alternativa de energia limpa na transição energética para a substituição dos combustíveis fósseis. Portugal tem este tipo de produção geotérmica, nas ilhas vulcânicas dos Açores, associada à junção tripla das placas tectónicas da América do Norte, Eurásia e África (ou Núbia) (Nunes *et al.*, 2021).

Este é um cenário que tende a mudar de um modo muito acentuado, pois, nas últimas duas décadas, a energia geotérmica tem sofrido enormes transformações tecnológicas, o que a coloca num patamar de sustentabilidade ao nível das energias limpas “main stream”. Curiosamente, as maiores e mais recentes transformações da energia geotérmica estão

* IPFN, DF, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

** CERENA, DER, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

relacionadas com a migração de alta tecnologia da indústria do petróleo e gás que, paradoxalmente, tende a substituir no necessário processo de transição energética. Na realidade, há uma grande similitude de métodos e técnicas de produção uma vez que os reservatórios, de hidrocarbonetos e de calor, se situam a grandes profundidades no subsolo em ambientes geológicos complexos.

Por exemplo, o enorme avanço tecnológico das operações de perfuração da indústria do petróleo e gás, fez com que a grande limitação da perfuração a grandes profundidades da energia geotérmica começasse a ser ultrapassada do ponto de vista técnico e económico; o modo de produção secundária e terciária (“Enhanced Oil Recovery”) é de certo modo reproduzido na produção geotérmica através das recentes tecnologias de “Enhanced Geothermal Systems” de rochas impermeáveis a grande profundidade e elevada temperatura.

Mas as grandes potencialidades da energia geotérmica também induziram outros caminhos de I&D no que respeita à perfuração a grandes profundidades, o “Deep Drilling”, com tecnologias inovadoras e disruptoras em relação aos métodos mais convencionais da indústria do petróleo. É o exemplo de uma nova tecnologia de perfuração baseada em micro-ondas de alta frequência, desenvolvida pela Quaise Energy uma “spinout” do MIT e que se encontra já em fase de piloto e implementação (<https://energy.mit.edu/news/mit-spinout-qaaise-energy-working-to-create-geothermal-wells-made-from-the-deepest-holes-in-the-world/>).

Essencialmente são estes os tópicos abordados neste texto que pretende ilustrar o modo como a produção de eletricidade a partir da energia geotérmica começa a ser vista como uma realidade alcançável praticamente em qualquer parte do planeta. Esta nova fase da energia geotérmica realça vantagens, até então consideradas secundárias, diretamente ligadas às limitações de outras formas de energia limpas: a pouca utilização de matérias-primas minerais e o diminuto uso do solo.

2. AS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Para se alcançar um futuro de baixo-carbono, haverá necessariamente um aumento substancial na procura de matérias-primas minerais fundamentais para a fabricação de tecnologias de energias mais limpas. É esta a conclusão do recente relatório do Banco Mundial, “The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future”, (Arrobas et al, 2017). A transição energética implicará um aumento exponencial da procura de matérias-primas minerais estratégicas, em relação à produção atual, como Lítio (965%), Cobalto (585%), Grafite (383%), Índium (241%). Na UE espera-se que a procura de metais de terras raras aumente seis vezes até 2030 e sete vezes, até 2050, para o lítio, a procura da UE deve aumentar doze vezes, até 2030, e vinte e uma vezes, até 2050. Hoje, a Europa depende fortemente de importações, muitas vezes de um único país terceiro, e crises recentes sublinharam as dependências da UE em relação às matérias-primas e à energia.

A disponibilização destes recursos acarreta problemas que normalmente não são colocados em cima da mesa, porque, inexplicavelmente, são dados como resolvidos. Daquele relatório sobressai o facto de que não há reservas atualmente conhecidas para satisfazer nenhum dos cenários de transição estabelecidos nos acordos de Paris. A prata é um caso paradigmático: o México, que é o maior produtor mundial, tem reservas conhecidas somente para 5 anos de consumo atual.

Um outro problema é a localização geográfica das reservas de matérias-primas críticas para a Europa, aquelas que têm elevado valor acrescentado para a economia, elevado risco de fornecimento e baixa taxa de substituição. Do último relatório “Study on the Critical Raw Materials for the EU”, de 2023, da lista de 51 elementos considerados “Critical Raw Materials”, 68% destes eram maioritariamente produzidos na China e, 40% destes, a China detém 80% da produção mundial. Na realidade, a transição energética desloca o centro de gravidade dos minerais energéticos, o Médio Oriente, para centros de decisão, como a China, com agendas

próprias, muito mais fechadas, no que diz respeito à detenção e apropriação desses recursos.

Um terceiro problema, mas não menos importante, diz respeito às necessidades destas matérias-primas minerais das diferentes formas de energia renovável. O aço é uma necessidade transversal a todas as formas de produção de energia. Mas a energia solar fotovoltaica e a energia eólica são as que necessitam de muito mais matérias-primas minerais críticas, uma necessidade incomparavelmente maior do que a energia hídrica, geotérmica ou nuclear e, por isso, estão mais expostas, num futuro próximo, ao problema da escassez de metais no nosso planeta (“Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options, UNECE”, 2021).

Facilmente se percebe que as reservas minerais disponíveis no planeta é dos fatores mais importantes e limitativos das diferentes estratégias e velocidade da transição energética pretendida, ou seja, as matérias-primas minerais são, seguramente, a mais crítica condição de fronteira da transição energética.

O futuro poderá vir a ser mais limpo, mas será seguramente mais incerto. As decisões e os consensos globais sobre os caminhos possíveis da transição energética dificilmente serão tomados num espaço alargado de incerteza. Por isso é tão importante criarmos condições para o decréscimo de emissões como pela redução da incerteza no conhecimento dos fatores que o determinam. Se não tivermos ideias concretas das reservas minerais existentes no planeta somos sempre confrontados com expectativas que estas são inesgotáveis. Assim, é importante que os países com potenciais recursos minerais invistam na sua prospeção, aumentando, deste modo, o conhecimento e reduzindo a incerteza.

Outra importante condição de fronteira tem a ver com o uso do solo num planeta finito e de crescimento continuado da população. Michael Shellenberger, ambientalista (“Hero of Environment” da “Time Magazine”), foi o impulsionador e assessor do presidente Obama para o seu grandioso programa de energias renováveis entre 2009 e 2015, um investimento de aproximadamente 150 bilhões de US\$. Essa experiência permitiu-lhe

conhecer bem os limites das energias renováveis. Num dos seus “Ted Talk”, “How humans save nature”, ele aborda a necessidade de ocupação de solo das diferentes formas de energia, argumentando, de um modo pertinente, que “o homem só consegue proteger a natureza, não a consumindo”, na tentativa de apontar a soluções de produção de energia eficientes quanto ao uso do solo.

É reconhecido que as tecnologias das fontes de energia renovável têm uma potencia energética muito inferior às energias fósseis. Como consequência, em qualquer cenário as percentagens de utilização das diferentes formas de energias renováveis em 2050, é inevitável que a transição energética intensifique a competição global por ocupação do solo (Capellán-Pérez *et al.*, 2017, Rao *et al.*, 1987, Nonhebel S., 2003, Scheidel *et al.*, 2012, Trainor *et al.*, 2016). O aumento da competição pela terra irá induzir necessariamente a perda de biodiversidade, alteração do uso da água ou o aumento das emissões, resultante de mudanças no uso da terra (impactes nos stocks de CO₂, vegetação substituída por solo ocupado para produção de energia).

O papel dos biocombustíveis na mudança drástica do uso de solo no sudoeste asiático é um exemplo extremo dos impactes negativos desta forma de energia. A desflorestação e conseqüente destruição de habitats de espécies ameaçadas, como os orangotangos em Bornéu e muitas outras espécies de mamíferos e aves na Indonésia, para a plantação de palmares para produção de óleo de palma cujo consumo aumentou significativamente na última década, é um exemplo de uma forma de energia que já ultrapassou os limites da sustentabilidade há mais de vinte anos. Paradoxalmente, continua a chamar-se de energia verde. Outros biocombustíveis, cereais por exemplo, competem com o único alimento disponível para uma percentagem significativa da humanidade, aumentando os preços e a procura de mais terra arável e a destruição das florestas e habitats naturais. Mesmo na Europa e nos EUA, a expansão da bioenergia já foi identificada como o principal impulsionador da recente mudança dos indicadores do uso do solo e conseqüentes impactes (Don A. *et al.*, 2012).

A mais recente crise pandémica do vírus SARS-CoV-2, veio colocar a descoberto outra face deste problema de invasão, ocupação e destruição de espaços naturais por uma crescente população mundial: o contacto com novos vírus que até agora estavam contidos nos habitats dos espaços naturais agora ocupados.

Vários estudos apresentam indicadores de eficiência energética no uso de solo como o ratio entre a energia produzida e a ocupação de solo necessária para essa produção. Os biocombustíveis são os que detêm os valores mais baixos deste indicador. Outro exemplo da baixa eficiência energética no uso do solo é a energia solar: recentes estudos demonstram que a energia solar é, na realidade, 6 a 7 vezes menos eficiente no uso do solo do que inicialmente se previa (Van de Ven *et al.*, 2021). A Europa, e em particular os países mediterrânicos, começam a lidar com problemas graves de ocupação de áreas protegidas por mega centrais fotovoltaicas.

Porque o planeta é finito, a população crescente, e a manutenção da natureza é vital para o homem, a ocupação e uso de solo das diferentes formas de produção de energia é a segunda importante condição de fronteira na definição das estratégias de transição energética.

