



Fusão Nuclear

na era das alterações
climáticas

Bruno Soares Gonçalves

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:
1.11, 13 de Maio 2022

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 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 a imagem e as acções correctivas serão tomadas imediatamente.

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*

*Ao Luís Guimarães 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

1

2

3

4

Motivação

Energia e Alterações Climáticas

Energia Nuclear

Fusão Nuclear por Confinamento Magnético

Ideias a Reter

- + *Prólogo*
- + *Introdução*

- + *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*

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

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

- + *Ideias a reter da leitura do livro*

Dos plasmas à fusão nuclear

Obter a energia das estrelas

Prof. Dr. João Gonçalves



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 crítica 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 prof^a 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. Quanto 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 crítica 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

(CO₂) 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

7 900 000 000

de seres humanos habitam
o nosso planeta

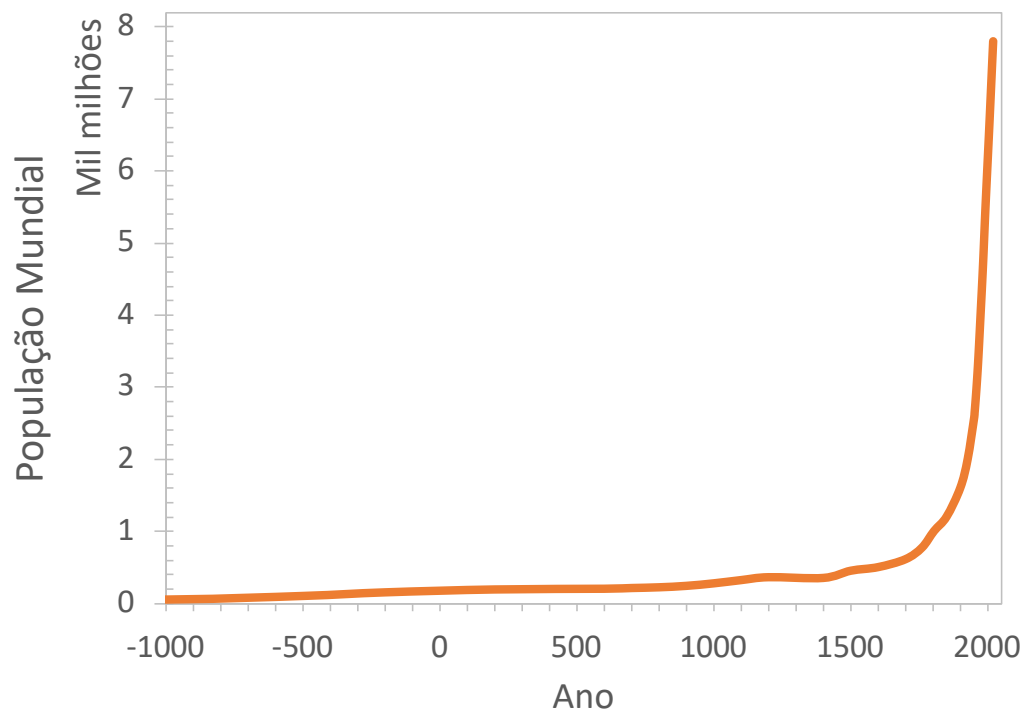


Fontes de energia seguras e sustentáveis são essenciais para manter um nível de vida adequado para a população mundial

A população mundial mais do que duplicou nos últimos 40 anos para o valor actual de 7900 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.

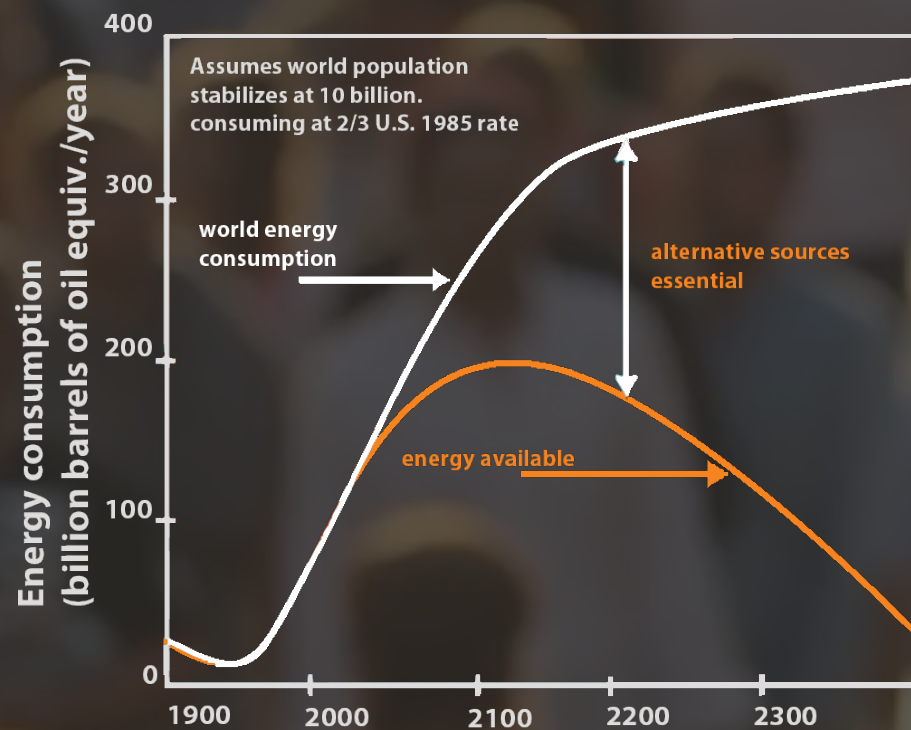
As possíveis poupanças em energia no mundo industrializado serão fortemente ultrapassadas pelas necessidades crescentes do mundo em vias de desenvolvimento: diversos cenários apontam para pelo menos o dobro, eventualmente o triplo, no crescimento da procura energética durante o este século.

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.

