Fusão Nuclear
na era das alterações climáticas

Bruno Soares Gonçalves





ipfn
INSTITUTO DE PLASMAS
E FUSÃO NUCLEAR

Imagem da capa: Sobreposição de duas imagens na região do ultra-violeta extremo. Ejecção de massa coronal no Sol em Agosto de 2021 (Créditos: NASA/Goddard Space Flight Center)

Fusão Nuclear na era das alterações climáticas

Bruno Soares Gonçalves

Este livro foi desenvolvido para divulgação e educação e é distribuído gratuitamente. Pode ser usado por alunos, professores e qualquer interessado no geral desde que dados os devidos créditos.

Não existem limitações à sua impressão e/ou distribuição desde que gratuita.

Assegurem-se sempre que têm a última versão disponível (a versão está indicada na coluna ao lado) uma vez que poderão ser efectuadas modificações, e correcções regularmente assim como poderá ser adicionado ou removido conteúdo conforme considerado pertinente para o fim a que se destina.

O QR code contém o endereço para aceder à página com a última versão disponível.

O autor compromete-se em tentar manter o livro actualizado e com informação o mais recente possível e, sempre que possível referenciando as fontes da informação que poderão ser consultadas para obter dados mais recentes.

No livro, o autor tenta providenciar informação precisa e fidedigna mas, ainda que científica, poderá ser considerada controversa por alguns leitores.

Cabe ao leitor a responsabilidade de procurar toda informação adicional e/ou complementar que lhe permita construir a sua própria visão acerca do papel da energia nuclear na era das alterações climáticas.

Está a ler a versão:
2.08, 11 junho 2024

Nota legal

A visão aqui expressa é da exclusiva responsabilidade do autor e não reflecte necessariamente a visão do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN), Instituto Superior Técnico (IST) ou qualquer das entidades financiadoras da Unidade de Investigação (IPFN). Estas entidades, em situação alguma, poderão ser consideradas responsáveis por qualquer uso que seja feito da informação que este livro contém.

Nota acerca das imagens

Tentei ter cuidado e incluir os créditos adequados nas imagens. No entanto, *mea culpa*, ao longo dos anos fui usando imagens conforme adequado, para efeito de ilustração, nas apresentações ao público, sem ter registado em vários casos a origem (online, apresentações de colegas, etc.)

Não tenho intenção de infringir os direitos de autor sobre as imagens e lamento eventuais erros ou omissões pelo que, se é o autor e sente que o devido crédito deve ser incluído ou que a imagem não deve ser usada, não hesite em contactar-me indicando a imagem em causa e as acções correctivas serão tomadas imediatamente.

Do mesmo autor

O livro “Nuclear posologia para combater a desinformação” tem informação complementar sobre energia nuclear e está também disponível online para download gratuito



Para acesso à página de download use o ”QR code” abaixo:

Fusão Nuclear
na era das alterações climáticas

Página propositadamente deixada em branco. Use-a para tomar notas

À Mariana, Guilherme, Telmo, Isabel, Filipe e Laura.

Tem sido uma grande e fantástica aventura!



"(...) quero garantir que os meus cinco filhos tenham electricidade barata daqui a uns anos e que o planeta ainda esteja em condições dignas para eles cá viverem".

- Bruno Soares Gonçalves, Entrevista ao Jornal I, 10 Fevereiro 2021



Até pode parecer do tempo dos dinossauros mas...

O autor escreve de acordo com o Antigo Acordo Ortográfico

Agradecimentos

Ao Carlos Silva, Rui Coelho e Alberto Vale pela revisão do texto inicial.

Ao Luís Guimarãis que partilhou a pesquisa que efectuou sobre energia nuclear no âmbito da escrita de um artigo

Ao Luís Oliveira e Silva e Marta Fajardo pelo contributo que deu origem às páginas sobre Fusão Inercial

Página propositadamente deixada em branco. Use-a para tomar notas

Índice

Motivação

+ *Prólogo*
+ *Introdução*

1 Energia e Alterações Climáticas

+ *Desenvolvimento sustentável*
+ *Produção de electricidade em Portugal*
+ *Como funciona uma central eléctrica*
+ *O caminho da descarbonização*
+ *Inovar para zero*
+ *Contribuição da energia nuclear*
+ *O mito da segurança*

2 Energia Nuclear

+ *Reacções nucleares*
+ *Sobre a fusão nuclear*
+ *Fissão nuclear*
+ *Fusão nuclear*

3 Fusão Nuclear por Confinamento Magnético

+ *Tipos de confinamento*
+ *Confinamento magnético*
+ *Tokamaks*
+ *O JET*
+ *Métodos de aquecimento*
+ *Ignição*
+ *ITER*
+ *Porquê investir em fusão?*
+ *Central eléctrica de fusão*
+ *Quando teremos fusão?*

4 Ideias a Reter

+ *Ideias a reter da leitura do livro*


Dos plasmas à
fusão nuclear

Prólogo

Porque razão escrever um livro de divulgação sobre energia e fusão nuclear?

Desde que regressei a Portugal, em 2007, após um estadia de 4 anos no JET (Inglaterra), que participo regularmente em actividades de divulgação, para alunos do secundário, para alunos e professores universitários e para o público em geral. Estas acções de divulgação versam sobre energia, sobre o nuclear e sobre a fusão nuclear. Neste âmbito sou também frequentemente solicitado a dar entrevistas sobre o assunto. A esta actividade somam-se também as acções de formação para professores do secundário, escolas de Verão e seminários a alunos de licenciatura e mestrado. Ao longo dos anos senti necessidade de comunicar mais e melhor e aprimorar a mensagem para que a audiência saísse informada e com curiosidade para querer saber mais sobre o assunto. As várias palestras que dou têm tido um fantástico acolhimento e sinto que, apesar de bem recebidas, fica por vezes a necessidade de dar informação complementar.

A informação hoje em dia está amplamente disseminada nos meios digitais mas nem sempre organizada de forma a que a mensagem passe da forma mais correcta. E assim nasceu esta espécie de livro!

Este livro não tem pretensões de ser mais do que um complemento às minhas palestras, ou um elemento de preparação para assistir a estas. É simples e acessível porque foi desenhado para ser simples e acessível, podendo servir a alunos e professores igualmente, contribuindo para a discussão sobre a energia que consumimos e sobre as formas como poderemos chegar às metas de descarbonização. Serve também para estimular a curiosidade e uma visão critica sobre o assunto.

O livro tem também um segundo objectivo: auxiliar os professores do secundário a discutirem a energia nuclear e a fusão nuclear com os alunos.

Enquanto sociedade temos a tendência a negligenciar os educadores, professores do básico e secundário, e o papel que estes têm em moldar o futuro dos alunos.

E aqui falo por experiência pessoal. Foi um destes educadores que, na Escola Secundária Gago Coutinho em Alverca, me guiou no caminho da física. E por esse motivo estarei eternamente grato à profª Dulce Evangelho. E assim espero que este livro também vos auxilie a guiar mentes jovens no caminho da ciência e engenharia.

Introdução

A energia faz parte das nossas vidas e o acesso a esta é hoje tomada como algo garantido e parte integral duma vida confortável. Contudo, nem sempre nos questionamos do impacto que o nosso consumo tem no ambiente e como poderemos reduzir esse impacto. Enquanto cidadãos temos a responsabilidade de consumir a energia da forma o mais eficiente possível. Como cidadãos temos também a obrigação de exigir que a energia que consumimos seja o mais sustentável possível e que contribua para as metas da descarbonização. A razão pela qual temos de descarbonizar é simples: os gases de efeito de estufa aprisionam o calor, causando o aumento da temperatura à superfície do planeta. Quantos mais gases houver, mais a temperatura sobe. E uma vez que os gases estejam na atmosfera ficam lá por um longo período de tempo. Cerca de um quinto dos gases emitidos hoje ainda estarão lá daqui a 10000 anos. Por esta razão temos de inovar para zero gases. É nossa obrigação deixar um planeta habitável às futuras gerações.

Neste contexto é necessário pôr em movimento um processo de descarbonização da sociedade e é essencial encontrarmos fontes de energia que sejam simultaneamente suficientes e seguras para garantir um nível de vida adequado. É também essencial avançar para uma maior electrificação da sociedade. A produção da electricidade com recurso a tecnologias limpas pode ajudar a resolver o problema do transporte, da climatização das casas e negócios e das fábricas que usam energia eléctrica de forma intensiva para produzir os seus produtos. Descarbonizar significa reduzir todas estas categorias. A produção de electricidade com recurso a tecnologias limpas não resolverá o problema da descarbonização mas será um passo essencial. Já não sobram dúvidas que a energia do futuro não vem da exploração intensiva dos recursos do planeta mas sim do conhecimento e do uso responsável dos recursos que o planeta nos oferece. Isto significa também que a par com o desenvolvimento de novas tecnologias é essencial que haja uma politica de inovação energética assente em produzir melhor e de forma mais limpa e eficiente, ter maior flexibilidade no portfolio de soluções energéticas e flexibilidade nos recursos utilizados (por exemplo, ampla distribuição geográfica das matérias primas) e consumir de forma mais eficiente e responsável .

A aposta nas energias renováveis (eólica, solar) é essencial. Mas será também necessário considerar outras formas de energia que não produzem gases causadores do efeito de estufa e que sejam capazes de providenciar a electricidade de base necessária para fazer face às intermitências das energias renováveis. A fissão nuclear, tantas vezes demonizada, é actualmente umas das soluções viáveis, contribuindo com segurança para a descarbonização. Ainda que possa não ser uma solução de longo termo, a fissão nuclear é crucial para comprarmos algum tempo até que a fusão nuclear se torne uma realidade. É certo que a palavra nuclear causa


A energia do futuro
não vem dos
recursos
vem
do
conhecimento

insegurança mas a maior insegurança é o desconhecimento. Por esta razão este livro tenta abordar de forma simples o problema da energia, a explicar o que é a energia nuclear (fissão e fusão), de que forma estas energias nucleares são diferentes e como poderão ambas contribuir para a descarbonização e desmistificar alguns medos associados à energia nuclear. A fusão é uma solução muito menos perigosa do ponto de vista dos resíduos (que a fissão), mas há na opinião pública uma grande incerteza quanto ao momento em que vai ser possível usá-la assim como dúvidas acerca da eficiência energética ou a quantidade de electricidade que será produzida. Parte do livro destina-se a explicar o que é a fusão nuclear, o que tem sido feito para chegarmos à realidade um reactor comercial de produção de energia eléctrica, os desafios e as metas alcançadas. O livro tentará dar elementos suficientes para que os leitores possam ficar mais informados e com a curiosidade estimulada para pesquisarem mais sobre o assunto, construindo assim uma visão critica mas assente em informação que se quer o mais científica possível.

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 é completamente diferente da fissão. Nos riscos que já foram avaliados, verificou-se que a fusão nuclear não produz emissões de dióxido de carbono (CO_2) ou outros gases que fomentam o efeito de estufa. Os materiais produzidos (pela fusão nuclear) decaem rapidamente e não têm risco significativo. Mas importa não esquecer que a operacionalidade comercial ainda vai demorar muito tempo."

- Francisco Ferreira, presidente da Associação Zero, in Jornal Expresso, 15 Fevereiro 2022

Este livro é um complemento às minhas palestras e um elemento adicional de informação para professores, alunos e público em geral. Como sempre terei todo o prazer em complementar a sua leitura com palestras e discussões sobre energia, sobre o nuclear em geral e sobre a fusão nuclear em particular. Aos potenciais interessados: não hesitem em contactar-me! Até lá desejo uma agradável leitura.



A aposta nas energias renováveis (eólica, solar) é essencial. Mas será também necessário considerar outras formas de energia que não produzem gases causadores do efeito de estufa e que sejam capazes de providenciar a electricidade de base necessária para fazer face às intermitências das energias renováveis

Energia e Alterações Climáticas

1

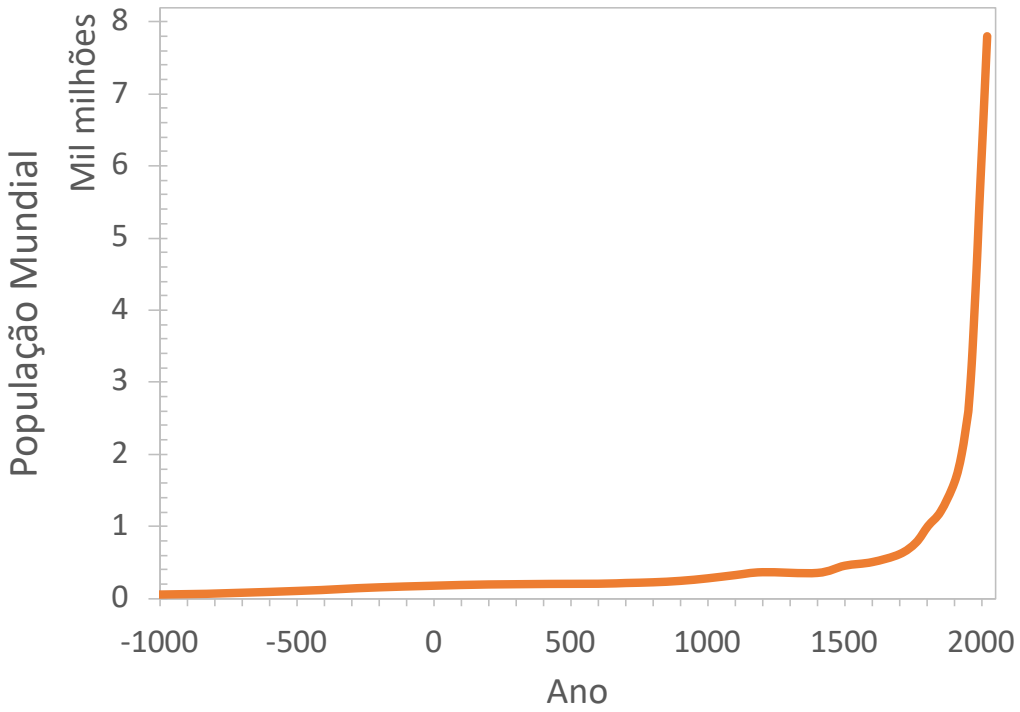

8 000 000 000
de seres humanos habitam
o nosso planeta

Fontes de energia seguras e sustentáveis são essenciais para manter um nível de vida adequado para a população mundial

A população mundial mais do que duplicou nos últimos 40 anos para o valor actual de 8000 milhões de humanos e estima-se que crescerá para 10-12 biliões de pessoas até 2100, ocorrendo o principal crescimento em países em vias de desenvolvimento. Este aumento da população mundial é acompanhado por aumento significativo do consumo de energia per capita.

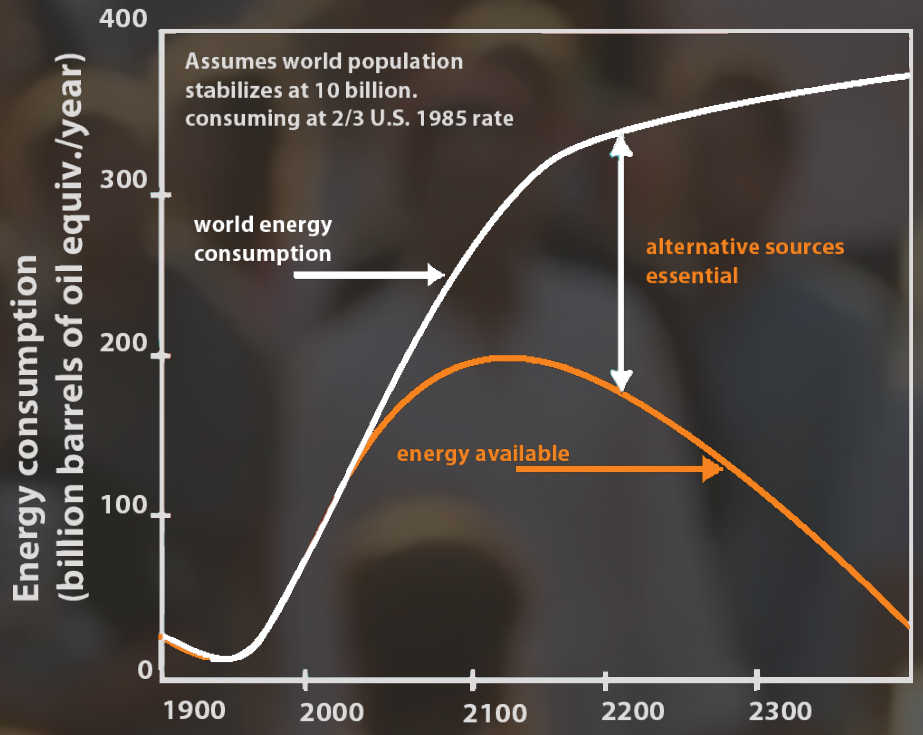
As possíveis poupanças em energia no mundo industrializado serão fortemente ultrapassadas pelas necessidades crescentes do mundo em vias de desenvolvimento: diversos cenários apontam para pelo menos o dobro, eventualmente o triplo, no crescimento da procura energética durante o este século.

É essencial encontrarmos fontes de energia que sejam simultaneamente suficiente e segura para garantir um nível de vida adequado.



A população mundial mais que duplicou nos últimos 40 anos. Actualmente a população mundial é superior a 7900 milhões de humanos.

Desenvolvimento sustentado requer diversidade das fontes energéticas



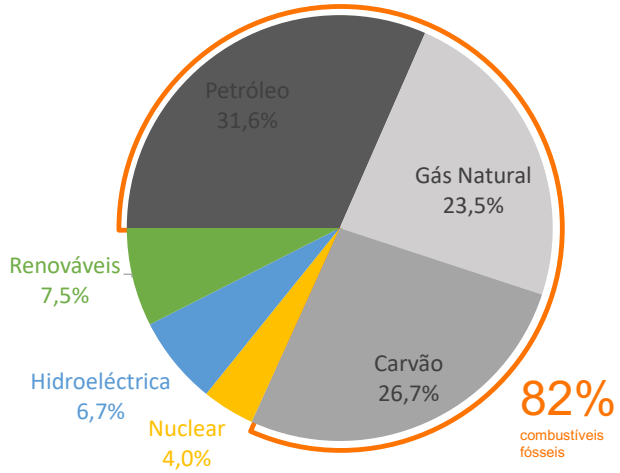
Se o consumo de energia continuar a crescer de acordo com as previsões em breve a procura ultrapassará a capacidade de a produzir com base nas fontes conhecidas

A energia é essencial ao ser humano e é um elemento crucial da nossa sociedade. Consequentemente, o desenvolvimento da sociedade depende da disponibilidade e abundância de fontes de energia. Nos últimos 25 anos houve um aumento de 60% no consumo total de energia, e não parece haver sinais de abrandamento para os próximos anos. O mundo está à beira duma situação energética insustentável (do ponto de vista económico e político) devido ao aumento constante da procura de energia. No entanto, não é possível fazer face à procura com base nas fontes de energia e recursos que actualmente conhecemos. Prevê-se que nos próximos anos, a menos que sejam encontradas novas soluções, haja um hiato entre a procura por energia e a capacidade para providenciá-la.

Com as opções actualmente existentes no portfolio energético é difícil fazer face à procura duma forma economicamente sustentável e ambientalmente amigável. Os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) continuam a ser os principais contribuidores no portfolio energético, representando mais de 80% da energia primária consumida (64% se nos focarmos apenas na produção de energia eléctrica). Os combustíveis fósseis permitiram um desenvolvimento rápido da civilização e satisfazem a maioria das nossas necessidades energéticas. No entanto, a sua queima produz gases responsáveis pelo efeito de estufa e são um dos principais responsáveis das alterações climáticas e aquecimento global.

82% do consumo de energia primária ainda resulta da queima de combustíveis fósseis

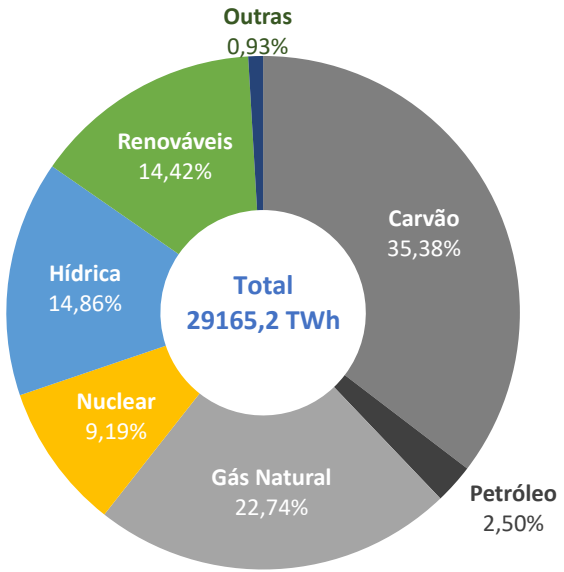
Por outro lado, as suas reservas são limitadas. Ainda que estejam a ser encontradas novas reservas, o aumento da procura é superior à taxa de descoberta de novas fontes. É crucial encontrar fontes de energia alternativas que permitam substituir a nossa dependência dos combustíveis fósseis para prevenir consequências catastróficas que afectarão toda a humanidade.



Fontes de produção de energia primária em 2022 (Fonte: Statistical Review of World Energy Data 2023)

A energia hídrica, fissão nuclear, e energias renováveis (solar e eólica), são actualmente as únicas fontes de energia para além dos combustíveis fósseis. Contudo, cada uma delas tem os seus próprios problemas alguns dos quais de difícil resolução. O principal problema da energia hídrica é que a maioria dos rios já tem barragens instaladas e a sua capacidade de expansão é diminuta. Por outro lado. tem-se verificado que em períodos de seca a produção de energia hidroeléctrica compete com a necessidade das populações de terem acesso a água potável. A fissão nuclear levanta questões acerca da sua segurança, reservas de combustível, produção de resíduos radioactivos e proliferação nuclear. As principais desvantagens da energia solar e eólica são as flutuações devido às condições climatéricas, face às quais é necessário manter uma produção de electricidade de base (actualmente providenciada com recurso a combustíveis fósseis ou à energia nuclear), e a necessidade de ocupação duma área significativa para produzirem um nível significativo de energia. Se quisermos reduzir as emissões, a solução terá de ser uma mistura inteligente entre o nuclear, hidroeléctrica, e renováveis (eólica, solar, geotérmica), complementada com a investigação e desenvolvimento em soluções alternativas inovadoras para produzir energia eléctrica de forma limpa e sustentável.

De acordo com a IEA no seu “2021 World Energy Outlook” a procura de carvão foi particularmente elevada na primeira metade de 2021, reduzindo drasticamente o stock disponível e aumentando drasticamente os preços. Na China e Índia a falta de carvão originou falhas energéticas, resultando em cortes significativos na produção de alumínio e aço (o que elevou o preço destes materiais a níveis plurianuais elevados). Como resultado a China adoptou como política doméstica o aumento da produção de carvão e a redução das falhas de fornecimento. No global, e à data ainda não existem dados disponíveis, a procura mundial de carvão, incluindo usos além da produção de electricidade tais como a produção de cimento e aço, terá resultado num aumento



61,6% da electricidade produzida em 2022 proveio da queima de combustíveis fósseis (Fonte: Statistical Review of World Energy Data 2023)



O consumo mundial de carvão não tem diminuído apesar das metas de descarbonização. As emissões de CO_2 relacionadas com a produção de energia cresceram para um valor recorde de 36,3 Gt em 2021.

de 6%. De acordo com a IEA, dependendo das condições climatéricas e do crescimento económico, a procura poderá atingir máximos em 2022, e manter esse nível por pelo menos dois anos, apesar de em 2021 não ter atingido os níveis de consumo verificados em 2013 e 2014.

No que se refere à produção de electricidade, o consumo de carvão teve um novo record em 2021 ameaçando as metas de descarbonização. O aumento na produção eléctrica global com recurso à queima de carvão deverá ter chegado a 9% em 2021 (um record absoluto de 10350 terawatt-hora).

O consumo mundial de carvão não tem diminuído apesar das metas de descarbonização.

O carvão é globalmente o maior responsável pela emissão de CO_2 e é preocupante o aumento verificado na procura para produção de energia eléctrica pondo o risco o cumprimento das metas de descarbonização.

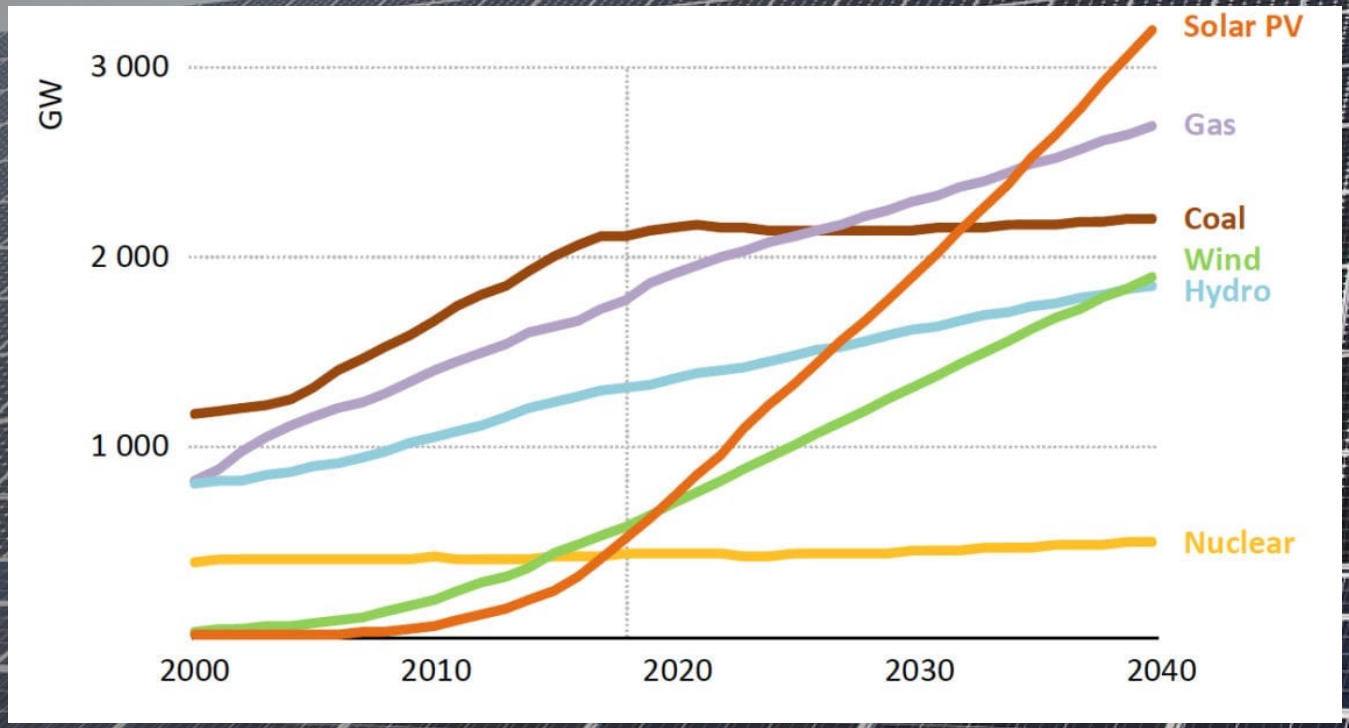
As emissões de CO_2 relacionadas com a produção de energia cresceram para um valor recorde de 36,3 Gt em 2021.

As emissões globais de CO_2 resultantes da produção de energia e processos industriais recuperaram em 2021 para atingir seu nível anual mais alto de todos os tempos. Um aumento de 6% em relação a 2020 elevou as emissões para 36,3 gigatoneladas (Gt), uma estimativa baseada na análise detalhada da IEA, com base nos dados nacionais oficiais mais recentes. O carvão foi responsável por mais de 40% do crescimento geral das emissões globais de CO_2 em 2021.

As emissões de carvão agora atingem um recorde histórico de 15,3 Gt, superando seu pico anterior (observado em 2014) em quase 200 Mt. As emissões de CO_2 do gás natural também recuperaram bem acima dos níveis de 2019, para 7,5 Gt, com o aumento da procura em todos os sectores. Em 2021 as emissões de petróleo, 10,7 Gt,, permaneceram significativamente abaixo dos níveis pré-pandemia devido à recuperação limitada da atividade global de transporte em 2021.

O maior aumento nas emissões de CO_2 por sector em 2021 ocorreu na produção de electricidade e calor, onde saltaram mais de 900 Mt. Este valor representou 46% do aumento global das emissões, uma vez que o uso de todos os combustíveis fósseis aumentou para ajudar a responder ao crescimento da procura de electricidade. As emissões de CO_2 do sector se aproximaram de 14,6 Gt, seu nível mais alto de todos os tempos e cerca de 500 Mt acima de 2019. A

China foi responsável por quase todo o aumento global nas emissões do sector de electricidade e calor entre 2019 e 2021. Um pequeno declínio do resto do mundo foi insuficiente para compensar o aumento na China. Na China, onde é produzida mais de 50% da electricidade global baseada na queima de carvão, estima-se que o consumo de carvão aumentou 9% in 2021. Na Índia o aumento terá sido da ordem dos 12%. Este é um record absoluto, ainda que ambos os países estejam a ter um aumento impressionante na capacidade instalada de energia eólica e solar. O portfolio energético está a ser remodelado pelo crescimento das energias renováveis e do gás natural . De acordo com as estimativas da IEA, em 2040 as renováveis serão responsáveis por quase metade da produção de electricidade.



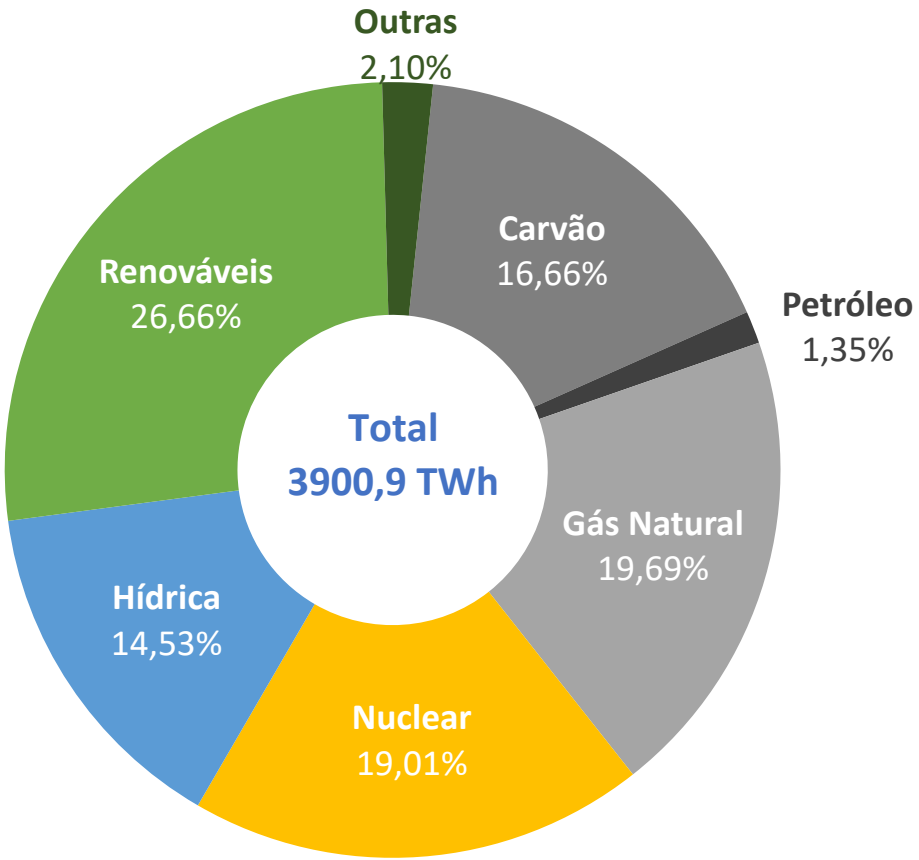
De acordo com as estimativas da IEA, em 2040 as renováveis serão responsáveis por quase metade da produção de electricidade. No entanto não é esperada uma diminuição no consumo de carvão (fonte: IEA World Energy Outlook 2019; Foto: Central fotovoltaica de Vale de Moura|)

Produção de electricidade na União Europeia

A geração líquida total de electricidade na UE foi de 4032 TWh em 2021. Mais de metade (63.3%) da electricidade líquida gerada na UE em 2019 veio de fontes primárias não combustíveis. Menos da metade (36,6%) veio de combustíveis (como gás natural, carvão e petróleo). Entre as fontes de energia renováveis a maior parcela da geração líquida de electricidade em 2021 foi de renováveis(23.5%), seguidas por hidroeléctricas (16.1%).

A energia nuclear gerou quase um quinto da electricidade total produzida na Europa em 2022.

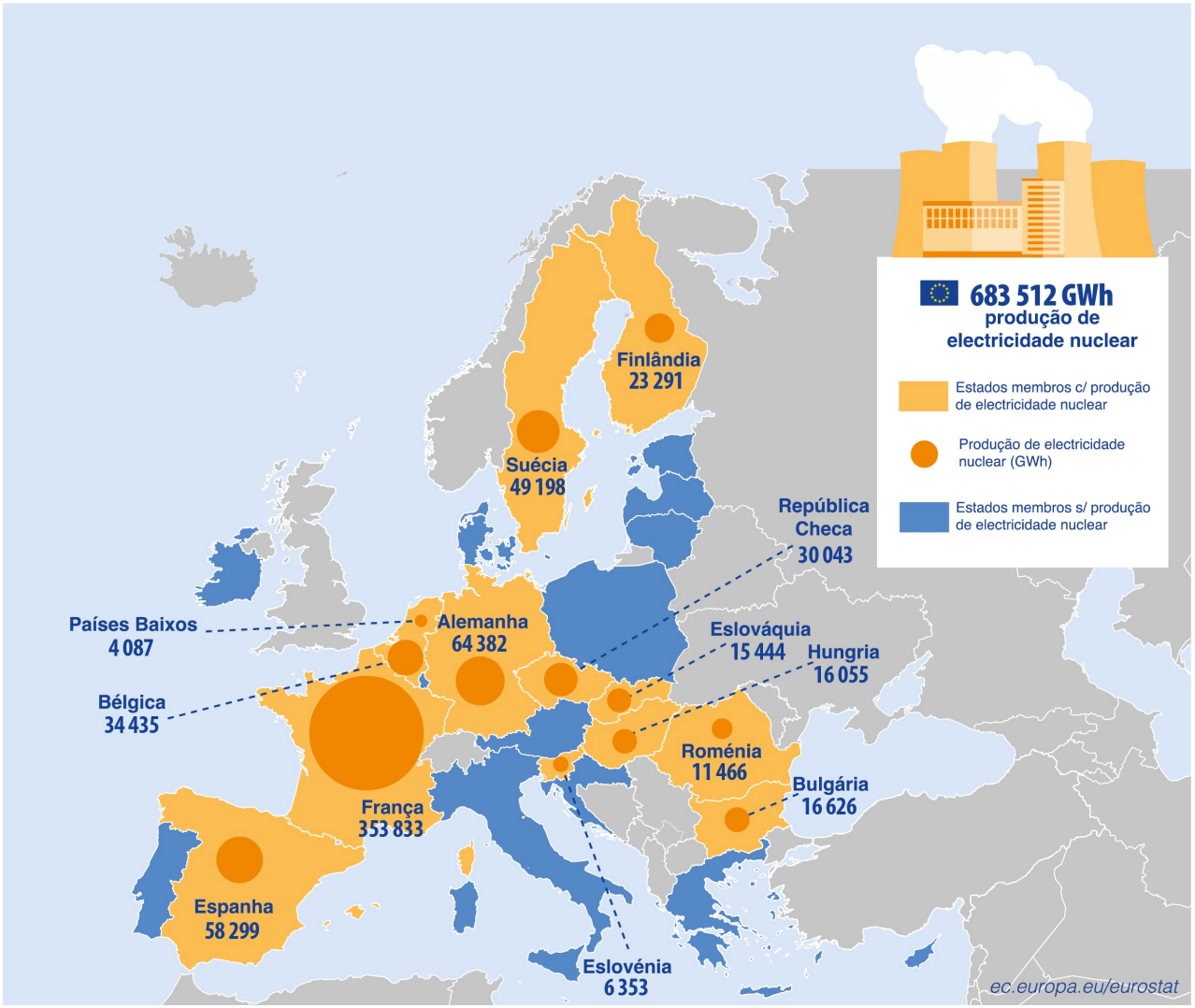
Apesar deste número ser expressivo a produção de electricidade a partir de centrais nucleares na UE diminuiu 25,2 % entre 2006 e 2020. No entanto, a situação pode mudar uma vez que a Comissão Europeia recentemente, em 2022, permitiu a



19% da electricidade produzida na União Europeia em 2021 proveio de energia nuclear (Fonte: BP Statistical Review of World Energy 2023)

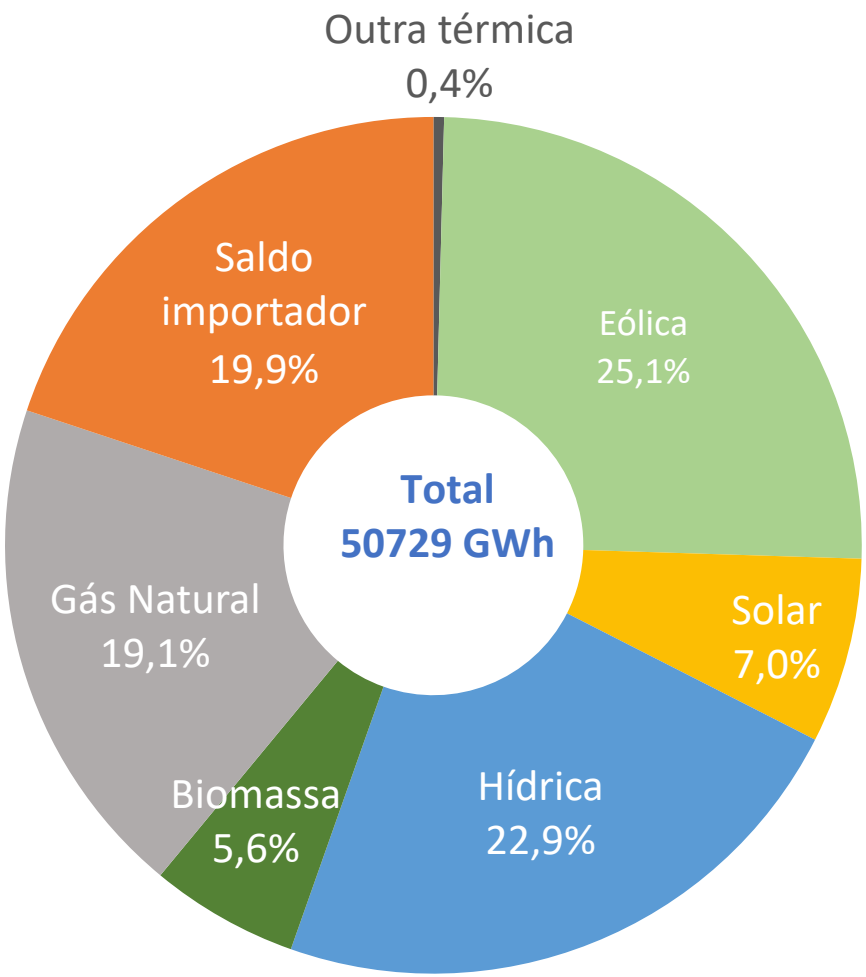
classificação de algumas centrais nucleares como investimentos verdes sob a Taxonomia da UE para investimentos verdes.

A geração bruta de electricidade a partir de centrais nucleares na UE em 2020 ascendeu a 683 512 GWh. De longe, o maior produtor de energia nuclear na UE em 2020 foi a França, com 51,8% do total da UE, seguida pela Alemanha (9,4%), Espanha (8,5%) e Suécia (7,2%). Estes quatro Estados-Membros produziram 76,9 % da quantidade total de electricidade gerada em instalações nucleares na UE em 2020.



Energia nuclear na União Europeia em 2020. 13 países europeus tinham reactores nucleares operacionais (fonte: Eurostat)

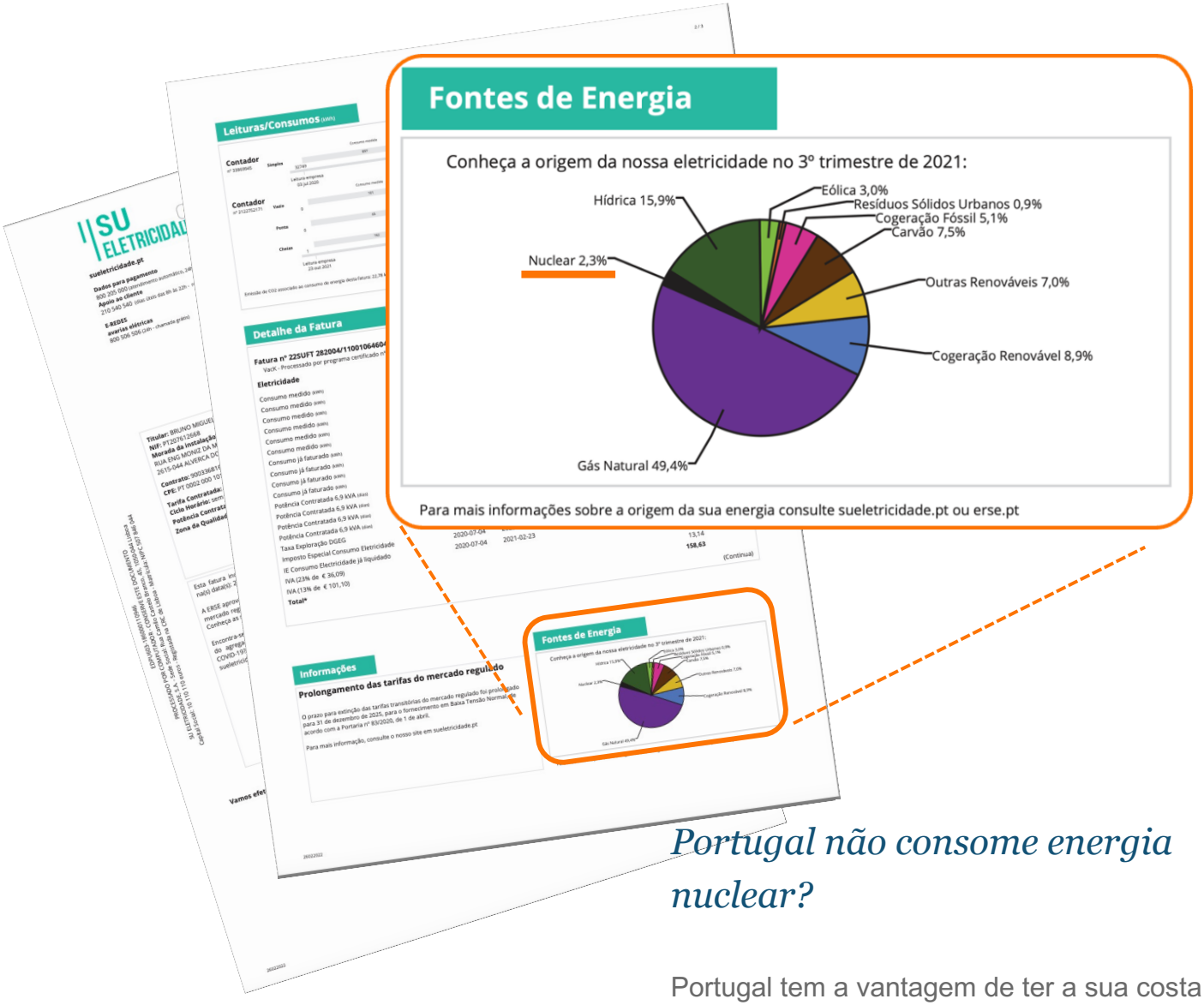
Produção de electricidade em Portugal em 2023



Distribuição por fontes de energia da produção eléctrica em Portugal no ano de 2023 (Fonte: ren.pt)

De acordo com os dados do relatório técnico da REN referentes ao 1º semestre de 2021, Portugal tinha uma potência instalada de 19,4 GW dos quais 14 GW correspondem a energias renováveis. De acordo com os dados disponíveis no website da REN em 2021 a produção renovável nacional abasteceu 59% do consumo, face aos 51% registados no ano anterior. As eólicas abasteceram 23.9 % do consumo e as hidroelétricas abasteceram também cerca de 25% do consumo. Nas restantes renováveis a biomassa abasteceu 6.6 % do consumo e as fotovoltaicas 3,7%. Nas não-renováveis o gás natural, incluindo ciclo combinado e cogeração, abasteceu 30% do consumo e o carvão abasteceu 1.5%. Nas trocas com o estrangeiro o saldo foi importador, equivalendo a cerca de 9.5% do consumo nacional.

Já em 2023 o consumo de energia eléctrica foi de 50729 GWh, a produção renovável abasteceu 60,6% do consumo, a não renovável 19,5%, enquanto os restantes 19,9% corresponderam a energia importada.



Portugal não consome energia nuclear?

Portugal tem a vantagem de ter a sua costa atlântica, que lhe dá uma riqueza eólica considerável. Tem também um bom índice de irradiação solar, com 1 kW por metro quadrado de irradiação. No entanto, consoante o dia, Portugal poderá importar até 25% da sua electricidade de Espanha, segundo o Electricity Map (https://app.electricitymap.org/zone/PT). Nos dias quentes de verão, sem vento, a nossa capacidade eólica diminui. A eficiência dos painéis solares fotovoltaicos também decresce. Nestes dias Portugal fica dependente de gás natural, vendo-se assim incapaz de cumprir limites de emissões. Com um nível tão elevado de electricidade importada podemos dizer que não consumimos energia nuclear? Portugal está integrado no mercado Ibérico de electricidade o qual dispõe de 7.6 GW de potência nuclear instalada. Para todos os efeitos é como se as centrais nucleares estivessem instaladas em território nacional.

Portugal consome Energia Nuclear uma vez que o saldo importador é significativo e uma parte significativa da electricidade produzida em Espanha tem origem em fissão nuclear.

Como funciona uma central eléctrica

A produção de energia eléctrica, a partir de combustíveis fósseis (carvão, petróleo ou gás natural), obtém-se através da sua queima. Antes de serem queimados, os combustíveis sofrem algumas transformações para aumentar a sua rentabilidade: o carvão é esmagado num pó fino; o petróleo sofre processos de destilação; apenas o gás natural é utilizado como é extraído na origem. O combustível é encaminhado para as caldeiras, onde é queimado produzindo energia calorífica (uma temperatura de cerca de 538ºC), que aquece grandes quantidades de água. A água aquecida a altas temperaturas liberta uma grande quantidade de vapor, que faz mover turbinas. O movimento das pás das turbinas activa um gerador, movimentando potentes electroímanes que giram a grandes velocidades entre bobinas produzindo corrente eléctrica alternada que, nas centrais portuguesas, tem uma frequência de 50 Hz. Esta corrente eléctrica é levada até nossas casas através da rede de distribuição,.

Sendo a fonte de energia utilizada neste tipo de central uma fonte não renovável, o seu uso depende das reservas naturais de combustíveis existentes no mundo. Embora o carvão seja abundante, tornando-se, portanto, uma fonte de energia barata, o seu uso nas centrais termoelétricas levanta muitos problemas de poluição.

Diariamente, são queimados, em todo o mundo, milhares de toneladas de carvão. Os produtos resultantes da combustão são o dióxido de carbono, dióxido e trióxido de enxofre e grandes quantidades de poeiras, que vão para a atmosfera.
Atualmente, as chaminés das centrais são altas e já dispõem de filtros adequados, que retêm uma parte apreciável das partículas sólidas em suspensão. Por outro lado, a altura das chaminés evita a poluição da camada mais baixa da atmosfera, mas faz com que as emissões gasosas sejam lançadas para a alta atmosfera, contribuindo para o efeito de estufa. Há, pois, necessidade de um maior desenvolvimento tecnológico, de modo a diminuir o impacto ambiental deste tipo de centrais.





A produção de energia eléctrica, a partir de combustíveis fósseis (carvão, petróleo ou gás natural), obtém-se através da sua queima.

Porque razão o dióxido de carbono (CO_2) é um problema?

O CO_2 é um gás que retém o calor produzido tanto na natureza quanto pelas atividades humanas, é o principal gás de efeito estufa, responsável por cerca de três quartos das emissões. As fontes de CO_2 produzidas pelo homem vêm da queima de combustíveis fósseis, para uso na geração de energia e transporte. O CO_2 também é libertado por via de mudanças no uso da terra, biologicamente através dos oceanos, decomposição de matéria orgânica e incêndios florestais. A acumulação de CO_2 e outros gases de efeito estufa na atmosfera pode reter o calor e contribuir para as mudanças climáticas. Os outros gases e fontes de efeito estufa são:

Metano (CH_4): O principal componente do gás natural, o metano é libertado de aterros sanitários, indústrias de gás natural e petróleo e agricultura (especialmente dos sistemas digestivos de animais de pasto). Uma molécula de metano não permanece na atmosfera tanto quanto uma molécula de dióxido de carbono, cerca de 12 anos, mas é pelo menos 84 vezes mais potente ao longo de duas décadas. É responsável por cerca de 16% de todas as emissões de gases de efeito estufa.

Óxido Nitroso (N_2O): O óxido nitroso ocupa uma parcela relativamente pequena das emissões globais de gases de efeito estufa - cerca de 6%, mas é 264 vezes mais poderoso que o dióxido de carbono em 20 anos, e o seu tempo de vida na atmosfera excede um século. A agricultura e a pecuária, incluindo fertilizantes, esterco e a queima de resíduos agrícolas, juntamente com a queima de combustível, são as maiores fontes de emissões de óxido nitroso.

Gases industriais: Gases fluorados, como hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos, clorofluorcarbonos, hexafluoreto de enxofre (SF_6) e trifluoreto de nitrogênio (NF_3) têm um potencial de retenção de calor milhares de vezes maior que o CO_2 e permanecem na atmosfera por centenas a milhares de anos. Representando cerca de 2% de todas as emissões, eles são usados como refrigerantes, solventes e na fabricação, às vezes ocorrendo como subprodutos.

Outros gases de efeito estufa incluem vapor de água e ozono (O_3). O vapor de água é, na verdade, o gás de efeito estufa mais abundante do mundo, mas não é rastreado da mesma forma que outros gases de efeito estufa porque não é emitido diretamente pela atividade humana e os seus efeitos não são bem compreendidos. Da mesma forma, o ozono troposférico (não deve ser confundido com a camada protetora de ozono estratosférico mais acima) não é emitido diretamente, mas emerge de reações complexas entre poluentes no ar.

Quão grave é o problema?

Nos tempos pré-industriais, cada milhão de moléculas de ar continha cerca de 280 moléculas de dióxido de carbono. Hoje essa proporção ultrapassa 380 moléculas por milhão e continua a subir. As evidências estão a aumentar de que o poder de retenção de calor do dióxido de carbono já começou a aumentar as temperaturas médias globais. Se os níveis de dióxido de carbono continuarem a subir, o aquecimento adicional pode ter consequências terríveis, resultantes do aumento do nível do mar,

interrupções na agricultura e tempestades mais fortes (por exemplo, furacões) e com maior frequência. No entanto, apesar de conhecermos bem o problema, reduzir o fluxo de dióxido de carbono que entra na atmosfera não tem uma solução simples. Mesmo com o surgimento de fontes de energia renovável, a queima de combustíveis fósseis permanecerá substancial. E o combustível fóssil em maior oferta, carvão, é o pior emissor de CO_2 por unidade de energia produzida.

Como o dióxido de carbono retém o calor?

O dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa agem como um cobertor ou uma tampa, prendendo parte do calor que a Terra poderia ter irradiado para o espaço. Quando a luz solar atinge a Terra, a superfície absorve parte da energia da luz e a irradia novamente como ondas infravermelhas, que sentimos como calor. As ondas infravermelhas viajam para a atmosfera e escapam de volta para o espaço se não forem impedidas. O oxigénio e o nitrogénio não interferem com as ondas infravermelhas na atmosfera mas a situação é diferente com o CO_2 e outros gases de efeito estufa. O dióxido de carbono, por exemplo, absorve energia numa variedade de comprimentos de onda entre 2000 e 15000 nm, uma faixa que se sobrepõe à comprimento de onda dos infravermelhos. À medida que o CO_2 absorve esta energia infravermelha, começa a vibrar e reemite a energia infravermelha de volta em todas as direcções. Cerca de metade dessa energia vai para o espaço e cerca de metade dela retorna à Terra como calor, contribuindo para o "efeito estufa".

Antes dos humanos começarem a queimar combustíveis fósseis, os gases de efeito estufa que ocorrem naturalmente ajudaram a tornar o clima da Terra habitável. Sem eles, a temperatura média do planeta estaria abaixo de zero. Portanto, sabemos que mesmo níveis naturais muito baixos de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa podem fazer uma enorme diferença no clima da Terra. Hoje, os níveis de CO_2 são mais altos do nos últimos 3 milhões de anos. E embora eles ainda representem apenas 0,04% da atmosfera, isso ainda soma biliões e biliões de toneladas de gás de retenção de calor. No caso dos gases de efeito estufa, a temperatura do planeta é um equilíbrio entre quanta energia entra versus quanta energia sai. Em última análise, qualquer aumento na quantidade de aprisionamento de calor significa que a superfície da Terra fica mais quente. As plantas, o oceano e o solo irão absorver todo o excesso de CO_2, eventualmente, em vários milhares de anos ou mais.

Infelizmente, não temos milhares de anos para esperar que a natureza absorva a inundação de CO_2. Precisamos de pôr em marcha uma combinação de descarbonização das formas de produzir energia, extração de CO_2 da atmosfera e desenvolvimento de formas mais sustentáveis de prosperar.

Milagres energéticos precisam-se!

Cada tonelada adicional de dióxido de carbono emitida na atmosfera custa à sociedade US$185 por tonelada.

De acordo com um artigo publicado na Nature* cada tonelada adicional de dióxido de carbono emitida na atmosfera custa à sociedade US$185 por tonelada. O custo social do carbono é uma métrica crítica que mede os danos económicos, em dólares, que resultam da emissão duma tonelada adicional de dióxido de carbono na atmosfera. O elevado custo social do carbono deve motivar políticas climáticas mais rigorosas, pois aumenta os benefícios estimados da redução dos gases de efeito estufa estabelecendo de forma inequívoca a diferença entre o custo económico da redução de emissão (os custos de mitigação) e o valor dos danos que são evitados por essa redução de emissão (benefícios climáticos, entre outros). Em novembro de 2021, a COP26 em Glasgow (Escócia) terminou com a adopção do Pacto Climático de Glasgow, um compromisso de atingir uma meta global de emissões líquidas zero até 2050. O ponto central do pacto é manter uma meta de aquecimento global de 1.5 ℃. No entanto, as estimativas sugerem que, mesmo que os compromissos sejam cumpridos, o mundo encaminha-se para um aquecimento de 2.4℃. Em fevereiro de 2022, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) divulgou seu último relatório, destacando as causas, impactos e possíveis soluções para as mudanças climáticas. O relatório demonstra que o colapso climático está a ocorrer mais rapidamente do que o previsto e que, nos níveis atuais, muitas partes do planeta se tornarão inabitáveis nas próximas décadas. O relatório sugere que o mundo deve reduzir suas emissões totais em 45% até 2030 para evitar uma catástrofe climática. Nos níveis actuais, as emissões globais aumentarão quase 14% neste período. Se for esse o caso, teremos que nos adaptar a impactos irreversíveis, como derretimento das calotas polares, eventos climáticos frequentes e intensos e imensa biodiversidade e perda de ecossistemas. Infelizmente os dados continuam a comprovar que o aumento das emissões para a atmosfera é uma realidade. Num relatório publicado no final de Outubro de 2022, a Organização Meteorológica Mundial (WMO) alerta que a quantidade de dióxido de carbono e dois outros gases de efeito estufa na atmosfera da Terra atingiu recordes em 2021. No seu Boletim de Gases do Efeito Estufa, publicado anualmente, a WMO reporta que as concentrações de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso atingiram novos máximos em 2021, uma tendência preocupante e um sinal de que o mundo não está a fazer o suficiente para combater as mudanças climáticas. O aumento do dióxido de carbono atmosférico

* K. Rennert et al., Nature, Vol. 610, October 2022, pp687-700, https://www.nature.com/articles/s41586-022-05224-9

de 2020 a 2021 foi maior do que a taxa média de crescimento anual na última década e o aumento dos níveis de metano em 2021 foi o maior salto de ano para ano desde que essas medições começaram há quase 40 anos. Um relatório separado pelas Nações Unidas alertou que o mundo não está “nem perto” de atingir as suas metas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com o planeta a caminho de ver as temperaturas subirem para 2,5 graus Celsius acima das médias pré-industriais no final do século XXI.

São necessários milagres energéticos que permitam reduzir as emissões totais em 45% até 2030 para evitar uma catástrofe climática.*

Os milagres energéticos terão de consistir em soluções que sejam economicamente competitiva como as soluções actuais (em particular o carvão), que não emitam CO_2 (ao longo de todo o seu ciclo de vida) e que sejam tão fiáveis quanto as soluções actualmente existentes. A solução passa por tecnologias que reduzam as emissões de gases de efeito estufa, incluindo a troca de combustíveis fósseis por fontes renováveis, aumento da eficiência energética e redução as emissões de carbono, colocando um preço elevado na sua emissão. Os milagres energéticos actuais são desenvolvimentos acoplados a velhas tecnologias, como é o caso da sequestração de carbono, soluções mais eficientes como se têm vindo a verificar no sector da energia solar e eólica ou soluções mais seguras como as que se têm procurado com novas gerações e novos conceitos de centrais de fissão nuclear. O futuro passa pelo desenvolvimento de novas tecnologias como é o caso do hidrogénio (embora esta seja uma possibilidade com alguma controvérsia associada) e da fusão nuclear.

A solução passa por tecnologias que reduzam as emissões de gases de efeito estufa, incluindo a troca de combustíveis fósseis por fontes renováveis, aumento da eficiência energética e pelo desenvolvimento de novas tecnologias como é o caso da fusão nuclear.

* A referência a milagres energéticos foi introduzida por Bill Gates numa TED talk, em 2013, intitulada “Innovating to Zero”, https://www.ted.com/talks/bill_gates_innovating_to_zero?language=en

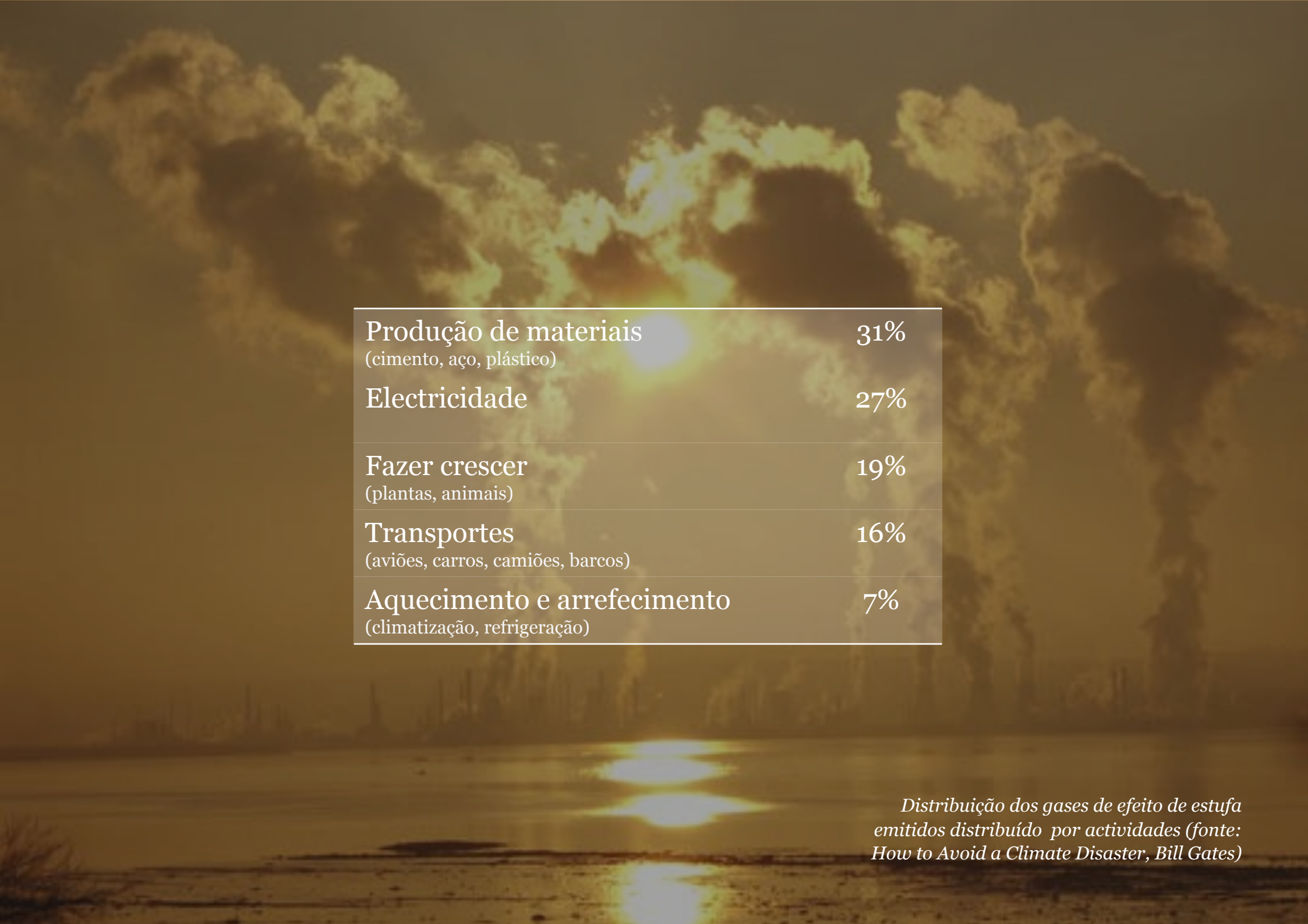
O caminho da descarbonização

Anualmente produzimos 51 biliões de toneladas de gases que causam efeito de estufa.

O plano para evitar (ou mitigar, dado o estado actual da situação) as alterações climáticas, deve considerar todas as actividades que geram gases causadores de efeito de estufa. Entre estas, os carros e produção de electricidade recebem grande parte da atenção, no entanto, o transporte de passageiros representa apenas menos de metade das emissões resultante das actividades de transporte que correspondem a 16% de todas as emissões a nível global. Entretanto, a produção de aço e cimento representam 10% da produção de gases de efeito de estufa. Uma estratégia para resolver o problema das alterações climáticas também tem de ir além do problema do transporte individual e electricidade. A tabela mostra a contribuição de diferentes actividades para a emissão de gases de efeito de estufa.

A maior contribuição para a produção de gases de efeito de estufa resulta da produção de materiais. Quatro materiais ocupam o primeiro lugar na escala de necessidade, formando os quatro pilares da civilização moderna*,**: cimento, aço, plástico e amónia sendo estes necessários em quantidades maiores que outros produtos essenciais. O mundo agora produz anualmente cerca de 4,5 bilhões de toneladas de cimento, 1,8 bilhão de toneladas de aço, quase 400 milhões de toneladas de plásticos e 180 milhões de toneladas de amónia. Estes quatro materiais, tão diferentes nas suas propriedades e qualidades, compartilham três características comuns: não são facilmente substituíveis por outros materiais (certamente não o serão num futuro próximo ou à escala global); precisaremos muito mais deles no futuro; e a sua produção em grande escala depende fortemente da combustão de combustíveis fósseis, tornando-os grandes fontes de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a transição em curso para as energias renováveis exigirá grandes quantidades de aço, betão e plásticos. Nenhuma estrutura é um símbolo mais óbvio da geração de eletricidade “verde” do que grandes turbinas eólicas, mas as suas fundações são de betão armado, as suas torres, naceles e rotores são de aço e as suas pás maciças consomem muita energia – e são difíceis de reciclar – resinas plásticas (embora comecem a aparecer soluções que poderão torná-las mais recicláveis), e todas estas peças gigantes devem ser trazidas para os locais de instalação por camiões (ou navios) de grandes dimensões e erguidas por grandes guindastes de aço, e as caixas de engrenagens das turbinas devem ser lubrificadas repetidamente com óleo. A eletricidade gerada por estas turbinas só seria verdadeiramente verde se todos estes

- HOW THE WORLD REALLY WORKS , Vaclav Smil,, Penguin books
- ** https://time.com/6175734/reliance-on-fossil-fuels/



Produção de materiais (cimento, aço, plástico)	31%
Electricidade	27%
Fazer crescer (plantas, animais)	19%
Transportes (aviões, carros, camiões, barcos)	16%
Aquecimento e arrefecimento (climatização, refrigeração)	7%

Distribuição dos gases de efeito de estufa emitidos distribuído por actividades (fonte: How to Avoid a Climate Disaster, Bill Gates)

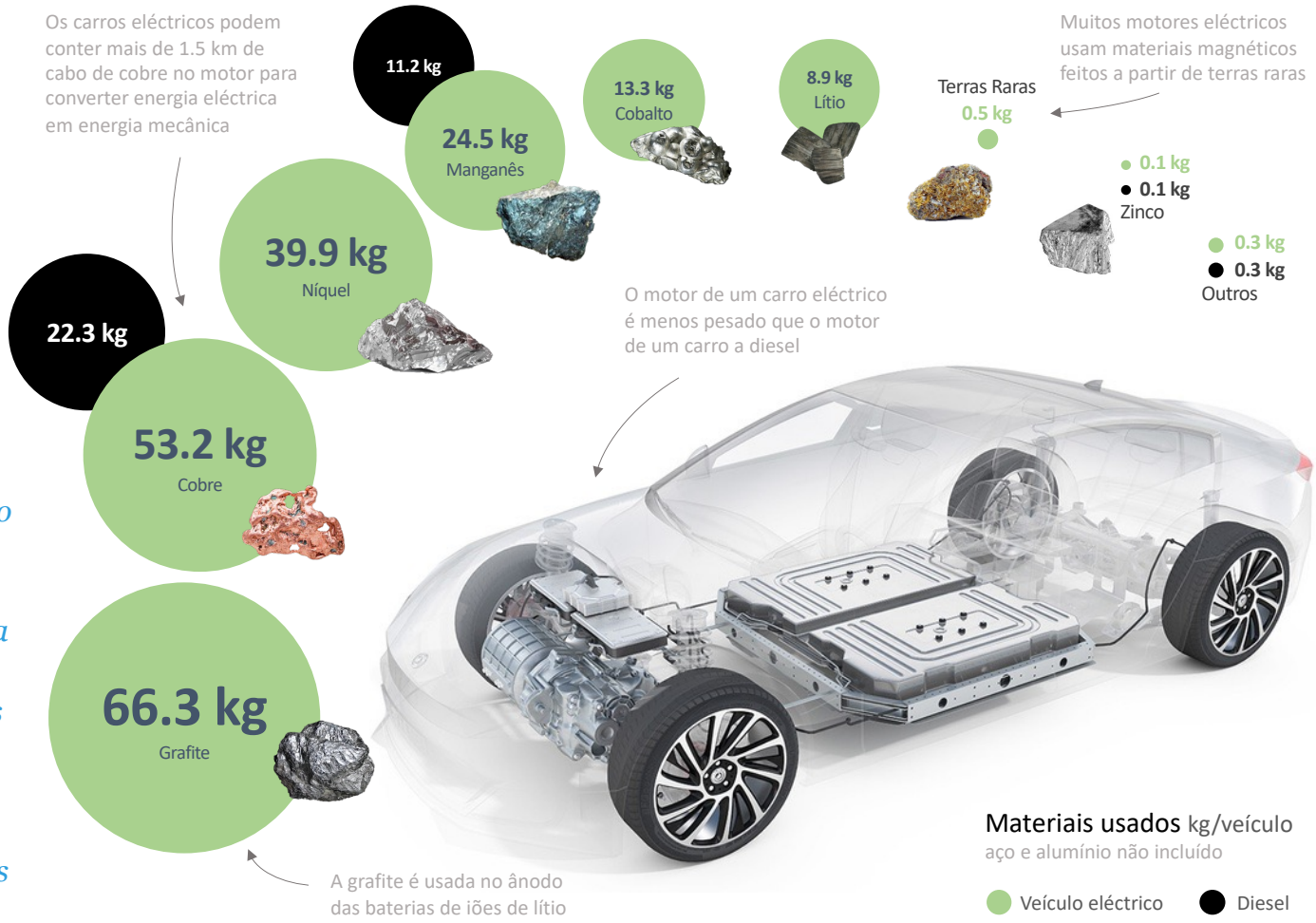
materiais fossem feitos sem nenhum combustível fóssil.

Além destes quatro materiais basilares para a economia, novas dependências de materiais altamente intensivos em energia estão a surgir, sendo os carros eléctricos o melhor exemplo, usando mais de 40 kg de cobre e 50 kg de grafite, bem como cerca de 181 kg de aço, alumínio e plásticos. O fornecimento destes materiais para um único veículo requer o processamento de cerca de 40 toneladas de minérios e, dada a baixa concentração de muitos elementos nos seus minérios, é necessário extrair e processar cerca de 225 toneladas de matérias-primas. A electrificação agressiva do transporte rodoviário exigirá a multiplicação destas necessidades em dezenas de milhões de unidades por ano! Os combustíveis fósseis continuam a ser indispensáveis para a produção de todos estes materiais.

A produção de electricidade representa apenas cerca de um quarto de todas as emissões. No entanto, no caminho para a descarbonização, resolver o problema da produção de electricidade representa mais de 27% da solução. A produção da electricidade com recurso a tecnologias limpas pode ajudar a resolver o problema do transporte, da climatização das casas e negócios e das fábricas que usam energia eléctrica de forma intensiva para produzir os seus produtos. Descarbonizar significa reduzir todas estas categorias. A produção de electricidade com recurso a tecnologias limpas não resolverá o problema da descarbonização mas será um passo essencial. A razão pela qual temos de descarbonizar é simples: os gases de efeito de estufa aprisionam o calor, causando o aumento da temperatura à superfície do planeta. Quantos mais gases houver, mais a temperatura sobe. E uma vez que os gases estejam na atmosfera ficam lá por um longo período de tempo. Cerca de um quinto dos gases emitidos hoje ainda estarão lá daqui a 10000 anos. Por esta razão temos de inovar.

“O desafio para todos os países é pôr em movimento a transição para um sistema energético mais seguro e descarbonizado sem minar o desenvolvimento económico e social”
- World Energy Outlook 2007 (OECD/IEA)

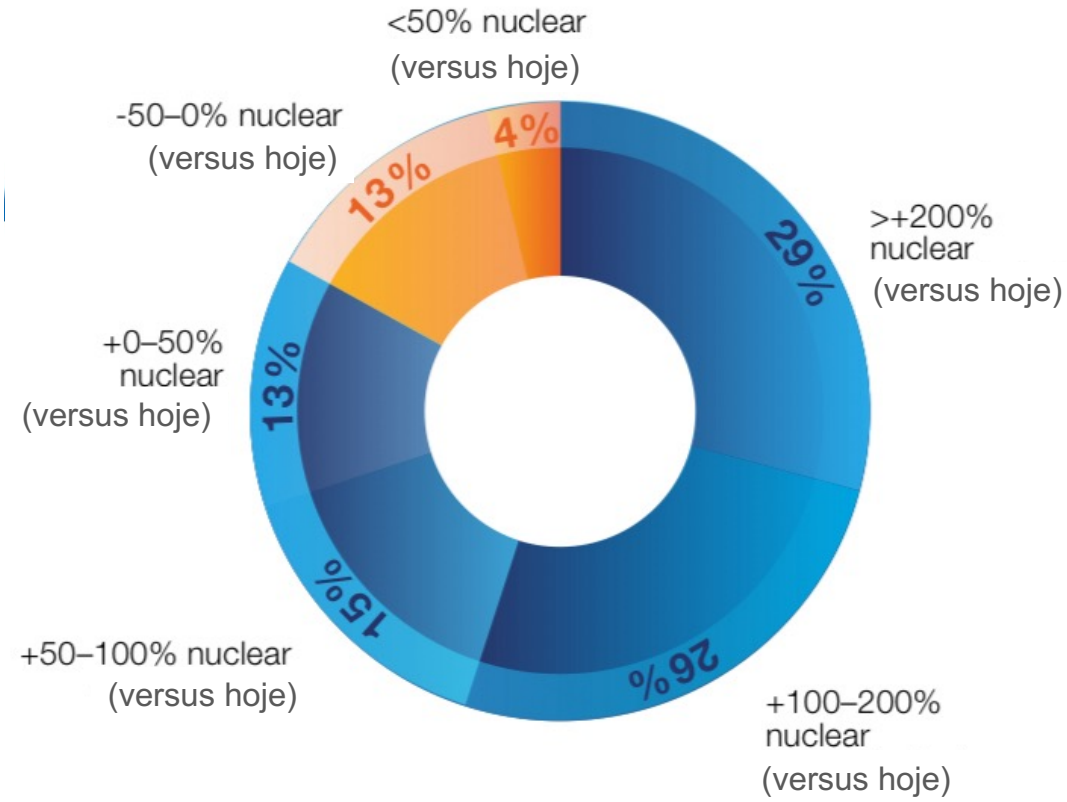
Em 2015, o mundo comprometeu-se em Paris a manter o aquecimento global acima dos níveis pré-industriais para abaixo de 2°C e tendo como alvo 1.5°C. Os últimos anos a comunidade científica tem alertado para os danos crescentes e graves que resultarão se o aquecimento subir acima de 1.5°C. Mantendo-se a taxa atual de emissões de



Os carros eléctricos serão mesmo de emissão zero? O veículos eléctricos usam, nos seus motores e baterias, uma maior quantidade de materiais que os veículos convencionais a diesel ou gasolina. A prospecção e refinamento destes materiais causam danos ambientais consideráveis e de intensidade energética de produção muito elevada. Um carro eléctrico requer cerca de 6 vezes mais materiais e pode, em média, ser 340 kg mais pesado (créditos: infografia adaptada de Elements.visualcapitalista. Os dados são da IEA e referem-se a todo o veículo incluindo baterias e motor. A intensidade de materiais refere-se a um carro de 75 kWh com 622 cátodos de níquel Manganês Cobalto e ânodos de grafite)

gases de efeito estufa (GEE), nenhum dos caminhos para a descarbonização parece ter probabilidade muito elevada de limitar o aquecimento a 1.5°C. Manter o aquecimento dentro de 1.5°C requer cortar as emissões de todos os gases de efeito estufa aproximadamente pela metade até 2030 e alcançar emissões líquidas de dióxido de carbono zero em 2050. Para atingir esta meta é necessário conseguir usar cerca de 95% menos carvão, 60% menos petróleo e 45% menos gás até 2050. Chegar a um zero líquido de CO2 em 2050 é tecnológica e economicamente viável. Para que a redução de emissões tenha uma probabilidade de 50% de manter o aquecimento global abaixo de 1.5°C e mais de 90% de probabilidade de ficar abaixo de 2°C é necessário que as emissões cumulativas de CO_2 entre 2020 e meados do século sejam limitadas a um "orçamento de carbono" de 500 Gt CO_2. Outros GEEs importantes, incluindo N_2O, CH4 e os gases fluorados, também devem ser reduzidos. O cumprimento da meta do orçamento de carbono pressupõe uma redução de cerca de 50-55% nas emissões anuais de metano (CH4) e 30% nas emissões anuais de óxido nitroso (N_2O) até 2050. Com acções mais arrojadas poderá ser possível acelerar a redução de emissões. As acções incluem o encerramento acelerado da geração de energia a carvão, redução significativa da desflorestação e progresso acelerado na electrificação do transporte rodoviário, juntamente com a descarbonização da indústria pesada e melhorias na eficiência energética. No entanto, mesmo neste caso, as emissões cumulativas de CO_2 entre agora e 2050 provavelmente excederão o orçamento de 1.5°C em cerca de 70 Gt CO_2.

O Painel Integovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) compilou e avaliou mais de 3000 cenários revistos por pares relacionados com a atenuação das alterações climáticas como parte do seu Sexto Relatório de Avaliação publicado entre 2021 e 2023. Estes cenários abrangem uma vasta gama de perspectivas sobre as transições energéticas e proporcionam uma visão aprofundada do papel das diferentes fontes de energia com baixo teor de carbono na consecução dos objectivos de atenuação das alterações climáticas. Também a Agência Internacioanal de Energia (IEA) publicou cenários que exploram as vias de desenvolvimento do sistema energético mundial no seu relatório anual World Energy Outlook. A contribuição da energia nuclear varia muito nestas trajectórias de cenários mas, de um modo geral, observa-se um papel crescente da energia nuclear até 2050 numa maioria significativa dos cenários, em especial nos que atingem reduções substanciais das emissões em conformidade com os objectivos do Acordo de Paris. Por exemplo, mais de 80% dos cenários com emissões inferiores a 20 Gt de CO2 em 2050 (o que corresponde aproximadamente a limitar o aquecimento a menos de 2°C)



80% dos cenários com emissões abaixo de 20 Gt em 2050 (limitando o aquecimento a um valor abaixo de 2ºC) prevêem uma expansão da geração de electricidade a partir de energia nuclear (créditos: "Nuclear energy in mitigation pathways to net zero", IAEA, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PAT-004_web.pdf)

prevêm um papel alargado para a produção de eletricidade de origem nuclear, com mais de metade a projetar pelo menos uma duplicação, e cerca de 30% a projetar uma triplicação ou mais em comparação com os níveis de 2020. O cenário "Net Zero Emissions by 2050 Scenario" da AIE também prevê mais do que uma duplicação da produção de eletricidade nuclear.

São cenários ambiciosos para os quais é provável que sejam necessários esforços adicionais para assegurar que as cadeias de abastecimento globais, o capital humano e outras infraestruturas estejam disponíveis para apoiar os elevados níveis de implantação e produção de energia nuclear previstos em alguns cenários.

No entanto, acções recentes demonstram que vários países começam tomar consciência que é preciso ir mais além para conseguir mitigar os efeitos das alterações climáticas. Na 28.ª Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (COP28) discutiu-se a energia nuclear como uma

potencial solução para as energias limpas. Em 1 de dezembro de 2023, 22 países, incluindo os EUA, o Canadá, o Reino Unido e a França, comprometeram-se a triplicar a capacidade de produção de energia nuclear até 2050 (a partir dos níveis de 2020). No entanto, a COP28 não tomou quaisquer decisões finais relativamente ao compromisso, mas propôs um novo objetivo específico de triplicar as energias renováveis e duplicar a eficiência energética até 2030.

O consenso em torno do nuclear também está cada vez mais presente no Parlamento Europeu que, em Novembro de 2023, votou a favor do reconhecimento da energia nuclear como uma tecnologia para a descarbonização no âmbito da "Net-zero industry act" (456 a favor da inclusão da energia nuclear e 153 contra). Esta legislação coloca o nuclear em pé de igualdade com outras tecnologias, como as energias renováveis. A energia nuclear, uma arma de descarbonização maciça (5-6 g CO2/kWh), finalmente reconhecida pelo parlamento Europeu. Um mês depois o mesmo parlamento adoptou (com vasta maioria de votos a favor) um relatório sobre os pequenos reactores modulares (SMR), confirmando a importância destas tecnologias no apoio à descarbonização, garantindo a segurança do fornecimento e apoiando sectores difíceis de descarbonizar, como a indústria.

Mobilidade e o sector eléctrico

Ainda que as emissões resultante das actividades de transporte correspondam a 16% de todas as emissões a nível global, a electrificação dos transportes afigura-se como um dos caminhos a trilhar uma vez que os veículos eléctricos carregados com electricidade de baixa emissão são uma das principais opções para reduzir as emissões no transporte rodoviário de passageiros. No entanto, a introdução de veículos eléctricos levará inevitavelmente a uma maior *interacção entre a mobilidade e o sector eléctrico.*

Quando a penetração dos carros eléctricos atingir níveis mais altos, a procura de electricidade dos carros elétricos tornar-se-á um factor relevante dentro do sistema energético e impactará a operação das centrais e infraestruturas da rede.

A União Europeia estima uma participação de 80% de veículos elétricos em 2050. Será necessário geração adicional de electricidade na União Europeia para responder à procura extra de energia decorrente deste aumento. De acordo com um estudo de 2016, a participação no consumo total de electricidade da Europa de veículos eléctricos aumentará de aproximadamente 0,03% em 2014 para cerca de 4-5% até 2030

e 9,5% até 2050*. A procura adicional de electricidade devido às altas taxas de propriedade de veículos elétricos assumidas para o futuro terá de ser correspondida por geração de energia adicional. Além disso, essa energia adicional precisa ser integrada na infraestrutura da rede em toda a Europa. As questões críticas são, portanto, quanta electricidade é necessária, que tipo de geração é usada para cobrir essa procura adicional de eletricidade e como os picos de carregamento serão geridos? Até 2030, a procura de energia adicional por veículos elétricos será limitada e não influenciará significativamente o sistema eléctrico. Mas, a longo prazo, com altas quotas de mercado de veículos eléctricos assumidas em 2050, a procura de electricidade necessária terá um impacto mais significativo nos sistemas de energia na Europa.

De acordo com os dados da European Environmental Agency** a parcela de consumo de electricidade exigida por uma parcela de 80% de veículos eléctricos em 2050 não é geograficamente homogénea e variará entre 3% e 25% da procura total de electricidade nos Estados-Membros da UE-28, dependendo do número de veículos eléctricos previstos em cada país. Em média, para a UE-28, a proporção da procura total de eletricidade necessária em 2050 é de 9,5%, em comparação com os 1,3% assumidos na projeção da Comissão Europeia. No geral, será necessária uma capacidade elétrica adicional de 150 GW para carregar carros eléctricos. Para Portugal, estima-se que em 2050 a procura de electricidade para alimentar o parque de veículos eléctricos corresponderá a 12% da electricidade total consumida. E como Mostrado anteriormente este é só um dos vectores onde a electrificação poderá contribuir para a descarbonização.

O caminho para a descarbonização exige um aumento significativo da produção de electricidade com recurso a fontes de energia limpas

* https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Assessing-the-status-of-electrification-of-the-road-transport-passenger-vehicles.pdf
** https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-and-the-energy

Inovar para zero requer investimento em Investigação e Desenvolvimento

Descarbonizar a sociedade é extremamente complicado. Infelizmente, os combustíveis fósseis são extremamente convenientes. São prácticos de utilizar e o nível de tecnologia necessário para os utilizar é baixo e assenta em tecnologia bem estabelecida e mesmo com a aplicação de taxas de carbono, os combustíveis fósseis têm continuado a ser um negócio atractivo. Mas, não há nenhum cenário no qual seja possível continuarmos a adicionar carbono à atmosfera e o nosso planeta deixe de ficar cada vez mais quente. E quanto mais quente fica mais difícil será para a humanidade sobreviver e prosperar. De momento não temos ainda a noção completa de quão nocivo poderá ser o aumento da temperatura mas devemos estar preocupados. E o planeta permanecerá mais quente por muito tempo mesmo quando descarbonizarmos totalmente porque os gases permanecerão na atmosfera. Por este motivo devemos ter um sentido da urgência da situação e começar a resolvê-la o mais rapidamente possível. No caminho da inovação para zero precisamos de milagres energéticos. Alguns dos potenciais milagres energéticos começam a emergir sob a forma de inovações tecnológicas.

A energia do futuro não vem da exploração intensiva dos recursos do planeta mas sim do conhecimento e do uso responsável dos recursos que o planeta nos oferece.

A par com o desenvolvimento de novas tecnologias é essencial que haja uma politica de inovação energética assente em produzir melhor e de forma mais limpa e eficiente, ter maior flexibilidade no portfolio de soluções energéticas e flexibilidade nos recursos utilizados (por exemplo, ampla distribuição geográfica das matérias primas) e consumir de forma mais eficiente e responsável.

Neste contexto a energia nuclear é uma das tecnologias que pode contribuir para esta política.

Garantir carga de base é uma prioridade. Mas são atingidas por diferentes países de formas diferentes. Ao consultar o site Electricity Map é possível obter uma imagem mais clara do consumo e da produção de electricidade Europeia. A Noruega, Suécia, Áustria, Finlândia, e França aparecem normalmente a verde, com uma produção de CO2 inferior a 100g por cada kWh de electricidade produzido. Os primeiros três países desfrutam de impressionantes recursos hídricos. A Finlândia possui um mix interessante de energia hídrica e energia nuclear. No entanto, países do centro Europeu como a Polónia, a República Checa, e a Bósnia, muito dependentes do carvão, chegam a emitir 30 vezes mais carbono do que a França.