3. A ENERGIA GEOTÉRMICA: UM “PLAYER” DETERMINANTE PARA O AUMENTO DA VELOCIDADE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.

A procura intensiva de metais e a eficiência energética relativa ao uso do solo, são duas das mais importantes, porque limitativas, condições de fronteira para a escolha do conjunto de formas de energia mais sustentáveis para cada país, de modo a alcançar-se o desejável aumento da velocidade da transição energética.

É neste contexto que formas de energia limpas e renováveis, fora do “main stream” da energia eólica, hídrica e solar, começam a ser colocadas como alternativas sérias para que um conjunto mais diversificado possa constituir solução para as expectativas criadas nos acordos de Paris em torno da velocidade da transição energética. É o caso da energia geotérmica que

tem ganho um cada vez maior consenso do ponto de vista científico, e da sua viabilidade nas suas componentes técnica e económica.

A energia geotérmica para produção de eletricidade teve o seu aparecimento praticamente no início do século XX e o conjunto mais significativo de projetos concentra-se em zonas do planeta de fácil acesso à água a elevadas temperaturas, porque pouco profundas. Exemplos de países com longo historial de produção de energia hidrotérmica são os Estados Unidos, Filipinas e Islândia.

Já neste século, o conceito de “Hot Dry Rock”, formações geológicas de alta temperatura, baixa permeabilidade e a grandes profundidades começou a ganhar forma como fonte de energia de grande potencial. A isso se deveu a evolução das tecnologias da indústria do petróleo e gás nomeadamente a perfuração, estimulação, produção e controlo geofísico. Por exemplo, as operações de controlo e produção dos reservatórios de petróleo e gás do pré-sal brasileiro efetuam-se entre 5 e 7 km de subsolo, para além da lâmina de água entre 2 a 3 km em operações *offshore*. Estas tecnologias começaram a ser pensadas para a produção de calor das chamadas “Hot Dry Rocks” sob a forma de sistemas de engenharia denominados “Enhanced Geothermal System” (EGS) (Olasolo *et al.*, 2016, Shyi-Min L., 2018). Em termos técnicos, o conceito de EGS é hoje, no atual estado de conhecimento, de I&D e de desenvolvimento, uma realidade técnica de produção de energia a partir destes reservatórios térmicos de grande profundidade e, em muitas situações, economicamente sustentável.

O EGS consiste essencialmente num poço injetor, que transporta um fluido, água por exemplo, até à profundidade da formação “HDR”. Esse fluido é recolhido num outro poço vizinho, ou poços vizinhos, à mesma profundidade, nos chamados poços produtores.

Como a rocha “HDR” é normalmente impermeável, granito é a rocha mais comum destes ambientes geológicos, para que o fluido circule na rocha entre os poços injetor e produtor, aumentando a sua temperatura, é necessário utilizarem-se técnicas de estimulação, que normalmente consistem na criação de fraturas e diáclases, por fraturação hidráulica,

umentando deste modo a permeabilidade da rocha e o contato do fluido circulante com as elevadas temperaturas da rocha. À saída do poço produtor o fluido aquecido é aproveitado para a geração de eletricidade por técnicas clássicas convencionais.

Este “workflow” é comum na produção secundária e terciária de reservatórios de petróleo e gás (processos de “Enhanced Oil Recovery” e “Enhanced Gas Recovery”). Na realidade, os projetos EGS capitalizam sobre as tecnologias maduras da indústria de petróleos nomeadamente dos processos de perfuração do subsolo a grandes profundidades, completação e cimentação dos poços, de métodos de estimulação (fraturação induzida) e gestão de produção. É importante notar que os avanços tecnológicos que proporcionaram a otimização daqueles processos produtivos, resultaram de avultados investimentos em I&D que as maiores empresas de perfuração *offshore* vêm fazendo de um modo continuado.

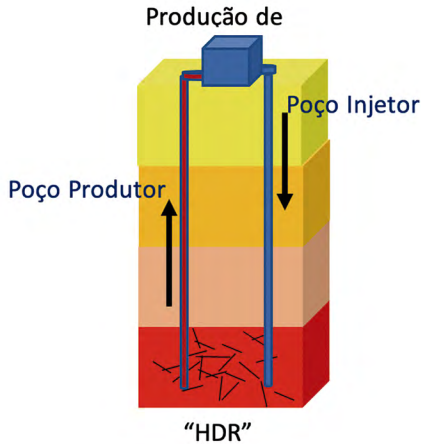


Figura 1. Esquema ilustrativo de um “Enhanced Geothermal System”.

Outras áreas tecnológicas muito avançadas na indústria do petróleo e gás nas áreas de prospeção e produção, das quais os projetos EGS podem beneficiar são a inversão sísmica para o controlo geomecânico do maciço HDR fraturado e os simuladores dinâmicos não-convencionais para alimentar sistemas inteligentes para a gestão da produção.

A prospeção geofísica, em geral, e a sísmica, em particular, para identificação e caracterização de alvos geológicos a grande profundidade, têm tido, nas últimas décadas, avanços tecnológicos notáveis com custos cada vez menores. Os métodos de inversão sísmica (baseadas em modelos de Spatial Data Analysis) conseguem reproduzir imagens de alta resolução, 3D e 4D, das propriedades internas dos alvos geológicos, como por exemplo, o controlo do grau de fraturação de um EGS (Azevedo *et al.*, 2017).

Para a gestão e otimização da produção de um EGS existem neste momento simuladores de fluidos não-convencionais (temperatura) com os quais podemos gerar cenários e explorar espaços de incerteza e risco. Estes simuladores são a base dos chamados “Smart Wells” e “Smart Fields” em que a produção de cada um dos poços é gerido, em tempo real, por sistemas inteligentes de modo (IA) de modo a otimizar a produção conjunta.

Através do EGS, a geotermia torna-se dos poucos recursos de energia renovável que pode fornecer energia de base contínua com mínimos impactos ao nível de ocupação de solo. Na realidade, os projetos EGS são das formas de energia limpa com maior eficiência energética em termos de ocupação de solo. A energia geotérmica, ao contrário das energias renováveis intermitentes, não requer armazenamento e, portanto, pode ser um valioso complemento de outras fontes renováveis — solar (CSP e PV), energia eólica, hidroelétrica — na necessária transição energética de baixo carbono.

4. OS DESAFIOS DOS EGS E UM NOVO “GAME CHANGER”: O “DEEP DRILLING”

Os projetos EGS estão, neste momento, a serem implementados em diferentes escalas (piloto e desenvolvimento) de um modo crescente em todo o onshore do planeta. Contudo, os custos de perfuração continuam a ser um obstáculo à sua implementação quando a rocha “HDR” está a grandes profundidades e atualmente são dos maiores desafios de I&D dos EGS. Estes custos, normais numa operação de produção de petróleo e gás, têm de se tornar competitivos na geração de energia elétrica por EGS na generalidade dos ambientes geológicos.

Até à profundidade equivalente à dos reservatórios de petróleo profundos, 4 km, os métodos de perfuração convencionais são tecnologicamente comprovados com eficiências muito elevadas, economicamente viáveis na produção de petróleo, mas podem tornar uma operação de produção de energia elétrica por um EGS inviável. Os custos de um furo a estas profundidades são, em média, 1 milhão de US\$/dia. Por exemplo, a Petrobras realizou recentemente um furo no Campo de Golfinho, bacia de Espírito Santo, com a mais recente tecnologia patenteada pela empresa, de grande produtividade, que custou 44 milhões de US\$. Um investimento desta ordem de grandeza, pode limitar a implementação de alguns projetos de EGS.

Para além da perfuração dos poços, os projetos de EGS têm de contar com os custos da manutenção dos poços, nomeadamente o revestimento (“casing”) que tem de suportar a componente corrosiva de eventuais gases dissolvidos na água e a prevenção de incrustações (“scaling”) com adição de solventes.

Mas não só a furação convencional sofreu, na última década, uma evolução tecnológica notável, como começaram também a emergir apostas no chamado “deep drilling”, para atingir profundidades superiores a 6 km, com custos inferiores à furação convencional.

Em 2006, o MIT promoveu um estudo realizado por um grande painel de especialistas de diferentes áreas que culminou na publicação de um relatório “The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century”, MIT. Após 14 anos de investimento de I&D do Plasma Science and Fusion Center do MIT, a Quaise Energy, uma “spinout” do MIT, detém uma patente de perfuração de rochas com base na tecnologia de micro ondas de alta frequência (<https://news.mit.edu/2022/quaise-energy-geothermal-0628>). A ideia é a utilização da tecnologia convencional de perfuração até à profundidade de 3 a 4 km e a utilização de micro-ondas de alta frequência a partir dessas profundidades. A utilização de micro-ondas toma partido da tecnologia de micro-ondas e ondas milimétricas, que é utilizada de forma generalizada em máquinas de fusão nuclear, e tem vantagens relativamente a outras

técnicas de perfuração recorrendo a fluidos por, nomeadamente, serem menos poluentes. Está previsto que a primeira sonda de perfuração híbrida combinando perfuração rotativa convencional e capacidades de perfuração de ondas milimétricas seja primeiramente testada em 2024.

Outra ideia inovadora e muito pertinente deste grupo tem a ver com a economicidade do processo na sua fase de arranque. Trata-se da reutilização das centrais de produção de energia a carvão desativadas, alimentando-as com vapor de água a alta temperatura para produzir eletricidade. Quaise estima que perfurar poços e transformar uma central de carvão para produzir 300 megawatts de eletricidade limpa custaria cerca de meio bilhão de dólares, custos incomparavelmente menores do que os da construção uma nova infraestruturas. O objetivo da empresa é realizar testes de campo no Texas ou no oeste dos EUA, em 2024, e começar a fornecer vapor a centrais de carvão reconvertidas, em 2028.