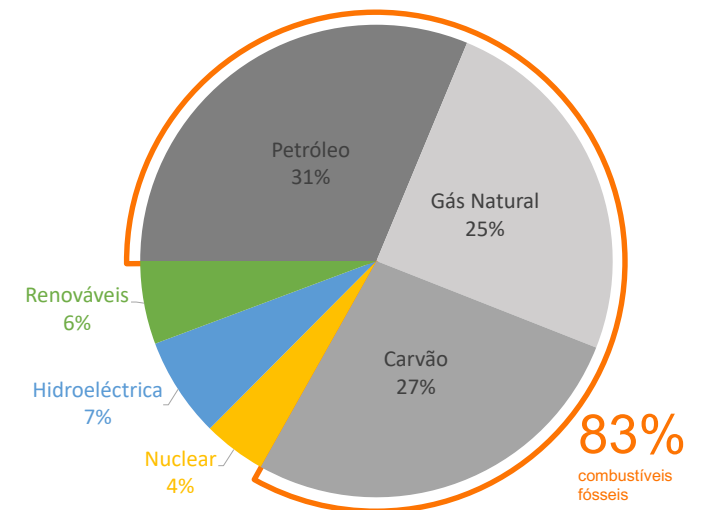
Com as opções actualmente existentes no portfolio energético é difícil fazer face à procura duma forma economicamente

sustentável e ambientalmente amigável. Os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) continuam a ser o principal contribuidor 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.

80% 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.



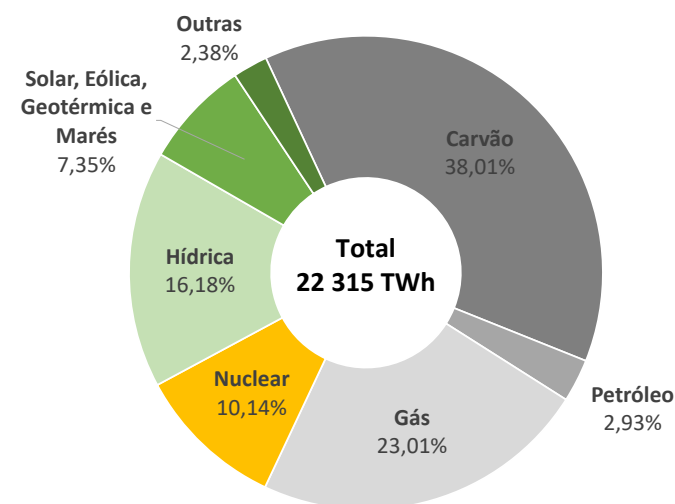
Fontes de produção de energia primária em 2020 (Fonte: BP Statistical Review of World Energy 2021)

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 climáticas, 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



64% da electricidade provém da queima de combustíveis fósseis (Fonte: IEA Electricity Information 2019)



o consumo mundial de carvão não tem diminuído apesar das metas de descarbonização. As emissões de CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ relacionadas com a produção de energia cresceram para um valor recorde de 36,3 Gt em 2021.

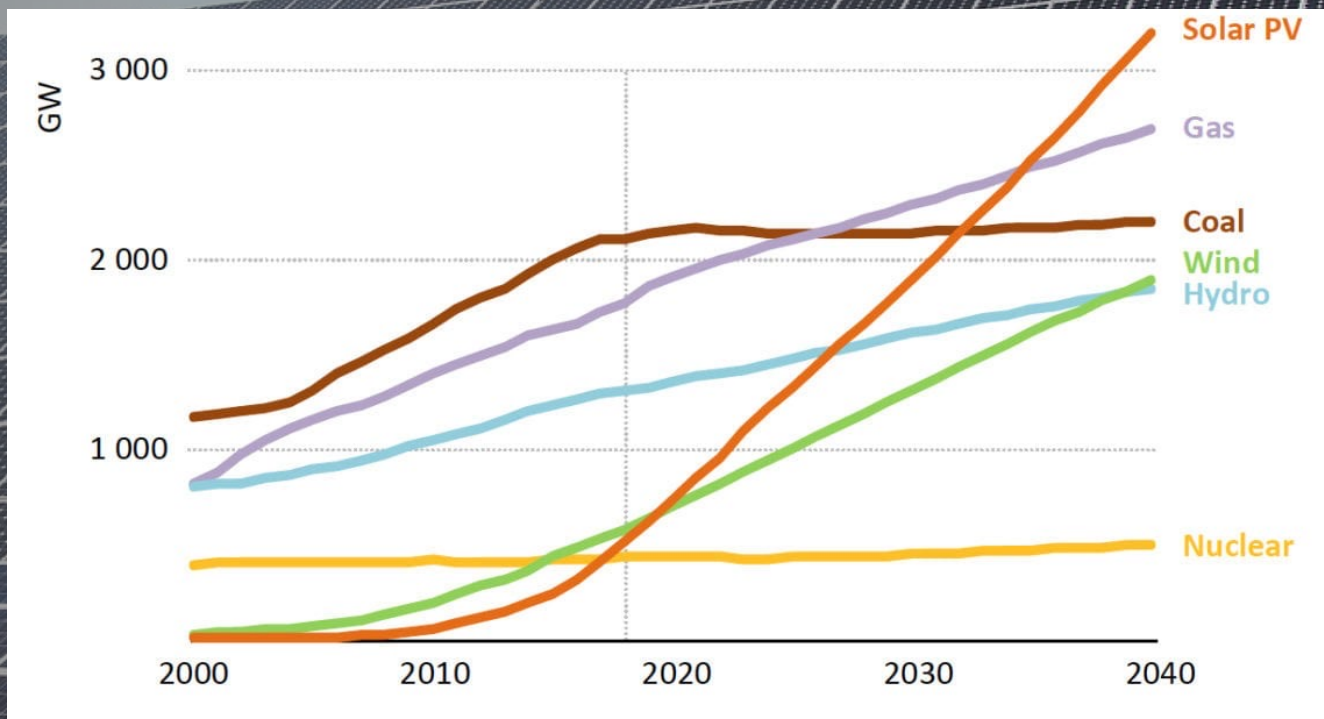
As emissões globais de CO₂ resultantes da produção de energia e processos industriais recuperaram em 2021 para atingir seu nível anual mais alto de todos os tempos. Um aumento de 6% em relação a 2020 elevou as emissões para 36,3 gigatoneladas (Gt), uma estimativa baseada na análise detalhada da IEA, com base nos dados nacionais oficiais mais recentes. O carvão foi responsável por mais de 40% do crescimento geral das emissões globais de CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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.