SEQUESTRAÇÃO DE CARBONO



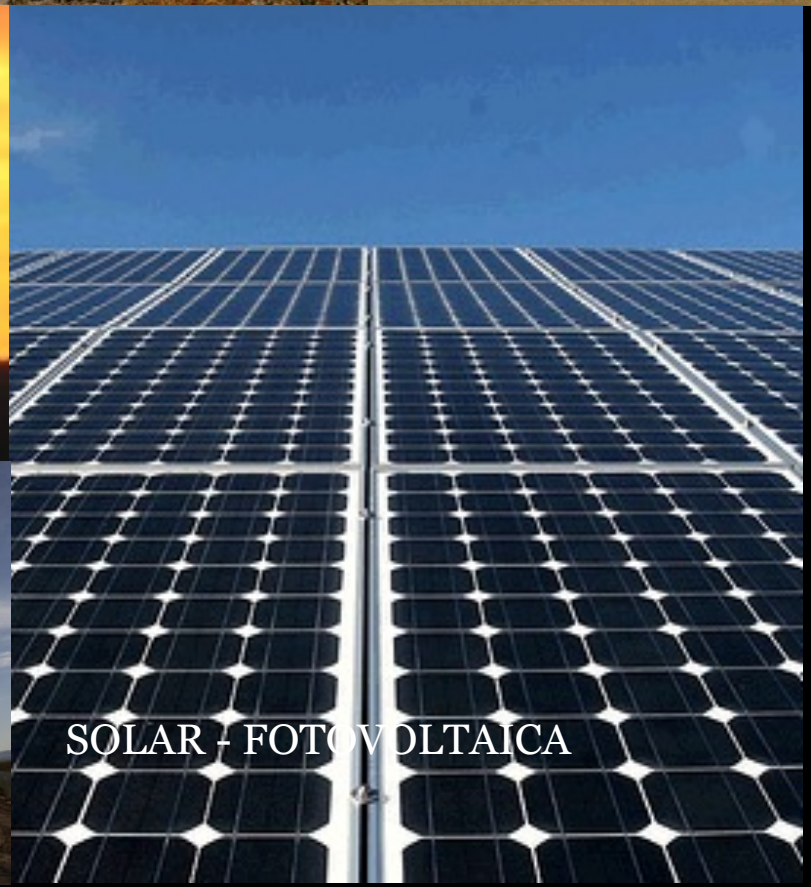
NUCLEAR



EÓLICA



SOLAR - TÉRMICA



SOLAR - FOTOVOLTAICA

Os milagres energéticos actuais são desenvolvimentos acoplados a velhas tecnologias, como é o caso da sequestração de carbono, soluções mais eficientes como se têm vindo a verificar no sector da energia solar e eólica ou soluções mais seguras como as que se têm procurado com novas gerações e novos conceitos de centrais de fissão nuclear.

Energia eólica

A energia eólica oferece muitas vantagens, desde logo o facto de ser uma energia renovável, o que explica por que é uma das fontes de energia que mais cresce no mundo.

O aquecimento desigual da atmosfera pelo sol, as superfícies irregulares da Terra (montanhas e vales) e a revolução do planeta em torno do sol combinam-se para criar vento. Como o vento é abundante, é um recurso sustentável enquanto os raios do sol aquecerem o planeta. Os padrões e velocidades do fluxo de vento variam muito entre as regiões e são modificados por corpos de água, vegetação e diferenças no terreno. As turbinas eólicas podem ser construídas em terra ou em grandes massas de água, como oceanos e lagos. As turbinas eólicas colectam e convertem a energia cinética que o vento produz em electricidade usando a força aerodinâmica das pás do rotor, que funcionam como uma asa de avião ou pá de rotor de helicóptero. Quando o vento flui através da lâmina, a pressão do ar em um lado da lâmina diminui. A diferença na pressão do ar entre os dois lados da lâmina faz com que o rotor gire. O rotor está conectado a um gerador, diretamente (se for uma turbina de accionamento direto) ou através de um eixo e uma série de engrenagens (uma caixa de engrenagens) que aceleram a rotação e permitem usar um gerador fisicamente menor. Essa tradução da força aerodinâmica para a rotação de um gerador cria electricidade. As turbinas eólicas são montadas numa torre para capturar o máximo de energia. A 30 metros ou mais acima do solo, as turbinas aproveitam o vento mais rápido e menos turbulento. As turbinas eólicas modernas podem ser categorizadas por onde estão instaladas e pela forma como estão conectadas à rede eléctrica:

Vento em plataforma terrestre: As turbinas eólicas terrestres variam em tamanho de 100 quilowatts a vários megawatts. Estas turbinas eólicas podem ser usadas como aplicações autónomas, ou podem ser conectadas a uma rede elétrica ou até combinadas com um sistema fotovoltaico (célula solar). As turbinas eólicas maiores são mais económicas e são agrupadas em parques eólicos, que fornecem energia em massa para a rede elétrica.

Vento offshore: As turbinas eólicas offshore tendem a ser enormes. Apesar do tamanho o seu transporte não apresenta os mesmos desafios das instalações eólicas terrestres, uma vez que os componentes podem ser transportados em navios em vez de estradas. Estas turbinas são capazes de capturar poderosos ventos oceânicos e gerar grandes quantidades de energia.

Vantagens

- É uma fonte de combustível limpa. As turbinas eólicas não produzem emissões atmosféricas que causam chuva ácida, poluição atmosférica ou gases de efeito estufa.
- O vento é uma fonte doméstica de



energia. A oferta eólica do país é abundante e inesgotável.

- É sustentável. Enquanto o vento sopra, a energia produzida pode ser aproveitada para enviar energia pela rede.
- A energia eólica é económica. A energia eólica terrestre é uma das fontes de energia de menor preço disponíveis hoje, custando cerca de 51 €/MWh de acordo como relatório “Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition” da IEA.

Desafios

- A energia eólica ainda tem de competir em termos de custo com as fontes convencionais de geração de electricidade. Embora o custo da energia eólica tenha diminuído drasticamente na última década, os projetos eólicos devem ser capazes de competir economicamente com a fonte de electricidade de menor custo, e alguns locais não dispõem de ventos suficientes para serem competitivos em termos de custos.
- Boas instalações eólicas terrestres geralmente estão localizadas em locais remotos, longe das cidades onde a electricidade é necessária. É necessário construir linhas de transmissão para levar a electricidade do parque eólico para os locais de consumo. O desenvolvimento de recursos eólicos pode não ser o uso mais lucrativo dos terrenos. Os terrenos adequados para a instalação de turbinas eólicas devem competir com usos alternativos do terreno, que podem ser mais valorizados do que a geração de electricidade.
- As turbinas podem causar poluição sonora e estética. Embora os parques eólicos tenham relativamente pouco impacto ao meio ambiente em comparação com as centrais convencionais, existe preocupação com o ruído produzido pelas pás das turbinas e os impactos visuais na paisagem.
- Os parques eólicos podem ter um impacto negativo na vida selvagem local. Há evidências do aumento de morte de aves ao voarem em direção às pás das turbinas giratórias. Há também evidências do aumento de mortalidade de morcegos devido às pás das turbinas. A maioria destes problemas tem vindo a ser resolvida ou bastante reduzida com recurso ao desenvolvimento de tecnologias que evitem e/ou mitiguem o problema ou pela localização adequada dos parques eólicos reduzindo o impacto nestas espécies. Como todas as fontes de energia, os projetos eólicos podem alterar



Fragmentos de pás de turbinas eólicas aguardam o enterro no Casper Regional Landfill em Wyoming, EUA (Créditos: Benjamin Rasmussen / Bloomberg Green)

o habitat em que são construídos, o que pode alterar a adequação desse habitat para determinadas espécies.

- Na União Europeia a eletricidade proveniente da energia eólica cresceu de menos de 1% em 2000 para mais de 16% hoje. Os fabricantes enfrentam cada vez mais um dilema ambiental próprio: como reciclá-las. À medida que a primeira onda de turbinas eólicas chega ao fim das suas vidas úteis, dezenas de milhares de pás das hélices estão a ser empilhadas e enterradas em aterros sanitários, onde levarão séculos para decompor-se.

A estimativa da Wind Europe, uma associação comercial com sede em Bruxelas que promove o uso de energia eólica na Europa, é que sejam descartadas 52000 pás por ano até 2030 um valor bastante superior acima dos cerca de 1000 atuais. O total de pás em fim de vida estima-se que tenha sido, em 2022, da ordem de 50000 toneladas*. Embora as pás das turbinas eólicas não sejam especialmente tóxicas, o aterro resultante, se manuseado de forma inadequada, pode contribuir para impactos ambientais perigosos, incluindo a poluição do solo e dos cursos de água. Apesar de começarem a aparecer no mercado alternativas ao descarte num aterro, como a queima em fornos de cimento, ou a trituração para uso em produtos como espelhos retrovisores de carros e painéis de isolamento, a inexistência de obrigação legal de reciclagem ou recuperação e a indisponibilidade destas técnicas à escala comercial ou a um preço que as torne alternativas viáveis para aterros sanitários torna a disposição em aterro a opção economicamente mais barata. A reciclagem dos materiais compósitos usados nas turbinas eólicas continua a ser um desafio devido ao baixo valor do produto reciclado e à quantidade relativamente pequena de resíduos (produzidos), o que não estimula os mercados de reciclagem. O artigo referido anteriormente concluiu que actualmente apenas algumas soluções de reciclagem estão disponíveis à escala comercial, oi que deixa algumas zonas da Europa sem solução para as turbinas em fim de vida. Várias empresas têm apostado na inovação para garantir que a energia eólica é totalmente sustentável e totalmente circular. Um exemplo é a nova lâmina, Siemens Gamesa que pode constituir um avanço significativo. As primeiras destas pás foram instaladas numa turbina eólica no parque eólico offshore de Kaskasi, na Alemanha. É a primeira instalação comercial de tecnologia de turbina eólica reciclável podendo a separação da resina, fibra de vidro e madeira, entre outros feita por meio duma solução ácida suave.

* J. Beauson et al., “The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 155, 2022, 111847, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111847



A novas pás para turbinas eólicas da Siemens Gamesa, a serem testadas em condições operacionais numa turbina eólica no parque eólico offshore de Kaskasi, na Alemanha.

Desta forma os materiais poderão entrar na economia circular, criando novos produtos sem a necessidade de recorrer a mais recursos brutos.

Um outro aspecto que merece atenção são as perdas de material para o meio ambiente. Durante a operação as eólicas offshore perdem material por erosão do bordo de ataque das pás directamente para o meio ambiente. Um estudo* calculou que para uma turbina de 4.5 MW com pás de 130 a 140 m a estimativa é da ordem de 62 kg/ano/turbina, levantando preocupações com o Bisfenol-A (BPA) introduzido no ecossistema**. O epóxi contém 33% de Bisfenol A e este representa 13-15% do peso das pás. Quanto deste BPA será libertado para o ambiente é incerto mas poderá ser um valor significativo embora a indústria conteste o estudo****. E embora outros estudos coloquem este valor em poucas centenas de g/ano por turbina, 1 kg de BPA é suficiente para poluir 10 mil milhões de litros de água. O BPA é um disruptor do sistema endócrino e é bioacumulativo em tecidos adiposos. Estudos confirmaram a sua ação antiandrogénica e efeitos semelhantes ao estrogénio, que conferem muitos impactos negativos à saúde, especialmente no sistema imunológico, no processo neuroendócrino e no mecanismo reprodutivo. Além disso, também pode induzir mutagénesis e carcinogénesis, conforme estudos científicos recentes. Mesmo baixas doses de BPA alteram órgãos sensíveis a hormonas e estão relacionadas a uma ampla gama de doenças humanas não transmissíveis com base em evidências de estudos em humanos e em experiências com animais e estudos in vitro***.



A erosão do bordo de ataque da pá numa eólica offshore é enorme, e.g. um estudo estima que numa turbina de 4.2 MW com pás de 130-140 m corresponde a 62 kg/ano/turbina, outros estudos estimam valores das centenas de gramas por ano. Qual será o impacto de 10 GW offshore (o valor anunciado para Portugal) com a instalação de cerca 666 turbinas (se forem turbinas de de 15 MW)?*

* https://docs.wind-watch.org/Leading-Edge-erosion-and-pollution-from-wind-turbine-blades_5_july_English.pdf
** A Abraham et al., Reviews on Environmental Health, vol. 35, no. 2, 2020, pp. 201. https://doi.org/10.1515/reveh-2019-0034
*** F. S vom Saal, et al., Endocrinology, Volume 162, Issue 3, March 2021, bqaa171, https://doi.org/10.1210/endocr/bqaa171
**** https://cleanpower.org/wp-content/uploads/2023/03/ACP_MicroplasticsFactSheet_March-2023.pdf



HUANGHE HYDROPOWER HAINAN SOLAR PARK, CHINA, 2.200 MW
Este parque solar de 2,2 GW na província de Qinghai, na China, desenvolvida pela empresa estatal Huanghe Hydropower Development, entrou em operação em setembro de 2020. A longo prazo, o plano é que a capacidade deste projeto atinja impressionantes 16 GW. A centraltambém inclui 202,8 MW/MWh de capacidade de armazenamento (Créditos: Protenders.com)

O potencial problema da revolução verde na China

Na China milhões de turbinas eólicas e painéis solares estão perto da idade da reforma e podem vir a tornar-se um problema ambiental.*

A China é líder mundial na produção de energia renovável, tendo instalado 328 GW de capacidade de energia eólica e 306 GW de capacidade de energia solar desde o início dos anos 2000. Isto traduz-se em cerca de 40% e 30% do total global, respectivamente. O país pretende duplicar a sua capacidade eólica e solar até 2025 para apoiar as suas metas de ter 80% da energia proveniente de fontes renováveis e alcançar a neutralidade de carbono até 2060. No entanto, energia solar e eólica podem acabar a contaminar o solo e as águas subterrâneas com metais tóxicos, aumentando a poluição do ar e contribuindo para as emissões de carbono, a menos que a China desenvolva um ecossistema de reciclagem que possa lidar com milhões de toneladas de equipamentos programados para desmantelamento nos próximos anos.

O Greenpeace prevê que no início o problema será de pequenas dimensões, com 1,2 GW de turbinas eólicas a serem desmanteladas em 2025. Mas em 2040, o número crescerá para 280 GW de turbinas eólicas desmanteladas e 250 GW de painéis fotovoltaicos retirados de serviço (correspondendo a cerca 750 milhões de painéis de acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos).

Os metais pesados nestes milhões de toneladas de turbinas eólicas e painéis solares podem contaminar o solo e as águas subterrâneas se colocados em aterros sanitários.

Queimá-los também pode libertar substâncias tóxicas, como fibra de vidro para o ar, para além da emissão de grandes quantidades de carbono. Enquanto isso, a produção de materiais-chave para novos equipamentos de energia verde, como aço, alumínio, silício e prata, também causa emissões elevadas de carbono, pois os actuais processos de produção dependem fortemente da queima de carvão.

De acordo com o Greenpeace, se todas as turbinas eólicas e painéis solares que deverão ser desmantelados até 2040 fossem totalmente reciclados, seriam eliminadas 221 milhões de toneladas de emissões de dióxido de carbono. No entanto, estes objetivos estão longe de serem possíveis no momento, porque o mercado de reciclagem na China ainda está na sua infância

* https://www.scmp.com/business/article/3187849/chinese-green-ambitions-dirty-side-beijing-faces-recycling-challenge



Central solar de Alcoutim

Energia solar

Quando falamos de energias renováveis, é impossível deixar de fora a fonte mais abundante à nossa disposição: o Sol.

A quantidade de energia solar produzida em apenas uma hora e meia poderia providenciar para o mundo inteiro a electricidade necessária anualmente! Com um recurso tão infinito, não é de admirar que uma das formas para tentar cumprir as metas de descarbonização seja o aumento da produção de electricidade a partir da energia solar. A energia solar é limpa e renovável e pode ajudar a preencher a lacuna dos combustíveis fósseis, garantindo ao mesmo tempo o acesso generalizado à electricidade. Actualmente, a energia solar é a forma de energia renovável que mais cresce em todo o mundo.

A radiação solar, a "luz" solar é a radiação eletromagnética emitida pelo sol. Embora todos os locais da Terra recebam alguma luz solar ao longo de um ano, a quantidade de radiação solar que atinge qualquer ponto da superfície da Terra varia. As tecnologias solares capturam essa radiação e Transformam-na em formas úteis de energia. As tecnologias solares convertem a luz solar em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos (PV) ou por meio de espelhos que concentram a radiação solar. Essa energia pode ser usada para gerar electricidade ou ser armazenada em baterias ou armazenamento térmico.

Solar fotovoltaico: As tecnologias fotovoltaicas, mais conhecidas como painéis solares, geram energia usando dispositivos que absorvem a energia da luz solar e a convertem em energia elétrica por meio de materiais semicondutores. Um único dispositivo fotovoltaico é conhecido como célula. Uma célula fotovoltaica individual é geralmente pequena, normalmente produzindo cerca de 1 ou 2 watts de potência. Essas células são feitas de diferentes materiais semicondutores e geralmente têm a espessura de quatro cabelos humanos. Para resistir ao ar livre por muitos anos, as células são colocadas entre materiais de proteção numa combinação de vidro e/ou plástico. Para aumentar a potência das células fotovoltaicas, elas são conectadas em cadeias para formar unidades maiores conhecidas como módulos ou painéis. Os módulos podem ser usados individualmente, ou vários podem ser conectados para formar matrizes. Uma ou mais matrizes são então conectadas à rede elétrica como parte de um sistema fotovoltaico completo. Devido a essa estrutura modular, os sistemas fotovoltaicos podem ser construídos para atender a praticamente qualquer necessidade de energia elétrica, pequena ou grande.

Os módulos e matrizes fotovoltaicas são apenas uma parte de um sistema fotovoltaico. Os sistemas também incluem estruturas de montagem que apontam os painéis para o Sol, juntamente com os componentes que transformam a

electricidade de corrente contínua (DC) produzida pelos módulos em electricidade de corrente alternada (AC).

Solar de Concentração: Os sistemas de concentração de energia solar térmica usam espelhos para refletir e concentrar a luz solar em receptores que colectam energia solar e a convertem em calor, que pode ser usado para produzir electricidade ou armazenado para uso posterior. É usado principalmente em centrais de energia de grandes dimensões.

A energia solar tem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas, incluindo a análise do impacto ambiental A energia solar, como todas as formas de geração de energia, tem uma pegada de carbono. Depois de contabilizar como os materiais são adquiridos, fabricados, transportados e executados há um custo oculto que deve ser contabilizado.

Vantagens

- A energia solar é limpa e renovável, livre de poluição e não causa emissão de gases de efeito estufa após a instalação: Ao contrário dos combustíveis fósseis, a energia solar não usa poluentes e não precisa de outros recursos para funcionar além da água limpa.
- A energia solar é uma energia sustentável. Portanto, não haverá problema em usá-la completamente sem deixar um legado de resíduos para as gerações futuras.
- Redução da dependência de combustíveis fósseis
- Energia limpa renovável disponível todos os dias do ano, capaz de produzir alguma energia mesmo em dias nublados.
- Os painéis solares são duradouros. Embora haja muito espaço para melhorias no processo de fabricação, as tecnologias solares têm longevidade - durando cerca de 30 anos, com custos de manutenção relativamente baixos. É claro que isso também beneficia o meio ambiente, com menos necessidade de substituição e manutenção, o que pode resultar em muito desperdício.
- Pode ser instalada e consumida localmente por consumidores domésticos. O excesso de energia pode ser vendido de volta para a companhia de energia se a rede estiver ligada. Pode ainda usar sistemas de armazenamento de energia para uso nocturno ou para fazer face a períodos de produção reduzida
- As células solares não fazem absolutamente nenhum ruído. As células solares requerem muito pouca manutenção para manterem um funcionamento normal. Vários fatores causam degradação além da idade. Os painéis solares são capazes de suportar muita pressão e condições bastante extremas. No entanto, não são imunes a



A central de concentração solar Gemasolar em Fuentes de Andalucia (Espanha), cpode gerar energia eléctrica suficiente para alimentar 27,500 casas de acordo com a SENER Energy (Créditos: mTom Hegen)

danos. Por exemplo, mudanças no clima causam tensão nos painéis solares, resultando em microfissuras. Os detritos também podem acumular-se e resultar em danos. Vento forte, neve e até a luz do sol, podem causar degradação nos painéis. Os fabricantes normalmente levam em consideração uma taxa de degradação de 1% a cada ano. No entanto, verificações de manutenção podem ajudar a prolongar a vida útil dessas tecnologias. Em geral, precisam de pouca manutenção, mas a manutenção da energia solar ainda é recomendada.

- A longo prazo, pode ter um elevado retorno do investimento devido à quantidade de energia gratuita que um painel solar pode produzir.

Desafios

- O fabrico de células solares e módulos fotovoltaicos requer quantidades mais ou menos elevadas de produtos químicos tóxicos, solventes e ácidos* (como ácido sulfúrico, ácido clorídrico, etc) para síntese e limpeza, gases para depositar películas ultrafinas de materiais semicondutores e metais, consoante o tipo de célula ou módulo fotovoltaico que está a ser fabricado. A maior parte destes produtos químicos são altamente tóxicos e nocivos para os seres humanos e o ambiente Desenvolver células solares eficientes usando produtos químicos menos tóxicos é um grande desafio.
- Elevados custos iniciais de material e instalação e longo Retorno do Investimento (ROI). No entanto, com a redução no custo da energia solar nos últimos 10 anos, a energia solar tem vindo a tornar-se mais viável.
- Precisa de muito espaço para a sua instalação, pois a eficiência ainda é baixa. A ocupação dos terrenos por centrais solares, acompanhado muitas vezes de abate de árvores, tem causado cada vez mais a revolta da população
- Actualmente, as células solares utilizam apenas uma pequena percentagem da luz solar. Aumentar a eficiência das células solares é um grande desafio. Com o aumento da eficiência é expectável que a quantidade de terreno necessário seja reduzida.
- A geração de electricidade depende inteiramente da exposição do país à luz solar; isso pode ser limitado pelo clima de um país. Nem todas as regiões do mundo recebem luz solar suficiente para depender totalmente dela.

* Toxic Materials Used in Thin Film Photovoltaics and Their Impacts on Environment, Hervé Joël Tchognia Nkuissi et al.,, , DOI: 10.5772/intechopen.88326, https://www.intechopen.com/chapters/68288

Sem energia solar à noite, há necessidade de sistemas de armazenamento de energia que também podem ajudar a fazer face à produção reduzida em dias nublados.

- Menor produção solar nos meses de inverno
- Para produzir um único módulo solar, é necessária uma quantidade significativa de energia, incluindo a energia necessária para a prospecção mineral, fabricação, transporte, descomissionamento e desmantelamento. Em vários locais a energia utilizada para o fabrico pode ser de elevada intensidade carbónica.
- Um outro desafio importante que não pode ser negligenciado é o desmantelamento e reciclagem de painéis solares. Esta é uma área de preocupação, pois podem representar sérios riscos ambientais. Esta questão é particularmente importante, pois a indústria de energia solar continua a crescer. De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), os resíduos de painéis solares podem chegar a 78 milhões de toneladas até 2050, e o mundo pode gerar 6 milhões de toneladas de novos resíduos solares anualmente. O desmantelamento e a reciclagem de painéis solares ainda não foram totalmente explorados e continuam sendo um processo complexo. Para recuperar materiais utilizados na produção de painéis solares, como silício e prata, são necessárias soluções mais sofisticadas. Caso contrário, esses módulos podem acabar em aterros sanitários. Uma vez que esses módulos sejam colocados em aterros, materiais valiosos (e cuja produção tem um custo ambiental elevado) são descartados. Aterros regulares também não estão equipados caso ocorra lixiviação. A lixiviação, na qual materiais perigosos são lixiviados no solo, é um risco importante a ser considerado caso os painéis solares sejam danificados ou descartados, Para que os painéis solares sejam sustentáveis é necessário que a reciclagem destes seja bem-sucedida, ou seja, os materiais usados para construí-los ainda devem ser utilizáveis no final de sua vida útil, décadas depois. Separar os materiais (como o silício, cádmio, antimónio e chumbo) e ser capaz de reciclá-los de forma única é actualmente um processo complicado e potencialmente caro. Este outro desafio que o sector de energia solar deve enfrentar o mais rapidamente possível.

A boa notícia é que a tecnologia para energia solar está a crescer rapidamente e há a esperança que todos estes desafios sejam superados. Inovações como um novo tipo de célula solar ou um novo tipo de material para células solares de silício podem mudar o jogo para sempre.

Hidrogénio

Na discussão sobre a transição energética o Hidrogénio tem estado na ribalta e parece assumir o papel de solução milagrosa para o cumprimento das metas de descarbonização.

O hidrogénio é uma solução inovadora para alcançar a neutralidade carbónica e descarbonizar setores difíceis de reduzir. O hidrogénio sustentável tem sido proposto como a espinha dorsal de uma sociedade energética moderna e descarbonizada*. O hidrogénio já é usado como matéria-prima química; por exemplo, a amónia é usada em fertilizantes ou hidrocarbonetos usados para plásticos. No futuro, o hidrogénio pode ser usado como uma forma de transportar energia e meio de armazenamento de energia. Tem aplicações vastas e viáveis em vários setores que precisam ser descarbonizados, como transporte, indústria, geração de energia e aquecimento para edifícios. Os proponentes do chamado Hidrogénio verde acreditam que este pode ajudar a terminar a dependência dos combustíveis fósseis e ajudar a transição para a neutralidade carbónica, transformando indústrias altamente poluentes como por exemplo o fabrico de aço e cimento, ou apresentando soluções para os transportes individuais e de mercadoria. Na economia actual o Hidrogénio é usado sobretudo para a refinação de petróleo e produção de fertilizantes. A procura por Hidrogénio para uso industrial mais que triplicou desde 1975 e, de acordo com o relatório da IEA “The future of Hydrogen”, actualmente é quase totalmente produzido a partir de combustíveis fósseis. Por esse motivo a produção de Hidrogénio “cinzento” (a partir de gás) que corresponde a cerca de 71% da produção e o Hidrogénio “castanho” e “negro” (a partir da gaseificação do carvão ou lenhite) contabiliza 830 milhões de toneladas de $C0_2$ por ano, correspondendo a cerca de 3% das emissões de gases causadores de efeito de estufa. O potencial do Hidrogénio é vasto podendo suprir as necessidades de produção de energia eléctrica limpa ou providenciar um combustível limpo que poderá ser usado em muitas aplicações que de outra forma seriam difíceis de descarbonizar e onde os combustíveis fósseis têm sido considerados essenciais. Tem ainda potencial para uso em indústrias com elevada emissão de CO_2 que actualmente consomem enormes quantidades de carvão, como por exemplo, a petroquímica, de cimento e aço, que frequentemente precisam de temperaturas elevadas e combustão e nas quais a electrificação é difícil. Há também a expectativa que o Hidrogénio possa complementar as energias renováveis preenchendo as necessidades de armazenamento e complementando as necessidades de fornecimento de electricidade de base. Actualmente, as baterias são uma forma barata de armazenar energia no curto prazo, mas o Hidrogénio

* UNECE Hydrogen Bief, https://unece.org/sites/default/files/2022-02/Hydrogen%20brief_EN_final.pdf

pode ser armazenado indefinidamente oferecendo solução para falhas prolongadas na rede de energia. No entanto, há alguns aspectos a considerar. Primeiramente, e por causa das múltiplas formas como pode ser implementado, o Hidrogénio pode servir de cobertura ao uso intransigente dos combustíveis fósseis e que vão acenando com o Hidrogénio, no futuro, como uma alternativa para justificarem no presente investimentos em gás natural. Em segundo lugar, a promessa da produção do Hidrogénio de forma limpa e sem produção de CO_2.

Embora o Hidrogénio, dito verde, seja produzido a partir de energias verdes, a grande maioria do Hidrogénio produzido hoje resulta do uso intensivo de combustíveis fósseis e está longe de ser verde.

Hidrogénio Cinzento: A grande maioria do Hidrogénio produzido hoje resulta do uso intensivo de combustíveis fósseis para produzir hidrogénio a partir de reformação de metano com vapor de água.

Hidrogénio verde: O Hidrogénio verde usa energias renováveis para a produção de electricidade que é usada para decompor água em oxigénio e hidrogénio por eletrólise. Este processo não emite CO_2 e produz hidrogénio puro (ao contrário do hidrogénio cinzento ou castanho que contem impurezas). É esperado que o Hidrogénio verde permita transformar a energia eólica e solar num combustível flexível e sem carbono, que pode substituir muitas das aplicações dos combustíveis fósseis. Tem ainda a vantagem que este tipo de energia poderá ser transportado à volta do mundo, como gás através de gasodutos, ou liquefeito em navios levando a energia de locais onde existe excesso de produção de energia renováveis para locais onde estas não abundam. Neste processo, o custo é bastante elevado. No entanto, com o crescimento das energias renováveis e a redução do seu custo assim como a expectativa de optimização do próprio processo de eletrólise, espera-se que a economia de escala vença e contribua para custos atractivos. Em particular, é expectável que a sinergia entre renováveis e a produção de Hidrogénio seja positiva. Com a penetração destas energias os preços deverão baixar havendo a expectativa que com o excesso de energias renováveis o processo possa se tornar barato. À data de hoje o crescimento das renováveis para sustentar o crescimento duma economia do Hidrogénio e a redução de custos são ainda desafios significativos. Para os custos de Produção descerem é também necessário que a tecnologia de eletrólise aumente de escala. Hoje em dia é necessário mais de 50 kWh para produzir 1 kg de Hidrogénio por eletrólise. O custo actual, em alguns projectos no norte da Europa ronda 2€/kg. É



Solar / Eólica



Nuclear



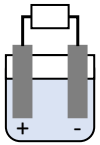
Gás



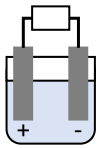
Gás



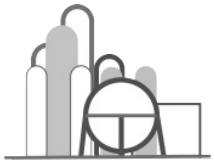
Carvão



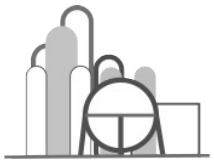
Electrólise



Electrólise



Reformação de metano com vapor de água



Reformação de metano com vapor de água

Gaseificação

O_2

O_2

Captura de CO_2

Hidrogénio verde

Hidrogénio rosa

Hidrogénio azul

Hidrogénio cinzento

Hidrogénio castanho

Os caminhos para a produção do Hidrogénio

expectável que em alguns anos se consiga ter eléctrodos que usem 20% menos energia para produzir a mesma quantidade de Hidrogénio. A viabilidade do Hidrogénio verde passa pela automação do processo de fabricação do electrolizadores e pelo aumento da eficiência destes, sendo esperado que em 2030 o custo reduza para 1/3 . No entanto, ainda que este alvo seja atingido o Hidrogénio verde ainda permanecerá uma alternativa cara.

Hidrogénio azul: O Hidrogénio azul, reduz as emissões de carbono, recorrendo a combustíveis fósseis mas aplicando técnicas de captura e sequestração de carbono durante o processo. Neste caso embora o processo de emissão possa vir a ser melhorado para 80 a 90% de sequestração, há que também ter em conta as emissões de metano. Quando se tem em consideração todo processo e a sua escalabilidade não só estas emissões são significativas como contribuem para que seja uma opção pouco amiga do ambiente. Os defensores do Hidrogénio azul usam como argumento o custo ainda elevado do Hidrogénio verde, defendendo que o Hidrogénio azul pode fazer a ponte no curto termo e contribuir para a redução de emissões na indústria. O argumento é que a produção de gás natural produz metano que é queimado como desperdício pelo que a captura e conversão em Hidrogénio pode contribuir para a redução das emissões no curto prazo.

Hidrogénio rosa. A possibilidade de produzir Hidrogénio limpo em centrais nucleares tem emergido como uma opção para produção barata de hidrogénio em larga-escala. As tecnologias de produção de Hidrogénio nuclear têm grande potencial e vantagens sobre outras fontes que podem ser consideradas para o crescimento da participação do hidrogénio numa futura economia mundial de energia. A selecção de tecnologias de Hidrogénio (a serem acopladas a reactores de energia nuclear) depende muito do tipo de central nuclear. Algumas tecnologias de produção de Hidrogénio, como a eletrólise convencional, requerem apenas energia eléctrica. Enquanto outros, como ciclos termoquímicos, podem exigir apenas calor de processo (que pode ser fornecido em valores de temperatura elevados) ou tecnologias híbridas, como a eletrólise a vapor de alta temperatura (HTSE) e ciclos termoquímicos híbridos, que requerem calor e electricidade.

Outros métodos de produção de hidrogénio: Há ainda a possibilidade de produção de Hidrogénio a partir da gaseificação da biomassa que, ainda que possa ser negativo do ponto de vista da produção de emissões (se usado em conjunto com técnicas de sequestração de carbono) levanta sérias questões acerca da origem da biomassa e de que forma iria



A empresa sueca de energia OKG produz 'hidrogénio rosa' livre de fósseis na sua instalação nuclear Oskarshamn 3, para a empresa de gás industrial Linde Gas.

O Hidrogénio rosa

A energia nuclear também pode ser usada para produzir hidrogénio por meio de vários processos de baixo carbono

A eletrólise da água a baixa temperatura é a abordagem baseada no uso de reactores nucleares atuais que produzem electricidade. A electricidade de baixo carbono é usada para alimentar a eletrólise que gera hidrogénio livre de emissões à temperatura ambiente. Os electrolisadores são mais eficazes quando trabalham continuamente com um factor de capacidade elevada, em vez de intermitentemente para diminuir os custos.

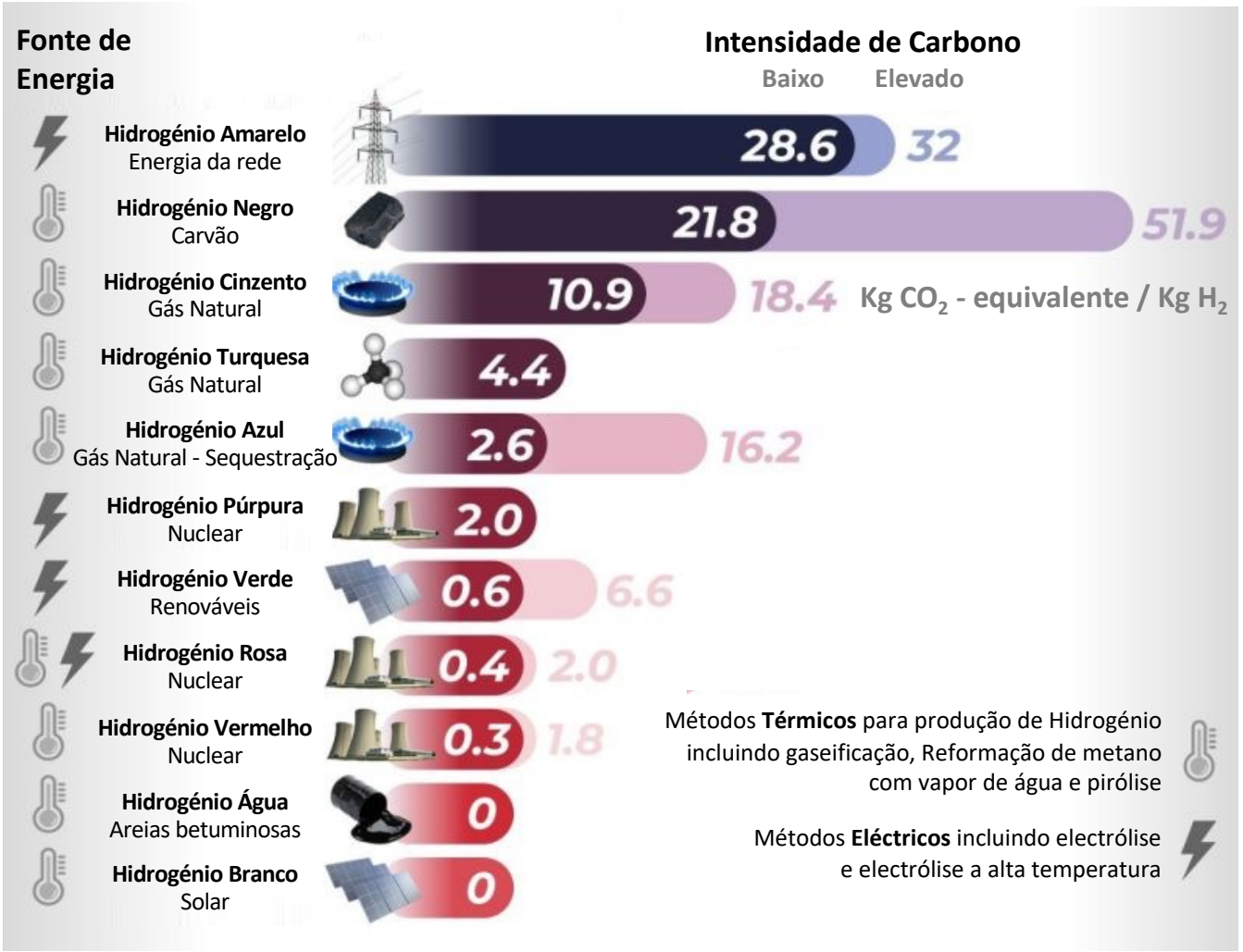
A eletrólise a vapor de alta temperatura aplica calor e electricidade de baixo carbono de reactores nucleares para alimentar a electrólise a vapor, que é mais eficiente na produção de hidrogénio do que a electrólise por meio de energia renovável. Embora este processo seja mais eficiente na faixa de temperatura (550 – 750°C), também é possível na temperatura (<200°C).

Devido aos factores de capacidade mais elevados, uma central nuclear de 1 GW poderá produzir cinco vezes mais hidrogénio do que um parque solar de 1 GW no mesmo período de tempo. Por exemplo, a Agência Internacional de Energia diz que 520 milhões de toneladas de hidrogénio limpo seriam necessários anualmente até 2050 num mundo descarbonizado. Se esse total fosse fornecido por eletrolisadores, seriam necessários apenas 3,3 TW de energia nuclear, em comparação com 16,5 TW de energia solar, 13,5 TW de eólicas terrestre ou 8,25 TW de energia eólica offshore, tendo em conta os factores de capacidade

Os dados sobre a produção global de hidrogénio rosa são limitados e por enquanto o volumes são pequenos. No entanto, é provável que isso mude com o crescente ressurgimento do apoio à energia nuclear e, por exemplo, a proposta da EU de incluir o nuclear como contribuinte para a mitigação das mudanças climáticas. O relatório da IEA*, “Global Hydrogen Review 2021”, reporta cerca de uma dúzia de projetos de demonstração com uma capacidade combinada do eletrolisador de 250 MW, que exploram o uso de energia nuclear para produção de hidrogénio no Canadá, China, Rússia, Reino Unido e EUA. A França sinalizou que a produção de hidrogénio rosa pode ter um papel importante no futuro mix de energia do país, enquanto o roteiro de hidrogénio do Conselho da Indústria Nuclear do governo do Reino Unido prevê que a energia nuclear produza um terço das necessidades de hidrogénio limpo do país até 2050.

O hidrogénio cor-de-rosa (e o vermelho) ambos de origem nuclear são as forma de produção de hidrogénio com menor intensidade de carbono **,***.

* https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021
** https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921012684
*** https://www.mdpi.com/2077-1312/10/9/1222



O hidrogénio cor-de-rosa (e o vermelho) ambos de origem nuclear são as forma de produção de hidrogénio com menor intensidade de carbono. As barras não são totalmente proporcionais (Créditos: gráfico adaptado para português de https://energynow.com/2022/12/carbon-intensities-of-hydrogen-various-colors-ranked-energyminute/)

competir com a necessidade de manter a renovação da biomassa, por exemplo, nas florestas. Também existe investigação considerável em métodos emergentes que poderão apresentar soluções viáveis, incluindo pirólise, fotólise, e processos a alta temperatura em centrais nucleares.

Armazenamento e distribuição

O armazenamento e distribuição de hidrogénio é em alguns aspectos similares ao gás natural embora apresente desafios únicos e requeira materiais e processos especiais. Do ponto de vista da produção pode ser mantido armazenado em tanques de dimensão reduzida à superfície ou em cavernas ou formações geológicas de grande dimensão debaixo do solo e transportado através de um gasoduto, liquefeito para transporte ou convertido em gás mais denso transporte ou convertido em gás mais denso como por exemplo amónia. Cada um destes métodos tem implicações na forma como o custo inicial de produção se reflecte no custo final de consumo. Hoje o hidrogénio pode ser misturado com gás natural entre 5 a 10% e transportado nos gasodutos mas acima desta concentração o gasoduto, compressores e material de monitorização devem ser substituídos para prevenir fugas devido à fragilização dos materiais.

E o uso de Hidrogénio para sintetizar combustíveis?

Teoricamente o Hidrogénio pode ser usado para sintetizar substitutos para os combustíveis fósseis a partir de metano, incluindo gasolina, diesel e combustível para aviões. No entanto o processo para produzir Hidrogénio a partir de electricidade transformando-o em combustível a partir do carbono existente na atmosfera é extremamente ineficiente e muito menos eficiente que usar directamente as energias renováveis para alimentar os veículos. Por exemplo seria necessário quatro vezes mais energia para gerar combustível a partir de Hidrogénio do que alimentar um carro com energias renováveis e o resultado final ainda seria combustível poluente. Esta opção não só é ineficiente como deverá apenas ser considerada como último recurso e não usada como desculpa para manutenção da dependência dos combustíveis fósseis.

Será que a combustão do Hidrogénio é limpa?

Quando o Hidrogénio é queimado (por oposição ao uso numa célula de combustível) pode emitir quantidades significativas de NOx, comparável ou mesmo superior à quantidade produzida na combustão de gás natural. A menos que exista investigação dedicada à mitigação do NOx e à melhoria dos processos de combustão, a combustão do Hidrogénio não poderá ser considerada limpa.

O papel do Hidrogénio no caminho para a descarbonização

O caminho para a descarbonização através do hidrogénio não é simples e só deve ser perseguido se não existirem alternativas melhores e se os impactos na saúde e ambiente puderem ser mitigados. Deve evitar-se a todo o custo que a visão do Hidrogénio verde acabe num compromisso com Hidrogénio cinzento ou azul. O Hidrogénio ainda assim poderá ter um papel importante na descarbonização, não necessariamente na produção de electricidade mas alargando energia limpa a outras aplicações que não possam ser facilmente electrificadas como é o caso da mobilidade aérea e marítima.

Desvantagens

O Hidrogénio tem desvantagens que tornam sua adopção longe ser algo simples. O Hidrogénio é difícil de transportar, difícil de armazenar em grandes quantidades, representa um risco de explosão e tem um potencial de contribuir para o aquecimento global indirectamente se for permitido escapar para a atmosfera. Relatórios recentes* do overno do Reino Unido mostram como as fugas hidrogénio podem produzir indiretamente efeitos de aquecimento 11 vezes piores que os do CO_2. Quando libertado diretamente na atmosfera, o hidrogénio pode interagir com outros gases e vapores no ar para produzir poderosos efeitos de aquecimento. O estudo do governo do Reino Unido colocou essas interações sob o microscópio e determinou que o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do hidrogénio é cerca de duas vezes pior do que se pensava anteriormente; num período de 100 anos, uma tonelada de hidrogénio na atmosfera aquecerá a Terra cerca de 11 vezes mais do que uma tonelada de CO_2, com uma incerteza de ± 5. Ainda assim o hidrogénio é uma opção com potencial para reduzir as emissões de CO2 porque o aumento nas emissões de CO_2 equivalente com base numa taxa de fuga de H_2 de 1 a 10%, compensa aproximadamente 0,4 e 4 por cento das reduções totais de emissões de CO_2 equivalente, respectivamente ou seja, mesmo assumindo o pior cenário de fuga ainda é uma melhoria enorme. No entanto, este estudo demonstra claramente a importância de controlar as fugas de H_2 dentro de uma economia de hidrogénio.

* https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf

Quando?

Realisticamente ainda estamos a pelo menos uma década do Hidrogénio começar a dar uma contribuição significativa pra a descarbonização. A capacidade instalada actual (em 2022) é da ordem do 97 MW com um investimento de 365 milhões de Euros, embora haja vários projectos previstos que podem aumentar rapidamente a capacidade. A economia da produção dependerá do preço dos recursos necessários para produzir hidrogénio, como gás natural, carvão ou eletricidade de energia renovável e nuclear.

Nas últimas semanas (Outubro 2023), as expectativas do mercado do hidrogénio parecem ter sido deflacionadas. É possível que a diminuição das expectativas tenha a ver com o relatório publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA) denominado "The Global Hydrogen Review 2023"*. Esta publicação acompanha a produção e a procura de hidrogénio a nível mundial, bem como o progresso em áreas críticas como o desenvolvimento de infra-estruturas, comércio, políticas, regulamentação, investimentos e inovação. De acordo com esta publicação da IEA, existe um interesse significativo no hidrogénio, com mais de 40 países a adoptarem estratégias nacionais para o hidrogénio. O relatório também destaca que, apesar do interesse de um maior número de países, a implementação ainda é baixa. Embora o número de projetos anunciados para a produção de hidrogénio renovável possa atingir 38 Mt em 2030, a produção atual é inferior a 1% e apenas 4% dos projectos de produção com baixo teor de carbono anunciados chegaram à decisão final de investimento ou à fase de construção, ou seja, 2 Mt.

A procura de hidrogénio atingiu 95 milhões de toneladas em 2022, com um crescimento anual de 3 %, mas continua concentrada nas aplicações tradicionais. A procura está na indústria e na refinação, com menos de 0,1% proveniente de novas aplicações em transportes ou geração de energia. O hidrogénio com baixas emissões está a ser adotado lentamente, representando apenas 0,7% da procura total de hidrogénio.

* https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf

Sequestração de carbono

O crescimento das emissões de dióxido de carbono, apontado como principal contribuinte para o aquecimento global, é um problema que talvez possa ser enterrado no subsolo ou no fundo do oceano.

O crescimento das emissões de CO_2 é um problema que não pode continuar a ser varrido para debaixo do tapete. Mas talvez possa ser enterrado no subsolo ou no fundo do oceano. A sequestração de carbono consiste em capturar o CO_2 produzido pela queima de combustíveis fósseis e armazená-lo com segurança reduzindo a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera. A ideia é estabilizar o carbono em formas sólidas e dissolvidas para que não aqueça a atmosfera. Existem três tipos principais de sequestro de carbono: biológico, geológico e tecnológico. A sequestração biológica de carbono é o armazenamento de dióxido de carbono na vegetação, como pastagens ou florestas, bem como em solos e oceanos e não será aqui abordada.

Sequestração Geológica de Carbono

A sequestração geológica de carbono é o processo de armazenamento de dióxido de carbono em formações geológicas subterrâneas, ou rochas. Normalmente, o dióxido de carbono é capturado de uma fonte industrial, como produção de aço ou cimento, ou de uma fonte relacionada com a produção de energia, como uma central de energia ou instalação de processamento de gás natural e injetado em rochas porosas para armazenamento a longo prazo. O CO_2 geralmente é pressurizado até se tornar líquido, e então é injetado em formações rochosas porosas em bacias geológicas. Esse método de armazenamento de carbono também às vezes faz parte da recuperação de petróleo, também conhecida como recuperação terciária, porque normalmente é usado mais tarde na vida de um poço de petróleo. Na recuperação do petróleo, o CO_2 líquido é injetado na formação de petróleo para reduzir a viscosidade do petróleo e permitir que ele flua mais facilmente para o poço. A captura e o armazenamento de carbono podem permitir o uso de combustíveis fósseis até que outra fonte de energia seja introduzida em larga escala. Várias possibilidades subterrâneas têm vindo a ser investigadas. Lugares lógicos incluem antigos campos de gás e petróleo. O armazenamento em campos de petróleo esgotados, por exemplo, oferece uma importante vantagem económica, o dióxido de carbono interage com o petróleo restante para facilitar a remoção. Alguns campos já fazem uso de dióxido de carbono para melhorar a recuperação do petróleo de difícil extracção. A injecção de dióxido de carbono desaloja o petróleo preso nos poros da rocha subterrânea, e a presença de dióxido de carbono reduz o atrito que impede o fluxo de óleo através da rocha para os poços. Os campos de petróleo e gás esgotados, no entanto, não têm capacidade para armazenar as quantidades de dióxido de carbono que eventualmente precisarão ser sequestradas. Segundo algumas estimativas, o mundo precisará de reservatórios capazes de conter


SaskPower
Boundary Dam

um trilião de toneladas de dióxido de carbono até o final do século. Essa quantidade possivelmente poderia ser acomodada por formações rochosas sedimentares com poros contendo água salgada (salmoura). As melhores formações sedimentares de salmoura seriam aquelas com mais de 800 metros de profundidade, muito abaixo das fontes de água potável e a uma profundidade à qual a alta pressão manterá o dióxido de carbono num estado de alta densidade. Rochas sedimentares que contêm salmoura estão disponíveis em abundância, mas existe a preocupação se elas serão suficientemente seguras para armazenar dióxido de carbono por séculos ou milénios. Falhas ou fissuras na rocha sobrejacente Podem permitir que o dióxido de carbono escape lentamente, por isso será um desafio de engenharia escolher, projectar e monitorizar cuidadosamente esses locais de armazenamento. Preocupações com fugas sugerem que a melhor estratégia pode ser literalmente reduzir o dióxido de carbono, injetando-o em sedimentos sob o fundo do oceano. A alta pressão de cima manteria o dióxido de carbono nos sedimentos e fora do próprio oceano. Pode custar mais para implementar do que outros métodos, mas estaria livre de preocupações com fugas. E no caso de alguns locais costeiros de produção de dióxido de carbono, o sequestro oceânico pode ser uma estratégia mais atraente do que transportá-lo para bacias sedimentares distantes. Também é possível que se consigam desenvolver novas técnicas de sequestro de dióxido de carbono baseadas em processos naturais. Por exemplo, quando as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono aumentaram em tempos geológicos para um certo limiar desconhecido, este foi para o oceano e combinou-se com iões de cálcio carregados positivamente para formar carbonato de cálcio, calcário. Da mesma forma, é possível conceber formas de bombear dióxido de carbono para o oceano de forma a prendê-lo eternamente na rocha.

Sequestro Tecnológico de Carbono

Têm vindo a ser exploradas novas maneiras de remover e armazenar carbono da atmosfera usando tecnologias inovadoras, procurando também usá-lo como recurso.

Produção de grafeno: O uso de dióxido de carbono como matéria-prima para a produção de grafeno, pode vir a ser uma opção. A produção de grafeno é limitada a indústrias específicas, mas é um exemplo de como o dióxido de carbono pode ser usado como recurso e solução para reduzir as emissões da atmosfera.

Captura de ar directa (DAC): Um meio para capturar carbono diretamente do ar usando plantas de tecnologia avançada. No entanto, este processo consome muita energia e é

caro, variando de 500€ a 800€ por tonelada de carbono removida. Embora as técnicas como a captura direta de ar possam ser eficazes, são ainda muito caras para serem implementadas em grande escala. Já existem métodos para algumas das partes essenciais do processo de sequestração. Um sistema químico de captura de dióxido de carbono já é utilizado em algumas instalações para fins comerciais, como carbonatação de bebidas e fabricação de gelo seco. A mesma abordagem poderia ser adaptada para centrais elétricas a carvão, onde as chaminés poderiam ser substituídas por torres de absorção. Uma torre conteria produtos químicos que isolam o dióxido de carbono dos outros gases (azoto e vapor de água) que escapam para o ar e o absorvem. Uma segunda torre separaria o dióxido de carbono dos produtos químicos absorventes, permitindo que fossem devolvidos à primeira torre para reutilização. Uma variação desta abordagem alteraria o processo de combustão no início, queimando carvão em oxigénio puro em vez de ar comum. Isto tornaria muito mais fácil separar o CO_2 do escape, pois seria misturado apenas com vapor de água, e não com azoto. É relativamente simples condensar o vapor de água, deixando o gás de dióxido de carbono puro que pode ser canalizado para armazenamento. Neste caso, porém, surge um problema de separação diferente, a necessidade inicial de oxigénio puro, que é criado pela separação do azoto e outros gases residuais no ar. Se esse processo puder ser económico, seria viável modernizar as centrais existentes com um sistema de combustão de oxigénio puro, simplificando e reduzindo o custo de captura de CO_2.

Métodos avançados de geração de energia a partir do carvão também podem oferecer oportunidades para a captura de CO_2. Nas Nas unidades de gaseificação de carvão, o carvão é queimado para produzir um gás sintético, normalmente contendo hidrogénio e monóxido de carbono. A adição de vapor, juntamente com um catalisador, ao gás sintético converte o monóxido de carbono em hidrogénio e dióxido de carbono adicionais que podem ser filtrados para fora do sistema. O hidrogénio pode ser usado numa turbina a gás para produzir energia elétrica. Duas das primeiras centrais a carvão do mundo com captura integrada de carbono estão em fase de conclusão em Saskatchewan (Canadá) e Mississippi (EUA), proporcionando um raro impulso para uma tecnologia que definhou nos últimos anos.

Moléculas projectadas em laboratório: Tem vindo a ser efectuada investigação focada no desenho de moléculas que podem mudar de forma, criando novos tipos de compostos capazes de separar e capturar o CO_2 do ar. As moléculas projetadas actuam como um filtro, atraindo apenas o elemento para o qual foram projetadas.



Uma das primeiras centrais a carvão do mundo com captura integrada de carbono está em fase de conclusão em Saskatchewan (Canadá)

Riscos

Um relatório Corporate Europe Observatory* publicado no início de Outubro de 2022 defende que grandes empresas ligadas aos combustíveis fósseis querem um sinal verde para continuar a extrair gás e petróleo mediante promessas irrealistas que, no futuro, haverá tecnologias para capturar o carbono emitido ou mesmo removê-lo da atmosfera. De acordo com o relatório, as tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono são ineficazes na remoção das emissões e estima que as 28 centrais de hoje em funcionamento apenas capturam 0,1% das emissões. Entre os riscos apontados a estas novas tecnologias é salientado que ao injectar CO_2 em galerias subterrâneas, poderá haver risco de fugas, contaminação de águas e tremores de terra.

Existem atualmente cerca de 8000 km de gasodutos de CO_2 , principalmente na América do Norte, e 7 operações geológicas de armazenamento de CO_2 com capacidade combinada de 10Mt/ano. Com base em projetos actualmente em estágios iniciais e avançados de desenvolvimento, a capacidade dedicada de armazenamento de CO_2 pode atingir cerca de 110Mt CO_2/ano até 2030, o que é muito inferior aos quase 1200Mt CO_2/ano que são capturados e armazenados até 2030 previstos.

Em Setembro de 2022 a IEA expressou preocupação** por o desenvolvimento do armazenamento de CO_2 não estar a acompanhar os planos de captura de CO_2. é importante também salientar o relatório mais recente*** do painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) das Nações Unidas afirma que os métodos de remoção de CO2 não podem substituir reduções substanciais das emissões.

* https://www.corporateeurope.org/sites/default/files/2022-09/Deadly%20climate%20gamble%20layout_3.pdf
** https://www.iea.org/reports/co2-transport-and-storage
*** https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

A importância dos minerais críticos na transição energética

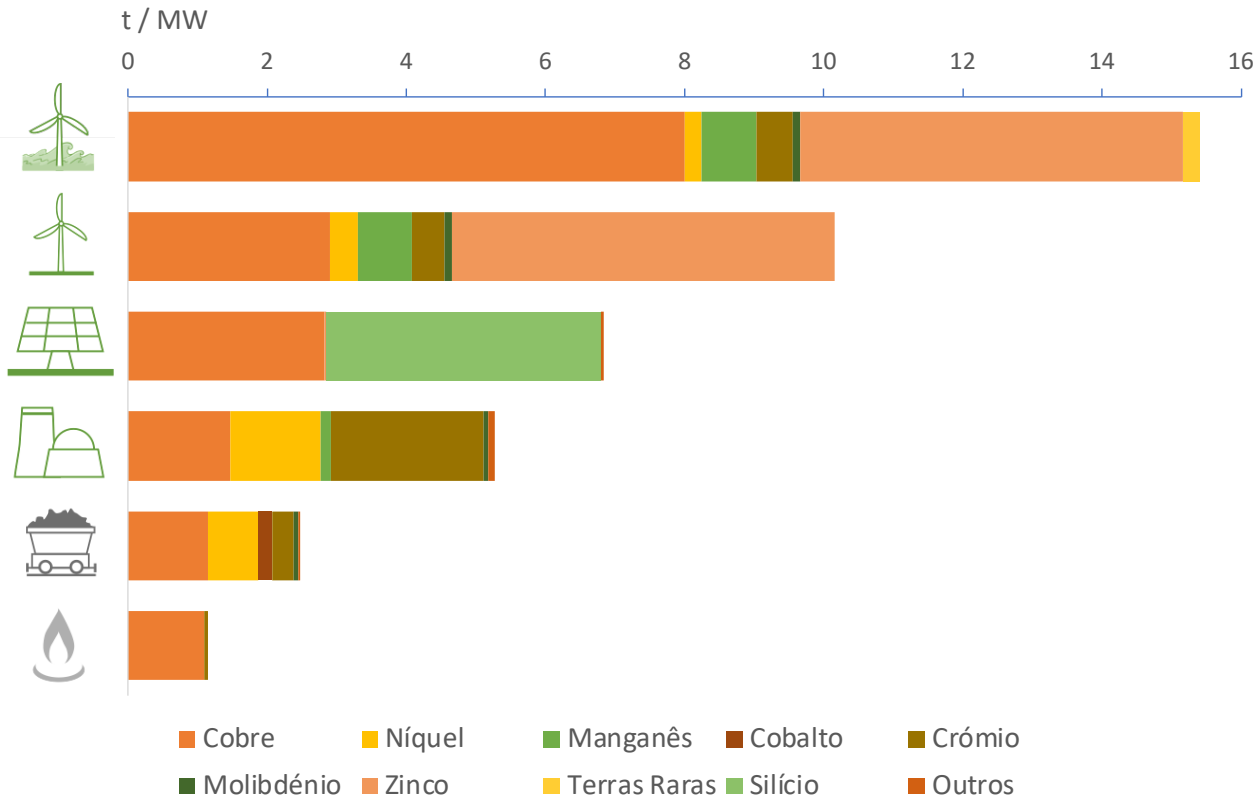
A mudança para um sistema de energia limpa irá gerar um enorme aumento nas necessidades de minerais críticos.

Num mundo descarbonizado, alguns elementos químicos serão tão importantes como o petróleo ou o gás eram num mundo dominado pelos combustíveis fósseis. Um sistema de energia alimentado por tecnologias de energia limpa difere profundamente de um alimentado por recursos tradicionais de hidrocarbonetos. As centrais solares fotovoltaicas (PV) e parques eólicos geralmente exigem mais minerais para construir do que as suas contrapartes baseadas em combustíveis fósseis. Um parque eólico requer nove vezes mais recursos minerais do que uma central a gás. Desde 2010, a quantidade média de minerais necessários para uma nova unidade de capacidade de geração de energia aumentou em 50%, à medida que a participação de energias renováveis em novos investimentos aumentou. De acordo com a IEA, para que o mundo atinja a meta de emissões líquidas zero de carbono até 2050, a procura por minerais críticos, incluindo Lítio, Cobre, Cobalto, Níquel e os elementos de terras raras, todos deles ingredientes vitais da tecnologia de energia limpa, aumentará seis vezes. Outra estimativa recente (2021) do Instituto Nacional de Estudos Ambientais do Japão prevê que a electrificação do transporte e a expansão da geração de energia renovável aumentarão a procura por minerais cerca de sete vezes até 2050. Os tipos de recursos minerais utilizados variam de acordo com a tecnologia. Elementos de terras raras são essenciais para ímãs permanentes que são vitais para turbinas eólicas e o cobre é a pedra basilar de todas as tecnologias relacionadas com electricidade. A mudança para um sistema de energia limpa irá gerar um enorme aumento nas necessidades desses minerais, o que significa que o sector de energia será uma força importante nos mercados minerais. A rápida implantação de tecnologias de energia limpa como parte da transição energética implica um aumento significativo na procura por minerais.

De acordo com a IEA, por MW de capacidade, a energia eólica offshore requer cerca de 15,5 toneladas de minerais críticos. A energia eólica em terra é menos intensiva em minerais, exigindo cerca de 10 t/MW, seguida pela energia solar fotovoltaica (PV) a cerca de 7 t/MW. O relatório da IEA* observa que a energia nuclear, juntamente com a energia hidroelétrica e a biomassa, têm requisitos minerais críticos comparativamente baixos. Os minerais críticos necessários para a energia nuclear limitam-se em grande medida ao crómio, ao níquel e ao cobre, com vestígios de manganês e molibdénio. Nenhum destes elementos consta da lista de

* Mais detalhes:
https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/mineral-requirements-for-electricity-generation.aspx

matérias-primas críticas da Comissão Europeia. As energias renováveis, pelo contrário, dependem de alguns elementos que fazem parte dessa lista, como as terras raras ou o gálio. Fontes elevadas de carbono, como carvão e gás, exigem muito menos desses minerais críticos. Uma análise usando os valores médios de capacidade para cada tecnologia com as estimativas da IEA, averdadeira procura mineral crítica relativa para cada tecnologia por unidade de electricidade fornecida demonstra que a energia nuclear é muito menos intensiva no uso minerais que as outras tecnologias verdes. A análise da IEA exclui alguns metais comuns, como aço e alumínio, bem como o cimento, que são materiais importantes amplamente utilizados em muitas tecnologias de energia limpa. Esses minerais são menos propensos a sofrer interrupções no fornecimento devido à omnipresença da sua produção, e a sua prospecção e processamento podem gerar impactos



Minerais críticos necessários para diferentes tecnologias de geração de electricidade em t/MW (créditos: IEA, relatório "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions", 2021)



Danos da exploração mineira de terras raras em Bayan Obo, na China. A argila colectada nestas bacias de rejeitados, onde são depositadas lamas tóxicas, regista cerca de três vezes a radiação de fundo (Créditos: Google Earth)

ambientais menores. Estes materiais também podem ser menos intensivos no carbono gerado com a extracção e processamento que os minerais críticos de transição energética identificados pela IEA. No entanto, as quantidades utilizadas são muito maiores e devem ser tidos em consideração para dar uma noção completa dos requisitos materiais duma dada tecnologia.

Para chegar ao zero líquido, a Europa precisará de até 26 vezes a quantidade de metais de terras raras em 2050 em comparação com as necessidades actuais. O que também irá entrar em competição com o aumento da procura devido à digitalização. A UE, como o Reino Unido, depende de importações, enquanto a geopolítica das cadeias logísticas é cada vez mais instável. A China é o maior produtor mundial de terras raras. A Rússia é o quarto maior fornecedor. O Ocidente vê isto como uma potencial ameaça significativa à sua segurança de abastecimento. Dadas as tentativas da Rússia de armar os seus fornecimentos de gás, esta não é uma crença irracional.

A abundância de minerais críticos que tem permitido suprir as necessidades do mercado tem sido extraída apenas num pequeno número de países. A maior parte do cobalto vem da República Democrática do Congo (RDC) e a maior parte do níquel vem da Indonésia. A China domina em grafite e elementos de terras raras. Visto por este prisma, a situação não é muito diferente da dos combustíveis fósseis, para os quais alguns países tendem a dominar o fornecimento*.

As terras raras podem ser difíceis de obter devido à procura, mas não são raras. Mesmo o elemento mais raro, o túlio, é mais de 100 vezes mais comum que o ouro. A maioria dos países do mundo possui reservas significativas, embora nem sempre acessíveis. Alguns países, como EUA, Austrália e Brasil, contêm depósitos suficientemente substanciais para serem explorados. Fundamentalmente, as soluções climáticas, como energia solar, energia eólica e veículos eléctricos, dependem de elementos de terras raras, que possuem propriedades magnéticas e luminescentes únicas. O problema é que sua produção e descarte são ambientalmente destrutivos. A extracção destes minerais envolve a superação de dois desafios. Para extrair apenas pequenas quantidades dos 17 metais de terras raras, é necessário remover muitas toneladas de agregados e rochas. Sem controlos rigorosos, esta operação é altamente poluente. Segue-se a separação

* https://www.nature.com/articles/d41586-023-02330-0

dos metais e a sua preparação para múltiplas aplicações tecnológicas. Todo o processo é caro e a China pode oferecer o produto acabado por 30% menos do que qualquer outra empresa levando a uma falta de interesse do mercado em levar em conta considerações geopolíticas. Por outro lado a urgência de quebrar o domínio Chinês na produção das terras raras corre-se o risco de pôr em causa a sustentabilidade, igualdade e segurança. A China, a Europa, os Estados Unidos e outros países estão todos a investir milhares de milhões de dólares para adquirir acesso a minerais críticos em África e na América do Sul. Este domínio resulta em potencial exploração destes países que têm vindo a recusar-se a serem usados apenas para fornecer matérias-primas para as baterias e segurança energética doutras pessoas, insistindo que o processamento dos minerais em produtos de maior valor aconteça também dentro das suas fronteiras. A Indonésia, por exemplo, proibiu a exportação de minério de níquel.

A transição para a neutralidade climática não pode significar a substituição da dependência de combustíveis fósseis sujos pela dependência de matérias-primas, cuja extração deixa grandes extensões da Terra inabitáveis. A exploração destes minerais críticos tem um enorme impacto ambiental, gerando grandes volumes de material tóxico e radioativo e incluindo emissões significativas de gases de efeito estufa decorrentes de atividades de prospecção e processamento com uso intensivo de energia. Embora estas emissões não anulem as vantagens climáticas das tecnologias de energia limpa, os minerais de transição energética envolvem maiores intensidades de emissão de gases de efeito de estufa em comparação com outros minerais, em particular a exploração mineira e o processamento de óxido de neodímio, sulfato de cobalto, alumínio, níquel e carbonato de lítio. A exploração destes minerais contribui também para perda de biodiversidade e perturbação social devido a mudanças no uso da terra, esgotamento e poluição da água, contaminação relacionada a resíduos e poluição do ar. A exploração mineira é um processo destrutivo que perturba o meio ambiente e dispersa amplamente os resíduos. Os métodos de extracção produzem montanhas de resíduos tóxicos com elevado risco ambiental e perigosidade para a saúde. Por cada tonelada de terras raras produzida, o processo de mineração gera 13 kg de poeiras, 9600-12000 metros cúbicos de gases residuais, 75 metros cúbicos de águas residuais e uma tonelada de resíduos radioativos*. Os minérios de

* https://hir.harvard.edu/not-so-green-technology-the-complicated-legacy-of-rare-earth-mining/

terras raras contêm metais que, quando misturados com os produtos químicos das lagoas de lixiviação, contaminam o ar, a água e o solo. Os minérios de terras raras frequentemente também contêm tório e urânio radioativos. No geral, para cada tonelada de terras raras, são produzidas 2000 toneladas de resíduos tóxicos. Os compostos químicos usados nos processos de extracção podem entrar no ar, nas águas superficiais e subterrâneas perto das minas. A moagem e britagem de minério contendo elementos críticos geralmente libertam poeiras, que podem ter efeitos cancerígenos e respiratórios negativos nos trabalhadores expostos e moradores próximos. Um exemplo concreto são as terras raras usadas no fabrico dos ímanes das turbinas eólicas, principalmente para turbinas offshore, devido à sua confiabilidade e capacidade de lidar com velocidades de vento mais elevadas. O processamento de minérios de terras raras gera materiais tóxicos e radioactivos. Para cada tonelada de elementos de terras raras produzidos, há 2000 toneladas de rejeitados das minas, incluindo 1 a 1.4 toneladas de resíduos radioativos. Alguns depósitos de terras raras contêm Tório e Urânio, que apresentam riscos acrescidos de radiação. Embora o Tório e o Urânio possam ser usados para gerar energia nuclear, neste caso raramente são comercialmente recuperáveis e, portanto, são deixados nos detritos, onde podem representar riscos para o meio ambiente e para a saúde humana. O caso do Neodímio e Cério, providencia um bom exemplo. Embora sejam chamados de minerais de terras raras, na verdade são bastante comuns. O Neodímio não é mais raro que o Cobre ou o Níquel e está distribuído de maneira bastante uniforme pela crosta terrestre a nível mundial. A China produz 90% do Neodímio do mercado global, mas apenas possui 30% dos depósitos mundiais. Indiscutivelmente, o que torna o Neodímio e Cério escassos o suficiente para serem lucrativos é o processo extremamente perigoso e tóxico necessário para extraí-los do minério e refiná-los em produtos utilizáveis. Por exemplo, o Cério é extraído esmagando misturas minerais e dissolvendo-as em ácido sulfúrico e nítrico, o que tem de ser feito em grande escala industrial, resultando numa grande quantidade de resíduos venenosos como subproduto. O domínio da China no mercado de terras raras vem acompanhado. por um enorme impacto ambiental que outras nações têm evitado.

Guillaume Pitron escreveu no seu livro, “The Rare Metals War”*, que nas próximas três décadas “precisaremos extrair mais minérios do que os humanos extraíram nos últimos 70000 anos”. Esta exploração intensiva não pode acabar a sacrificar a Terra. A China estabeleceu seu domínio sobre a indústria de terras raras por causa de regulamentações ambientais frouxas e uma força de trabalho barata. Pagou um alto preço. Hoje, 10% de

* Guillaume Pitron, The rare metals war, Scirbe Publications, 2020



Vista aérea da mina de columbite-tantalite, industrialmente conhecido como tantalite, de Luwowo em Rubaya, Rna epública Democrática do Congo. A tantalite é o minério de onde são extraídos o nióbio e o Tãntalo. A mina produz cerca de 1000 toneladas de tantalite por ano, cerca de metade da produção total da República Democrática do Congo (Créditos: MONUSCO / Wikimedia Commons)

suas terras cultiváveis estão contaminadas por metais pesados e 80% de suas águas subterrâneas não são próprias para consumo. O avanço tecnológico em escala global não deve replicar tal destruição ecológica.

Uma outra grande preocupação centra-se na quantidade de metal necessária para fazer a próxima geração de unidades de tecnologia renovável para substituir os combustíveis fósseis que é muito maior do que se pensava inicialmente. A actual produção de mineração destes metais está muito longe de corresponder à procura. As actuais reservas minerais relatadas também não são suficientes em tamanho. O mais preocupante é o cobre, como um dos déficits sinalizados, pois é importante para os geradores eólicos e painéis solares mas também porque é usado em motores elétricos, turbinas, linhas de transmissão e outros componentes. As reservas de cobre cobrem apenas 20% das necessidades e será difícil o incremento da exploração nos volumes necessários*. As reservas actuais de cobre são de 880 milhões de toneladas quando são necessárias 4,5 bilhões de toneladas de cobre para fabricar uma geração de necessárias 4,5 bilhões de toneladas de cobre para fabricar uma geração de necessárias 4,5 bilhões de toneladas de cobre para fabricar uma geração de tecnologias renováveis. Além disso, cada tecnologia renovável tem um ciclo de vida de até 25 anos após o qual são desmantelados e substituídos, não se antevendo também que a reciclagem possa mitigar esta lacuna. Um relatório publicado pela Comissão Europeia chega a conclusões similares**.

Fazer face à emergência climática não é apenas uma questão de abandonar os combustíveis fósseis. Requer a construção dum sistema inteiramente novo de produção e consumo de energia, que por si só contém enormes riscos para o meio ambiente se não for feito corretamente. Mas o maior risco é que os mesmos recursos que oferecem uma fraca promessa para nossa sobrevivência transformem o mundo mais uma vez num caldeirão de conflitos geopolíticos.

É também necessário estabelecer uma "economia circular" nos elementos de terras raras, com ênfase na reutilização e reciclagem de materiais, em vez de alimentar uma procura cada vez maior por matérias-primas***. Não tem lógica alguma salvar o planeta de tecnologias ambientalmente poluentes ao utilizar métodos para garantir minerais críticos que, por si só, causam danos ao meio ambiente.

** Simon P. Michaux,: *What Would It Take To Replace The Existing Fossil Fuel System?*, https://www.youtube.com/watch?v=MBVmnKuBocc&t=2036s

** Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU, A foresight study, https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8e167f11-077c-11eb-a511-01aa75ed71a1/language-en

*** https://www.nature.com/articles/d41586-023-02153-z

A contribuição da fissão nuclear

A energia nuclear ajudou a retardar o aumento nas emissões de dióxido de carbono ao longo do último meio século, particularmente nas economias avançadas.

A fissão nuclear já tem uma contribuição, não desprezável, para a produção elétrica mundial da ordem dos 10% do total de electricidade produzida. E apesar dos acidentes de Chernobyl e Fukushima, ambos ainda bastante presentes, não houve um abrandamento significativo. Apesar de alguns países como a Alemanha terem abandonado a opção nuclear, em França 75% da electricidade provém da energia nuclear.

A França é a campeã da produção de energia nuclear na Europa. As emissões de CO2 da França são entre 5 a 10 vezes inferiores aos maiores emissores Europeus: Polónia e Alemanha.

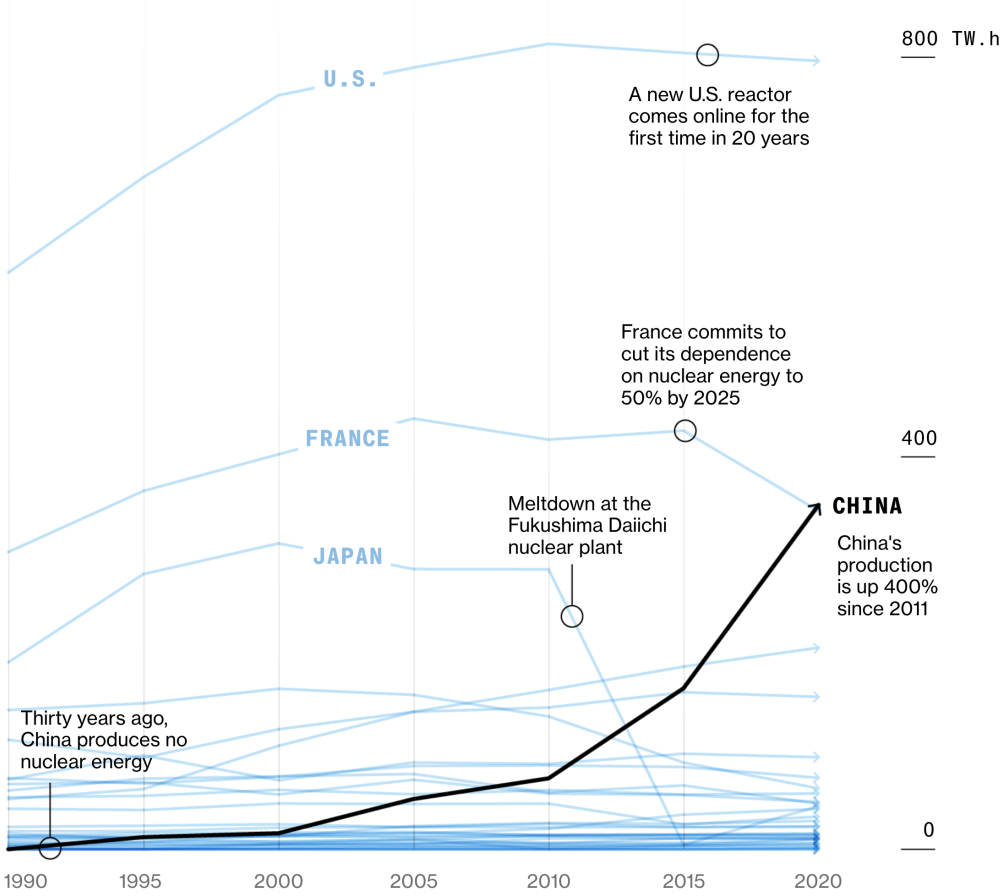
Após a crise petrolífera de 1973, a França põe em ação o plano Messmer. A França, pobre em recursos naturais no que toca a combustíveis fósseis, leva adiante um plano ambicioso para cortar a sua dependência de crude estrangeiro. O plano, chamado assim devido ao Primeiro Ministro da época que o implementou, Pierre Messmer, viu a França construir 56 reactores em 15 anos, com um tempo médio de construção por reactor de aproximadamente 8 anos. Quem diz que o nuclear é caro de certeza que desconhece que o plano Messmer conseguiu descarbonizar quase totalmente a França em apenas 10 anos. Hoje o contribuinte Francês paga dois terços por kWh em relação ao seu vizinho Alemão, emitindo consideravelmente menos CO_2.

A China aumentou 400% a produção de energia nuclear desde 2011 estando prevista a construção de 150 novos reactores até 2035.

Atualmente, a China copia o plano Messmer da França e aumentou 400% a produção de energia nuclear desde 2011 estando prevista a construção de 150 novos reactores até 2035, num investimento de 440 Biliões de dólares de acordo com a International Atomic Energy Agency (IAEA).

A standardização das centrais permite reduzir os custos. Com a construção duma frota de centrais, o custo das centrais construídas adicionalmente esbate-se rapidamente. A produção em massa de centrais tem retornos consideráveis. A limitação na China actualmente é na formação de pessoal capaz de operar centrais e na obtenção de combustível em quantidade suficiente. A Rússia, um dos grandes produtores de combustível nuclear a nível mundial, revelou planos para uma nova frota que pretende construir até 2045. Os detractores do nuclear frequentemente criticam a fissão nuclear com sendo cara e impraticável. No entanto,

EDF exporta electricidade para toda a Europa, incluindo Portugal e Alemanha, e mantém-se lucrativa tao longo dos anos. Devido aos seus longos tempos de vida, as centrais nucleares francesas construídas nos anos 70 tiveram, até à data, um retorno considerável, especialmente nesta era de exportação de electricidade para países vizinhos. Mesmo sendo uma fonte de emprego bem-recebida pelas populações locais, há uma pressão considerável para que a EDF reduza a sua dependência do produção de electricidade a partir de energia nuclear, o que irá acontecer. Em parte devido a alterações climáticas uma vez que os reactores necessitam de água para o seu arrefecimento e esta começa a escassear nas suas redondezas, mas principalmente por pressão de grupos ambientalistas, devido a receios com a idade das centrais.



Na China a potência instalada de fissão nuclear tem vindo a aumentar desde 1990 tendo tido uma aceleração nos últimos 10 anos (Fonte: IAEA)

O novo rótulo verde do nuclear na Europa

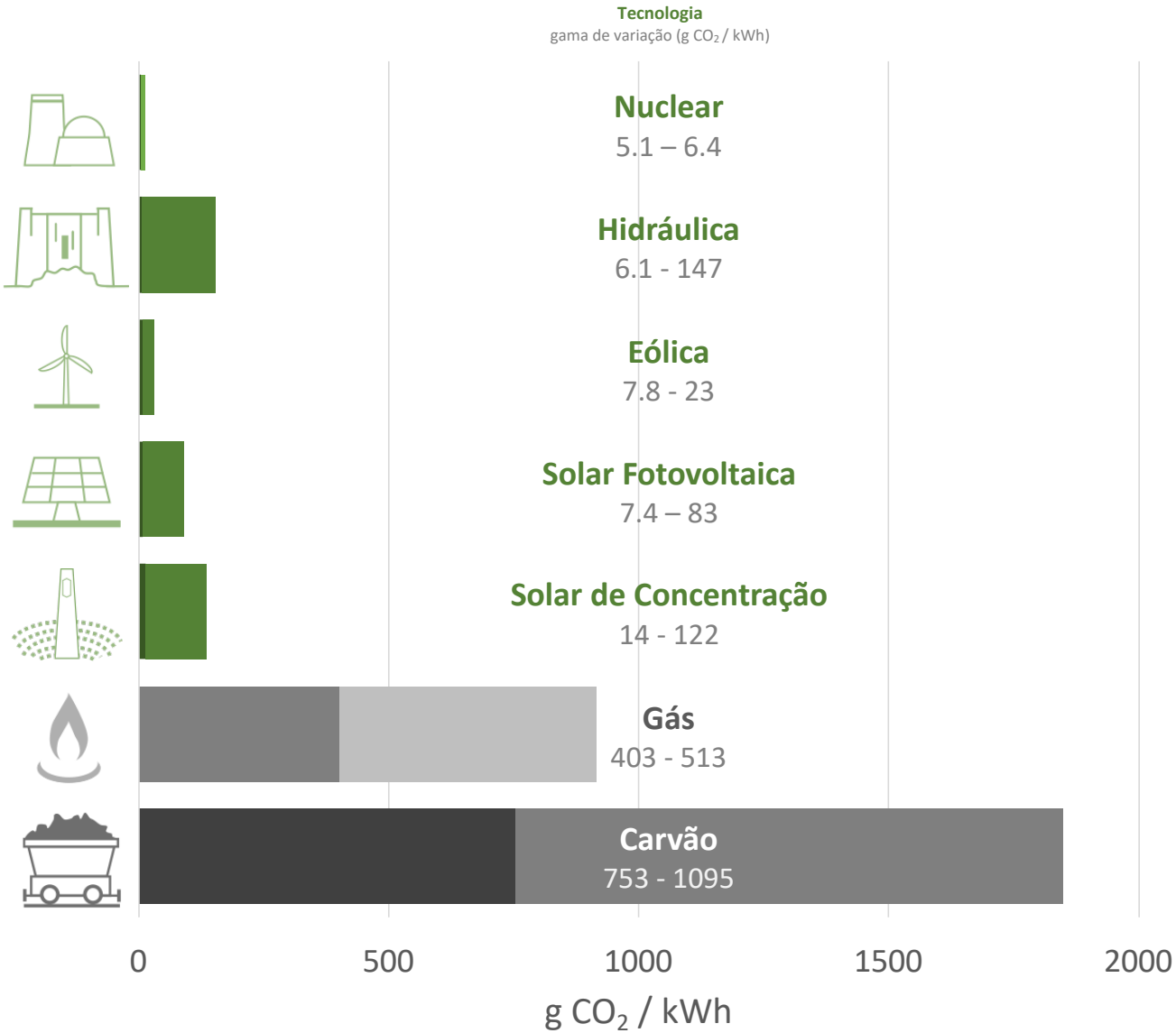
No último dia de 2021, a Comissão Europeia revelou um projeto de atribuição de rótulo verde às centrais nucleares e a gás, com o objetivo de facilitar o financiamento de infraestruturas que contribuam para combater a emissão de gases com efeitos de estufa. Bruxelas pretende também estender esta rotulagem às centrais elétricas fornecidas a gás natural. Também o Presidente francês, Emanuel Macron, apresentou em Fevereiro de 2022 planos para a construção de novas centrais nucleares no âmbito da meta para a neutralidade carbónica até 2050, sublinhando a necessidade de acelerar a produção de energia eólica e solar a curto prazo, bem como intensificar os esforços para a redução do consumo de energia. Esta aposta está bem assente em dados científicos. Em 2021 a *United Nations Economic Commission for Europe* (UNECE) publicou um relatório intitulado "*Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options*",* no qual se conclui que a energia nuclear produz menos emissões de CO_2, no seu ciclo completo de vida, que qualquer outra fonte de produção de electricidade. O mesmo relatório também indica que a energia nuclear é, entre a tecnologias limpas, a que faz menos uso de terreno no seu ciclo de vida e a que requer uma menor quantidade de minerais e materiais metálicos. Estes resultados são similares a estudos efectuados pela EDF Energy para a Central Hinkley Point C (HPC). Em construção no Reino Unido, no qual se concluiu que o o ciclo completo de vida da HPC produzirá cerca de 5,49 g CO_2/kWh gerado.

* https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf

Tanto a energia nuclear como as renováveis não emitem gases de efeito de estufa no seu processo de produção de electricidade, mas cada uma das formas de produzir electricidade tem uma pegada carbónica distinta ao longo das várias etapas do seu ciclo de vida completo: fabricação do combustível, construção das instalações, prazo de operação e desmantelamento final no seu fim de vida operacional.

A energia nuclear é a que tem uma menor gama de emissões, expressas em g CO2 / kWh produzido, entre as várias formas de produção de energia.