A iniciativa do MIT e o consequente sucesso da empresa inovadora Quaise, veio demonstrar uma outra evidencia: a necessidade de um maior investimento na energia geotérmica. Tal como as mais usuais formas de produção de energia renovável, eólica e solar por exemplo, e armazenamento de energia (baterias), que tiveram de ser subsidiadas no início do seu percurso para ganharem escala e tornarem-se sustentáveis, os EGS também têm de ter apostas mais sólidas em I&D, e agendas mais focadas dos decisores políticos para que a economicidade dos processos dos EGS seja ultrapassada no curto prazo.

REFERÊNCIAS

- Arrobas, Daniele La Porta, Hund, Kirsten Lori, McCormick, Michael Stephen, Ningthoujam, Jagabanta, Drexhage, John Richard. *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future* (English). Washington, D.C., World Bank Group. 2017.
- Axel Don, Bruce Osborne, Astley Hastings, Ute Skiba, Mette S. Carter, Julia Drewer, Heinz Flessa, Annette Freibauer, Niina Hyvönen, Mike B. Jones, Gary J. Lanigan, Ülo Mander, Andrea Monti, Sylvestre Njakou Djomo, John

- Valentine, Katja Walter, Walter Zegada-Lizarazu, Terenzio Zenone. Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *GCB Bioenergy* 4, 372-391 (2012).
- Azevedo L., Soares A., *Geostatistical Methods for Reservoir Geophysics*. 2017. Springer.
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C. & Arto, I. Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77, 760-782 (2017).
- Nunes, J.C., Coelho, L., Carvalho, J.M., Carvalho, M.R., Garcia, J., Portugal Country Update 2020, Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
- Nonhebel, S. Land-use changes induced by increased use of renewable energy sources. In *Global Environmental Change and Land Use* (eds. Dolman, A. J., Verhagen, A. & Rovers, C. A.) 187-202 (Springer Netherlands, 2003). https://doi.org/10.1007/978-94-017-0335-2_8.
- P. Olasolo, M.C. Juárez, M.P. Morales, Sebastiano D'Amico, I.A. Liarte, Enhanced geothermal systems (EGS): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, 2016, Pages 133-144, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>.
- Rao, G. L. & Sastri, V. M. K. Land use and solar energy. *Habitat Int.* 11, 61-75 (1987).
- Scheidel, A. & Sorman, A. H. Energy transitions and the global land rush: ultimate drivers and persistent consequences. *Glob. Environ. Change* 22, 588-595 (2012).
- Shyi-Min Lu, A global review of enhanced geothermal system (EGS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 81, Part 2, 2018, Pages 2902-2921, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097>.
- Trainor, A. M., McDonald, R. I. & Fargione, J. Energy sprawl is the largest driver of land use change in United States. *PLoS ONE* 11, 1-16 (2016).
- Van de Ven, DJ., Capellan-Peréz, I., Arto, I. et al. The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Sci Rep* 11, 2907 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5>

Hidrogénio renovável $H_2(V)$ Um combustível para a Transição Energética

JOSÉ JOÃO CAMPOS RODRIGUES

SÍNTESE

O hidrogénio é uma matéria-prima importante na indústria química, mas, apesar de ser o elemento químico de maior poder calorífico por unidade de peso, a sua valorização nas cadeias energéticas tem sido marginal. O hidrogénio renovável ($H_2(V)$), dando ênfase à sua valorização energética, posiciona-o nos lugares de destaque de várias agendas: da sustentabilidade energética, da economia e da geopolítica, por quatro razões principais:

- Maximiza o aproveitamento de energias renováveis,
- Promove a descarbonização das economias,
- Torna viáveis os objectivos da neutralidade carbónica em 2050;
- Facilita a autonomia energética de qualquer espaço geopolítico.

A União Europeia está comprometida com a transição energética global e lidera a mudança para um paradigma neutro em carbono. É, pois, sensível a cada um destes argumentos. Pretende-se viabilizar um novo paradigma energético ambientalmente neutro, assegurando o armazenamento e a despachabilidade da energia renovável produzida. A versatilidade do $H_2(V)$ (da mobilidade aos processos industriais) torna realista o objetivo assumido na COP28 de eliminar os combustíveis fósseis na década de 40. O $H_2(V)$ recria a cadeia de hidrocarbonetos, mas, sem a emissão de gases de efeito estufa.

O consumo projectado de $H_2(V)$ na UE em 2030 é de 20 Mton/ano, 2,5 vezes o consumo atual de H_2 , representando 7% da energia consumida na UE. A neutralidade carbónica em 2045 (como projeta a UE), será uma meta viável. É uma nova geografia da energia a emergir, sem dependências

dos combustíveis fósseis.

O $H_2(V)$ terá um contributo estratégico na construção do novo modelo energético. Mas, tem ainda um exigente percurso a realizar, no curto/médio prazo:

- *scale-up* das soluções e industrialização dos processos produtivos,
- redução dos custos de produção (CAPEX e OPEX);
- investimento, significativo, na sua cadeia logística.

Espera-se que, em meados da década de 30, o custo do H_2 renovável (via eletrólise da água) seja competitivo com o custo do H_2 obtido por reformação. Esta aproximação progressiva, deve ser apoiada por incentivos para cobrir (de forma regressiva) o *gap* de competitividade estimado. Os mecanismos já aprovados — leilões de H_2 (Banco de Hidrogénio e Fundo de Carbono) e o Sistema de Incentivos de Apoio à Produção de Hidrogénio Renovável, são instrumentos desenhados com esse enquadramento e de que se espera, se adequadamente financiados, esse contributo.

Recentemente, foram descobertas grandes reservas de hidrogénio geológico. Em 2024, os Serviços Geológicos dos EUA testemunharam no Senado que essas reservas têm potencial para satisfazer as necessidades energéticas globais por centenas de anos. A confirmarem-se, estas reservas poderão revolucionar a estratégia global da transição energética, reforçando o contributo do H_2 .

RECOMENDAÇÕES:

Prospecção de H_2 geológico em território nacional;

Financiamento da rede pública de postos de abastecimento a H_2 (indexada à dimensão do parque automóvel);

Atualização da ENH2 – alinhado-a com o FIT55 e o RePowerEU (e com o PNEC 202030 – rev. 2024) e do do plano de investimento associado;

Ambicionar Portugal como um espaço com autonomia energética no médio prazo (2040?);

Consolidação do cluster nacional do $H_2(V)$, associado aos investimentos projetados.

1. NARRATIVA DO HIDROGÊNIO

a) Um cenário idílico do pós-guerra

Após a 2.^a Guerra Mundial, verifica-se uma estabilidade nas plataformas de oferta energética, que respondia adequadamente à procura crescente por energia, resultante do desenvolvimento das economias de mercado da época. Os combustíveis fósseis, carvão e petróleo (a que se junta posteriormente o GN), satisfaziam os vários segmentos da procura:

- Produção de eletricidade (secundados pela hidroeletricidade);
- Mobilidade;
- Indústria;
- Residencial e serviços (com a climatização a ganhar progressiva relevância).

A energia nuclear perfilava-se (década de 70) como um sucessor dos combustíveis fósseis, pelo menos no que respeitava à produção de eletricidade. O abastecimento energético estava assegurado no longo prazo, não suscitando grandes dramas. O mercado funcionava.

Mas, surgem no horizonte (anos 80) sinais de perturbação deste equilíbrio:

- As crises petrolíferas, que culminam, já no final do século, com a ameaça do fim do petróleo, por previsível esgotamento das reservas (à época) conhecidas. Os preços da energia disparam, e o mercado da energia enfrenta várias instabilidades, que vão exigir novas abordagens e outras políticas;
- Os acidentes nucleares de Three Mile Islands (1979), Chernobyl (1986) e mais recentemente Fukushima (2011), conduzem a moratórias da energia nuclear na maioria dos países desenvolvidos e pondo em causa esta solução tecnológica;
- O protocolo de Kyoto (1997) assume os alertas sobre as amea-

ças das alterações climáticas para o futuro da humanidade. Tornava-se imperioso controlar a emissão dos gases com efeito de estufa, nomeadamente o CO₂. As medidas então preconizadas são reforçadas com o Acordo de Paris sobre as Alterações Climáticas (2015). Recentemente, a COP 28 – Dubai (2023) aprova o fim dos combustíveis fósseis (até 2040) e define o objetivo da neutralidade carbónica em 2050 a nível global.

- A guerra da Rússia à Ucrânia (2022) expõe a vulnerabilidade energética da UE, resultante da dependência do GN proveniente da Federação Russa. Assegurar a soberania energética da União torna-se um objetivo estratégico prioritário na definição das políticas comunitárias.

O modelo energético do pós-guerra está posto em causa. Há que, de forma já acelerada, substituir os combustíveis fósseis. A chave da solução está nas energias renováveis, nomeadamente a solar e a eólica. São tecnologias já maduras, que podem assegurar a satisfação das necessidades energéticas da economia global.

b) A Transição energética e o contributo do H₂ renovável

A solução está num novo paradigma energético, em que a fonte primária de energia seja renovável, inesgotável, não poluente e economicamente competitiva com a energia fóssil. A mudança de paradigma é técnica e economicamente viável e não se traduz, necessariamente, num aumento de custos para os consumidores. Mas a energia renovável coloca outros desafios ao modelo energético, que condicionam/limitam a sua adoção como solução universal:

- Sazonalidade;
- Intermitência e aleatoriedade;
- Não ser despachável,
- Obrigando a soluções de armazenamento (baterias e bombagem).