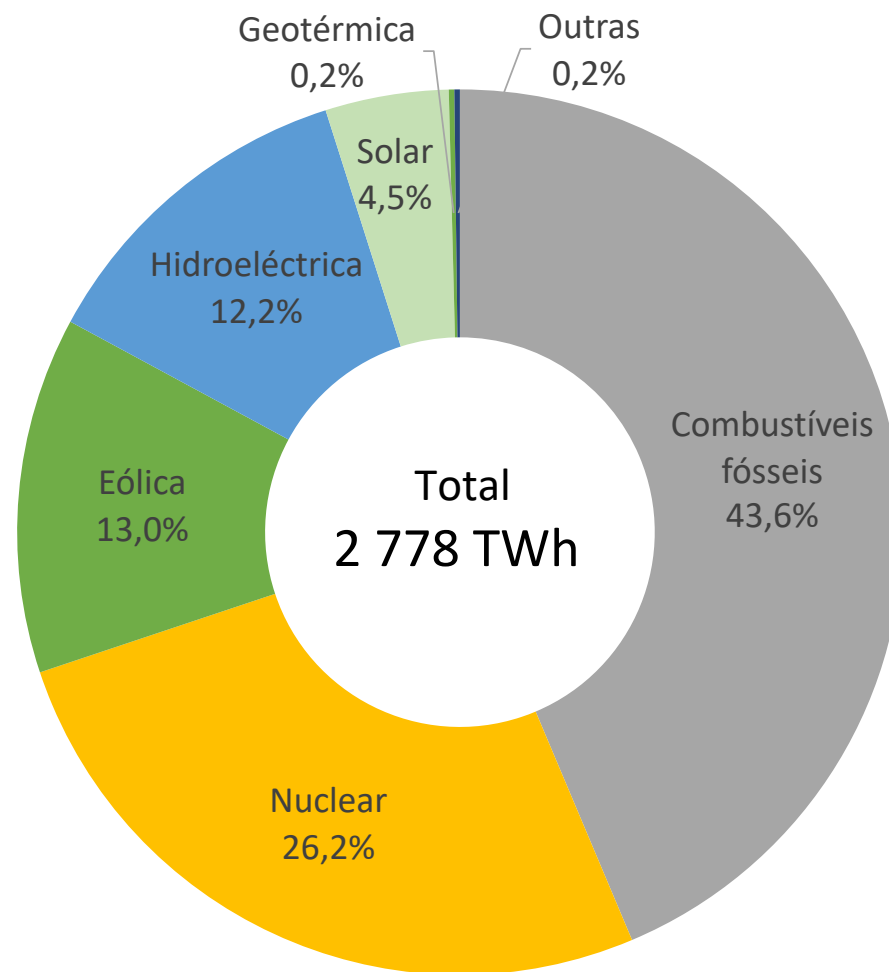
De acordo com as estimativas da IEA, em 2040 as renováveis serão responsáveis por quase metade da produção de electricidade. No entanto não é esperada uma diminuição no consumo de carvão (fonte: IEA World Energy Outlook 2019; Foto: Central fotovoltaica de Vale de Moura|)

Produção de electricidade na União Europeia

A geração líquida total de electricidade na UE foi de 2 778 TWh em 2019. Mais de metade (56,4%) da electricidade líquida gerada na UE em 2019 veio de fontes primárias não combustíveis. Menos da metade (43,6%) veio de combustíveis (como gás natural, carvão e petróleo). Entre as fontes de energia renováveis a maior parcela da geração líquida de electricidade em 2019 foi de turbinas eólicas (13,0%), seguidas por hidroeléctricas (12,2%) e energia solar (4,5%).

A energia nuclear gerou quase um quarto da electricidade total produzida na Europa em 2020.