A energia nuclear ajudou a retardar o aumento nas emissões de dióxido de carbono ao longo do último meio século, particularmente nas economias avançadas. Globalmente, a produção de energia nuclear evitou 63 Gigatoneladas de dióxido de



Emissão de CO_2 durante o ciclo de vida para diferente tecnologias energéticas. A duas tonalidades representam, gama de variação valores mínimos e máximos estimados, para cada uma das tecnologias energéticas. A energia nuclear é a que tem uma menor gama de emissões, expressas em g CO2 / kWh produzido, entre as várias formas de produção de energia. (fonte: "Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options", United Nations Economic Commission for Europe - UNECE)

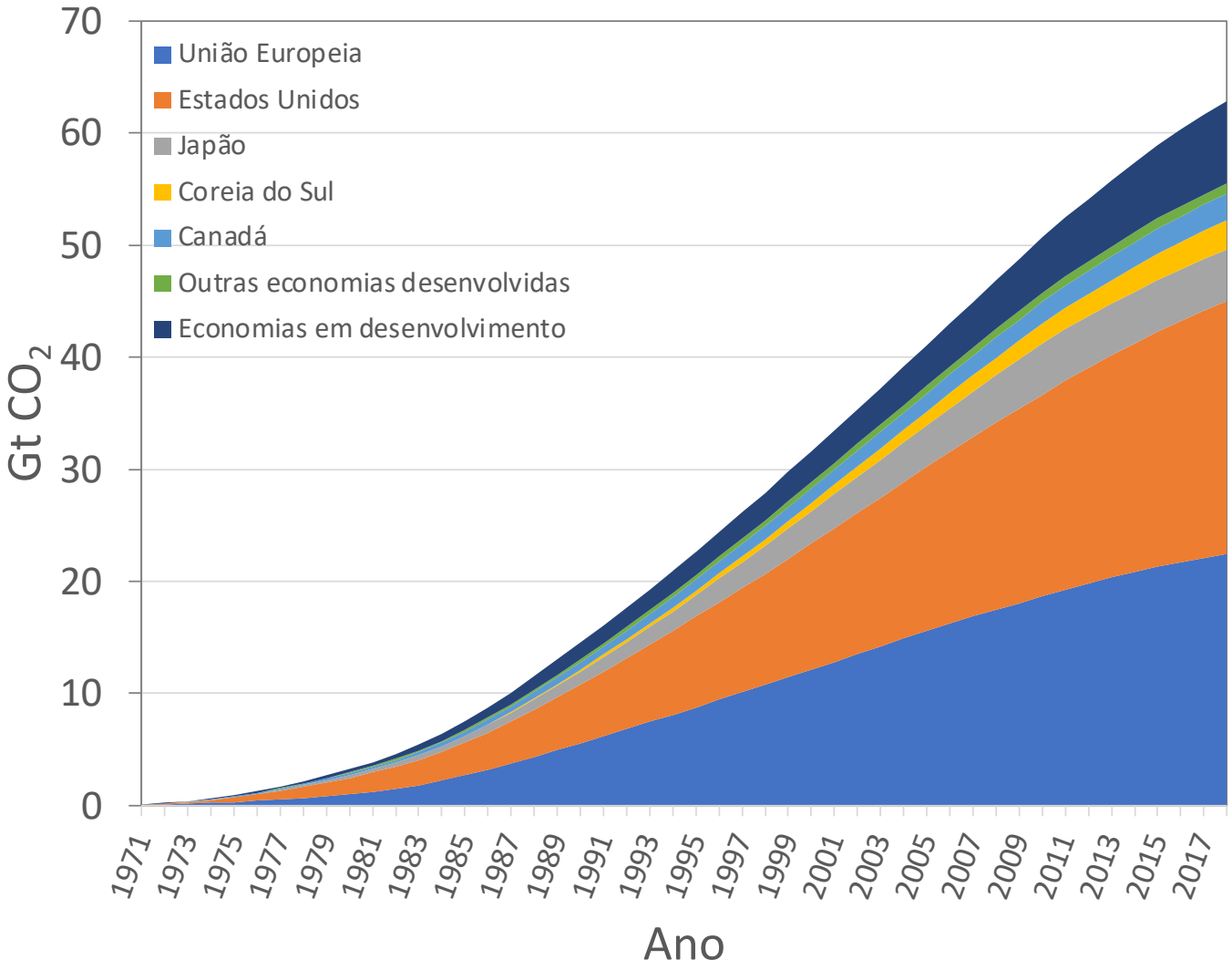
carbono (Gt CO_2) de 1971 a 2018 de acordo com o relatório da IEA “Nuclear Power in a Clean Energy System”. Sem a energia nuclear, as emissões resultantes da geração de electricidade teriam sido quase 20% maiores, e as emissões totais relacionadas à energia, 6% maiores, durante esse período. Quase 90% das emissões evitadas ocorreram em economias avançadas. A União Europeia e os Estados Unidos evitaram cada um cerca de 22 Gt CO_2, o equivalente a mais de 40% do total de emissões do sector de energia na União Europeia e um quarto nos Estados Unidos.

A produção de energia nuclear evitou 63 Gigatoneladas de dióxido de carbono (Gt CO2) de 1971 a 2018

Ainda que seja uma decisão controversa, o investimento em novas tecnologias de fissão nuclear e em centrais mais avançadas e seguras poderá certamente ser um contributo importante para a metas de descarbonização e permitir-nos comprar algum tempo até termos uma forma segura e limpa de produzir electricidade de base, para o qual a fusão nuclear é uma das candidatas. Para tal é necessário conseguir vencer a opinião pública e convencer os decisores políticos que as novas soluções são seguras. Chernobyl, na Ucrânia, e Fukushima, no Japão, são marcos incontornáveis da história da humanidade. Como tal seria fácil assumir que a Ucrânia e o Japão, palcos dos maiores acidentes nucleares de sempre, fossem países onde o nuclear não existisse. No entanto, são ambos países que continuam a apresentar um forte investimento na energia nuclear. Várias centrais nucleares Nipónicas viram a sua licença de operação estendida, por 20 anos em alguns casos, em linha com os oito anos adicionais de Almaraz. Às antigas centrais que voltaram a estar ligadas à rede e às que agora operam, o Japão planeia estender a sua frota nuclear com um plano ambicioso onde inclui várias centrais de última geração. Contudo, nenhuma central com o princípio de funcionamento de Fukushima opera hoje em solo Japonês. Todas as atuais centrais são novas, mais robustas, e com protocolos de segurança mais evoluídos.

A energia nuclear tem custos competitivos?

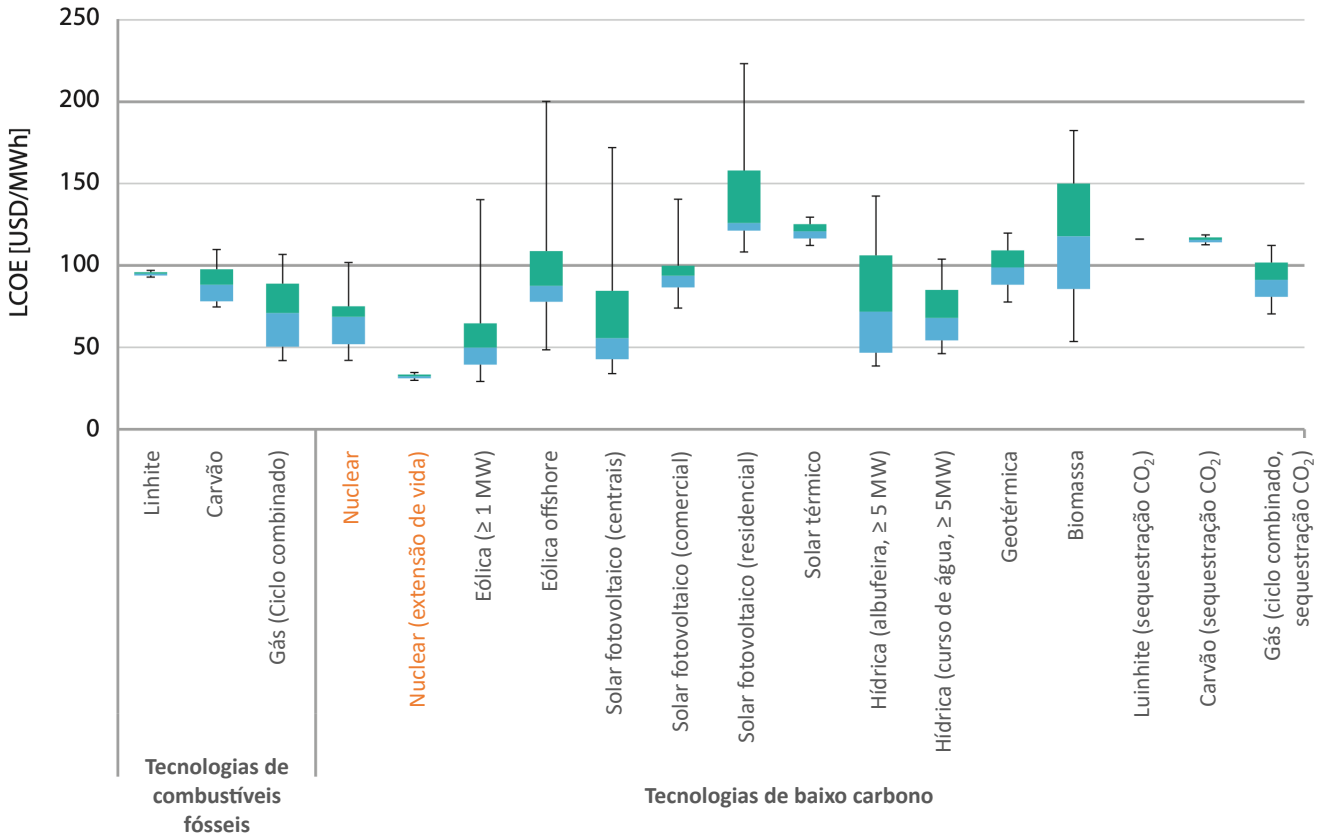
A avaliação dos custos relativos à construção de diferentes soluções para produção de energia eléctrica, utilizando diferentes tecnologias, é uma questão complexa e os resultados dependem crucialmente da localização. A métrica económica básica para qualquer central de geração eléctrica é o custo nivelado da electricidade (*Levelized Costs of Electricity,* LCOE), que representa o custo total para construir e operar uma



Emissões cumulativas de CO_2 evitadas pela energia nuclear global no período 1971-2018 (Créditos: IEA, "Nuclear Power in a Clean Energy System")

central de energia ao longo da sua vida dividido pela produção total de electricidade 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. De acordo com o relatório de 2020 da Agência Internacional de Energia*, (“*Projected Costs of Generating Electricity*”), a energia nuclear continua a ser a tecnologia de baixo carbono com os menores custos expectáveis em 2025. Numa base nivelada (ou seja, ao longo da vida), a energia nuclear é uma fonte económica de geração de electricidade, combinando as vantagens de segurança, confiabilidade e emissões muito baixas de gases de efeito estufa. As centrais existentes funcionam bem, com um elevado grau de previsibilidade. O custo operacional dessas centrais é menor do que quase todos os concorrentes de combustíveis fósseis, com um risco muito baixo de inflação dos custos operacionais (os custos do combustível são uma proporção pequena dos custos totais de operação). Espera-se agora que as centrais operem por 60 anos (e ainda mais no futuro). Os principais riscos económicos para as centrais existentes estão nos impactos da dos subsídios para as energias renováveis e baixo custo do gás. Também existe o risco político de uma tributação mais elevada focada especificamente na energia nuclear. A construção de centrais nucleares é cara, mas a operação destas é relativamente barata**. Em muitos lugares, a energia nuclear é competitiva com os combustíveis fósseis como meio de geração de electricidade. Os custos de eliminação de resíduos e desmantelamento são normalmente incluídos na totalidade nos custos operacionais. Se os custos sociais, sanitários e ambientais dos combustíveis fósseis também forem levados em conta, a competitividade da energia nuclear é ainda maior. Apenas grandes reservatórios hidráulicos podem fornecer uma contribuição semelhante a custos comparáveis, mas permanecem altamente dependentes das condições naturais de cada país. O carvão é, e provavelmente continuará a ser, economicamente atraente em países como China e Austrália, desde que as emissões de carbono sejam gratuitas ou não totalmente pagas. O gás também é competitivo para a produção de energia de carga de base em muitos lugares, principalmente quando recorre centrais de ciclo combinado. Embora as turbinas a gás de ciclo combinado sejam competitivas em algumas regiões, o seu custo (medidos em termos do LCOE depende muito dos preços do gás natural e do custo das emissões de carbono em cada uma das regiões.

* https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020
** https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx



A energia nuclear continua a ser a tecnologia de baixo carbono com os menores custos expectáveis em 2025. numa base nivelada (ou seja, ao longo da vida) (fonte: relatório IEA "Projected costs of generating electricity", 2020, valores em Dólares)

A electricidade produzida a partir da operação nuclear de longo prazo, por extensão de vida útil, é altamente competitiva e continua a ser não apenas a opção de menor custo para a geração de baixo carbono, quando comparada à construção de novas centrais, mas para todas as formas de geração de energia.

Esta redução dos custos da energia nuclear beneficia da redução de custos resultante das lições aprendidas na construção duma primeira central única e passando a uma abordagem em que múltiplas centrais nucleares similares são construídas, beneficiando duma economia de escala. A energia nuclear tem custos comparáveis e combina perfeitamente com as energias renováveis, como a eólica e a solar, para criar um sistema de energia confiável e limpo. A energia nuclear fornece energia barata, 24 horas, sem emissões de carbono preenchendo as lacunas quando o sol não brilha ou o vento não sopra.

Os defensores da energia eólica e da energia solar muitas vezes citam as estimativas de LCOE da Lazard (uma empresa de consultoria) ou da IEA erroneamente para alegar que a energia eólica e solar são agora mais baratas do que outras fontes de energia. No entanto, a Lazard e a IEA mostram o custo de operação duma única instalação eólica ou solar na sua produção máxima razoável e não incluem o custo de operar de forma confiável um sistema eléctrico inteiro com elevadas penetrações de energia eólica e solar, que custa exponencialmente mais (sugiro ver o cálculo de LCOE para o exemplo de um estado americano*). Por exemplo, Lazard e EIA não contabilizam as despesas incorridas para construir novas linhas de transmissão, o custo de fornecer electricidade de “backup” com gás natural ou armazenamento em baterias para quando o vento não sopra ou o sol brilha. Mas, Ainda mais importante, as estimativas de LCOE da Lazard e da IEA não levam em conta o enorme excesso de potência instalada e redução de potência que deve ocorrer para garantir que as redes com alta dependência de energia eólica, solar e armazenamento de baterias correspondam à procura de eletricidade a cada hora de cada dia. Na rede eléctrica o fornecimento de electricidade deve estar em perfeito equilíbrio

* https://files.americanexperiment.org/wp-content/uploads/2022/09/The-High-Cost-of-100-Percent-Carbon-Free-Electricity-by-2040-in-Minnesota.pdf

com a procura em cada segundo de todos os dias. Se a procura aumentar o fornecimento de energia deve aumentar para corresponder à procura. Caso não seja possível aumentar a oferta para corresponder à procura, os operadores da rede poderão ser forçados a cortar a energia dos consumidores para evitar que a rede caia causando apagões. Gerar mais electricidade é relativamente fácil com centrais de energia despacháveis, ou seja centrais que podem ser activadas ou desativadas sob comando, tais como as centrais a carvão, gás natural e nuclear. Mas o ajuste a flutuações de segundo a segundo na procura de electricidade é muito mais difícil com energia eólica e solar, cuja produção de electricidade depende de flutuações de segundo a segundo nas condições climatéricas. Como resultado, é muito mais difícil fornecer energia confiável à medida que aumenta a dependência da energia eólica e solar para corresponder às necessidades de energia. É possível mitigar parte da falta de confiabilidade inerente da energia eólica e solar aumentando enormemente a quantidade de capacidade eólica e solar na rede (sobredimensionando as instalações) para permitir que a procura de eletricidade seja correspondida mesmo em dias nublados ou com pouco vento, e reduzindo, ou desligando, grande parte dessa capacidade quando a produção eólica e solar é maior. Outras estratégias de mitigação incluem a construção de mais linhas de transmissão e instalações de armazenamento em baterias ou em albufeiras de barragens usando a electricidade excedente para bombear a água de volta. Cada uma dessas estratégias de mitigação, no entanto, é um factor importante de custo para todo o sistema eléctrico. E quanto mais energias renováveis houver no sistema, mais estes custos serão proeminentes*.

Os custos associados a manter um balanço entre a procura e a oferta de electricidade, o sobredimensionamento da potência instalada e a necessidade de reduzir a produção quando há excesso aumentam drasticamente porque a quantidade de energia eólico, solar e de armazenamento em baterias deve ser sobredimensionada para levar em conta a intermitência da energia eólica e solar. Estudos recentes para a Suíça** e Países Baixos*** mostram que a combinação de geração de energias renováveis e carga de base nuclear tem custos de sistema consistentemente mais baixos do que cenários baseados exclusivamente em renováveis.

* https://www.ft.com/content/1859ab32-2230-11e9-8ce6-5db4543da632
** https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_74877/achieving-net-zero-carbon-emissions-in-switzerland-in-2050-low-carbon-scenarios-and-their-system-costs?details=true
*** Possible role of nuclear in the Dutch energy mix in the future,, FINAL REPORT ENCO-FR-(20)-13

A energia nuclear requer áreas significativas de terreno?

O uso da terra para produção de electricidade afecta áreas que podem ser usadas para outras aplicações (e.g. produção de alimentos) e faz intervenções nuclear também complementa as energias renováveis porque gera mais energia com menos ocupação de terreno, 13 vezes menos do que as instalações solares e 25 vezes menos do que os parques eólicos, com base nos dados do relatório "STRATA (2017), The footprint of Energy: Land Use of U.S. Electricity Production*". Este relatório considera as várias necessidades diretas e indiretas de terreno para geração de electricidade a carvão, gás natural, nuclear, hídrica, eólica e solar nos Estados Unidos em 2015. Para cada fonte, é estimada a terra usada durante a produção de recursos, por centrais de energia, para transporte e transmissão, e para armazenar materiais residuais.

Os parques eólicos e solares estão localizados onde o vento e a luz solar estão disponíveis em abundância e exigem grandes quantidades de terra para turbinas e painéis, enquanto a energia nuclear está contida em centrais nucleares. Se considerarmos apenas a área ocupada para produção de energia eléctrica, uma instalação de energia nuclear ocupa uma área pequena de terreno, exigindo cerca de 3.4 km^2 por 1000 megawatts de energia. Este número é baseado na área média das 54 instalações de centrais nucleares nos Estados Unidos. As centrais eólicas e solares modernas operando com a mesma capacidade, exigiriam 173 e 31 vezes mais área de terra, respectivamente, para produzir a mesma quantidade de energia.

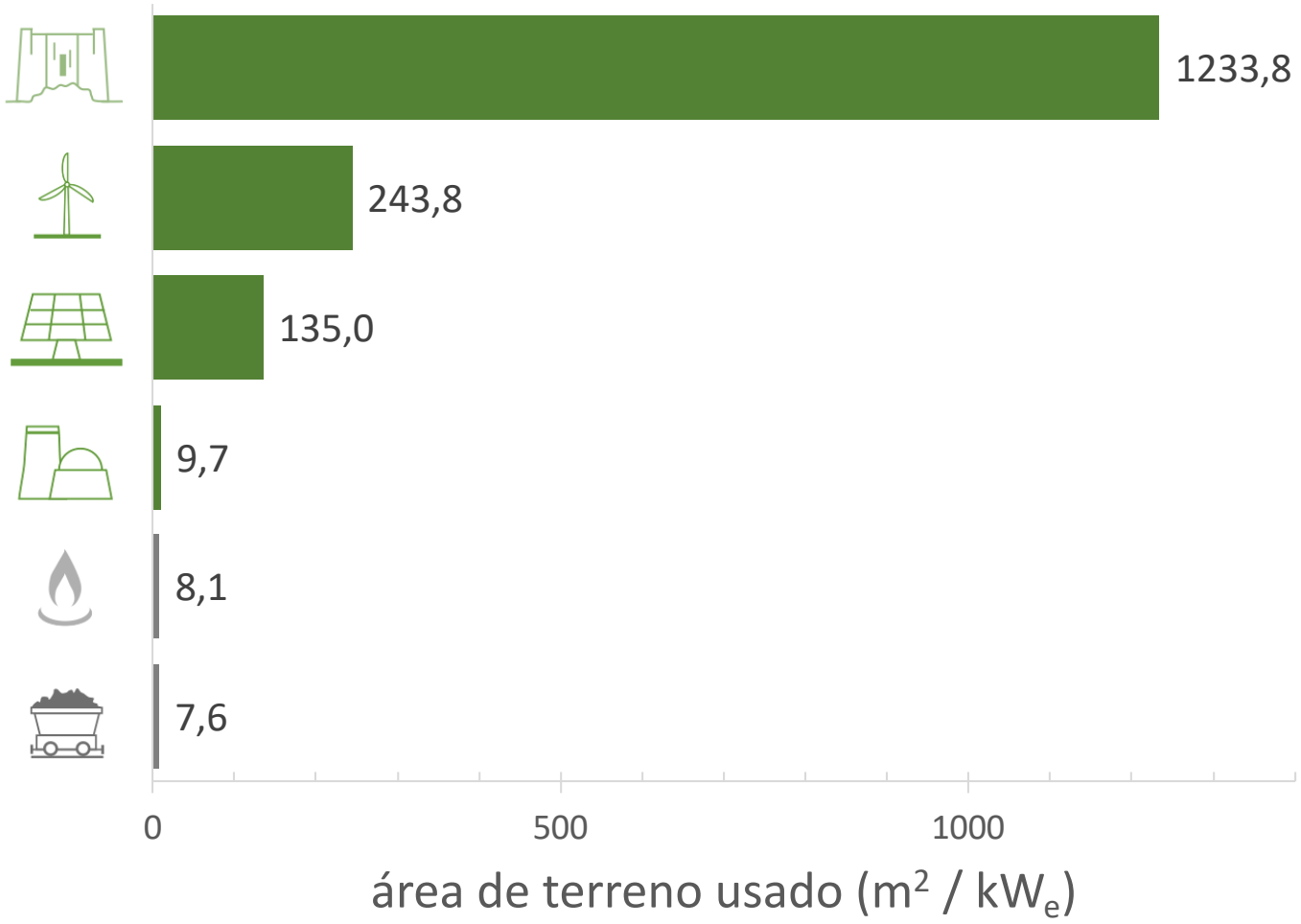
A energia nuclear requer muito menos área do que as renováveis.

Um outro estudo recente** calculou a intensidade do uso da terra por energia (LUIE) usando dados reais em vários locais o mundo e para todas as principais fontes de electricidade, integrando dados de literatura publicada, bases de dados e dados originais, tendo obtido LUIE que variam várias ordens de magnitude desde 7.1 ha/TWh/y para o nuclear até mais de uma ordem de magnitude acima para a eólica (130 ha/TWh/y) e mais de duas ordens de magnitude acima para a energia solar (2000 ha/TWh/y). O mesmo estudo expressa preocupação que a produção de eletricidade para cumprir as metas de descarbonização possa se tornar um novo e significativo factor

* https://docs.wind-watch.org/US-footprints-Strata-2017.pdf"
** https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0270155

de mudança no uso e cobertura do solo, com implicações para a perda de habitat e biodiversidade, segurança alimentar e outras prioridades ambientais e sociais. Embora os valores da áreas variem entre diferentes estudos, o consenso é que as centrais eólicas e solares, operando com a mesma significativas na natureza e na paisagem. Além disso, a necessidade elevada de materiais para as energias renováveis significa um aumento significativo da

*A energia nuclear complementa as energias renováveis porque gera mais energia com menos utilização de terreno. (Fonte: Análise com base no relatório STRATA (2017) excluindo a ocupação do terreno pelas linhas de transmissão eléctrica). Os resultados são comparáveis com os obtidos num artigo publicado em 2018**



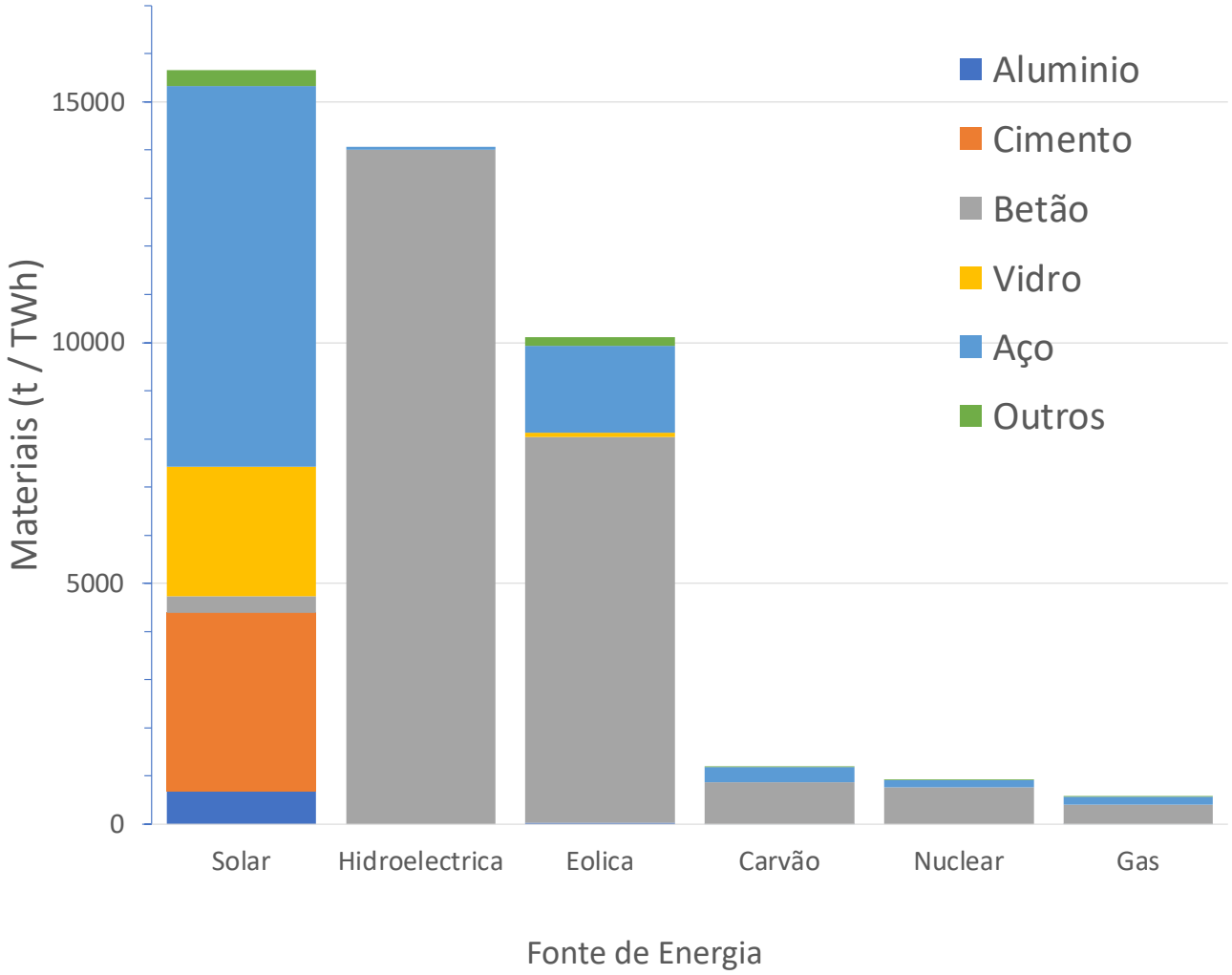
* John van Zalka, Paul Behrens, "The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A T review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S.", Energy Policy 123 (2018) 83–91

atividade de mineração que leva tempo para se estabelecer e cria desafios à disponibilidade de quantidades limitadas de matérias-primas. Por este motivo a energia capacidade, exigem substancialmente mais área de terra para produzir a mesma quantidade de energia. Um estudo de 2018*, compara a pegada total para fontes de energia diferentes. À semelhança dos estudos anteriores os resultados referem-se apenas aos EUA, mas não deverão ser substancialmente diferente para outros países. A diferença entre energia renovável e energia fóssil/nuclear é enorme, chegando a duas ou três ordens de magnitude. A energia hidroeléctrica tem a menor produção de energia por área. As energias eólica e solar têm melhor aproveitamento de área, 243,8 e 135 m^2 por kW de electricidade produzida, respectivamente. A energia nuclear tem densidade de energia 130 vezes maior que a eólica e só é igualada pelo gás natural sendo inegavelmente superior a outras fontes de baixo carbono em requisitos de área. Um outro estudo de 2022** mostra que a energia nuclear, mesmo incluindo a superfície de segurança além da própria central nuclear, apresenta uma densidade de geração anual maior do que as centrais a gás natural, considerando a ocupação do solo por condutas e a mineração para alimentar centrais a gás.

A energia nuclear requer outros recursos naturais?

Estudos recentes*** analisaram o uso dos recursos na geração de energia nuclear ao longo do ciclo de vida, tendo como foco os métodos de mineração, os tipos de reactores e os diferentes ciclos de combustível empregados (aberto ou fechado) e incluindo a incerteza do teor do minério de urânio. A análise foi feita uma comparação entre a geração de energia nuclear e outros tipos de sistemas de geração de energia. O impacto da energia nuclear é 20% do carvão, 23% do petróleo e 35% do gás natural liquefeito. É comparável ao das energias renováveis, como a solar, tornando a energia nuclear não apenas uma fonte de energia de baixo carbono, mas uma fonte de energia que usa poucos recursos naturais ao longo do seu ciclo de vida. Há também a preocupação crescente que as ameaças da mineração à biodiversidade aumentem à medida que mais minas direcionarem materiais para a produção de energia renovável**** e, sem planeamento estratégico, essas novas ameaças à biodiversidade podem superar aquelas evitadas pela mitigação das mudanças climáticas. A produção de

** https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262202131X
** https://www.nature.com/articles/s41598-022-25341-9
*** https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/Quadrennial-Technology-Review-2015_0.pdf
**** https://www.nature.com/articles/s41467-020-17928-5



* https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/Quadrennial-Technology-Review-2015_0.pdf

energias renováveis é intensiva em materiais o que significa que a produção futura também aumentará a procura por muitos metais. É improvável que estas novas procuras sejam atendidas desviando o uso destes recursos de outros sectores ou apenas da reciclagem de materiais.

De todas as fontes de baixo carbono, a nuclear tem os menores requisitos de área e materiais.

Requisitos de materiais (combustível excluído) para várias tecnologias de geração de eletricidade. Foram também excluídos o silício e cobre por terem sido incluídos no gráfico dos materiais críticos anteriormente apresentado (Fonte: Quadrennial Technology Review, US. Department of Energy,, 2015)*

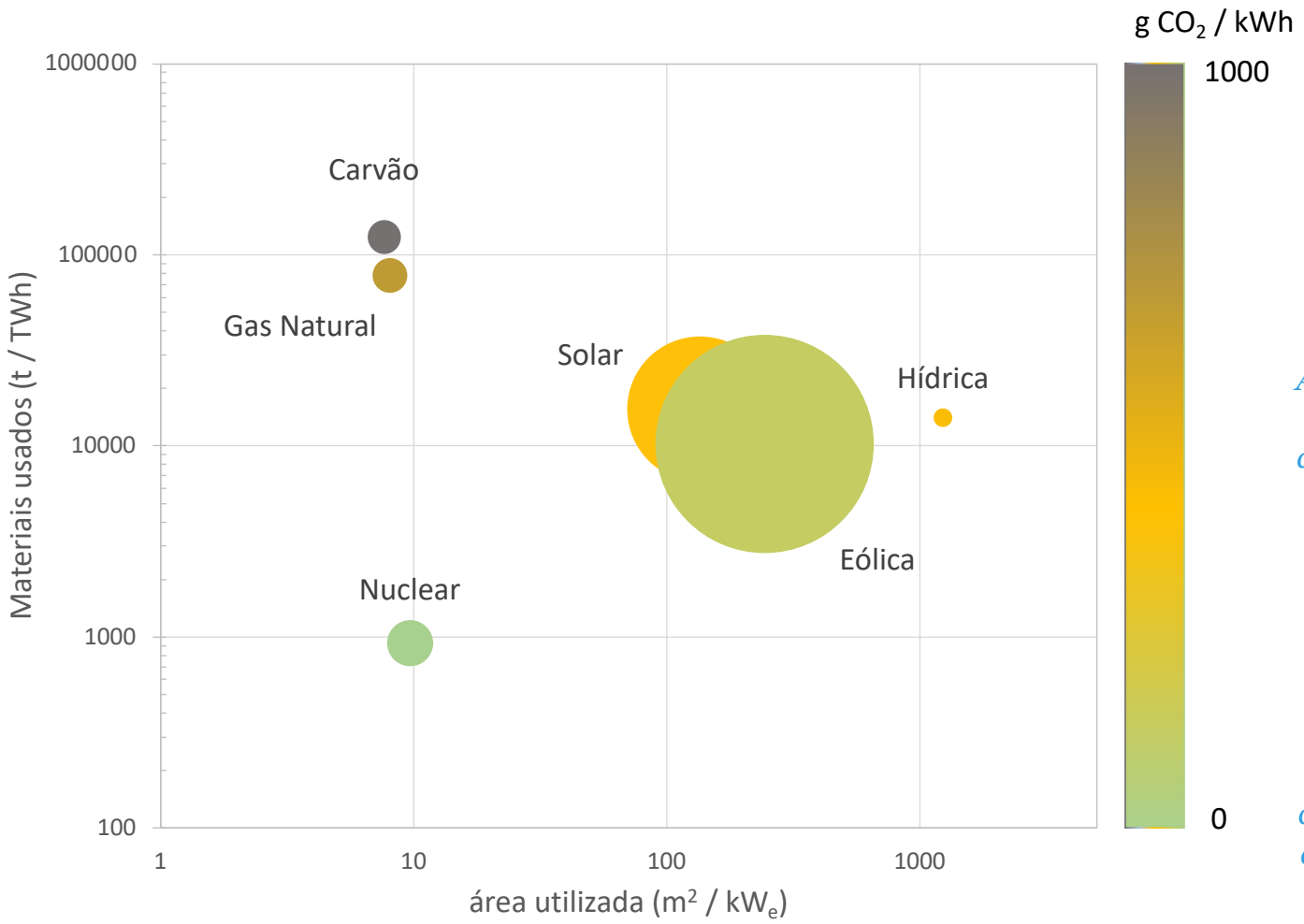
Os requisitos de área e materiais são parâmetros-chave a serem considerados na redução da dependência dos combustíveis fósseis. Todas as tecnologias energéticas requerem materiais, mas os tipos e quantidades de materiais consumidos variam muito. Algumas tecnologias exigem apenas materiais comuns e abundantes, como aço, vidro, betão e outros para além de quantidades variadas de materiais raros, como metais nobres. No que diz respeito a materiais comuns as energias renováveis (solar, hídrica e eólica) exigem dezasseis vezes mais materiais, expressos em t/TWh produzido, que a energia nuclear*.

Um dos principais desafios da expansão das energias renováveis será seguramente o aumento da procura de materiais. Enquanto a energia nuclear tem um consumo de pouco menos de mil toneladas de materiais por TWh, de longe a menor de todas as fontes de energia, a procura para a energia eólica é mais de dez vezes maior. A energia hidroeléctrica e solar requer ainda mais materiais, quatorze e dezoito vezes, respectivamente, onde a grande maioria corresponde a betão e aço. Esta procura é problemático, em parte devido ao uso de altas temperatura nas indústrias de aço e cimento que são difíceis de alcançar com eletricidade, levando a altas emissões de CO_2.

As energias renováveis têm densidades de energia muito mais baixas do que outras fontes não renováveis. Como mostrado anteriormente a energia solar e eólica também têm o maior consumo de metais críticos, levando ao uso intensivo de recursos não renováveis, incluindo uma variedade de metais de terras raras. Estes existem em quantidades limitadas na natureza e não podem ser facilmente substituídos. Entre eles estão o disprósio e o neodímio amplamente utilizados em turbinas eólicas. Além disso, outros metais, como cobre, prata e índio, são também amplamente usados. A preocupação com a disponibilidade de fornecimento de muitas destas matérias primas para apoiarem a transição energética está expressa num relatório de 2021 da União Europeia assim como num relatório da IEA**. Quando pesados todos estes factores a energia nuclear tem vantagens consideráveis.

A energia nuclear é superior às outras fontes de baixo carbono em requisitos materiais, comuns e críticos, área ocupada e baixa produção de CO_2 /kWh

* QuadrennialTechnologyReview, US. Department of Energy,, 2015, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/Quadrennial-Technology-Review-2015_0.pdf
** https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions



Área ocupada e materiais utlizados por fonte de energia. O tamanho da bolhas representa a quantidade de minerais críticos usados por cada uma das fonte de energia e a escala de cores a quantidade de CO2 produzido expressa em g CO_2 / kWh. Este gráfico condensa a informação apresentada anteriormente excepto para os materiais utlizados onde foram usados os valores apresentados pela Glex e as referências aí apresentadas, excluindo a quantidade de cobre e silício. A energia nuclear é superior a outras fontes de baixo carbono em requisitos materiais e espaciais.*

* https://energy.glex.no/feature-stories/area-and-material-consumption



Nenhuma fonte de energia está livre de ter acidentes ou é completamente segura. Em Dezembro de 2011 um gerador eólico na cidade costeira de Ardrossan no Reino Unido explodiu de forma espectacular durante uma tempestade. Ainda que estes acidentes sejam relativamente raros, com estimativas a rondar os 1/2000 a 1/15000, não são desprezáveis

O mito da (in)segurança

Como a energia nuclear tem ainda muitas conotações negativas é importante desmistificarmos um pouco esta percepção de insegurança.

Um dos problemas que a energia nuclear enfrenta é a percepção que as populações têm da segurança. O nuclear é visto como sendo problemático confundindo-se o impacto dos acidentes de Chernobyl e Fukushima com o medo das bombas nucleares e criando uma narrativa de medo.

Nenhuma fonte de energia está livre de ter acidentes ou é completamente segura. Qualquer método de produção de electricidade pode causar grandes pressões ambientais ou sociais.

O pior acidente de energia de todos os tempos foi o colapso da barragem hidroeléctrica de Banqiao, na China, em 1975, que matou entre 170000 e 230000 pessoas*. Qualquer cidadão comum facilmente concordará que a energia eólica é segura. No entanto, em 2021 nos Estados Unidos, um incêndio deflagrou numa fábrica que produz lubrificantes para turbinas eólicas. Para combater as chamas, os bombeiros utilizaram “forever chemicals” (químicos eternos ou PFAS: Per- And Polyfluoroalkyl Substances). Estes produtos químicos não são destruídos em nenhum processo no meio-ambiente e podem acumular-se em seres humanos. Ao longo da cadeia de utilização e produção, nem as tecnologias mais limpas escapam a terem desvantagens consideráveis. Outro exemplo, é o risco de incêndio em geradores eólicos. Ainda que estes acidentes sejam relativamente raros, com estimativas a rondar os 1/2000 a 1/15000, não são desprezáveis embora sejam tomadas medidas no design para minimizar o risco de incêndio. Mesmo sendo um acidente infrequente, será que um incêndio em Portugal num período de seca não teria consequências? Infelizmente, nos últimos anos temos tido vários exemplos que demonstram o contrário!

O pior acidente de energia de todos os tempos foi o colapso da barragem hidroelétrica de Banqiao, na China, em 1975, que matou entre 170000 e 230000 pessoas

Um outro exemplo ocorreu em Outubro de 1963 quando quase 2000 pessoas morreram em Itália, num dos piores desastres relacionados com a energia na história da Europa. A barragem de Vajont era, na altura,

* https://www.popularmechanics.com/science/energy/a40437341/banqiao-dam-disaster/



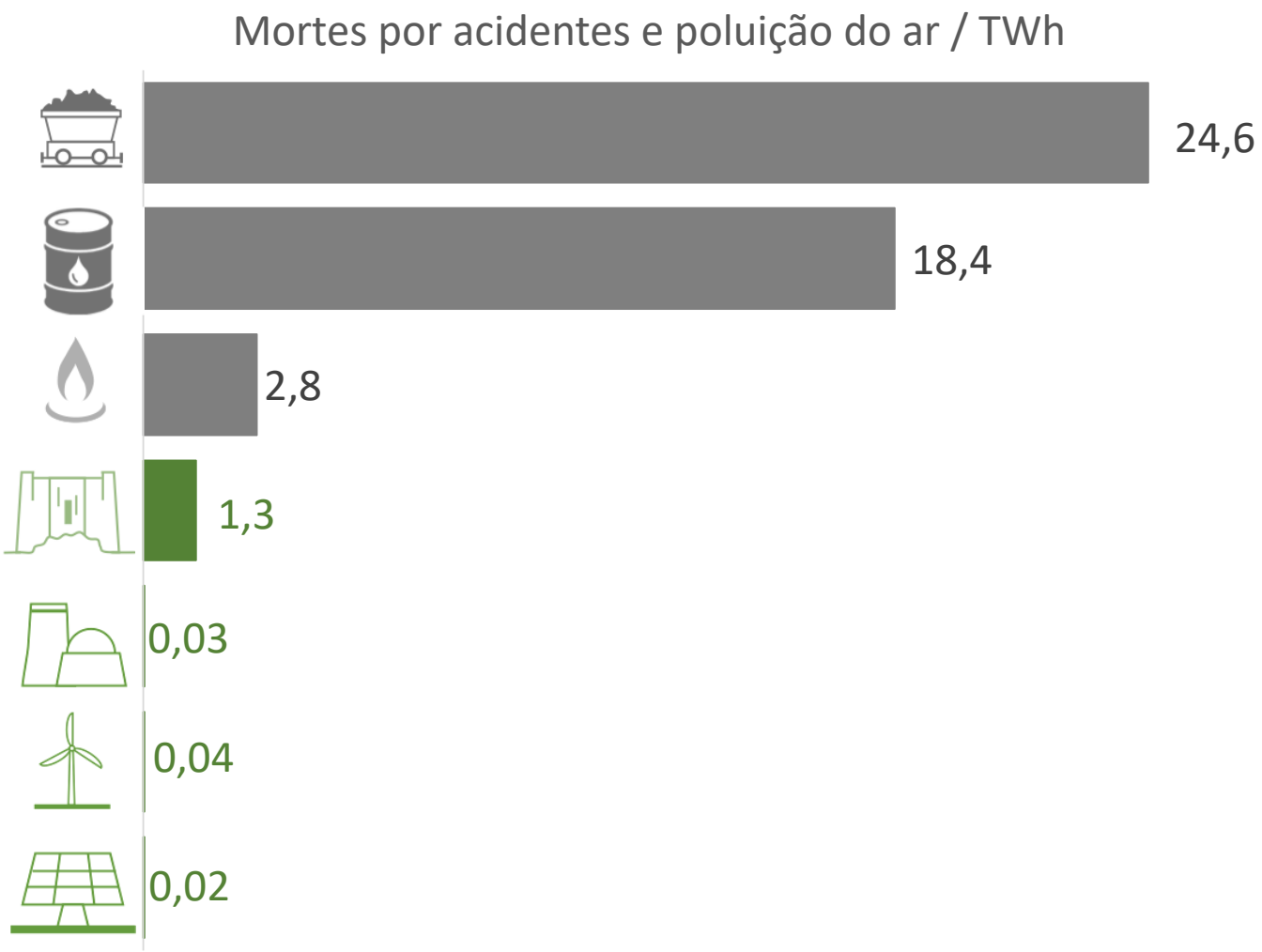
A barragen hidroeléctrica de Banqiao após o acidente. Um maremoto de água de 10 km de largura, mais de 5 m de altura e viajando a até 50 km/h atravessou terras agrícolas planas na província de Henan, demolindo tudo no seu caminho.Morreram entre 170000 e 230000 pessoas

a barragem mais alta do mundo. Foi construída perto de uma montanha, o Monte Toc, que tinha camadas de sedimentos perigosos por baixo de outras mais pesadas. Naquela noite, metade da montanha desmoronou-se sobre a barragem, criando um tsunami que submergiu as aldeias abaixo. A barragem permaneceu quase intacta e dois terços da água ficaram retidos atrás dela. O acidente ocorreu depois da ENEL e o Governo italiano terem ocultado relatórios e rejeitado provas de que o Monte Toc, no lado sul da bacia, era geologicamente instável. Ignoraram numerosos avisos, sinais de perigo e avaliações negativas. Felizmente, posteriormente compreenderam o erro e actualmente, quase 20% da energia no norte de Itália continua a ser providenciada por centrais hidroeléctricas.

Uma vez que a maior insegurança é o desconhecimento o resto deste livro destina-se a explicar o que é a energia nuclear (fissão e fusão) e tentará dar elementos suficientes para que os leitores possam ficar mais informados e com curiosidade suficiente para pesquisarem mais sobre o assunto e construírem uma visão critica.

Os combustíveis fósseis matam muito mais pessoas do que a energia nuclear!

Isto é surpreendente para muitas pessoas, porque muitos têm memórias proeminentes dos dois maiores desastres nucleares da história: Chernobyl e Fukushima. Estes dois eventos foram de longe os maiores incidentes nucleares da história; os únicos desastres a receber um nível 7 (a classificação máxima) na Escala Internacional de Eventos Nucleares. Quando se trata de acidentes nucleares, há dois impactos fatais a serem considerados: o primeiro é o número de mortes directas que ocorreram no momento do incidente ou nos dias seguintes (ou seja, os impactos agudos); o segundo são os impactos de longo prazo (crónicos) da exposição à radiação, que tem ligações conhecidas com a incidência de várias formas de cancro. Para Chernobyl, existem várias estimativas de vítimas mortais. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que 4000 pessoas morreram ou morrerão do desastre de Chernobyl. Este número inclui a morte de 31 pessoas como resultado directo do desastre e aqueles que se estimam poderem morrer posteriormente de cancro devido à exposição à radiação. Este é o número mais citado embora seja considerado muito alto por vários investigadores, incluindo um relatório posterior do Comité Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atómica (UNSCEAR). O desastre em Fukushima matou 574 pessoas. Em 2018, o governo japonês informou que um trabalhador morreu



Mortes por acidentes e poluição do ar por TWh de electricidade produzida. Os dados referentes à energia nuclear incluem os acidentes de Chernobyl e Fukushima assim como acidentes relacionados com a operação das centrais, fabrico do combustível e prospeção mineira (Créditos: Hannah Ritchie e Max Roser, https://ourworldindata.org/nuclear-energy)

de cancro de pulmão como resultado da exposição ao evento. Ninguém morreu directamente do desastre de Fukushima. De acordo com as autoridades japonesas, 573 pessoas morreram devido ao impacto da evacuação e stress.

O estudo da UNSCEAR realizado 10 anos após o acidente, concluiu que a radiação na área de Fukushima está ao nível da radiação de fundo e a incidência de cancro da tiróide, leucemia ou outras doenças não é diferente de outros locais no Japão.*

Infelizmente, a opinião pública sobre a energia nuclear tende a ser muito negativa mas totalmente errada. Quando as pessoas discutem a segurança da energia nuclear, muitas vezes concentram-se no número de mortes causadas por estes dois eventos. No entanto, a energia nuclear é uma das fontes de energia mais seguras e limpas, por unidade de energia, resultando em centenas de mortes a menos do que as causadas pelo carvão, petróleo ou gás, e é comparável às fontes renováveis, como solar ou eólica.

A energia nuclear é uma das fontes de energia mais seguras e limpas, por unidade de energia, e comparável às fontes renováveis, como solar ou eólica.

Os dados referentes à energia nuclear incluem os acidentes de Chernobyl e Fukushima (mesmo sabendo-se que apenas uma das vitimas foi creditada ao acidente de Fukushima como vítima de radiação) assim como acidentes relacionados com a operação das centrais, fabrico do combustível e prospeção mineira. De notar que estes valores não incluem quaisquer impactos na saúde decorrentes da exposição a radiações provenientes da extração de metais e minerais utilizados nas cadeias de abastecimento. Embora haja a tendência a pensar que estes só teriam impacto na energia nuclear, as análises sugerem que a toxicidade carcinogénica de outras fontes - incluindo a solar, a eólica, a hidroelétrica, o carvão e o gás - é significativamente mais elevada ao longo das suas cadeias de abastecimento.**

* https://www.unscear.org/unscear/uploads/images/videos/UNSCEAR_FFUP-II_Report_findings_English.mp4
** UNECE (2021). "Lifecycle Assessment of Electricity Generation Options". United Nations Economic Commission for Europe, https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf .

Impacto ambiental e na saúde

Todas as formas de produção de energia apresentam riscos e causam impactos ambientais e de saúde estando sujeita a regulamentação que estabelecem os níveis aceitáveis de impacto.

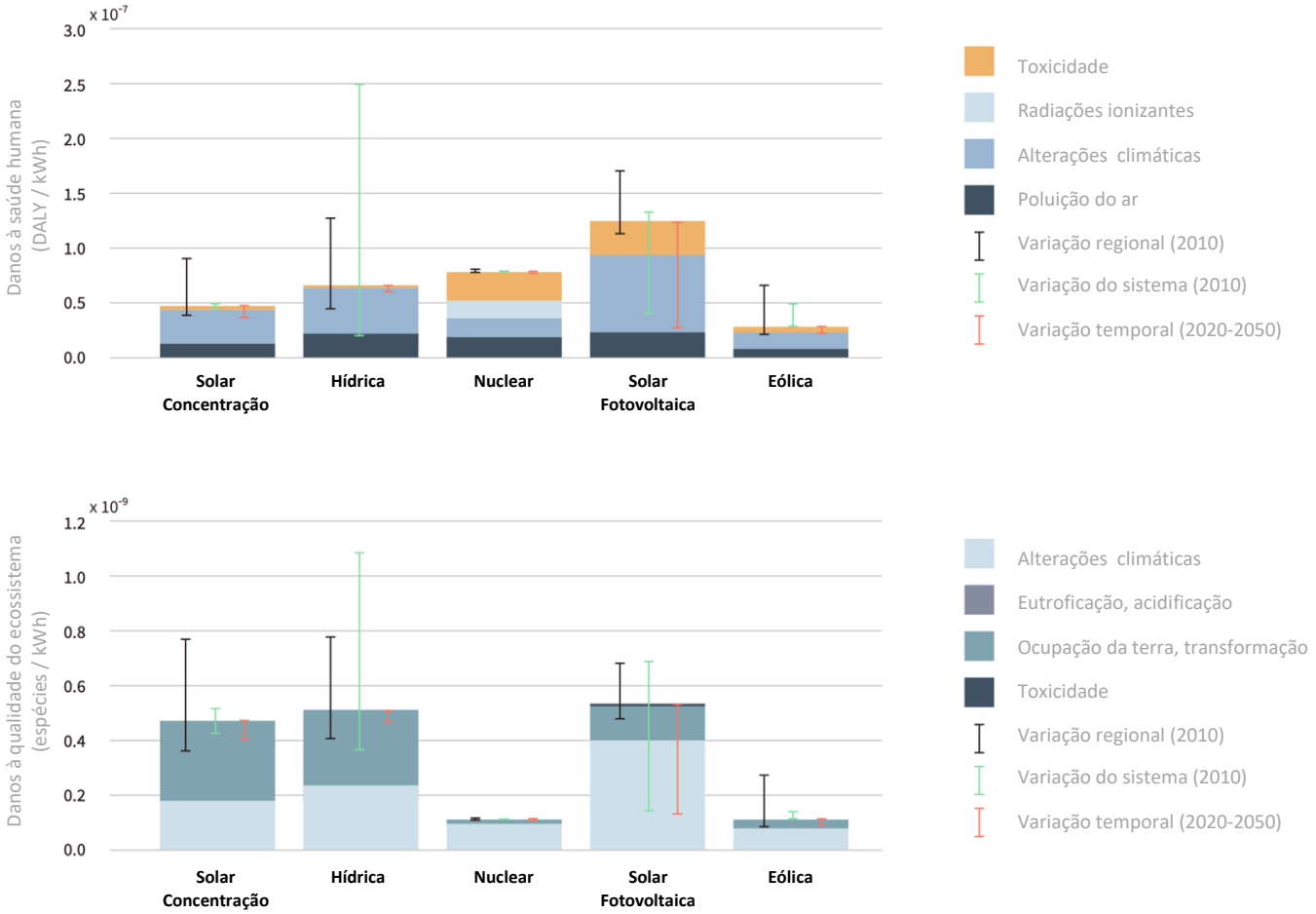
Para minimizar os riscos e impactos ambientais todas atividades industriais estão sujeitas a monitorização e regulamentação, garantindo que os impactos são limitados a níveis aceitáveis. A energia nuclear apresenta riscos específicos, como acidentes radiológicos e gestão de resíduos radioativos, no entanto, avaliações abrangentes do ciclo de vida mostram que, quando avaliada numa ampla gama de indicadores ambientais, a energia nuclear tem um dos menores impactos de qualquer fonte de energia*. Esses impactos são amplamente semelhantes às energias renováveis e muitas ordens de magnitude menores do que os combustíveis fósseis. A vantagem deve-se principalmente aos menores impactos das mudanças climáticas, que tendem a dominar os impactos na saúde de todas as tecnologias, incluindo energias renováveis. No entanto, mesmo sem considerar mudanças climáticas, as energias renováveis e nuclear têm um desempenho melhor do que a energia fóssil. A energia solar, eólica e hidroelétrica têm emissões mais baixas para todas as classes de poluição do que a energia a carvão e a gás. As conclusões do estudo eliminam mitos residuais sobre impactos adversos à saúde e ao ecossistema associados ao uso intenso de energia e às necessidades materiais de produção e instalação das centrais solares e eólicas e coloca em perspectiva os impactos à saúde associados à radiação ionizante da energia nuclear. Adoptar a combinação certa de tecnologias de baixo carbono para geração de eletricidade traz vários benefícios para a saúde humana e do ecossistema, ao mesmo tempo que tem o potencial de estabilizar a temperatura global.

Similarmente, as conclusões duma investigação do European Union Joint Research Centre sobre se a energia nuclear deveria ser incluída na taxonomia verdes da UE“ não revelou nenhuma evidência científica de que a energia nuclear cause mais danos à saúde humana ou ao meio ambiente do que outras tecnologias de produção de eletricidade”.

Um dos desafios ambientais e de saúde mais importantes que o mundo enfrenta é a qualidade do ar. A Organização Mundial da Saúde estima que a poluição do ar ambiente é responsável por 4,2 milhões de mortes em todo o mundo a cada ano e muitas destas mortes estão associadas à produção e uso de energia. As centrais nucleares não contribuem para a poluição do ar, e acredita-se que o uso histórico da tecnologia tenha ajudado a salvar mais de um milhão de vidas. As centrais nucleares também ajudam inequivocamente a reduzir as emissões de

* Health benefits, ecological threats of low-carbon electricity, Thomas Gibon et al., https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa6047

Avaliação do impacto ao longo do tempo de vida para várias fontes de energia de baixo carbono. Um DALY ((Disability-adjusted life years) representa a perda do equivalente a um ano de saúde plena. Os DALYs para uma doença ou condição de saúde são a soma dos anos de vida perdidos por mortalidade prematura e os anos vividos com incapacidade devido a casos prevalentes da doença ou condição de saúde numa população. (créditos: gráfico traduzido de https://unece.org/sites/default/files/2021-08/Nuclear%20brief_EN.pdf , dados: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa6047)



CO_2 e outros gases de efeito estufa. O IPCC reconhece que todo o ciclo de vida das emissões de gases de efeito estufa da energia nuclear está no mesmo nível das fontes renováveis de energia.

A pergunta correcta a fazer é "Quantas vidas a energia nuclear salvou?", ou "Quantas vidas poderiam ter sido salvas se os países não a tivessem abandonado?".

Após o desastre nuclear de Fukushima em 2011, a Alemanha anunciou planos para eliminar gradualmente a geração de energia nuclear: no período de 2011 a 2017, fechou 10 de suas 17 instalações nucleares e planeia fechar os reactores restantes em 2022. Como a energia nuclear é mais segura do que suas principais alternativas, essa decisão política custa vidas. Substituir a energia nuclear por combustíveis fósseis mata pessoas. Este é provavelmente o caso no exemplo recente da Alemanha. A maior parte do déficit de energia da Alemanha com o desmantelamento de energia nuclear foi preenchido pelo aumento da produção de carvão. Estima-se que a eliminação da energia nuclear da Alemanha custou mais de 1100 mortes adicionais por ano como resultado da poluição do ar. O plano da Alemanha para tornar os seus sistemas de energia mais seguros teve exactamente o resultado oposto. Investigadores americanos calcularam o custo social do carbono cujos principais componentes são o efeito no clima e como essas mudanças afetam a economia em resultado do aumento do nível do mar e declínio na saúde humana e na produtividade laboral*. O estudo focado no caso da Alemanha concluiu que o abandono da energia nuclear resultou num custo anual para a Alemanha de aproximadamente US$ 12 mil milhões por ano. Mais de 70% desse custo é devido ao excesso de 1100 mortes por ano anteriormente referidas. De acordo com o mesmo estudos os custos estimados da eliminação da energia nuclear excedem em muito as estimativas dos benefícios da desactivação do parque nuclear resultante das reduções no risco de acidentes nucleares e nos custos de descarte dos resíduos.

Um estudo publicado em 2013 analisou quantas pessoas mais teriam morrido mundialmente no período de 1971 a 2009 se a energia nuclear tivesse sido substituída por combustíveis fósseis, tendo concluído que a energia nuclear salvou globalmente cerca de

* Stephen Jarvis, et al. , The Private and External Costs of Germany's Nuclear Phase-Out, Journal of the European Economic Association, Volume 20, Issue 3, June 2022, Pages 1311–1346, https://doi.org/10.1093/jeea/jvac007

dois milhões de vidas neste período*. O mesmo estudo estima que a energia nuclear evitou em média 76000 mortes por ano no período de 2000 a 2009.

O Governo Americano considera um valor de 51$ por tonelada, mas um estudo recentes publicado na conceituada revista Nature indica que esse valor deveria ser 185$ por tonelada. Pegando nos números da IEA, isto é, 63 Gt CO2, tivemos um benefício resultante do uso da energia nuclear de 51 000 000 000 $ ou 185 000 000 00 $ dependendo do valor que quisermos usar.

Não só a energia nuclear é uma arma de descarbonização maciça crucial na guerra contra as alterações climáticas como salvou e continuará a vidas ao substituir os combustíveis fósseis por uma solução mais limpa, evitando um número significativo de mortes prematuras.

A energia nuclear salvou vidas ao substituir os combustíveis fósseis por uma solução mais limpa, evitando um número significativo de mortes prematuras.

* Kharecha, P. A., & Hansen, J. E. (2013). Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power. Environmental Science & Technology, 47(9), 4889-4895



Halyna Zubchenko & Gregory Pryshedko — Forjadores da modernidade (mosaico, 1974, Institute for Nuclear Research, Kiev, Ucrânia)

Energia Nuclear

2

Radioactividade

Alguns elementos são instáveis, libertando um pequeno número de partículas e energia espontaneamente. Este processo denomina-se por radioactividade.

O número de protões e electrões governa as propriedades químicas/eléctricas dum elemento e como ele reage com outros elementos. O número de neutrões não tem impacto nas propriedades químicas do elemento. No entanto, alguns isótopos são instáveis, libertando um pequeno número de partículas e energia espontaneamente. Este processo denomina-se por radioactividade. O material radioactivo existe naturalmente na Terra (em parte, é por isso que o núcleo da Terra é quente) e é produzido continuamente na atmosfera por raios cósmicos.

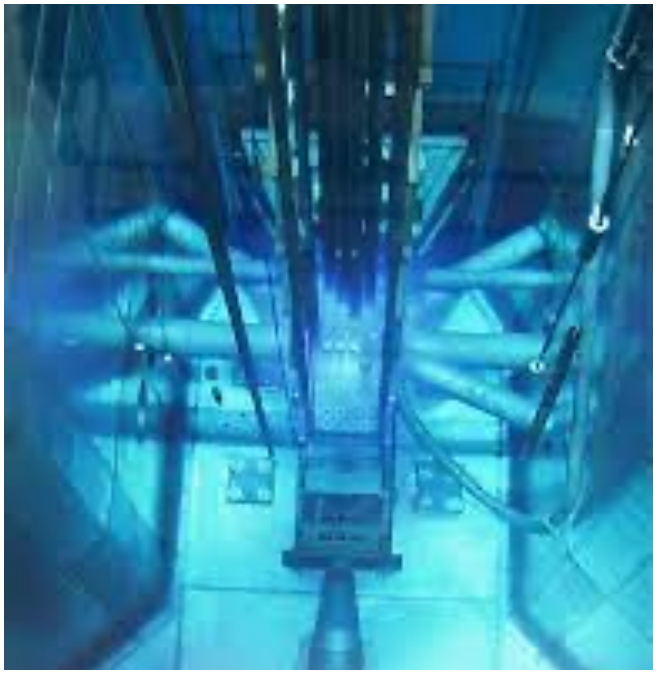
A radioactividade (também conhecida como decaimento radioactivo, decaimento nuclear, desintegração radioactiva ou desintegração nuclear) é o processo pelo qual um núcleo atómico instável perde energia por radiação. Um material contendo núcleos instáveis é considerado radioactivo. Três dos tipos mais comuns de decaimento são o decaimento alfa (decaimento α), o decaimento beta (decaimento β) e o decaimento gama (decaimento γ), todos envolvendo a emissão de uma ou mais partículas:

- O decaimento alfa ocorre quando o núcleo ejecta uma partícula alfa (núcleo de hélio).
- O decaimento beta ocorre de duas maneiras: o decaimento beta-menos, quando o núcleo emite um electrão e um antineutrino num processo que transforma um neutrão num protão. E o decaimento beta-mais, quando o núcleo emite um positrão e um neutrino num processo que transforma um protão num neutrão, também conhecido como emissão de positrões.
- No decaimento gama, um núcleo radioactivo primeiro decai pela emissão de uma partícula alfa ou beta. O núcleo filho resultante geralmente é deixado num estado excitado e pode decair para um estado de energia mais baixo emitindo um fotão de raios gama.

Algumas destas partículas são conhecidas como partículas ionizantes. Estas são partículas com energia suficiente para arrancar electrões de átomos ou moléculas. O grau de radioactividade depende da fracção de núcleos instáveis e com que frequência esses núcleos decaem. O efeito da radioactividade também depende do tipo e da energia das partículas produzidas durante o decaimento nuclear. Por exemplo, os neutrinos passam constantemente pela Terra, enquanto as partículas alfa são bloqueadas por uma folha de papel. Os cientistas e engenheiros usam a radioactividade como fonte de calor para satélites, imagens médicas, tratamentos de cancro direccionados, datação radiométrica e pesquisas sobre as leis da natureza e a origem da matéria. A radioactividade pode causar danos em materiais e em tecidos vegetais, animais e humanos, razão pela qual pode ser perigosa para a vida.

Após uma emissão alfa ou beta, o átomo torna-se noutro elemento que pode ser mais radioactivo, menos radioactivo ou completamente estável. Não é possível prever exactamente quando um determinado átomo emitirá radiação, mas o número de emissões ao longo dum período de tempo, a meia-vida, é conhecido. A meia-vida do material, é o tempo após o qual metade dos átomos iniciais libertam a sua energia. Alguns isótopos têm meias-vidas de minúsculas fracções de segundo; outros são biliões de anos. Meias-vidas mais curtas são mais perigosas, pois há mais eventos de decaimento acontecendo a qualquer momento. O maior perigo vem de elementos que são absorvidos pelo organismo, como o iodo radioactivo (absorvido pela glândula tiróide, desencadeando o cancro da tiróide) ou o estrôncio (absorvido como o cálcio nos ossos). Ambos os elementos são produzidos em reactores nucleares e por armas nucleares. É por isso que os comprimidos de iodo são distribuídos no caso dum incidente nuclear, para garantir que o iodo radioactivo não será absorvido.

Além do decaímento radioactivo, há outra maneira de fazer um núcleo ejectar partículas e energia. Os núcleos com maiores combinações de protões e neutrões, como Urânio e Tório, podem dividir-se em vários pedaços (tipicamente dois ou três) quando atingidos por um neutrão movendo-se a uma velocidade específica. É a este processo que se chama fissão nuclear e as substâncias nas quais este processo acontece são conhecidas como isótopos físseis. Este processo está na base de todos os reactores nucleares (e da bomba nuclear). A quantidade de energia libertada durante a fissão é milhões de vezes a quantidade libertada durante a combustão de combustíveis fósseis. Cada evento de fissão resulta na criação de produtos de fissão constituídos por diferentes elementos que muitas vezes são altamente radioactivos. Estes produtos de fissão constituem os resíduos nucleares de alto nível e representam um desafio significativo.



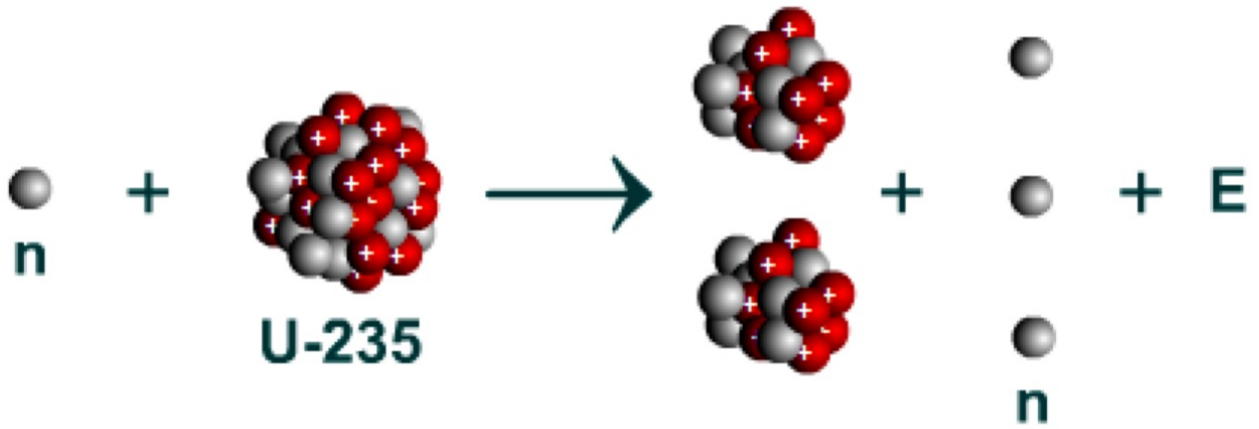
Núcleo do antigo Reactor Português de Investigação (RPI). O brilho azul é criado por electrões emitidos em decaimentos radioativos no núcleo

Reacções nucleares

Dois tipos de reacções nucleares, fusão e fissão, conduzem à libertação de quantidades significativas de energia. Estas reacções libertam energia porque se obtêm núcleos mais estáveis.

Como alquimistas modernos, temos assim forma de obter uma enorme fonte de energia fundindo ou partindo elementos. Na fissão (ou cisão) nuclear, que ocorre nas centrais nucleares espalhadas pelo planeta, um núcleo pesado, como o Urânio, é convertido em dois elementos mais leves, libertando energia. No núcleo de cada átomo de Urânio-235 (U-235) existem 92 protões e 143 neutrões. O arranjo das partículas dentro do Urânio-235 é instável e o núcleo pode se desintegrar se for excitado por um fonte externa. Quando um núcleo U-235 absorve um neutrão extra, ele rapidamente se divide em duas partes. Este processo é conhecido como fissão. Cada vez que um núcleo de U-235 se divide, ele liberta dois ou três neutrões podendo criar uma reação em cadeia. A soma das massas dos fragmentos resultantes da reacção é menor que a massa original. A massa em 'falta' (cerca de 0,1% da massa original) foi convertida em energia de acordo com a equação de Einstein.

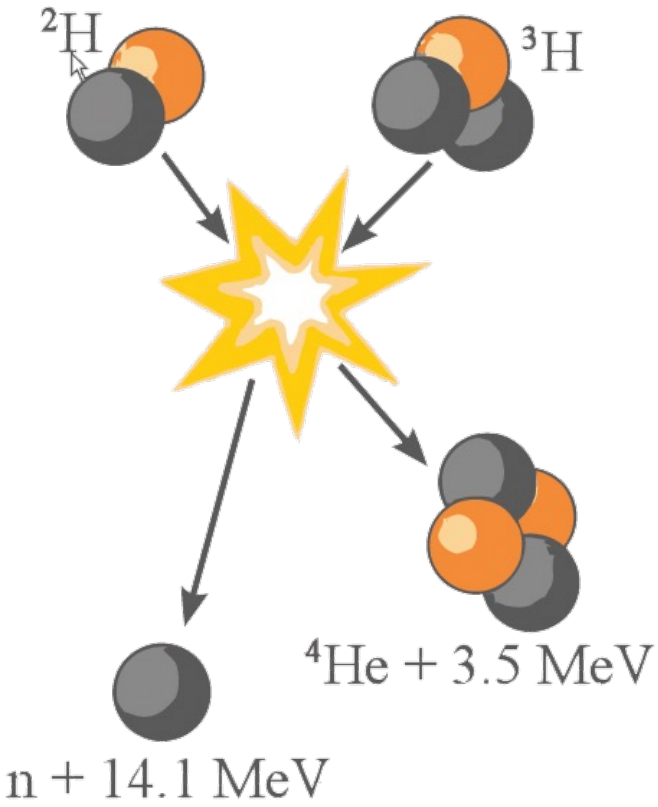
Como os neutrões emitidos durante a fissão movem-se muito rápido para desencadear mais fissão, devem ser desacelerados por ricocheteando em outros átomos, dentro de uma substância conhecida como moderador. Para interromper a reação basta absorvem os neutrões dentro de outra substância não físsil. Um reactor nuclear é, portanto, conceptualmente, um dispositivo bastante simples. Da mesma forma que um incêndio requer combustível, oxigénio e calor, uma reacção nuclear em cadeia requer uma substância físsil, neutrões e um moderador.



A Fissão Nuclear consiste na desagregação de átomos de um elemento

Na fusão nuclear, dois núcleos (de carga elétrica positiva) de elementos leves, que ultrapassam a sua repulsão, convertem-se num núcleo mais pesado e liberta-se energia, por conversão de uma parte da massa dos núcleos originais em energia, explicada pela famosa relação de Einstein, $E=mc^2$. Esse processo de fusão nuclear é a fonte de energia da estrelas, como o nosso Sol. A energia libertada nas reacções de fusão é muito maior que a libertada em reacções químicas, porque a energia de ligação que mantém juntas as partículas dos núcleos é muito maior que a energia que liga os electrões ao núcleo.

O processo de fusão consiste em juntar átomos de elementos leves, como o Hidrogénio, a altas temperaturas, formando Hélio e libertando uma enorme quantidade de energia na forma de calor. A reação de fusão mais interessante e que é a mais fácil de causar é a reação de fusão Deutério-Trítio (D-T). Nesta reação, dois isótopos do Hidrogénio, deutério (um protão, um neutrão) e Trítio (um protão, dois neutrões) fundem-se para formar um núcleo de Hélio e um neutrão livre ambos com uma enorme quantidade de energia: 17,6 MeV. MeV significa mega-electrão-volt. O electrão-volt (eV) é uma unidade de energia, como o Joule (J), que é frequentemente usada em processos nucleares e atómicos.
Um electrão-volt é muito pequeno: 1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J, logo 17,6 MeV pode não parecer muito (10^{-19} = 0,00000000000000000001 então 17,6 MeV = $2{,}82 \times 10^{-12}$ J ou 0,00000000000282 J), mas para dois núcleos, esta é uma enorme quantidade de energia. Como os núcleos são muito pequenos e como há muitos núcleos numa pequena quantidade de "combustível" nuclear, a densidade de energia (a energia por unidade de volume) é enormemente alta. A reacção de fusão de um litro de combustível de deutério e trítio cerca de 10 milhões de vezes mais energia que a combustão de um litro de gasolina!



Reacção de fusão nuclear entre dois isótopos do Hidrogénio, o Deutério e o Trítio.

Densidade de energia na fissão nuclear

A vantagem ambiental singular da energia nuclear pode ser resumida no termo "densidade de energia".

A "densidade de energia" é a quantidade de energia armazenada num determinado sistema ou região do espaço por unidade de volume. Também pode ser usado para energia por unidade de massa. O Urânio é um metal abundante e com uma elevada densidade de energia. Para manter a reação em cadeia necessária para operar um reactor de fissão nuclear, o Urânio deve ter uma concentração suficientemente alta de um do seus isótopos isótopos, o Urânio-235. O urânio é enriquecido em instalações específicas, para uso nos reactores nucleares. O urânio enriquecido é convertido em pó que é então comprimido em pastilhas (pellets) de Urânio. Uma pastilha de combustível de Urânio, com aproximadamente 2.5 cm, cria tanta energia quanto uma tonelada de carvão, 545 litros de petróleo ou 481 m^3 de gás natural.

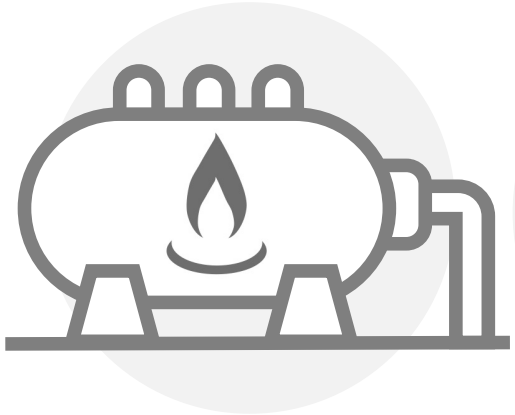
Um pedaço de urânio do tamanho de uma bola de golfe, pesando apenas 780 gramas , pode fornecer energia suficiente para cobrir todas necessidades de um ser humano ao longo da sua vida, incluindo electricidade, locomoção automóvel, viagens de avião, alimentos e produtos manufaturados, num total de 6,4 milhões de kWh. Para obter a mesma produção de energia do carvão, seriam necessárias 3200 toneladas resultando em mais de 11000 toneladas de dióxido de carbono. O volume dessa pilha de carvão seria de 4000 metros cúbicos (um cubo de 16 metros de lado do tamanho de um grande prédio de 5 andares).

Como alquimistas modernos, temos assim forma de obter uma enorme fonte de energia fundindo ou partindo elementos. No entanto, os produtos das duas reações não são iguais: os elementos resultantes da reação de fissão são isótopos radioactivos de elementos comuns, que embora tóxicos para o ambiente durante milhares de anos podem ser armazenados de forma segura, enquanto a fusão nuclear gera produtos limpos (Hélio e neutrões), que só tornam radioativos os materiais à sua volta por um período de tempo reduzido.

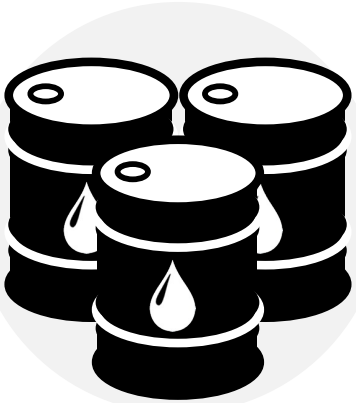


1 pellet de Urânio
(~2.5 cm de altura)

=



481 m³
de gás natural



545 l
de petróleo



1 t
de carvão

O combustível de fissão nuclear tem uma elevada densidade de energia (Créditos: U.S Department of Energy, adaptado)

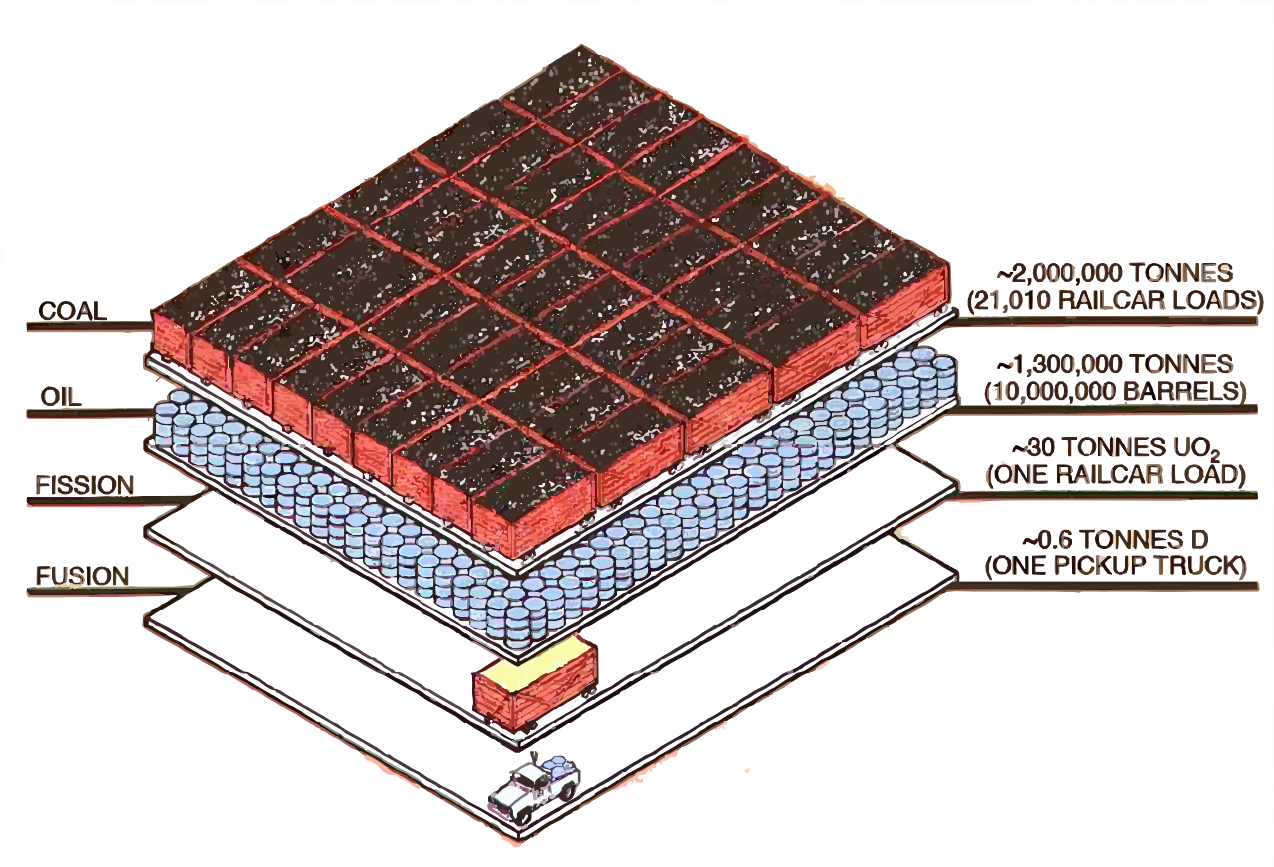
Densidade de energia na fusão nuclear

A investigação em fusão visa replicar o processo que gera energia no Sol com o objetivo de criar uma nova fonte de energia em grande escala e de baixas emissões de carbono aqui na Terra.

Quando os átomos leves se fundem para formar outros mais pesados, é libertada uma grande quantidade de energia. Neste processo, alguns gramas de combustíveis de Hidrogénio são aquecidos a temperaturas extremas – dez vezes a do núcleo solar – formando um plasma no qual ocorrem as reações de fusão. Numa central comercial de fusão, a energia produzida pelas reacções de fusão será usada para gerar electricidade.

A Fusão Nuclear permite gerar quase quatro milhões de vezes mais energia do que a que é produzida na queima de carvão, petróleo ou gás.

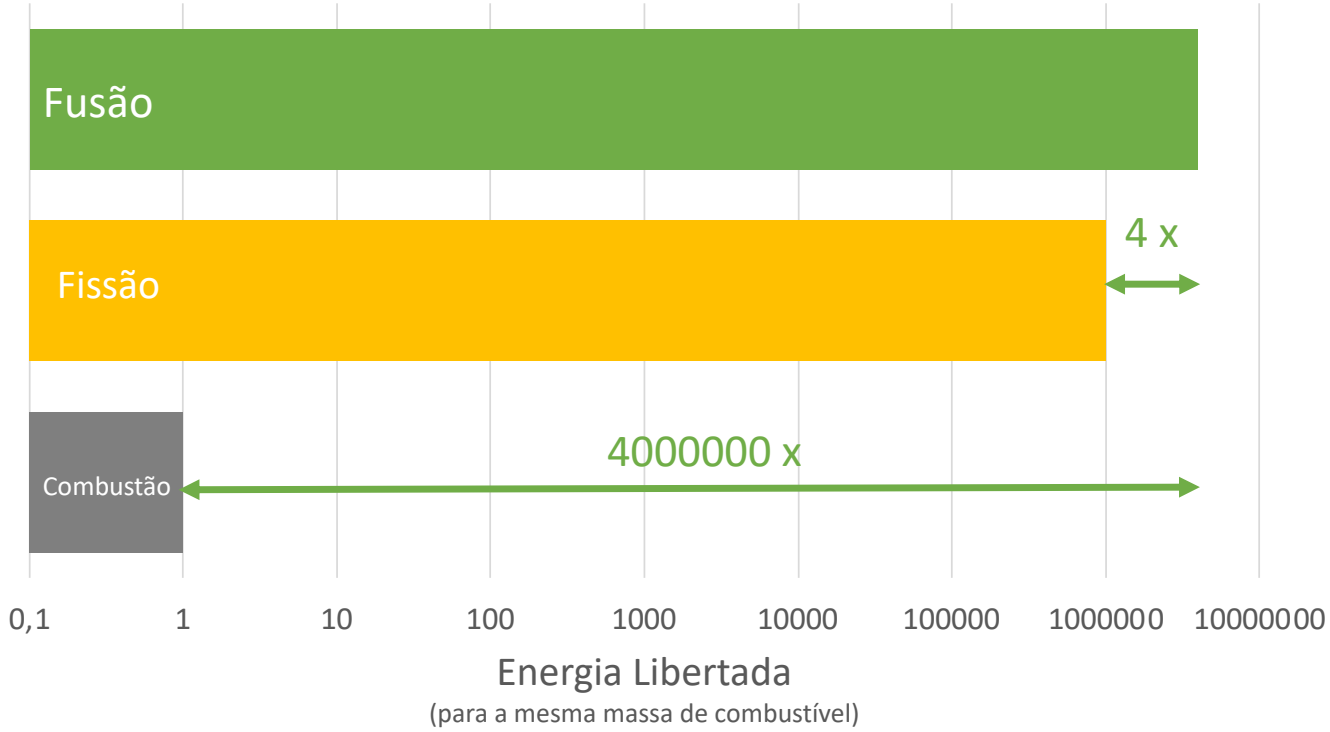
Esta tremenda diferença resulta do facto que a combustão resulta das forças electromagnéticas que mantêm as moléculas juntas, e que são relativamente fracas,



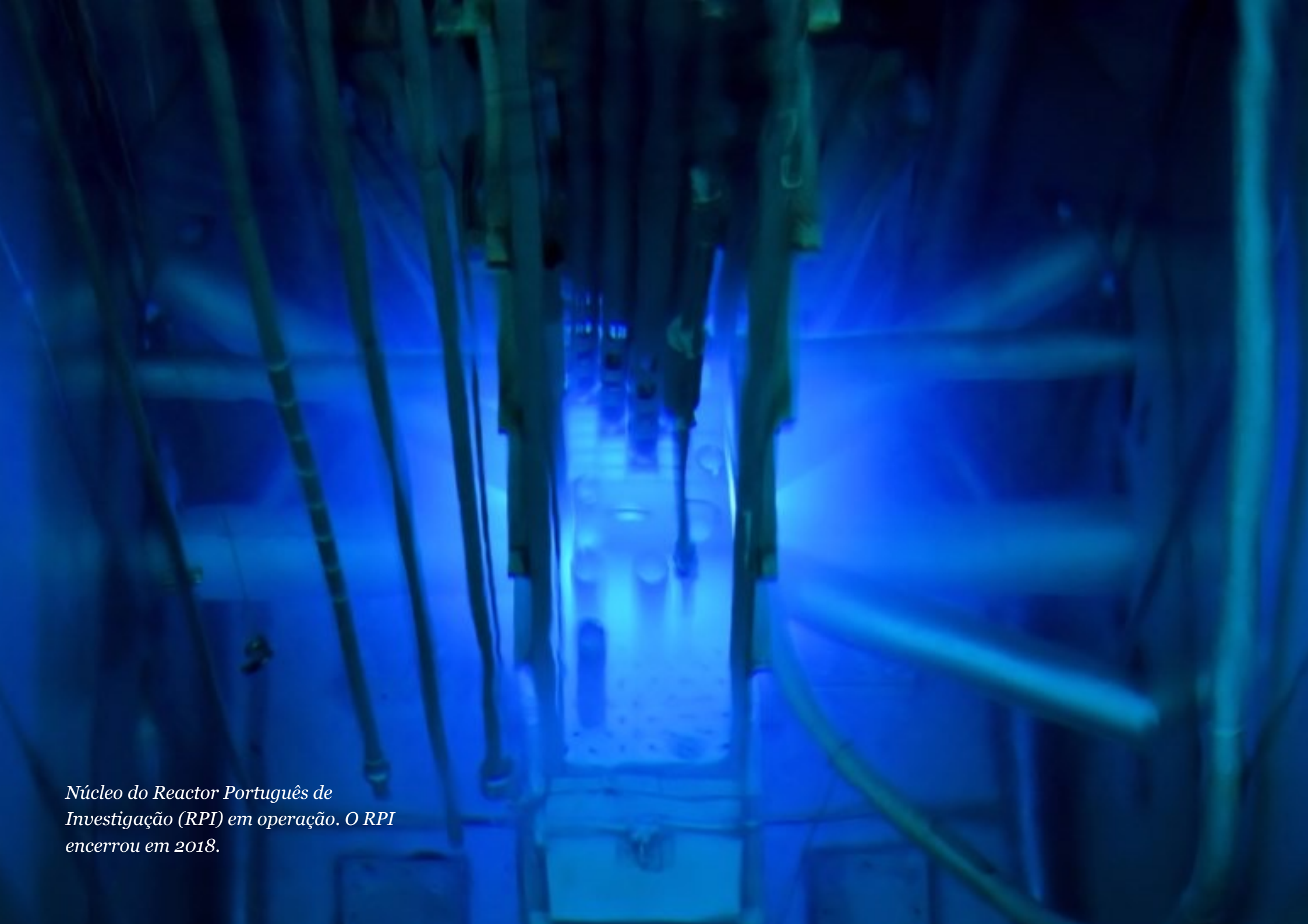
Eficiência das reacções nucleares. Combustível necessário para alimentar uma central de 1 GW durante um ano

enquanto a fusão e fissão nuclear padrão, baseiam-se nas forças nucleares muito mais fortes que mantêm os núcleos dos átomos unidos. Tanto a combustão como a fusão e a fissão nuclear libertam energia porque os produtos da reacção (por exemplo, água se queimarmos hidrogénio ou hélio mais um neutrão na reacção de fusão deutério-trítio) são mais estáveis do que os ingredientes originais separados.