Estas características afetam a fiabilidade e a operacionalidade do sistema. A energia elétrica, de origem renovável, carece de flexibilidade

e de versatilidade, para poder assegurar um sistema robusto. Adicionalmente não é uma solução satisfatória para várias indústrias, nem para a mobilidade.

Satisfazer, com segurança, uma procura aleatória, através de uma oferta igualmente aleatória, obriga a recorrer a um vetor intercalar de armazenamento, que confira despachabilidade ao sistema: garantia de satisfação da procura, sem perdas significativas da produção (*curtailment*), inerentes a soluções de sobredimensionamento da oferta.

O hidrogénio renovável/verde ($H_2(V)$), produzido por eletrólise da água, torna-se uma chave para a viabilização do modelo energético baseado na oferta renovável, tornando-a despachável. É uma forma química de armazenamento da eletricidade produzida e não consumida. A sua versatilidade, flexibilidade e reversibilidade permite comunicar entre as cadeias energéticas, satisfazendo o mais largo espectro de aplicações. Podemos, com tranquilidade, libertar-nos dos combustíveis fósseis como fontes primárias de energia. Atingir a neutralidade carbónica já só depende da vontade política de, cumprindo o compromisso assumido na COP 28, eliminarmos os combustíveis fósseis do modelo energético. Este é o desafio político da Transição Energética, que o $H_2(V)$ torna credível.

c) Introdução ao hidrogénio^a

Primeiro elemento da tabela periódica

Substância mais abundante no Universo, mas... não em estado livre (pensava-se)

Densidade: 0,0899 kg/m³ | (Ar: 1,225 kg/m³)

PCI: 33,8 kWh/kg | 3,0 kWh/m³ (GN: 13,4 kWh/kg | 10,8 kWh/m³)

^a O hidrogénio (gerador de água) foi assim batizado por Lavoisier, em 1783. O conhecimento da existência deste gás remonta a 1671, quando Robert Boyle descreve a libertação de um gás na reação de limalha de ferro com ácidos diluídos. Henry Cavendish (1766) foi o primeiro a identificar o hidrogénio como uma substância discreta, que formava água quando ardia. A descoberta da sua produção por eletrólise da água deve-se a William Nicholson e Anthony Carlisle (1800). A primeira célula de combustível com a produção de eletricidade remonta a 1839 (Sir William Grove). Deve-se à NASA (Missões Apolo e Gemini, 1960) as primeiras aplicações de células de combustível alcalinas para a produção de energia elétrica no interior das naves espaciais.

O hidrogénio é o elemento mais abundante existente no Universo. Por unidade de massa contém mais energia que qualquer outro combustível. É uma matéria-prima usada numa grande variedade de processos industriais, nomeadamente refinarias, fabricação de aço e indústria química. Mas o H₂ não está disponível de forma livre na natureza, tendo de ser obtido por processos químicos e eletroquímicos a partir de diferentes matérias-primas de cuja composição faz parte.

Nota: Esta afirmação corre o risco de estar desatualizada no curto prazo, com a recente descoberta de jazidas de H₂ no subsolo, algumas de grande dimensão. Numa deposição recente, em 2024, dos Serviços Geológicos americanos perante uma Comissão do Senado dos EUA, foi afirmado que o potencial de reserva de H₂ no subsolo a nível global pode ser suficiente para satisfazer as necessidades energéticas mundiais durante centenas de anos.^b

O mercado mundial de H₂ está avaliado em cerca de 200 B\$US (2021), tendo a procura mundial crescido aproximadamente 300% desde 1975. O consumo mundial de H₂, em 2019, foi de 112 Mt (dados IEA). Os principais segmentos de consumo são as refinarias (35 Mt – 31%) e a produção de amónia (31 Mt – 28%) e metanol (12Mt – 11%). Apesar do seu elevado poder calorífico (2 vezes superior ao GN), e de ser reconhecido como um meio de armazenar e transportar energia, a sua utilização do H₂ como vetor energético tem sido marginal (sendo a aplicação mais emblemática a propulsão aeroespacial).

O H₂ é uma matéria-prima que a indústria mundial conhece bem, dominando a sua cadeia de valor da produção ao consumo, nas mais diversas aplicações. Mas, o H₂ não é uma *comodity* com significado no comércio internacional. É normalmente produzido junto dos lugares de consumo, seja em unidades integradas (ex.: GALP, em Sines) seja em regime de outsourcing por empresas especializadas. O comércio internacional é pouco significativo e visa sobretudo satisfazer os consumos de aplicações de pequeno volume (metalurgia, arrefecimento de alternadores, indústria

^b Ellis Testimony 2-28-24 SENR Cmte Hrg .pdf (senate.gov).

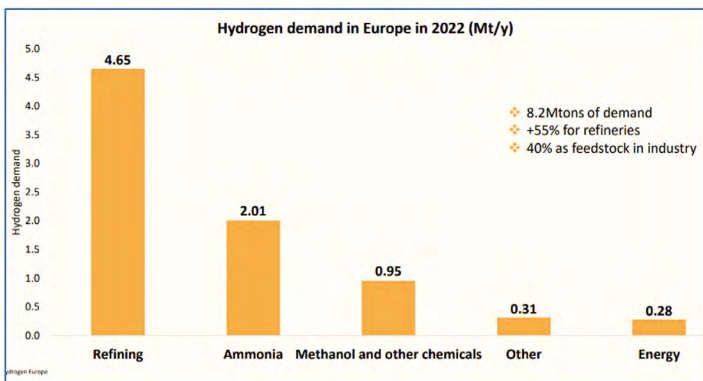
alimentar, química, farmacêutica, vidreira...).

São várias as tecnologias para a produção de Hidrogénio:

- Reformação
- Electrólise
- Fotólise
- Hidrólises várias (Al, ...)^c
- Bioquímicos
- Pirólise
- Termólise
- Culturas microbiológicas

Em 2019, a produção mundial de H₂ foi de 114Mt (dados da IEA), maioritariamente produzido por reformação a partir do GN (69 Mt). A outra via importante de obtenção de H₂ é como subproduto de eletrólises em diversas cadeias de valor da indústria química.^d A produção direta de H₂ eletrolítico a partir da água, é residual. As outras tecnologias listadas de produção de H₂ estão em TRL 7 ou inferiores, e, com exceção da Termólise, têm um potencial económico reduzido de produção em larga escala.

d) Economia europeia de H₂



Hydrogen demand in Europe 2022. H₂ Europe.

^c A hidrólise de metais diversos é uma das hipóteses avançada para explicar o aparecimento de jazidas subterrâneas de H₂.

^d Parte dele tem sido simplesmente libertado para a atmosfera por falta de *oftakers*.

A capacidade instalada na UE para a produção de H_2 é de 11 Mton/ano (10% da produção mundial), 90% por reformação e 10% como *by-product* de electrólises diversas. Em 2022, o consumo na UE foi de 8,2 Mt (<10% do consumo mundial) — refinarias (55%) e indústria química (40%) são os principais *oftakers*. A sua utilização como vetor energético foi <3%.

A Alemanha, Holanda e Polónia em conjunto são responsáveis por 43% do consumo total de H_2 na Europa.

e) A nova economia do H_2 renovável

O desafio novo que se coloca é a ênfase dada à produção de H_2 por via electrolítica, em alternativa ao recurso à reformação de combustíveis fósseis. É valorizar o H_2 como vector energético, e explorando a sua versatilidade e reversibilidade, ser em simultâneo:

- Um veículo para armazenamento de energia eléctrica, conferindo despachabilidade a um sistema primário renovável;
- Um combustível alternativo aos combustíveis fósseis, descarbonizando a indústria e a mobilidade;
- Uma matéria-prima industrial nos segmentos tradicionais da sua utilização (amónia, siderurgia, metanol...) conferindo sustentabilidade ambiental a estas actividades industriais,
- A amónia e o metanol, por sua vez, ganham novas valências como *carriers* de $H_2(V)$ no comércio internacional, nomeadamente transcontinental. A economia do $H_2(V)$ pode, assim, beneficiar de uma logística já bem estabelecida.

Há um exercício, diletante, de atribuir cores ao H_2 , dependendo do processo produtivo utilizado e/ou da fonte de energia eléctrica. Não é uma abordagem a que atribuamos particular interesse. Mas, o que queremos relevar é haver uma via renovável, não poluente e inesgotável, de produzir hidrogénio, que viabiliza um novo paradigma energético ambientalmente sustentável e que contribui para serem atingidos os objetivos climáticos de combate ao aquecimento global: O hidrogénio renovável, que no referido código de cores é comumente designado por hidrogénio Verde – $H_2(V)$.

2. HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, DRIVERS, UMA NOVA VISÃO

To meet the world's decarbonization goals, the public and private sectors must invest from \$6 trillion to \$12 trillion by 2050 in assets to produce and transport low-carbon hydrogen, according to BCG's calculations. Demand for hydrogen in 2021 amounted to 94 million tons—around 99% of it in the form of gray hydrogen—but demand for low-carbon hydrogen is projected to be approximately 350 million tons per annum (mtpa) by 2050 in the 2 °C warming scenario and as much as 530 mtpa in the 1.5 °C scenario. Hence the need for \$6 trillion to \$12 trillion in capital expenditure from 2025 to 2050 – Building the Green Hydrogen Economy, BCG, March 2023.

a) Drivers para o H₂(V)

A transição energética vai marcar a época atual. A transição não é uma opção política nem uma questão ideológica. É:

- a via disponível para se atingir a neutralidade carbônica até 2050 (PARIS 2015) e minimizar os riscos decorrentes das alterações climáticas;
- um imperativo para a sobrevivência no curto prazo da humanidade;
- uma responsabilidade face ao futuro das novas gerações que temos de saber assumir.