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

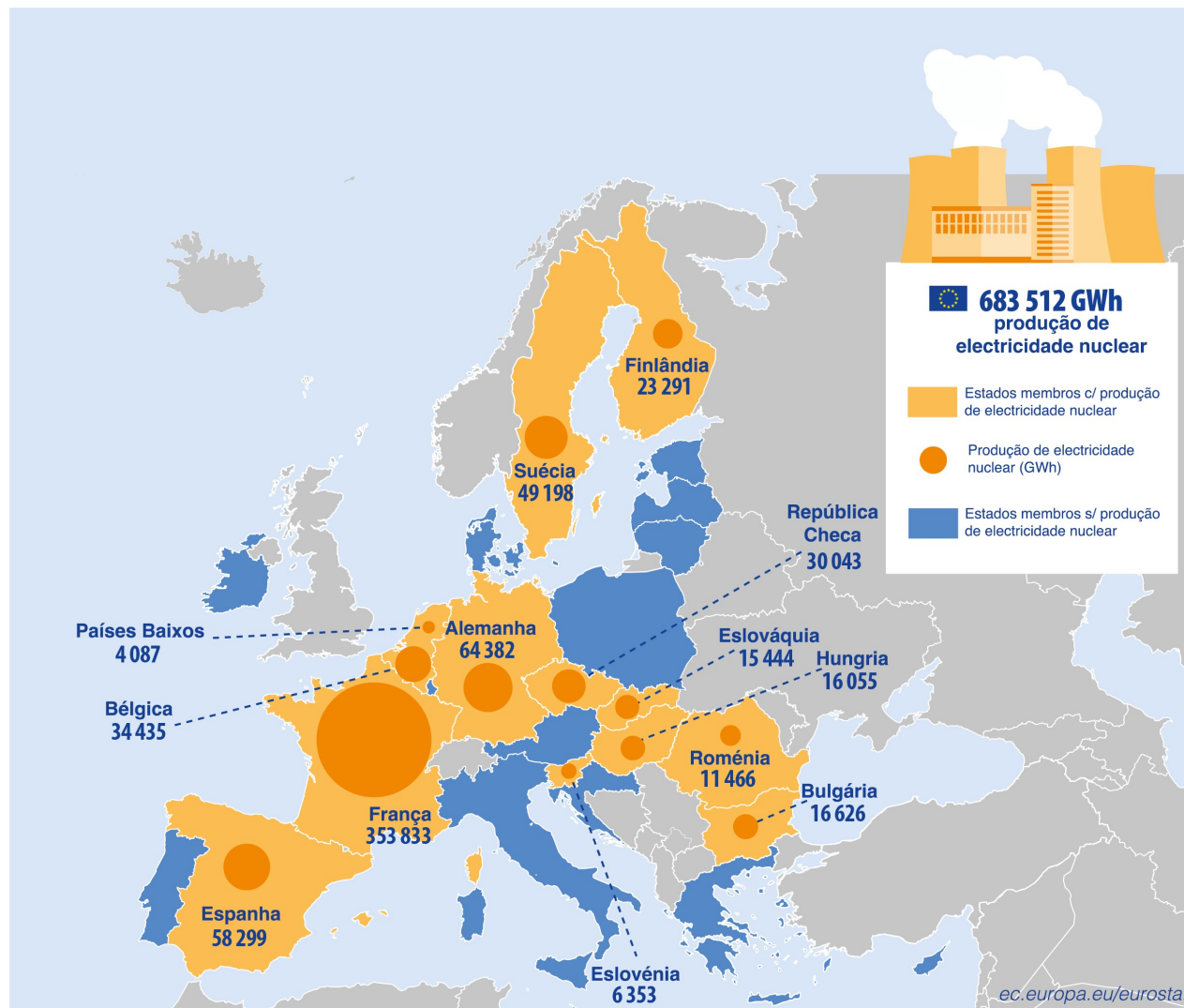


26,2% da electricidade produzida na União Europeia em 2019 proveio de energia nuclear (Fonte: Eurostat)

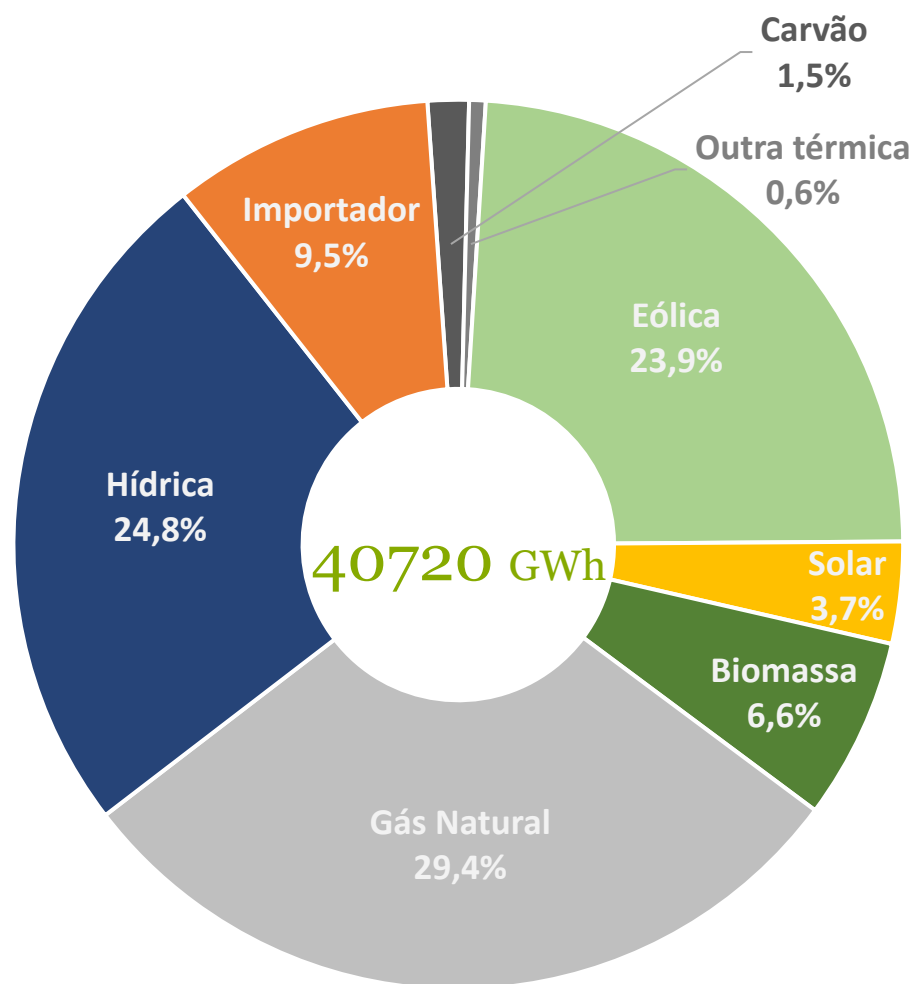
recentemente, em 2022, permitiu a classificação de algumas centrais nucleares como investimentos verdes sob a Taxonomia da UE para investimentos verdes.