A fusão tem um enorme potencial como fonte de energia de baixas emissões de carbono. A fusão nuclear, representa uma fonte de electricidade limpa, quase ilimitada e de longo prazo, usando pequenas quantidades de combustível que podem ser obtidas por todo o globo a partir de materiais baratos. A fusão nuclear é ambientalmente responsável, recorrendo a combustível abundante e sustentável e inerentemente segura, uma vez que não pode dar origem a um processo de produção descontrolado.



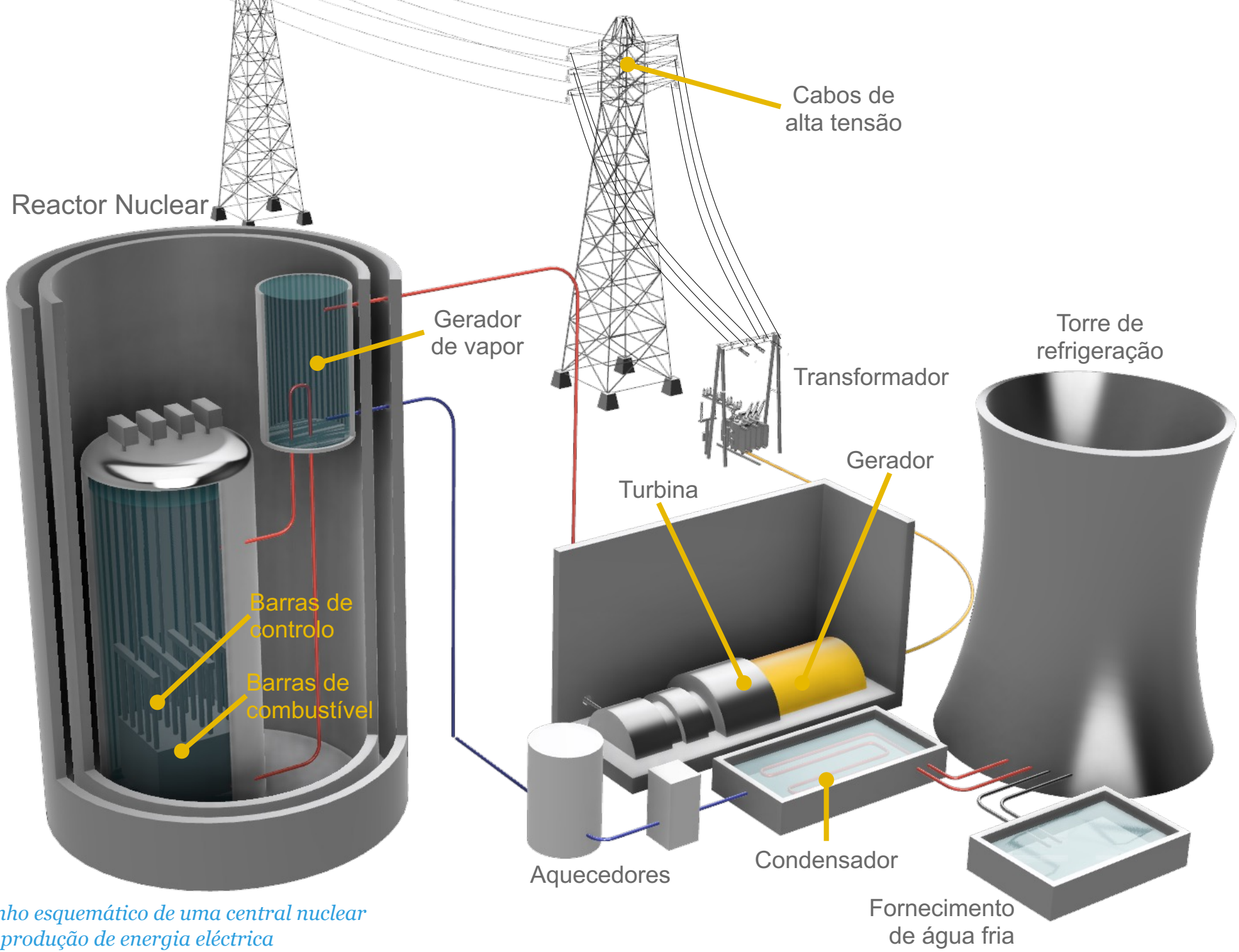
A reacção de fusão nuclear liberta 4000000 vezes mais energia que a queima de combustíveis fósseis



Núcleo do Reactor Português de Investigação (RPI) em operação. O RPI encerrou em 2018.

+ *Fissão Nuclear*

2.1



Desenho esquemático de uma central nuclear para produção de energia eléctrica

Como funciona uma central de fissão nuclear?

Um reactor nuclear produz energia de forma similar aos restantes reactores para produção de energia eléctrica. *A diferença apenas reside na forma como o calor é produzido.*

As centrais de carvão, petróleo ou gás natural queimam combustíveis fósseis para gerar calor. A fonte de calor no caso das centrais nucleares são as reacções de fissão nuclear que ocorrem no núcleo do reactor, que contém o combustível nuclear, Urânio. Numa central nuclear os neutrões colidem com os átomos de Urânio, cindindo-os. A cisão liberta neutrões que por sua vez colidem com outros átomos causando uma reacção em cadeia. O Urânio é processado em pequenos grânulos (pellets) de cerâmica e empilhados em tubos de metal selados, denominadas hastes/barras de combustível. Normalmente, mais de 200 dessas hastes são agrupadas para formar um conjunto de combustível. Um núcleo de reactor é normalmente composto de algumas centenas de conjuntos, dependendo do nível de potência. Dentro da câmara do reactor, as barras de combustível são imersas em água que actua como refrigerante e moderador. O moderador ajuda a desacelerar os neutrões produzidos pela fissão para sustentar a reacção em cadeia. A reacção em cadeia é controlada através de barras moderadoras que absorvem os neutrões. As hastes de controlo/barras moderadoras podem ser inseridas no núcleo do reactor para reduzir a taxa de reacção ou retiradas para aumentá-la.

Quando os núcleos de Urânio cindem é libertada uma enorme quantidade de energia (parte sob a forma de radiação mas na sua maioria sob a forma de energia cinética). No núcleo dos reactores esta energia que aquece água até cerca de 270º C produzindo vapor. O pressão do vapor é usado para fazer funcionar turbinas ligadas a geradores que produzem a electricidade. O vapor é arrefecido até condensar em água numa estrutura separada denominada de chaminé de coluna de refrigeração ou usam a água de lagos, rios ou do oceano. A água arrefecida é reutilizada para produzir novamente vapor

Actualmente a fissão nuclear, é a única forma de produzir electricidade capaz de providenciar uma potência constante, conhecida como potência de base, de forma fiável e sem emitir gases causadores de efeito de estufa.

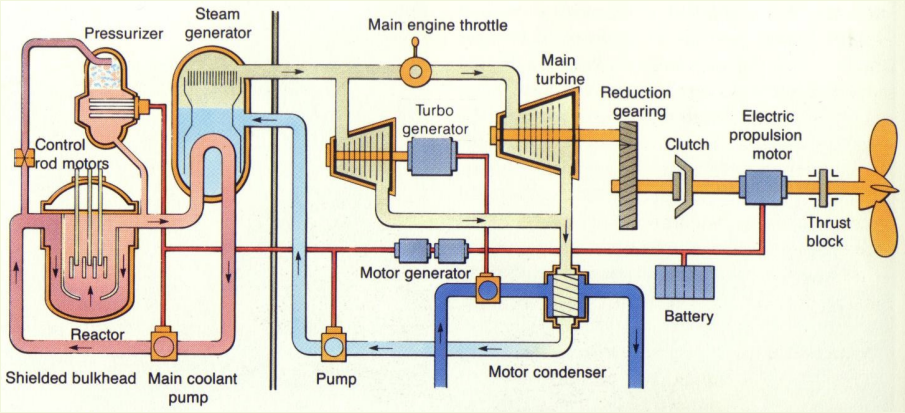
Urânio

O combustível dos reactores de fissão nuclear é o Urânio enriquecido (3 % to 4 % U235). O Urânio é abundante na Terra (Portugal já teve minas de Urânio na zona da Urgeiriça no distrito de Castelo Branco). O decaímento do Urânio quando cinde ou decai liberta calor que aquece a crosta terrestre. Um processo similar acontece no interior dos reactores. O Urânio enriquecido, produzido em centrais de enriquecimento, é convertido

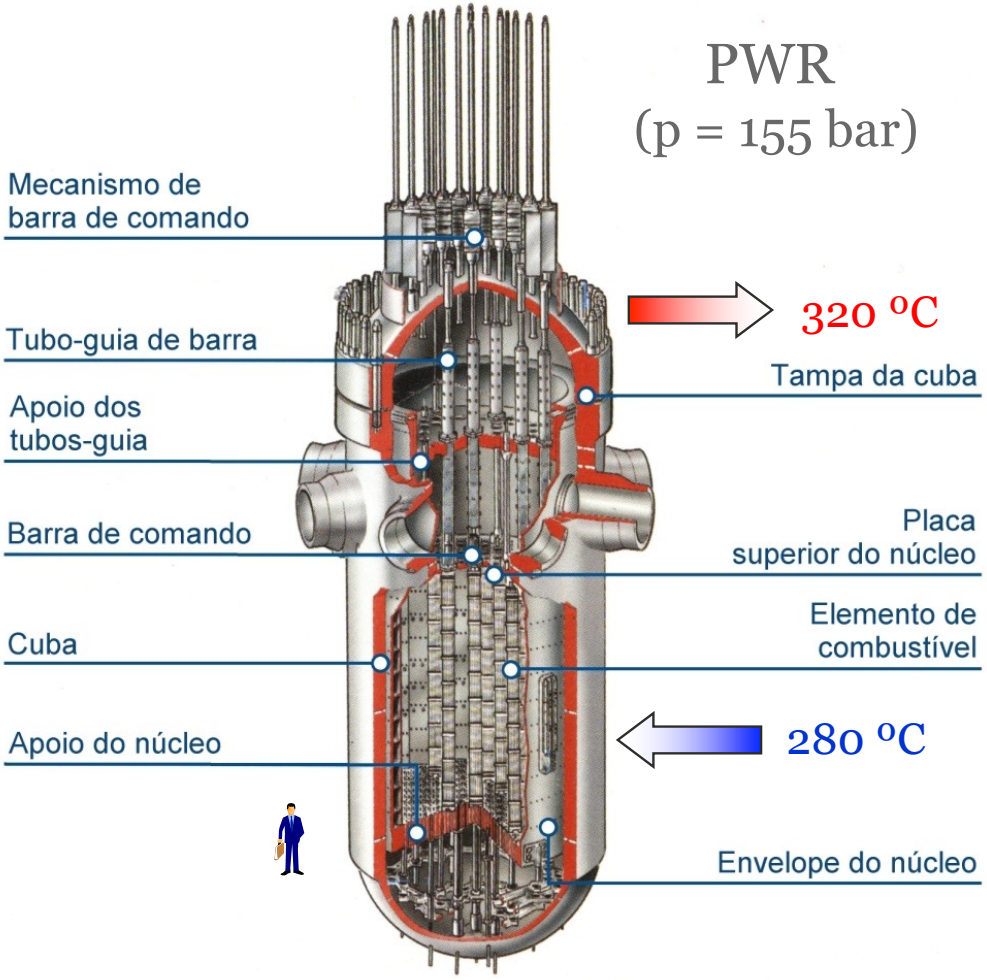




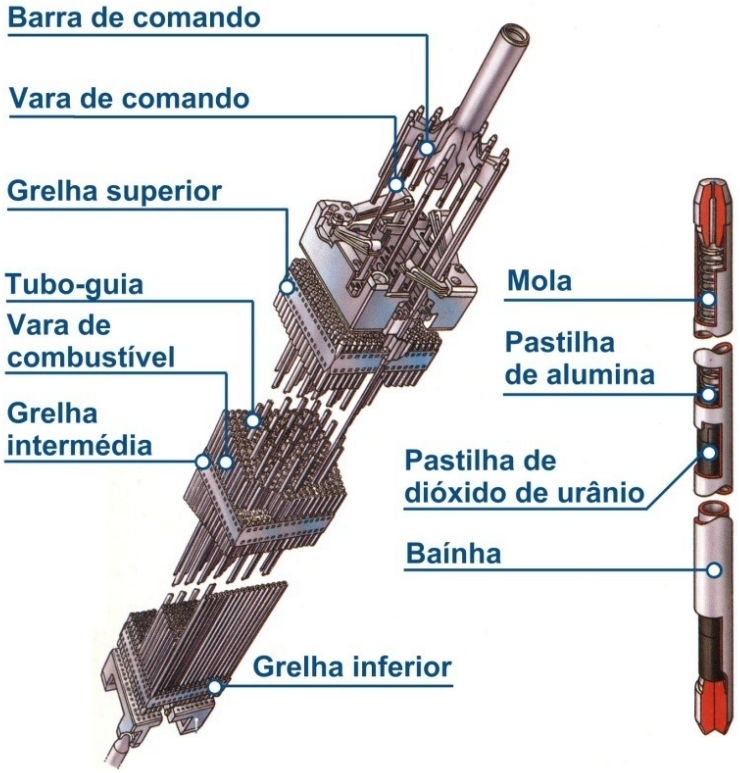




Reactores de fissão nuclear são também usados em porta-aviões, navios e submarinos. O princípio de funcionamente é o mesmo, sendo a electricidade gerada usada para fazer funcionar as hélices.



(12×4×0,2) m³



(4×0,2×0,2) m³

1 cm ∅
(264 pellets of UO_2)

Desenho esquemático de um reactor de água pressurizado (Pressurized Water Reactor - PWR)

em pellets de combustível de cerâmica com milhões de núcleos de Urânio. O óxido de Urânio é pressionado para formar pellets (pequenos cilindros). Cada pellet produz a mesma quantidade de energia que 560 litros de petróleo. As pellets são empilhadas em tubos metálicos de cerca de 1 cm de diâmetro e cerca de 3.7 a 5 metros. Estes tubos são geralmente feitos duma liga de zircónio, que tem as propriedades benéficas de ter um ponto de fusão elevado, alta resistência à corrosão química, vibrações e impactos. Estas ligas também são essencialmente transparentes para os neutrões, o que significa que não interferem de maneira perceptível na reação em cadeia da fissão nuclear do reator. As barras de combustível contêm um grande número de pastilhas de combustível de cerâmica individuais, que após o enchimento são lavadas e finalmente preenchidas com gás hélio pressurizado a alguns MPa (Mega Pascais). Algum espaço permanece entre as tampas e os pellets de combustível que geralmente é preenchido com uma mola que fornece compressão à pilha de pellets. Estas hastes individuais são então fixadas em uma estrutura de aço, o que permite que tipos de hastes individuais (combustível, moderador, slots vazios) sejam controlados conforme exigido pelo reator alvo. Por exemplo, o combustível para o reactores de água pressurizada (PWR) é construído com um arranjo em treliça quadrada e os conjuntos são caracterizados pelo número de hastes que contêm, normalmente, 17 × 17 nos reactores recentes. Um conjunto de combustível PWR tem entre quatro e cinco metros de altura, tem cerca de 20 cm de diâmetro e pesa cerca de meia tonelada. O conjunto possui posições de haste vazias – espaço restante para a inserção vertical de uma haste de controlo. Um núcleo PWR de 1100 MWe pode conter 193 conjuntos de combustível compostos por mais de 50.000 barras de combustível e cerca de 18 milhões de pellets de combustível. Uma vez carregado, o combustível permanece no núcleo por vários anos, dependendo do ciclo operacional. Durante o reabastecimento, a cada 12 a 18 meses, parte do combustível - geralmente um terço ou um quarto do núcleo - é removido para armazenamento, enquanto o restante é reorganizado em um local no núcleo mais adequado ao nível restante de enriquecimento. Como a fissão ocorre em taxas diferentes dentro núcleo do reactor, as barras de combustível são movidas dentro do reactor ao longo de vários ciclos de reabastecimento antes de serem consideradas gastas. Uma haste de combustível pode permanecer dentro de um reactor até cinco anos antes de ser substituída. Dentro do reactor as células de combustível estão imersas em água que funciona como refrigerante e como moderador dos neutrões. O moderador ajuda a travar os neutrões produzidos nas reacções de fusão para conter a reacção em cadeia.

Barras de controlo podem ser inseridas no núcleo do reactor para reduzir a taxa de reacção ou retiradas para aumentar a taxa de reacção.

Tipos de reactor nuclear

Existem vários tipos de reactores nucleares. Os mais comuns são :
Reactor de água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor): Os reactores de água pressurizada (PWRs) são o tipo mais comum de reactor nuclear, representando dois terços da capacidade de geração nuclear instalada actualmente em todo o mundo. Um núcleo PWR usa água normal como moderador e refrigerante primário, mantido sob pressão considerável (cerca de 10 MPa) para evitar que ferva, e a sua temperatura aumenta para cerca de 330°C após a sua passagem ascendente pelo combustível. A água super-aquecida é transportada para um gerador de vapor, o permutador de calor, constituído por muitos pequenos tubos. O calor destes tubos é usado para transformar um outro volume de água, isolado, em vapor que por sua vez irá fazer funcionar a turbina. A água do reactor é bombeada de volta ao núcleo do reactor e reaquecida. O vapor das turbinas é arrefecido num condensador e a água resultante é reenviada para o gerador de vapor. Este é o reactor mais comum.
Reactores de água fervente (BWR - boiling water reactors) nos quais a àgua é aquecida e produzem vapor directamente dentro do núcleo do reactor. A água é bombeada através do núcleo do reactor e aquecida. Os tubos enviam o vapor directamente para a turbina para produzir electricidade. O vapor é posteriormente condensado de volta para o estado líquido e reutilizado no processo de aquecimento.

Existem ainda outros tipos de reactores: Reactor avançado arrefecido a gás (AGR - Advanced gas-cooled reactor); LWGR – Lightwater graphite-moderated reactor; Reactor de Neutrões Rápidos (FNR - Fast neutron reactor); Reactor arrefecido a gás de alta temperatura (HGTR - High temperature gas-cooled reactor); Reactores de sal derretido (MSR - Molten Salt Reactors); e Reactores estimulados por aceleradores (ADS **-** Accelerator Driven Reactors).

Prospecção de Urânio

O Urânio não é um mineral abundante constituindo apenas 2 partes por milhão na crosta terrestre, mas por ser radioactivo é uma fonte de abundante de energia .

1 kg de Urânio produz tanta energia como a queima de 3 toneladas de carvão.

Os elementos radioactivos decaem gradualmente perdendo a sua radioactividade. O tempo necessário para

perder metade da radioactividade denominado de tempo de meia-vida. O U-238, a forma mais comum de Urânio, tem um tempo de meia-vida de 4.5 biliões de anos. O Urânio pode ser encontrado em várias formações geológicas e na água do mar. No entanto, para ser utilizado como combustível deve estar suficientemente concentrado, sendo pelo menos 1 parte por milhão (0.01%) da rocha onde é encontrado. A prospecção é similar ao carvão podendo fazer-se em minas ou em poços a céu aberto. 99% do Urânio é U-238. Infelizmente o usado nas centrais nucleares é U-235. O U-238 pode ser processado em Plutónio que também é cindível.

Em comparação com outras matérias-primas, como o Cobalto, os recursos mundiais de Urânio estão distribuídos de forma razoavelmente ampla.

O Cazaquistão produz mais de 40% da oferta global, seguido pelo Canadá (12,6%), Austrália (12,1%) e Namíbia (10%). A Rússia é um produtor menor, produzindo cerca de 5%, enquanto os EUA e a Europa produzem menos de 1%. As reservas de Urânio da Rússia são modestas em comparação com as reservas conhecidas de países como Austrália (27.5%) de acordo com dados de 2019 do GlobalData Mining. No entanto, grande parte do Urânio moído do Cazaquistão viaja pela Rússia antes de ser exportado para os mercados globais. Outras partes da cadeia de fornecimento também passam pela Rússia.

Produção de combustível nuclear

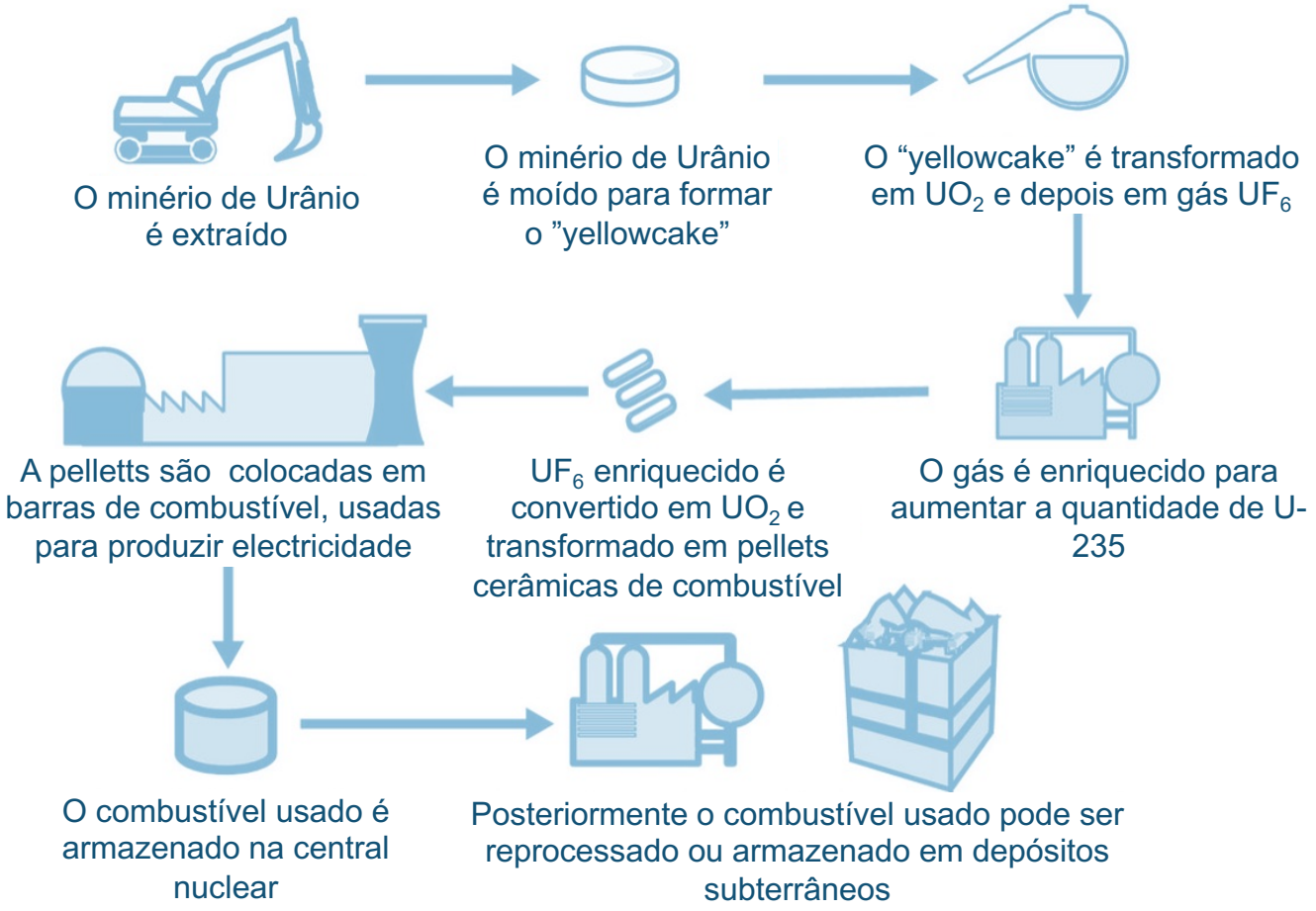
A conversão, enriquecimento e fabricação de Urânio são processos técnicos sofisticados que são tratados em um pequeno número de instalações em todo o mundo. A produção de combustível nuclear envolve cinco etapas:

- O minério de urânio bruto, que geralmente contém menos de 2% de urânio, é extraído do solo.
- Uma vez minerado a escória de Urânio é enviada para uma central de processamento onde é concentrado para se tornar combustível das centrais. O minério é moído para separar o urânio de outros materiais, gerando um pó chamado “yellowcake” (bolo amarelo) que é fabricado lavando o Urânio da escória recorrendo a ácidos. O bolo amarelo contém tipicamente 70% a 90% de octóxido de triurânio (U_3O_8) em peso. Existem outros óxidos como o dióxido de urânio (UO_2) e o trióxido de urânio (UO_3).
- O Yellowcake é quimicamente convertido em hexafluoreto de Urânio gasoso.
- O hexafluoreto de Urânio é processado para aumentar sua concentração de urânio-235, que pode ser dividido em reactores para produzir grandes

quantidades de energia. O U-235 representa apenas 0,7% do Urânio natural. O enriquecimento para combustível de reactor comercial aumenta a sua concentração, geralmente até 5%.

- O Urânio enriquecido é transformado em pellets que são usadas para fabricar as barras de combustível para reactores.

Os combustíveis para reactores nucleares são altamente especializados e vinculados a projetos específicos de reactores. Comprar um reactor comercial dum fornecedor como a Rosatom, empresa nuclear estatal russa, ou a empresa francesa Framatome, pode levar a décadas de dependência de fornecimento do combustível embora comecem a existir vários exemplos de reactores onde o combustível passou a ser providenciado por fornecedores diferentes. Por exemplo na Ucrânia cários reactores cortaram o vínculo com a Rosatom e passaram a receber combustível fabricado pela Westinghouse.



O ciclo da vida do combustível de Urânio (Créditos: National Energy Education Development Project)



Óxido de Urânio, produzido a partir do "yellowcake", é a forma combustível do Urânio usada em reactores nucleares (Crédito: Shamil Zhumatov/Reuters)

Todos estes factores tornam as cadeias de fornecimento nuclear mais complexas, menos competitivas e mais difíceis de mudar rapidamente do que outros tipos de energia, como petróleo e gás. Como os materiais e tecnologias essenciais para a energia nuclear civil também podem ser usados para produzir materiais nucleares utilizáveis em armas, as vendas internacionais de energia nuclear estão sujeitas a controles rígidos de exportação e restrições comerciais. Apenas um número reduzido de instalações no mundo converte Urânio moído em hexafluoreto de Urânio. Grandes instalações comerciais de enriquecimento estão em operação na França, Alemanha, Holanda, Reino Unido, EUA e Rússia, instalações menores existem em outros lugares. Novas instalações estão a ser construídas em França e nos EUA e várias instalações estão a adicionar capacidade. A capacidade da China está a expandir-se consideravelmente, de acordo com as necessidades domésticas.

Com capacidade excedente, as centrais russas produzem urânio de baixo enriquecimento para venda. A Rússia produziu aproximadamente um terço do fornecimento de 2020, grande parte feito com Urânio do Cazaquistão. A Rússia também tem 43% da capacidade global de enriquecimento, seguida pela Europa (cerca de 33%), China (16%) e EUA (7%). Há alguma capacidade parada nos EUA e na Europa, e a China está a expandir-se.

Será o Tório uma alternativa ao Urânio?

O desenvolvimento de um ciclo de combustível à base de Tório tem sido uma perspectiva tentadora desde há muitos anos uma vez que o Tório é mais abundante na natureza do que o Urânio. Extrair o seu valor de forma economicamente viável continua a ser um desafio e exigirá um investimento considerável em I&D. O Tório é fértil em vez de físsil, e só pode ser usado como combustível em conjunto com um material físsil, como o Plutónio reciclado. Os combustíveis de tório podem produzir urânio-233 físsil para ser usado em vários tipos de reactores nucleares. Os reactores de sal fundido são adequados para o combustível de Tório, pois evita a fabricação normal de combustível. Os ciclos de combustível de Tório oferecem recursos atraentes, incluindo níveis mais baixos de geração de resíduos, menos elementos transurânicos nesses resíduos e uma opção de diversificação para o fornecimento de combustível nuclear. Além disso, o uso de Tório na maioria dos tipos de reactores proporciona margens de segurança extras. Apesar desses méritos, a comercialização de combustíveis de Tório enfrenta alguns obstáculos económicos significativos que não incentivam a realização de mais trabalho de desenvolvimento. Uma grande quantidade de testes, análises e trabalhos de licenciamento e qualificação serão necessários antes que qualquer combustível de Tório possa entrar em serviço. Actualmente o Urânio é abundante e barato e representa apenas uma pequena parte do custo da geração de electricidade nuclear, de modo que não há incentivos reais para o investimento num novo tipo de combustível que possa economizar recursos de Urânio. Outros impedimentos para o desenvolvimento do ciclo de combustível de Tório são o custo mais elevado do fabrico do combustível e o custo de reprocessamento para fornecer o material de Plutónio físsil. O elevado custo de fabricação de combustível (para combustível sólido) deve-se em parte ao elevado nível de radioatividade que se acumula no U-233 quimicamente separado do combustível de Tório irradiado.



Os 7 pilares da segurança nuclear

É essencial que as instalações nucleares sejam operadas com segurança sob todas as condições. Para tal é fundamental o total cumprimento dos 7 pilares da segurança nuclear.

A segurança nuclear é definida pela Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA) como "A obtenção de condições operacionais adequadas, prevenção de acidentes ou mitigação das consequências de acidentes, resultando na proteção dos trabalhadores, do público e do meio ambiente contra riscos de radiação indevida". A implementação da segurança nuclear assenta em sete pilares que devem ser integralmente respeitados em todos os momentos:

- A integridade física das instalações, sejam reactores, tanques de combustível ou depósitos de resíduos radioativos, deve ser mantida;
- Todos os sistemas e equipamentos de segurança e proteção devem estar sempre em pleno funcionamento;
- O pessoal operacional deve ser capaz de cumprir suas funções de segurança e proteção e ter a capacidade de tomar decisões livres de pressões indevidas;
- Deve haver fornecimento seguro de energia externa da rede para todas as instalações nucleares;
- Deve haver cadeias de suprimentos logísticas ininterruptas e transporte de e para os locais;
- Deve haver sistemas eficazes de monitorização de radiação no local e fora do local e medidas de preparação e resposta a emergências; e
- Deve haver comunicações confiáveis com o regulador e outros.

O âmbito da segurança nuclear e da regulamentação associada abrange todo o 'ciclo do combustível nuclear'. O ciclo do combustível nuclear inclui a extração e o enriquecimento de minérios radioativos, a produção de combustíveis nucleares, o transporte e uso de combustível na operação de centrais nucleares, o reprocessamento de combustível irradiado para recuperar materiais reutilizáveis para mais combustível e o armazenamento de lixo nuclear. Além da gestão de combustível, a segurança nuclear abrange especialmente o projecto, construção, operação e desactivação de todas as instalações nucleares, tais como centrais nucleares e instalações de armazenamento de resíduos. Garantir a segurança nuclear também requer a disponibilidade de pessoal devidamente qualificado, o estabelecimento duma cultura de segurança eficaz nos trabalhadores, o financiamento de investigação sobre questões operacionais e de segurança e um foco adequado na segurança. O trabalho dos reguladores nucleares abrange todos esses aspectos. Em Portugal esta função é desempenhada pela Agência Portuguesa do Ambiente.

O medo dos acidentes nucleares

Desde o início, houve uma forte consciência do perigo potencial tanto da criticidade nuclear quanto da libertação de materiais radioactivos da geração de eletricidade com energia nuclear.

A fissão nuclear é uma forma de produzir energia barata, sem produzir gases de efeito de estufa para a atmosfera e o combustível é abundante e amplamente distribuído geograficamente. Estas vantagens tornam a fissão nuclear atractiva e com um forte potencial para contribuir para as metas da descarbonização. Infelizmente existem vários problemas associados que, independentemente do fundamento, geram um forte receio na população e consequentemente condicionam as decisões políticas. A Humanidade conheceu a energia nuclear de forma traumática, com o bombardeamento de Hiroshima e Nagasaki, seguido dos tempos tensos da Guerra Fria e o medo da proliferação das armas nucleares. A este trauma seguiram-se os acidentes de Chernobyl e Fukushima (antecedidos pelo incidente de Three Mile Islands) e consequentes impactos ambientais, aos quais há que adicionar o problemas da armazenagem dos resíduos radioactivos que ainda hoje levanta muitas dúvidas e receios. No entanto, desde o início da indústria nuclear que houve uma forte consciência doperigo potencial tanto da criticidade nuclear quanto da libertação dos materiais radioactivos resultantes da geração de eletricidade com energia nuclear. Como em outras indústrias, o projecto e a operação de centrais nucleares visam minimizar a probabilidade de acidentes e evitar grandes consequências humanas quando eles ocorrem.

Chernobyl e Fukushima são sem dúvida os dois maiores acidentes nucleares da nossa história. No entanto, no pós-Fukushima a indústria nuclear é uma das mais estritamente regulamentadas a nível mundial. Como resultado, as centrais nucleares foram redesenhadas repensando a segurança e foram estabelecidos novos padrões operacionais internacionais. As instalações nucleares actuais operam seguindo uma abordagem de "defesa em profundidade", que apresenta "equipamentos que evitam distúrbios operacionais ou falhas humanas e erros que se transformam em problemas", monitorização rigorosa e testes regulares de equipamentos, "sistemas redundantes e diversos para controlar danos ao combustível" e manter os danos causados pelo combustível confinados à infraestrutura. As salvaguardas específicas incluem a construção de barreiras físicas entre o núcleo e o ambiente e a criação de sistemas de segurança multicamadas com backups.

Seria fácil assumir que a Ucrânia e o Japão, palcos dos maiores acidentes nucleares de sempre, fossem países onde o nuclear não existisse. No entanto, ambos continuam a apresentar um forte investimento na energia nuclear.



No Japão, em 2022, a escassez de energia e um inverno muito frio tornaram-se os motivos para que o apoio da opinião pública à retoma do uso da energia nuclear ultrapasse os 60%. O primeiro-ministro japonês, Fumio Kishida, anunciou em maio que o país tomará medidas firmes para reiniciar centrais nucleares paradas para estabilizar o fornecimento e os preços de energia. Várias centrais nucleares Nipónicas viram a sua licença de operação estendida, por 20 anos em alguns casos. Às antigas centrais que voltaram a estar ligadas à rede e às que agora operam, o Japão planeia estender a sua frota nuclear com um plano ambicioso onde inclui várias centrais de última geração. Contudo, nenhuma central com o princípio de funcionamento de Fukushima opera hoje em solo Japonês. Todas as centrais actuais são novas, mais robustas, e com protocolos de segurança mais evoluídos. As fatalidades causadas por ambos os acidentes e pelo nuclear no geral são uma gota no oceano quando comparado com as fatalidades causadas por combustíveis fósseis. Para colocar a quantidade de fatalidades em perspectiva, o CDC (“Centers for Disease Control and Prevention”) estimou que 69 trabalhadores faleceram em projetos de extração de crude e gás natural apenas em 2017. O pior acidente em plataformas offshore, Piper Alpha, causou a morte a mais de 160 trabalhadores. O carvão é a fonte de energia com a maior taxa de fatalidades por quantidade de energia produzida: 1230 fatalidades por cada fatalidade causada por energia solar. Este último número inclui mortes causadas por poluição.

Segundo dados oficiais, o nuclear tem uma taxa de fatalidades comparável ao solar, ao eólico, e à energia hídrica.

O acidente de Fukushima foi um momento assustador mas também de mudança na indústria nuclear. No pós-Fukushima a indústria nuclear é uma das mais estritamente regulamentadas a nível mundial e as centrais actuais são mais robustas, e seguem protocolos de segurança mais evoluídos.

3 acidentes nucleares vistos à lupa

Como em outras indústrias, o projeto e a operação de centrais nucleares visam minimizar a probabilidade de acidentes e evitar grandes consequências humanas quando eles ocorrem.

*Three Mile Island**

A Central Nuclear de Three Mile Island, na Pensilvânia nos EUA, era constituída por dois reactores de água pressurizada. TMI-1, um PWR de 800 MWe (775 MWe líquido) que tinha entrado ao serviço em 1974 (e que continua sendo uma das unidades de melhor desempenho nos EUA). O TMI-2 tinha uma potência de 906 MWe (880 MWe líquido) e era practicamente novo no momento do acidente.

Em 1979, num momento em o reactor operava a 97% da sua potência, uma falha no funcionamento do sistema de arrefecimento causou o colapso parcial de um dos dois reactores da central. O acidente começou com uma avaria relativamente pequena no circuito de arrefecimento secundário que fez com que a temperatura no líquido de arrefecimento primário aumentasse. Como resultado o reactor foi desligado automaticamente. Esta a paragem demorou cerca de um segundo. Neste ponto, uma das válvulas do sistema de arrefecimento não fechou devidamente apesar da instrumentação indicar erradamente que a válvula tinha fechado correctamente resultando na drenagem significativa do refrigerante primário resultando que o calor residual de decaimento no núcleo do reactor não foi removido. Os operadores não conseguiram diagnosticar ou responder adequadamente à paragem automática não planeada do reactor. A instrumentação deficiente da sala de controle e o treino de resposta a emergências inadequado provaram ser as causas do acidente. O núcleo do reactor aqueceu o suficiente para derreter cerca de metade do combustível do reactor. Consequentemente, uma quantidade muito pequena de material radioactivo acabou sendo libertada para fora da cúpula de contenção do reactor dias após o acidente.



Barras de combustível derretidas no interior do reactor TMI-2

* https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx

Em resposta ao acidente, houve uma evacuação voluntária em torno da central. Cerca de metade da população local recusou-se a evacuar e aqueles que evacuaram retornaram ao longo do período de três semanas. Não houve mortes ou feridos associados ao acidente.

As cerca de 2 milhões de pessoas que habitavam próximo da central durante o acidente receberam uma exposição à radiação estimada entre um e dez milirems. Esta dose é comparável a um raio-X (embora a exposição seja num período de tempo superior, o que diminui a taxa de pico de dose em comparação com um raio-X). O relatório oficial encomendado pelo presidente Carter concluiu que o efeito mais grave para a saúde resultante do acidente foi o stress que causou, “que foi de curta duração”.

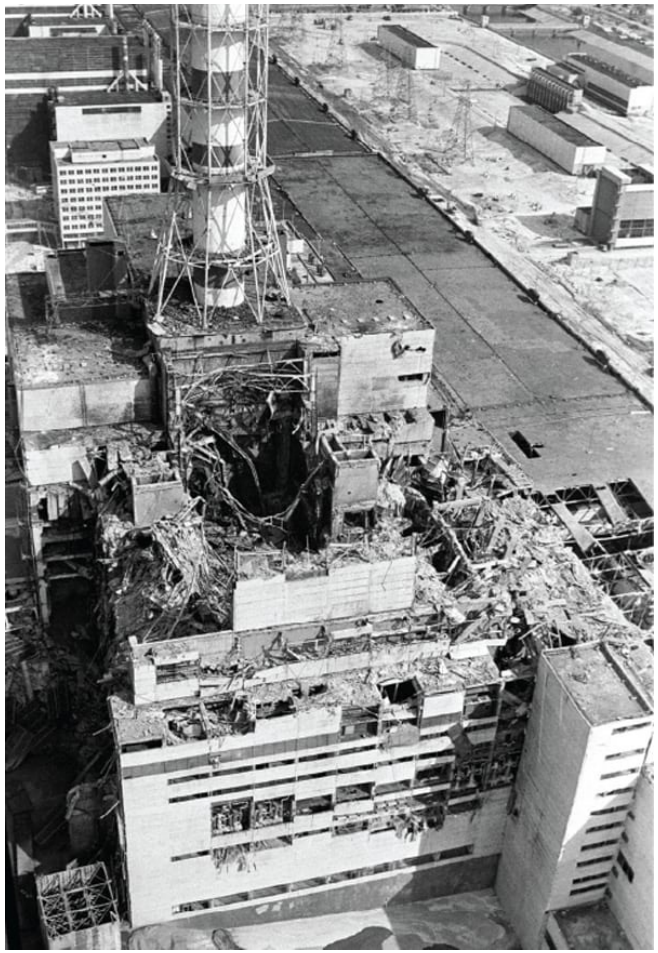
Não houve danos ambientais e no rio próximo porque o contentor do reactor conteve a maioria dos materiais radioativos. Estudos detalhados foram conduzidos pela Comissão Reguladora Nuclear dos EUA, a Agência de Proteção Ambiental e outros grupos estaduais e independentes. Todos concluíram que nenhum impacto ambiental significativo resultou do acidente.

As lições aprendidas com o acidente resultaram numa melhoria contínua e importante no desempenho de todas as centrais nucleares. O acidente também promoveu uma melhor compreensão do derretimento do combustível, incluindo a improbabilidade de um colapso de "Síndrome da China" violando o contentor do reactor e a estrutura de contenção.

Chernobyl[*]

Os reactores da Central de Chernobyl eram reactores do tipo RBMK-1000 de desenho e fabrico soviético. O RMBK-1000 é um reactor tipo tubo de pressão, com moderadores de grafite que usa combustível de dióxido de urânio levemente enriquecido (2% U-235).O acidente de Chernobyl em 1986 resultou de falhas no projecto do reactor, que continha falhas de segurança, e da operação inadequada deste. Houve um acidente de criticidade nuclear que desencadeou uma explosão de vapor no núcleo, causando uma ejecção intensa do material do núcleo superaquecido e combustão extensiva de grafite e materiais do reactor por um longo período de tempo. A libertação não foi confinada porque este tipo de reactor não possuía uma estrutura de contenção conforme o que já à época era comum em todos os reactores dos EUA. Como resultado, a radioatividade teve um caminho

[*] https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx



A Central de Chernobyl após a explosão

aberto directo para o meio ambiente, exponenciado pelo arrastamento nos fumos da combustão da grafite. A explosão de vapor resultante e os incêndios libertaram pelo menos 5% do núcleo radioactivo do reactor para o meio ambiente, com a deposição de materiais radioactivos em muitas partes da Europa. Grandes áreas da Bielorrússia, Ucrânia, Rússia e além foram contaminadas em graus variados.

O acidente destruiu o reator de Chernobyl 4, matando 30 operadores e bombeiros em três meses. Uma pessoa morreu imediatamente e uma segunda morreu no hospital logo depois, como resultado dos ferimentos recebidos. A síndrome aguda da radiação (SAR) foi originalmente diagnosticada em 237 pessoas no local e envolvidas com a limpeza, e posteriormente confirmada em 134 casos. Destes, 28 pessoas morreram como resultado de SAR poucas semanas após o acidente. Mais dezanove trabalhadores morreram posteriormente entre 1987 e 2004, mas as suas mortes não podem ser necessariamente atribuídas à exposição à radiação. Ninguém fora do local sofreu efeitos agudos de radiação, embora uma fracção significativa, mas incerta, dos cancros de tiróide diagnosticados desde o acidente em pacientes que eram crianças na época provavelmente seja devido à ingestão de iodo radioativo libertado no acidente.

A OMS estimou um total de 4000 vitimas em resultado do acidente mas um estudo posterior do Comité Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atómica concluiu que, além de cerca de 5000 cancros de tiroide (resultando em 15 mortes), "não há evidências de um grande impacto na saúde pública atribuível à exposição à radiação 20 anos após o acidente". Cerca de 350.000 pessoas foram evacuadas como resultado do acidente. O desastre de Chernobyl foi um evento único e o único acidente na história



O novo confinamento seguro de Chernobyl é uma estrutura construída em 2016 para confinar os restos da unidade do reator número 4 da Central Nuclear de Chernobyl, na Ucrânia, que foi destruída durante o desastre de Chernobyl em 1986. A estrutura também inclui a Estrutura de contenção temporária (sarcófago) que foi construído em torno do reator imediatamente após o desastre. O novo confinamento seguro foi projectado para evitar a liberação de contaminantes radioativos, proteger o reator de influências externas, facilitar a desmontagem e descomissionamento do reactor e evitar a entrada de água

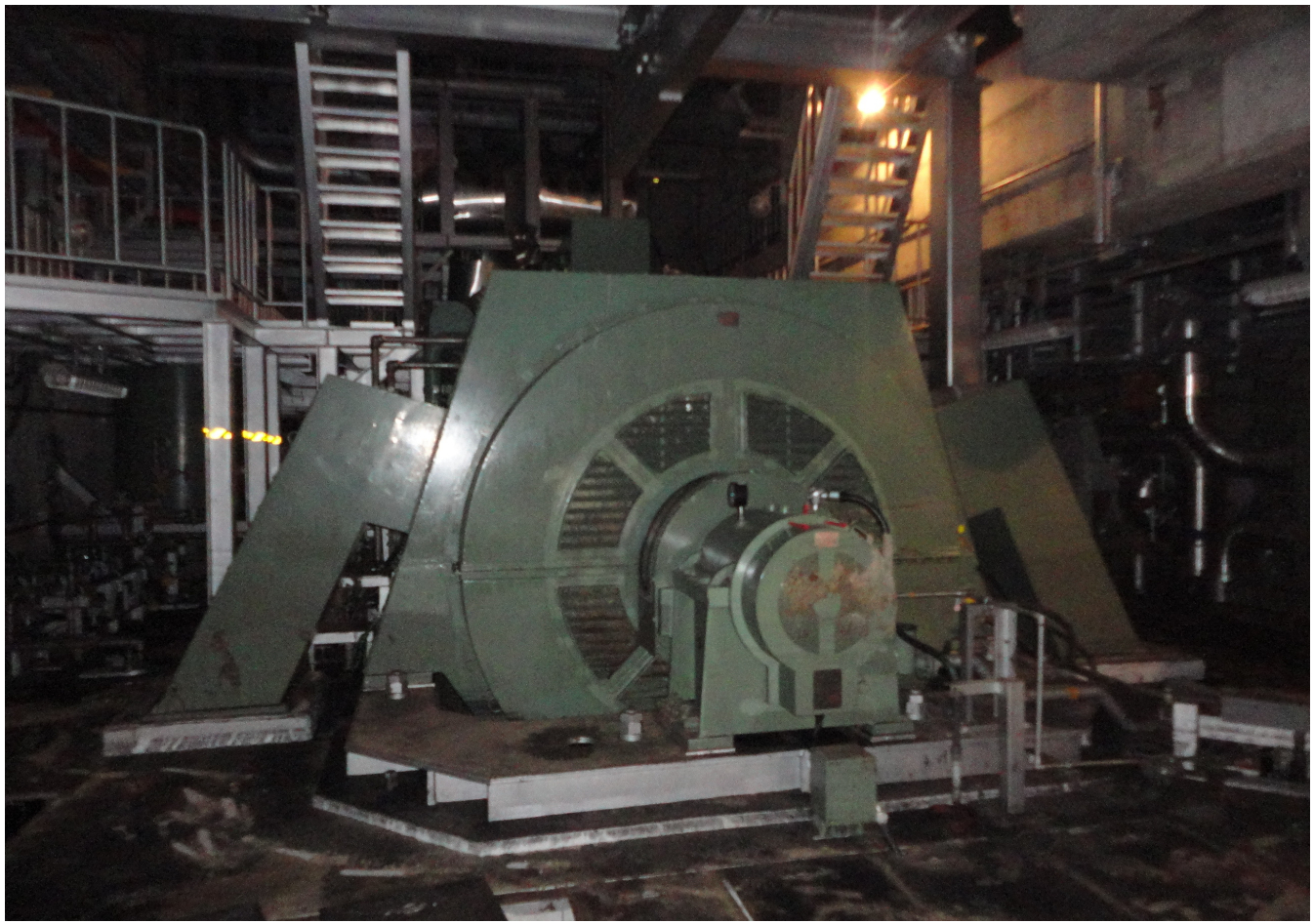
da energia nuclear comercial onde ocorreram fatalidades relacionadas com a radiação. O projeto do reactor era único e, nesse aspecto, o acidente é, portanto, de pouca relevância para o resto da indústria nuclear fora do então Bloco de Leste. Como resultado do acidente foram efectuadas modificações significativas em todos os reatores RBMK em operação para superar deficiências. Actualmente existem ainda 8 reactores deste tipo em operação, todos localizados na Federação Russa. As lições aprendidas também tiveram impacto no desenho de reactores ocidentais posteriores ao acidente.

A unidade 4 de Chernobyl foi fechada numa estrutura de contenção de betão que foi erguido rapidamente (em outubro de 1986) para permitir a operação contínua dos outros reactores. Cerca de 200 toneladas de material altamente radioactivo permanecem no interior, representando um risco ambiental. Uma nova estrutura de confinamento “Novo Confinamento Seguro” foi construído em entre 2021 e 2017. É um arco de 110 metros de altura, 165 metros de comprimento e 260 metros de extensão, que pesa 12800 toneladas e cobre tanto a unidade 4 quanto a estrutura de 1986 que tinha sido construída de emergência. O edifício hermeticamente fechado permitirá aos engenheiros desmontar remotamente a estrutura de 1986 que protegeu os restos do reactor das intempéries desde as semanas após o acidente. Permitirá a eventual remoção dos materiais contendo combustível radioactivo na parte inferior do edifício do reactor e proceder à sua caracterização, compactação e embalagem para descarte .

*Fukushima**

Em março de 2011, o terramoto mais forte já registrado no Japão sacudiu o país por seis minutos. Os reatores próximos ao terramoto, incluindo os que operam em Fukushima Daiichi, foram desligados conforme projectado. No entanto, devido a defesas marítimas insuficientes, os geradores de reserva da Central de Fukushima Daiichi, que deveriam bombear água de arrefecimento através do reactor, foram destruídos por ondas do tsunami de 15 metros (os geradores estavam localizados nas caves que ficaram inundadas). Como resultado, os núcleos das unidades 1-3 derreteram em grande parte nos três dias seguintes, e a acumulação de hidrogénio produzido pela reação do revestimento de combustível quente com água resultou em várias explosões de hidrogénio nas unidades 1, 2 e 4, bem como como a libertação de material nuclear no ambiente circundante.

* https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident.aspx



Gerador diesel de reserva de emergência inundado durante o tsunami. Situação após a catástrofe fotografado em 20 de março de 2011 (créditos: TEPCO)

O acidente de Fukushima libertou 10 vezes menos radiação do que a radiação libertada no acidente de Chernobyl

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA), houve menos libertação atmosférica total de radioatividade do acidente de Fukushima em comparação com Chernobyl devido aos diferentes cenários de acidentes e mecanismos de libertações radioativas. Em Fukushima, não houve explosões dentro dos núcleos. Em vez disso, aquecimento progressivo, oxidação e fusão dos núcleos ocorreram durante um período de tempo muito mais longo. Os produtos radioactivos foram libertados do núcleo muito mais gradualmente, com parte do material radioativo confinado por estruturas de contenção que retiveram parcialmente a radioatividade. O governo japonês agiu rapidamente para implementar

medidas de proteção, evacuando pessoas e interrompendo o envio de alimentos da área. O governo também distribuiu iodeto de potássio para moradores próximos à instalação para evitar a absorção de iodo radioactivo na tiróide. Estas ações limitaram quaisquer efeitos adversos à saúde do acidente. Nenhuma morte por exposição à radiação foi atribuída ao acidente em Fukushima. As doses de radiação a que o público em geral foi exposto durante e após o acidente foram muito baixas. O Comité Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atómica concluiu em 2013 (e reafirmou em 2015 e em 2021) que "não foram observadas mortes ou doenças agudas relacionadas à radiação entre os trabalhadores e o público em geral expostos à radiação do acidente" e que "não é discernível um aumento perceptível de incidência de efeitos na saúde relacionados com a radiação entre membros expostos do público ou seus descendentes". Um estudo separado da Organização Mundial da Saúde chegou a conclusões similares. Não houve efeitos à saúde verificados fora do Japão.

O terramoto de março de 2011 foi o mais grave de que há registo na história do Japão. Mas os terramotos eram esperados na região e o que aconteceu em Fukushima era previsível. O tsunami que rompeu o paredão de Fukushima Daiichi foi um acontecimento de um em mil anos, mas não foi incluído nas simulações que a empresa de eletricidade, TEPCO, utilizou quando construiu a central. Fukushima-Daiichi foi construída a uma altitude de 10 metros, reduzindo o terreno que inicialmente se situava a 35 metros acima do nível do mar para facilitar o transporte de equipamento para o local de construção e a bombagem de água do mar para os sistemas de arrefecimento do reator. Também não foram feitas actualizações quando surgiram novas informações. Em 2002, a TEPCO realizou uma análise que revelou que os riscos de tsunami em Fukushima tinham sido subestimados e que as bombas de água do mar para arrefecer o reator estavam em perigo. A empresa não efectuou quaisquer alterações para responder a esta constatação, nem as suas licenças governamentais exigiram explicitamente alterações em resultado disso. Os funcionários da indústria nuclear japonesa e da agência governamental que a supervisiona concentraram-se nos riscos de terramotos, negligenciando o risco histórico (relacionado) de tsunamis no Japão. Estudos de tsunamis que remontam ao século XV teriam revelado que ondas gigantescas poderiam romper o paredão da central eléctrica. Um terramoto e um tsunami históricos ocorrido em 869 no Japão, também evidenciavam o risco de um tsunami maciço na região. No entanto, o muro da central não foi construído para resistir a ondas com metade da altura das que atingiram Fukushima em março de 2011.



Imagem de 16 de março de 2011 dos quatro prédios dos reactores danificados. Da direita para a esquerda: Unidades 1, 2, 3 e 4.
(Créditos: Digital Globe)

A central de Fukushima exibia várias falhas conhecidas que numa situação extrema causaram o acidente. No entanto, o caso da central de Onagawa, localizada a 60 km do epicentro, é bastante interessante e ilustrativo de como uma cultura de segurança pode evitar um acidente*. As centrais de Fukushima e Onagawa partilharam de condições de catástrofe semelhantes, tipos de reactores nucleares (Boiling Water Reator BWR, Mark I), datas de funcionamento e um regime regulamentar idêntico. A central nuclear de Fukushima Daini foi danificada pelo terramoto e severamente atingida pelo tsunami, mas graças aos esforços heróicos dos seus operadores e à sua improvisação épica conseguiu desligar a frio os seus quatro reactores em funcionamento**. A diferença na intensidade sísmica experimentada por estas centrais nucleares foi mínima, e a altura do tsunami em Onagawa foi maior do que em Fukushima Daiichi no entanto, a central de Onagawa manteve a sua integridade e conseguiu atingir a situação de paragem a frio sem problemas, porque foi contruída numa posição mais elevada em relação ao mar, e tinha outras soluções de engenharia contra o tsunami (o quebramar elevado, e as entradas de água mar adentro) assim como uma cultura de segurança com todos os operadores bastante bem preparados. O artigo referido faz um levantamento exaustivo dos motivos que levaram a que Onagawa seja um exemplo de sucesso, demonstrando que os desastres são construídos ao longo do tempo e o impacto dramático de um perigo como terremoto ou tsunami é apenas um contexto que traz destruição massiva e enorme perda humana. Aprender com a não falha da central nuclear de Onagawa mostra que a segurança sempre deve vir em primeiro lugar na energia nuclear.

Ideias a reter...

Desde o início, houve uma forte consciência do perigo potencial tanto da criticidade nuclear quanto da libertação de materiais radioactivos da geração de eletricidade com energia nuclear. Como em outras indústrias, o projeto e a operação de centrais nucleares visam minimizar a probabilidade de acidentes e evitar consequências humanas quando eles ocorrem. Estes são os únicos grandes acidentes ocorridos em mais de 18500 anos acumulados de operação de reactores de energia nuclear comercial em 36 países.

A evidência ao longo de seis décadas mostra que a energia nuclear é um meio seguro de gerar eletricidade. O risco de acidentes em centrais nucleares é baixo e está em declínio.

* Michaela Ibrion, et al. , Results in Engineering, Volume 8, 2020 , 100185, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100185
** https://hbr.org/2014/07/how-the-other-fukushima-plant-survived

A resiliência de um homem e a central que não cedeu

Em 11 de março de 2011, a central nuclear de Onagawa, situada a norte de Fukushima, foi atingida pelo terramoto e tsunami de Tohoku, e sobreviveu praticamente incólume.

Em 11 de março de 2011, a central nuclear de Onagawa, situada a norte de Fukushima (mais perto do epicentro do terramoto) e gerida por uma empresa de energia diferente, foi atingida pelo terramoto e tsunami de Tohoku (magnitude 9,0). Ao contrário da central nuclear de Fukushima Daiichi, que registou a fusão de três dos seis reactores nucleares da central, os três reactores da central nuclear de Onagawa, que se encontrava mais próxima do epicentro do sismo e suportou um sismo mais forte e o mesmo nível de tsunami, sobreviveram praticamente intactos. Ondas de 13,78 m de altura (12,78 m de altura de onda e 1 m de afundamento de terra) atacaram a central nuclear, mas não a atingiram em 1 m. As suas muralhas marítimas resistiram e a central não sofreu danos perigosos. A central foi encerrada de forma tão segura que serviu de centro de evacuação em Onagawa, onde morreram 827 pessoas. De facto, vários residentes das redondezas, cujas casas tinham sido destruídas pelo tsunami, ficaram no ginásio da central como centro de refugiados.

Após o terramoto os inspectores das Nações Unidas ficaram maravilhados com o facto de a central nuclear mais próxima do epicentro do grande terramoto do Japão ter sobrevivido praticamente intacta, evitando um acidente similar a Fukushima o que deu indicações que havia margens significativas nos projectos". A missão da IAEA à central nuclear de Onagawa apresentou um relatório de 92 páginas ao governo do Japão, após ter recolhido dados sobre a experiência sísmica de 30 de julho a 11 de agosto de 2012 em Onagawa. O relatório* concluiu: *"Apesar de um abalo prolongado do solo e de um nível significativo de energia sísmica introduzida nas [suas] instalações, as estruturas, sistemas e componentes da central nuclear de Onagawa desempenharam as funções previstas sem danos significativos. A ausência de danos graves em todas as classes de instalações de conceção sísmica atesta a robustez destas instalações sob fortes abalos sísmicos."*

Apesar de três centrais nucleares no norte do Japão - Fukushima-Daiichi, Fukushima-Daini e Onagawa - partilharem condições de catástrofe semelhantes, tipos de reactores nucleares e um regime regulamentar idêntico, os seus destinos foram muito diferente. Apesar de estar mais perto do epicentro do terramoto do que Fukushima-Daiichi, Onagawa "foi encerrada em segurança" e "não sofreu danos notáveis", refere o documento. Onagawa fica a cerca de 120 km a norte de Fukushima-Daiichi. Um

* https://www.iaea.org/sites/default/files/iaeamissiononagawa.pdf



Central nuclear de Onagawa em 2012 (Créditos: foto da missão da IAEA a Onagawa NPS)

dos principais factores foi o facto de a central nuclear de Onagawa ter sido construída a 14,8 metros acima do nível do mar, uma vez que as estimativas iniciais apontavam para uma altura média de tsunami de três metros na zona.

A central nuclear de Onagawa, ao contrário de Fukushima Daiichi, tinha sido construída para resistir aos tsunamis. O herói que salvou a central foi um homem há muito falecido chamado Yanosuke Hirai que insistiu para que a central excedesse os requisitos do projeto. Hirai era um engenheiro sénior da companhia de eletricidade. Nascido na província de Miyagi, Hirai tinha plena consciência do quão terríveis podiam ser os terramotos e os tsunamis. Em criança, visitou a cidade onde nasceu e nessa cidade havia um antigo santuário xintoísta. Segundo a lenda, o santuário foi afetado pela inundação do grande tsunami de Jogan do ano 869, que se terá deslocado 7 quilómetros para o

interior a partir da costa, tendo mesmo chegado ao santuário xintoísta Sengan em Iwanuma. Supostamente, Yanosuke Hirai nunca deixou de pensar nessa visita. Quando a central de Oanagawa foi construída, Yanosuke Hirai insistiu para que a central fosse construída mais afastada do mar, numa maior elevação superior à inicialmente proposta, cerca de 15 metros acima do nível do mar, e com um paredão mais alto do que os 12 metros que os outros engenheiros consideravam necessário. Ao contrário da central de Onagawa, a equipa de projeto de Fukushima baixou a elevação da central durante a construção, pela razão lógica de que mais perto do oceano significava menos custos de bombear a água para cima. Além disso, Hirai defendeu um sistema de arrefecimento único que forneceria água mesmo que um tsunami recuasse temporariamente e deixasse a central a seco. Para tal, concebeu uma medida de segurança para a retirada do tsunami: um canal de entrada e um reservatório contendo água do mar suficiente para arrefecer os reactores nucleares durante 40 minutos. A construção dos três reactores nucleares da central nuclear de Onagawa foi concluída em 2002.

A obsessão de Hirai pela segurança foi sempre uma enorme batalha que travou contra a inércia institucional.

Yanosuke Hirai, com base nas suas convicções como engenheiro e no seu sentido de responsabilidade como membro da indústria de energia eléctrica, insistiu na importância de tomar medidas de proteção altamente preventivas contra terramotos e tsunamis. Foi também devido às suas convicções em matéria de segurança que a empresa desenvolveu uma forte cultura de segurança. A empresa efectuou vários estudos e simulações para prever os tsunamis antes do início da construção em 1980. Após a construção, a Tohoku Electric realizou também controlos de segurança periódicos para garantir a segurança da central e das pessoas. Como parte da cultura de segurança, todos os empregados receberam uma formação completa em gestão de catástrofes. Todos trabalhadores de Onagawa estavam familiarizados com os passos a dar quando era emitido um alerta de tsunami ou quando se aproximava um tsunami. Sessões de formação periódicas para relembrar os trabalhadores de situações extremas também permitiam que os trabalhadores se mantivessem "equilibrados" durante uma catástrofe.

Defesa em profundidade

Defesa em profundidade é uma filosofia de segurança que orienta o projeto, construção, inspecção, operação e regulamentação de todas as instalações nucleares.

As centrais nucleares actualmente em operação melhoraram a segurança graças à implementação de mecanismos Defesa em Profundidade. A defesa em profundidade consiste numa abordagem para projectar e operar instalações nucleares que previne e mitiga acidentes que libertam radiação ou materiais perigosos. O princípio central da Defesa em Profundidade é proteger a saúde e a segurança do público e dos trabalhadores da central. Outros objetivos incluem proteger o meio ambiente e garantir a prontidão operacional da instalação. A central possui sistemas de segurança sofisticados e dispositivos para protecção contra erros humanos, falhas de equipamentos e mau funcionamento, levando em consideração fenómenos naturais como terramotos, tornados e inundações.

A chave é criar várias camadas de defesa independentes e redundantes entre a fonte de radiação e o exterior para compensar possíveis falhas humanas e mecânicas, de modo que nenhuma camada única, por mais robusta que seja, seja exclusivamente confiável garantindo que o público e o ambiente continuam protegidos mesmo que uma ou mais dessas barreiras falhe. Esta abordagem reconhece que imperfeições, falhas e eventos imprevistos ocorrerão e devem ser acomodados no projeto, operação e regulamentação das instalações nucleares. A defesa em profundidade é implementado por meio de várias medidas, incluindo barreiras físicas robustas, sistemas de segurança redundantes e diversos, forte segurança física e prontidão para resposta a emergências:

Design e construção: A defesa em profundidade requer um processo de alta qualidade para o projeto, aquisição, fabricação, construção, inspecção, teste e licenciamento de uma instalação nuclear. As leis nacionais e regulamentação internacional regulam todas as etapas desse processo.

Barreiras múltiplas: O conceito de barreiras de protecção refere-se a uma série de barreiras físicas fortes e estanques entre os produtos radioactivos e o meio ambiente. As barreiras impedem a libertação de produtos radioactivos em todas as circunstâncias. O objectivo da defesa em profundidade, é garantir funções básicas de segurança, ou seja, controlar a reactividade, refrigerar o combustível irradiado e conter substâncias radioactivas. Estas funções de segurança são necessárias para garantir que todas as barreiras permaneçam eficazes.

Primeira barreira – Matriz de combustível e revestimento de combustível: O dióxido de urânio é um composto de urânio refractário cerâmico usado como combustível nuclear. Os produtos de fissão num reactor em operação estão contidos em pellets de $U0_2$ que são embalados em elementos de

combustível revestidos que são montados dentro do núcleo do reactor. Tanto a matriz do combustível quanto o revestimento do combustível evitam o escape dos gases do produto da fissão e confinam os fragmentos da fissão durante acidentes anormais e na maioria das vezes. Esta barreira é protegida pelos níveis 1 – 3 de defesa em profundidade.

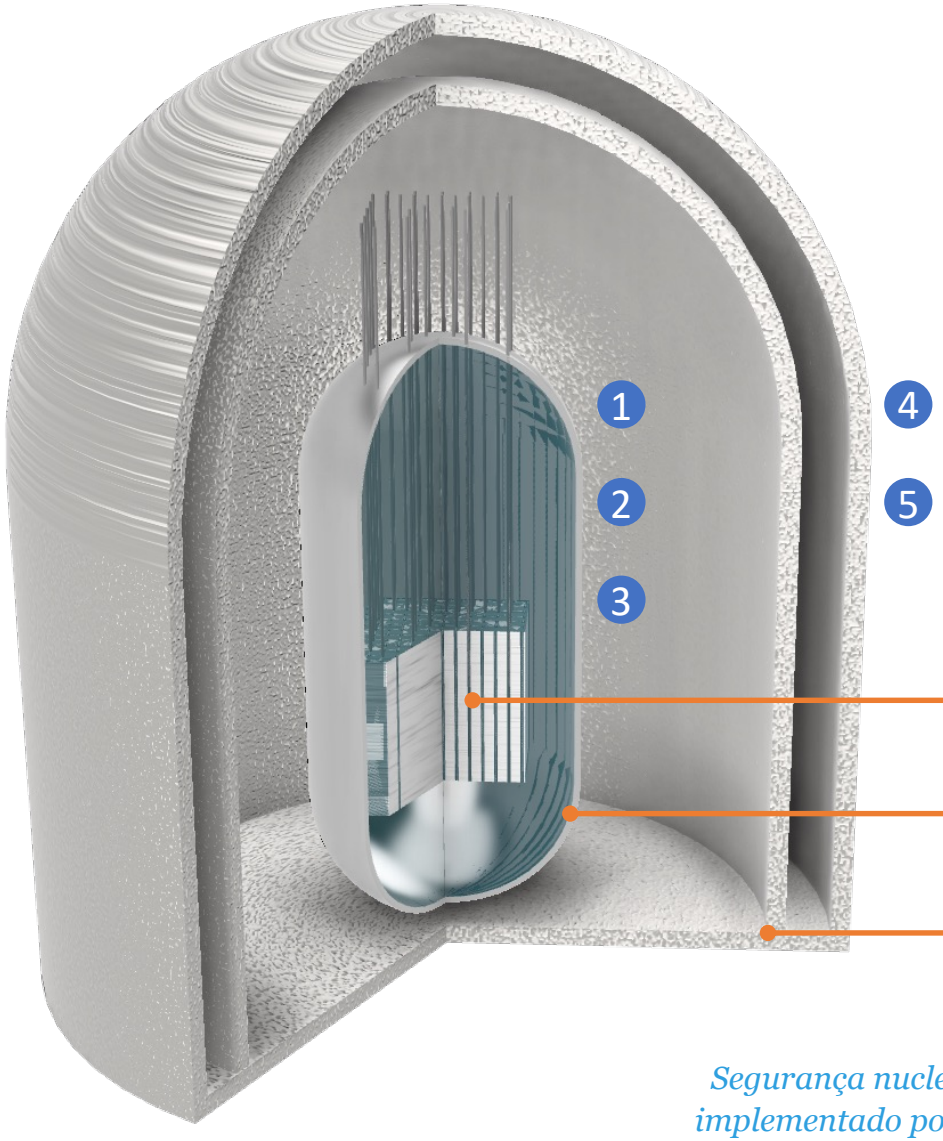
Segunda barreira - Limite do sistema de refrigeração do reactor: O núcleo do reactor está localizado dentro duma câmara de pressão que, por sua vez, está localizada dentro de um edifício de contenção. O circuito primário é um circuito fechado feito de aço espesso. A câmara de pressão do reactor faz parte deste circuito. Os produtos de fissão que escaparam do combustível devem ser confinados por esta segunda barreira. A integridade do circuito primário também é protegida pelos níveis 1 – 3 de defesa em profundidade.

Terceira barreira – Edifício de contenção: O edifício de contenção é projectado principalmente para prevenir ou mitigar a libertação descontrolada de material radioactivo para o meio ambiente em estados operacionais e em condições de acidente no caso de ambas as barreiras primárias e secundárias serem comprometidas. Portanto, é considerada a terceira e última barreira na estratégia de defesa em profundidade. A integridade do edifício de contenção também é protegida pelos níveis 1 a 4 de defesa em profundidade.

Estas três barreiras são projetadas para resistir ao evento mais severo e credível, interno ou externo, para a localização da infraestrutura.

Redundância e Diversidade: Os sistemas projectados que são classificados como importantes para a segurança têm designs muito robustos para garantir a confiabilidade. No entanto, no caso de falha de um componente, a defesa em profundidade exige que vários sistemas de backup estejam disponíveis para substituir a função relacionada à segurança do componente com falha. Além disso, os sistemas de backup são projectados com base em diferentes princípios físicos ou mecanismos para limitar as possibilidades de falhas de modo comum.

Manutenção e Operações: Testes de instalações e procedimentos de manutenção são implementados para garantir que cada sistema individual opere para fornecer a função pretendida. Para sistemas relacionados com a segurança, as operações normais da instalação não são permitidas, a menos que recursos de backup suficientes estejam disponíveis. Além de apoiar a Defesa em Profundidade, os procedimentos adequados de manutenção e operação ajudam a garantir uma operação confiável e económica da instalação.



Barreiras conceptuais

1. **Nível 1** - Prevenção de avarias operacionais e falhas do sistema
2. **Nível 2** - Controlo de avarias operacionais e detecção de falhas
3. **Nível 3** - Gestão abrangente de acidentes
4. **Nível 4 -** Gestão abrangente de condições severas
5. **Nível 5** – Planeamento da resposta a situações de emergência

Barreiras físicas

Primeira barreira – Matriz de combustível e revestimento do combustível

Segunda barreira – Perímetro do sistema de refrigeração

Terceira barreira – Edifício de contenção

Segurança nuclear – os princípios da defesa em profundidade. A defesa em profundidade é implementado por meio de várias medidas, incluindo barreiras físicas robustas, sistemas de segurança redundantes e forte segurança física e prontidão para resposta a emergências:

Segurança física: Mesmo antes do 11 de setembro, a segurança física era um componente importante da Defesa em Profundidade. Uma revisão pós-11 de setembro de segurança física enfatizou a natureza fortemente interconectada da segurança das instalações, segurança física e preparação para emergências. Embora não fossem necessárias grandes mudanças, foram feitos aprimoramentos para melhorar os controlos de acesso, os requisitos de treino, os exercícios de segurança e as capacidades defensivas.

Preparação para Emergências: A preparação para emergências inclui comunicações, abrigo, evacuação e planos de resposta. As instalações nucleares coordenam-se com as autoridades locais, nacionais e internacionais para garantir que os planos de preparação para emergências sejam bem definidos e testados periodicamente por meio de exercícios de treino. Os planos de preparação para emergências são um requisito de licenciamento para todas as instalações nucleares.

Níveis da Defesa em profundidade

A formulação da IAEA compreende cinco níveis diferentes de defesa. Estes níveis correspondem ao seguinte:

- Evitar desvios da operação normal
- Detectar e controlar desvios
- Incorporar recursos de segurança, sistemas de segurança e procedimentos para evitar danos ao núcleo
- Mitigar as consequências dos acidentes
- Mitigar as consequências radiológicas

Na formulação da IAEA, a defesa em profundidade deve ser aplicada a todas as atividades relacionadas à segurança, sejam organizacionais, comportamentais ou relacionadas ao design, e sejam em plena potência, baixa potência ou vários estados de paragem. Isto visa garantir que todas as actividades relacionadas com a segurança estejam sujeitas a camadas independentes de procedimentos, de modo que, se ocorrer uma falha, ela seja detectada e compensada ou corrigida por medidas apropriadas

Nível 1– Prevenção de avarias operacionais e falhas do sistema: O primeiro nível de defesa aborda a prevenção de acidentes por meio do projecto da instalação, incluindo garantia de qualidade, redundância, separação, teste e inspecção. A instalação é projetada e construída para operar como pretendido com um alto grau de confiabilidade. Coeficientes de reactividade negativos que levam a condições de operação inerentemente estáveis, margens de segurança no projecto, desempenho de materiais confiáveis e conhecidos em estruturas e componentes, instrumentação e

controlo adequados, e assim por diante, estão entre as medidas preventivas empregadas no projeto de reatores.

Nível 2 – Controlo de avarias operacionais e detecção de falhas: O nível 2 incorpora características inerentes à instalação, como estabilidade do núcleo e inércia térmica, e sistemas de controlo de operação anormal (ocorrências operacionais antecipadas), levando em consideração fenómenos capazes de causar maior deterioração no estado da instalação. Isto inclui funções automáticas e sistemas de controlo que podem retornar a instalação ao seu modo de operação normal o mais rápido possível. Os sistemas para mitigar as consequências de tais ocorrências operacionais são projectados de acordo com critérios específicos (como redundância, organização e qualificação).

Nível 3 - Gestão abrangente de acidentes: Apesar das provisões para prevenção, podem ocorrer condições de acidentes. Recursos de segurança projectados e sistemas de protecção são fornecidos para evitar a evolução para acidentes graves e também para confinar materiais radioactivos dentro do sistema de contenção. As medidas tomadas a este nível destinam-se, em particular, a prevenir danos no núcleo. Os procedimentos de projecto e operação também visam manter a eficácia das barreiras, especialmente a contenção. Por exemplo, o sistema de resfriamento central de emergência (ECCS) é fornecido para mitigar as consequências de um acidente com perda de refrigerante (LOCA), mesmo que o primeiro nível de defesa torne tal ocorrência altamente improvável.

Nível 4 - Gestão abrangente de condições severas: Além de engenharia e procedimentos que reduzem o risco e a gravidade dos acidentes, todas as instalações possuem diretrizes para gestão ou mitigação de acidentes graves. Tais condições da instalação podem ser causadas por falhas múltiplas, como a perda completa de todos os conjuntos de um sistema de segurança, ou por um evento extremamente improvável, como uma inundação severa. Este nível de defesa em profundidade inclui procedimentos e equipamentos utilizados para lidar com situações que não são cobertas pelos três primeiros níveis de defesa em profundidade; estes são acidentes que podem resultar no derretimento do núcleo do reator. No nível 4, o objetivo geral é garantir que a probabilidade de um acidente que implique danos graves no núcleo e a magnitude das emissões radioactivas no caso improvável de ocorrer uma condição grave da instalação sejam mantidas tão baixas quanto razoavelmente possível. O objetivo mais importante para a mitigação das consequências de um acidente no Nível 4 é a proteção do confinamento. As funções que protegem a contenção, como

contenção da refrigeração, controlo de penetração e recombinadores de hidrogénio são normalmente projetadas e analisadas com os mesmos padrões conservadores dos recursos de segurança projetados.

Nível 5 – Planeamento da resposta a situações de emergência para limitar as consequências da radiação no caso de libertações radioactivas: Apesar de todas as medidas descritas acima, em situações muito extraordinárias podem ocorrer libertações radioactivas. A segurança nuclear não pode excluir esta probabilidade, mas esta probabilidade é muito baixa. As medidas para proteger o público das emissões radioactivas incluem planos de emergência regionais preparados para cada local. As autoridades públicas implementam o plano de emergência regional, que organiza operações de emergência para limitar a exposição pública à radiação em caso de emissões.

Nível	Objectivo	Medida Principal
1	Prevenção de avarias operacionais e falhas do sistema	Design conservador e elevada qualidade de construção e operação
2	Controlo de avarias operacionais e detecção de falhas	Sistemas para controlo, protecção e revisão (para manter a infraestrutura dentro dos seus parâmetros operacionais normais) e monitorização (prevenção de falhas)
3	Gestão abrangente de acidentes (incluindo acidentes relacionados com o design)	Projecto de mecanismos de segurança e procedimentos em caso de acidente
4	Gestão abrangente de condições severas, prevenções do progresso do acidente e mitigação das consequências	Medidas complementares e gestão de acidentes
5	Planeamento da resposta a situações de emergência para limitar as consequências da radiação no caso de libertações radioactivas	Plano de emergência para além do perímetro da infraestrutura (zona envolvente)

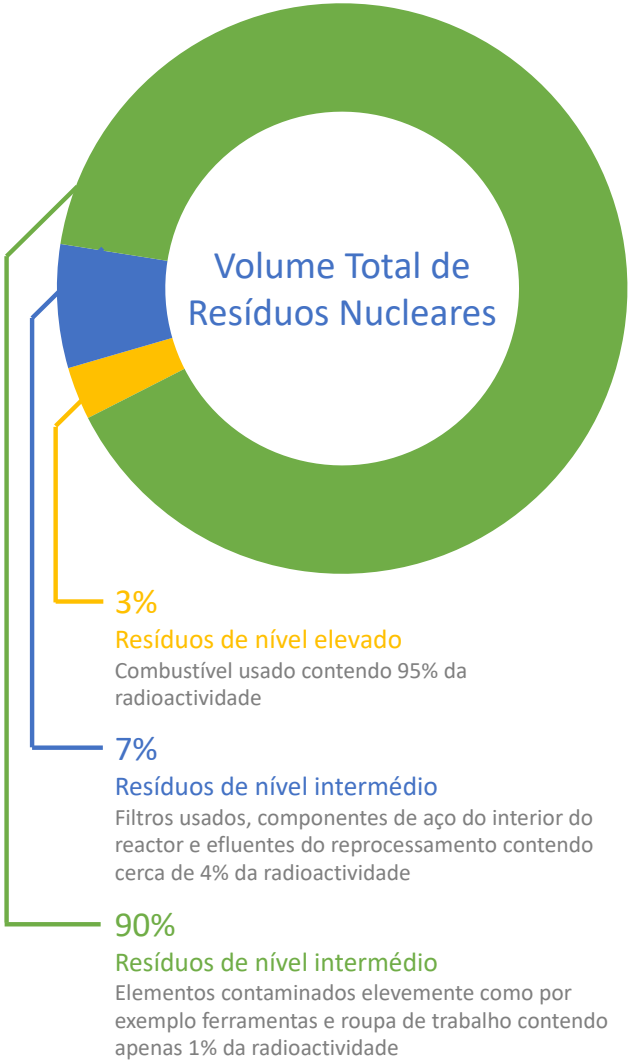
Os níveis de defesa em profundidade e as medidas principais

O receio dos resíduos nucleares

A eletricidade gerada a partir de reatores nucleares resulta numa pequena quantidade de resíduos e estes têm sido geridos com responsabilidade desde o início da energia nuclear civil.

Um dos receios frequentemente associado ao nuclear está relacionado com os resíduos radioactivos. Como todas as indústrias e tecnologias de produção de energia, o uso de energia nuclear resulta em alguns resíduos. No entanto, um aspecto positivo da energia nuclear é que os volumes de resíduos são pequenos, podem ser geridos de maneira rigorosa e a indústria nuclear desenvolveu, e implementou, a maioria das tecnologias necessárias para a disposição final de todos os resíduos que produz. A questão restante é a aceitação pública e não a viabilidade tecnológica. Os resíduos radioactivos (ou nucleares) são o resultado de reactores nucleares, mas também das centrais de processamento de combustível, hospitais e infraestruturas de investigação. São também gerados resíduos durante o encerramento e desmantelamento de reactores e outras instalações nucleares. Existem três tipos de resíduos nucleares, classificados de acordo com sua radioatividade: baixo, intermediário e alto nível.

Os resíduos de baixa actividade resultam de aplicações médicas, académicas e industriais e outros usos comerciais de materiais radioactivos. Os resíduos da extracção de Urânio, efluentes da fabricação e reprocessamento do combustível, equipamentos e roupas contaminadas e algum do material resultante do desmantelamento duma central nuclear também são resíduos de baixa e média actividade. Numa central nuclear a grande maioria dos resíduos (90% do volume total) é composta apenas por itens levemente contaminados, como ferramentas e roupas de trabalho, e contém apenas 1% da radioatividade total.



Distribuição do volume total de resíduos nucleares (Créditos : World Nuclear Association)

Os resíduos de alto nível, de actividade elevada, são primariamente o combustível de Urânio que foi usado num reactor nuclear e está “gasto” ou já não é eficiente para a produção de electricidade (cerca de 1/3 do combustível utilizado numa central nuclear é substituído todos os anos). Estes resíduos representam apenas 3% do volume total de resíduos, mas contém 95% da radioactividade total. O combustível usado é quente do ponto de vista térmico e altamente radioactivo e requer o uso de manipulação remota e blindagem. As barras de combustível antes de serem usadas são apenas um pouco radioactivas e podem ser manuseadas sem recurso a nenhuma blindagem especial. Durante o processso de fissão criam-se isótopos radioactivos de elementos mais leves tais como o Césio-137 e o Estrôncio-90. Estes isótopos denominados de “produtos da fissão”, representam grande parte do calor e radiação penetrante dos resíduos de actividade elevada. Alguns átomos de Urânio, capturam neutrões produzidos no processo de fissão e formam elementos mais pesados tais como o Plutónio. Estes elementos mais pesados que o Urânio, denominados de “transurânicos”, não produzem tanto calor nem tanta radiação penetrante mas demoram muito mais tempo para decair. Os resíduos transurânicos, também chamados de TRU, representam a maioria do risco radioactivo que permanece em resíduos de actividade elevada ao fim de 1000 anos. Os resíduos de actividade elevada são perigosos porque produzem doses de radiação fatais em pouco tempo de exposição. O reprocessamento destes resíduos separa o Urânio residual e Plutónio dos produtos da fissão. O Urânio e o Plutónio podem ser reutilizados como combustível embora em muitos casos este reprocessamento não é efectuado e a maioria dos resíduos de actividade elevada são combustível usado não reprocessado.

Ao contrário de qualquer outra indústria de geração de energia, o sector nuclear assume total responsabilidade por todos os seus resíduos. Muitas instalações de descarte permanente estão em operação para resíduos de nível baixo e intermediário, e instalações para resíduos de alto nível e combustível nuclear usado estão em implementação e instalações em construção. Há décadas que se sabe o que fazer aos resíduos, e todos os anos surgem novas soluções. Por exemplo, todo o combustível usado das centrais nucleares dos Estados Unidos está armazenado em piscinas construídas com betão reforçado com uma espessura considerável e forradas com aço. A água serve simultaneamente para blindar a radiação e arrefecer os resíduos. Quando as piscinas atingem a sua capacidade máxima o combustível mais antigo (que passou em média 5 a 10 anos na piscina) é transferido para contentores de aço envolvidos em betão.