Os combustíveis fósseis têm o seu destino traçado, o compromisso já está assumido pela COP 28 (Dubai, 2023).

O quadro geopolítico atual introduz um novo fator que decorre da dependência da matriz energética europeia do gás natural (GN), que ficou claramente exposta com a guerra na Ucrânia. Houve necessidade de encontrar alternativas, com os preços de energia a apresentarem grande volatilidade, afetando as indústrias mais dependentes da energia. Os gases renováveis (leia-se H₂(V) e metano) são parte dessa solução energética alternativa, permitindo aos diferentes espaços geográficos, comunidades

e indústrias criarem soluções autónomas, cortando com a dependência atual dos hidrocarbonetos de origem fóssil.

O $H_2(V)$ é o vetor energético que torna viável este novo modelo energético. Permite uma gestão eficaz das fontes renováveis, transformando-as em formas despacháveis de energia.

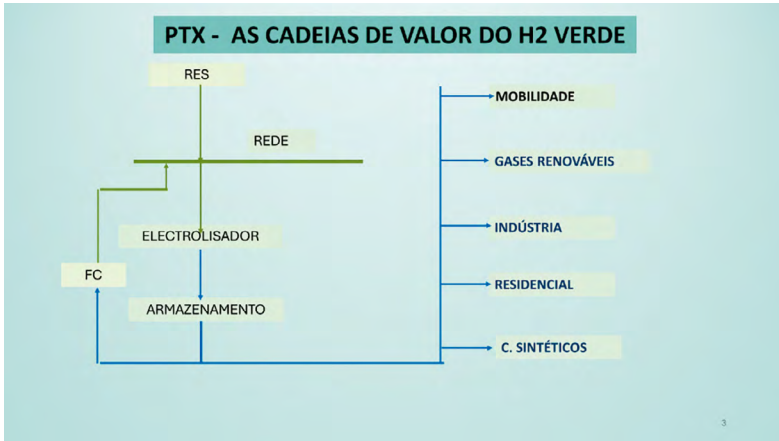
- É uma via de armazenamento de energia elétrica, que possibilita o ajustamento da oferta à procura;
- É uma alternativa aos hidrocarbonetos, requeridos pela mobilidade ou consumidos nos processos industriais;
- Tem um impacto geopolítico que deve ser realçado: qualquer Comunidade pode ambicionar à sua autonomia energética, retirando da Agenda internacional as tensões associadas ao acesso à energia;
- Contribuirá para a estabilização dos preços de energia nos mercados internacionais, eliminando as movimentações especulativas a que se tem assistido, e agravadas em 2021;
- É inesgotável, dependendo a sua produção unicamente da disponibilidade de uma fonte de energia elétrica renovável e de água.

b) A cadeia de valor do $H_2(V)$

O $H_2(V)$ é um vetor energético com grande versatilidade e flexibilidade, fazendo a comunicação entre diferentes cadeias energéticas, nomeadamente entre a rede elétrica e a rede de gases renováveis. As pilhas de combustível asseguram a reversibilidade do processo de eletrólise, isto é, a partir do H_2 (e O_2) posso obter novamente energia elétrica (com as perdas inevitáveis — a termodinâmica não perdoa). Como gás pode substituir o GN (parcial ou na totalidade) nos processos de combustão (descarbonização total ou parcial dos processos de queima), ou como matéria-prima em reações catalíticas de que as mais comuns são com o CO_2 (cadeia de hidrocarbonetos sintéticos) e com o N_2 (produção de amónia verde para fertilizantes).

O H_2 permite armazenar os excessos de energia produzida e não

consumida transferindo-a para outros usos ou voltando a injetá-la na rede, quando a oferta não é suficiente para satisfazer a procura. Está assegurada a despachabilidade do sistema renovável.



Cadeia de valor do H₂(V)

São as cadeias **PtX** (*Power to X*) centrais no desenvolvimento da economia do H₂. O **X** pode ser diverso, conforme o enquadramento pretendido:

- PtP – *Power to Power* – produção de energia elétrica;
- PtG – *Power to Gas* – produção de metano;
- PtF – *Power to Fuel* – produção de hidrocarbonetos líquidos;
- PtNH₃ – *Power to Ammonia* – produção de amoníaco.

O **X** é o vetor que assegura o armazenamento, transporte e distribuição de uma energia renovável, de outra forma desperdiçada.

c) Aplicações/usos

Em primeira instância o mercado do H₂(V) é o mercado já pré-existente para o hidrogénio, agora descarbonizado (refinarias, produção de aço, amoníaco, metanol...). O H₂(V) será uma alternativa ao H₂ produzido por via da reformação do GN. Mas, o mercado do H₂(V) é um mercado muito mais vasto, potenciando as suas valias energéticas e a sua versatilidade:

- Combustível de substituição do GN, nomeadamente nos processos industriais em que a eletrificação não se revela eficiente;

- Produção de Metano renovável, reforçando a cadeia de Biometano renovável;
- Combustível para a Mobilidade, em alternativa a baterias ou a hidrocarbonetos de origem fóssil.

Em síntese, o mercado do $H_2(V)$ adiciona aos mercados existentes a valorização energética do hidrogénio, em competição com os combustíveis fósseis: Gases renováveis, Mobilidade e Combustíveis sintéticos.

i) Redes de gases renováveis

O *blend* de H_2 com o GN visando a descarbonização parcial da rede de GN tem sido o mercado inicial do $H_2(V)$, com capacidade de absorver grandes volumes de hidrogénio. Este *blend* pode atingir 20% em volume do gás comercializado, cumprindo as normas atuais relativas ao poder calorífico do GN e sem necessidade de quaisquer adaptações nos dispositivos finais de consumo. Está a ser uma via da indústria e consumidores ganharem habitação ao novo combustível, sem rupturas ou alterações de procedimentos. Mas, o seu alcance está limitado, ganhando forma novas configurações a implementar no médio prazo.

- Redes de hidrogénio

As redes de hidrogénio, autónomas do GN, estão já a ser desenhadas e implementadas em várias geografias a nível global. A figura seguinte apresenta a rede de hidrogénio projetada para a Europa (<https://ehb.eu/page/european-hydrogen-backbone-maps>).

É uma rede aberta de transporte, similar à rede elétrica atual, à qual terão acesso produtores e distribuidores. Esta rede primária integrará as reservas estratégicas de H_2 , à semelhança do que se verifica atualmente para o GN.^e

- Redes de biometano/metano renovável

O GN será progressivamente substituído pelo Biometano e por Metano renovável obtido por reação catalítica de $H_2(V)$ e CO_2 biogénico (cadeia PtG),

^e No caso português estão em curso os estudos preliminares para a adaptação de cavernas de sal com esse objetivo.

assegurando-se o abastecimento dos consumidores, sem alteração dos seus padrões de consumo. Esta solução vai permitir eliminar a importação de GN, sem perturbações para os consumidores.^f



EHB European Hydrogen Backbone

- Hydrogen Valleys

São mini redes de âmbito local/regional que agregam vários produtores e consumidores. É de prever a ligação futura dos Hydrogen Valley entre si, gerando uma segunda rede de H₂ que reforça e se interliga com o próprio Backbone.

ii) Descarbonização da indústria

Embora a eletrificação seja a solução de descarbonização preconizada, nem em todas as situações constitui a via mais adequada para algumas indústrias, muito dependentes do GN como fonte de energia. A substituição do GN por H₂, em regime de autoconsumo, é a via que está a ser favorecida, embora essa mudança não seja pacífica, quer no que se refere a processos produtivos, quer na adaptação dos equipamentos para um novo combustível.

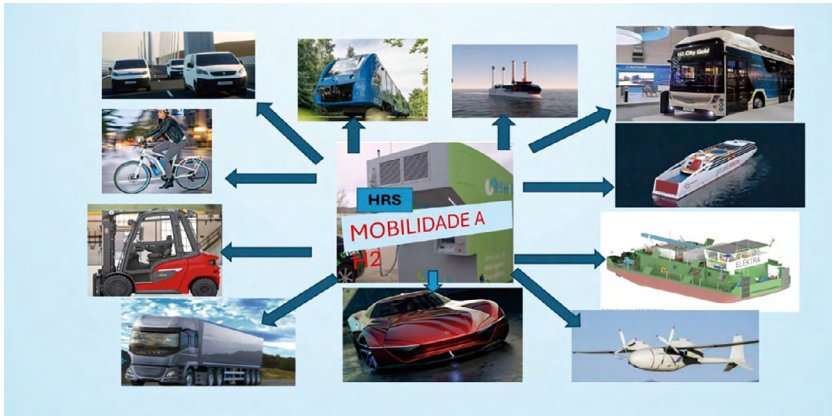
^f Portugal prevê poder deixar de importar GN em 2040.

iii) Mobilidade

O sector dos transportes (rodoviário, aéreo e marítimo) é responsável por cerca de 20 % das emissões de CO₂.

A eletrificação (baterias ou H₂) é a solução que recolhe as preferências do sector, nomeadamente as baterias. A falta de uma infraestrutura de apoio de abastecimento de H₂ é um condicionante adicional à penetração do hidrogénio neste segmento potencial.

A adoção do hidrogénio na Mobilidade está a verificar-se essencialmente através da mobilidade pesada, seja de carga ou passageiros, segmentos em que as baterias têm mais dificuldade em acompanhar as especificações de autonomia dos operadores.