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 2021



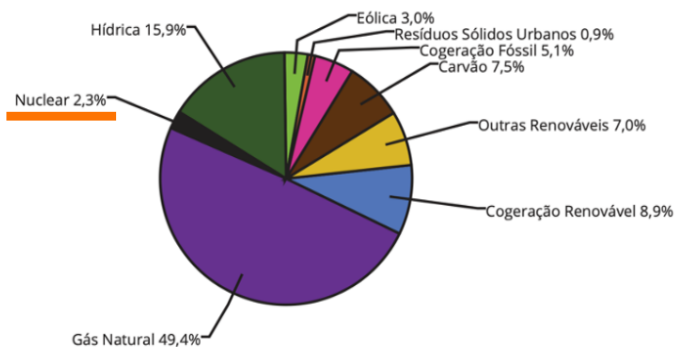
Distribuição por fontes de energia da produção eléctrica em Portugal no ano de 2021 (Fonte: ren.pt)

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 2022 o consumo de energia eléctrica em Portugal subiu 9,4% em março, face ao período homólogo. A produção renovável abasteceu 57% do consumo, a não renovável 30%, enquanto os restantes 13% corresponderam a energia importada.

Fontes de Energia

Conheça a origem da nossa eletricidade no 3º trimestre de 2021:



Para mais informações sobre a origem da sua energia consulte suelectricidade.pt ou erse.pt

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 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,

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

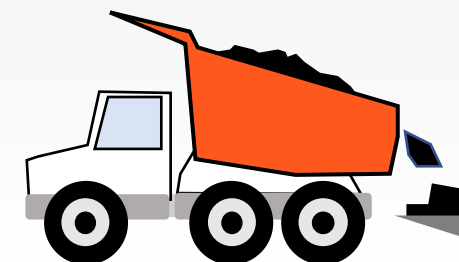
A produção de energia eléctrica, a partir de combustíveis fósseis (carvão, petróleo ou gás natural), obtém-se através da sua queima. Antes de serem queimados, os combustíveis sofrem algumas transformações para aumentar a sua rentabilidade: o carvão é esmagado num pó fino; o petróleo sofre processos de 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 538°C), 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 electroímãs 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 termoeléctricas 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 (CO₂) é um problema?

O CO₂ 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 CO₂ produzidas pelo homem vêm da queima de combustíveis fósseis, para uso na geração de energia e transporte. O CO₂ 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 CO₂ 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 (CH₄): 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 (N₂O): 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 (SF₆) e trifluoreto de nitrogênio (NF₃) têm um potencial de retenção de calor milhares de vezes maior que o CO₂ 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 (O₃). 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ são mais altos do nos últimos 3 milhões de anos. E embora eles ainda representem apenas

0,04% da atmosfera, isso ainda soma bilhões e bilhões 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 CO₂, eventualmente, em vários milhares de anos ou mais.

Infelizmente, não temos milhares de anos para esperar que a natureza absorva a inundação de CO₂. Precisamos de pôr em marcha uma combinação de descarbonização das formas de produzir energia, extração de CO₂ da atmosfera e desenvolvimento de formas mais sustentáveis de prosperar.



Milagres energéticos precisam-se!

Em novembro de 2021, a COP26 em Glasgow (Escócia) terminou com a adoção 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 °C. No entanto, as estimativas sugerem que, mesmo que os compromissos sejam cumpridos, o mundo encaminha-se para um aquecimento de 2.4°C. 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

atuais, 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.

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

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 das emissões de carbono, colocando um preço elevado na sua emissão. Os milagres energéticos atuais 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 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.

O caminho da descarbonização

Anualmente produzimos 51 bilhões 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 representam 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 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. Quanto 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.

“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 actual de emissões de 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 CO₂ entre 2020 e meados do século sejam limitadas a um “orçamento de carbono” de 500 Gt CO₂. Outros GEEs importantes, incluindo N₂O, 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 (N₂O) 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 CO₂ entre agora e 2050 provavelmente excederão o orçamento de 1.5°C em cerca de 70 Gt CO₂.

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)

Inovar para zero requer investimento em Investigação e Desenvolvimento

Descarbonizar a sociedade é extremamente complicado. Infelizmente, os combustíveis fósseis são extremamente convenientes. São práticos 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 política 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 - FOTOVOLTAICA



SOLAR - TÉRMICA

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 eléctrica 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 eléctrica.

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



Central solar de Alcútin

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 eléctrica 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 eléctrica 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 eléctrica 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 eléctrica, 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 noturno 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 Andalucía (Espanha), pode 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 requer produtos químicos tóxicos, como ácido

sulfúrico, ácido clorídrico, etc. 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
- 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.

- 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.
- A produção de painéis solares ainda tem um problema de escala embora tenha havido um aumento significativo na produção nos últimos anos
- 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.
- 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, antimônio 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.



A instalação de sistema fotovoltaicos sobre água permite a utilização de grandes áreas planas disponíveis. Além disso evitam a competição com campos agrícolas, permitindo a instalação a grande escala de sistemas de produção de electricidade com base em energias renováveis.

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.

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 a manufactura de aço e cimento, ou apresentando soluções para os transportes individuais e de mercadorias. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 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 CO₂. 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 electrólise. Este processo não emite CO₂ 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 electrólise, 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 electrólise aumente de escala. Hoje em dia é necessário mais de 50 kWh para produzir 1 kg de Hidrogénio por electrólise. O custo actual, em alguns projectos no norte da Europa ronda 2€/kg. É 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 com o uma opção para produção 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 electrólise 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 electrólise 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 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,

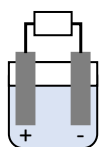
incluindo pirólise, fotólise, e processos a alta temperatura em centrais nucleares.

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



Solar / Eólica



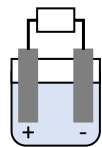
Electrólise



Hidrogénio verde



Nuclear



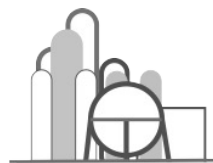
Electrólise



Hidrogénio rosa



Gás



Reformação de metano com vapor de água



Hidrogénio azul



Gás



Reformação de metano com vapor de água



Hidrogénio cinzento



Carvão



Gaseificação



Hidrogénio castanho

Os caminhos para a produção do Hidrogénio

O Hidrogénio rosa

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.