A densidade energética de um combustível nuclear como o Urânio, por exemplo, é um milhão de vezes superior à densidade energética de um combustível fóssil. Os resíduos da operação de uma central nuclear são pequenos comparativamente aos de uma central a carvão ou gás natural. Uma central a carvão, para além de gases perigosos

como sulfitos, óxido nítrico, entre outros, liberta 1 kg de CO_2 por kWh de electricidade produzida. Em 2019 apenas, a Alemanha libertou 219 milhões de toneladas de carbono para a atmosfera a partir das suas centrais de carvão. A este número terá que se adicionar a biomassa, lignite, e gás natural. O consumo de electricidade per capita da Alemanha (6146.2 kWh em 2021) mostra que cada cidadão necessitaria de aproximadamente 1 kg de Urânio enriquecido para satisfazer o seu consumo de electricidade durante aproximadamente 65 anos (e daria para aproximadamente 85 anos do consumo de electricidade de um português, 4685.4 kWh em 2021).

Em termos de processamento, o nuclear tem outra vantagem para além das suas baixas necessidades de combustível. Apenas 10% do total de resíduos nucleares são verdadeiramente perigosos do ponto de vista biológico. Aproximadamente 90% dos resíduos nucleares podem ser enclausurados em contentores metálicos ou de cimento e colocados em armazéns. O que supera o atual método dos combustíveis fósseis de descargas para águas fluviais ou até para a atmosfera. Os restantes 10% requerem soluções mais avançadas de armazenamento, mas existem soluções perfeitamente seguras. Novos métodos conseguirão produzir energia adicional de combustível já gasto.

É um mito que não saibamos nem tenhamos alternativas para o processamento de resíduos nucleares.

Além disso, o tratamento e armazenamento de resíduos nucleares está já incluído nos custos iniciais da construção de uma central. Ironicamente, as centrais a carvão libertam mais radioatividade para a atmosfera que centrais nucleares. O carvão possui quantidades ínfimas de Urânio e Tório. A quantidade exacta depende da origem do carvão que é utilizado mas rondam geralmente algumas partes por milhão. Pode não parecer muito até nos apercebermos que uma central típica de 1 GW de potência queima milhões de toneladas de carvão por ano. Isto significa que cada uma destas centrais produz cinzas com cerca de 5 a 10 toneladas de Urânio e Tório por ano. Multiplicando pelo número de centrais a carvão em operação no mundo o número de resíduos radioactivos produzidos é avassalador.

De acordo com estimativas do Oak Ridge National Laboratory (Estados Unidos), as centrais de carvão existentes no mundo geram cerca de 5000 toneladas de Urânio e 15000 toneladas de Tório resultando numa libertação de cerca de 100 vezes mais radioactividade no ambiente que a libertada por centrais nucleares.

Devido à elevada densidade energia do combustível nuclear os resíduos nucleares resultantes da produção da electricidade consumida por uma pessoa em toda a sua vida caberiam numa lata de refrigerante e pesariam cerca de 3 kg. Apenas uma parte pequena destes resíduos seriam resíduos radioactivos de longa duração. A mesma quantidade de electricidade produzida a partir de carvão resultaria em 68 toneladas de cinzas e na emissão de 77 toneladas de CO_2 para a atmosfera por pessoa. Enquanto uma vasta quantidade destas cinzas é lançada na atmosfera, juntamente com vários gases nocivos, os resíduos nucleares são armazenados em barris secos, onde são mantidos em uma pequena área e monitorizados.

Os resíduos nucleares resultantes da produção da electricidade consumida por uma pessoa em toda a sua vida caberiam numa lata de refrigerante e pesariam cerca de 3 kg. Apenas uma parte pequena destes resíduos seriam resíduos radioactivos de longa duração



Armazenamento e descarga de resíduos radioactivos

Os resíduos radioactivos são armazenados de forma a evitar qualquer possibilidade de exposição das pessoas à radiação, ou qualquer poluição.

A eliminação de resíduos de baixo nível é simples e pode ser realizada com segurança em quase qualquer lugar. A maioria dos resíduos radioactivos de baixo nível (LLW) é normalmente enviada para descarga em aterros imediatamente após o seu empacotamento para gestão a longo prazo e posterior descarga autorizada como resíduos isentos. Isto significa que para a maioria (~90% em volume) de todos os tipos de resíduos produzidos por tecnologias nucleares, um meio de descarga satisfatório foi desenvolvido e está a ser implementado em todo o mundo.

Para combustível usado, designado como resíduo radioactivo de alto nível (HLW), o primeiro passo é o armazenamento para permitir o decaimento da radioatividade e do calor, tornando a manipulação muito mais segura. O armazenamento do combustível usado pode ser efectuado em piscinas ou contentores secos, tanto nos locais dos reactores ou gerido em infraestruturas dedicadas. Além do armazenamento, muitas opções têm sido investigadas com o objectivo de encontrar soluções publicamente aceitáveis, seguras e ambientalmente correctas para a gestão final de resíduos radioativos. A solução mais amplamente favorecida é a disposição geológica profunda. O foco está em como e onde construir tais instalações.

A disposição geológica profunda é amplamente reconhecida como a melhor solução para a disposição final dos resíduos mais radioativos produzidos

O combustível usado que não se destina a descarga directa pode ser reprocessado para reciclar o Urânio e o Plutónio que contém. Alguns HLW líquidos separados surgem durante o reprocessamento; este são vitrificados em vidro e armazenados aguardando disposição final.

Os resíduos radioativos de nível intermédio (ILW) que contêm radioisótopos de vida longa também são armazenados aguardando disposição num repositório geológico. Vários países descartam ILW contendo radioisótopos de vida curta em instalações de descarga próxima à superfície, conforme usado para descarga de LLW. A definição da Agência Internacional de Energia Atómica (IEA) desta opção é a disposição de resíduos, com ou sem barreiras de engenharia, em:

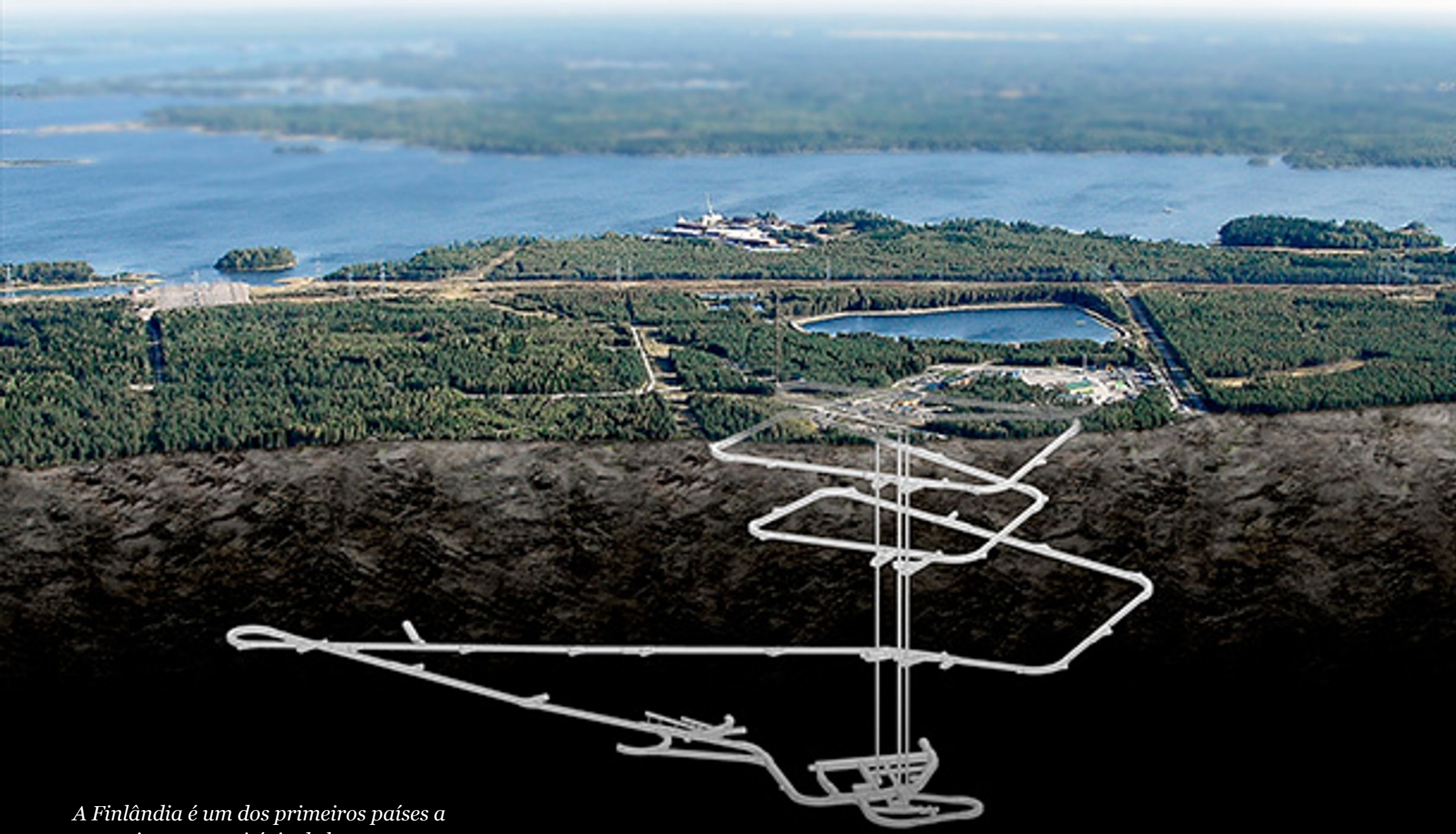
- **Instalações de eliminação perto da superfície ao nível do solo**. Estas instalações encontram-se sobre ou abaixo da superfície onde a cobertura de proteção é da ordem de alguns metros de espessura. Os recipientes de resíduos são colocados em cofres construídos e,

quando cheios, os cofres são preenchidos. Eventualmente, serão cobertos com uma membrana impermeável e solo superficial. Essas instalações podem incorporar alguma forma de drenagem e possivelmente um sistema de ventilação de gás.

- **Instalações de descarga próximo à superfície em cavernas abaixo do nível do solo.** Ao contrário da descarga próxima à superfície ao nível do solo, onde as escavações são realizadas a partir da superfície, este tipo de descarga requer escavação subterrânea de cavernas. A instalação fica a uma profundidade de várias dezenas de metros abaixo da superfície da Terra e com acessos a partir duma ramificação.

Este tipo de instalações serão afetadas por mudanças climáticas de longo prazo e esse efeito deve ser tido em consideração ao ponderar a sua segurança, pois tais mudanças podem prejudicar estas instalações. Este tipo de instalação é, portanto, normalmente usado para LLW e ILW de curta duração com meias-vidas de até 30 anos.

Alguns países estão nas fases preliminares da consideração de descargas de ILW e HLW, enquanto outros, como a Finlândia e Suécia, fizeram progressos significativos. Espera-se que o repositório Onkalo da Finlândia comece a operar em 2023. Será o primeiro repositório geológico profundo licenciado para a eliminação de combustível usado de reactores civis. Para proporcionar um armazenamento mais seguro e permanente, serão enterradas cápsulas de ferro e cobre soldadas eletricamente a 400 metros de profundidade. As cápsulas serão cercadas por barreiras de barro e cobertas com entulho e cimento. A instalação, que terá uma capacidade de 6500 toneladas, poderá conter os futuros resíduos nucleares estimados da Finlândia e da Suécia.



A Finlândia é um dos primeiros países a contruir um repositório de longo-prazo para resíduos radioactivos. O repositório está a ser construído na ilha de Olkiluoto e foi desenhado para durar 100000 anos. (Créditos: POSIVA OU)

6 factos acerca do combustível nuclear usado

1. O combustível nuclear usado, combustível de urânio já usado num reactor comercial, é um combustível sólido. O combustível é constituído por varetas de combustível metálicas que contêm pequenas pastilhas cerâmicas de óxido de urânio enriquecido. As barras de combustível são combinadas em elementos de combustível que são então colocadas no reator. É sólido quando entra no reator e sólido quando sai.

2. Quase não há resíduos nucleares porque a quantidade de urânio usado como combustível é reduzida (Palavra-chave: densidade de energia). Todos os resíduos nucleares da UE cabem num pavilhão desportivo. O combustível usado pode ser armazenado em repositório geológico profundo licenciado, como é o caso de Onkalo, na Finlândia. Os EUA geram cerca de 2000 toneladas de combustível usado por ano e produziram cerca de 90000 toneladas de combustível usado desde 1950, uma quantidade que caberia num único campo de futebol com uma profundidade de menos de 10 metros.

3. O combustível nuclear usado pode ser reciclado para fazer novo combustível e subprodutos. Mais de 90% da sua energia potencial ainda permanece no combustível, mesmo após cinco anos de operação num reator (95% urânio empobrecido) desse resíduo pode ser reutilizado em centrais nucleares modernas de Geração IV. A França, por exemplo, extrai o urânio não gasto através do reprocessamento na fábrica de reprocessamento de La Hague.

4. Apenas 5% (produtos de fissão) são um verdadeiro "desperdício". Não pode ser reutilizado. Após cerca de 200-300 anos, quando a radiação gama e o calor desaparecem, tornam-se inofensivos.

5. Desses 5%, uma fração muito pequena (actinídeos) é chamada de resíduos de longa duração. O Greenpeace classifica este desperdício como extremamente perigoso no entanto, os actinídeos são emissores alfa. É a radiotoxicidade que conta, não a radioatividade (ou meia-vida), ou seja, não devem ser ingeridos. Depois de um período de armazenamento em piscinas de betão revestidas de aço o combustível usado é armazenado em contentores de armazenamento a seco de aço e betão, e pode ficar em segurança nessas instalações até que uma solução de descarte permanente seja determinada

6. O volume de resíduos industriais tóxicos (chumbo, cádmio, arsénio, mercúrio e muitos outros produtos químicos) é 1000 vezes maior que o lixo nuclear. No entanto, são depositados em repositórios subterrâneos rasos onde tendem a espalhar-se pelos ecossistemas.

A excepcionalidade das situações de guerra

Apesar de toda a segurança e regulamentação a que as centrais nucleares estão sujeitas, situações de guerra são situações extremas.

A indústria nuclear é das indústrias mais regulamentadas em todo o mundo, com o objectivo de prevenir e mitigar o risco de acidentes graves, havendo constantes revisões da regulamentação para fazer face a situações não previstas anteriormente e com o intuito de reduzir os riscos ao mínimo.

Infelizmente, apesar de toda a segurança e regulamentação a que estas centrais estão sujeitas, que inclui a construção de edifícios resistentes a terramotos de magnitude elevada e embates de aviões, situações de guerra como as vivenciadas na Ucrânia desde a invasão russa no final de Fevereiro de 2022, são situações extremas para as quais é impossível prever o desfecho. Em contexto de guerra é real o risco de acidente nuclear. Neste caso o risco aparece por várias vias: dano no edifico e núcleo do reactor, ou num dos geradores responsáveis pelo fornecimento de electricidade aos sistemas de segurança activos (no caso das centrais de geração II como as existentes na Ucrânia), morte ou ferimentos dos operadores que possam assegurar a operação segura do reactor (apesar dos muito automatismos existentes para garantir esta operação segura), danos nas piscinas de arrefecimento do combustível recém usado (5-10 anos) ou dano dos contentores de metal e silos betão de armazenamento de longa duração (para combustível usado há mais de 5 anos). Em qualquer destas situações poderá haver libertação de quantidades significativas de material radioativo, potenciado pela libertação para a atmosfera caso haja incêndios no local. Qualquer uma destas situações é grave e poderá resultar em libertação de quantidades significativas de material radioactivo para atmosfera que facilmente atravessará as fronteiras da Ucrânia, sendo a situação mais grave no caso de danos no núcleo ou sistemas de segurança que poderão levar a situações similares a Chernobyl, Fukushima ou pior. Salienta-se que se trata duma situação extrema e que não é expectável que ocorra em instalações nucleares devotadas a objectivos pacíficos.

A resolução da assembleia da IAEA de 2009, declara que "qualquer ataque ou ameaça contra instalações nucleares devotadas a objectivos pacíficos constitui uma violação dos princípios da Carta das Nações Unidas, da lei internacional e do estatuto da IAEA"



No 11 de Setembro 2001. Aviões comerciais foram usados como armas nas mãos de terroristas e causaram milhares de vítimas (2977 vítimas). No entanto, esse acontecimento não afecta a segurança dos aviões enquanto meio de transporte nem a percepção de segurança que temos ao andar de avião (Créditos: Spencer Platt / Getty Images*)*

Existe ainda uma Resolução GC(43)/533 da Conferência Geral da IAEA, que reconhece que um ataque armado ou uma ameaça de ataque armado a uma instalação nuclear protegida, em operação ou em construção, cria uma situação em que o Conselho de Segurança da ONU tem que agir imediatamente de acordo com as disposições da Carta das Nações Unidas.

Pese embora o risco de acidente nuclear, é preciso ter em conta que o risco seria similar se se tratasse de um bombardeamento a uma barragem que pusesse em causa a sua integridade estrutural. A ruptura duma barragem pode ser devastadora para as populações que vivem à beira dos leitos a jusante da albufeira dessa barragem e que seriam afectados pela libertação súbita de toda a água contida na albufeira. Este tipo de evento não é apenas uma possibilidade uma vez que aconteceu também em Zaporizhzhya em 1941 no auge da II guerra mundial. Em Agosto de 1941, enquanto as tropas alemãs nazis invadiam a Ucrânia da era soviética, a polícia secreta de Josef Estaline, explodiu uma barragem hidroeléctrica na cidade de Zaporizhzhya, no sul, para retardar o avanço nazi. A explosão inundou aldeias ao longo das margens do rio Dnieper, matando milhares de civis.

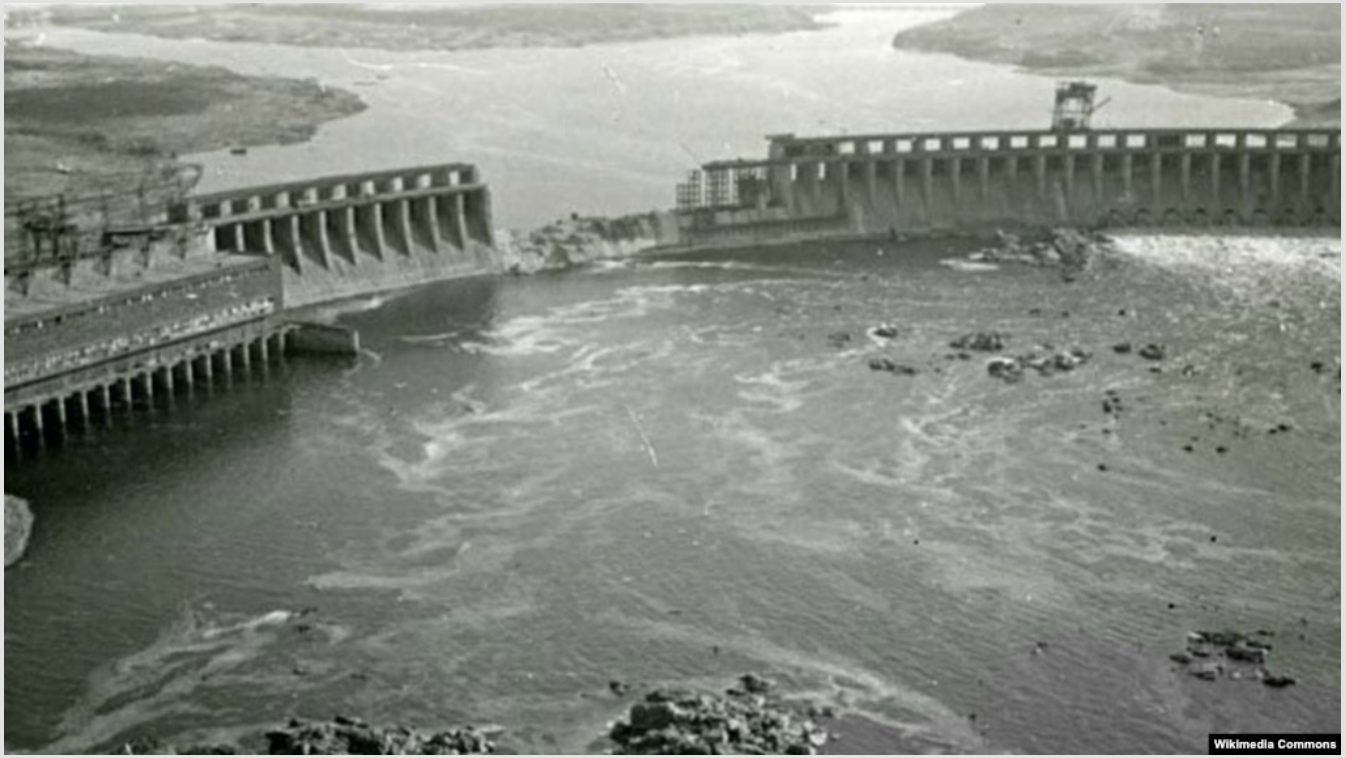
As situações de guerra são situações extremas e devemos saber distinguir entre a segurança em situações normais de situações para as quais é muito difícil controlar o desfecho.

Um outro bom exemplo, para efeitos de comparação, é o que aconteceu no 11 de Setembro 2001. Aviões comerciais foram usados como armas nas mãos de terroristas e causaram milhares de vítimas (2977 vítimas). No entanto, esse acontecimento não afecta a segurança dos aviões enquanto meio de transporte nem a percepção de segurança que temos ao andar de avião. No pós-Chernobyl (vitimas estimadas entre 4000 e 27000) e, sobretudo, no pós-Fukushima (575 vitimas creditadas) a indústria nuclear aumentou a regulamentação de segurança para que o uso normal de reactores nucleares para produção de energia eléctrica tenha o mínimo de risco para população. O reactores de geração III que estão a entrar em funcionamento por todo o mundo são ainda mais seguros. Devemos portanto, na nossa percepção de segurança nuclear, conseguir separar as situações de operação normal das situações de ataques bélicos onde o desfecho, como em muitas situações de guerra, é totalmente imprevisível.

Existem perigos comparáveis numa situação de guerra?

O bombardeamento duma barragem pode ser tão ou mais devastador que o ataque a uma central nuclear. Este tipo de evento aconteceu em Zaporizhzhya em 1941 no auge da II guerra mundial.

Em Agosto de 1941, enquanto as tropas alemãs nazis invadiam a Ucrânia da era soviética, agentes do NKVD, o antecessor da KGB, explodiram uma barragem hidroeléctrica na cidade de Zaporizhzhya, no sul, para retardar o avanço nazi*. A equipa executou com sucesso sua missão secreta, que os historiadores dizem ter sido ordenada pelo próprio Estaline, abrindo um buraco na barragem e isolando temporariamente parte da cidade dos invasores. A explosão inundou aldeias ao longo das margens do rio Dnieper, matando milhares de civis desprevenidos, bem como oficiais do Exército Vermelho que atravessavam o rio. Como nenhum número oficial de mortos foi divulgado na época, o número estimado de vítimas varia muito. A maioria dos historiadores coloca entre 20000 e 100000, com base no número de pessoas que viviam nas áreas inundadas.



A barragem na cidade de Zaporizhzhya, no sul da Ucrânia, depois de ter sido explodida pela polícia secreta de Estaline em 1941. 20000 a 100000 pessoas morreram na enchente que se seguiu.

* https://www.rferl.org/a/european-remembrance-day-ukraine-little-known-ww2-tragedy/25083847.html

Quais são os riscos para uma central nuclear numa zona de conflito armado?

Apesar de extremamente resilientes as centrais nucleares são construídas para operações em tempos de paz, não para guerras.

Uma central nuclear não explode nem em caso de acidente nuclear nem em caso de bombardeamento durante um conflito militar. É impossível um reactor explodir como uma arma nuclear. As armas nucleares contêm materiais muito específicos em configurações muito particulares, nenhum dos quais está presente num reactor nuclear. Mesmo uma reação descontrolada aconteceria muito lentamente para causar uma explosão. Numa arma nuclear, os átomos são compactados com densidade suficiente dentro duma pequena câmara para iniciar uma reação em cadeia explosiva instantânea. Um reator é muito grande para produzir a densidade e o calor necessários para criar uma explosão nuclear.

Bombardeamento

A pior coisa que pode acontecer é se um local for deliberadamente ou acidentalmente bombardeado, e o edifício de contenção, que abriga o reactor nuclear, for atingido. Os edifícios de contenção não são projetados ou construídos para ambientes de guerra e não estão desenhados para bombardeamentos deliberados. Estes edifícios são projectados e construídos para resistir a uma pequena explosão interna, por exemplo na tubagem de água pressurizado, mas embora estejam projectados para resistir ao embate de um avião comercial, não são projetados para resistir a uma explosão de grandes dimensões causadas por armamento militar. A robustez do reactor encerrado no edifício de contenção e a sua resiliência em situação de bombardeamento depende das armas que forem usadas. O pior cenário é que um míssil destruidor de bunkers rompa a cúpula de contenção, uma carapaça grossa de betão armado reforçado com aço situada no topo do reactor, e expluda. Uma explosão deste tipo poderia danificar gravemente o reactor nuclear e libertar radiação na atmosfera embora os escombros da estrutura de retenção também ajudem a reduzir as libertações radioactivas. Apesar de muitos reactores terem já sistemas de extinção de incêndios instalados no caso destes não serem suficientes para conter o incêndio (porque, por exemplo, não sobreviveram a uma explosão), o acesso a bombeiros é muito difícil. Uma situação destas poderia, numa situação extrema, resultar num acidente similar a Fukushima. As piscinas de arrefecimento do combustível usado podem ser alvos mais vulneráveis, sobretudo quando não estão localizadas no interior dos edifício de contenção do reactor. Se um projétil atingir o reservatório de combustível irradiado da central, que contém o combustível já usado e que ainda está radioativo, ou se causar perda da circulação da água de refrigeração, poderá haver libertação de radiação. A piscina onde é armazenado o combustível usado pode ou não estar no edifício de contenção. Se estiver fora do edifício de contenção está mais vulnerável. Se a piscina for drenada devido a



O reservatório de combustível irradiado duma central, contém o combustível irradiado já usado e que ainda está radioativo. Esta zona das centrais nucleares é um alvo particularmente vulnerável em caso de ataque militar (Créditos: NEA)



Contentores de betão para armazenamento a seco de de material radioactivo irradiado (combustível usado) na central de Zaporizhzhya, Ucrânia. Se uma bomba ou míssil atingir directamente os contentores de armazenamento a seco e os danificar (embora seja altamente improvável devido à sua robustez) estes poderão libertar algum material radioactivo para o ambiente

.

um bombardeamento, o combustível no interior pode atingir temperaturas elevadas e produzir hidrogénio devido à temperatura elevada. Uma explosão de hidrogénio pode levar à libertação de alguma radiação para o meio ambiente. Se uma bomba ou míssil atingir directamente os contentores de armazenamento a seco estes poderão libertar material radioactivo embora seja estruturas extremamente sólidas.

Quer seja seja um ataque intencional ou dano colateral de guerra, o bombardeamento numa central nuclear pode causar a libertação de resíduos radioactivos para o ambiente.

Falha nos sistemas auxiliares de arrefecimento

Os sistemas de protecção do reactor desligam-no automaticamente em caso de mau funcionamento ou devido a actividade sismíca. Este processo é conhecido como "SCRAM", podendo também ser accionado manualmente caso o operador considere que existe algum risco. Desligar um reactor reduz significativamente o calor que este gera, requerendo muito menos água e energia para manter os sistemas críticos de arrefecimento. Inicialmente, por alguns minutos, o calor gerado é cerca de 7% do nível pré-scram caindo para cerca de 1% da produção normal de calor após duas horas, para 0,5% após um dia e 0,2% após uma semana. Mesmo com o reactor desligado, o combustível está quente. O problema é que, num reactor de 3 $GW_{térmicos}$ (~1$GW_{electricidade}$), 0.5% da potência total ainda é 15 milhões de Watts, o que requer muito refrigeração sendo necessário manter a circulação de água dos circuitos de arrefecimento responsáveis pela remoção do

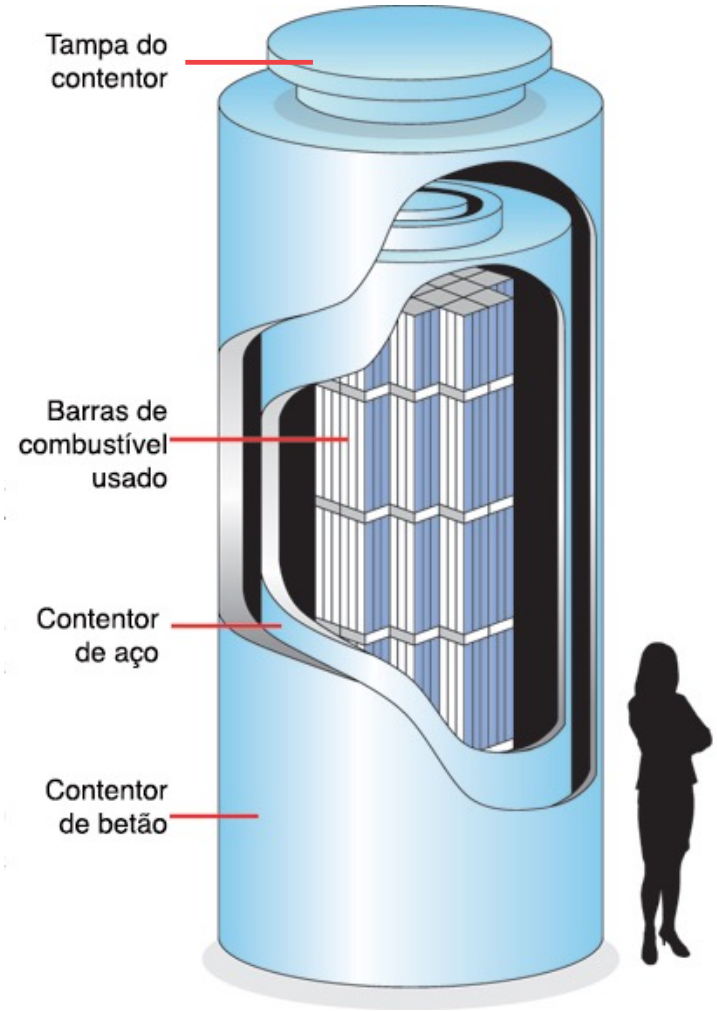


Diagrama de um contentor de armazenamento de combustível usado (Créditos: US Nuclear Regulatory Commission)

calor residual do reactor até que este fique numa situação de segurança, chamado “cool shutdown” (quando a temperatura da água está abaixo de 100°C à pressão atmosférica). Para além de energia externa para operar o sistema de arrefecimento, numa situação de bombardeamento ou incêndio podem ocorrer danos em vários sistemas essenciais responsáveis por garantir o arrefecimento activo e que estão localizados fora do edifício de contenção, incluindo bombas de água, permutadores de calor, tubagens, geradores de apoio, depósitos de combustível dos geradores.

Falha de energia

Uma central nuclear precisa de electricidade constante. Este fornecimento de electricidade é difícil de manter em tempos de guerra. A probabilidade de falha sustentada no fornecimento de energia elétrica aumenta durante um conflito, porque as linhas de transmissão podem ser destruídas por bombardeamento ou os geradores de apoio podem ser danificados e deixar de operar. E ainda que estes consigam continuar a funcionar é necessário que haja combustível suficiente para manter o seu funcionamento não sendo este abastecimento garantido em situação de conflito armado. No caso de haver uma falha no fornecimento de electricidade, os geradores ficarem sem combustível e os sistemas de refrigeração falharem, os reactores são isolados em edifícios de contenção bastante robustos. Estes edifícios devem ser capazes de, pelo menos temporariamente, bloquear a libertação de emissões radioativas no meio ambiente. Ainda assim, se o combustível começar a derreter, pode-se acumular hidrogénio suficiente cuja explosão pode romper o edifício de contenção (a maioria dos reactores já tem recombinadores de hidrogénio para evitar este problema). Entretanto, os operadores poderão conseguir colocar os sistemas de refrigeração novamente em operação. Além dos sistemas de refrigeração dos reactores é necessário manter o combustível nuclear usado seguro. Normalmente este combustível está armazenado em piscinas de arrefecimento adjacentes ao edifício de contenção. Estas piscinas podem armazenar mais combustível do que os reactores e também precisam de circulação constante de água para mantê-las frescas.

Este combustível tem de ser arrefecido por vários anos (5-10 anos) antes de poder ser transferido para os contentores secos. Caso o sistema de arrefecimento deixe de funcionar, o combustível irradiado começa a superaquecer e o seu revestimento de

O exemplo do desastre de Fukushima

o tsunami derrubou o fornecimento de energia, incluindo geradores de backup e o sistema de arrefecimento responsável por retirar o calor do reactor deixou de funcionar. O combustível ficou exposto e superaquecido depois da água dentro dos reactores ter desaparecido, fazendo com que o vapor produzisse gás de hidrogénio combustível. Este hidrogénio explodiu destruindo as estruturas de contenção, libertando uma nuvem radioactiva.

zircónio pode causar bolhas de hidrogénio. Se o hidrogénio não for ventilado há o perigo de explosão, espalhando radiação. Se houver perda de energia externa, os operadores terão que contar com geradores de emergência que não só requerem combustível para funcionar como têm eles próprios de ser arrefecidos. No pós-Fukushima as centrais nucleares passaram a ter mais geradores de emergência, com sistemas redundantes e em localizações mais seguras. No entanto, continuam a depender do fornecimento do combustível para continuarem a funcionar e, em simultâneo, os restantes sistemas auxiliares têm de estar em condições de funcionamento.

Erro humano

Há um elemento humano na operação de uma central nuclear. Apesar da muita automação existente para aumentar a segurança, os operadores são a primeira e a última camada de defesa da instalação e do público. Os operadores são as primeiras pessoas a detectar qualquer anomalia e a interromper ou mitigar qualquer incidente. E se houver um acidente, eles serão os primeiros a tentar heroicamente contê-lo. Em situação de conflito armado estes trabalhadores poderão ser feridos ou mortos, ou poderão ser feitos reféns e obrigados a trabalhar debaixo duma enorme situação de stress e perigo iminente. A equipa operacional deve ser capaz de realizar os procedimentos vitais de segurança e poder tomar decisões livres de pressões indevidas. É difícil de garantir que, em situações em que os operadores são feitos reféns por forças hostis, as tarefas são executadas em condições estáveis, sem interferência ou pressão externa indevida. O stress aumenta a probabilidade de ocorrer um erro e baixa o desempenho destes. É também essencial que os operadores descansem em condições para conseguirem manter o seu estado de alerta e sentido crítico ao máximo e desempenharem correctamente as tarefas complexas que lhes são exigidas. Situações de fadiga agravada pelo stress é uma combinação perigosa.

Manutenção do funcionamento seguro

Em situação de guerra a manutenção duma central pode ser comprometida por falta de pessoal ou indisponibilidade de peças de reposição. Governança, regulamentação e supervisão, todas cruciais para o funcionamento seguro de uma indústria nuclear, também são interrompidas. Em particular, as comunicações confiáveis entre o regulador e o operador, que são uma parte crítica da segurança e proteção nuclear geral, pode ser gravemente comprometida. Também a infraestrutura local, por exemplo a capacidade de resposta dos bombeiros locais pode ficar seriamente afectada.

A melhor solução para evitar problemas numa central nuclear numa zona de conflito armado é garantir uma zona de exclusão de combate em torno de centrais nucleares.

O futuro da fissão nuclear

Em Junho de 2019 a Agência Internacional da Energia da OCDE (IEA) publicou o relatório “Nuclear Power in a Clean System”, que concluiu que não investir em centrais nucleares existentes e novas nas economias avançadas tornaria drasticamente mais difícil e mais caro os esforços duma transição global para uma sistema de energia limpo.

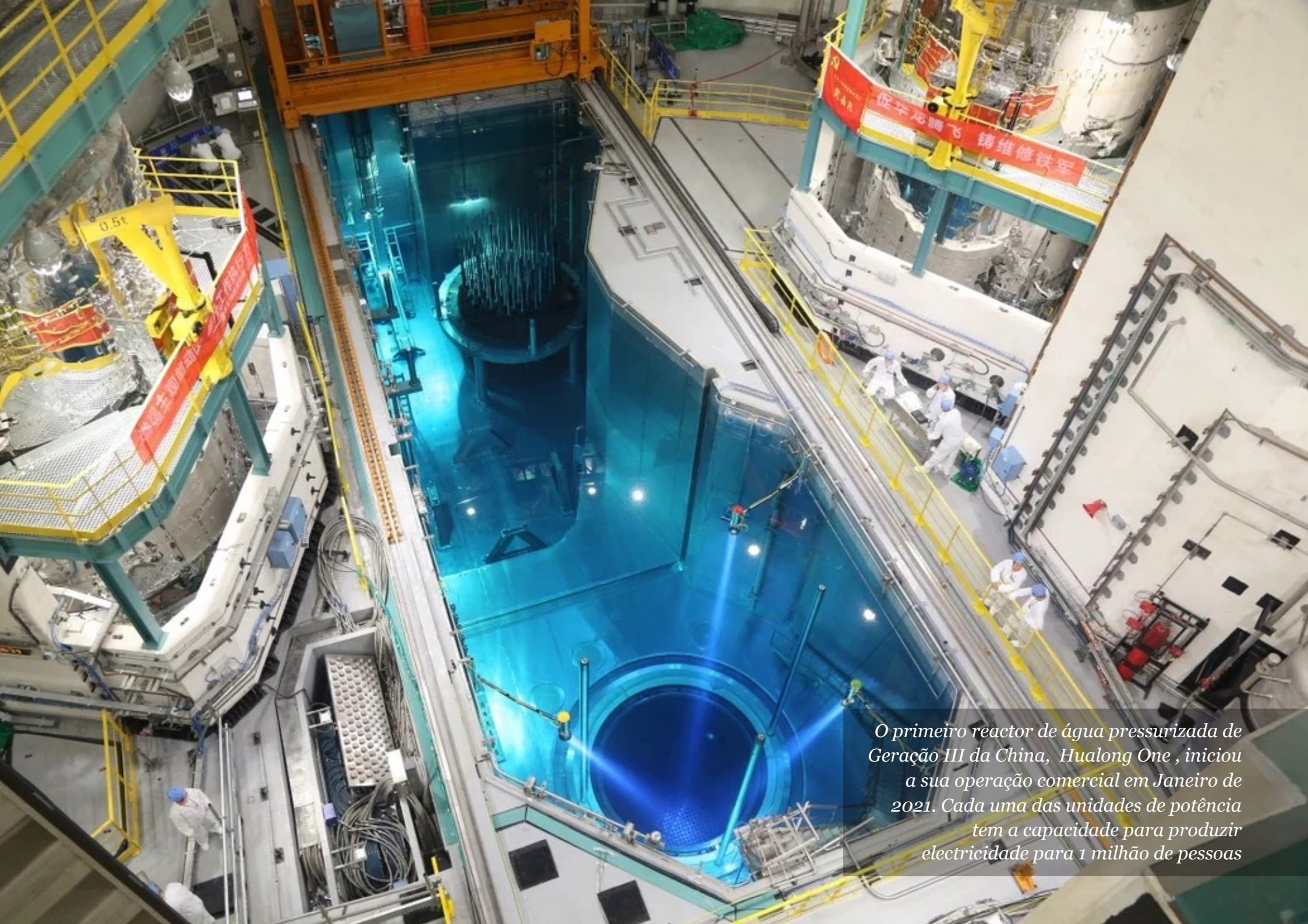
Desenhos melhorados de reactores nucleares estão constantemente a ser desenvolvidos a nível mundial. Os chamados reactores avançados de Geração III estão em operação no Japão desde 1996 e têm vindo a evoluir. Os novos reactores avançados que estão actualmente em construção têm designs mais simples destinados a diminuir o custo. São também mais eficientes e inerentemente seguros. Entre os novos reactores existem também progressos no design de reactores pequenos que produzem até 300 MW. A indústria nuclear tem vindo a desenvolver e melhorar a tecnologia de reactores há mais de 5 décadas e está agora a começar a construir a próxima geração de centrais nucleares.

Habitualmente são distinguidas diferentes gerações de reactores. Os reactores de Geração I foram desenvolvidos em 1950-60 tendo o último reactor desta geração sido encerrado no Reino Unido em 2015. Os reactores de Geração II estão amplamente presentes na frota actual americana e francesa e em vários outros países. Os primeiros reactores de Geração III (e III+) estão em operação no Japão havendo mais a a ser construídos em vários países. Os reactores de Geração IV estão ainda em fase de projecto e não estarão operacionais nos próximos 20 anos. Mais de 85% da electricidade mundial de origem nuclear é gerada por reactores derivados de um design original projectado para uso naval. Estas e outras unidades actualmente em operação demonstraram serem seguras e fiáveis, mas estão agora a ser suplantados por melhores desenhos.

Os fornecedores de reactores nos Estados Unidos, Japão, Europa, Rússia, China e outros têm dezenas de designs de reactores novos em estado avançado de planeamento ou em construção, enquanto outros estão na fase de investigação e desenvolvimento. Os reactores de Geração IV estão em fase de Investigação e Desenvolvimento ou numa fase conceptual.

Os reactores de terceira geração têm:

- Um desenho mais estandardizado para acelerar o licenciamento, reduzir o custo e reduzir o tempo de construção.
- Um desenho mais simples e mais robusto, tornando-os mais simples de operar e menos vulneráveis a problemas operacionais.
- Maior disponibilidade e tempo de vida operacional mais longo , tipicamente de 60 anos.
- Ainda mais reduzida probabilidade de acidentes que levem ao derretimento do núcleo.
- Um período de graça substancial. Que permite que após um “shutdown” a infraestrutura não necessite de nenhuma intervenção activa pro tipicamente 72 horas (o termo período de graça é usado para descrever a capacidade da



O primeiro reactor de água pressurizada de Geração III da China, Hualong One , iniciou a sua operação comercial em Janeiro de 2021. Cada uma das unidades de potência tem a capacidade para produzir electricidade para 1 milhão de pessoas

infraestrutura permanecer numa condição segura por um período de tempo substancial após um acidente ou incidente sem necessitar de intervenção humana).

- Estruturas mais reforçadas em relação a designs anteriores contra impactos de aviões para resistir à libertação de radiação.
- Maior taxa de queima que permite um uso mais eficiente do combustível e reduzir a quantidade de resíduos.
- Maior uso de absorvedores para estender o tempo de vida do combustível

O maior avanço, face aos reactores actualmente em operação, é a incorporação de segurança passiva ou elementos inerentemente seguros que não requerem controlo activo ou intervenção operacional para evitar acidentes nem caso de falha (estes sistemas podem usar a força da gravidade, convecção natural ou resistência a altas temperaturas. Os sistemas de segurança tradicionais são activos no sentido em que requerem operação eléctrica ou mecânica). Mesmo os reactores de água leve mais convencionais têm sofrido uma evolução rápida. Os chamados reactores de geração III+, como o EPR francês ou o Westinghouse AP1000 têm sistemas de segurança melhorados, como o sistema de arrefecimento central acionado por gravidade do ESBWR da GE Hitachi, no qual grandes reservatórios no topo do edifício de contenção podem fornecer água para evitar o superaquecimento do núcleo, mesmo num cenário de perda total de energia externa similar ao que ocorreu em Fukushima. O padrão para todos os reactores Geração III+ é a segurança passiva por pelo menos 72 horas, sem necessidade de intervenção do operador, graças aos sistemas de circulação natural que podem remover o calor continuamente do núcleo. Desta forma, estes reactores podem sobreviver intactos a um cenário do tipo Fukushima sem libertação de radiação.

Outra diferença substancial é que muitos dos novos reactores estão desenhados para seguir a carga da rede (os requisitos da União Europeia para este tipo de equipamentos desde 2001 que especificam que os novos reactores devem ser capazes de seguir a carga da rede entre 50% a 100% da capacidade). Alguns dos novos designs são de construção modular. Muitos dos componentes pequenos serão montados em módulos estruturais num ambiente fabril (remotamente ou no local) e instalados posteriormente. Desta forma a construção é acelerada.

Em relação à Geração IV foi criada uma Task Force internacional que partilha I&D para o desenvolvimento de tecnologias de 6 tipos reactores. Quatro destes são reactores de neutrões rápidos. Todos estes reactores operarão a temperaturas superiores aos reactores actuais. Em particular quatro dos novos designs permitirão a produção de Hidrogénio. Os 6 reactores representam avanços em sustentabilidade, fiabilidade, economia, segurança e resistência à proliferação. A Europa está a apostar em 3 destes designs. Todos estes avanços são promissores e permite antever que a fissão nuclear poderá contribuir com segurança para a descarbonização . A fissão nuclear é crucial para comprarmos algum tempo até que a fusão nuclear se torne uma realidade.



Evolução dos reactores nucleares

Aplicações adicionais para reactores nucleares

A energia nuclear é uma ferramenta essencial para combater as mudanças climáticas e está a começar a tornar-se mais versátil

Os reactores comerciais oferecem várias aplicações além do fornecimento de electricidade para residências e empresas. As possibilidades vão muito além da geração de electricidade e a energia nuclear pode ser usada noutras indústrias para ajudar ainda mais a descarbonizar a nossa sociedade. Os novos reactores e tecnologias trazem a promessa do futuro de energia limpa e confiável. Os reactores nucleares de amanhã, alguns a menos de uma década, oferecerão uma variedade de benefícios, como dessalinização de água, geração de calor de processo e combustíveis alternativos e acesso a energia além da rede. Poderão ajudar áreas remotas a ter opções de electricidade confiáveis e limpas e fornecer energia imediatamente após um desastre. Alguns projetos permitirão também recuperar e reciclar elementos em combustível nuclear usado que ainda podem produzir energia. Estes reatores serão a espinha dorsal do nosso futuro livre de carbono.

Dessalinização Nuclear*: Os avanços nos sistemas de esgoto, dessalinização e estações de tratamento de águas residuais melhoram significativamente a saúde pública. Ainda assim, um quinto da população mundial sofre com a escassez de água. A procura por água doce continua a crescer devido ao aumento da população e ao impacto das mudanças climáticas em regiões áridas e semiáridas. As centrais de dessalinização produzem água doce a partir da água do mar por meio de destilação ou usando energia elétrica/mecânica para acionar bombas para pressurização da água do mar através de membranas para separar o sal das águas salinas. O processo requer energia na forma de calor electricidade para remover o sal da água salina tornando-a potável. As centrais de dessalinização geralmente são alimentadas por fontes de calor emissoras de carbono, como combustíveis fósseis. A viabilidade de centrais de dessalinização nuclear integradas foi comprovada em reatores, principalmente na Índia, Japão e Cazaquistão. Actualmente, existem vários projectos de desenvolvimento de sistemas avançados de reactores nucleares que poderão ser instalados em praticamente qualquer lugar do mundo e poderão produzir água e eletricidade simultaneamente quando combinados com centrais de dessalinização

Produção de hidrogénio limpo: O hidrogénio é um componente chave dos futuros sistemas de energia e, apesar de ser menos eficiente que usar a electricidade directamente, pode ser gerado com pouca ou nenhuma emissão com tecnologias como a

* https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-desalination.aspx

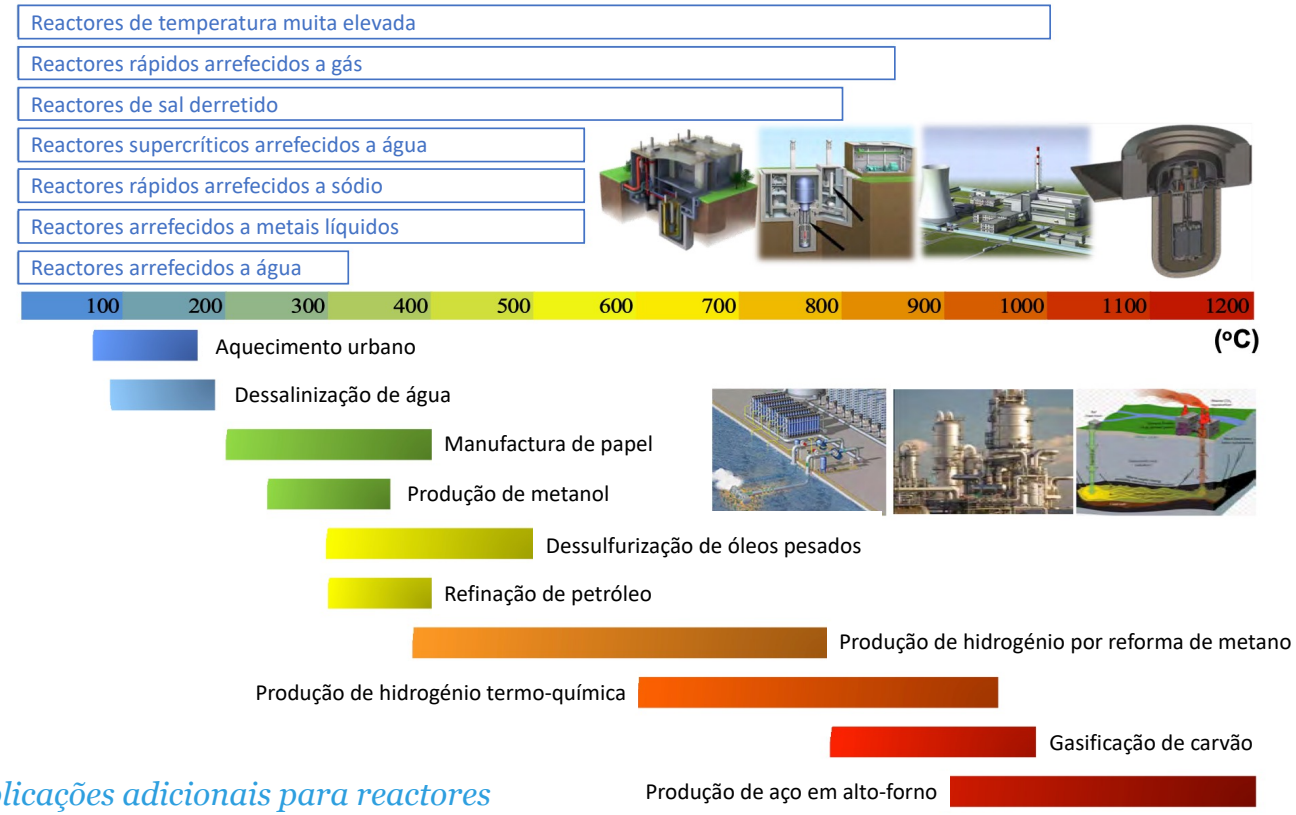
energia nuclear (denominado hidrogénio rosa). Existem vários métodos para usar a energia nuclear, como fonte de eletricidade e calor, para produzir hidrogénio de forma eficiente e com pouca ou nenhuma emissão de CO_2 que pode ser usado por exemplo para criar amónia e nitrogénio para fertilizantes, para a refinação de aço ou para desenvolver combustíveis sintéticos.

Produção de calor para a indústria: A energia sob a forma de calor é usada principalmente pelo sector industrial para processos como secagem, fabricação, refinação, aquecimento e arrefecimento. As aplicações de calor nos processos industriais representam uma parte significativa da emissão directa de CO_2 industrial a cada ano. Actualmente, a maior parte do calor para o sector industrial resulta da queima de combustíveis fósseis, impulsionando muitos processos industriais, desde electrólise a vapor até fundição de ferro e outros materiais de sucata para fazer aço. A energia nuclear é uma alternativa livre de carbono que pode alimentar instalações industriais e fornecer calor de alta temperatura limpo, confiável e constante. Os reactores nucleares convertem um terço do calor produzido em eletricidade. Normalmente, o calor restante é libertado para o meio ambiente, mas pode ser aproveitado para atender à procura de calor para a indústria.

Estão a ser desenhados reactores avançados para alimentar sistemas de energia híbrida que produzem eletricidade para a rede, mas que também podem produzir água potável limpa e hidrogénio ou calor para descarbonizar os sectores industrial e de transporte.

Nuclear para reduzir os sectores mais difíceis de reduzir

No caminho da descarbonização, certos sectores industriais colocam desafios significativos. Estes sectores, incluindo o aço, o cimento, a petroquímica, o alumínio, a aviação, o betão, o transporte marítimo e o transporte rodoviário, representam coletivamente cerca de 30-40% das emissões globais. Estes sectores são considerados de difícil redução (“hard to abate”) devido às dificuldades técnicas e económicas de reduzir as suas emissões de carbono. Estas indústrias requerem fontes de energia fiáveis e acessíveis que possam fornecer calor e eletricidade. Mas satisfazer as exigências da energia com baixo teor de carbono vai ser um desafio. E a energia nuclear é uma das poucas opções que o pode fazer de forma eficaz, pelo que poderá desempenhar um papel fundamental na atenuação deste problema



Aplicações adicionais para reactores nucleares de acordo com a gama de temperatura (créditos: Adaptado de "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments", IAEA (2020), https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)

O nuclear oferece uma solução convincente. É uma fonte de energia com baixo teor de carbono e fornece eletricidade e calor ininterruptamente, 24 horas por dia, 7 dias por semana. Pode produzir calor para aplicações industriais, bem como hidrogénio, criando alternativas sem recurso a combustíveis fósseis na aviação e no transporte marítimo. A integração da energia nuclear na carteira de energias limpas é essencial para enfrentar os desafios mais difíceis em matéria de redução das emissões e alcançar um futuro sustentável e com baixas emissões de carbono.

Quando pensamos em sectores difíceis de abater, é importante pensar primeiro porque é que são tão difíceis de abater. De facto, estes sectores dividem-se em duas categorias:

i) A primeira são as indústrias que requerem quantidades substanciais de calor: o

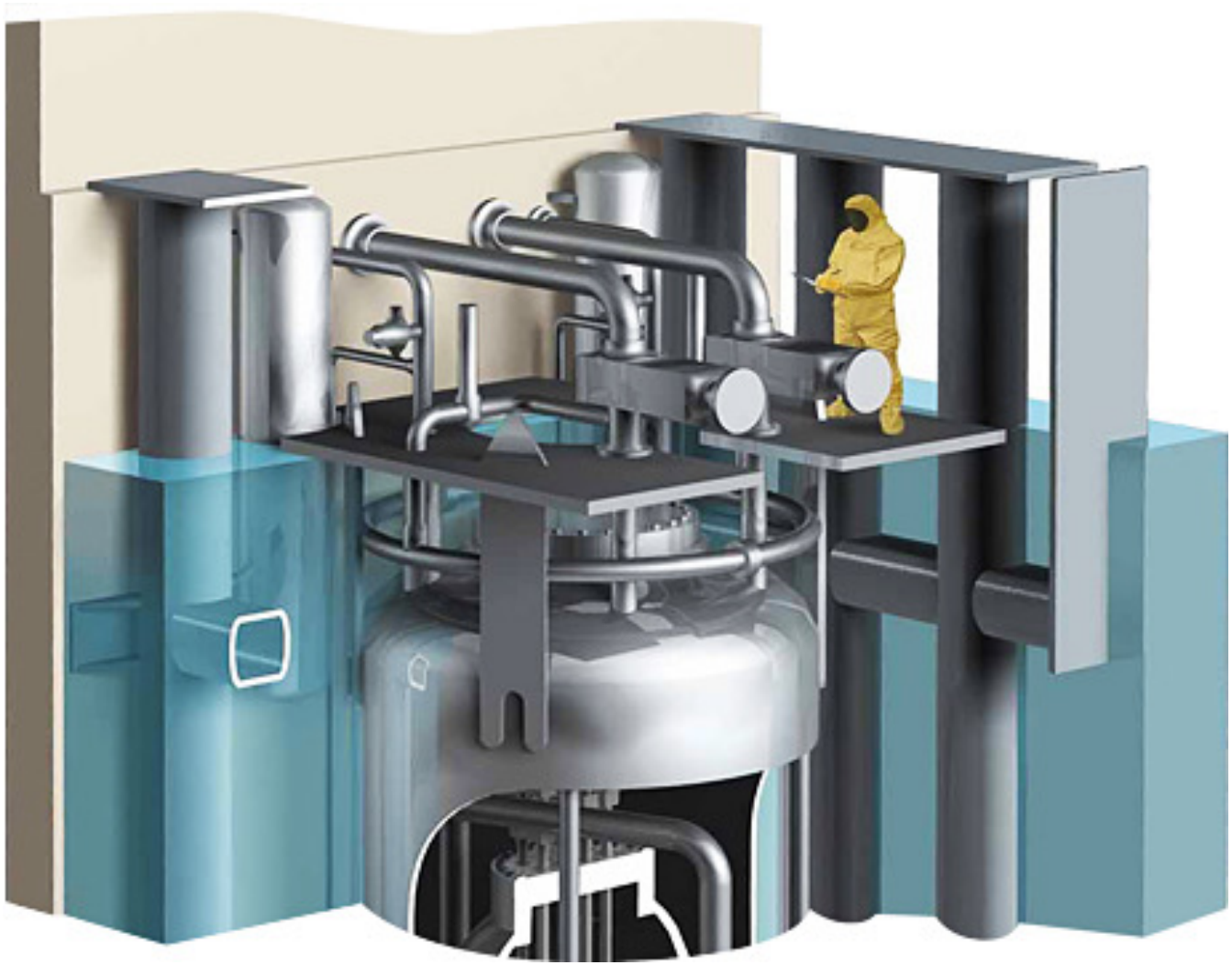
processamento petroquímico, a produção química em geral, o fabrico de plásticos e esse tipo de coisas, até ao fabrico de betão, todos eles requerem quantidades significativas de calor. Há formas de obter calor através da electricidade, utilizando um electrolisador ou outro tipo de intermediário, mas a energia nuclear é realmente capaz de fornecer esse calor diretamente, pelo que não é necessário passar por esse intermediário - é possível utilizar o calor diretamente do reactor avançado.

ii) A outra parte dos sectores difíceis de reduzir é a necessidade continua de energia, por isso, quando pensamos na produção de energia - produção de energia limpa - as energias renováveis são fontes intermitentes e, embora tenham de ter um papel na rede, há sectores que necessitam de energia 24 horas por dia. A fiabilidade é fundamental, e a fiabilidade do nuclear é inigualável.

Uma das soluções promissoras para este sector é a produção de hidrogénio, conseguido através da eletrólise a baixa e alta temperatura que divide a água em hidrogénio e oxigénio puros. Tanto os reactores nucleares tradicionais como os avançados podem fornecer o calor e a eletricidade constantes necessários para este processo. Isto poderia abrir novos mercados nestes sectores difíceis de abater e facilitar a transição para uma economia com baixas emissões de carbono. Os combustíveis sintéticos de origem nuclear também têm o potencial de proporcionar uma descarbonização quase nula nos sectores mais difíceis de reduzir, sobretudo quando são necessários combustíveis com as mesmas características das versões fósseis tradicionais.

Não esquecendo que o objetivo último é a descarbonização, a energia, nas suas diversas formas (eletricidade, hidrogénio, combustíveis sintéticos,...), é apenas um facilitador para a criação de valor com indústrias competitivas.

A reindustrialização e a descarbonização das indústrias pesadas exigirão enormes quantidades de energia descarbonizada, pelo que serão necessárias todas as fontes de baixo carbono disponíveis para cumprir os objectivos da União Europeia. Exige inovação, avanços tecnológicos e visões agnósticas sobre as diferentes formas de produção de energia.



O módulo de potência da NuScale Power é um reactor de água pressurizada (PWR) de 250 MWt, 77 MWe com circulação natural. (créditos: NuScale)

A revolução dos pequenos reactores modulares

Os reactores avançados representam a vanguarda da tecnologia nuclear e incorporam décadas de progresso em física nuclear, ciência de materiais, engenharia de sistemas e controlo.

O termo “reactor avançado” é definido como um reactor com melhorias significativas em comparação com os reactores comerciais existentes* (por exemplo, recursos de segurança inerentes adicionais; custo nivelado significativamente menor de eletricidade; redução dos resíduos; maior utilização de combustível; maior confiabilidade; maior resistência à proliferação; maior eficiência térmica; ou capacidade de integração em aplicações eléctricas e não eléctricas). Estes reactores serão inerentemente mais seguros por design, com alguns, como o pequeno reator modular (SMR) desenvolvido pela NuScale Power, capazes de operar sem a necessidade de sistemas eléctricos de backup relacionados com a segurança. Os reactores nucleares avançados estão a ser projetados para ajustar mais rapidamente a sua produção de electricidade para responder à procura permitindo-lhes estabilizar a rede em áreas com alto volume de energia renovável intermitente. Os reactores avançados usarão uma variedade de refrigerantes, incluindo água, sal fundido, gás de alta temperatura e metal líquido e terão uma ampla variedade de tamanhos, de alguns megawatts a mais de 1000 MW (similar aos reactores tradicionais). Isto permitirá que os proprietários adaptem a geração de electricidade às suas necessidades energéticas. Esta flexibilidade poderá vir a ser revolucionária e particularmente importante para empresas menores, cooperativas elétricas rurais ou órgãos municipais e para aplicações isoladas e distribuídas.

Os projetos nucleares tendem a ser caros porque que cada um é um projeto de construção gigantesco e complexo, e mesmo o menor atraso torna-se rapidamente proibitivamente caro (sobretudo quando cada central adopta uma desenho único). Uma das soluções para reduzir o custo pode ser a adopção de projetos modulares mais simples, nos quais os componentes das centrais nucleares são produzidos e montados em fábricas e não no local, permitindo economias de escala e padrões de fabricação uniformemente elevados. A modularidade é mais fácil se os reactores forem menores. Esta abordagem vai permitir reduzir os custos gerais de construção e operação para que estes reactores sejam mais competitivos com outras formas de geração de energia.

Nos próximos 10 anos, os pequenos reactores modulares avançados (SMRs) podem mudar a maneira como pensamos em energia nuclear confiável, limpa e acessível.

* https://nuclearinnovationalliance.org/sites/default/files/2022-07/ANRT-APrimer-July2022.pdf

Os SMR são definidos como reactores nucleares geralmente equivalentes a 300 MWe ou menos, projectados com tecnologia modular usando fabricação modular em fábrica, procurando economias de produção em série e tempos de construção curtos.

O termo SMR descreve o tamanho do reactor e a capacidade de combinar vários módulos padronizados, mas não a tecnologia utilizada.

Estes reactores avançados podem ser usados para geração de energia, calor de processo, dessalinização ou outros usos industriais. É expectável que estes pequenos reactores modernos para geração de energia, tenham maior simplicidade de projecto e custos de implantação reduzidos. A maioria também é projectada para um nível elevado de segurança passiva ou inerente em caso de mau funcionamento. O conceito de segurança para SMRs geralmente depende mais de sistemas passivos e características de segurança inerentes ao reactor, como baixa potência e pressão de operação. Isto significa que, nestes casos, nenhuma intervenção humana ou fonte externa de energia é necessária para desligar os sistemas, porque os sistemas passivos dependem de fenómenos físicos, como circulação natural, convecção, gravidade e autopressurização. Estas margens de segurança aumentadas, em alguns casos, eliminam ou reduzem significativamente o potencial de libertação de radioactividade para o meio ambiente em caso de acidente. Também muitos são projetados para serem colocados abaixo do nível do solo, permitindo uma resistência alta às ameaças terroristas. Os SMRs também reduzem os requisitos de combustível exigindo reabastecimentos menos frequentes, a cada 3 a 7 anos, em comparação com entre 1 e 2 anos para centrais convencionais. Alguns SMRs estão a ser projectados para operar até 30 anos sem reabastecimento.

Os SMRs avançados oferecem muitas vantagens, como pegadas físicas relativamente pequenas, investimento de capital reduzido, capacidade de serem instalados em locais impossíveis para centrais nucleares maiores provisões para adições incrementais de energia.

SMRs e centrais nucleares oferecem atributos únicos em termos de eficiência, economia e flexibilidade. Embora os reactores nucleares forneçam fontes de energia despacháveis (podem ajustar a

produção de acordo com a procura de electricidade), algumas energias renováveis, como eólica e solar, são fontes de energia variáveis que dependem do clima e da hora do dia. Os SMRs podem ser combinados e aumentar a eficiência das fontes renováveis num sistema de energia híbrido. Estas características posicionam os SMRs para desempenhar um papel fundamental na transição para energia limpa, ao mesmo tempo que ajudam os países a atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Um passo significativo foi dado em Julho de 2022 quando foi aprovado para certificação pela Comissão Reguladora Nuclear dos EUA (NRC) o primeiro projeto dum reactor nuclear de geração IV, o projeto de reactor modular pequeno da NuScale que promete energia limpa e segura com custo, uso do solo e tempo de instalação radicalmente reduzidos. A revolução SMR, e todos os outros projetos concorrentes de Geração III+ e Geração IV, mostram que a tecnologia nuclear não parou. Não há dúvida de que os novos projetos disponíveis hoje são dramaticamente mais seguros do que os do passado, e que o potencial de acidentes graves foi bastante reduzido.

É um erro julgar o potencial das novas formas de produzir energia nuclear com base em acidentes como Fukushima e Chernobyl. Esta comparação é similar a julgar a segurança de um Airbus A380 com o registro de acidentes de um avião comercial da década de 1970.



Um corte do módulo do reactor Nu-scale Power (céditos: NuScale Power)

Ideias (nucleares) a reter...

A energia nuclear pode dar um contributo único para a descarbonização, dada a utilidade esmagadora, baixo risco e sustentabilidade disponíveis nesta tecnologia.

Alguns ainda acreditam que as energias renováveis tradicionais são o único caminho preferido para a descarbonização da rede elétrica. No entanto, em termos dos benefícios tecnológicos a energia nuclear pode fornecer de forma sustentável a grande maioria de nossa energia (incluindo transporte e fabricação). Tecnicamente, não há razão para não apreciar todos os benefícios, sustentabilidade e progresso proporcionados pelos avanços que têm vindo a ser concretizados com as energias renováveis tradicionais. Mas, ainda que questionado por muitos, o mesmo progresso ocorre com a energia nuclear. Para que a comparação seja justa, inequívoca é necessário a consideração adequada dos riscos associados a todas estas tecnologias, para que falhas pontuais, interrupções no fornecimento e quaisquer riscos específicos para cada opção sejam avaliados objetivamente. Para tal é necessário que preconceitos implícitos ou qualquer forma de narrativa sectorial devem ser evitados por aqueles que adotam uma perspectiva científica ou de engenharia, para que recomendações e perspectivas informadas possam ser disseminadas para a melhoria da sociedade em geral. O objetivo final é um risco sustentável e cada vez menor para os trabalhadores, o público e o meio ambiente, alinhado às boas práticas de engenharia. Ao usar energia nuclear, é possível reduzir completamente o risco ambiental, público e dos trabalhadores*. Ao contrário de outros resíduos tóxicos industriais, o principal perigo associado aos resíduos de nível elevado, a radioactividade, diminui com o tempo. Actualmente, as instalações de armazenamento provisório fornecem um ambiente adequado para conter e gerir os resíduos existentes, e a decomposição do calor e da radioatividade ao longo do tempo fornece um forte incentivo para armazenar estes resíduos por um período antes de seu descarte final. De facto, após 40 anos, a radioactividade do combustível usado diminui para cerca de um milésimo do nível no momento em que o combustível foi descarregado do reactor. A longo prazo, no entanto, é necessários encontrar formas apropriadas para o armazenamento destes resíduos devido à sua radioactividade prolongada mas descarte seguro e ambientalmente correcto está tecnologicamente comprovado, com consenso científico internacional em repositórios geológicos profundos. Tais projetos estão bastante avançados em alguns países, como a Finlândia e a Suécia.

Com todos os benefícios oferecidos pela

* https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772783122000085

energia nuclear, as únicas barreiras reais à sua implantação parecem estar enraizadas na radiofobia (o medo clínico de radiações ionizantes), largamente atribuído às questões do lixo nuclear, Fukushima e proliferação. A realidade é que a aceitação pública (ou falta dela) levou a energia nuclear a tentar atingir o risco zero a um custo exorbitante.

A energia nuclear contribui para salvar vidas ao contribuir para a descarbonização e limitar os efeitos nefastos das alterações climáticas.

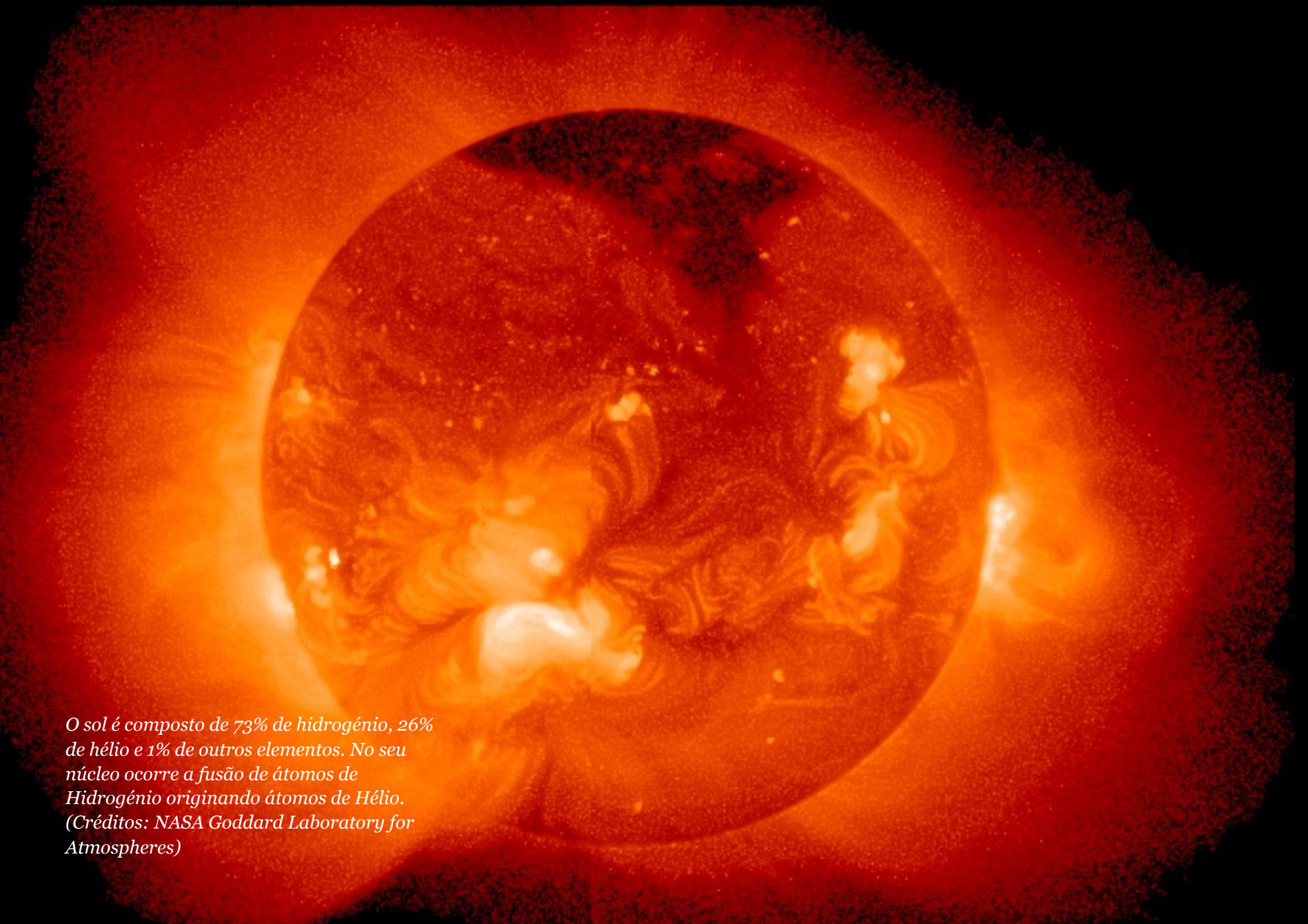
Os únicos argumentos viáveis contra a energia nuclear, enraizados na radiofobia são teoricamente passíveis de serem superados com uma educação adequada sobre os riscos relativos associados ao seu uso ou rejeição. Ao contrário da crença popular, a energia nuclear salvou vidas ao substituir os combustíveis fósseis por uma solução mais limpa, evitando um número significativo de mortes prematuras.

O potencial de usar o excesso de calor na geração de energia nuclear para dessalinização de água poderá melhorar a eficiência do sistema como um todo, não despejando diretamente o calor residual no meio ambiente. Da mesma forma, a versatilidade e as opções personalizadas disponíveis com os novos reatores modulares pequenos (SMRs) podem trazer mudanças substanciais no cenário da energia nuclear devido à sua diversidade de aplicações potenciais mantendo-se economicamente viável. Juntando isto com a dessalinização, o sequestro de carbono, a produção de Hidrogénio e o fornecimento de calor industrial para processos de manufactura, a energia nuclear pode, ser realmente a solução climática que precisamos. Com a segurança passiva/inerente melhorada encontrada em projetos de SMR, pode-se esperar que a aceitação do público aumente, particularmente quando a zona de exclusão de um acidente permanece dentro do perímetro da instalação. É compreensível que a ausência de danos radiológicos nos habitantes de Fukushima não alivie o impacto e danos causados pela evacuação e, portanto, novos projetos têm tentado reduzir a aversão social.

A energia nuclear não é apenas uma fonte de energia de baixo carbono, mas uma fonte de energia com um uso baixo de recursos, com um impacto ambiental total por kWh semelhante ao das energias renováveis. A par com as energias renováveis, a energia nuclear pode dar um contributo significativo para uma economia de baixo carbono enquanto parte de um portfolio diversificado de formas de produção de energia.

+ *Fusão Nuclear*

2.2



O sol é composto de 73% de hidrogénio, 26% de hélio e 1% de outros elementos. No seu núcleo ocorre a fusão de átomos de Hidrogénio originando átomos de Hélio. (Créditos: NASA Goddard Laboratory for Atmospheres)

A fusão nuclear é a energia das estrelas

A fusão nuclear é o processo pelo qual as estrelas, incluindo o Sol, geram a sua energia.

Numa reação de fusão, os núcleos atómicos "fundem-se" para formar núcleos mais pesados. Para que isso aconteça, os núcleos precisam ter energia suficiente para superar a força repulsiva que experimentam porque ambos têm cargas positivas e precisam de colidir uns com os outros.

Estas condições de pressão e temperatura extremamente altas podem ser encontradas nos núcleos das estrelas. A pressão no centro do Sol, por exemplo, é de uns impressionantes 100 mil milhões de vezes a pressão atmosférica, enquanto a temperatura é de 15 000 000°C. A força gravitacional do Sol (~28 vezes a força da gravidade da Terra) confina os núcleos de Hidrogénio carregados positivamente e juntamente com as altas temperaturas que fazem com que os núcleos se movam furiosamente, contribuem para que os núcleos colidam a altas velocidades superando a repulsão electroestática natural que existe entre as cargas positivas fundindo-se para formar o Hélio mais pesado. Sob estas condições, a fusão de Hidrogénio em Hélio pode ser facilmente mantida. As reações de fusão nas estrelas podem criar elementos mais pesados que também podem continuar a fundir-se se a temperatura fôr suficientemente alta. Desta forma, elementos mais pesados podem ser criados por meio de cadeias de reação de fusão. Numa reação de fusão, o núcleo resultante (se for mais leve que o ferro) tem uma massa ligeiramente menor do que os núcleos que se combinaram para formá-lo. Esse excesso de massa é libertado como energia, e é essa energia que alimenta as estrelas.

As reacções de fusão nuclear ocorrem num meio denominado plasma, frequentemente denominado o "quarto estado da matéria"

O plasma é frequentemente denominado de "o quarto estado da matéria", juntamente com os estados sólido, líquido e gasoso. Assim como um líquido ferver transformando-se em gás quando a energia é adicionada, o aquecimento de um gás forma um plasma, uma sopa de partículas carregadas positivamente (iões) e partículas carregadas negativamente (electrões).

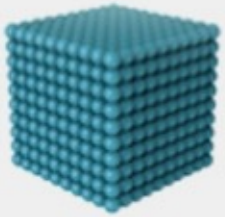
Como se forma um plasma?

Para se formar um plasma é necessário energia que permita ionizar um gás até que este atinja o estado de plasma.

Se aquecermos um gás as ligações entre o núcleo e os electrões dos átomos que compõe o gás começam a quebrar-se. Esta quebra ocorre quando um gás é aquecido de tal forma que a energia do átomo ultrapassa um certo limite, a energia de ionização. O átomo começa a separar-se e os núcleos podem ser despojados de um ou mais electrões e o átomo torna-se um ião. Este processo denomina-se ionização. Como a maioria dos átomos tem múltiplos electrões, a maioria dos átomos pode ser despojado de mais do que apenas um electrão. Se todos os electrões forem removidos, o ião torna-se completamente ionizado, resultando num núcleo positivo livre de eletrões. Um plasma é um gás ionizado, consistindo de iões positivos livres e electrões negativos livres. Normalmente, nem todos os átomos do plasma estão ionizados. Se todoso os átomos do plasma estiverem ionizados fala-se de um plasma totalmente ionizado.

A principal distinção entre um gás e um plasma resulta do plasma ser constituído por electrões e iões, ou seja, partículas carregadas, enquanto um gás regular é constituído apenas por átomos neutros. Por este motivo num plasma, temos cargas que se movem livremente. Isso significa que um plasma pode ter correntes e conduzir eletricidade, como um fio de metal. Além da sua condutividade, outra qualidade importante dos plasmas é que eles são sensíveis a campos eléctricos e magnéticos.

Aumento de Energia



SÓLIDO



LÌQUIDO



GÁS



PLASMA

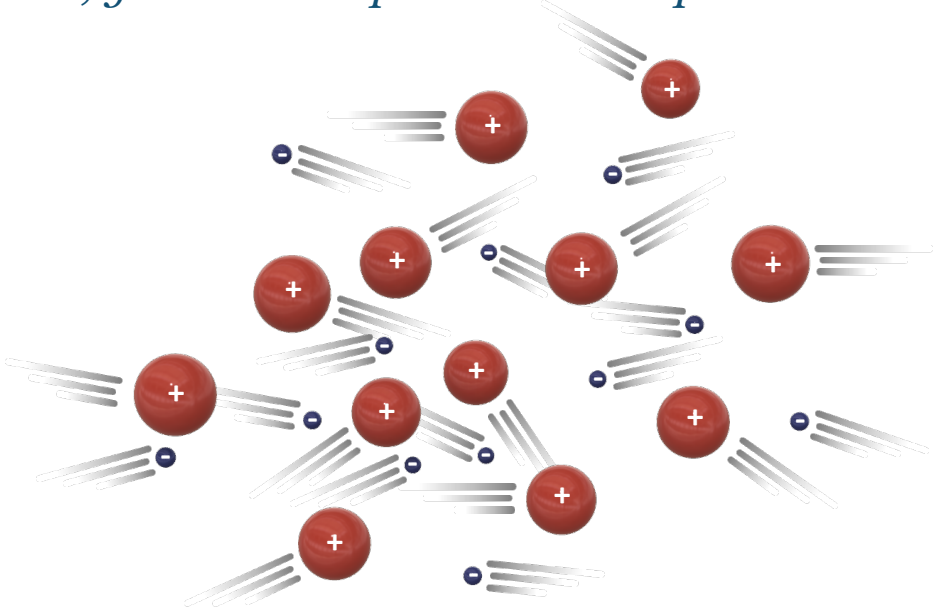
núcleo^{+}

electrão^{-}

O estado de plasma ocorre a temperaturas muito elevadas nas quais os electrões são arrancados dos núcleos atómicos

O que é um plasma?

Um plasma é um gás ionizado, globalmente quase-neutro e que exibe um comportamento colectivo.



Gás Ionizado

Um gás cujas moléculas tiveram os seus electrões arrancados devido a um grande aumento na sua energia. Todos os gases que recebem quantidades suficientemente grandes de energia podem ter os seus átomos e moléculas ionizados, ou seja, ter os seus electrões separados o suficiente para deixarem de sofrer uma grande atração eléctrica dos seus núcleos atómicos.

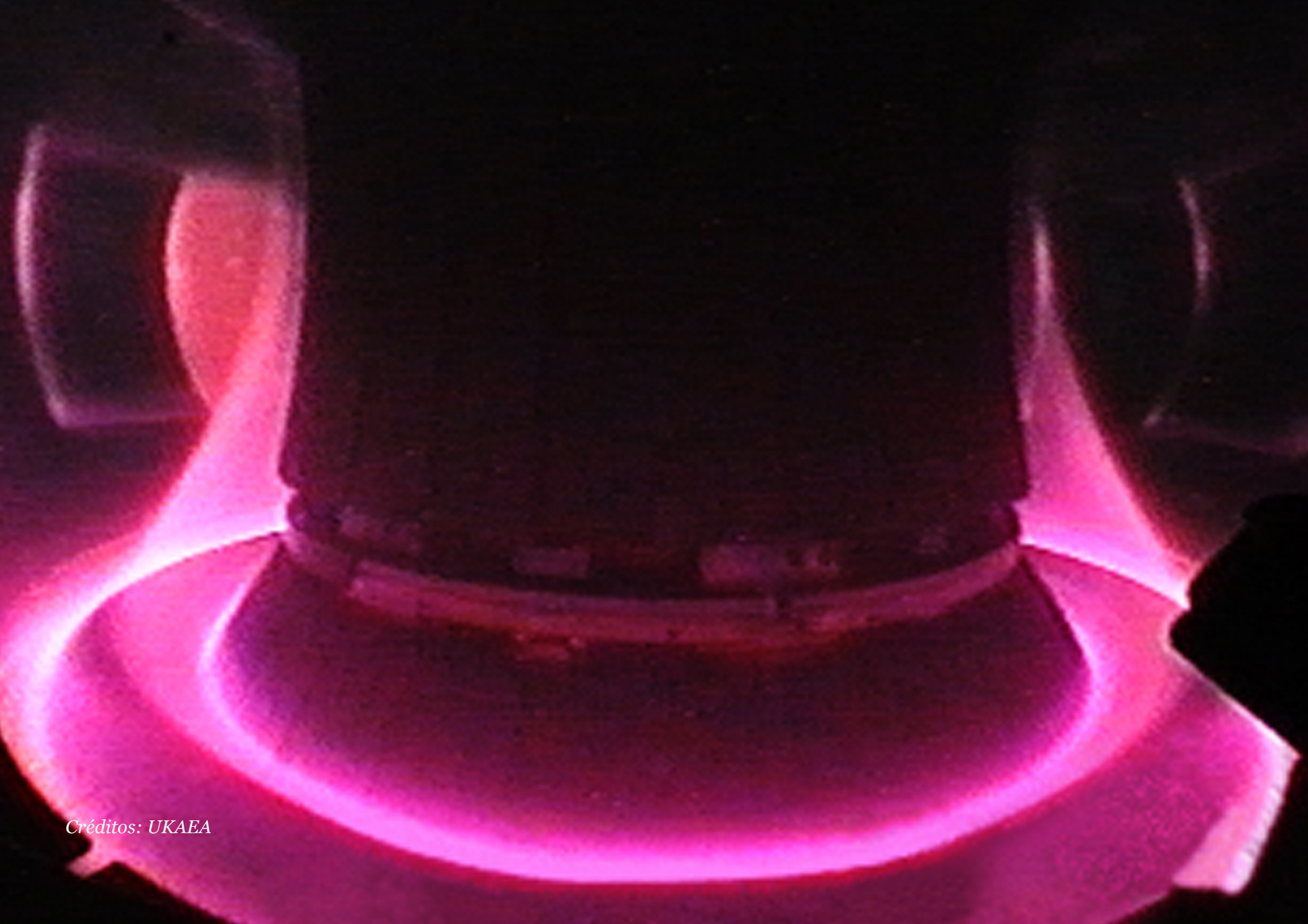
Meio neutro

O plasma comporta-se como uma “nuvem” de protões, neutros e electrões livres diferentemente dos gases que são constituídos por átomos e moléculas neutras. Além disso, as partículas de carga elétrica positiva (protões) e negativa (electrões) do plasma atraem-se mutuamente, mas têm dificuldade em ligarem-se, devido à grande velocidade e agitação térmica deste estado da matéria.