Mobilidade a Hidrogénio.

Outros segmentos a considerar são a aviação e o transporte marítimo, em que a eletrificação não é igualmente solução. As soluções vão passar principalmente por combustíveis sintéticos renováveis, para a produção dos quais o hidrogénio é determinante (SAF– Sustainable aviation Fuels).

A figura anterior ilustra de forma expressiva as potencialidades do H₂(V) como combustível para a Mobilidade.

As demonstrações e testes abrangem a globalidade das aplicações de Mobilidade. O sucesso com os empilhadores justifica uma nota de realce, face

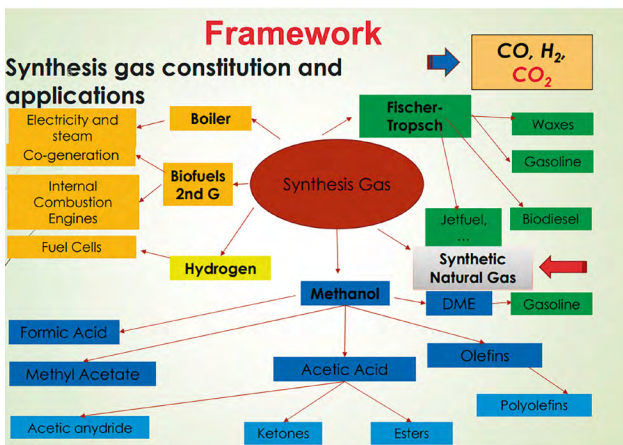
às vantagens competitivas reveladas face às soluções já existentes no mercado.

Uma mudança com algum significado pode vir a acontecer neste segmento de mercado, com a reconversão dos MCI para H₂, em alternativa às pilhas de combustível, nos segmentos ligeiros, e na mobilidade pesada.

iv) Combustíveis sintéticos

Os hidrocarbonetos renováveis (sintéticos) são a alternativa aos combustíveis fósseis, cuja saída do mercado é imperiosa face aos desafios da sustentabilidade ambiental e da mitigação das alterações climáticas.

A base para a sua produção consiste no gás de síntese (mistura em proporções variadas de H₂, CO₂ e CO) sujeito a reações catalíticas diversas para a obtenção nomeadamente de Metano e Metanol, de que pode derivar uma cadeia de hidrocarbonetos para as mais diversas aplicações nomeadamente na substituição dos combustíveis fósseis. Para que o combustível possa ser classificado como renovável, todos os seus componentes terão de ter esse atributo, isto é, serem obtidos a partir de eletricidade verde (caso do H₂) ou resultarem de matéria orgânica/resíduos lenho celulósicos (CO₂/CO).



A cadeia de combustíveis sintéticos – Jaime Puna, ISEL, 2024.

É uma tecnologia que se pode considerar madura (TRL 9), mas que continua a colocar desafios à comunidade científica e tecnológica no objetivo

de melhoria do desempenho e redução de custos.

A figura seguinte apresenta a cadeia de produtos que se pode obter a partir de reacções catalíticas do gás de síntese. A utilização de CO₂ biogénico permite caracterizar os produtos obtidos como neutros ou de baixa intensidade carbónica, tornando o seu uso particularmente apelativo na navegação marítima e na aviação.[§]

Uma outra cadeia sintética a ser mencionada é a da produção de Amónio verde. Neste caso a reacção do H₂ é com o azoto (obtido por separação do ar). É um processo químico já bastante conhecido e utilizado, visando principalmente a produção de fertilizantes (processo de Haber-Bosch). A nota inovadora é a do uso de H₂(V) tornando sustentável a cadeia de valor em que se inserem, com impacto na descarbonização da agricultura.

d) Novo mapa energético

O H₂(V) está a moldar um novo mapa energético, com implicações geoestratégicas nas próximas décadas. A era do petróleo dará lugar à era das energias verdes, em que o H₂(V) desempenhará um papel chave.

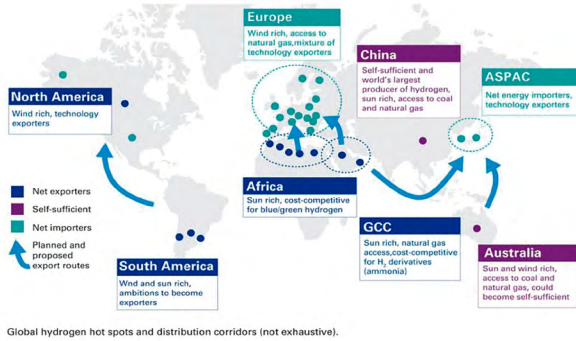
A geografia da energia altera-se com a emergência dos novos polos, que se desenham:

- América do Norte, Austrália, Norte de África e Médio Oriente serão, em 2050, os principais polos produtores de H₂ verde;
- América Latina e a África subsariana terão igualmente um contributo importante para esta nova economia, embora em menor escala face ao grupo anterior;
- Índia e China com produções relevantes, embora orientadas preferencialmente para a satisfação dos seus consumos internos;
- A UE poderá satisfazer internamente metade dos seus consumos, mas continuará a depender de forma significativa das importações;
- Metano, metanol, amónio e combustíveis sintéticos serão dominantes na logística associada ao comércio internacional do

[§] O CO₂ pode ser obtido por sequestro de efluentes de processos industriais, mas nesse caso os combustíveis fabricados não serão classificados sustentáveis.

hidrogénio, quer como *carriers*, quer como combustíveis.

A figura seguinte, da KPMG (2022), ilustra estes novos movimentos. Principal nota é o posicionamento da África e América do Sul como países exportadores de energia verde.



Fonte:
KPMG
(2022)

Global hydrogen hot spots...

H₂(V) NA AGENDA EUROPEIA

a) Protagonismo da UE

A UE está a implementar um plano ambicioso para reduzir a sua dependência dos combustíveis fósseis e acelerar a transição ecológica, através da poupança de energia, do investimento em energias renováveis e da diversificação do abastecimento energético.

No conjunto dos grandes blocos geopolíticos a UE tem assumido grande protagonismo no combate às alterações climáticas e na tomada de medidas visando a eliminação das emissões poluentes que contribuem para o efeito de estufa. Definiu metas ambiciosas de redução das emissões poluentes, subscrevendo os objectivos da Conferência de Paris (FIT 55). De forma consequente, a UE está a investir na Economia do H₂(V) como uma solução viável para a descarbonização e sustentabilidade energética, nomeadamente na sequência da Conferência de Paris.

Com a guerra da Rússia à Ucrânia o protagonismo e a liderança europeia relativamente à Economia do Hidrogénio ganhou maior relevância. A vulnerabilidade da UE ficou patente. A dependência energética da Rússia, tornou-se uma ameaça à soberania da própria UE. Houve que, de forma acelerada, reformular as estratégias energéticas da UE enquanto bloco político, com uma estratégia assente em dois pilares: diversificação das fontes de fornecimento e descarbonização do sistema energético, maximizando a eletrificação e o recurso às fontes renováveis de energia. É o paradigma energético assumido pelo RePowerEU, em que, pelas razões expostas, o H₂ ganha grande relevância.

É um processo que se tem desenvolvido no quadro da parceria estratégica estabelecida entre a UE, a Indústria Europeia e o Sistema Científico e que conduziu à criação em 2021 da Clean Hydrogen Partnership, sucedânea da FCH-JU.^h O objetivo é reforçar e integrar a capacidade científica da UE, a fim de acelerar o desenvolvimento e a melhoria de aplicações avançadas de hidrogénio limpo. Os três membros da parceria são a União Europeia, representada pela Comissão Europeia, as indústrias das pilhas de combustível e do hidrogénio representadas pela Hydrogen Europe e a comunidade de investigação representada pela Hydrogen Europe Research. A UE apoia a Clean Hydrogen Partnership com mil milhões de euros para o período 2021–2027, complementados por, pelo menos, um montante equivalente de investimento privado (dos membros privados da parceria), elevando o orçamento total para mais de 2 mil milhões de euros.

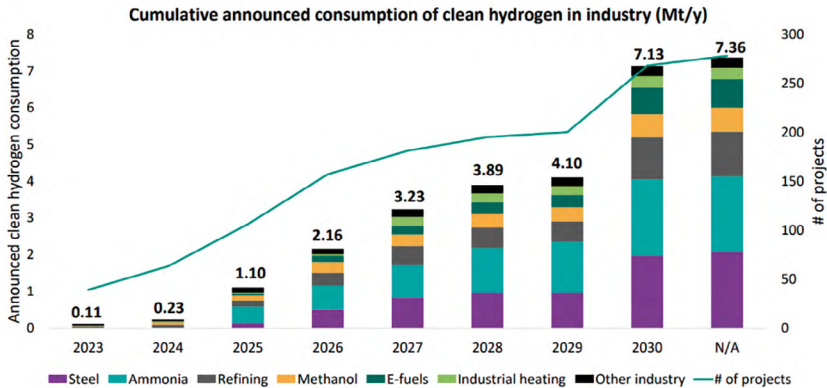
Foi interessante acompanhar, nestes últimos anos, as diligências de responsáveis políticos e investidores europeus junto de países terceiros, nomeadamente África e América Latina, na negociação de projectos de investimento de larga escala para a produção de hidrogénio verde, reformulando-se assim, como já se referiu, a geografia da energia a nível mundial e contribuindo para a criação de valor num conjunto de países em desenvolvimento, nomeadamente os países da orla mediterrânica do Norte de África, mas não só.