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.

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. Embora o Hidrogénio possa ser livre de carbono 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.

Quando?

Realisticamente ainda estamos a uma década do Hidrogénio começar a dar uma contribuição significativa pra a descarbonização. A capacidade instalada actual é da ordem do 97 MW com um investimento de 365 milhões de dólares, embora haja vários projectos previstos que podem aumentar rapidamente a capacidade

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 extração. A injeção 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



um trilhão 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 milênios. 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 CO₂ 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 CO₂.

Métodos avançados de geração de energia a partir do carvão também podem oferecer oportunidades para a captura de CO₂. 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 definiu 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 CO₂ 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)

A importância dos minerais críticos na transição energética

Um sistema de energia alimentado por tecnologias de energia limpa difere profundamente de um alimentado por recursos tradicionais de hidrocarbonetos. 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 sua 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

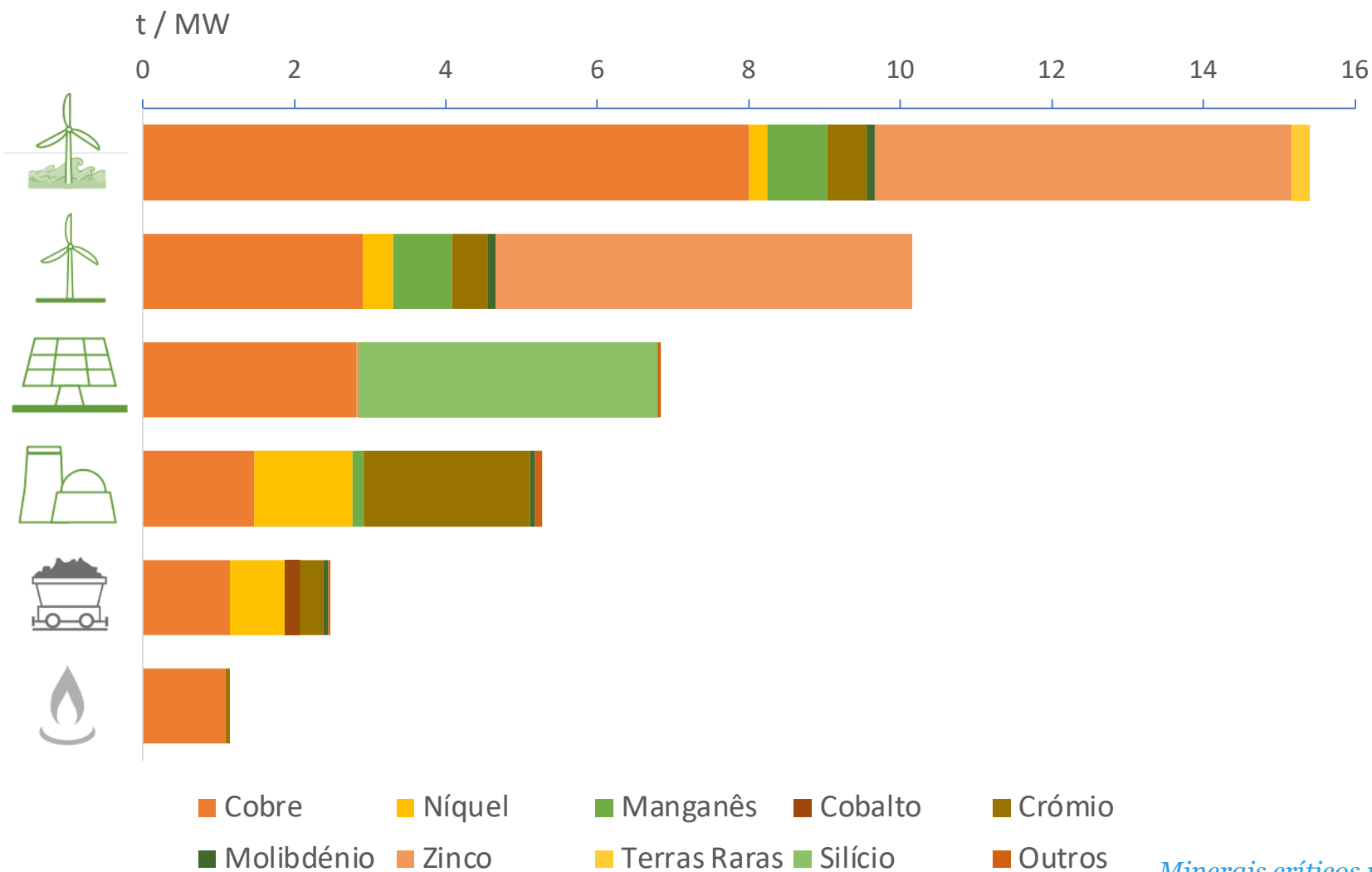
energia renovável aumentarão a procura por minerais cerca de sete vezes até 2050. Os tipos de recursos minerais utilizados variam de acordo com a tecnologia. Elementos de terras raras são essenciais para ímãs permanentes que são vitais para turbinas eólicas e o cobre é a pedra angular de todas as tecnologias 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. 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, a verdadeira 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 ambientais menores. Estes materiais também podem ser menos intensivos no carbono gerado com a extracção e processamento

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

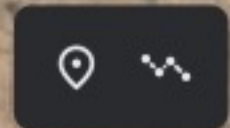


Minerais críticos necessários para diferentes tecnologias de geração de electricidade em t/MW (créditos: IEA, relatório “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions”, 2021)

Minas a céu aberto

Bacias de rejeitados

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)



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 dada tecnologia. A exploração destes minerais críticos tem um enorme impacto ambiental, 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 compostos químicos usados nos processos de extração 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 frequentemente 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 significativos 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.

A contribuição da fissão nuclear

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.