Comportamento colectivo

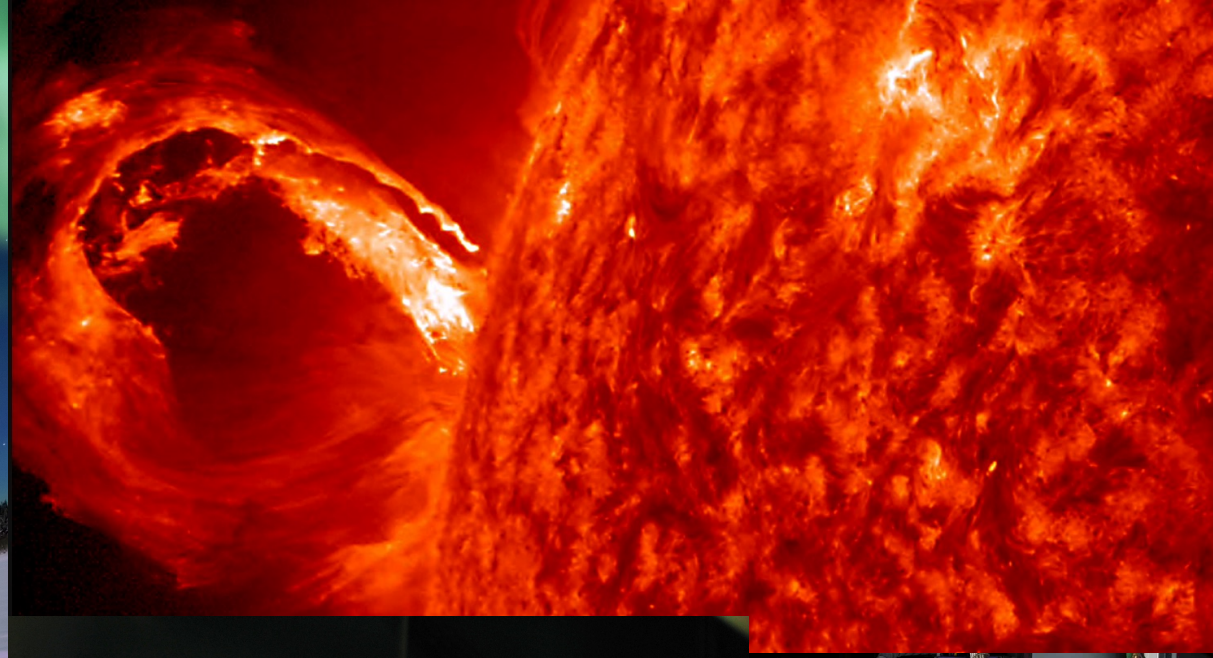
O comportamento do plasma é regido por efeitos colectivos devido a interacções electromagnéticas de longo alcance entre as partículas carregadas que o constituem

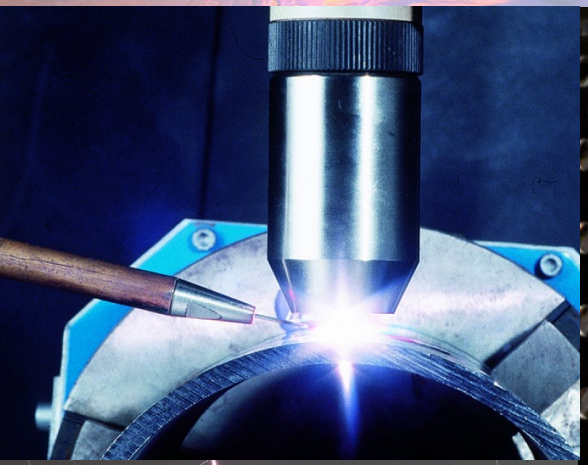

Mais de 99,9 % da matéria visível do
universo está no estado de plasma



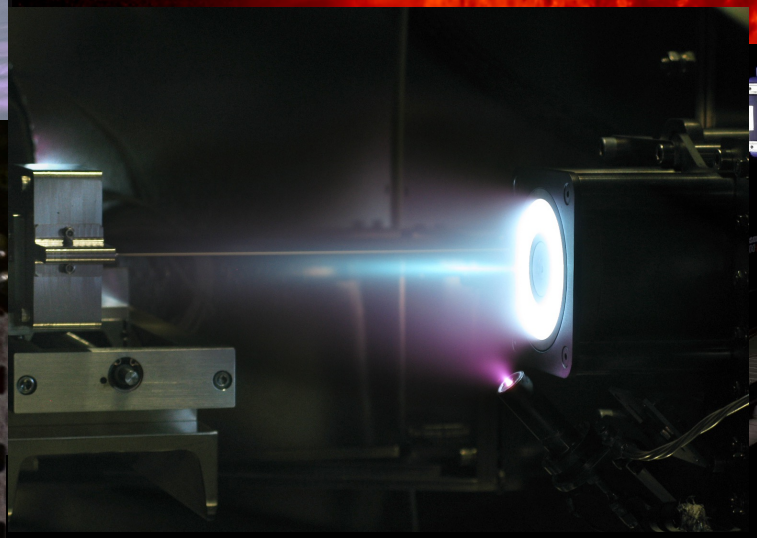
Créditos: UKAEA



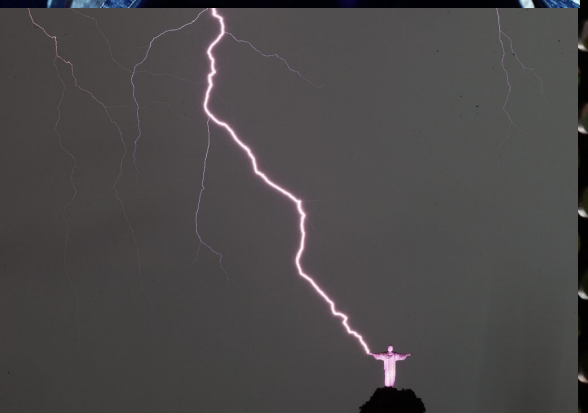








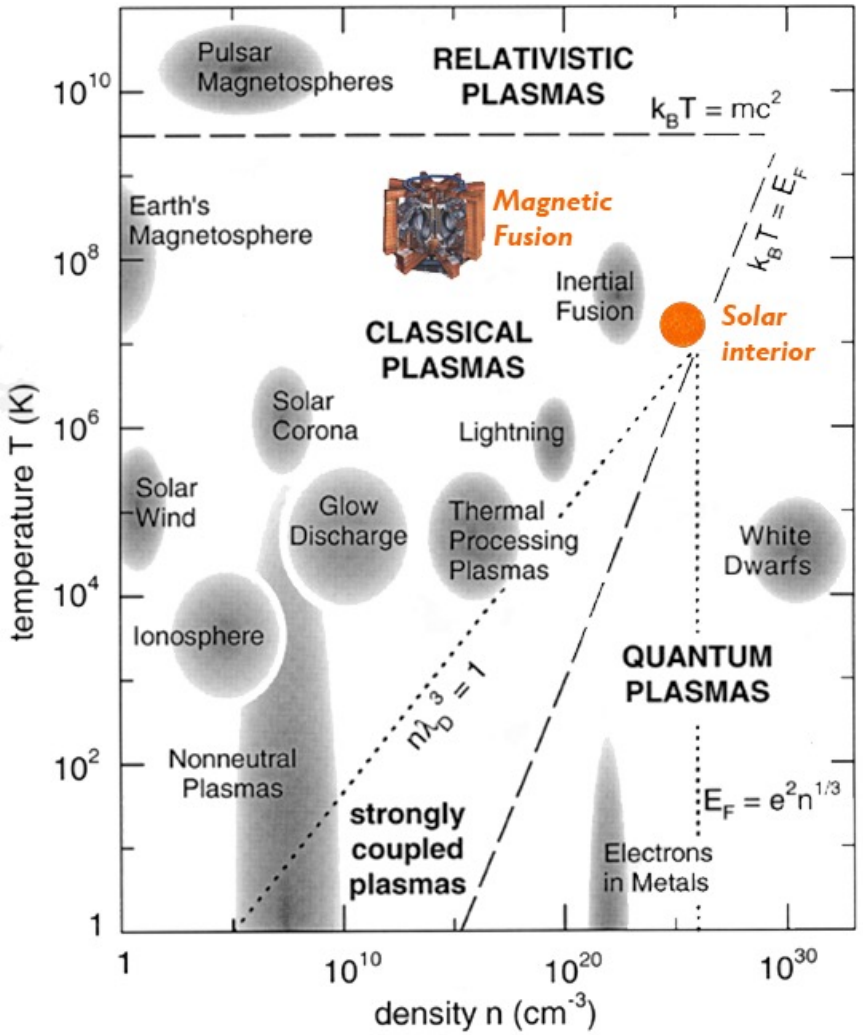


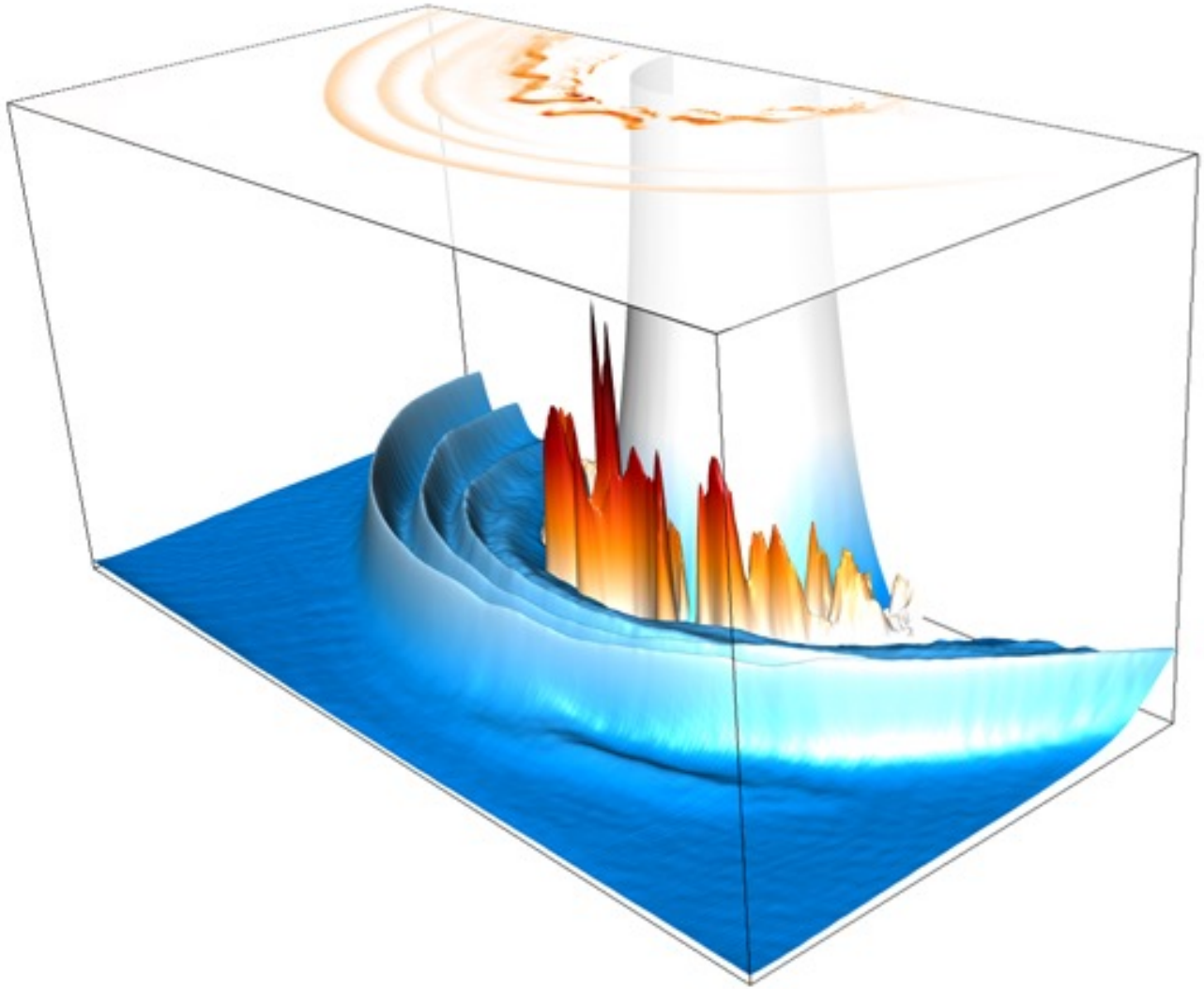


Os plasmas estão amplamente presentes na natureza e no nosso dia-a dia. Nestas páginas estão ilustrados alguns exemplos para além das estrelas e entre muitos possíveis: o plasma num reactor de fusão, o plasma ejectado durante uma tempestade solar e que atinge o nosso planeta sobe a forma de vento solar, as auroras boreais, os relâmpagos, ferramentas de corte e soldar, motores para satélite e dispositivos para produção de nanomateriais.

Os plasmas existem na natureza sob muitas formas e têm um uso generalizado em ciência e tecnologia. Como grande parte do universo está no estado de plasma, o seu comportamento e propriedades são de enorme interesse para cientistas de muitas disciplinas. Os plasmas possuem densidade e temperatura com valores que se distribuem numa larga faixa de abrangência. A densidade varia mais de 30 ordens de magnitude e a temperatura pode variar mais de 10 ordens de magnitude. A figura ao lado mostra vários tipos de plasmas.

Em alguns casos , como acontece nos plasmas astrofísicos, os plasmas estão inacessíveis para além da observação recorrendo a instrumentação sofisticada ou em experiências complexas em laboratório.





O recurso a supercomputadores permite fazer simulações extremamente complexas para perceber a complexidade dos fenómenos envolvidos Por exemplo, sob a acção de intensidades extremas de lasers ou feixes de partículas, e devido a não linearidades nos plasmas, as simulações são críticas para determinar a dinâmica de um conjunto variado de cenários complexos em experiências laboratoriais e em astrofísica

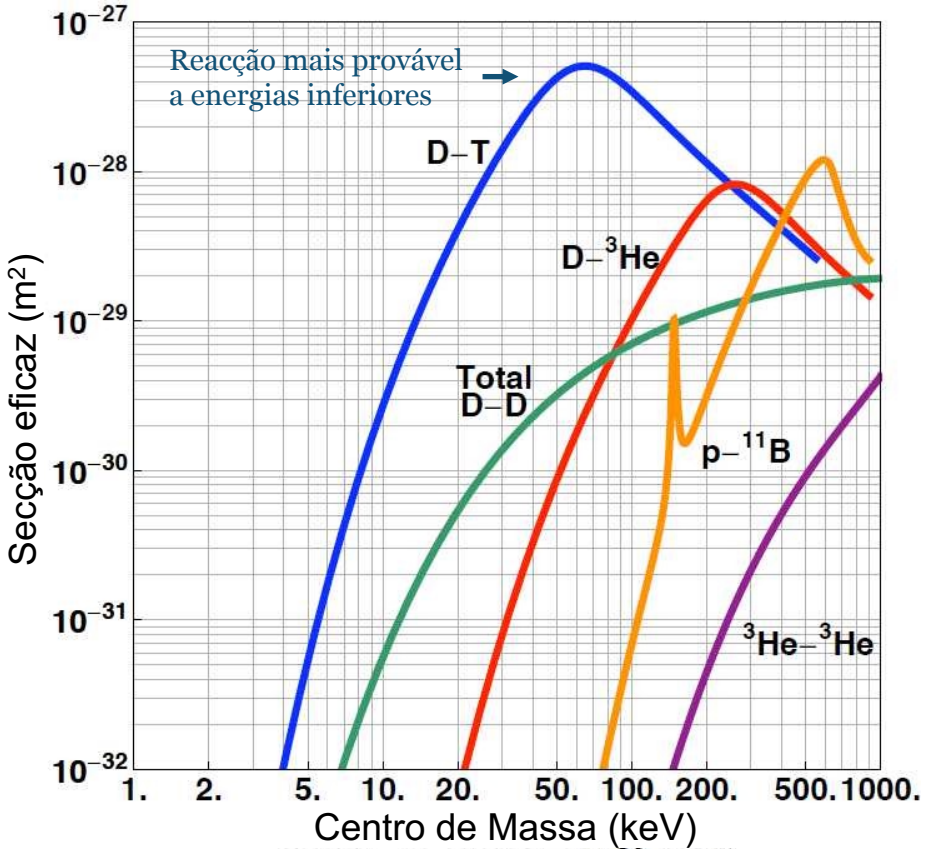
Geração de ondas de choque magnetizadas em miniatura
(Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear)

Reacções de fusão nuclear

A fusão pode envolver muitos elementos diferentes na tabela periódica. No entanto, a reacção de fusão mais fácil de produzir na Terra é a que ocorre entre dois isótopos pesados do Hidrogénio, Deutério (D) e Trítio (T). Os produtos da reacção, ou seja, uma partícula alfa (o núcleo de um átomo de hélio) e um neutrão, têm globalmente uma energia (cinética) de 17.6 MeV.

Um grama de combustível D-T poderá gerar 100000 kilowatt-hora de electricidade: são necessárias cerca de 8 toneladas de carvão para produzir a mesma energia!

O Deutério pode ser extraído da água (em média, existem 30 g por metro cúbico). O isótopo radioactivo, trítio, existe em quantidades infímas sobre a terra , mas pode ser criado a partir do Lítio, um metal leve que é abundante na crosta terrestre.



Secção eficaz de colisão para várias reacções de fusão em função da energia do no centro de massa das partículas. Este gráfico pode ser visto como uma medida da probabilidade de haver fusão.

Condições para que ocorra uma reacção de fusão

Para que a reacção de fusão ocorra de forma sustentada é necessário que sejam atingidos três parâmetros em simultâneo (temperatura de plasma, densidade e tempo de confinamento). O produto destas três quantidades é denominado do triplo produto da fusão e deve exceder uma certa quantidade. Este produto é denominado o critério de Lawson, após o investigador John Lawson o ter derivado em 1955:

$$nT\tau \geq 3.5 \times 10^{28} \text{ K s / m}^3$$

Densidade

A densidade dos iões do combustível (o número de iões por m^3) deve ser suficientemente elevada para que as reacções de fusão ocorram com uma taxa elevada. A potência de fusão gerada é reduzida se o combustível estiver diluído com átomos de impurezas ou pela acumulação de iões de Hélio resultante das reacções de fusão. À medida que as reacções de fusão ocorrem no plasma, o Hélio (as “cinzas” da reacção) deve ser removido e substituído por novos átomos de combustível.

Temperatura

As reacções de fusão ocorrem a uma taxa significativa apenas a temperaturas elevadas nas quais os iões de carga positiva conseguem superar as forças repulsivas entre eles. Num dispositivo de fusão são necessárias temperaturas da ordem dos 100 milhões de K para termos reacções Deutério-Trítio (para reacções Deutério-Deutério ocorrem são necessárias temperaturas ainda mais elevadas)

Tempo de confinamento

O tempo de confinamento de energia é uma medida de quanto tempo o plasma retém a energia antes desta ser perdida. É o quociente entre as energia térmica contida no plasma e a potência necessária para manter estas condições. Em dispositivos de fusão são usados campos magnéticos para isolar o plasma quente das paredes frias, retendo a energia por mais tempo. O tempo de confinamento aumenta substancialmente com o tamanho do plasma (volumes grandes retém calor melhor que volumes pequenos. por exemplo o Sol devido ao seu volume tem um enorme tempo de confinamento).

Para que uma reacção de fusão sustentada de Deutério e Trítio corra num campo magnético é necessário atingir as seguintes condições de plasma em simultâneo:

Temperatura de plasma (T) = 100-200 milhões K (Kelvin; 0 K = -273,15 ºC)

Tempo de confinamento (τ): 4-6 s

Densidade do plasma (n): 1-2 x 10^{20} m^{-3} (aproximadamente 1 milhão de vezes a densidade do ar).

A densidades maiores o tempo de confinamento seria menor mas é extremamente difícil atingir densidades de plasmas mais elevadas.

Para controlar a reacção de fusão nuclear é necessário confinar o plasma

Desde que compreendemos a relação de Einstein, tentamos obter energia nuclear de forma controlada. Mas se a primeira central nuclear por fissão foi inaugurada em 1954, até hoje não temos uma central de fusão nuclear. A dificuldade consiste na necessidade de vencer a enorme repulsão elétrica entre dois núcleos, que obriga a lançar os núcleos uns contra os outros a energias muito elevadas.

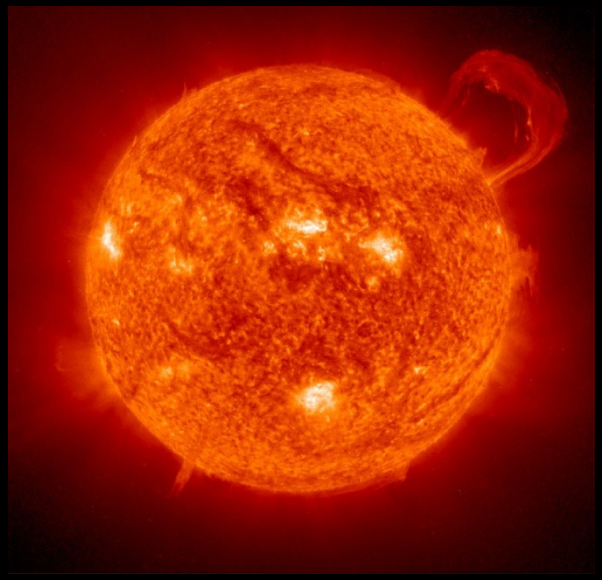
No interior do Sol (a temperaturas de 10 – 15 milhões °C), da fusão dos núcleos de hidrogénio resulta Hélio: este processo fornece a energia que, sob a forma de radiação solar, garante a vida sobre a Terra. No Sol, o "combustível" é aquecido e confinado por acção da gravidade. Na Terra, como não podemos usar a gravidade para criar densidades e temperaturas tão altas como no Sol, precisamos encontrar outra forma de obter condições tão extremas e precisamos de confinar toda essa energia. Na Terra, o confinamento deve ser conseguido por outros meios e a fusão requer uma temperatura acima de 100 milhões °C (dez vezes a temperatura no interior do Sol). Para que o processo seja eficaz, ou conseguimos aquecer fortemente estes núcleos para chocarem entre si durante muito tempo, ou aumentamos muito rapidamente a densidade dos núcleos para que choquem rapidamente entre si. Esta última é a estratégia adotada pela fusão a laser também denominado por fusão inercial.

Como um plasma apropriado para a fusão é muito quente não pode ser contido normalmente e tem 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 do plasma ser constituído basicamente de partículas carregadas eletricamente apesar de, como um todo, o plasma permanecer neutro. A ideia é usar campos magnéticos e correntes elétricas induzidas no plasma de maneira a desviar convenientemente as trajetórias das partículas de modo a mantê-las sempre dentro de uma região do espaço. A isto se chama "confinamento magnético".

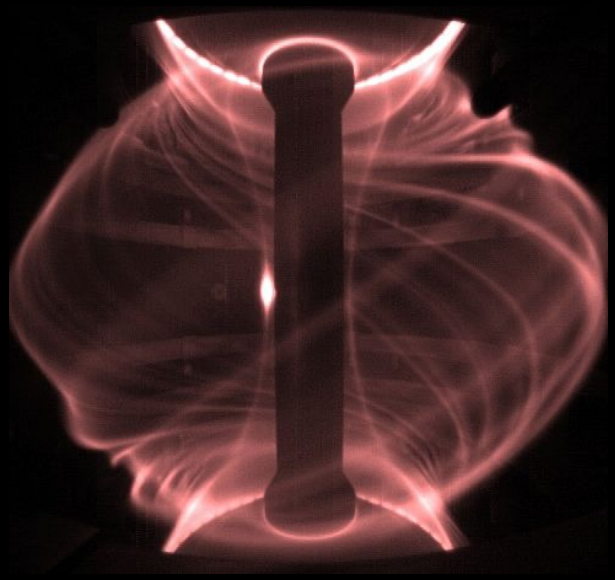
O primeiro avanço no uso pacífico da fusão como fonte de energia veio da Rússia em 1968, quando foi inventado um dispositivo de confinamento magnético com excelente capacidade de conter plasmas de alta temperatura. O dispositivo, denominado por tokamak, tem sido o foco principal das actividades de investigação em fusão desde então.

O Confinamento Magnético é o mais promissor para produção de energia

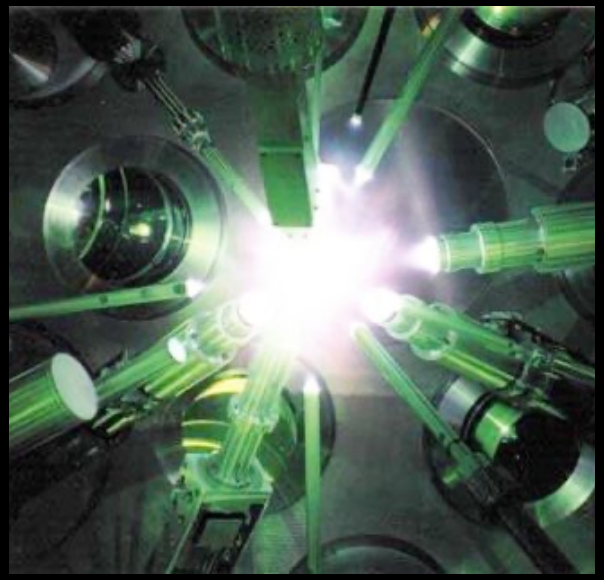
O sucesso do tokamak levou à construção de grandes dispositivos que entraram em operação na primeira metade da década de 1980, como o Joint European Torus (JET) na Europa em Culham, Reino Unido e o Tokamak Test Fusion Reactor (TFTR) na Princeton Plasma Physics Laboratório, EUA. Por todo o mundo foram também construídos dispositivos e instalações complementares para investigar a ampla gama de desafios de ciência, tecnologia e engenharia necessários para tornar a energia de fusão nuclear uma realidade.



gravitacional



magnético



inercial

Na Terra, o confinamento deve ser conseguido por outros meios diferentes do confinamento gravitacional. O Confinamento Magnético é o mais promissor para produção de energia

Fusão a laser – National ignition facility (NIF)

A Fusão por Confinamento Inercial (FCI) utiliza lasers ou feixes de iões para aquecer e comprimir uma pequena cápsula de combustível até cerca de 1000 vezes a densidade de um sólido,

No dia 9 de agosto de 2021, começaram a circular furiosamente emails com o rumor de uma grande descoberta na National Ignition Facility (NIF), em Livermore, na Califórnia. A enorme expectativa que se criou obrigou o Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) a anunciar em comunicado de imprensa, ainda sem revisão dos resultados científicos pela comunidade, a obtenção de um ganho próximo de 1 (0,7) de uma das suas experiências de fusão nuclear com lasers no dia 8 de agosto: a energia libertada aproximou-se da energia injectada na experiência pelos lasers.

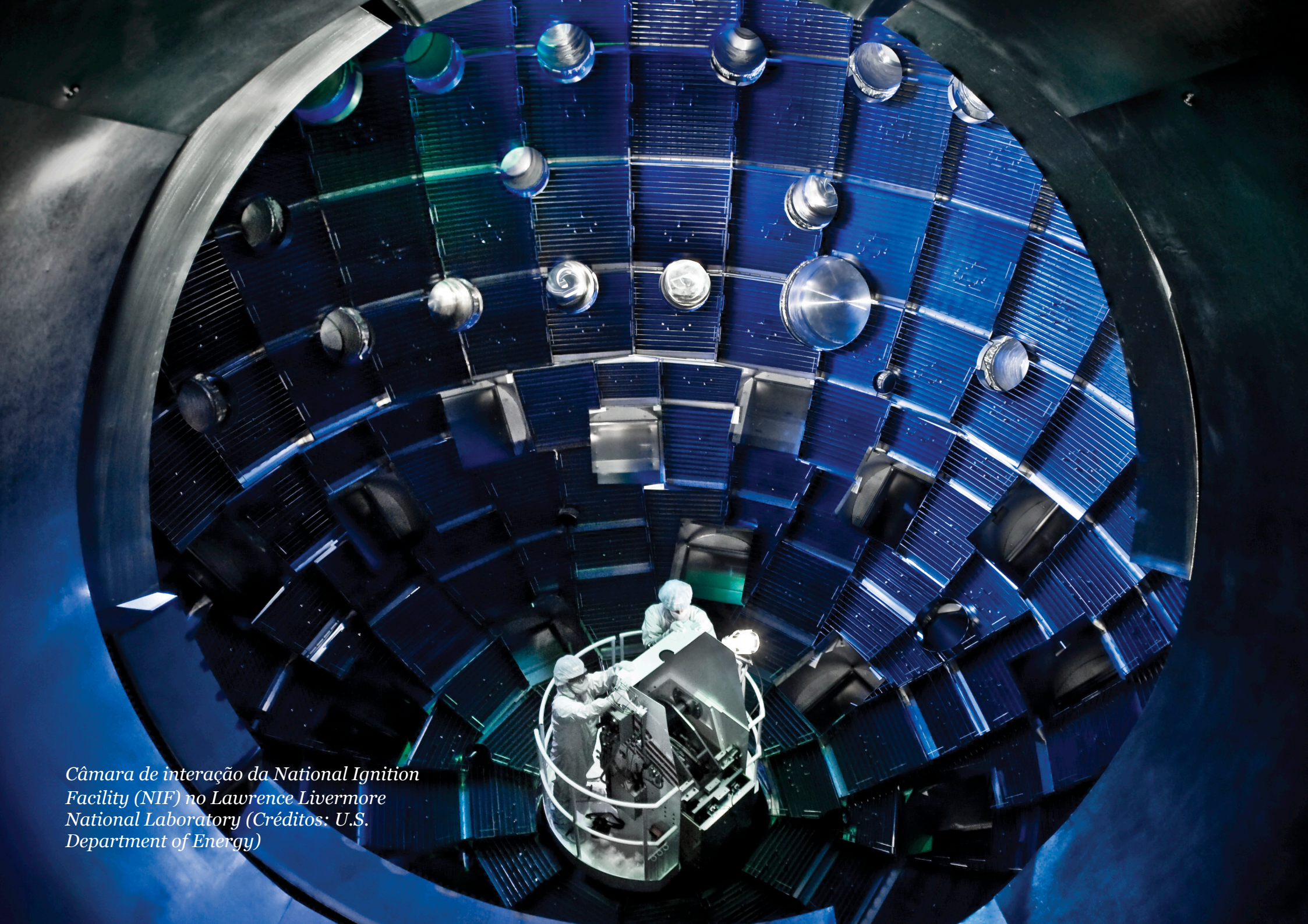
Desde a invenção dos lasers em 1959, percebemos que podemos controlar a luz de forma a depositar enormes quantidades de energia num ponto do espaço muito localizado, durante um tempo ultra-curto.

Pouco depois da invenção do laser, foi proposta a fusão nuclear com lasers. A possibilidade de utilizar lasers para atingir as condições necessárias para a fusão nuclear foi postulada em 1964 por John Dawson, na altura na Universidade de Princeton, e Nikolai Basov (prémio Nobel da Física pelo laser em 1964). Anteciparam o potencial dos lasers (inventados apenas quatro anos antes, em 1960), mas desconheciam os avanços dos cientistas que estavam a desenhar armas nucleares no LLNL. Aí também procuravam, desde 1958, novas formas de atingir as condições para a fusão nuclear controlada, com o objetivo de produzir energia elétrica, mas utilizando a própria luz emitida por outras explosões nucleares.

Com acesso a experiências (subterrâneas), os cientistas do LLNL tinham, entretanto, descoberto que era fundamental comprimir o combustível para que a fusão nuclear pudesse ser energeticamente mais simples de atingir. O trabalho de LLNL, liderado por John Nuckolls, é publicado na revista Nature* em 1972 e traça o caminho para explorar a fusão nuclear com lasers. Esse trabalho, baseado em modelos computacionais muito limitados, é suficientemente promissor para estimular outros laboratórios e universidades a explorar esta ideia, embora só em 1994 tivesse sido desclassificado todo o conhecimento sobre fusão nuclear com lasers, entretanto, descoberto nos laboratórios militares.

A ideia inicial era fazer incidir em simultâneo vários lasers sobre uma cápsula cheia de DT, deutério e trítio, isótopos do hidrogénio, que precisam de vencer uma barreira de energia ligeiramente menor do que dois núcleos de deutério para se fundir, para que a cápsula, ao explodir, comprimisse o gás no

* https://www.nature.com/articles/239139a0



Câmara de interação da National Ignition Facility (NIF) no Lawrence Livermore National Laboratory (Créditos: U.S. Department of Energy)

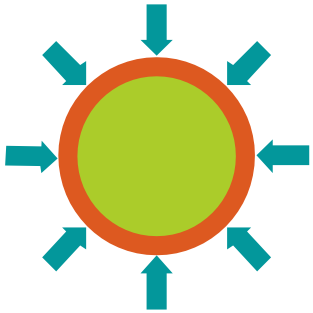
seu interior, até temperaturas e densidades tais que criassem as condições para a fusão de todo o combustível da cápsula. Gerar algumas reações de fusão é relativamente fácil; com frequência assistimos a anúncios da produção de (alguns) neutrões como evidência da fusão nuclear, mas o desafio é chegar à ignição, ou seja, produzir reacções de fusão em quantidade suficiente para que se propaguem a uma parte apreciável do combustível.

A NIF foi construída para demonstrar a fusão nuclear com lasers.

Com a tecnologia laser dos anos 80, na qual a NIF foi baseada, rapidamente se percebeu que não seria possível fazer uma irradiação homogénea da cápsula de combustível: só se o aquecimento da cápsula fosse perfeitamente simétrico é que se esperaria que todo o combustível se comprimisse no seu centro até ao ponto de fusão. Assim, optou-se por um caminho alternativo: converter primeiro a energia laser em raios-X brilhantes e homogéneos, e usar então os raios-x para aquecer a cápsula de D-T.

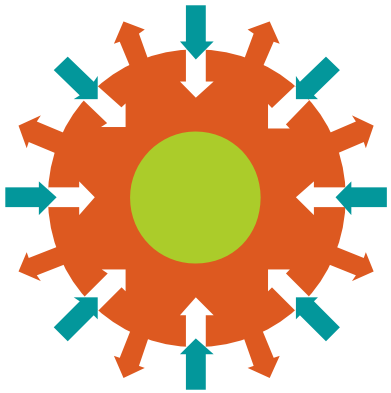
O caminho da NIF tem sido tortuoso. Logo após a inauguração, os lasers atingiram as especificações previstas nos anos 80 mas, infelizmente, a física revelou-se muito mais complexa do que antecipado. A turbulência, o eterno problema por resolver, voltou a revelar-se – comprimir uma cápsula de poucos milímetros de raio tem que ser feito rapidamente, para se aumentar a densidade, mas também gentilmente para que as instabilidades não quebrem a simetria da compressão. Durante mais de 10 anos, muito do trabalho dos cientistas da NIF tem sido compreender e ultrapassar os desafios da turbulência no processo de compressão.

Os resultados obtidos no início de Agosto de 2021 foram um avanço extraordinário mas na altura não se atingiu o ganho de 1, o objetivo da NIF. No entanto estabeleceu um caminho identificado para a fusão nuclear com lasers tendo finalmente sido atingida a ignição a 5 de Dezembro de 2022. 192 feixes de laser, disparados numa pellet de combustível de Deutério e Trítio com cerca de 1 mm de diâmetro inserida dentro de um pequeno cilindro de ouro, permitiram que durante breves instantes fosse atingida uma temperatura superior à do núcleo do Sol, atingindo as condições de ignição, foi obtida mais energia de fusão do que aquela que foi inserida através dos feixes laser. Especificamente, para 2 milhões de Joules de energia laser, foram obtidos 3 milhões de Joules de energia de fusão, um factor de ganho de uma vez e meia. O Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), foi, durante alguns milionésimos de um milionésimo de segundo, o local com maior



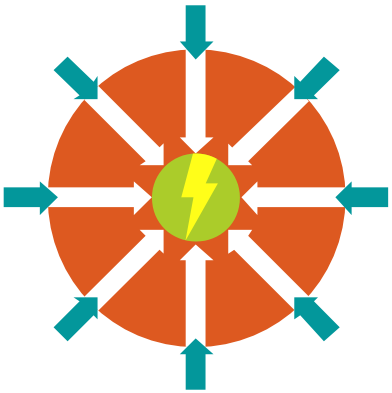
1

Lasers iluminam o alvo



2

O alvo é comprimido



3

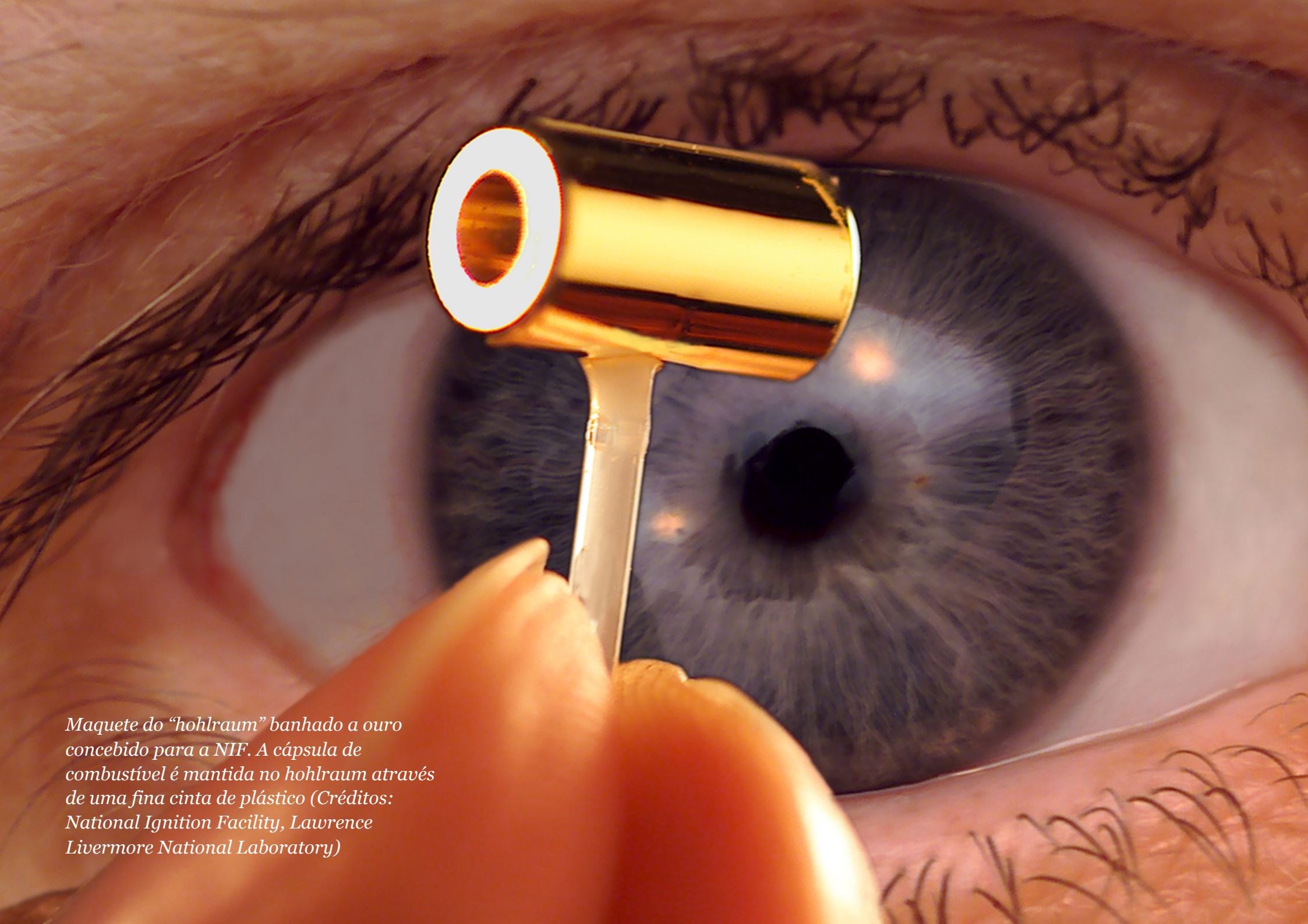
A ignição acontece



4

O alvo “queima“

A fusão inercial em 4 passos. o combustível é comprimido por um factor superior a 30. Isto é equivalente a comprimir uma bola de futebol para o tamanho de uma lentilha, mas mantendo a forma esférica da bola com elevada precisão durante toda a compressão



Maquete do "hohlraum" banhado a ouro concebido para a NIF. A cápsula de combustível é mantida no hohlraum através de uma fina cinta de plástico (Créditos: National Ignition Facility, Lawrence Livermore National Laboratory)

intensidade de energia libertada (cerca de mil triliões de Watt por centímetro quadrado) do Sistema Solar. O combustível e o cilindro foram vaporizados em poucos nanossegundos durante a experiência.

Na experiência do NIF, os feixes laser são focados nas paredes interiores de um pequeno cilindro oco, denominado ”hohlraum”, do tamanho de um dedal, no interior do qual está suspensa uma minúscula cápsula esférica de diamante, do tamanho de um grão de pimenta, que contém o combustível de deutério e trítio. Os componentes deste cilindro demoraram cerca de sete meses para serem produzidos e cerca de duas semanas para montagem. A reacção dos lasers com o cilindro gera uma explosão de raios-X de tal intensidade que a cápsula é comprimida, um processo designado “irradiação indirecta”. Ao diminuir violentamente de volume, os átomos de hidrogénio acabam por se unir.

Este é o funcionamento em teoria. Na prática, tem-se revelado extremamente complicado conseguir que este processo se dê de uma forma equilibrada, homogénea e sustentada durante tempo suficiente para que a reacção de fusão seja rentável. Para se compreender o desafio tecnológico, note-se que o combustível é comprimido por um factor superior a 30. Isto é equivalente a comprimir uma bola de futebol para o tamanho de uma lentilha, mas mantendo a forma esférica da bola com elevada precisão durante toda a compressão. A sua superfície não pode ter rugosidades muito maiores do que a espessura de um cabelo. No momento de compressão máxima, a nossa bola-lentilha tem condições idênticas às do centro do nosso sol.

Antes deste resultado histórico, já tinham sido feitas centenas de experiências semelhantes, cujos resultados os investigadores aproveitaram para refinar o conhecimento sobre a física da fusão inercial. Já em Agosto de 2022, um dos disparos do laser levou a uma reacção de fusão com uma energia de 1,35 milhões de Joules, à beira da ignição. Mas estes últimos resultados não deixam qualquer dúvida sobre a ultrapassagem deste ponto crucial. Na experiência de Dezembro foi finalmente atingida a ignição, produzindo reações de fusão em quantidade suficiente para que se propagarem a uma parte apreciável do combustível. Nestas experiências, assistiu-se finalmente ao início deste processo, mas, ainda assim, ficou bastante combustível por “queimar”.

“É uma conquista histórica”, disse na altura Kim Budil, directora do LLNL, durante a conferência de imprensa que anunciou o resultado, num sentimento partilhado pelos diversos representantes governamentais e científicos presentes. No entanto, reconhece-se que ainda estamos a algumas décadas

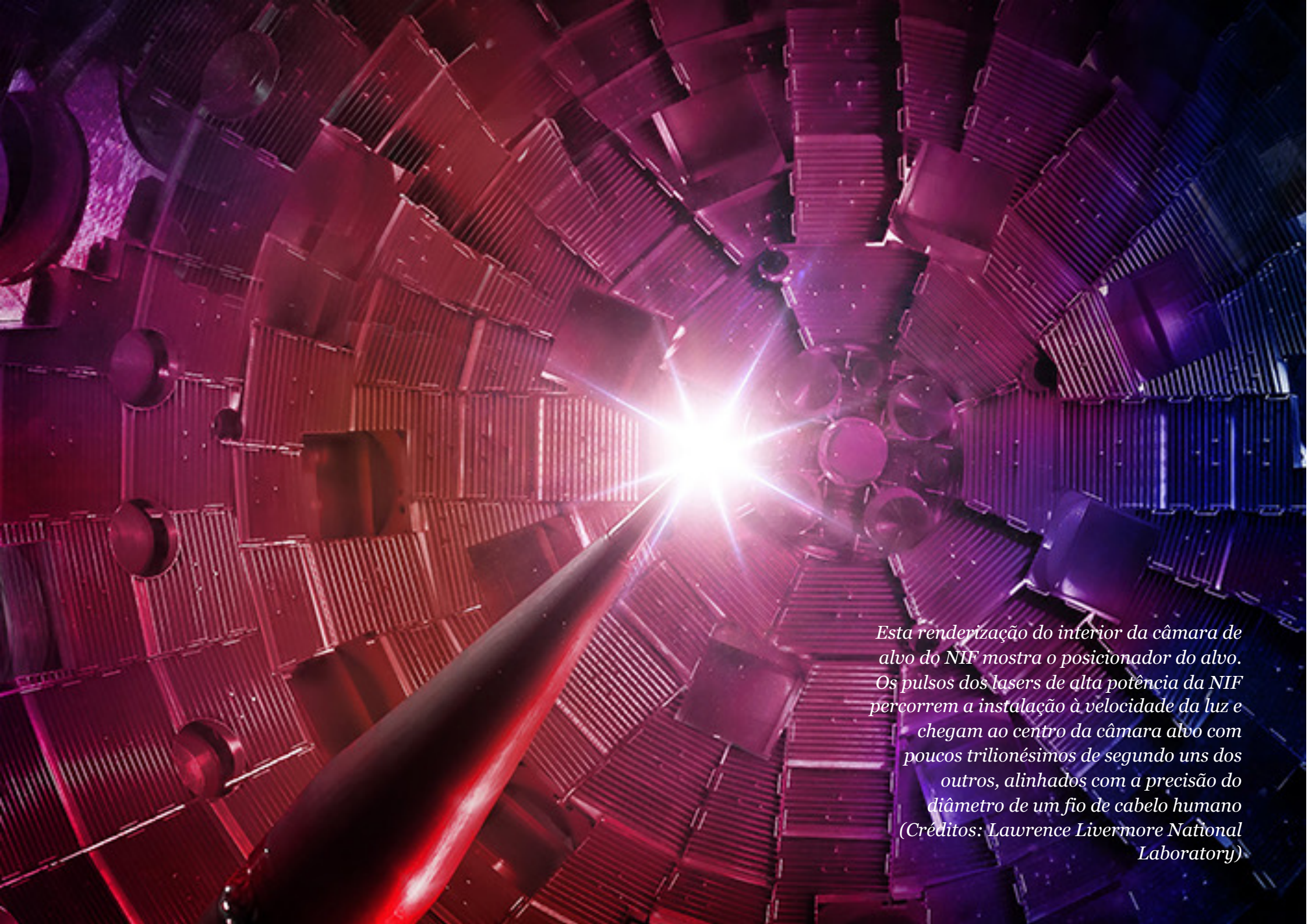


Um alvo a ser preparado nas instalações do Laboratório Nacional Ignition Facility do Lawrence Livermore National Laboratory (Créditos: Lawrence Livermore National Laboratory)

(“mas não cinco, nem quatro”, nas suas palavras) de conseguir fazer uso comercial da fusão nuclear. De facto, a energia que foi necessária para gerar os impulsos laser que dão início ao processo é, por enquanto, de 300 milhões de Joules, ou seja, a energia gerada é apenas 1% da que foi necessária. No entanto estes números não são desencorajadores: de facto, o NIF foi desenhado há mais de um par de décadas, quando a tecnologia laser estava muito menos desenvolvida do que actualmente. Um reactor de fusão a laser usando tecnologia actual pode fazer subir este valor o suficiente para sonharmos com o dia em que se obtém mais energia do que a que foi utilizada. Vários outros disparos conseguiram a ignição durante os meses seguintes e em 30 de julho de 2023, o laser da NIF forneceu novamente 2,05 MJ de energia ao alvo, resultando em 3,88 MJ de energia de fusão, o maior rendimento alcançado até à data seguido por 3,4 MJ de energia de fusão, o segundo maior rendimento de neutrões alguma vez alcançado na NIF, obtido em Outubro de 2023. Estes resultados demonstraram a capacidade da NIF para produzir consistentemente energia de fusão a níveis multi-megajoule.

Estes são resultados marcantes e, embora a tecnologia seja bastante diferente do que se prevê a médio prazo para uma central de fusão, permite um avanço significativo na área aproximando-nos um passo na busca por uma nova fonte de energia. Os desafios científicos e tecnológicos para atingirmos um reactor de fusão são enormes; alguns são comuns à fusão nuclear por confinamento magnético (por exemplo, materiais para a fusão capazes de suportar fluxos muito elevados de neutrões) outros são específicos da fusão nuclear a laser. As duas abordagens têm trabalhado em conjunto com vista a, num futuro que se espera próximo, podermos aceder a uma fonte de energia limpa e praticamente inesgotável, um objectivo não só inspirador, mas sobretudo essencial para a sobrevivência das gerações futuras.

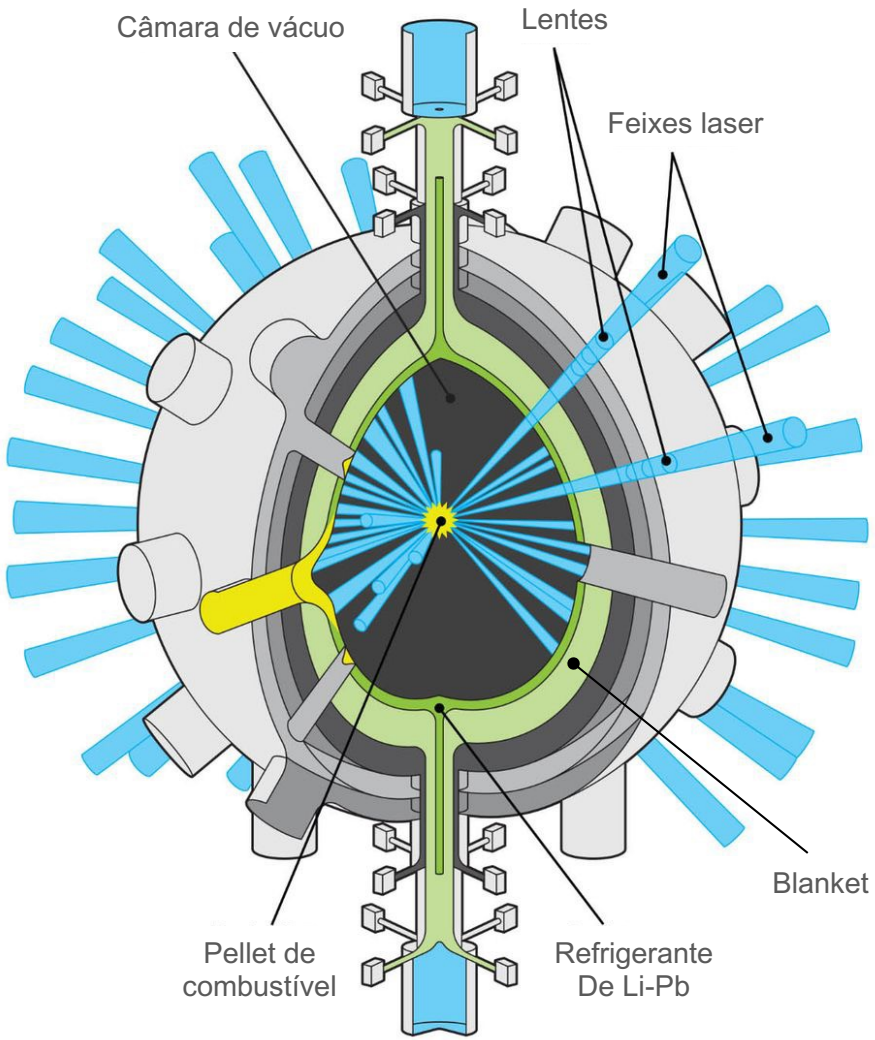
Há muito trabalho a ser feito para tornar a fusão capaz de gerar electricidade em escala comercial. Um dos objetivos da fusão nuclear é converter estes avanços fundamentais no desenho de uma central de produção de energia eléctrica. Estamos ainda longe desse objetivo. Será necessário desenvolver tecnologia laser mais eficiente, novos alvos mais baratos, conseguir uma taxa de repetição elevada e estudar os mecanismos mais eficientes para se converter a energia libertada em energia elétrica. Há, no entanto, já muitos avanços tecnológicos promissores e muitos destes passos intermédios terão também consequências e impacto tecnológico para lá da fusão nuclear. Quando podemos esperar mais desenvolvimentos da fusão inercial? Já sabemos que apenas uma



Esta renderização do interior da câmara de alvo do NIF mostra o posicionador do alvo. Os pulsos dos lasers de alta potência da NIF percorrem a instalação à velocidade da luz e chegam ao centro da câmara alvo com poucos trilionésimos de segundo uns dos outros, alinhados com a precisão do diâmetro de um fio de cabelo humano (Créditos: Lawrence Livermore National Laboratory)

fração do combustível nas experiências de LLNL foi de facto consumido – deve ser possível agora optimizar os resultados para saltar de ganhos de 1,5 para ganhos próximos de 30 ou 40. Um futuro reactor, capaz de produzir energia elétrica de forma economicamente relevante, necessitará de ganhos da ordem de 100 e de “novas” estrelas criadas dez vezes por segundo (enquanto neste momento é gerada uma explosão por dia). Isto implicará desenvolvimentos quer nos lasers e na sua eficiência quer na fabricação dos alvos. Mas agora será tudo muito mais fácil porque sabemos qual o objetivo a atingir (e que é atingível).

Se a comercialização de electricidade produzida a partir de fusão nuclear for bem-sucedida, o mundo poderá olhar para as conquistas do NIF daqui a décadas como um dos marcos mais proeminentes que ajudaram a inaugurar a era da fusão.



Desenho conceptual de um reactor de fusão inercial (Crédito: ilustração de Chris Philpot https://spectrum.ieee.org/5-big-ideas-for-making-fusion-power-a-reality#toggle-gdpr)

Fusão Nuclear por Confinamento Magnético

3

O que é a fusão nuclear por confinamento magnético?

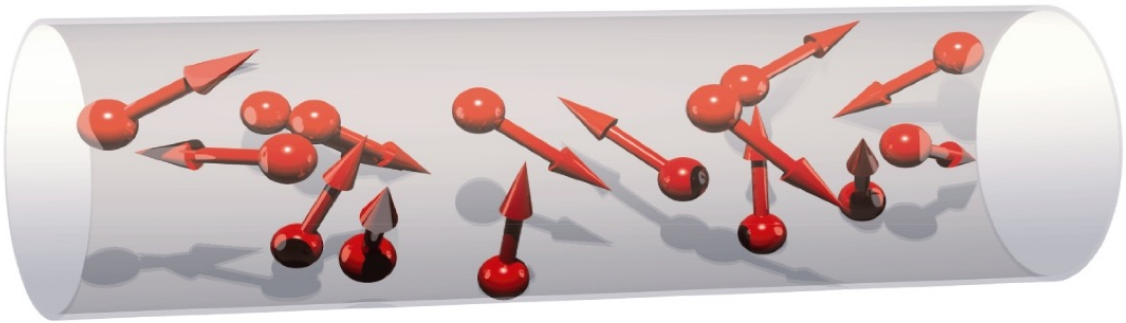
As reacções de fusão ocorrem quando os núcleos têm velocidade suficiente para ultrapassar as forças repulsivas entre as suas cargas eléctricas. No caso das reacções D-T, são necessárias temperaturas acima de 100 milhões °C, bem acima da temperatura para a qual um gás está completamente ionizado e se 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. Esta tarefa constitui um desafio, quer em termos de se compreender os complexos processos físicos envolvidos, quer pela necessidade de novas e sofisticadas tecnologias. O confinamento magnético do plasma é uma das soluções para este problema. 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 reactor, nas quais dissipariam a sua energia. Quando uma partícula carregada entra num campo magnético, a partícula carregada começa a girar em torno das linhas do campo magnético.

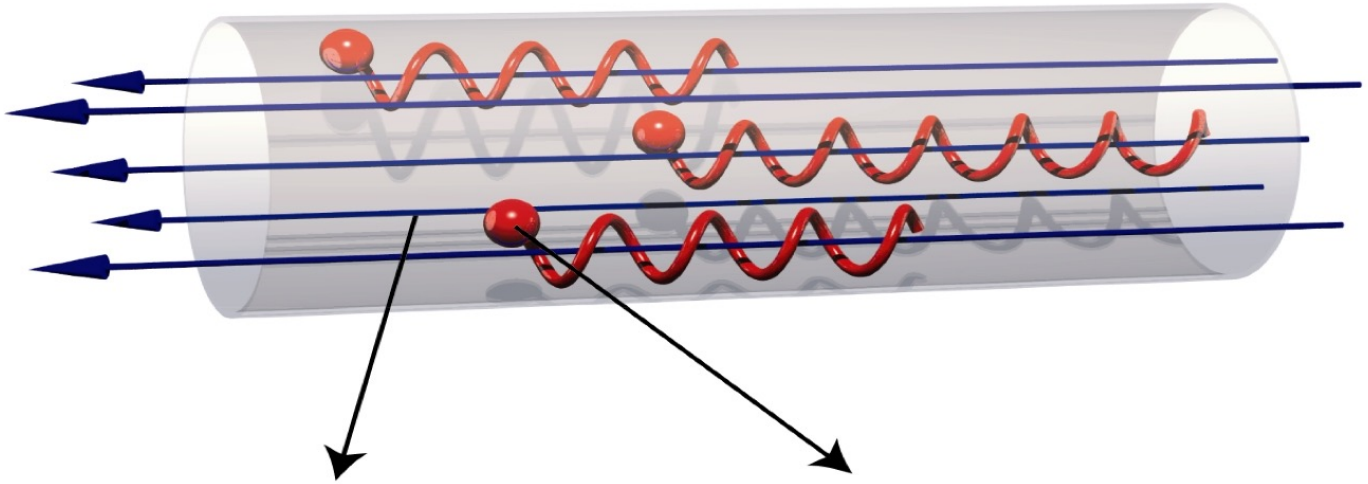
Quando a partícula está a mover-se perpendicularmente ao campo magnético, ela começará a mover-se em círculos ao redor da linha do campo magnético. Se a partícula também tiver uma velocidade na direção do campo magnético, a partícula seguirá uma trajetória helicoidal em redor da linha do campo magnético. Este movimento circular devido ao campo magnético é muito útil porque podemos controlar o plasma com ímãs, mantendo-o longe das paredes do reactor e suspender o plasma, para que ele não possa derreter o dispositivo de fusão ao mesmo tempo que reduz o arrefecimento do plasma minimizando a interacção com as paredes.

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).

Sem campo magnético



Com campo magnético

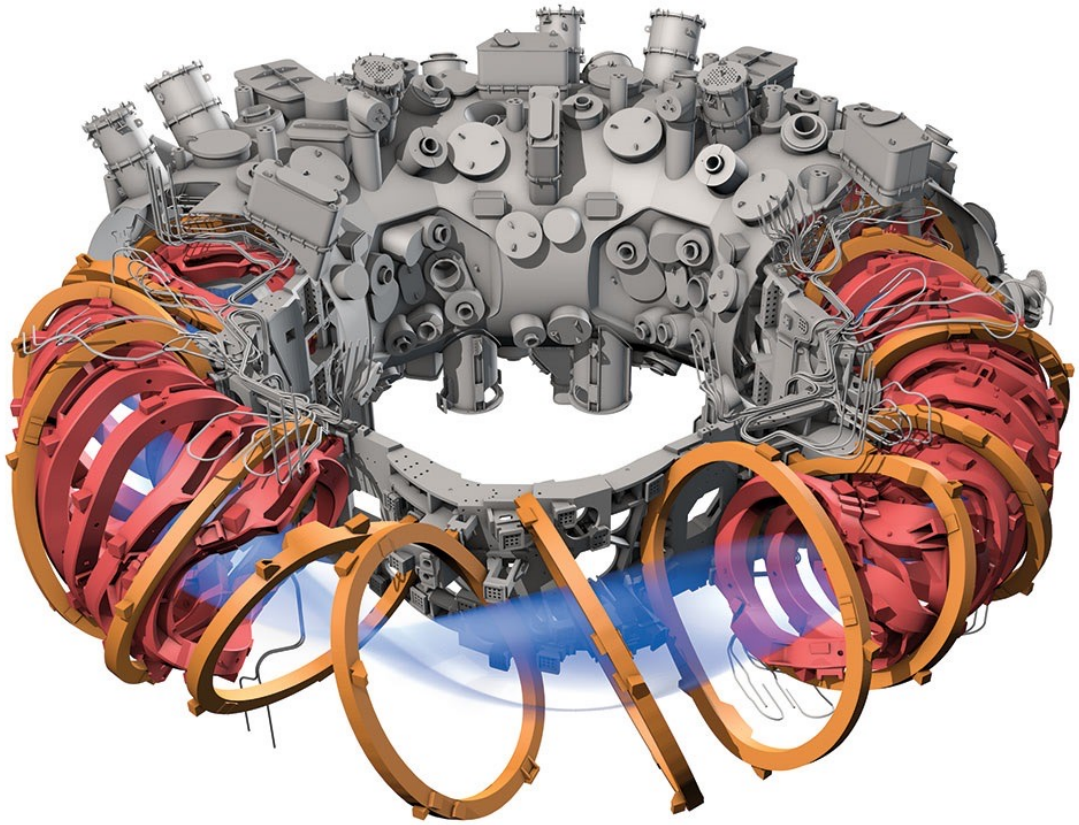


As partículas carregadas descrevem movimentos circulares no campo magnético limitando o seu movimento da direcção perpendicular ao campo magnético

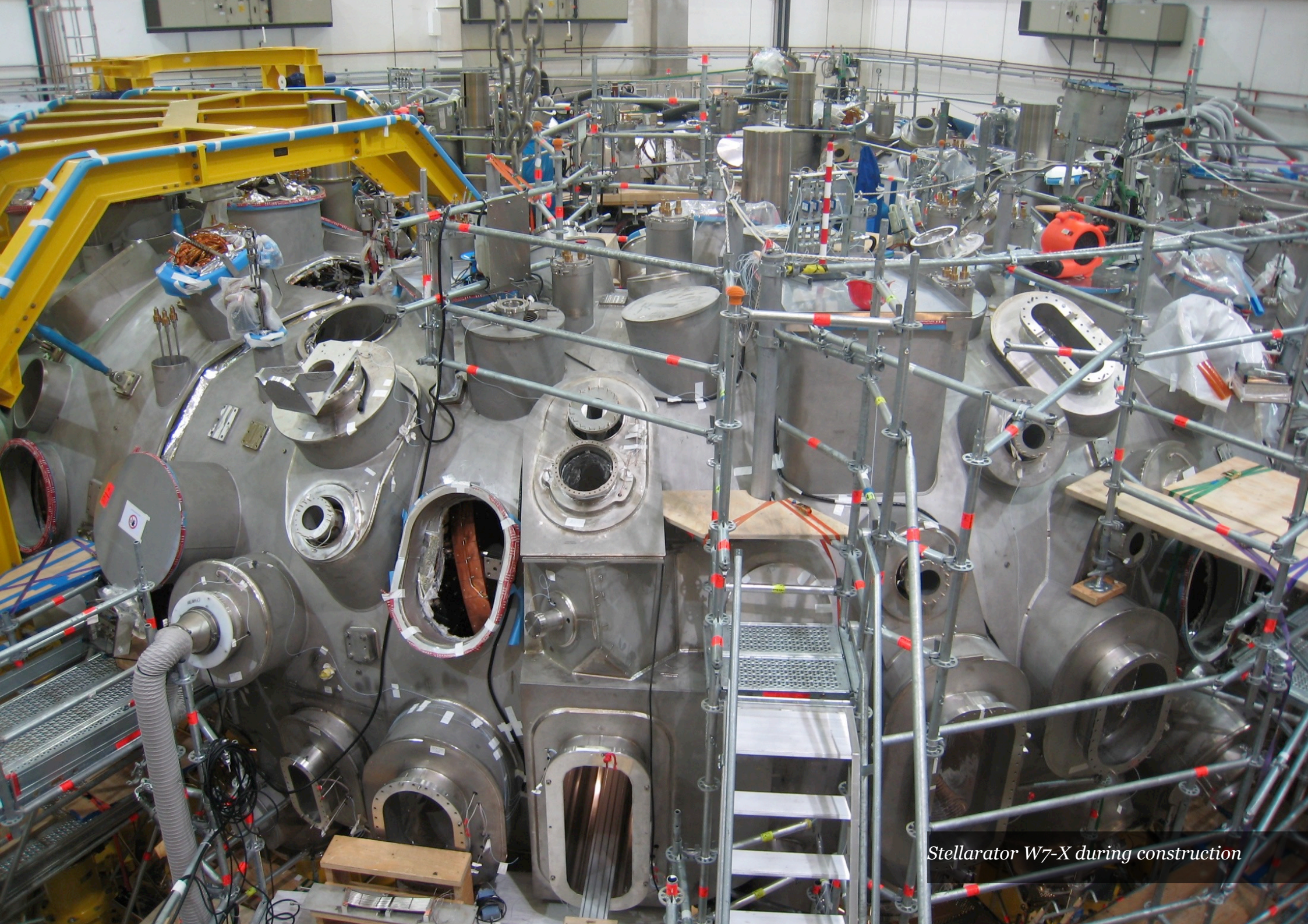
Stellarators

Nos stellarators a torção helicoidal das linhas de campo é alcançada apenas com bobinas externas que devem ser torcidas por forma a criar o campo desejado fazendo com que as bobinas magnéticas e o plasma tenham uma forma complicada. Os stellarators usam bobines magnéticas que produzem campos magnéticos extremamente fortes (no W7-X o campo magnético é de 3T ou seja ~100000 vezes o campo magnético à superfície da Terra), e torcidos, que se enrolam ao longo duma geometria toroidal.

Os stellarators têm algumas vantagens sobre os tokamaks: requerem a injecção de menos potência para sustentar a reacção, têm mais flexibilidade no design e permitem a simplificação de alguns aspectos do controlo do plasma. No entanto estes benefícios têm como custo uma complexidade acrescida, especialmente no desenho das bobines magnéticas e menor volume de plasma.



Stelarator Wendelstein7-X (W7.X, Germany)



Stellarator W7-X during construction

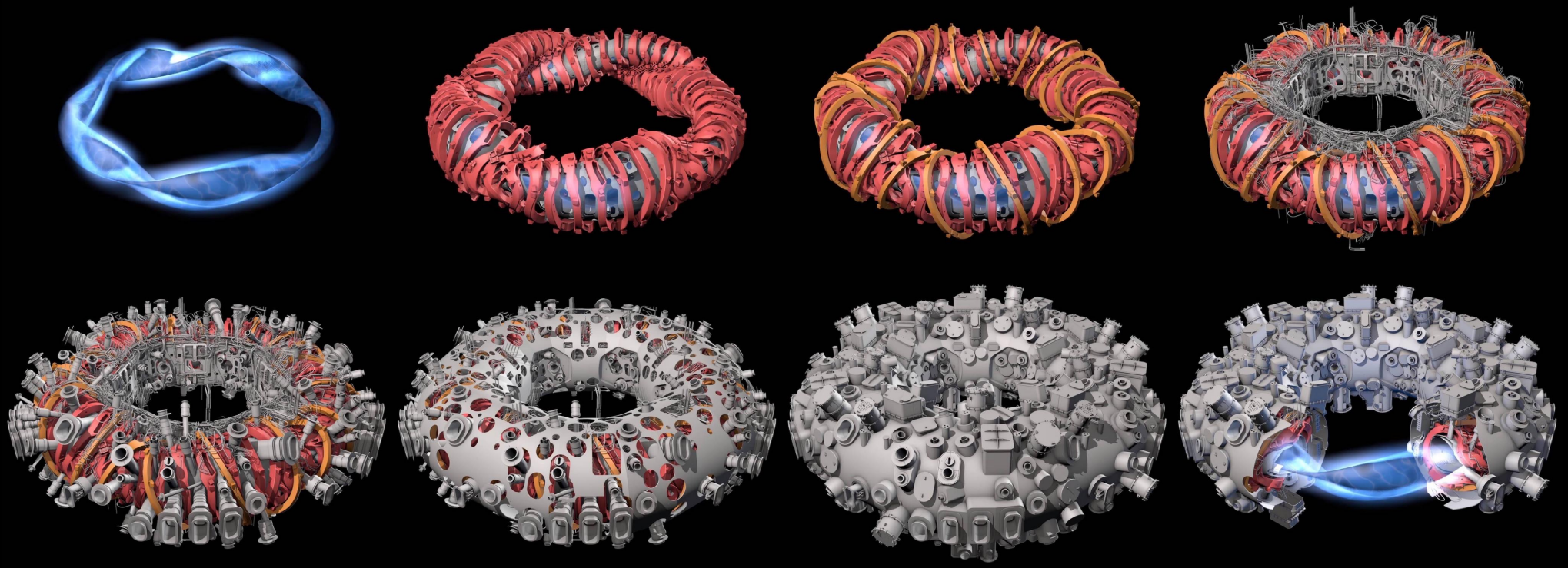
Para avançar no design dos stellarators os cientistas recorrem a super computadores e teoria de plasmas avançada. O stellarator não depende de uma corrente de plasma toroidal: a sua configuração magnética, não tem simetria axial e é produzida ou por dois conjuntos de bobinas interligadas, ou (para um reactor) por um conjunto de bobinas não-planares em torno da câmara. Os Stellarators têm a potencialidade intrínseca para operação contínua.

O Wendelstein 7-X (W7-X), na Alemanha, é o maior dispositivo de fusão do mundo do tipo stellarator. Este stellarator foi construído com bobinas supercondutoras modulares que permitem a operação do plasma em estado estacionário para explorar a relevância deste conceito de reactor. O W7-X tem como objectivo investigar a adequação deste tipo de reactor para uma central. O W7-X tem um campo magnético otimizado para confinamento do plasma, que é produzido por um sistema de 50 bobinas magnéticas não planares e supercondutoras, sendo esta a peça central técnica do dispositivo. Espera-se que o equilíbrio e o confinamento do plasma sejam de qualidade comparável à de um tokamak do mesmo tamanho. Mas evitará as desvantagens do tokamak nomeadamente, a necessidade de criar uma corrente de plasma elevada para criar uma das componentes do campo magnético.

Os stellarators poderão vir a fornecer uma solução para um central de fusão tecnicamente mais simples do que os tokamaks. Com descargas de plasma com duração de até 30 minutos, o W7-X tem como objectivo demonstrar a propriedade essencial do stellarator, a operação contínua. Para tal também foi essencial a instalação de componentes arrefecidos a água no interior da câmara de vácuo permitindo-lhes aguentar a exposição contínua a partículas e calor vindas do plasma.

O W7-X necessitou do investimento de 1.1. milhões de horas de trabalho para montar, usando um dos modelos de engenharia mais complexo alguma vez imaginado, e tem de suportar enorme variações de temperatura, e forças enormes. Um contentor de 16 metros contém todas as bobines magnéticas e o hélio líquido refrigerante. Por este contentor passam 150 portas de acesso

A montagem do Wendelstein 7-X foi concluída em 2014, e o primeiro plasma foi produzido em 10 de dezembro de 2015.



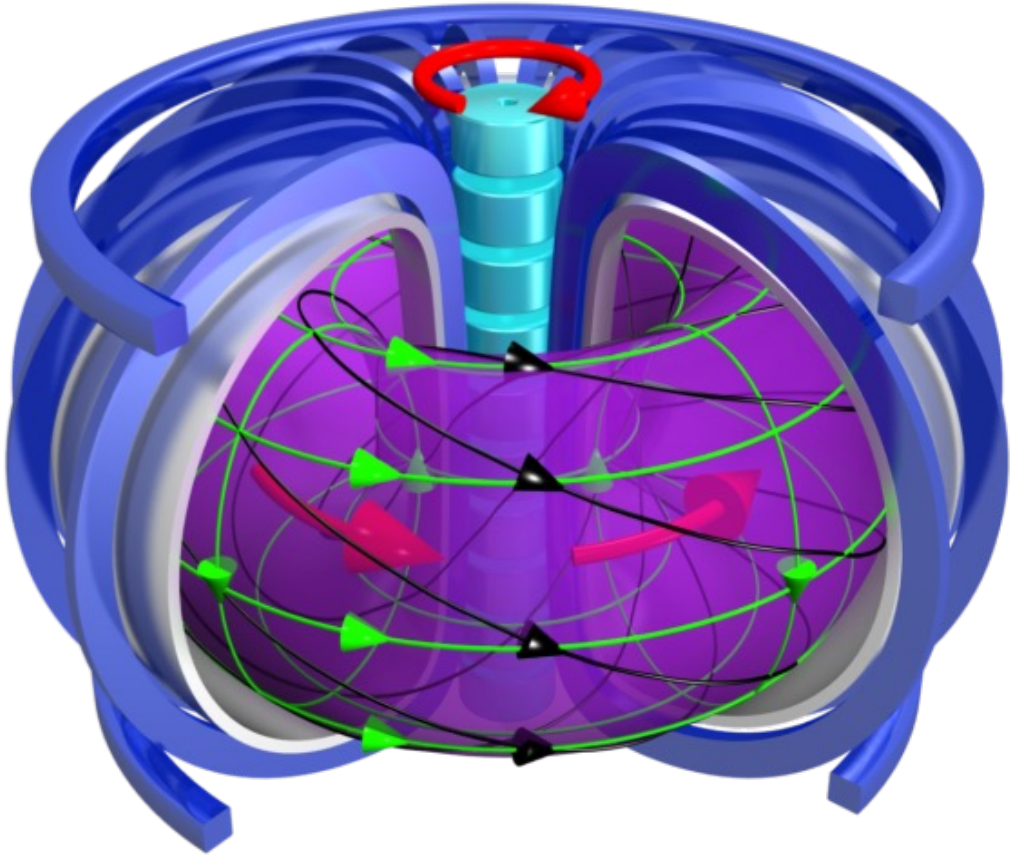
Wendelstein 7-X, é o primeiro stellatrator optimizado de larga-escala. Necessitou do investimento de 1.1. milhões de horas de trabalho para montar, usando um dos modelos de engenharia mais complexo alguma vez imaginado, e tem de suportar enorme variações de temperatura, e forças enormes. Um contentor de 16 metros contém todas as bobines magnéticas e o hélio líquido refrigerante. Por este contentor passam 150 portas de acesso

Tokamak

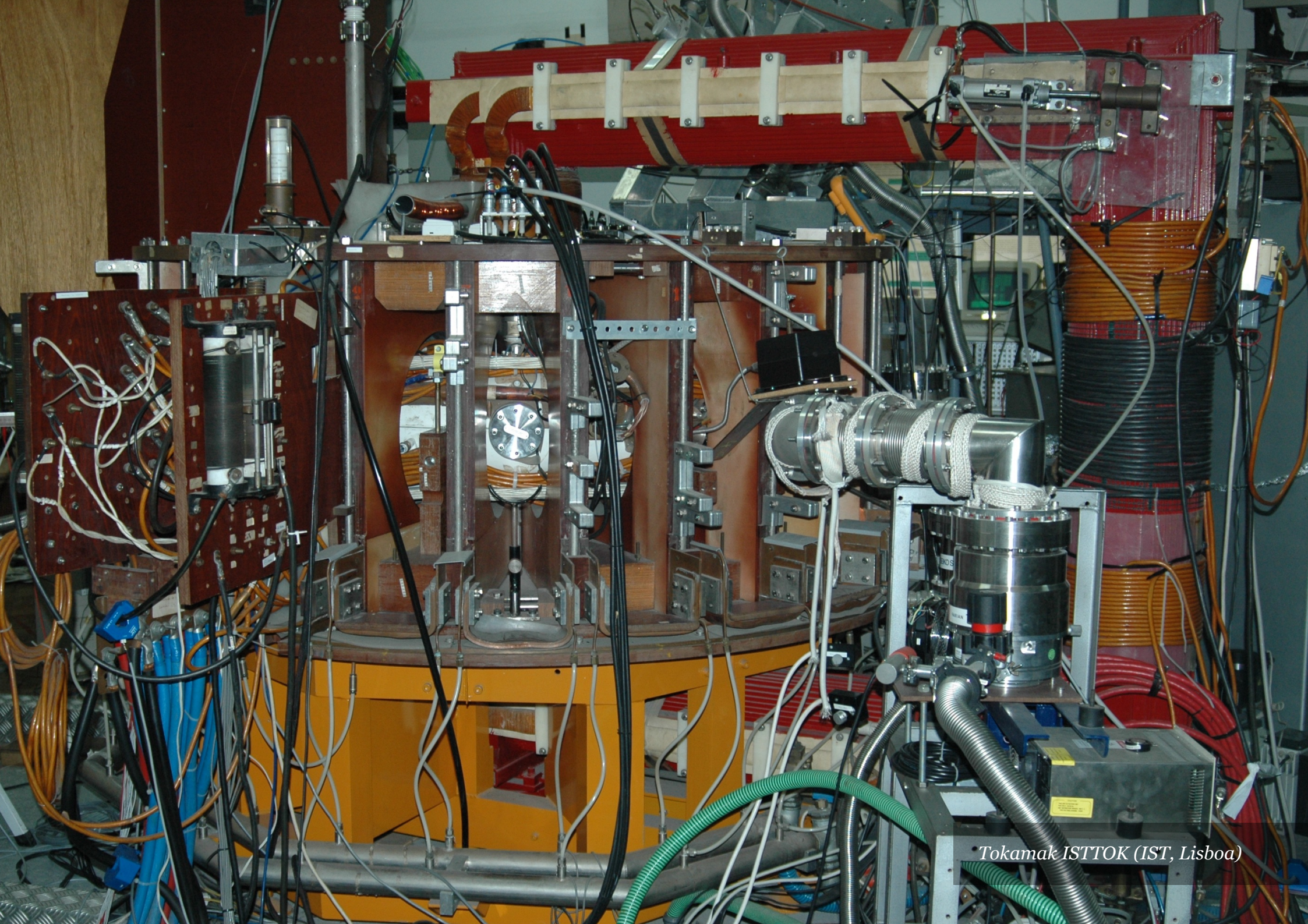
Câmara Toroidal de confinamento Magnético

O tokamak foi desenhado em 1951 pelos Físicos Soviéticos Andrei Sakharov e Igor Tamm. O tokamak tem um campo magnético toroidal criado por um conjunto de bobines separadas de forma homogénea ao longo de um reactor de forma toroidal. No tokamak, um campo magnético toroidal forte (vários Tesla) é produzido por bobinas colocadas em torno da câmara toroidal do reactor. A corrente eléctrica é induzida no plasma por um solenóide central. Uma corrente toroidal elevada (10 a 20 milhões de Amperes num reactor) 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 muito desafios técnicos, o tokamak é considerado o design mais promissor para um reactor de fusão nuclear.