^h FCH-JU_ Fuel Cell and Hydrogen- Joint Undertaking.

b) Road Map Europeu

Objetivos escalonados ao nível do *road map* estabelecido pela Comissão Europeia:

- 2020–2024: Pelo menos 6 GW de capacidade instalada e produção de 1 Milhão de ton de hidrogénio (especial enfoque da European Clean Hydrogen Alliance);
- 2025–2030: O hidrogénio verde como parte integrante do sistema energético de cada Estado-Membro, incluindo, pelo menos, 40 GW de capacidade instalada e a produção de 10 Milhões de ton – “Hydrogen Valleys”;
- 2030–2050: maturidade de tecnologias de produção de $H_2(V)$ e implementação de economias de escala, com a redução generalizada de preços ao nível dos *inputs*.

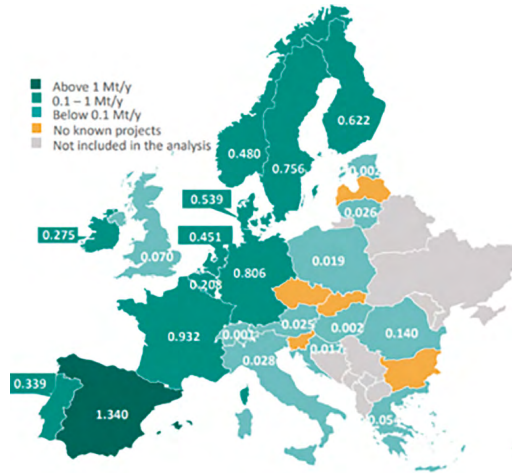


Consumo de $H_2(V)$ na indústria por sectores – H2EUROPE.

A figura anterior apresenta as projeções do consumo de $H_2(V)$ na indústria até 2030. Indústria do aço, Amoníaco e Refinarias serão os principais consumidores, prevendo-se o crescimento do consumo de cerca de 100 ton, em 2023, para 7.36 Mton, em 2030, num total acumulado de mais de 250 projetos.

A figura seguinte representa o consumo na indústria esperado por País, em 2030. Os principais consumidores serão os países que atualmente têm

maiores consumos de H_2 de origem fóssil, e que beneficiam de um potencial relevante de fontes renováveis



Consumo de H_2 (V) na Indústria (H2Europe).

c) Medidas

A sustentabilidade climática obrigou a antecipar respostas planeadas na sequência do Acordo de Paris. A guerra da Ucrânia colocou em Agenda a vulnerabilidade energética do espaço europeu: a autonomia energética tornou-se uma prioridade para a UE.

Foram várias (e robustas) as respostas comunitárias a esta alteração do enquadramento das políticas da sustentabilidade energética. Destacamos:

- Lei do Clima Europeia (Regulamento (eu) 2021/1119, de 30 de junho de 2021;
- Pacote “Fit-for-55” (COM(2021) 550 final), em 2021;
- Plano RePowerEU (COM(2022) 230 final), maio de 2022;
- Plano Industrial do Pacto Ecológico (COM(2023) 62 final), fevereiro de 2023.

i) Fit for 55

Na sequência da Lei do Clima Europeu, que fixa o objetivo de redução em 55% da emissão dos gases de efeito de estufa, até 2030, para que as metas

de 2050 possam ser atingidas, a Comissão aprova um plano abrangente e ambicioso de medidas para os vários sectores da atividade económica com as medidas a tomar e que constitui um guião das políticas comunitárias visando a sustentabilidade ambiental no quadro da transição energética.

Entre as medidas previstas neste pacote, com incidência mais direta na Economia do Hidrogénio, destacamos:

- UE ETS – Sistema de comércio de emissões
- CBAM – The carbon border adjustment mechanism
- Emissões 0 para viaturas ligeiras a partir de 2035
- Soluções de combustíveis de baixo carbono para a aviação (SAF) e transportes marítimos
- Criação de uma infraestrutura de abastecimento de combustíveis alternativos (AFIR)
- Revisão da diretiva de renováveis: pelo menos 40%, em 2030
- Infraestrutura logística do Hidrogénio

ii) RePowerEU

Na sequência da guerra da Ucrânia, a UE aprovou o RePowerEU, cuja principal referência é a redução da dependência energética, em alinhamento com os objetivos do *FIT 55*, anteriormente aprovado.

O H2 verde tem um contributo significativo para os objetivos do RePowerEU, tendo-se definido um target de consumo de 20 Mton de H₂ até 2030 (2,5 vezes o consumo atual de H2 na UE), das quais 10 Mton se preveem importadas. Este objetivo corresponde à satisfação de 7% do consumo anual final de energia da UE.

A capacidade de eletrólise associada, a instalar, é de 100GW, num investimento superior a 100 B€.

O Mecanismo de Recuperação e Resiliência (MRR), criado no rescaldo da crise da COVID-19 como um instrumento temporário para mitigar o impacto económico e social da pandemia, é o principal instrumento de financiamento do plano. Procedeu-se à sua revisão para permitir aos Estados-Membros adicionar capítulos específicos do RePowerEU aos seus

planos de recuperação e resiliência, para financiar medidas de investimento e reforma em linha com os objetivos deste plano.

iii) Banco do Hidrogénio

A criação do Banco do Hidrogénio, com investimento de 3.000 M€, é outra medida a assinalar no quadro do plano europeu. O Banco do Hidrogénio vai intervir no mercado assegurando, nesta fase de transição, por um mecanismo de leilão, um preço do hidrogénio competitivo com o dos combustíveis fósseis.

O primeiro leilão foi agora realizado, com um valor máximo de subsídio do H₂ é de 4,00€/kg. O orçamento indicativo para o primeiro leilão foi de 800 milhões de EUR, tendo em conta os resultados dos testes de mercado já realizados e a necessidade de criar um nível de concorrência adequada.

iv) CBAM- Mecanismo Fronteiriço de ajustamento do Carbono

O Mecanismo Fronteiriço de Ajustamento Carbono é o instrumento da UE para atribuir um preço justo ao carbono emitido durante a produção de bens com utilização intensiva de carbono que entram na UE, e para incentivar uma produção industrial mais limpa em países terceiros.

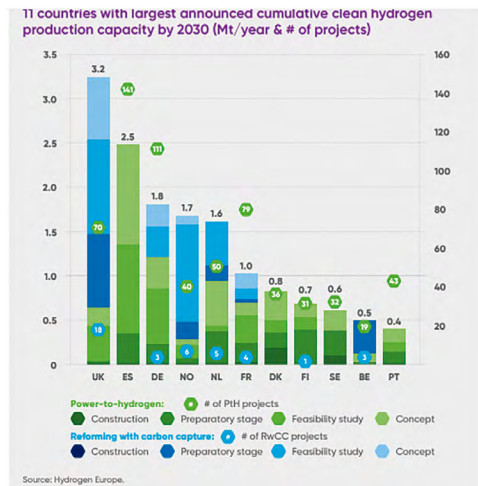
Ao confirmar que foi pago um preço pelas emissões de carbono incorporadas geradas na produção de determinados bens importados para a UE, o CBAM garantirá que os objetivos climáticos da UE não estão prejudicados, protegendo a indústria europeia de dumping ambiental de países terceiros. O CBAM foi concebido para ser compatível com as regras da OMC.

O CBAM será aplicado no seu regime definitivo a partir de 2026, enquanto a atual fase de transição dura entre 2023 e 2026. Esta introdução gradual do CBAM está alinhada com a eliminação progressiva da atribuição de licenças gratuitas no âmbito do Regime de Comércio de Emissões da UE (ETS) para apoiar a descarbonização da indústria da UE.

d) Pipeline de projetos

O pipeline “GW scale projects” a implementar até 2030 excede atualmente os 250 GW, estimando-se uma capacidade instalada de $H_2(V)$ superior a 50 milhões de ton/ano (cerca de 50% do consumo atual global de H_2), com o mercado europeu a representar cerca de 40% deste total. São projetos que cobrem praticamente todos os continentes.

Em termos de UE este processo é dominado pelos países nórdicos e ocidentais, sendo de salientar que os investimentos de produção de H_2 com sequestro de carbono se mantêm significativos nalguns países, com especial destaque para a Grã-Bretanha, Noruega, Países Baixos e Bélgica (que dispõem das reservas de hidrocarbonetos do Mar do Norte) conforme se pode constatar na figura seguinte.

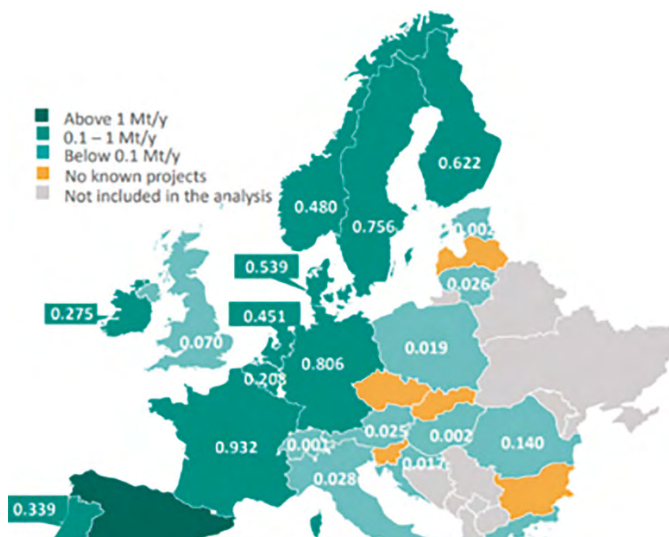


Aguarda-se com alguma expectativa os resultados do 1.º leilão do Banco do Hidrogénio/Innovation Fund, para se começar a ter sinais mais sólidos da forma como este mercado se vai consolidar.