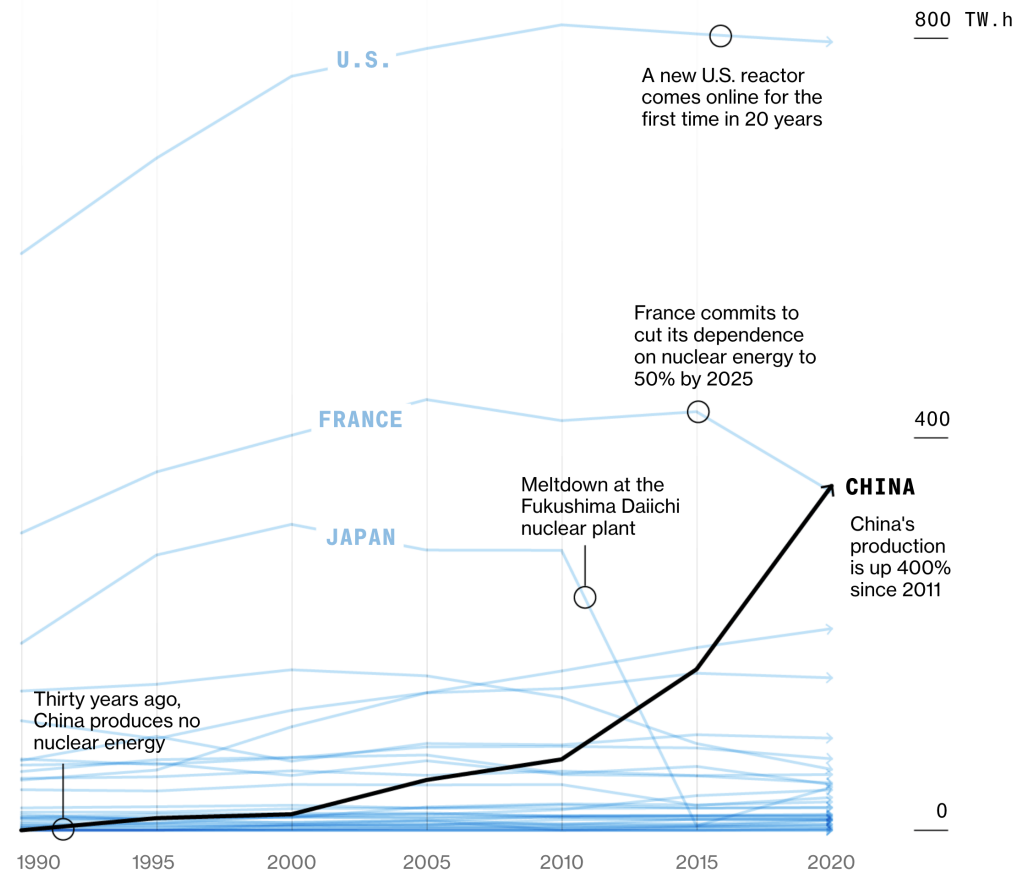
Após a crise petrolífera de 1973, a França põe em ação o plano Messmer. A França, pobre em recursos naturais no que toca a

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 CO₂. 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 China aumentou 400% a produção de energia nuclear desde 2011 estando prevista a construção de 150 novos reactores até 2035.

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 atualmente 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 extremamente 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 — os reactores necessitam de água para o seu arrefecimento que 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 conclui que a energia nuclear produz menos emissões de CO₂, 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 CO₂/kWh gerado.

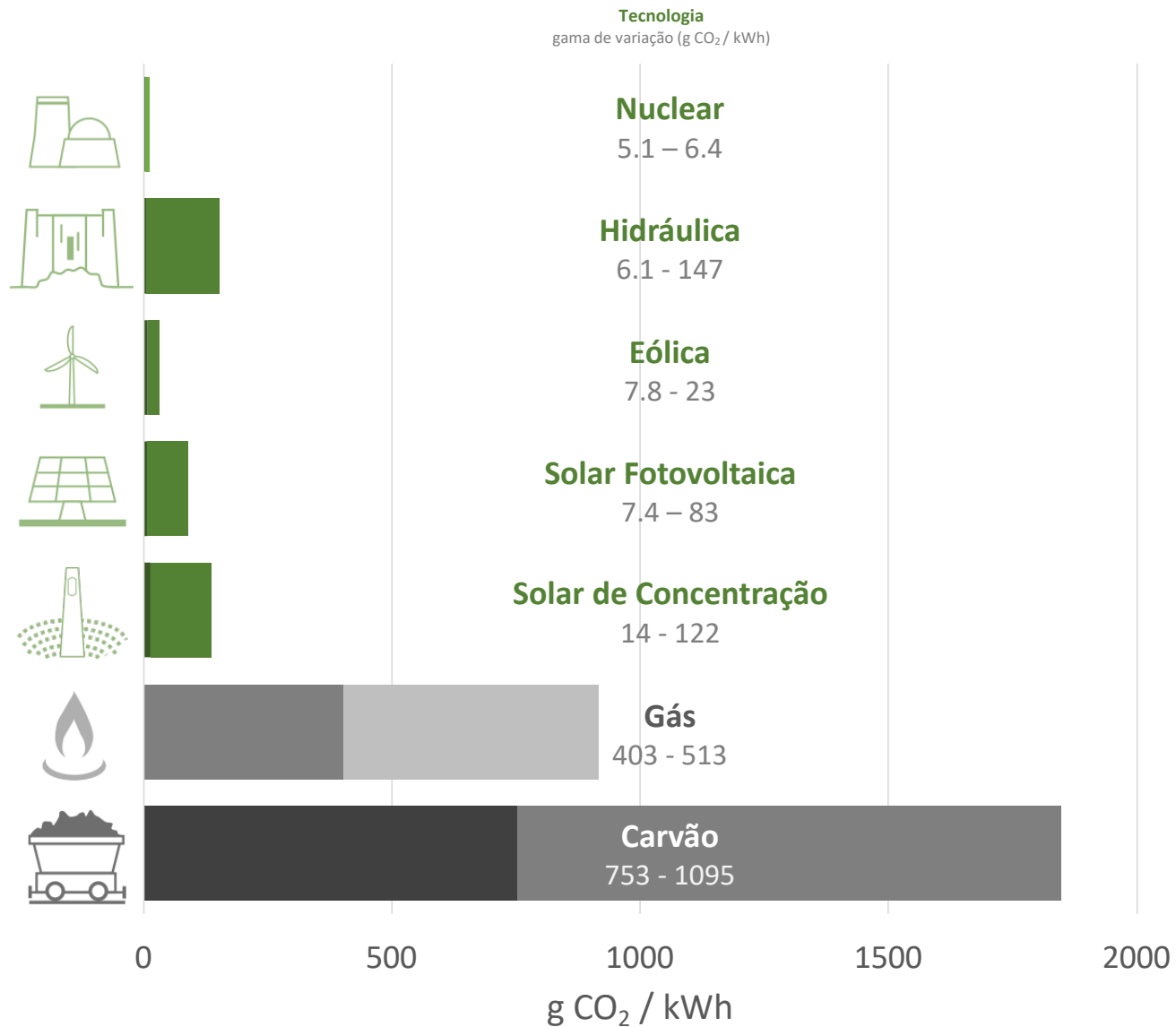
Tanto a energia nuclear como as renováveis não emitem gases de efeito de estufa no seu processo de produção de electricidade, mas cada uma das formas de produzir electricidade tem uma pegada carbónica