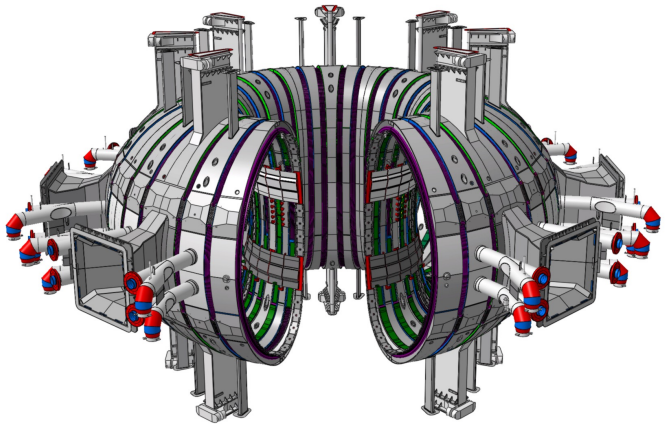
Desenho esquemático de um tokamak e do campo magnético helicoidal produzido pelas bobines toroidais e pela corrente de plasma



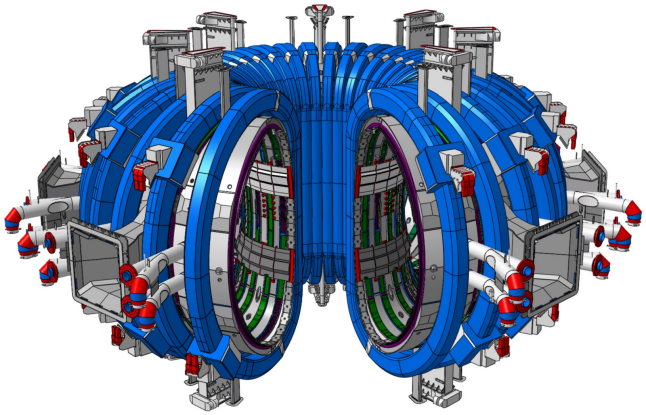
Tokamak ISTTOK (IST, Lisboa)

Anatomia duma máquina de fusão

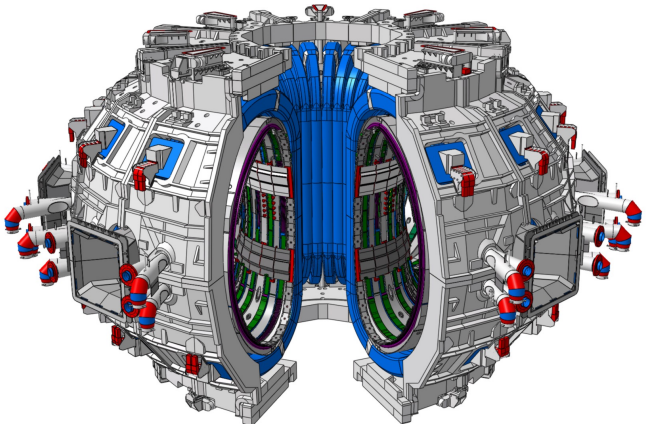
O JET é actualmente o maior máquina de fusão nuclear em operação e é aqui usado para ilustrar alguns dos componentes que compõe um tokamak



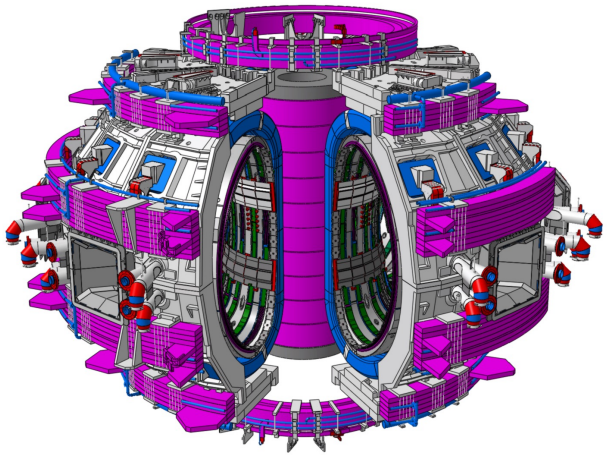
Câmara de Vácuo



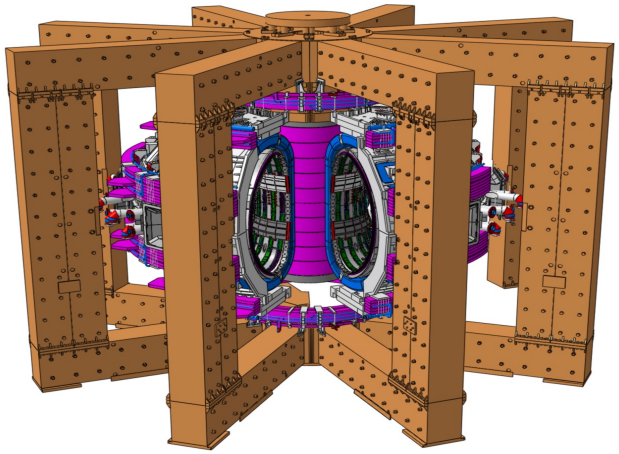
Bobines Magnéticas Toroidais (arrefecidas com Galden)



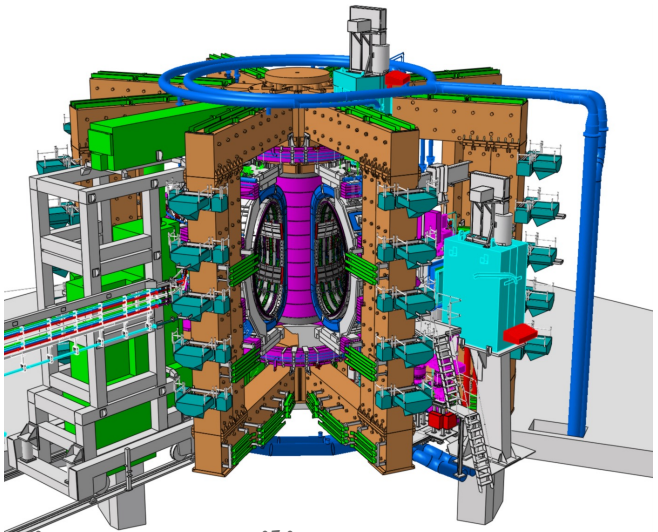
Estrutura de suporte



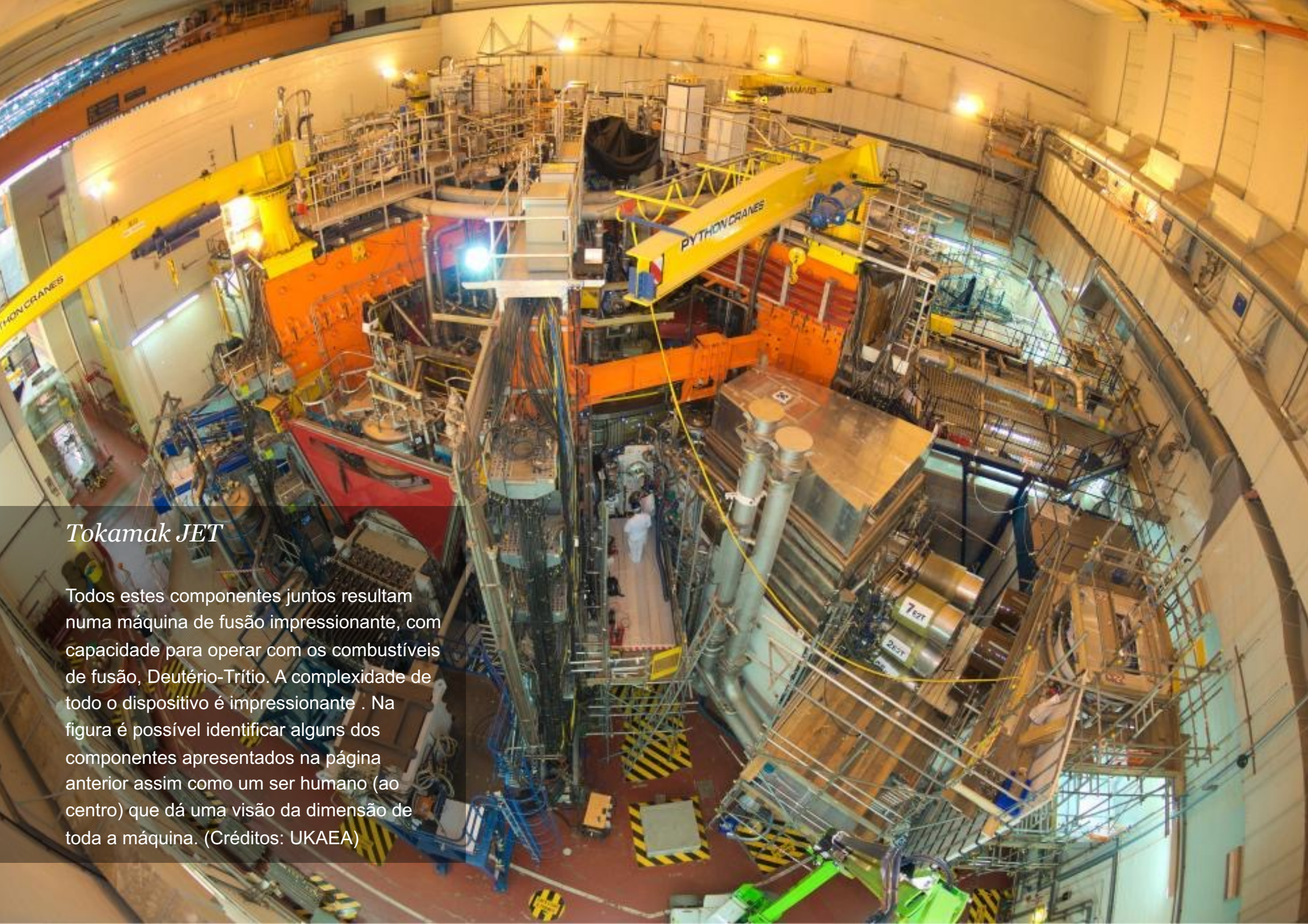
Bobines Poloidais



Núcleo do Transformador

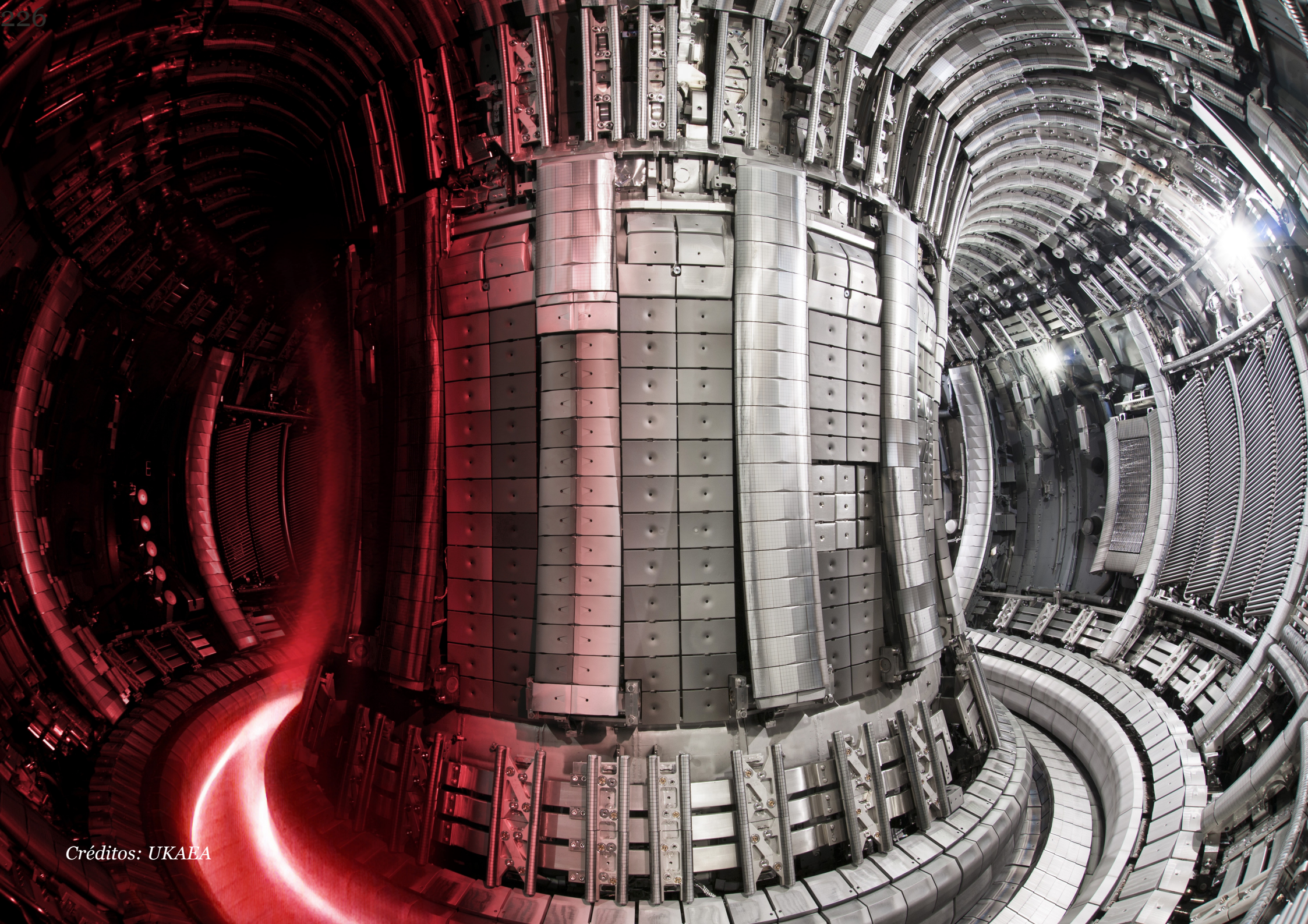


Sistemas auxiliares



Tokamak JET

Todos estes componentes juntos resultam numa máquina de fusão impressionante, com capacidade para operar com os combustíveis de fusão, Deutério-Trítio. A complexidade de todo o dispositivo é impressionante . Na figura é possível identificar alguns dos componentes apresentados na página anterior assim como um ser humano (ao centro) que dá uma visão da dimensão de toda a máquina. (Créditos: UKAEA)



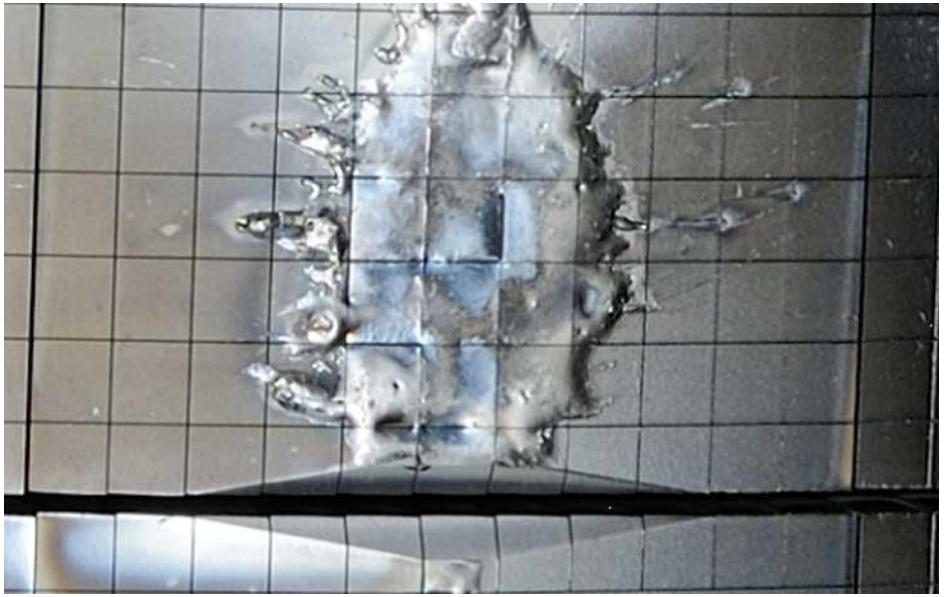
Créditos: UKAEA

O interior da câmara de vácuo toroidal está completamente coberto de telhas de protecção que protegem a câmara de vácuo das elevadas temperaturas do plasma

No caso do JET estas telhas são de Berílio nas paredes e de Tungsténio na região inferior da câmara (denominado de diversor), replicando os materiais usados no ITER.

Para além das telhas é possível ver na imagem várias grelhas que protegem as antenas dos sistemas de aquecimento por ondas electromagnéticas.

Na imagem à esquerda está sobreposta uma fotografia do plasma durante a operação. O plasma é mantido afastado das paredes por acção dos campos magnéticos que o confinam. A fotografia foi efectuada no espectro visível e capta sobretudo a radiação resultante da interação do plasma com o diversor na zona inferior da câmara. A zona central o plasma está a temperaturas típicas da fusão nuclear (da ordem dos 150 milhões de ºC). Apesar o berílio e Tungsténio terem pontos de fusão elevados, podem derreter quando expostos ao plasma. Houve necessidade de aprender a operar o JET de forma a evitar que o metal líquido das telhas escorresse pelas paredes sob acção dos fortes campos magnéticos e correntes. Para evitar situações destas as paredes do JET são monitorizadas durante a operação por câmara de infravermelhos e caso algo ocorra um Sistema de Injecção Massiva de gás entra em acção para arrefecer o plasma com Hidrogénio frio.

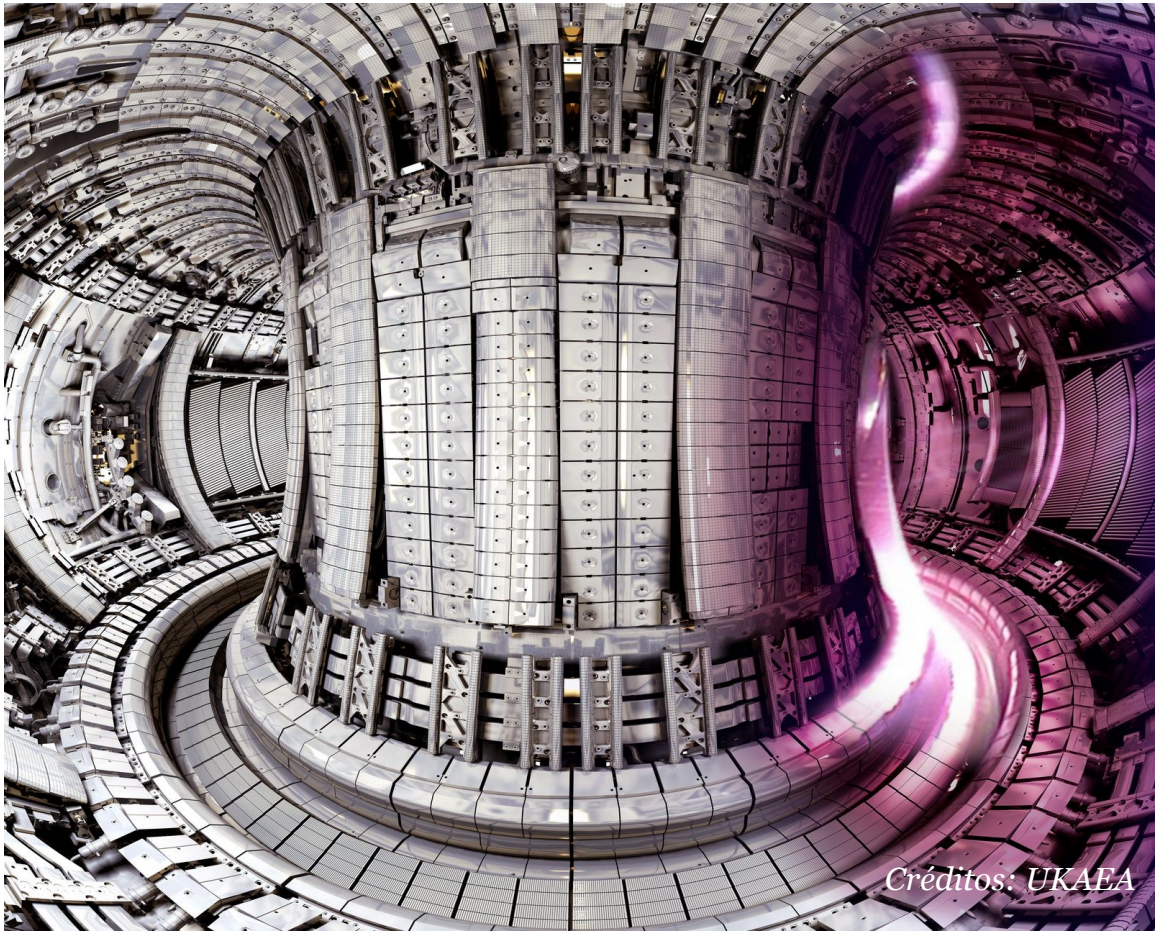


Telha de Berílio do JET derretida após experiências, devido a partículas rápidas do plasma que conseguiram escapar aos campos magnéticos que confinam o plasma(Créditos: UKAEA)

O papel único do JET

O JET (Joint European Torus) é 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 utlizado nos primeiros reactores comerciais para produção de energia eléctrica baseada em fusão nuclear.

O dispositivo de fusão Joint European Torus (JET) – onde se criam plasmas capazes de atingir temperaturas de 150 milhões de graus Celsius, dez vezes mais quentes que o centro do sol – é um teste vital para o ITER, um dos maiores projetos 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 é ideal para testar modelos de operação do plasma em preparação da operação do ITER.

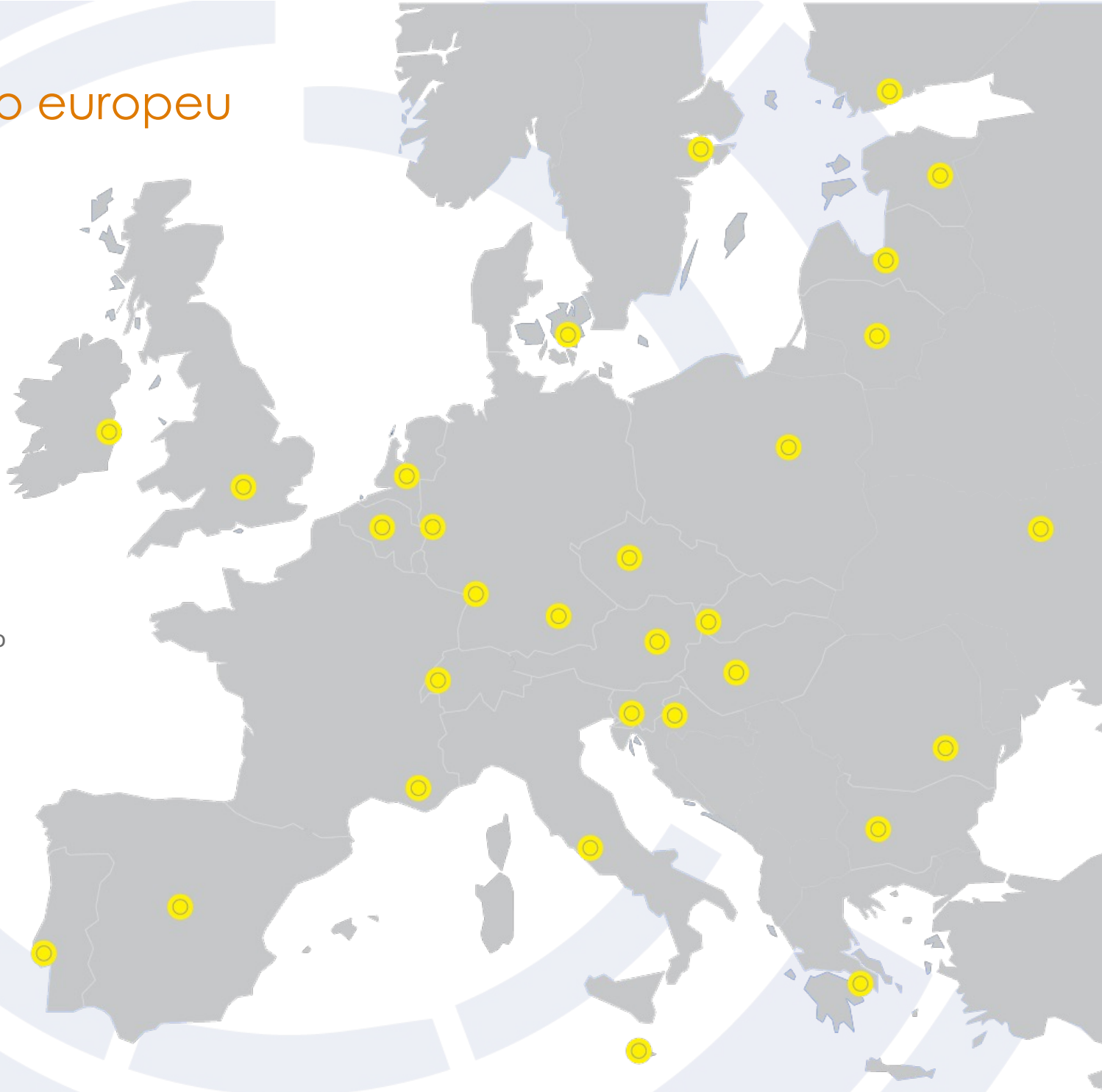


O interior do JET está coberto de telhas de protecção (de Berílio e Tungsténio). À direita da imagem está sobreposta uma imagem do plasma

Um empreendimento europeu

O JET foi construído e desenvolvido em Culham, Reino Unido, como uma Empresa Comum da Comunidade Europeia desde 1977. A infraestrutura tem sido operada pela UKAEA desde 2000. O programa de Investigação e Formação da Euratom tem contribuído com aproximadamente 80% dos custos de operação do JET desde 1977 até o final de 2021.

Usado pelos 30 membros do consórcio EUROfusion é uma experiência colectiva desenhada para investigar o potencial da energia de fusão



Como aquecemos o plasma?

Para se conseguir reacções de fusão nuclear o plasma tem de atingir temperaturas da ordem de 150 milhões de graus centígrados

Tal como num condutor sólido, uma corrente eléctrica aquece o plasma através do qual flui, por efeito de Joule. Isto deve-se às colisões dos electrões com as outras partículas do plasma. Contudo, um tal aquecimento tem as suas limitações visto que:

- à medida que a temperatura aumenta, a taxa de colisão decresce e o aquecimento ohmico torna-se cada vez menos efectivo;
- mesmo com confinamento perfeito, a energia perde-se através de radiação electromagnética originada nos iões do plasma.

Com o aquecimento ohmico não é possível atingir temperaturas mais elevadas que algumas dezenas de milhão de ºC, insuficiente para manutenção das reacções de fusão.

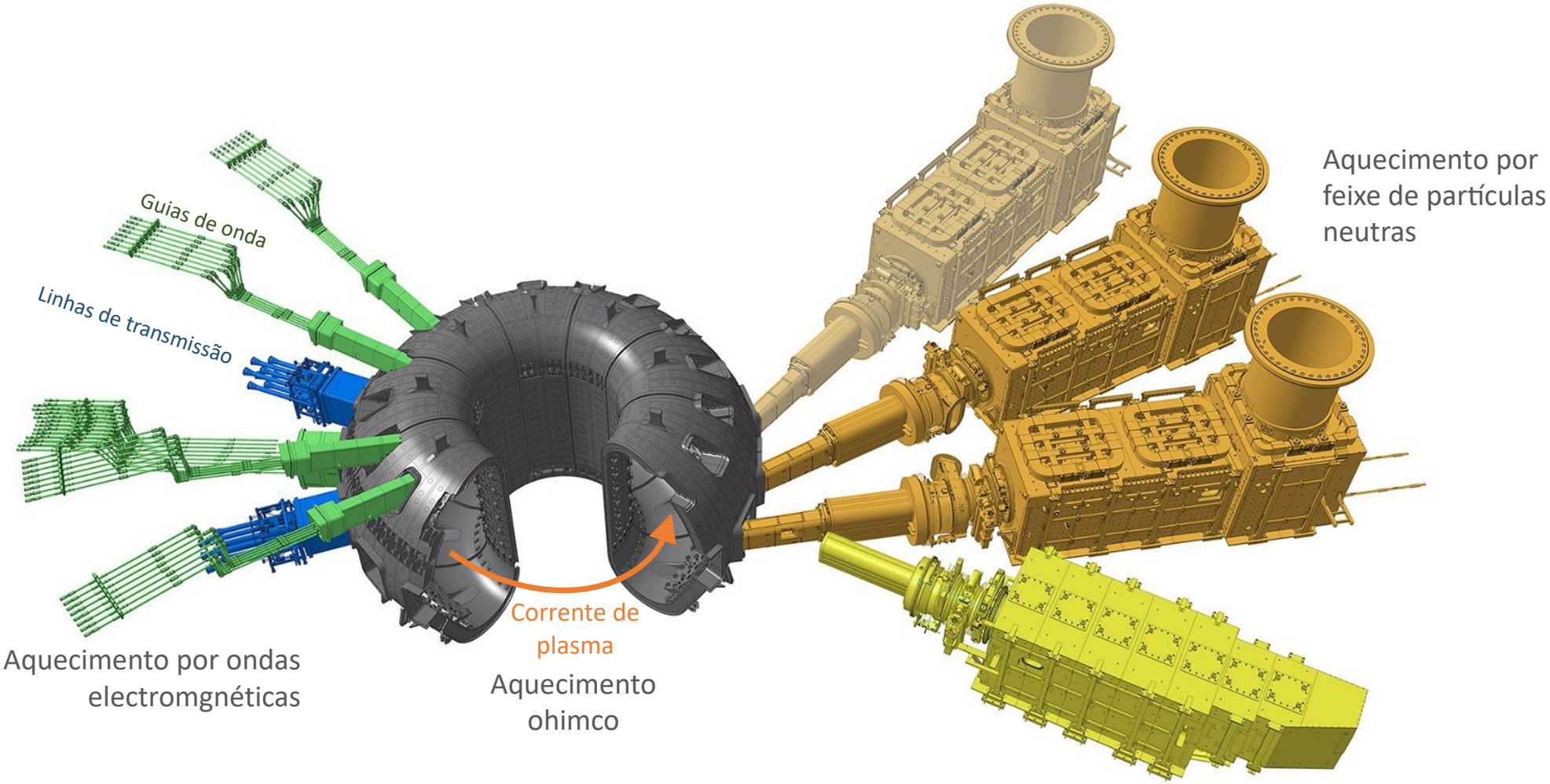
Para que a fusão termonuclear ocorra de forma auto-sustentada num reactor, são necessárias temperaturas do plasma 10 vezes mais elevadas.

Para se atingir as temperaturas termonucleares são necessário sistemas de aquecimento adicionais, tais como, injecção de feixes de neutros e aquecimento por radio-frequência.

Na Injecção de Feixes de Neutros, um feixe de partículas carregadas é produzido numa fonte iónica, acelerado por alta tensão (100000 volts ou mais) e neutralizado através duma câmara de gás (neutralizador). O feixe de neutros não sente os campos magnéticos e penetra no plasma onde é absorvido, fornecendo a sua energia ao plasma (através de colisões).

O aquecimento por Rádio-Frequência (RF) usa ondas de rádio de alta-potência a uma frequência apropriada para entrar em ressonância com as partículas do plasma em movimento no campo magnético. Pode assim ser transmitida energia para o plasma, aquecendo-o. Os aquecimentos ns frequências de Ressonâncias Iónico-Ciclotrónica (ICR) e Electro-Ciclotrónica (ECR) são os mais usualmente utilizados.

São usadas diferentes fontes de RF: klistrões (até ~ 10 GHz) principalmente para o ICR, girotrões (até algumas centenas de GHz) para o ECR.

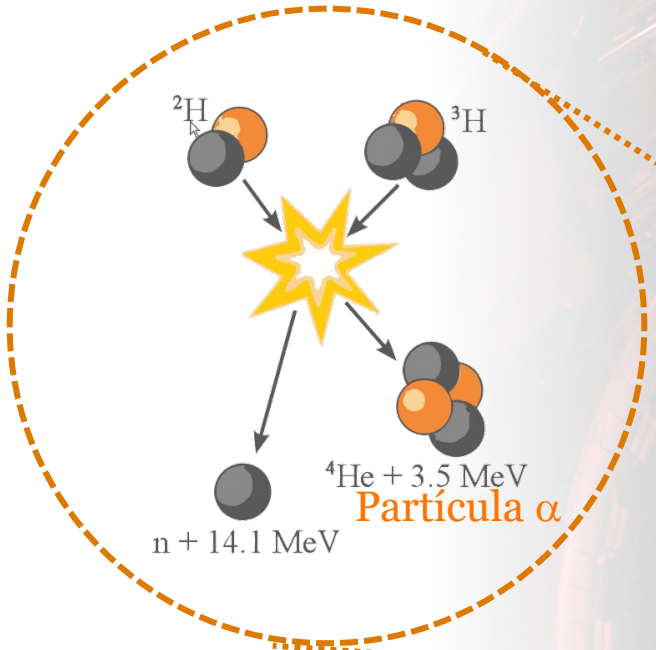


Desenho esquemático dos diferentes métodos de aquecimento usados em experiências de fusão nuclear. Injeccão de feixe de neutros (à direita) e fontes de ondas electromagnéticas de radiação elevada (à esquerda); aquecimento iónico ciclotrónico (azul) e electónico ciclotrónico (verde)

Créditos: ITER

Ignição

.



Aquecimento auxiliar
Feixe de Neutros, Ondas electromagnéticas

Perdas
Radiação, condução de calor, partículas

Ignição ocorre quando a temperatura de plasma, apesar das perdas, pode ser mantida por aquecimento de partículas α



Os núcleos de Hélio com alta energia (denominados partículas alfa) libertadas nas reacções de fusão interagem com o plasma e, consequentemente, aquecem-no.

Quando as reacções de fusão se tornam auto-sustentadas, ou seja, quando todas as perdas de energia do plasma são compensadas pelo aquecimento das partículas alfa, diz-se que se atingiu a ignição do plasma.

Para manter uma reacção auto-sustentada de fusão nuclear é necessário manter a temperatura elevada, manter o plasma confinado num volume e prevenir as perdas de energia pelo plasma. Mantendo-se estas condições o combustível pode então, em princípio, continuar a ser queimado numa reacção auto-sustentada (i.e. sem necessidade de aquecimento auxiliar). Contudo, para o controlo da queima, é sempre necessário existir uma certa quantidade de potência de aquecimento. Em dispositivos com corrente de plasma (e.g. tokamaks), são necessários sistemas de "geração de corrente" para a sustentação do plasma para operação de longa-duração ou estacionária

Investigadores europeus atingem recorde de energia de fusão

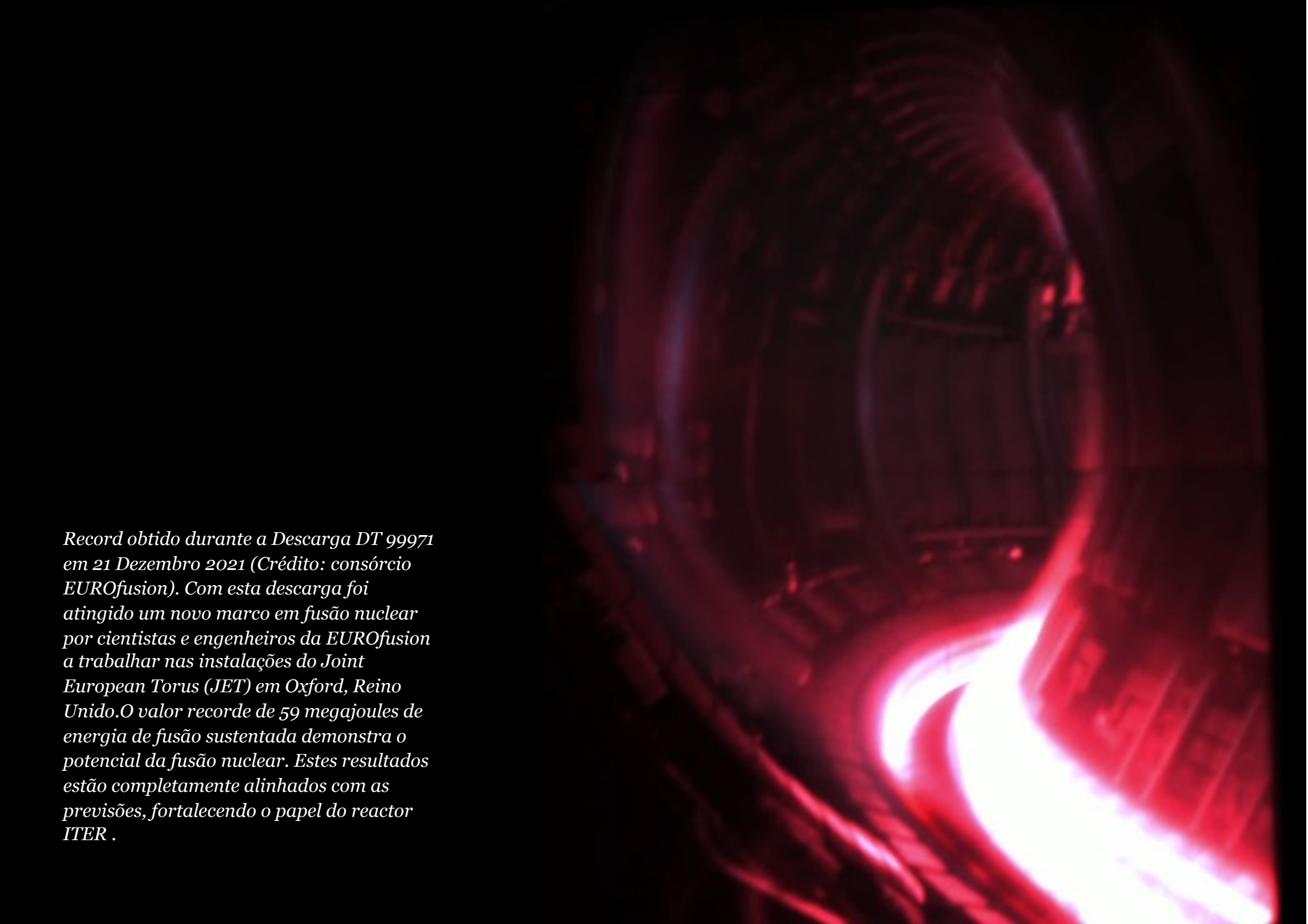
O valor recorde de 69 megajoules de energia de fusão sustentada, usando apenas 0,2 miligramas de combustível, demonstra o potencial da fusão nuclear

O valor recorde, obtido em Dezembro de 2021 e novamente em 2023, 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.

Os investigadores do consórcio EUROfusion – 4.800 especialistas, estudantes e técnicos vindos de toda a Europa, cofinanciados pela Comissão Europeia e incluindo investigadores do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) do Instituto Superior Técnico em Portugal – usaram o dispositivo Joint European Torus (JET) para atingir um valor recorde de 59 megajoules de energia de fusão de um modo sustentado. Este feito alcançado no JET – o maior e mais poderoso tokamak operacional do mundo, instalado perto de Oxford, no Reino Unido – mais do que triplica o recorde de energia de fusão de 21,7 megajoules obtido em 1997. O resultado surgiu na sequência de uma campanha experimental concebida pela EUROfusion com o objetivo de testar mais de duas décadas de avanços na fusão, e assim otimizar o arranque do projeto internacional ITER.

O valor recorde de 69 megajoules de energia de fusão sustentada, usando apenas 0,2 miligramas de combustível demonstra o potencial da fusão nuclear. Durante estas experiências foram efectuadas as primeiras observações detalhada do combustível de fusão a manter-se quente através do aquecimento alfa. Trata-se do processo em que os iões de hélio de alta energia (partículas alfa) que saem da reação de fusão transferem o seu calor para a mistura de combustível circundante para manter o processo de fusão em curso. Estudar este processo em condições realistas é crucial para o desenvolvimento de centrais eléctricas de fusão. Outros resultados importantes incluem técnicas de controlo para proteger as paredes das máquinas de fusão, técnicas de aquecimento e formas de recuperar o combustível de fusão (Trítio) absorvido nas paredes da máquina. 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 é apoiado por sete membros – China, União Europeia, Índia, Japão, Coreia do Sul, Rússia e EUA – e visa demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da energia de fusão.

À medida que aumenta a pressão pública para que se lide com os efeitos das alterações climáticas através da descarbonização da produção de energia, esse sucesso é um grande passo em frente na demonstração da fusão nuclear como um meio seguro, eficiente e de baixas emissões para enfrentar a crise energética global.

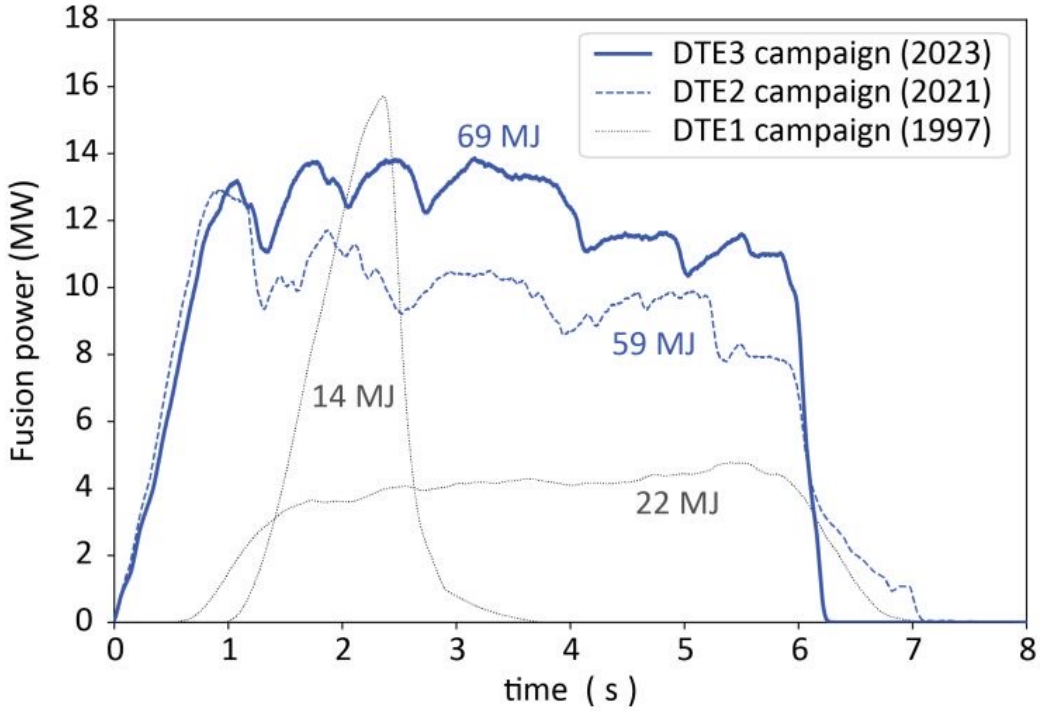


Record obtido durante a Descarga DT 99971 em 21 Dezembro 2021 (Crédito: consórcio EUROfusion). Com esta descarga foi atingido um novo marco em fusão nuclear por cientistas e engenheiros da EUROfusion a trabalhar nas instalações do Joint European Torus (JET) em Oxford, Reino Unido.O valor recorde de 59 megajoules de energia de fusão sustentada demonstra o potencial da fusão nuclear. Estes resultados estão completamente alinhados com as previsões, fortalecendo o papel do reactor ITER .

Megajoules e Megawatts explicados

Nas experiências recorde, o JET produziu um total de 59 e 69 Megajoules de energia térmica de fusão durante um período de cinco segundos (a duração da experiência).

Neste período, o JET atingiu potência média de fusão (ou seja, energia por segundo) de cerca de 11 Megawatts (Megajoules por segundo) que corresponde aproximadamente à potência energética consumida por 11 mil casas. 59 MJ é suficiente para ferver a água de 60 chaleiras. O anterior recorde de energia numa experiência de fusão, também alcançado no JET em 1997, foi de 22 megajoules de energia térmica. Já a potência de pico de 16 MW alcançada brevemente em 1997 não foi ultrapassada nas experiências mais recentes, pois o foco tem sido obter energia de fusão de um modo sustentado.



Comparação entre a energia de fusão produzida nos records de 1997, 2021 e 2023

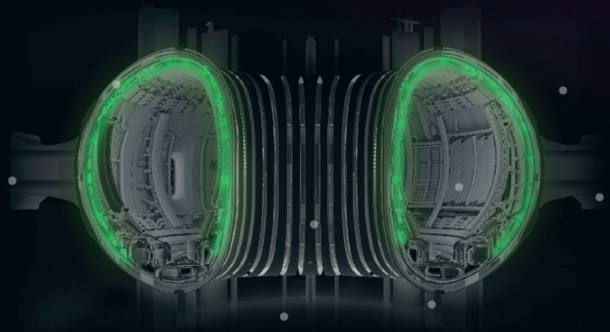


Um impulso sustentado de fusão baseada na mistura deutério-trítio a este nível de energia – quase à escala industrial – representa uma confirmação avassaladora para todos os que estão envolvidos no esforço global da investigação em fusão. Para o ITER, os resultados do JET dão uma forte confiança de que estamos no caminho certo para demonstrar o poder de fusão à escala total.

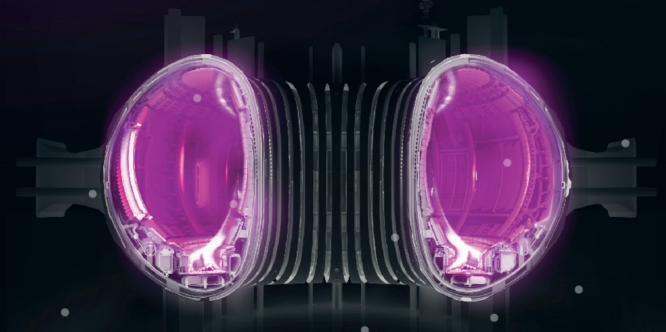
- Dr. Bernard Bigot, Diretor Geral do ITER (2015-2022)

Porque é estes resultados são importantes?

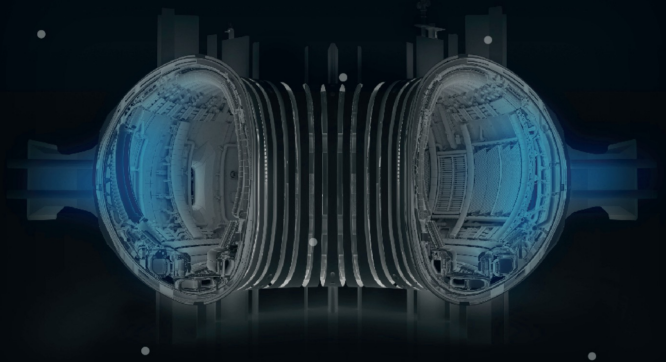
As campanhas experimentais denominadas de DTE2 e DTE3 são as experiências de energia de fusão mais relevante nos últimos 20 anos . Tiveram como objectivo produzir níveis elevados de energia de fusão de forma sustentada em condições similares à de uma central de fusão por um período de tempo record.



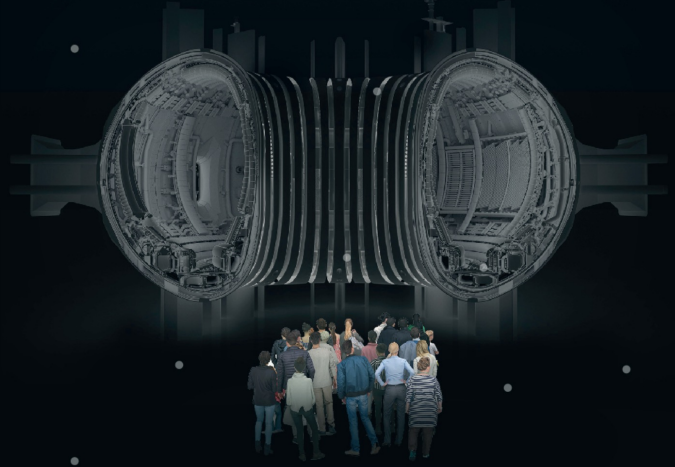
Testar os materiais usados no ITER para optimizar a performance da operação



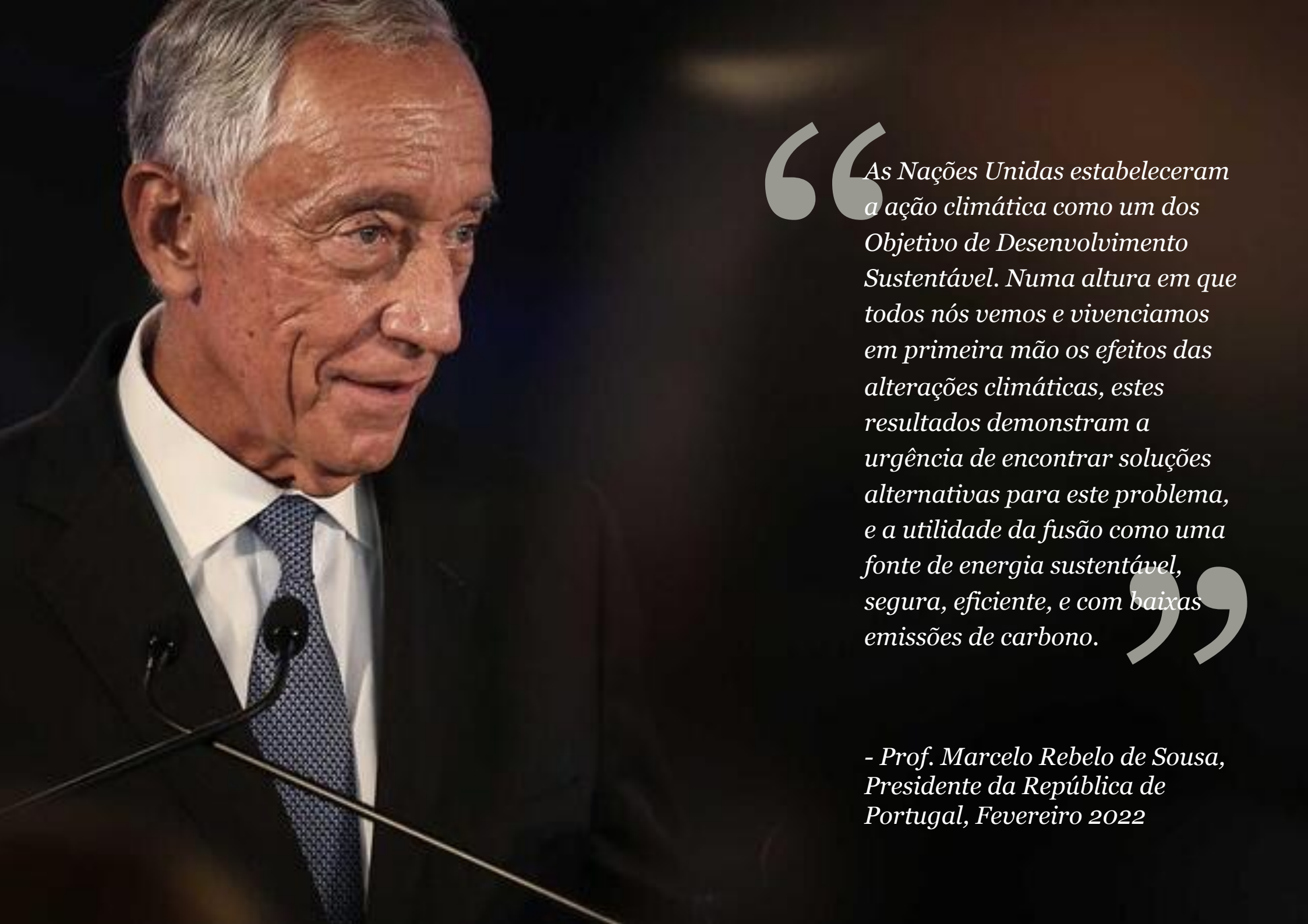
Atingir o record de energia de fusão num pulso sustentado de 5 segundos



Aprender a usar e recuperar o Trítio em preparação da operação do ITER e das primeiras centrais comerciais de fusão



Treinar uma nova geração de peritos para o ITER



As Nações Unidas estabeleceram a ação climática como um dos Objetivo de Desenvolvimento Sustentável. Numa altura em que todos nós vemos e vivenciamos em primeira mão os efeitos das alterações climáticas, estes resultados demonstram a urgência de encontrar soluções alternativas para este problema, e a utilidade da fusão como uma fonte de energia sustentável, segura, eficiente, e com baixas emissões de carbono.

- Prof. Marcelo Rebelo de Sousa, Presidente da República de Portugal, Fevereiro 2022

40 anos de ciência da fusão e o fim duma era

O JET tem sido a maior e mais bem-sucedida experiência de fusão do mundo e um centro de investigação central do Programa Europeu de Fusão. Cessou as suas operações no final de 2023.

O JET começou a funcionar em 1983 como um projeto europeu conjunto, tendo sido sujeito a vários aperfeiçoamentos para melhorar o seu desempenho ao longo dos anos. Em 1991, o JET tornou-se o primeiro reator do mundo a funcionar utilizando uma mistura de trítio e deutério 50-50.

A instalação estabeleceu numerosos recordes de fusão, incluindo um recorde de Q-plasma (o rácio entre a potência de fusão produzida e a potência externa utilizada para aquecer o plasma). Construído pela Europa e utilizado em colaboração por investigadores europeus ao longo da sua vida, o JET tornou-se propriedade da UKAEA em outubro de 2021, celebrou o seu 40.º aniversário em junho deste ano e cessou as suas operações no final de 2023.

Desde a sua criação em 1983 como um projeto europeu conjunto, o JET esteve na vanguarda de realizações inovadoras, liderando a procura de soluções de energia de fusão seguras, de baixo carbono e sustentáveis para satisfazer as futuras exigências energéticas do mundo. Esta infraestrutura tem sido fundamental no avanço da energia de fusão ao longo de mais de quatro décadas, simbolizando a colaboração científica internacional, a excelência em engenharia e o compromisso de aproveitar o poder da energia de fusão. O sucesso do JET resultou da sua visão fundadora e o espírito colaborativo que o impulsionou desde o início.

Ao longo do seu ciclo de vida, o JET tem sido extremamente útil como precursor do ITER: no teste de novos materiais, no desenvolvimento de componentes inovadores e sobretudo na geração de dados científicos da fusão deutério-trítio. Os resultados obtidos terão um impacto directo e positivo no ITER, validando o caminho a seguir e permitindo progredir mais rapidamente em direcção aos objectivos de desempenho previstos.

O JET transita agora para a próxima fase do seu ciclo de vida de reaproveitamento e desmantelamento. As conquistas do JET, desde os principais marcos científicos até ao estabelecimento de recordes energéticos, sublinham o legado duradouro da instalação na evolução da tecnologia de fusão. As suas contribuições para a ciência e engenharia da fusão têm desempenhado um papel crucial na aceleração do desenvolvimento da energia de fusão, que promete ser uma parte segura, de baixo carbono e sustentável do futuro fornecimento de energia mundial.

”O legado do JET são as suas pessoas” disse Ian Chapman, CEO da UKAEA, na conferência de imprensa que apresentou o último record. Sem dúvida!

Portugal e o JET

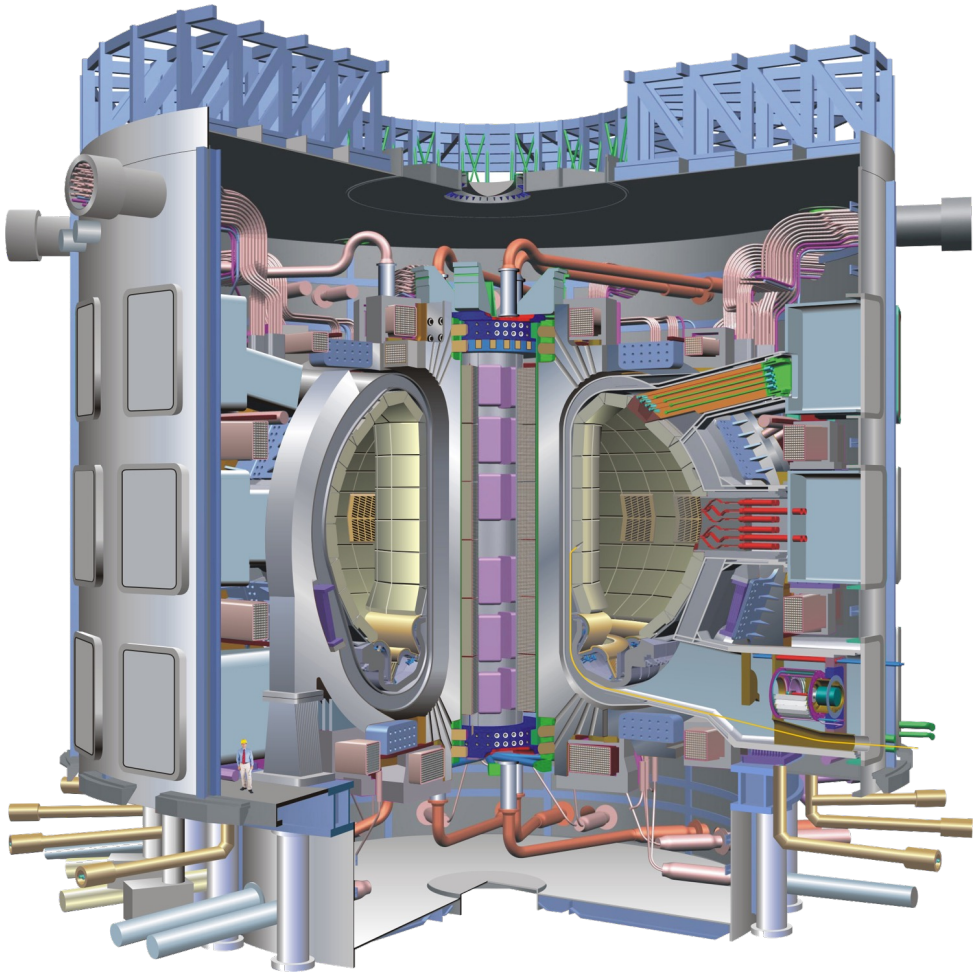
Os investigadores portugueses do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) do Instituto Superior Técnico (IST) participam activamente no JET desde o início da sua actividade experimental. Esta contribuição que começou com um número tímido, representado por uma investigadora, cresceu para um número significativo ao longo dos anos (chegando a ser o sexto país com mais investigadores a participarem nas campanhas experimentais) e continuou através da sua participação no consórcio EUROfusion. Com o renascimento da fusão nuclear existem muitas novas ideias a serem testadas e investimento privado e público a alavancar a inovação na área. O IPFN continua empenhado em contribuir para os desenvolvimentos da área com vontade de enfrentar os desafios que ainda terão de ser enfrentados para chegar à construção do primeiro reator experimental de demonstração de produção de energia eléctrica.



Análise de uma das telhas de Berílio usada para protecção da parede do JET após uma campanha experimental, usando um micro feixe. A análise foi efectuada no Laboratório de Aceleradores e Tecnologias de Radiação operado por investigadores do IPFN.

ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor

O ITER tem como missão provar a viabilidade científica e técnica da energia de fusão e testar a integração de todas as tecnologias necessárias para uma central eléctrica de fusão nuclear.



Corte do reactor ITER (Créditos: ITER)

O ITER, projectado para demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da energia de fusão em larga escala, será a maior instalação mundial de fusão. Quando concluído, será o primeiro dispositivo de fusão a produzir energia (P=500 MW, D=300 s, Q=10–20), abrindo o caminho para a implementação subsequente dos reactores de fusão de demonstração (DEMO), seguidos por centrais comerciais de fusão.

O ITER também é uma colaboração global inédita. A Europa contribui com quase metade dos custos da sua construção, enquanto os outros seis integrantes desta parceria internacional (China, Índia, Japão, República da Coreia, Federação Russa e EUA), contribuem para o restante na mesma proporção.

O Projeto ITER está em construção em Saint-Paul-lez-Durance, no sul de França. Para mais informações: http://www.iter.org/

O ITER está em construção em Cadarache no sul de França



ITER – Outubro 2021

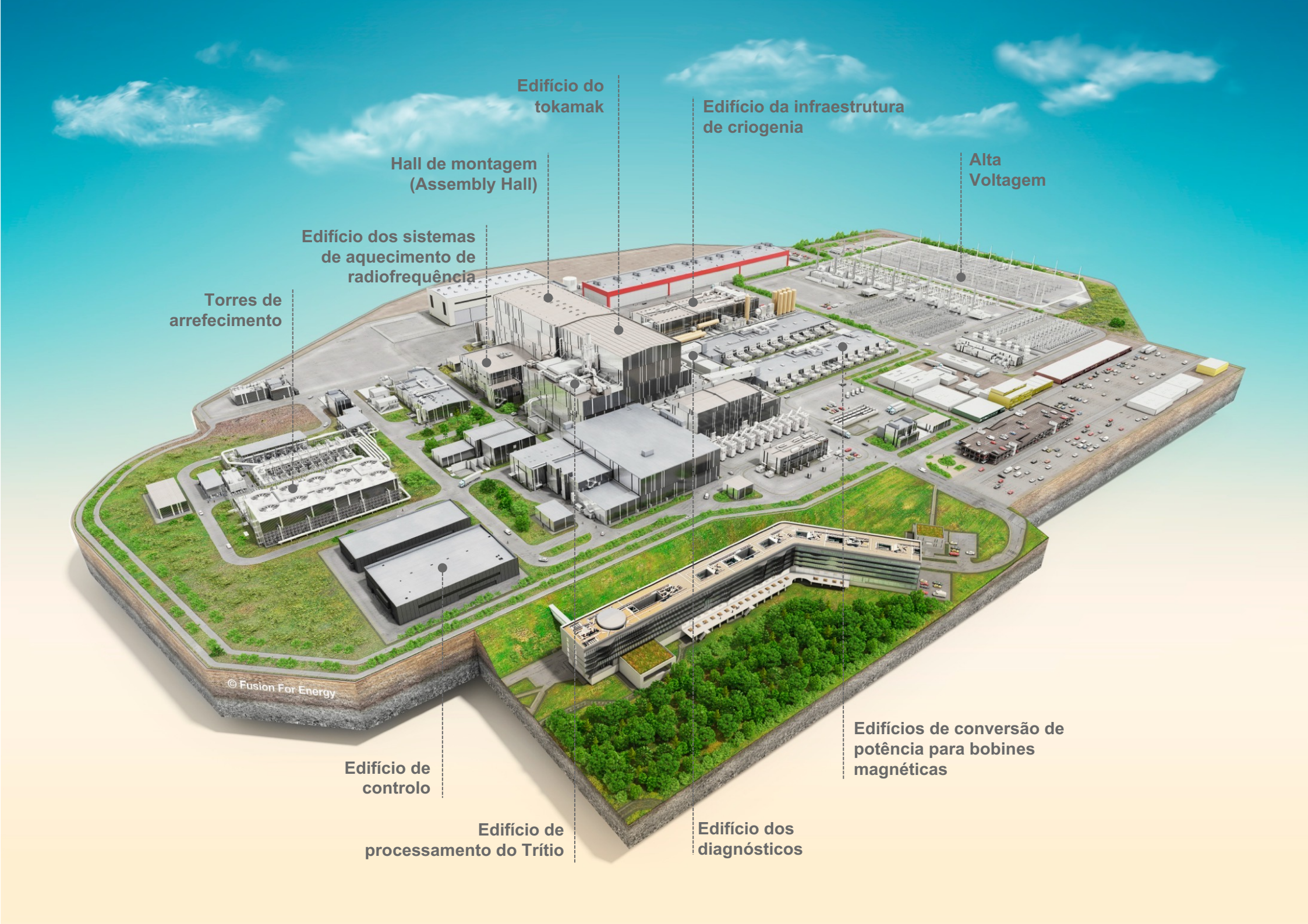
Créditos: ITER

O complexo do ITER

No coração das instalações científica dos ITER está o complexo do toakamak, um edifíco de 400000 toneladas que reúne os edifícios do tokamak, diagnósticos e Trítio. O edifício tem 80 m de altura (incluindo os pisos das caves), 120 m de comprimento e 80 m de largura. A estrutura de 7 andares alberga não só o tokamak ITER, mas também ais de 30 diferentes sistemas necessários para a operação da máquina. O complexo do tokamak é uma estrutura qualificada para aplicações nucleares com betão reforçado e apoiada em isoladores anti-sísmicos. O telhado está a 60 metros do chão e o piso da cave é aproximadamente a 11 metros de profundidade. O plano médio do tokamak fica situado ao nível do solo. A construção do edifico necessitou de 16000 toneladas de vigas,150000 m^3 de betão e 7500 toneladas de aço para a estrutura do edifício. O tokamak ficará dentro do escudo biológico do ITER, uma estrutura circular no centro do edifício do tokamak e que forma o poço do tokamak. Com altura de 6 pisos tem aberturas para os sistemas e equipamentos tendo paredes com até 3.2 m de espessura.



O complexo do tokamak é uma estrutura qualificada para aplicações nucleares com betão reforçado com uma estrutura de aço muito apertada (na fotografia)


Edifício do tokamak
Edifício da infraestrutura de criogenia
Hall de montagem (Assembly Hall)
Alta Voltagem
Edifício dos sistemas de aquecimento de radiofrequência
Torres de arrefecimento
© Fusion For Energy
Edifícios de conversão de potência para bobines magnéticas
Edifício de controlo
Edifício de processamento do Trítio
Edifício dos diagnósticos

Toda a infraestrutura do ITER ocupa uma plataforma com uma área de 42 hectares e é considerada uma das maiores superfícies niveladas no mundo produzidas pelo homem. Para além do edifício do tokamak. O campus aloja vários edifícios de apoio à operação do ITER.

Edifício do tokamak – edifício onde ficará alojado o tokamak. Um edifício de 7 andares dos quais 13 metros estão localizados abaixo da superfície e 60 metros acima da superfície

Hall de montagem (Assembly Hall) – o edifício que funciona como uma oficina/fábrica gigante onde os componentes são montados antes de serem introduzidos na sua localização final no dispositivo do ITER

Edifício dos sistemas de aquecimento de radiofrequência – onde serão geradas as ondas eletromagnéticas de radiofrequência para aquecimento do plasma

Torres de arrefecimento – irão remover o calor gerado pel c|amara de vácuo do ITER, pelos componentes da parede do tokamak e dos restantes sistemas

Edifício de controlo – o edifício do qual a operação de ITER será controlada

Edifício de processamento do Trítio – edifício no qual são armazenado e manuseados os combustíveis de fusão (Deutério e Trítio)

Edifício dos diagnósticos – os diagnósticos serão os “olhos” e “ouvidos” do que acontece dentro do dispositivo. No edifício dos diagnósticos é onde a informação medida pelos diagnósticos é recebida, interpretada, analisada e processada.

Edifícios de conversão de potência para bobines magnéticas – edifício onde conversores AC/DC e sistemas associados convertem 22 kV AV em alta voltagem DC para ser usada pela bobines magnéticas do ITER

Edifício da infraestrutura de criogenia – este edifico aloja o gigantesco sistema de refrigeração do ITER. Inclui os compressores, as ciaxas friasm tanques criogénicos e sistemas auxiliares que irão produzir o azoto e Hélio líquido necessário.

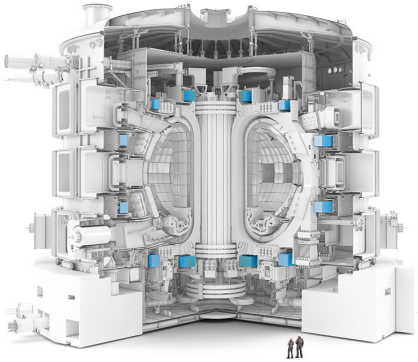
Alta Voltagem – o ITER está ligado a rede eléctrica francesa. Os transformadores do ITER recebem 400 kV que serão convertidos em 22 kV e 66 kV para fazer face às necessidades de toda a infraestrutura do ITER e dos seus componentes



Créditos: ITER

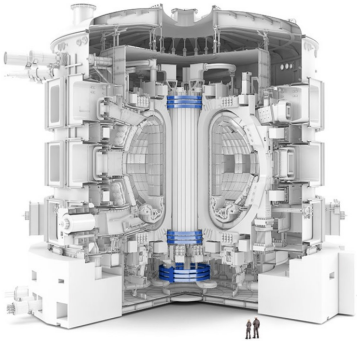
O poço do tokamak ITER é onde está instalado o tokamak . A estrutura circular à volta é o escudo biológico feito de betão com paredes de até 3.2 metros de espessura

Anatomia do ITER



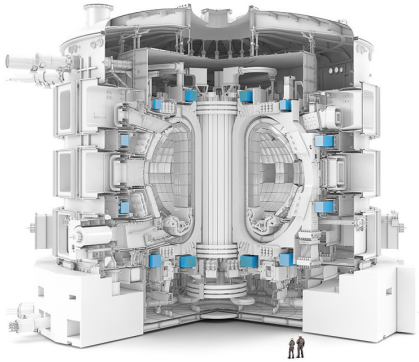
Câmara de Vácuo

A câmara de vácuo do ITER é a câmara onde ocorrerão as reações de fusão e localiza-se no interior do criostato. Na câmara de formato toroidal (forma de donut), as partículas de plasma colidem e libertam energia sem tocarem nas paredes devido ao processo de confinamento magnético. A câmara é constituída por 9 sectores. Cada sector tem 12 m de altura, 6.5 m de largura e 6.3 m de profundidade e pesa aproximadamente 500 t. o Peso de todo o componente quando soldado em conjunto será de 5000 t



Bobines Toroidais

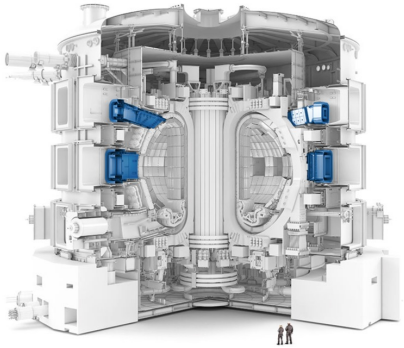
Um total de 18 bobines toroidais irão operar no ITER para criar uma potente gaiola magnética para confinar o plasma ultra-quente.
Quando energizada com corrente (68 000 A) o campo magnético atingirá os 11.8 T – cerca de 250000 vezes o campo magnético da Terra!. Cada bobine mede 17x9 m e pesa 320 toneladas..



Bobines Poloidais

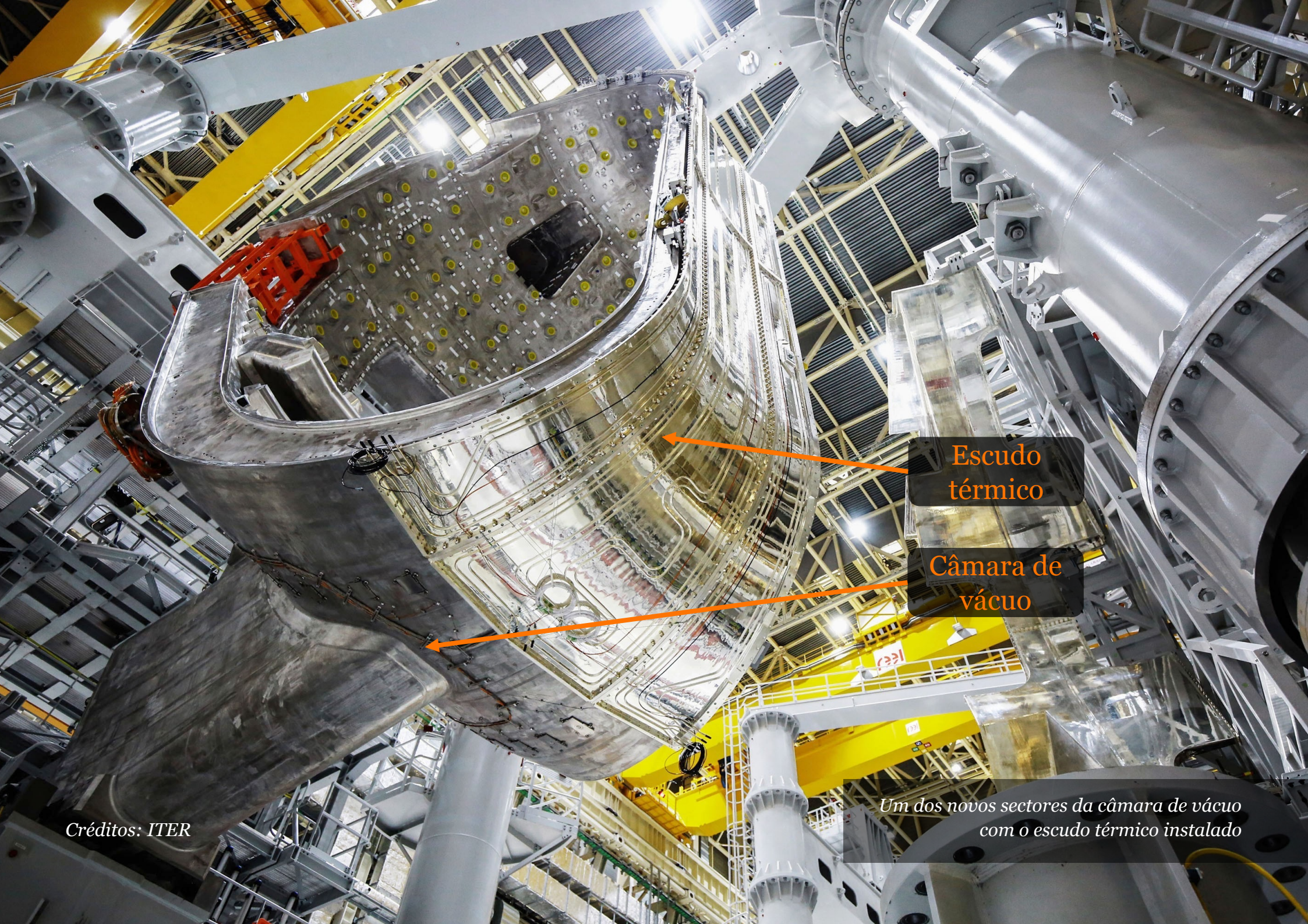
O ITER irá operar com 6 bobines toroidais, que asseguram a forma e estabilidade do plasma ultra-quente.

Devido ao seu diâmetro (17-25 m) e pesos impressionantes (200-400 t) as bobines poloidais serão fabricadas numa fábrica localizada no complexo do ITER.



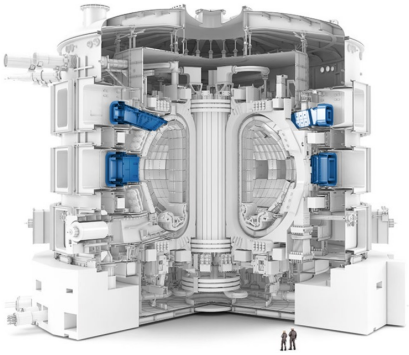
Anéis pre-compressores

o ITER tem um conjunto de anéis pré-compressores instalados para resistir à fadiga resultante nas bobines toroidais, e com a deformação resultante dos elevados campos magnéticos. Três estarão instalados no topo das bobines toroidais e três na zona inferir. Os anéis, fabricados num compósito de fibra de vidro, consistem em mais de um bilião de fibras de vidro minúsculas, coladas por resina epóxi de elevada performance. Terão um diâmetro de aproximadamente 5 metros e uma secção de quase 300 mm x 300 mm e pesarão um pouco mais que 3 t.



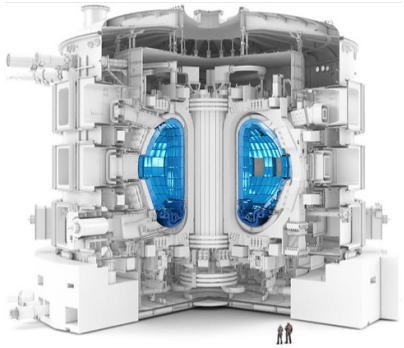
Um dos novos sectores da câmara de vácuo com o escudo térmico instalado

Créditos: ITER



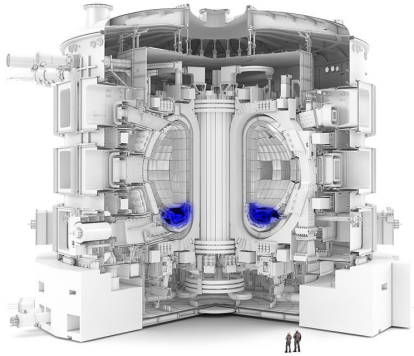
Diagnósticos

Os sistemas de diagnóstico ajudarão os investigadores a estudar e controlar o comportamento do plasma, medir as suas propriedades e aumentar a compreensão da física de plasmas. Estes sistemas actuarão como os “olhos” e “ouvidos” dos peritos, providenciando compreensão com base em tecnologias de topo.
O ITER Terá cerca de 50 diagnósticos que oferecerão um visão sem paralelo do plama e garantirão uma operação suave do dispositivo.



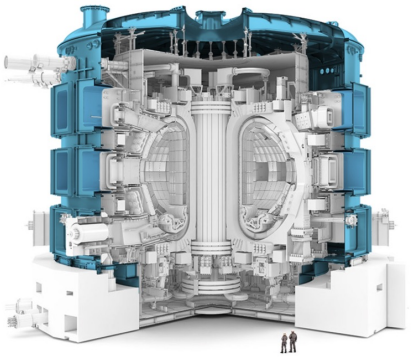
Parede

As temperaturas extremamente quentes do das reacções de fusão serão sentidas pelo componentes que estão no interior da câmara de vácuo, também conhecidos como “plasma facing componentes”, devido à sua exposição a um calor e fluxo de neutrões elevados. .
A parede consiste de 440 módulos, que cobrem a parede da câmara de vácuo.



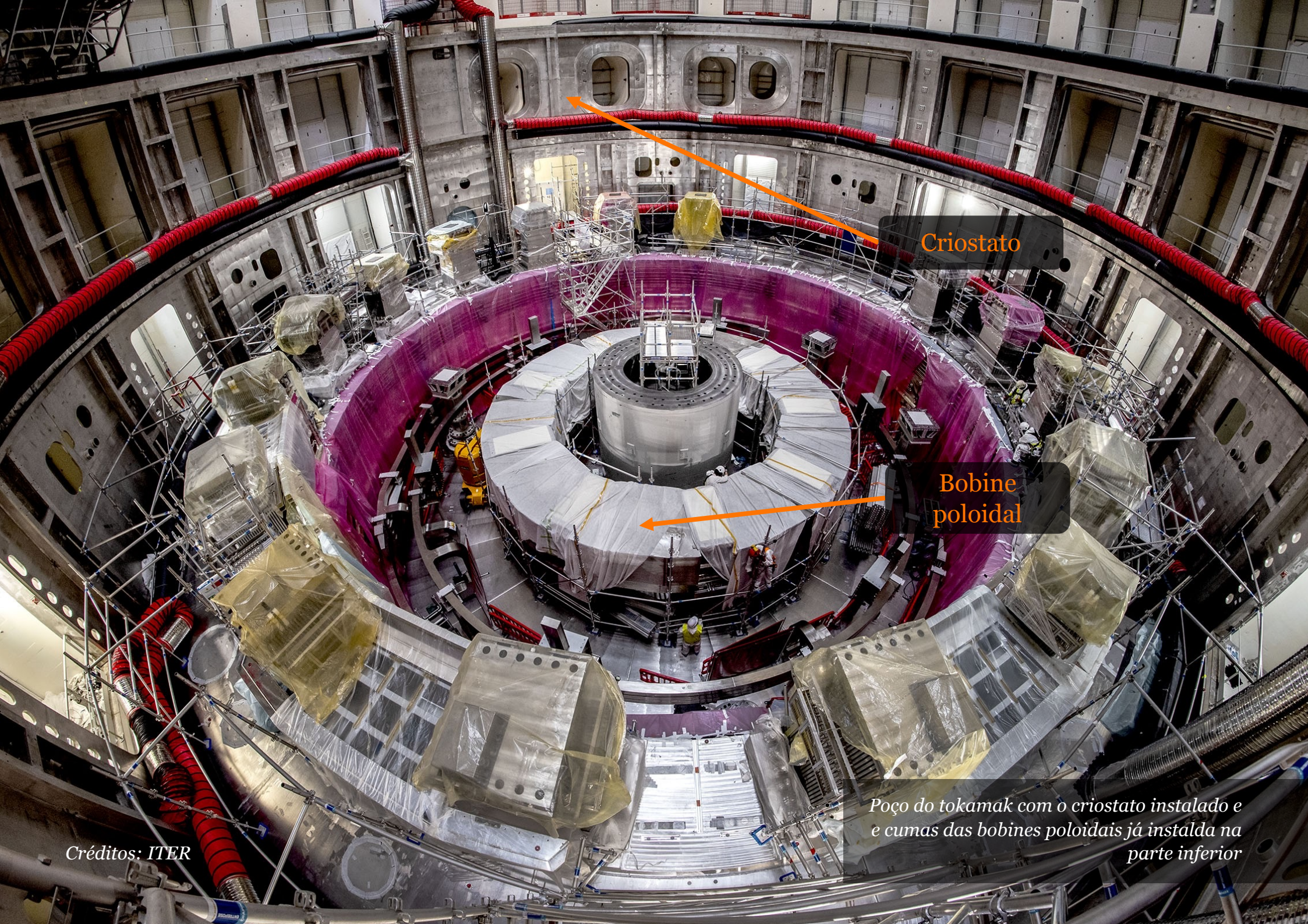
Diversor

Quando o ITER estiver em operação os gases resultantes da reacção de fusão serão bombados com o auxílio de 6 bombas criogénicas pela parte inferior do reactor onde se encontra o diversor.
O diversor consiste de 54 cassetes, localizadas na parte inferior da câmara de vácuo.



Criostato

O ITER estará sujeito a variações extremas de temperatura. Dentro das bobines magnéticas circulará Hélio líquido par abaixar a sua temperatura até aos -269 ˚C. Os escudos térmicos das bobines magnéticas e as bombas criogénicas serão arrefecidas com recurso a um dos sistemas criogénicos mais avançados à data.
O criostato pode ser descrito como um gigantesco refrigerador que irá gerar as extremamente baixas temperaturas necessárias para operar o reactor.

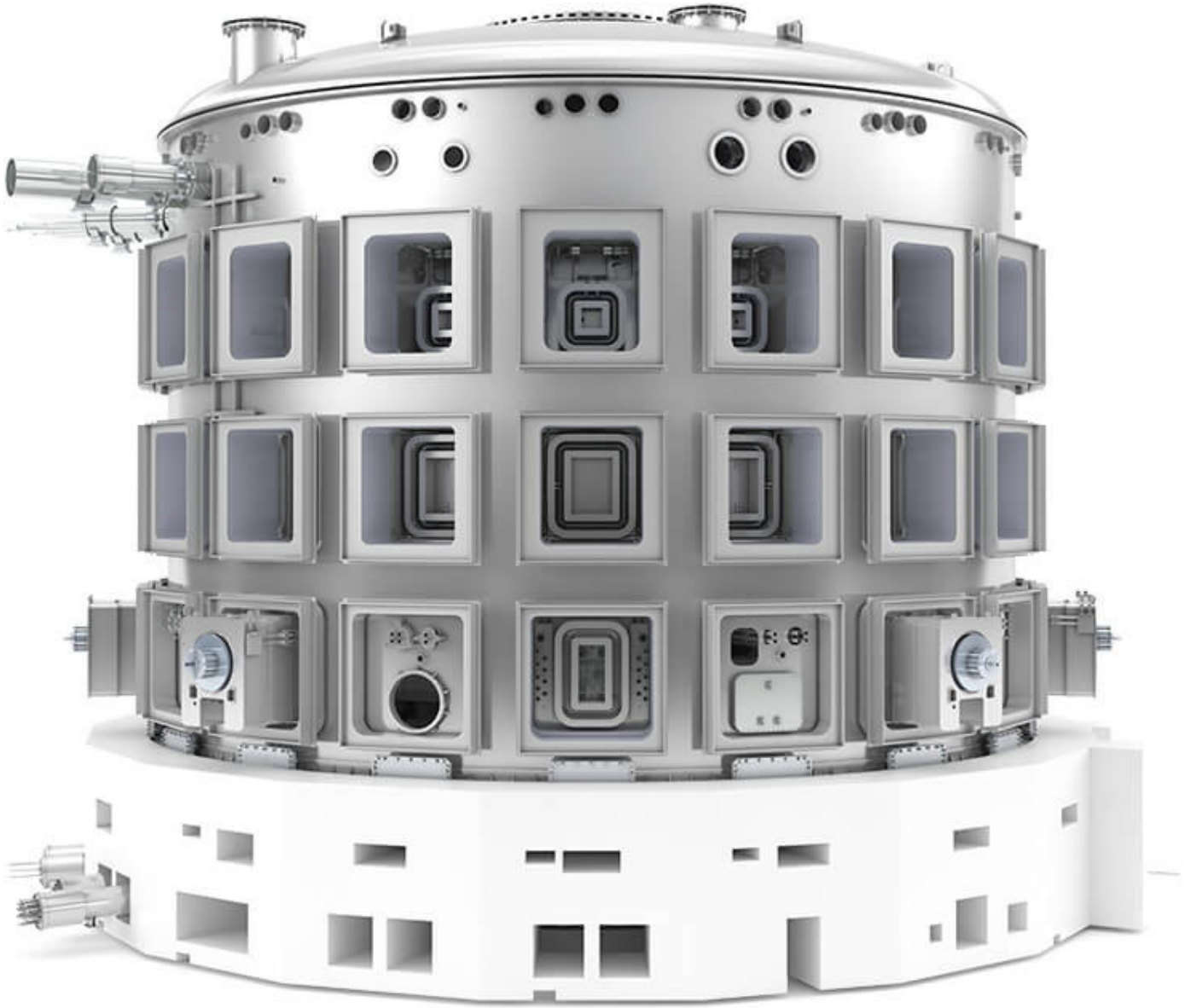


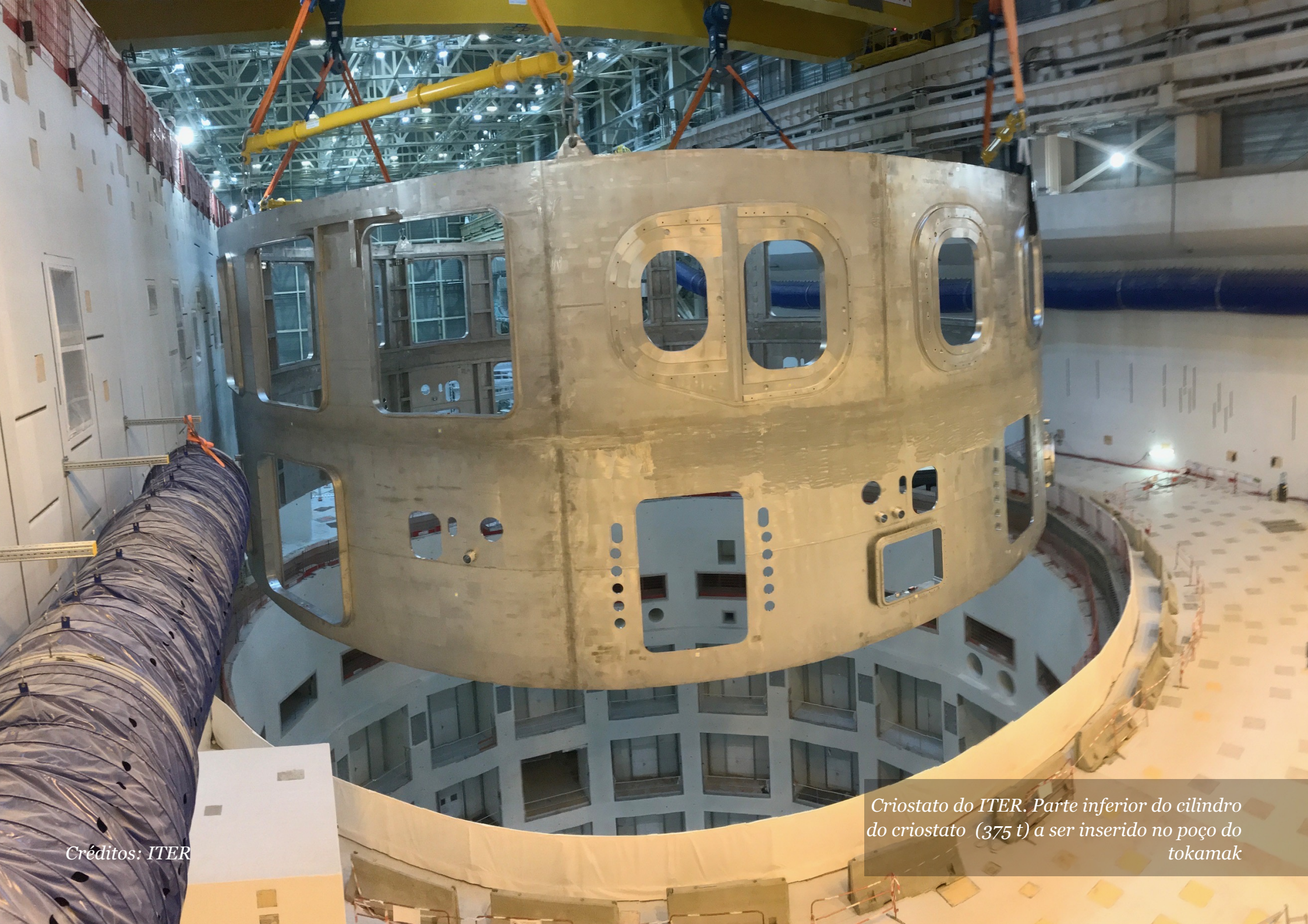
Poço do tokamak com o criostato instalado e e cumas das bobines poloidais já instalda na parte inferior

Créditos: ITER

O criostato de 29 m x 29 m envolve completamente a câmara de vácuo e as bobines supercondutoras. O criostato tem duas funções: providenciar um ambiente de vácuo a componentes críticos (as bobines magnéticas operam a 4.5 K o escudo térmico opera a 80 K) e contribuir para o reforço estrutural, suportando a massa da máquina e transferir as forças horizontais e rotacionais para a parede radial.

O criostato é uma estrutura de parede única soldada em aço inoxidável com um fundo plano, uma cobertura abobadada e uma parede com espessura que varia de 25 a 200 mm. Várias aberturas grandes providenciam acesso Aos portos da câmara de vácuo, tubagem criogénica, ligações eléctricas e acesso para manipulação remota. Na sua construção tiveram de ser usadas técnicas especiais de soldadura.