$H_2(V)$ NA AGENDA PORTUGUESA

a) Oportunidade para Portugal?

Portugal foi dos primeiros países da União a apresentar um plano estratégico para o $H_2(V)$ (ENH2 – agosto de 2020). O $H_2(V)$ entrava na Agenda integrando a solução para a transição energética, assegurando a sustentabilidade ambiental. As vantagens competitivas do País no contexto europeu para a produção de $H_2(V)$ foram cedo reconhecidas, traduzindo-se no interesse de diversos *players* em considerar Portugal como uma alternativa a reter para os seus planos para a Economia do Hidrogénio.



Custo comparativo do $H_2(V)$ na UE

A estratégia desenhada estava ancorada em três pilares principais:

- A descarbonização parcial da rede de GN, através da injeção de H_2 (5% em vol. até 2025/10-15% até 2030);
- Descarbonização da indústria, como alternativa ao GN;
- Produção de *carriers* de H_2 (Metanol e Amoníaco), com logísticas bem estabelecidas, para exportação do H_2 para o Norte da Europa.

A entrada do $H_2(V)$ na agenda energética verifica-se associada à versão

inicial do PNEC 2030 (Plano Nacional da Energia e Clima) apresentado em Bruxelas no início de 2020. O período que se segue é caracterizado pelo lançamento de projectos piloto/demonstração apoiados pelo Fundo Ambiental (com recurso já a verbas do PRR, entretanto aprovado). É criado um regime de incentivos específicos de apoio ao CAPEX para os projetos de H₂(V), Portaria n.º 98-A/2022 de 18 de fevereiro, a completar por um mecanismo de leilões para compra de H₂(V) para injeção na rede, previsto na ENH2. No quadro do PRR são abertas várias candidaturas para apoiar projetos de produção de H₂ visando a injeção na rede e a descarbonização da indústria. Várias Agendas Mobilizadoras contemplam a cadeia de valor do H₂(V), como parte da sua visão estratégica.

Uma menção ao trabalho do LNEG de mapeamento do território, um instrumento de avaliação do potencial para a localização de projetos de H₂(V).

Os projetos aprovados e em fase de investimento atravessam a globalidade do território nacional, destacando-se o hub de Sines com 15 projetos anunciados de investimentos para a produção de H₂ (e/ou carriers associados). Dando consistência a este hub, a REN está a investir numa rede dedicada ao transporte de H₂, com 14,4 km de comprimento na 1.ª fase (2025), que assegurará a distribuição do H₂ produzido às indústrias consumidoras.



Sines Hydrogen Valley

Neste período, 20/23, sucedeu a aprovação, pela CE, do FIT 55 e do

RePowerEU, havendo que proceder à atualização dos instrumentos nacionais face a estes novos enquadramentos.

b) A revisão da EN H2

i) A revisão do PNEC 2030 ver. 1 final, julho de 2024

A revisão do PNEC 2030 é a proposta nacional para o alinhamento das políticas e instrumentos nacionais ao novo contexto energético. Com esta revisão, Portugal posiciona-se numa trajetória que visa atingir a redução de 90% das emissões de CO₂ até 2050 (face a 2005), nomeadamente através do reforço das energias renováveis, cujas metas foram revistas em alta. Alguns números (*entre parêntesis o valor da versão anterior do PNEC*):

- 51% de FER no consumo global bruto de energia, em 2030 (47%)
- 95% de FER na produção de eletricidade (80%)
- 63% de FER no Aquecimento e Arrefecimento (38%)
- 29% de FER nos Transportes (20%)

No horizonte 2030, a evolução do setor eletroprodutor contemplará consideráveis desenvolvimentos na incorporação de energia solar fotovoltaica. A aposta no eólico *offshore* terá igualmente um peso relevante, procurando-se aproveitar o recurso existente na zona costeira.

A potência renovável a instalar para a produção de eletricidade é estimada em 48 GW (36 GW), dos quais 12,4 GW eólico — on e offshore — e 20,84 GW de PV (13,2 GW).ⁱ

São também vertidos na revisão do PNEC 2030 os objetivos previstos na Lei de Bases do Clima, dado o seu impacte na atual estratégia nacional climática e energética (limitação da comercialização de novos veículos ligeiros movidos exclusivamente a combustíveis fósseis até 2035 ou a proibição da utilização de gás natural de origem fóssil para a produção de energia elétrica a partir de 2040^j).

ⁱ Esta estimativa contempla já o efeito de adicionalidade associado à produção de Hidrogénio (previsão de 3 GW de eletrolisadores).

^j Desde que assegurada a segurança do abastecimento.

ii) Revisão da ENH2 – o que sabemos

O PNEC 2030 não modula o contributo do H₂ para os objetivos da transição energética e da sustentabilidade ambiental. Mas são múltiplas as referências que ao longo de todo o documento são feitas às contribuições esperadas do H₂ (e gases renováveis), dando indicações que nos permitem antever as suas linhas de força:

- Previsão de 3 GW (>200.000 ton/ano H₂(V)) de potência instalada de eletrolisadores até 2030, com a rede elétrica renovável a ser redimensionada dado o efeito de adicionalidade associado (mais 11 GW face à anterior versão).
- É reconhecida a importância do sistema nacional de gás a operar em estreita articulação (e interconexão via produção de H₂(V)) com o sistema elétrico, garantindo ao setor energético a resiliência que se exige.
- O hidrogénio renovável poderá ser recebido na rede de gás natural, ou transportado em redes de gás dedicadas. É expectável a sua utilização como matéria-prima, potenciando uma indústria verde.
- Estão previstos um conjunto de mecanismos com o objetivo de:
 - regulamentar a injeção de gases renováveis na rede nacional de gás natural;
 - implementar um sistema de garantias de origem para os gases renováveis;
 - apoiar a produção de energia na produção de gases renováveis, em particular hidrogénio renovável e biometano;
 - avaliar a fixação de metas vinculativas até 2030 para a incorporação de gases renováveis na rede de gás natural.
- O *blend* de GN, H₂ e biometano (transportados nas atuais redes de GN) são uma importante alternativa para a substituição progressiva dos combustíveis fósseis no aquecimento e arrefecimento.
- Prevê-se a reconversão de redes actuais para redes 100% dedicadas a hidrogénio e a criação de polos de produção e consumo de hidrogénio (H₂ Valleys).

- Os biocombustíveis sustentáveis, o hidrogénio renovável e outros combustíveis renováveis de origem não biológica, são soluções alternativas e complementares à mobilidade elétrica, em particular para os setores de transporte pesado de mercadorias;
- O H2Med, associado a eixos internos de transporte de hidrogénio em Portugal, Espanha e França, irá potenciar o desenvolvimento de um dos principais corredores de hidrogénio, via Mediterrâneo.



- O Eixo Nacional de Transporte de Hidrogénio, compreendendo a construção e adequação dos gasodutos Figueira da Foz - Celorico da Beira - Monforte é uma infraestrutura anunciada, vital para a futura rede interna de H₂ renovável.

c) Em agenda

Enumera-se seguidamente um conjunto de medidas (e de sinais) que se aguardam por parte do novo governo, necessárias para formatar o desenvolvimento da Economia do Hidrogénio num futuro próximo. A margem de manobra relativamente a Bruxelas, face aos compromissos de transição energética assumidos pelo País, é relativamente estreita, mas temos de estar atentos às decisões que é necessário tomar:

- ENH2 (revisão face: PNEC/FIT 55/REPOWER EU);
- Rede de mobilidade (Directiva AFIR);
- Leilões de gases renováveis;
- Reforço da rede de Transporte de Eletricidade;
- Rede de gasoduto dedicada ao H₂;
- Produção *offshore* – plano de concursos;
- *Phase out* dos Combustíveis Fósseis (COP 28).

REFERÊNCIAS

CLEAN HYDROGEN MONITOR 2023 Hydrogen Europe.

Global Hydrogen Review 2023, IEA.

National Hydrogen Strategies, 2023, KPMG.

CLEAN HYDROGEN Project Development 2023 World Hydrogen Leaders.

Building the Green Hydrogen Economy, Infrastructure Strategy 2023, BCG.

Breaking free from fossil gas. A new path to a climate-neutral Europe. Agora Energiewende (2023).

The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production, Jose M. Marín Arcos and Diogo M. F. Santos, Gases 2023, 3.

Green hydrogen: Energizing the path to net zero Deloitte's 2023 global green hydrogen outlook.

Ellis Testimony 2-28-24 SENR Cmte Hrg .pdf (senate.gov)

<https://www.energy.senate.gov/services/files/A4FBB586-D6C6-4E73-BE9C-61128E922DFB>

Lei do Clima Europeia (Regulamento (eu) 2021/1119, de 30 de junho de 2021.

Pacote "Fit-for-55" (COM(2021) 550 final), em 2021.

Plano RePowerEU (COM(2022) 230 final), maio de 2022.

Plano Industrial do Pacto Ecológico (COM(2023) 62 final), fevereiro 2023.

Plano Nacional do Hidrogénio, Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020, 14 de agosto.

Lei de Bases do Clima (LBC) (Lei n.º 98/2021 de 31 de dezembro).

Plano de Ação para o Biometano 2024–2040, Resolução do Conselho de Ministros n.º 41/2024.

Sistema de Incentivos de Apoio à Produção de Hidrogénio Renovável e Outros Gases Renováveis, Portaria n.º 98-A/2022 de 18 de fevereiro.

Sistema de compra centralizada de H2 e Biometano, Port 15/2023, 4 janeiro.

Plano Nacional Energia e Clima 2021–2030 (PNEC 2030).