Créditos: ITER

Criostato do ITER. Parte inferior do cilindro do criostato (375 t) a ser inserido no poço do tokamak

Factos e números do ITER



80000 km

de supercondutor de Nióbio-Estanho (Nb3Sn) necessárias para as bobines toroidais



10^7 componentes

Dez milhões de peças individuais. 10x os componentes de um A380



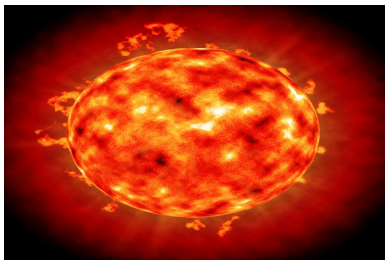
360 t

Cada uma das 18 bobines toroidais . Peso de um Boeing 747-300 carregado



150 milhões °C

10 x a temperatura do centro do Sol (temperatura da superfície do sol 6,000°C)



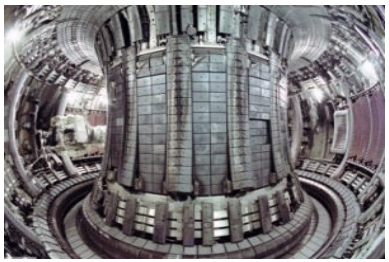
23000 t

3 x a quantidade de metal da Torre Eifel (7300 t)



840 m3

Mais de 10 vezes o volume do JET



360000 t

de betão nas fundações anti-sísmicas e paredes (~ peso do Empire State Buiding)



73 m

O Edifício do Tokamak será ligeiramente maior que Arco do Triunfo em Paris (60 m acima da superfície e 13 m abaixo)

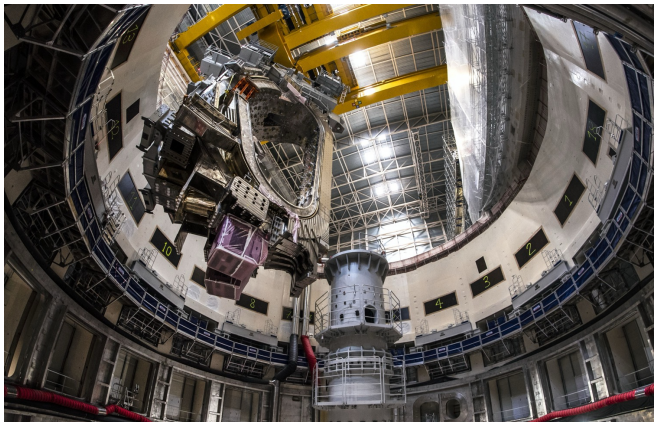


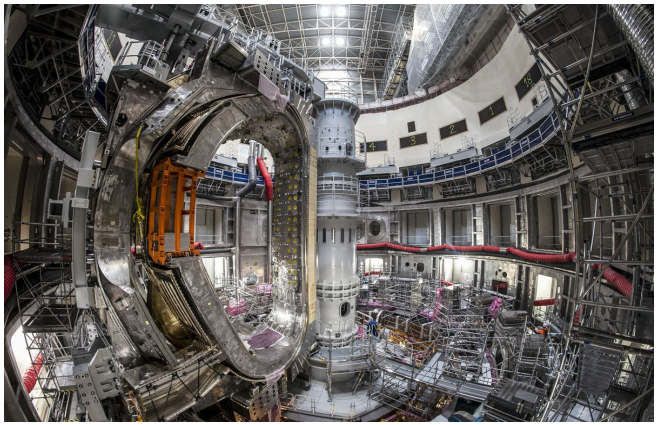
Uma das 18 bobines toroidais do ITER
(Créditos : ITER)

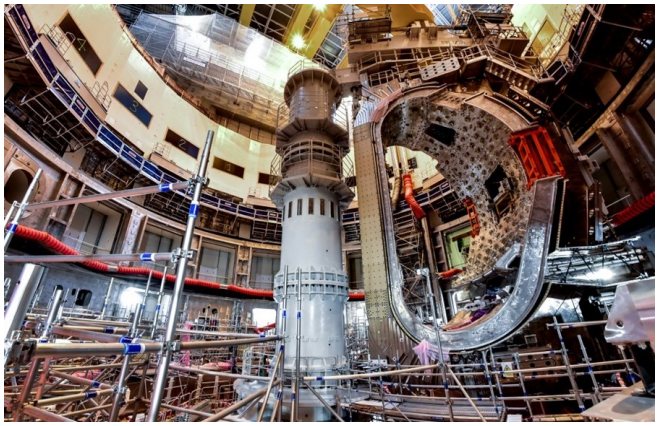
O ITER começa a ganhar forma

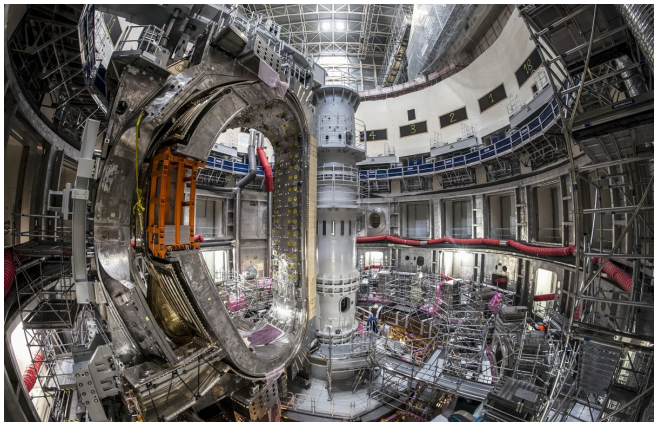
A instalação do 1º módulo do ITER é um primeiro passo essencial para que o dispositivo comece a ganhar a sua forma final.

No ITER, um "módulo" é um conjunto de um sector da câmara a vácuo, duas bobinas toroidais em forma de D e os painéis de blindagem térmica correspondentes, além de variados tipos de tubagem e apêndices que elevam a massa total do subcomponente a 1380 toneladas, o equivalente a quatro Boeing 747 totalmente carregados. Nos dias 11 e 12 de maio, o primeiro dos nove módulos necessários para a câmara de vácuo toroidal do tokamak foi extraído lentamente da ferramenta de montagem, levantado e transportado sobre a parede do escudo biológico que separa o átrio de montagem do poço da máquina e posicionado com precisão submilimétrica nos seus suportes. Serão necessárias nove operações similares, além da soldadura, para fechar o toro.

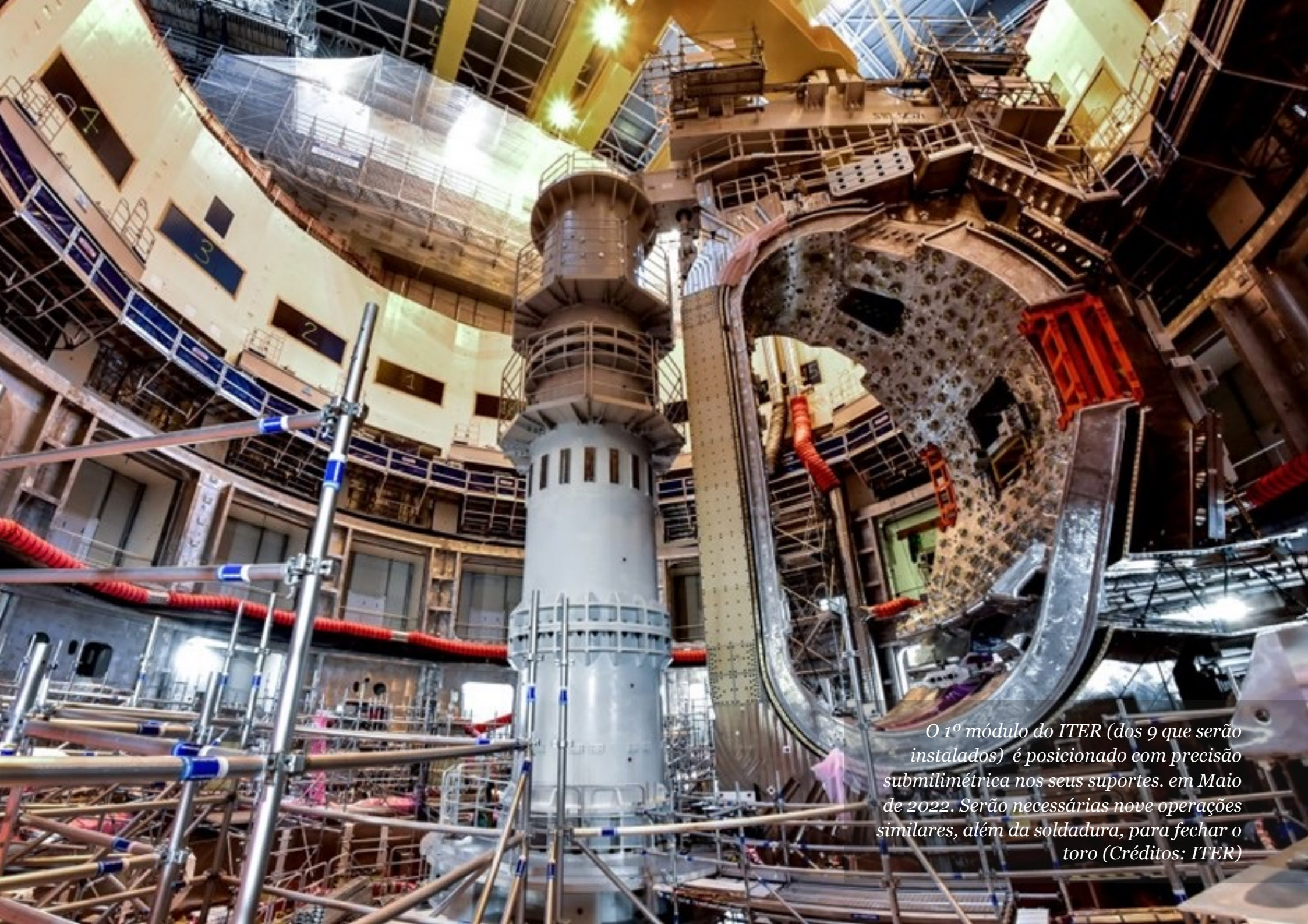








Diferentes vistas do 1º módulo do ITER em várias fases do trajecto desde o Hall de montagem até à sua posição final no edifício do tokamak



O 1º módulo do ITER (dos 9 que serão instalados) é posicionado com precisão submilimétrica nos seus suportes. em Maio de 2022. Serão necessárias nove operações similares, além da soldadura, para fechar o toro (Créditos: ITER)

Porque razão estamos a investir em energia de fusão



Baixa emissão de carbono

Estima-se que em 2040 o planeta esteja a usar o dobro da electricidade

A Fusão poderá providenciar de forma fiável electricidade em contínuo sem emissão de gás causadores do efeito de estufa



Abundante

As reservas de combustível chegam para dezenas de milhar de anos

O Deutério é extraído de quantidade pequenas de água

O Trítio será produzido no interior do reactor de fusão a partir do Lítio que é abundante na Terra



Seguro

O desafio da fusão é sustentar, não conter, a reacção

Ao contrário dos reactores de fissão, a fusão não produz reacçoes em cadeia descontroladas

As partes irradiadas do reactor podem ser processadas usando tecnologias já amplamente usadas com sucesso



Eficiente

Poucas centenas de kg de combustível de fusão podem alimenta ruam central de fusão por um ano

O Deutério existente na água duma banheira, fundido com o Trítio providencia energia para uma pessoa durante 60 anos



Inovadora

Com aplicação na aviação, cuidados de saúde, limpeza ambiental e diagnósticos médicos

Spin-offs para outros sectores tecnológicos incluindo computação avançada, investigação em materiais e robótica

Traz benefícios económicos a nível mundial, empregos e competências em diferentes mercados



Uma disrupção no tokamak JET. O plasma moveu-se em direcção do topo da máquina onde se pode observar uma forte interacção do plasma com a parede.

A fusão nuclear é realmente segura?

Uma central de fusão nuclear, é uma instalação nuclear, mas não é expectável que um acidente de pior cenário tenha impacto significativo sobre o público.

Uma das razões pela qual a fusão parece ter maior aceitação pública do que a fissão é que o público pode estar menos preocupado com acidentes catastróficos (embora como mostrado em secções anteriores o uso de fissão nuclear para produção de electricidade é perfeitamente seguro). As centrais de fusão não produzirão os mesmos isótopos radioativos quentes que os reatores de fissão produzem, que em caso de falha na refrigeração pode resultar no derretimento do combustível sólido usado ("meltdown"). A fusão não partilha desta insegurança associada à fissão nuclear, não havendo o risco de ser uma descarga descontrolada, pelo que não há nenhum risco de incidentes similares aos que aconteceram em Chernobil ou Fukushima.

Na fusão nuclear, se não existirem as condições perfeitas, a descarga não consegue continuar a funcionar. Ao contrário de uma reação de fissão nuclear, que pode escalar e continuar a crescer de forma descontrolada.

Quando algo falha num reactor de fusão nuclear, pode ocorrer uma disrupção, libertando instantaneamente uma quantidade significativa de energia em direcção das paredes mas a reação extingue-se.

Por definição, as reações em centrais de fusão não produzirão produtos de fissão radioactivos. Além disso, os principais radioisótopos que têm sido motivo de preocupação em acidentes de reactores de fissão por potencialmente fornecer doses de radiação para populações próximas (como Iodo-131) ou contaminar terras próximas (como Césio-137) não existem em reactores de fusão. A ausência de produtos de fissão radioativa faz parte do atraente caso de segurança para a energia de fusão. A reacção de fusão não produz diretamente subprodutos radioativos (o núcleo de hélio, um gás estável e inerte sem preocupações de segurança, e o neutrão não são radioativos). A radiação e o material radioativo numa central de fusão vêm de duas fontes principais – o trítio usado e produzido como combustível e materiais dentro e ao redor da câmara de vácuo do reactor que são activados (tornados radioactivos) pelos neutrões. Ou seja, existirão alguns materiais radioactivos no local duma central de fusão e que estes exigirão cuidado e atenção. Os sistemas de fusão produzirão algum lixo nuclear de baixo nível. As centrais de energia de fusão que utilizam combustível Deutério-Trítio, por exemplo, produzirão neutrões energéticos e, por sua vez, levarão a algum nível de activação nos materiais estruturais em torno do plasma onde ocorrem as reações de

fusão. É importante ressalvar, no entanto, que se os níveis de ativação forem mantidos abaixo de certos limites, não existem dificuldades adicionais, havendo experiência em vários países na operação locais para o descarte com sucesso destas formas de resíduos menos desafiadoras.

Também o Trítio, um dos combustíveis da fusão, é um material de fusão que é altamente móvel (com propriedades químicas similares ao Hidrogénio é bastante móvel em sistemas biológicos e no ambiente) e também radioactivo (embora apenas fracamente e com um tempo de meia-vida de 12,3 anos, sendo este o tempo que metade do Trítio demora a decair para Hélio). O próprio hidrogénio é um gás inflamável que pode levar a incêndios e explosões se não for manuseado adequadamente. Por outro lado, o uso seguro de materiais inflamáveis e perigosos ocorre em muitos outros tipos de instalações industriais em todo o mundo sem despertar o tipo de preocupação pública que as centrais nucleares podem despertar.

Uma central de fusão nuclear será um infraestrutura industrial e como tal sujeita também a muitos riscos habitualmente encontrados em infraestruturas deste tipo. Por exemplo, campos magnéticos elevados, lasers, microondas de alta potência, altas voltagens e materiais perigosos, como berílio e lítio. Algumas delas são comuns em outros processos e instalações industriais e como tal exigem medidas de segurança adequadas.

Uma central de fusão nuclear, é uma instalação nuclear, mas é importante reter que estudos de segurança efectuados pela UKAEA* mostram que um acidente de pior cenário não teria impacto significativo sobre o público.

Em caso de acidente numa central de fusão, mesmo para eventos hipotéticos extremos, os efeitos potenciais para o público serão muito menores do que os perigos dos piores acidentes numa central de fissão.

* https://scientific-publications.ukaea.uk/wp-content/uploads/UKAEA-RE2101-Fusion-Technology-Report-Issue-1.pdf



O grande objectivo da investigação em fusão nuclear é construir uma central de produção de electricidade

Créditos: NASA

A central de DEMOnstração de produção electricidade

O objectivo último da investigação em fusão nuclear é produzir electricidade. No caminho para este objectivo está a construção duma central de DEMOnstração de produção electricidade.

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. Este dispositivo único de fusão nuclear, primeiro do seu tipo, entrará em funcionamento em meados deste século e demonstrará a produção de 300 a 500 MW de eletricidade proveniente de fusão nuclear, uma energia limpa e segura, e a sua ligação à rede.

O reactor de DEMOonstração, geralmente designado por DEMO, refere-se ao conjunto de reactores de fusão destinados a demonstrar a produção de electricidade 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 reactores de fusão nuclear.

As experiências de fusão actuais foram desenhadas com o principal objectivo de investigar a física de plasmas. O DEMO terá como objectivo principal a produção e electricidade ainda que possa estar aquém, em potência e custo, do expectável para as futuras centrais comerciais. O DEMO deve ser capaz de demonstrar as tecnologias necessárias para controlar um plasma muito mais potente que os existentes nos dispositivos actuais (ou dos que existirão no ITER), permitindo a geração de electricidade 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 à medida que este é consumido no interior da máquina.

O projeto do DEMO da União Europeia, cujo desenho conceptual tem vindo a ser desenvolvido pela EUROfusion, 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. 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.

Construir e operar um reactor, capaz de produzir 300 a 500 MW de electricidade e introduzi-la na rede de distribuição é o objectivo último do Roteiro da Fusão da EUROfusion.

No âmbito da EUROfusion está a ser desenvolvida a fundação para um desenho conceptual robusto. Esta fundação assenta nos seguintes aspectos principais:

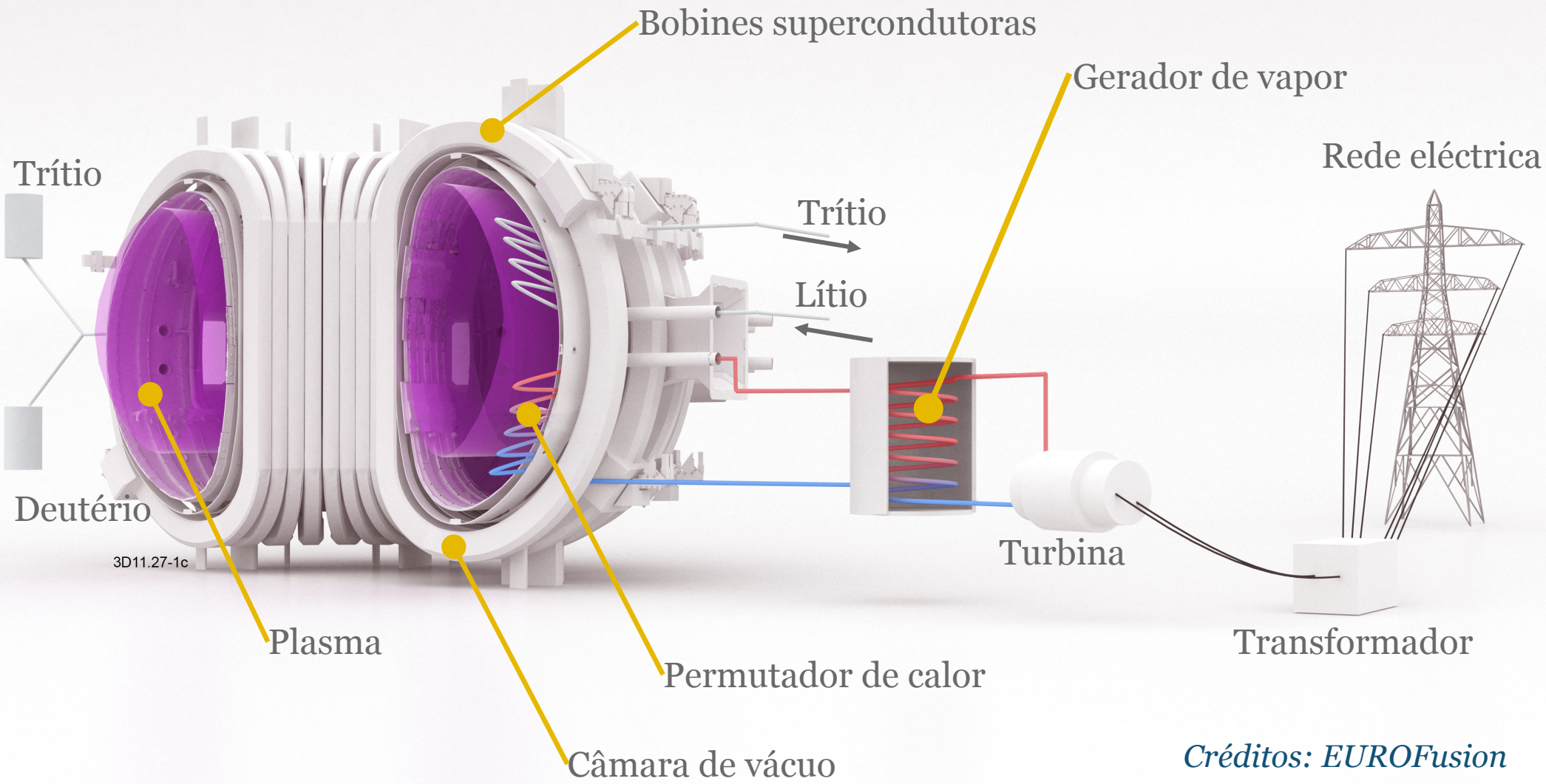
- Escolha adequado da camada fértil ("Breeding Blankets"): Estes módulos são os componentes internos da parede do reactor que irão absorver a energia da reacção de fusão, produzir o Trítio e blindar os componentes exteriores à câmara onde corre a reacção dos neutrões rápidos produzidos nas reacções de fusão.
- Escolha do diversor adequado
- Escolha do desenho adequado para a primeira parede (a parede em contacto directo 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 actividades de manutenção possam ser efectuadas remotamente através de manipuladores
- Incorporação de requisitos de segurança nuclear desde a fase de desenho conceptual do reactor

Para além dos esforços da União Europeia existem muitos outros projectos que visam a construção de um reactor de demonstração. Em Outubro de 2019 a Agência atómica do Reino Unido anunciou o seu objectivo de construir o "Spherical Tokamak for Energy Production (STEP)", com o objectivo de o ligar à rede eléctrica em 2040. A China propôs a construção do CFETR, um dispositivo com capacidade para produção de 1 GW de electricidade. Também o Japão e a Coreia do Sul têm os seus projectos de DEMO. Nos Estados Unidos tem crescido o interesse do sector privado em conceitos alternativos de produção de energia eléctrica 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 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).

Central eléctrica de fusão nuclear

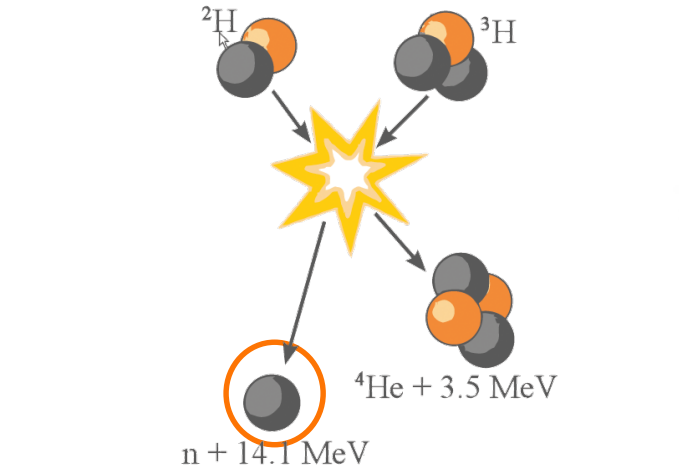
O objectivo da investigação em fusão nuclear é ter uma central eléctrica de 1 GW em operação contínua.



Créditos: EUROFusion

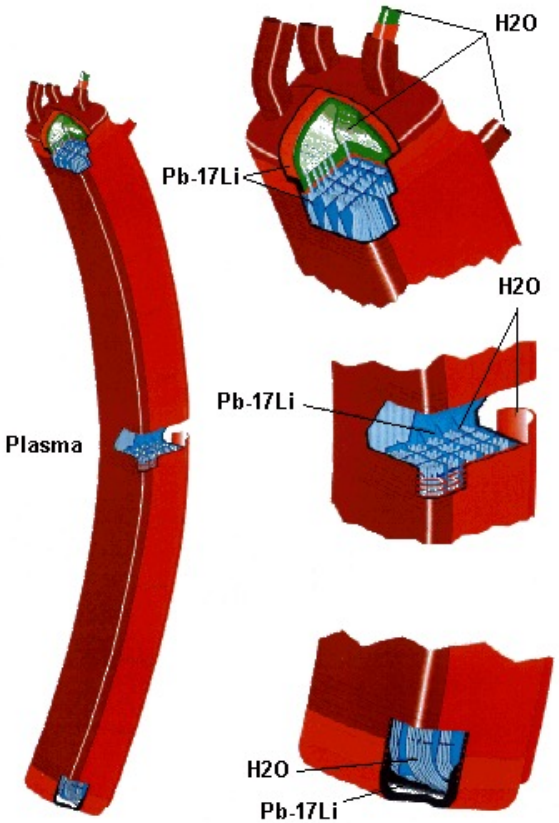
A camada fértil - "Tritium Breeding Blanket"

O "Tritium Breeding Blanket" é o módulo, localizado junto às paredes do tokamak, onde ocorre a permutação de calor e a produção de Trítio a partir do Lítio.



$$Li^6 + n \rightarrow T + He^4 + 4.8MeV$$

$$Li^7 + n \rightarrow T + He^4 - 2.5MeV$$



Desenho conceptual do "Tritim Breeding Blanket" e as reacçoes que ocorrem entre o Lítio e os neutrões provenientes da reacção de fusão

Enquanto o Deutério pode ser extraído da água do mar em quantidades quase virtualmente ilimitadas, a disponibilidade de Trítio é limitada a um valor actualmente estimado de 20 kg. O maioria do Trítio usado actualmente em experiências de fusão é produzido no reactor canadiano "CANDU Pressurized Heavy Water Reactor".

Felizmente o Trítio pode produzido no tokamak quando os neutrões que escapam do plasma interagem com um elemento específico, o Lítio, contido na camada fértil denominada em inglês por "Tritium Breeding Blanket".

Este conceito de produção do Trítio durante a

reacção de fusão é essencial para futuros reactores de larga escala para produção de electricidade. No caso do ITER, o Trítio usado será adquirido do inventário mundial para ser usado nos 20 anos de operação. O ITER providenciará uma oportunidade única para testar o conceito do "Breeding Blanket" denominados "Test Blanket Modules (TBM)", num ambiente real de fusão. Nestes módulos de teste serão exploradas técnicas viáveis para assegurar a produção auto-suficiente de Trítio. Na Europa existem dois conceitos para os "Brreding Blankets": o "Helium-Cooled Pebble-Bed (HCPB)" e o "Helium-Cooled Lead Lithium (HCLL)". As principais diferenças residem no material usado para produção do Trítio. Por forma preparar a escolha para o DEMO foi decidido testar no ITER os dois conceitos em simultâneo.

Sem dúvida as lições tiradas da operação do "Tritium Breeding Blankets" do ITER terão implicações significativas no design de futuros reactores

Para o DEMO, o próximo passo no caminho de um reactor comercial, serão necessários 300 g de Trítio por dia para produzir 800 MW de electricidade. Não existe nenhuma fonte externa de Trítio para o desenvolvimento da energia de fusão para além do ITER, sendo por isso essencial o desenvolvimento dos "Breeding Blankets" para o futuro da energia de fusão.

O consumo de Lítio pela fusão nuclear será ínfima quando comparado com as reservas mundiais. Estima-se que as reservas terrestres de Lítio permitirão a operação de centrais de fusão por mais de 1000 anos e as reservas de Lítion no mar poderão fazer face às necessidades das centrais de fusão nuclear por milhões de anos.

Quanto Lítio será necessário para 1 ano de operação?

$$Li^6 + n \rightarrow T + He^4 + 4.8MeV$$

1 Central de 1 Gw	**500 kg** apenas **140 kg** efectivamente **"queimados"**	**70 kg**
10000 centrais de 1Gw ~1/3 procura mundial esperada em 2100	**5000 t** obtidas do processamento de **70000 t** de Lítio	

O consumo de Lítio pela fusão nuclear será ínfima quando comparado com as reservas mundiais e poderá coexistir com procura para armazenamento de energia (para comparação estima-se que um veículo Tesla Model S usa nas suas baterias cerca de 63 kg de Carbonato de Lítio o que corresponde a cerca de 12 kg de Lítio puro).

A energia de fusão é realmente ilimitada?

A fusão nuclear recorrendo à reacção Deutério-Trítio, está limitada pela quantidade de Lítio existente devido à necessidade de usar o Lítio para criar Trítio.

De acordo com os dados da BP no seu "*Statistical Review of World Energy 2021*" os referente às reservas mundiais de combustíveis fósseis, conhecidas e estimadas, é fácil estimar que o planeta esgotará as suas reservas de energia em menos de cem anos à taxa de consumo actual. Mesmo no caso da fissão nuclear as reservas de urânio à taxa de consumo actual e com as reservas conhecidas, não durará mais de 200 anos. Este valor decrescerá se a fissão nuclear sofrer um crescimento acentuado para auxiliar no cumprimento das metas de descarbonização.

Com base no conhecimento actual e nas reservas de combustível existentes, não existem soluções que possam providenciar electricidade de base por mais de 200 anos.

De acordo com estimativas da Nuclear Energy Association /OCDE existem recursos de Urânio suficientes para apoiar o uso contínuo da energia nuclear e o crescimento significativo da capacidade nuclear para geração de eletricidade de baixo carbono e outros usos (por exemplo, calor, produção de hidrogénio) a longo prazo. Os recursos recuperáveis identificados, incluindo recursos razoavelmente garantidos e recursos inferidos são suficientes por mais de 135 anos. Progressos na extração de Urânio a partir da água do mar poderão permitir que o recurso à fissão nuclear seja uma opção por muito mais tempo. Será necessário desenvolver um esforço significativo no desenvolvimento de métodos de exploração, técnicas inovadoras e investimentos oportunos para transformar estes recursos em Urânio refinado pronto para a produção de combustível nuclear e para facilitar a implantação de novas tecnologias nucleares promissoras.

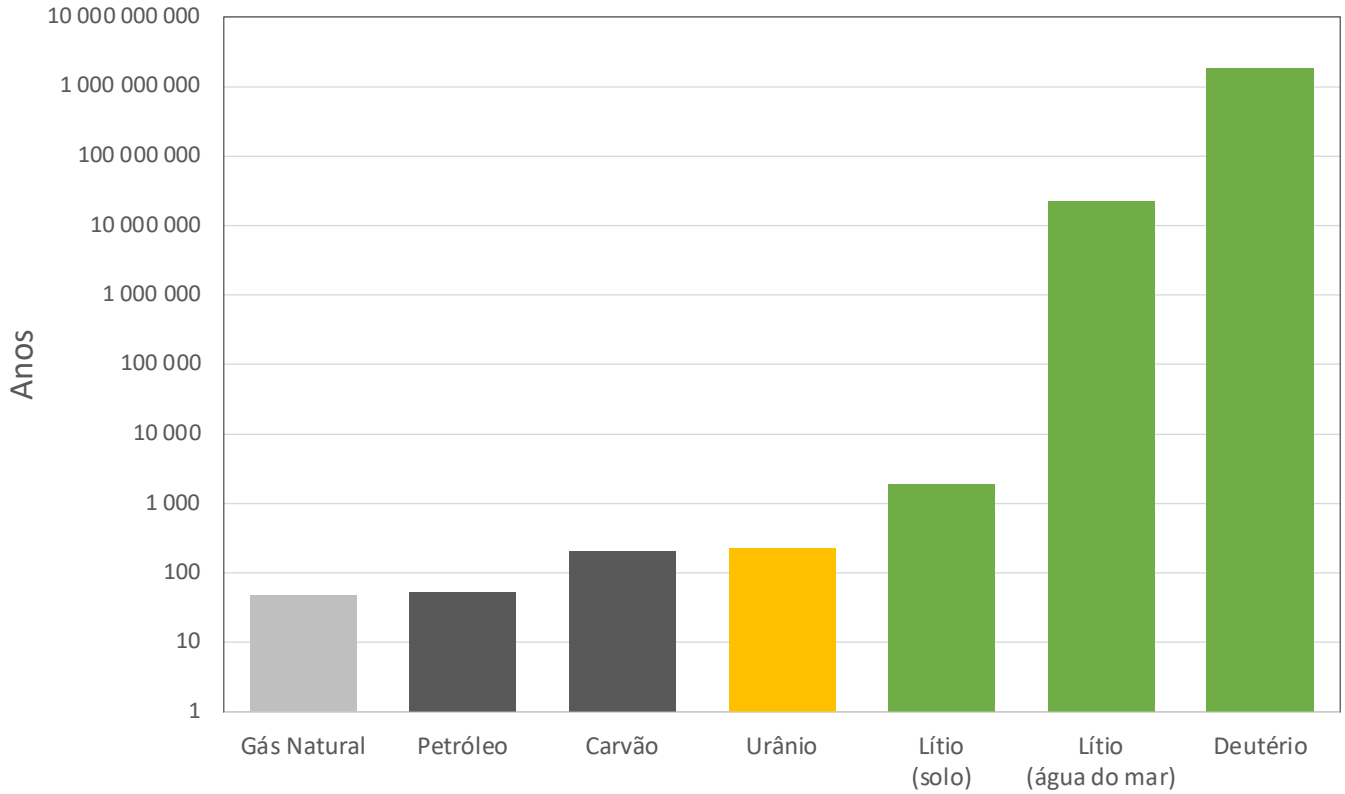
Os reactores rápidos também poderão usar Urânio-238, tanto directamente por fissão como indirectamente por conversão em Plutónio-239, que por sua vez sofre fissão. Isto significa que não só os reactores rápidos, implantados em larga escala, podem ajudar a minimizar o problema do lixo nuclear, mas também poderão manter a produção de electricidade durante séculos com o Urânio que já foi extraído e para o qual há actualmente pouco uso.

A fusão nuclear recorrendo à reacção Deutério-Trítio, está limitada pela quantidade de Lítio existente, seja de minérios ou extraído da água do mar, devido à necessidade de usar o Lítio para criar Trítio. A fusão recorrendo à reacção Deutério - Deutério é limitada apenas pela quantidade de deutério nos oceanos. A forma mais simples de fusão, usando o Lítio extraído de minérios, poderá durar até quase 2000 anos mesmo assumindo que 1/3 da procura

mundial de electricidade estimada para 2100 é suprida recorrendo à fusão nuclear. Usando o mesmo pressuposto, o Lítio extraído da água do mar aumentaria o fornecimento de energia de fusão para 22 milhões de anos. A fusão apenas com deutério duraria mais de mil milhões de anos.

As reservas de combustível de fusão nuclear existentes no nosso planeta são efetivamente ilimitadas.

A energia da fusão usando apenas deutério duraria por escalas de tempo que o ultrapassam o tempo estimado para que o Sol esgote o seu próprio suprimento de combustível de Hidrogénio e se expanda até engolir a Terra. A fusão é uma fonte de energia que pode continuar até que o próprio planeta seja inabitável.



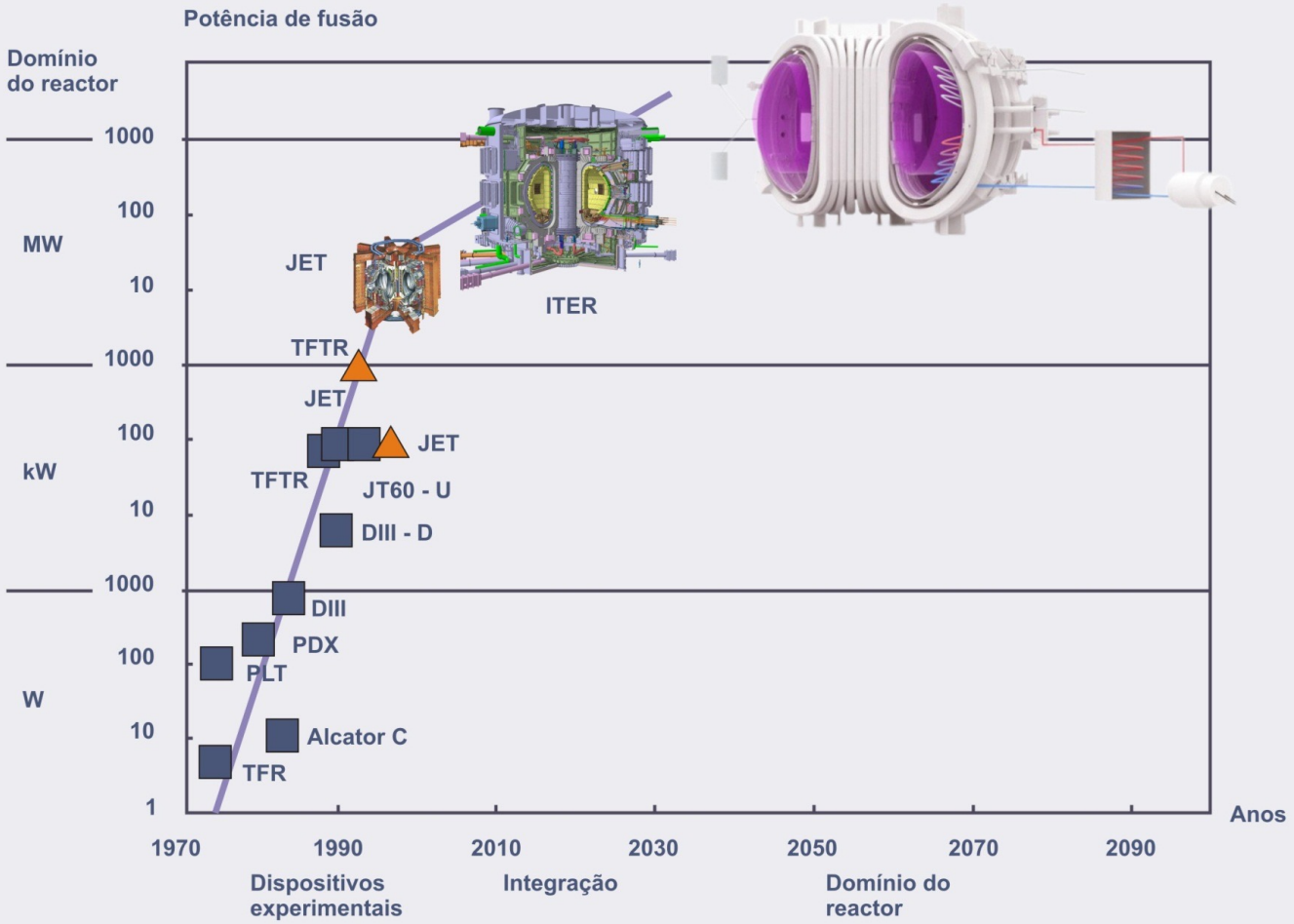
Número de anos de energia restante se usássemos os combustíveis à taxa de consumo actual. A cinzento estão representados os combustíveis fósseis, a amarelo a fissão nuclear (com base nos reactores actuais) e a verde os combustíveis necessários para fusão nuclear, Deutério-Trítio (usando lítio do solo ou do mar) e Deutério-Deutério (que requer apenas água do mar). Os dados referentes ao consumo e reservas combustíveis fósseis e os dados referentes às reservas de Urânio foram retirados do "BP Statistical Review of World Energy 2021".

Quando teremos energia de fusão?

A investigação em fusão nuclear sofreu avanços significativos ao longo das última décadas e em breve estaremos em condições de construir e operar um reactor de 1 GW em contínuo.

Nos próximos anos assistiremos a avanços significativos em várias frentes tecnológicas permitindo concretizar a operação de um reactor de demonstração de produção de electricidade em 2050.

Se este objectivo for alcançado é previsível que no final do século 1/3 da electricidade mundial possa ser produzida a partir de fusão nuclear.



A evolução da potência dos reactores de fusão desde os anos 70 tem sido significativa permitindo uma aproximação do domínio dos reactores comerciais

O roteiro da fusão

Constituído por três etapas para chegar a um reactor comercial para produção de energia eléctrica

Curto-prazo

- Construção do ITER
- Investigação e Desenvolvimento em apoio do ITER
- Operação Deutério- Trítio no JET
- Desenho conceptual do DEMO
- Investigação e Desenvovimento para o DEMO
- Construção duma infraestrutura de testes d materiais, IFMIF-DONES
- Exploração científica e tecnológica do conceito stellarator

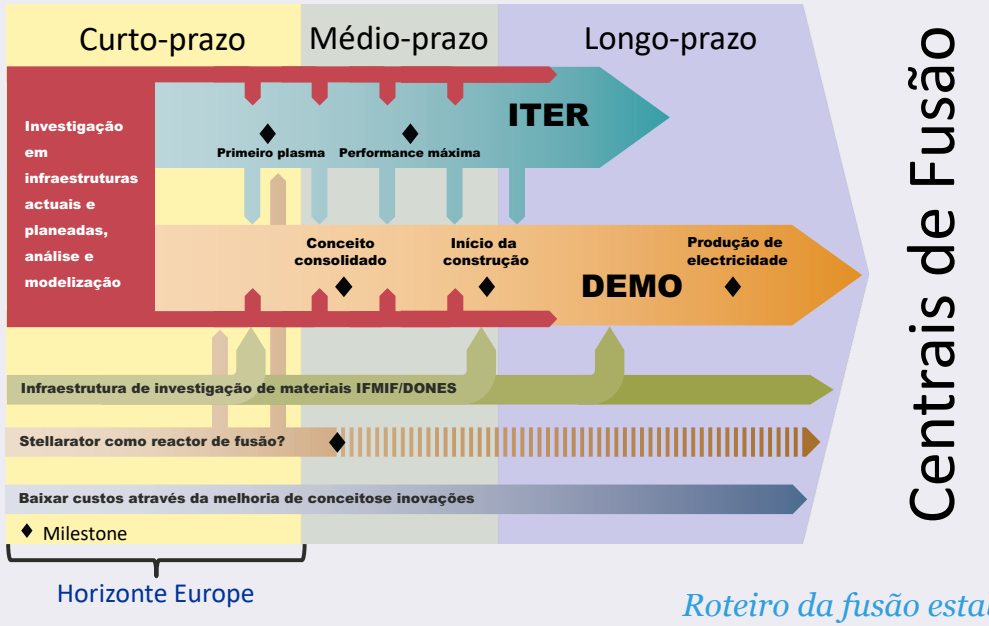
Médio-prazo

- Primeira exploração científica e tecnológica do ITER
- Primeira exploração do IFMIF-DONES
- Fase de design de engenharia do DEMO com envolvimento industrial
- Desenvoviemnto de materiais e tecnologias relevantes para um central de fusão
- Desenvolvimento adicional do conceito stellarator

Longo- Prazo

- Alta performance e resultados tecnológicos do ITER
- Qualificação de materiais de vida longa para o DEMO e centrais de fusão no IFMIF-DONES

- Finalização do design do DEMO
- Construção do DEMO
- Demonstração da geração de electricidade
- Comercialização da tecnologia e materiais
- Implementação da fusão juntamente com a indústria



Roteiro da fusão estabelecido pela EUROfusion

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 no fornecimento 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. Para analisar esse papel potencial são efectuadas análises prospectiva de longo prazo, pois não se espera que a fusão esteja disponível antes de 2050, e portanto, o seu impacto deve ser discutido num horizonte temporal até 2100. A única maneira de abordar esse horizontes de tempo 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 os vários cenários possíveis as simulações da penetração da energia de fusão no mercado* prevêm que em 2100 a fusão nuclear consiga providenciar 1/3 da electricidade mundial assumindo a meta de 2050 para concretização da operação de um reactor de demonstração capaz de produzir energia eléctrica e a colocar na rede.

A fusão representa uma opção tecnológica chave para o futuro sistema de energia.

O principal factor para a penetração da fusão é uma preocupação com as mudanças climáticas. A adopção de medidas ambientais, mesmo na forma mais fraca de um imposto CO_2 diferenciado entre as regiões e com uma trajectória moderada de crescimento, é suficiente para impulsionar a fusão no mercado de electricidade no final do século sendo os resultados robustos contra diferentes trajetórias de crescimento económico.

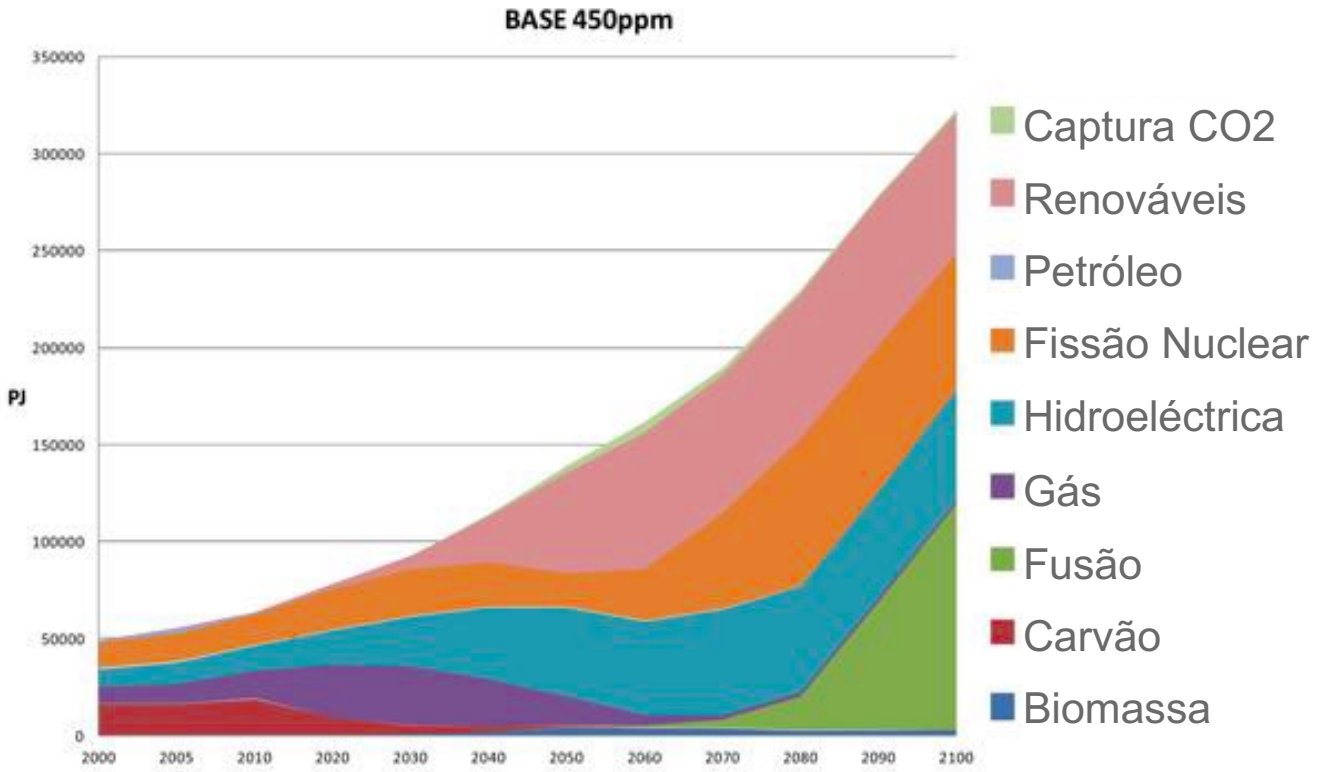
Apesar das simulações optimistas é necessário salientar que existem restrições económicas para a velocidade de implantação da energia de fusão**. Estas derivam das grandes dimensões da infraestrutura, do longo tempo de construção, que impede um ciclo de inovação eficaz, e da necessidade de um investimento 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, conseguir-se reduzir a infraestrutura. Por exemplo, o reactor DEMO ser de menor dimensão, mais

* H. Cabal et al., EPJ Web of Conferences **33**, 01006 (2012), https://doi.org/10.1051/epjconf/20123301006
** NJL 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

simples e mais barato poderia potencialmente antecipar a introdução da energia de fusão em décadas.

Existem também vários caminhos que podem ser explorados recorrendo a outras funções potenciais para a fusão para além da geração de electricidade tais como a dessalinização de água, aquecimento centralizado, produção de hidrogénio, uso de calor de processo para a indústria, mas que actualmente carecem de mais investigação e desenvolvimento e que poderão contribuir para uma mais rápida penetração da fusão no mercado.Esta discussão está sistematizada sob a forma da análise SWOT apresentada na tabela.

Uma questão relacionada com os prazos reside em estabelecer em que ponto do ciclo de desenvolvimento da fusão a liderança para a comercialização deve passar para o sector privado. O roteiro da EUROfusion



Simulação da penetração da energia de fusão no mercado assumindo emissão de CO2 limitada a 450ppm, (H. Cabal et al 2012)

sugere que tal acontecerá após um DEMO público. Ou seja, os programas públicos conduzem o desenvolvimento tecnológico à beira da comercialização, altura em que é expectável que o sector privado assuma a construção duma primeira vaga de centrais comerciais. Outros preveem que este momento ocorra após experiências bem-sucedidas de Deutério-Trítio no ITER, em resposta ao facto de que um DEMO público levaria demasiado tempo e o financiamento poderia ser politicamente difícil.

A natureza dos prazos de investimento públicos, ou seja, DEMO apenas até 2045-2050 torna a comercialização irrealista antes de meados dos anos 2050, no mínimo. A lógica por detrás 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. Haverá maior certeza numa calendarização para as

Forças
Todos os benefícios da fusão… (segurança, combustível ilimitado, poucos resíduos, baixo CO2, …)

Fraquezas
Incertezas devido aos desafios tecnológicos
Incertezas quanto aos desafios da regulamentação nuclear
Requer um investimento sem precedentes para se tornar uma opção energética

Oportunidades
As alterações climáticas e taxas de CO_2 podem estimular a adopção
Avanços tecnológicos ou novos conceitos poderão antecipar em décadas a introdução no mercado
Outras funções potenciais para além da geração de electricidade (dessalinização de água, aquecimento centralizado, produção de hidrogénio, uso de calor de processo para a indústria)

Ameaças
Espaço ocupado por outras tecnologias
Restrições económicas à implantação • Dimensões da infraestrutura; • Investimento elevado; • Custos da regulamentação; • Tempo de construção longo
Aceitação pública (é uma tecnologia nuclear...)

Será que 1/3 da electricidade em 2100 poderá ser suprida pela fusão nuclear? Uma análise SWOT da situação (adaptada de NJL 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

instalações comerciais quando o primeiro conjunto de dispositivos seguintes funcionar com sucesso.

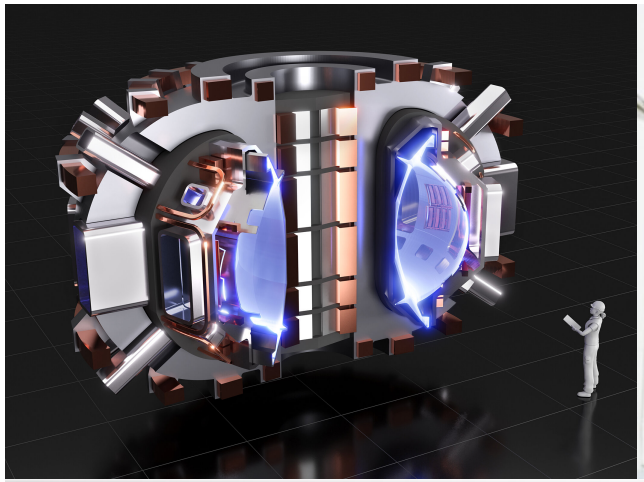
Também permanece pouco claro ou mesmo impossível determinar o futuro custo da energia de fusão, dadas as enormes e variadas incertezas. Os principais factores que determinam o custo do reactor de fusão são a grande dimensão da central e a quantidade de matérias-primas necessárias (aço, betão, etc.), a necessidade de componentes específicos para os quais ainda não existe uma produção normalizada (por exemplo, bobines supercondutoras, câmara vácuo, etc.). É razoável esperar uma forte contribuição do custo de capital (ou seja, juros elevados sobre a dívida) devido ao risco financeiro associado aos projectos comerciais de fusão, tal como se espera para tecnologias inovadoras semelhantes, como os reactores de cisão de quarta geração.

Embora seja prematuro questionar a viabilidade económica (o custo da electricidade) 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* analisou possíveis requisitos de custos para a electricidade gerada por fusão, calor de processo e produção de hidrogénio concluindo 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 vendendo a electricidade quando há preços elevados em períodos de maior procura e nos quais as renováveis não conseguem dar resposta.. Isto garantiria um LCOE mais baixo.

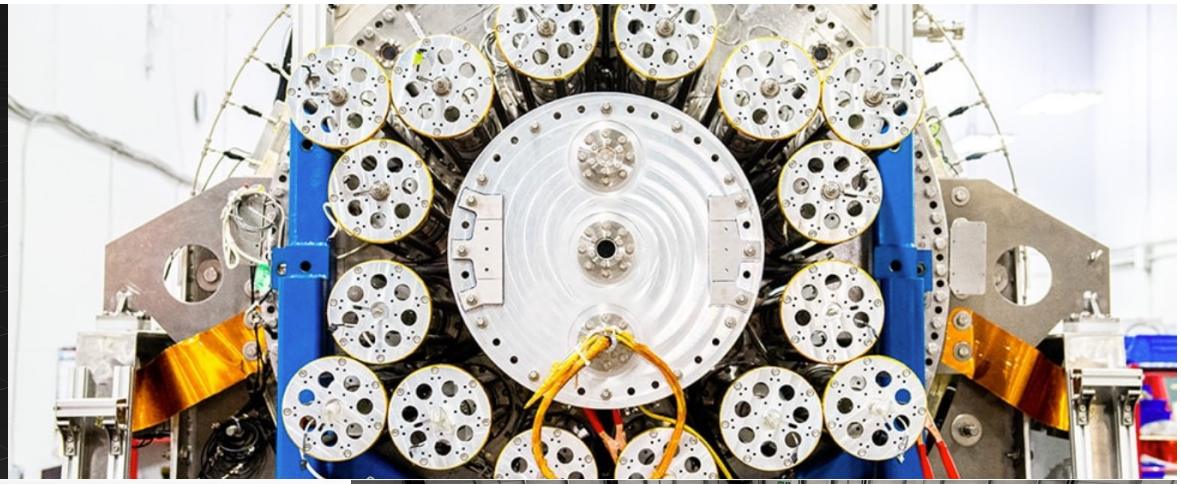
Ainda existem muitas incertezas acerca de quando fusão nuclear poderá dar um contributo significativo para a produção de electricidade mas também muito trabalho a ser realizado para tornar a fusão uma realidade. Se no sector privado um punhado de empresas concluírem e operarem com sucesso os seus próximos 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.

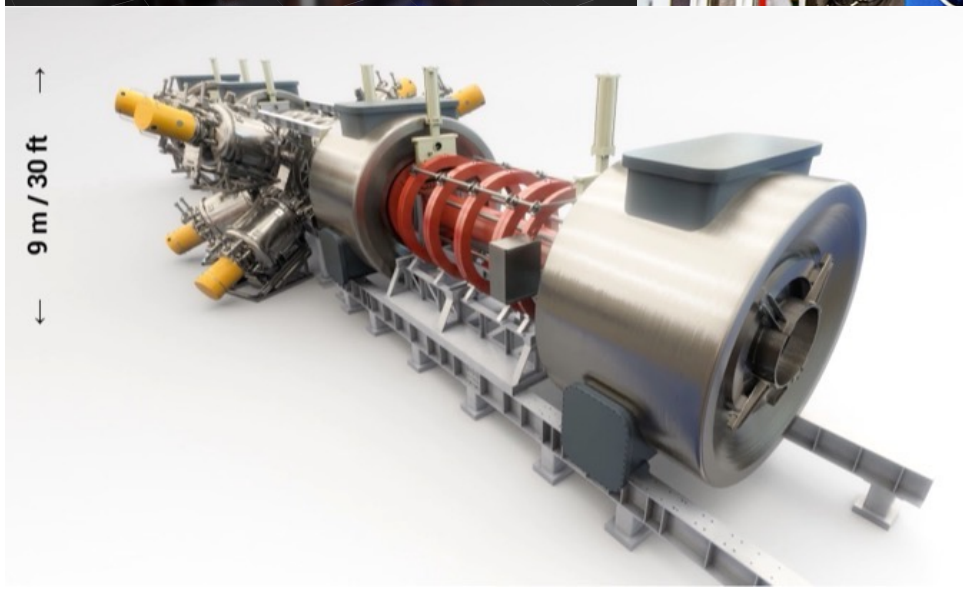
* Handley, M., Slesinski, D. and Hsu, S. (2021). Potential Early Markets for Fusion Energy, https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-021-00306-4

SPARC

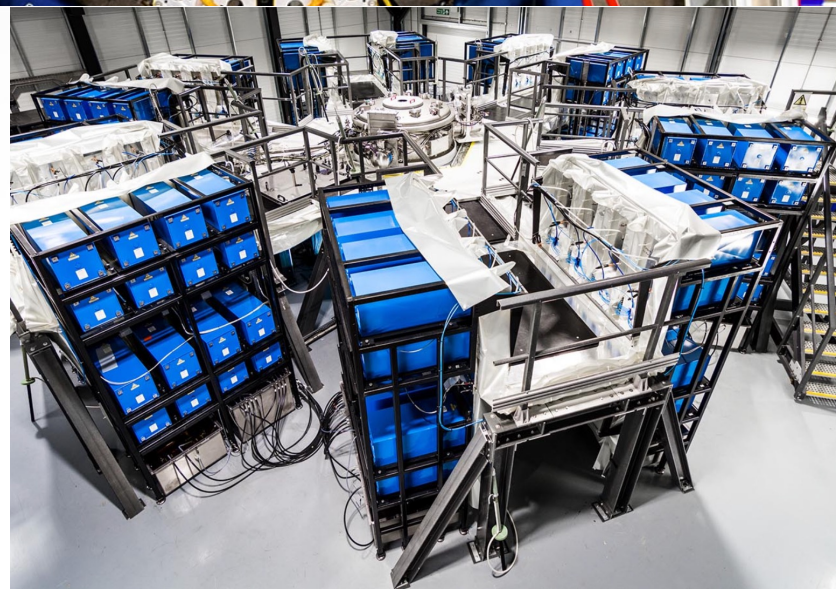


General Fusion





TAE Technologies



First Ligth Fusion

Existem vários conceitos alternativos a serem exploradas com recurso a investimento privado

Novos conceitos

Para além da construção do ITER, progressos no desenho do DEMO e de projectos previstos em vários países existem também start-ups a explorar novas configurações.

Para além da construção do ITER, progressos no desenho do DEMO (nas várias versões seguidas por diversos países) e de projectos 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: dispositivo no qual 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 é usar 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 injectado no na câmara de vácuo, onde é comprimido para atingir as condições de fusão por compressão mecânica rápida dum fluído condutor.

Confinamento magnético de configuração invertida de campo: contém 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 entre si e, em seguida, aquece-os com feixes de partículas.

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”



Uma bobine supercondutora de alta temperatura construído pela Commonwealth Fusion Systems e o Plasma Science and Fusion Center (PSFC) do MIT produziu um campo magnético de 20 tesla numa demonstração recente. (Crédito: Gretchen Ertl, CFS/MIT-PSFC)

O investimento privado em fusão nuclear

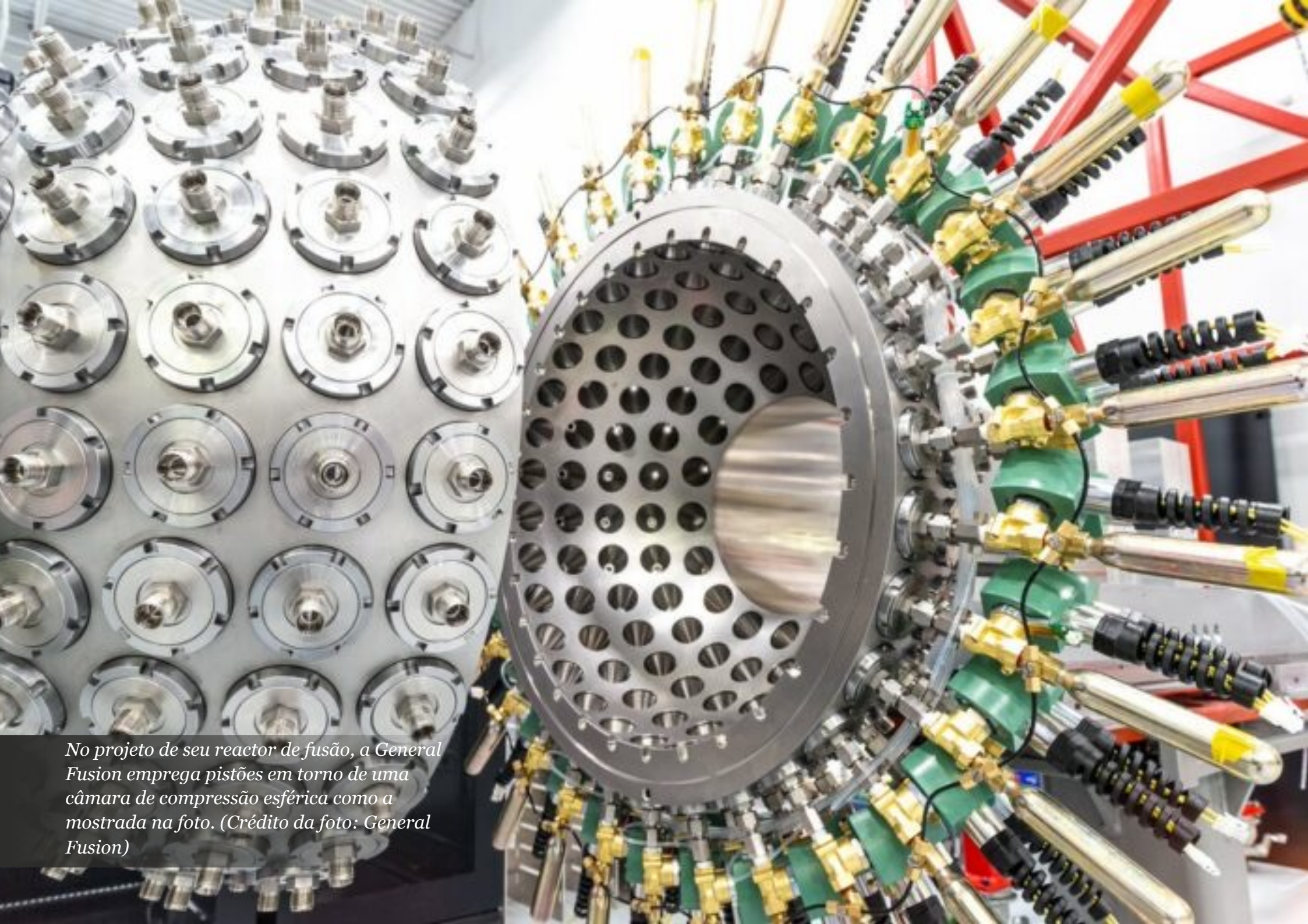
A fusão nuclear, antes considerado apenas um sonho sempre a 30 anos de distância, tem atraído nos últimos anos investimento de grandes empresas de capital de risco e de grandes empresas.

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 triliões de euros. A FIA diz 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. 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 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 dum sector privado de fusão é uma maior diversidade de abordagens alguns dos quais brevemente destacados abaixo:

Commonwealth Fusion Systems, uma spinoff do MIT criada em 2015, que está a construir um tokamak denominado SPARC, com o objetivo de produzir um protótipo até 2025, capaz de produzir energia 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 um protótipo de reactor chamado ARC. Em dezembro de 2021, a empresa acionou 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 desses 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 gere cerca de 100 MW de energia o que o tornará “comercialmente relevante”.

A **TAE Technologies**, fundada em 1998 usa uma abordagem, que envolve a criação



No projeto de seu reactor de fusão, a General Fusion emprega pistões em torno de uma câmara de compressão esférica como a mostrada na foto. (Crédito da foto: General Fusion)

duma reacção de fusão a temperaturas extremamente elevadas para criar a fusão de dois elementos abundantes, hidrogénio e boro-11, criando apenas hélio. O reactor linear da TAE, do tamanho de um autocarro de dois andares, é completamente não radioactivo, O problema neste caso é que requer temperaturas na ordem de um bilhão de graus Celsius. (dez vezes superiores ao ITER que requer “apenas” uma temperatura de 150 milhões de graus Celsius). A vantagem é que esta reacção usa apenas combustível disponível em abundância e não gera neutrões que possam contaminar o reactor oferecendo custos de manutenção mais baixos e um resultado final muito mais sustentável. Nos reactores TAE, o plasma é confinado dentro dum campo magnético cilíndrico criado por um solenóide, 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 rotção são injectados feixes tangenciais de boro. A TAE afirma que o seu actual reactor 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 centrífugadora gira uma câmara cheia de chumbo fundido e lítio criando uma cavidade no metal líquido, onde fica o plasma. Um sistema de pistões bombeia mais metal líquido para a câmara, comprimindo o plasma em algumas dezenas de milissegundos. O hidrogénio, aquecido a temperaturas elevadas é mantido confinado por um campo magnético, preenche a esfera para criar a reacção. 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 accionar uma turbina e gerar eletricidade. Um aspecto 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, e a empresa pretende ter reactores à venda no início de 2030.

A **Magneto-Intertial Fusion Technologies**, ou MIFTI, fundada em 2008 na Califórnia, está a desenvolver um reactor 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 de tempo. 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 reactores 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 reactor 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 aseguir uma estratégia diferente, o confinamento inercial similar à bordagerm 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 electromagnético 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 actuais 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 dum reactor 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 reactor 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 reactor 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 triliões 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.

Embora as perspectivas sejam inegavelmente excitantes, a fusão comercial numa década pode ser excessivamente optimista. No entanto, ainda que esta meta temporal seja considerada demasiado optimista, 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.

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 eléctricas exigirá um esforço significativo e I&D dedicada a componentes críticos. Os projectos 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 aspectos críticos poderão tornar-se mais específicos e claramente identificados to desafios necessários para produzir um reactor comercial. Por este motivo, embora as perspectivas sejam inegavelmente excitantes, a fusão comercial numa década pode ser excessivamente optimista. No entanto, ainda que esta meta temporal seja considerada demasiado optimista, 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*. Décadas de Propriedade intelectual gerada por investigação em fusão nuclear contribuíram substancialmente para o desenvolvimento de áreas fora da fusão nuclear tais como ciência dos materiais, supercondutores, 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.

Todos os intervenientes privados têm como objectivo claro a comercialização da energia de fusão, mas nesta fase apenas dão estimativas gerais sobre quando é que tal pode 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 projectos, 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 electricidade até que possam confirmar todos os aspectos da tecnologia.

* Elias G. Carayannis and John Draper, Fusion Engineering and Design, Volume 173, December 2021, 112815, https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112815

Participação portuguesa no Programa Europeu de Fusão

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, uma unidade de investigação do Instituto Superior Técnico, participa activamente no programa Europeu de fusão desde 1989

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear* participa activamente no programa Europeu de fusão desde 1989, ano da criação da Associação Euratom-IST. Em 2014 as actividades europeia de fusão passaram a ser geridas no âmbito do Consórcio EUROfusion do qual o IPFN/IST são membros. As actividades de fusão nuclear do IPFN estão fortemente centradas no programa de trabalho estabelecido no roteiro de Fusão para H2020** 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 concepção, 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 disponíveis, aumentando as competências necessárias para a engenharia e integração de sistemas.

O IPFN integra o Programa de Fusão da UE com contribuições activas e autónomas em actividades 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 actividades do IPFN concentram-se principalmente na contribuição para a construção e exploração do ITER, exploração dos dispositivos de actualização JET e ASDEX, e em actividades relacionadas com a DEMO. O programa de trabalho inclui actividades 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 concepção e construção da próxima geração de dispositivos de fusão (ITER, DEMO e W7-X).

* https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt
** 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



O IPFN desenvolveu um reflectómetro de microondas para o injetcor de plasma PI3 da GeneralFusion permitindo revelar novos dados valiosos sobre a densidade do plasma - um parâmetro crítico do plasma. Especialistas de topo do IPFN construíram os componentes electrónicos do dispositivo em Portugal tendo estes sido instalados no dispositivo em fevereiro de 2024.

Tendo o Projecto ITER como principal foco das actividades 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 objectivo 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 actividades relacionadas com a construção do ITER, actividades preparatórias de I&D que a ele conduzem, e todas as actividades 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 actividades relativas ao funcionamento do tokamak, estabelecimento da base física para o ITER, bem como actividades 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 actividades 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 actividades de modelização. Estas actividades serão levadas a cabo sob a coordenação do Consórcio EUROfusion, que é responsável pela acção co-financiada pela Euratom.

Para além do ITER: visando o desenvolvimento a longo prazo da fusão como fonte de energia para a produção de electricidade em larga escala e centrado no desenho conceptual do primeiro protótipo comercial, DEMO. Para cumprir o objectivo da demonstração da electricidade 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 actividades de I&D que estão orientadas para o desenvolvimento de soluções para as aplicações das centrais eléctricas, incluindo o apoio a actividades 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 activamente para o programa de fusão, quer em instituições de investigação quer na indústria envolvida na construção do ITER.



Ilustração da central de demonstração da produção de electricidade a partir de fusão nuclear, DEMO (Créditos: F4E/EUROfusion)

Ideias a reter

4

Notas finais

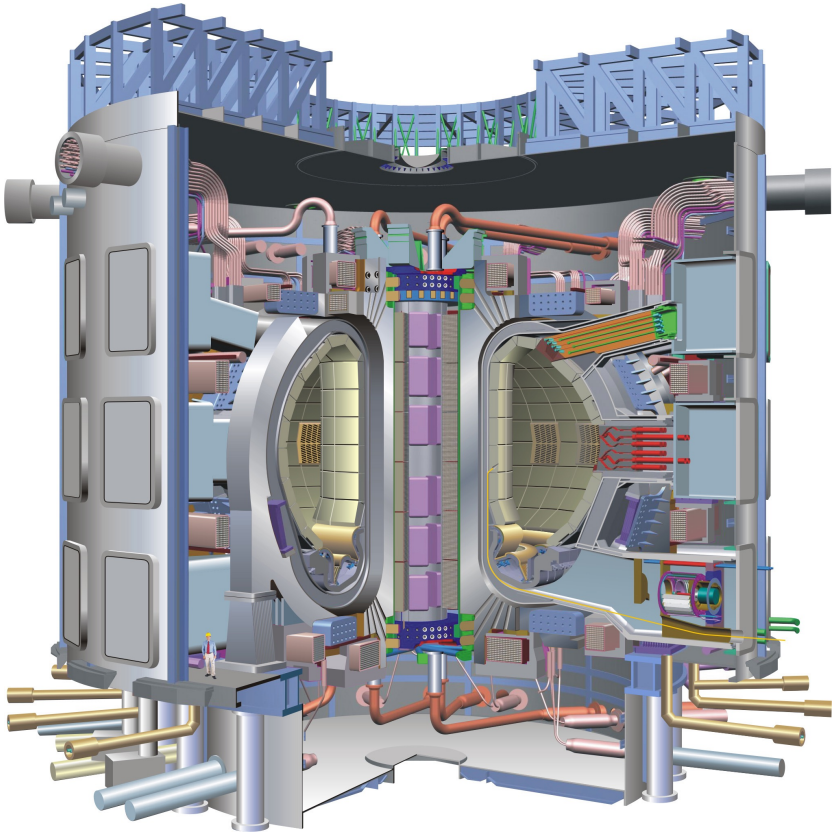
A energia nuclear não é má e pode ser uma das armas na guerra contra as alterações climáticas comprando tempo até que a fusão nuclear esteja disponível.

A neutralidade carbónica é alcançável usando uma mistura de tecnologias de baixo e zero carbono e mudanças no comportamento social. A procura de energia será impulsionada pela atividade económica, acompanhada de mudanças no estilo de vida e melhorias na eficiência energética, desenvolvimento de combustíveis de baixo carbono, tecnologias inteligentes e electrificação de todos os sectores. Como tal, a neutralidade carbónica precisará, em última análise, de mudanças significativas na maneira como as economias funcionam. As energias renováveis, a energia nuclear e o gás com sistemas de sequestração de carbono serão os principais elementos de um futuro sistema de energia. Um estudo efectuado pela United Nations Economic Comssion for Europe (UNECE)* conclui que os objetivos climáticos mundiais não serão alcançados se as tecnologias nucleares forem excluídas. Enquanto praticamente todas as energias renováveis são inconstantes, como a eólica, solar ou hídrica, é preciso uma energia constante, de base, quando todas falharem. Por agora, esse papel tem sido tido pelas energias fósseis ou fissão nuclear. Apesar de toda esta aposta nas energias renováveis, que deve ser feita e incentivada, dificilmente estas energias sozinhas vão conseguir produzir a quantidade de energia necessária, com a fiabilidade que é preciso para podermos fazer esta transição.

Os objetivos climáticos mundiais não serão alcançados se as tecnologias nucleares forem excluídas.

A energia nuclear é uma fonte essencial de eletricidade e calor com baixa emissão de carbono que tem desempenhado um papel importante na prevenção das emissões de CO_2. Nos últimos 50 anos, o uso de energia nuclear reduziu as emissões globais de CO_2 em cerca de 74 Gt, ou quase dois anos do total de emissões globais relacionadas com energia. A energia nuclear pode continuar a desempenhar um papel essencial na descarbonização. Além dos reactores nucleares de grande escala existentes, a energia nuclear continua a evoluir com novas tecnologias emergentes, incluindo pequenos reactores modulares (SMRs) e tecnologias avançadas de reactores, abrindo portas a novas aplicações, tais como melhor gestão de carga, calor de alta temperatura para processos industriais, produção combinada de calor e energia e eletrólise para produção de hidrogénio. A energia nuclear é adequada para fornecer quantidades substanciais de energia de baixo carbono usando pouca

* https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2_1.pdf



=



terra. Do ponto de vista do ciclo de vida ambiental, a energia nuclear demonstrou ser de baixo carbono, mas também tem benefícios adicionais tais como uma baixa ocupação do solo, baixa transformação do ambiente ao longo do ciclo de vida devido à alta densidade energética dos elementos combustíveis, o que minimiza a área de exploração mineira por kWh, e a relativamente baixa ocupação dos locais de implantação das centrais. Também é adequada para fornecer ininterruptamente quantidades substanciais de electricidade. Mesmo com um excesso de capacidade solar ou eólica, sempre haverá a necessidade de activar a capacidade de geração de electricidade despachável (fóssil ou nuclear) quando as energias renováveis instáveis não estiverem disponíveis. Por outras palavras, ao nível da rede, a energia solar e eólica nunca poderão fornecer energia sozinhas, sem uma fonte de energia complementar. Os custos impostos incluem a necessidade de manter a energia de carga básica, como carvão ou gás natural ou nuclear em marcha lenta, caso a energia eólica ou solar não produzam energia suficiente para atender à procura e manter as luzes acesas 24 horas por dia, 7 dias por semana. Tais custos são frequentemente ignorados pelos defensores da energia eólica e solar. A energia nuclear é claramente uma melhor opção.

Recentemente a Comissão Europeia propôs considerar temporariamente verdes o gás natural, a energia fóssil menos poluente, ou o nuclear. No seio da União Europeia, a discórdia é notória. Países como a França empurram a ideia de que o nuclear é verde, por causar emissões mínimas de gases com efeitos de estufa. Outros, como a Alemanha, vêem-no como um risco de segurança, uma outra tragédia que deixamos aos nossos descendentes, pela produção de toneladas de resíduos nucleares, alguns dos quais continuarão radioactivos durante dezenas de milhares de anos, senão centenas. E a definição da energia nuclear enquanto verde, ou não, poderá ter impacto no acesso da indústria a fundos europeus significativos, ao longo dos próximos anos.

A fusão nuclear será o passo seguinte tornando a energia nuclear ainda mais amiga do ambiente. Progressos científicos significativos abrem a perspectiva de um futuro próspero e com energia barata, ilimitada e segura. A possibilidade de que a energia que chega às nossas casas possa vir de uma pequena estrela construída na Terra, aprisionada por poderosos campos magnéticos, 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 construção do DEMO é um passo essencial para 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). Entretanto, até que a fusão nuclear se torne uma realidade, o caminho para a descarbonização passa por manter a aposta nas energias renováveis, mas também pela fissão nuclear, que apesar de tantas vezes demonizada, é atualmente umas das soluções viáveis, contribuindo com segurança para a descarbonização e permitindo comprarmos algum tempo.

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 combater a pobreza energética. A par com o investimento público em projectos como o ITER e o DEMO, é bastante positivo que exista actualmente um crescimento significativo das empresas privadas de fusão. As iniciativas privadas em energia de fusão ganharam financiamento e impulso significativos nos últimos 5 anos, e só em 2020 e 2021 oito novas empresas obtiveram financiamento. Um relatório* da Comissão Europeia, do final de 2022, fornece uma visão geral das várias actividades de fusão, tanto públicas quanto privadas, que estão a ocorrer globalmente e, com base nisso, fornece cenários que fornecem previsões sobre como a energia de fusão pode desenvolver-se nas próximas décadas e além. 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.

* https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/83bc3ecd-b19c-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-281356207

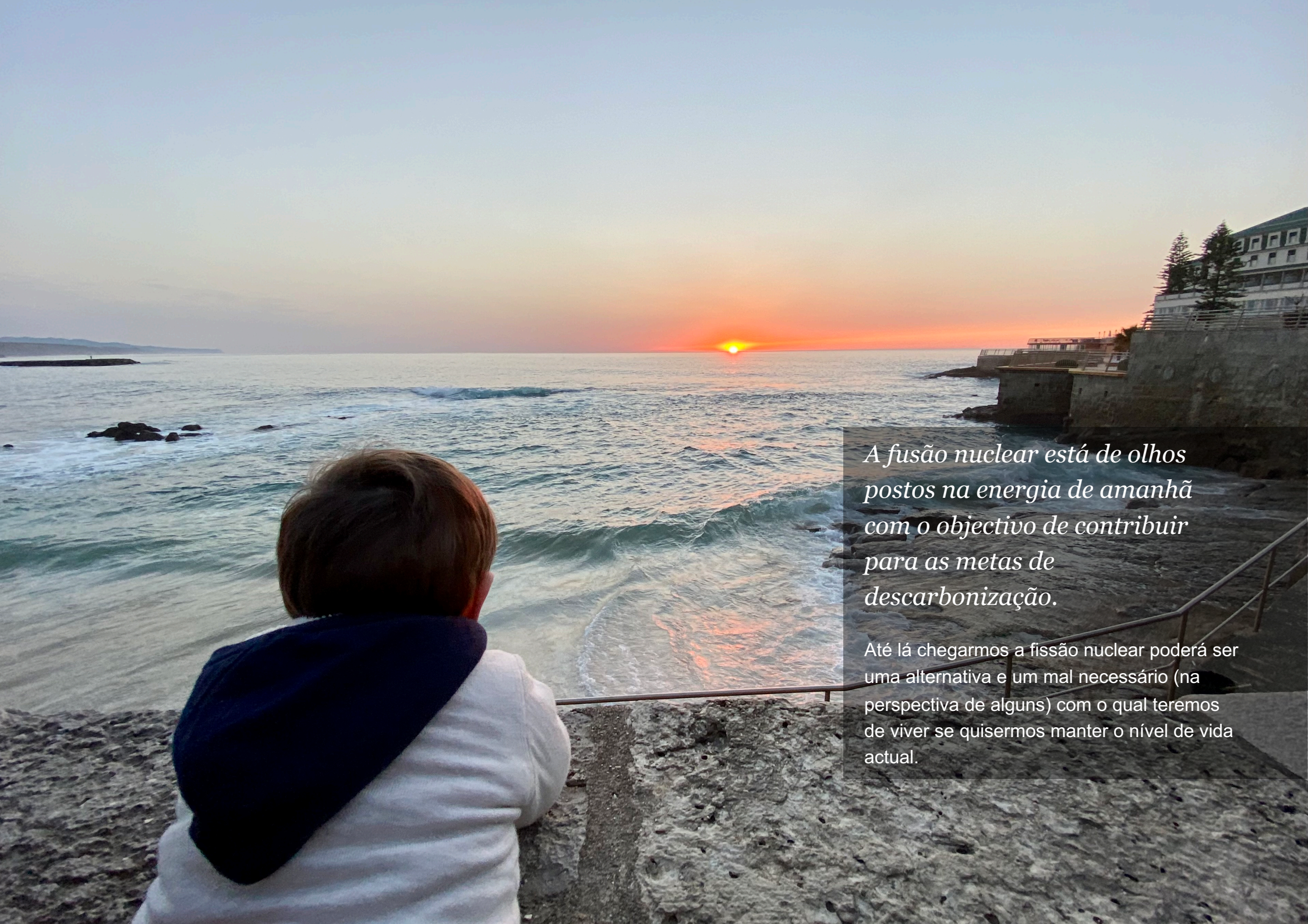
Estes desafios incluem pessoal, integração (construção, engenharia, ciência da fusão) e tecnologias onde mais conhecimento é ainda essencial, como ciclo e reprodução de combustível de trítio, blindagem de neutrões, manutenção remota, controlo do plasma, geração de corrente de plasma e diversor. O DEMO será um projeto inédito (FOAK - "First-Of-A-Kind") e semelhante ao 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.

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 reactores de fusão nuclear, na NIF, no ITER e nas novas máquinas que algumas start-ups estão a desenvolver. Conforme o professor Luís Oliveira e Silva escreveu no seu artigo de opinião no Público*:

"Do ponto de vista científico, estamos a entrar num novo regime único dos plasmas, em que o combustível atinge a ignição tal como nas estrelas, cumprindo o mito de Prometeu, e roubando aos deuses não só o conhecimento, mas também as próprias estrelas."

* https://www.publico.pt/2023/01/15/ciencia/opiniao/micro-estrela-terra-2033530



A fusão nuclear está de olhos postos na energia de amanhã com o objectivo de contribuir para as metas de descarbonização.

Até lá chegarmos a fissão nuclear poderá ser uma alternativa e um mal necessário (na perspectiva de alguns) com o qual teremos de viver se quisermos manter o nível de vida actual.

Contacte-nos

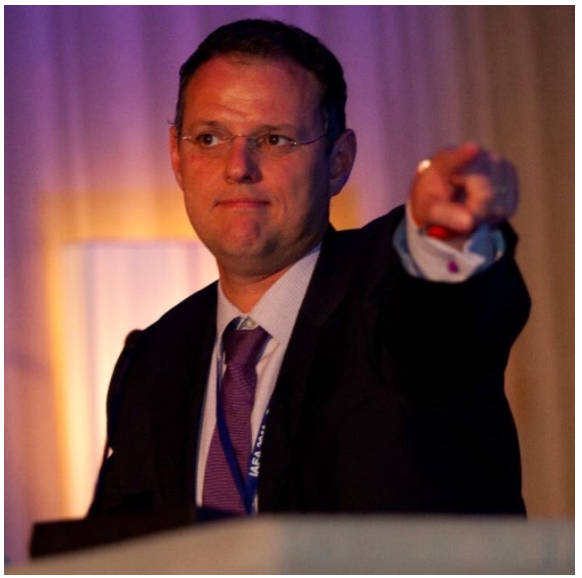
Se quiser contactar o IPFN:

www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt
+351 21 841 7696
ipfn@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Facebook:
IPFNLA

LinkedIn:
ipfn

Se quiser contactar o Bruno:



LinkedIn:
bruno-soares-gonçalves-106819212

bruno@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Bibliografia e Recursos online

Livros e Relatórios

How to Avoid a Climate Disaster, Bill Gates (gratuito para estudantes e professores)

Sustainable energy – without the hot air, David JC MacKay(disponível online: https://www.withouthotair.com)

IEA World Energy Outlook 2020 (disponível online: https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf)

EUROfusion Roadmap: https://www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options, Relatório UNECE: https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf

Dompter le dragon nucléaire ?: Réalités, fantasmes et émotions dans la culture populaire, Alain Michel, Europe des cultures (2013)

BP Statistical Review of World Energy 2022: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf

Nuclear 2.0: Why a Green Future Needs Nuclear Power, Mark Lynas

Meeting Climate Change Targets: The Role of Nuclear Energy, NEA/OCDE (2022), https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_69396/meeting-climate-change-targets-the-role-of-nuclear-energy?

*Recursos online**

Página do ITER: www.iter.org

Pagina da EUROfusion: www.euro-fusion.org

Página do IPFN: www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Electricity map app: https://app.electricitymap.org/zone/PT

Página da USRNC: https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/radwaste.html

Página da IEA: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020

Sobre os custos da construção duma central nuclear: https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx

* disponibilidade verificada em Agosto de 2022

Sobre o autor

Bruno Soares Gonçalves é Presidente do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear do Instituto Superior Técnico desde Maio de 2012 e Investigador Coordenador do Instituto Superior Técnico

Trabalha em fusão nuclear desde 1996, tendo passado 3 anos no CIEMAT em Madrid durante o seu doutoramento e, posteriormente, 4 anos no JET como membro da “Close Support Unit. Esteve envolvido e liderou vários projectos de desenvolvimento de diagnósticos para dispositivos de fusão, de sistemas de controlo e aquisição de dados e em análise de dados de fenómenos de turbulência na periferia do plasma.

Desde 2007 que participa activamente em actividades de divulgação, para alunos do secundário, para alunos e professores universitários e para o público em geral, sobre energia, sobre o nuclear e sobre a fusão nuclear.