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 carbono (Gt CO₂) 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%

Emissão de CO₂ 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)



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 CO₂, 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

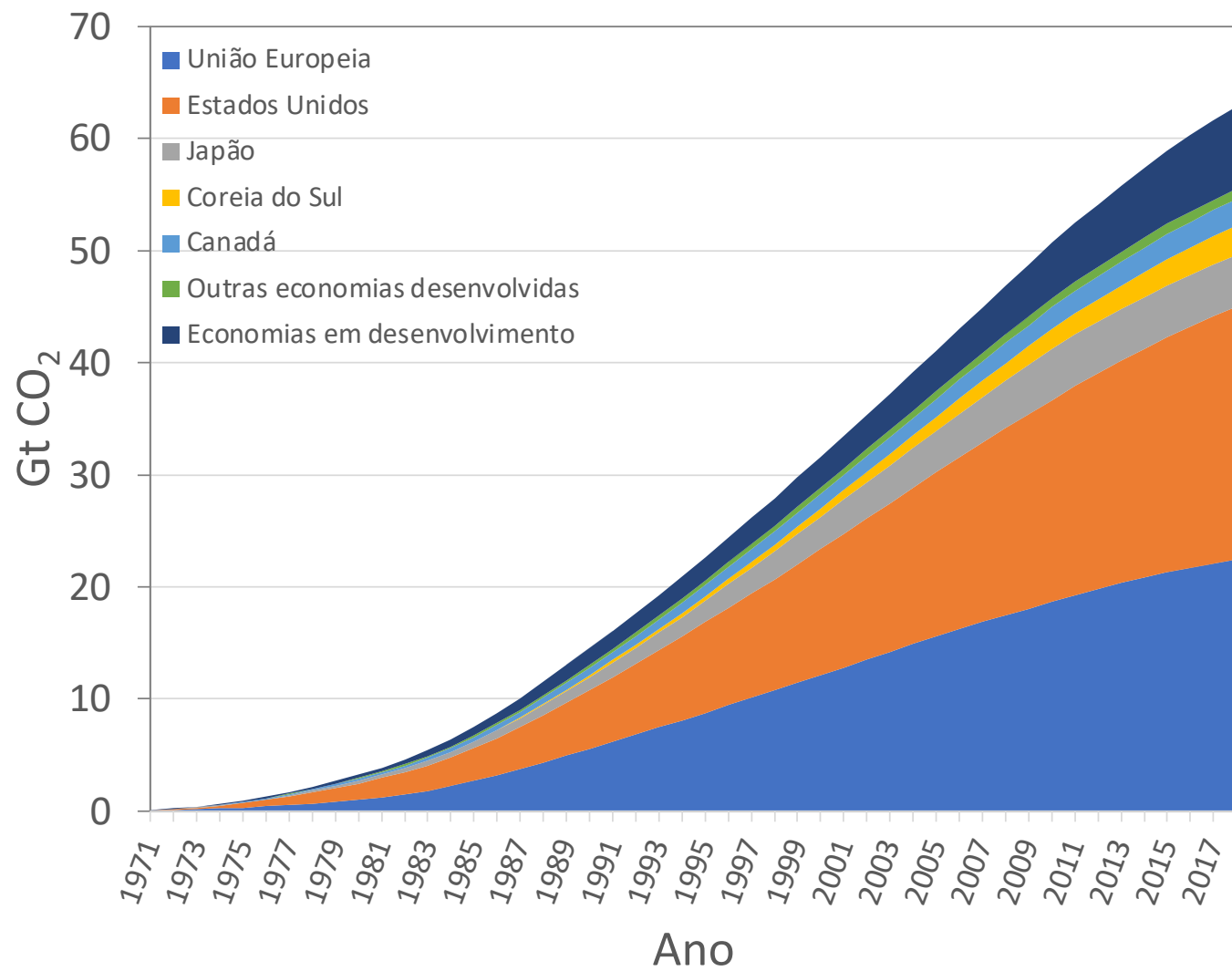
electricidade de base, para o qual a fusão nuclear uma das candidatas. Para tal é necessário conseguir vencer a opinião pública e convencer os decisores políticos que as novas soluções são seguras. Chernobyl, na Ucrânia, e Fukushima, no Japão, são marcos incontornáveis da história da humanidade. Como 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 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

*Emissões cumulativas de CO₂ evitadas pela energia nuclear global no período 1971-2018
(Créditos: IEA, “Nuclear Power in a Clean Energy System”)*



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.

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 a 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.

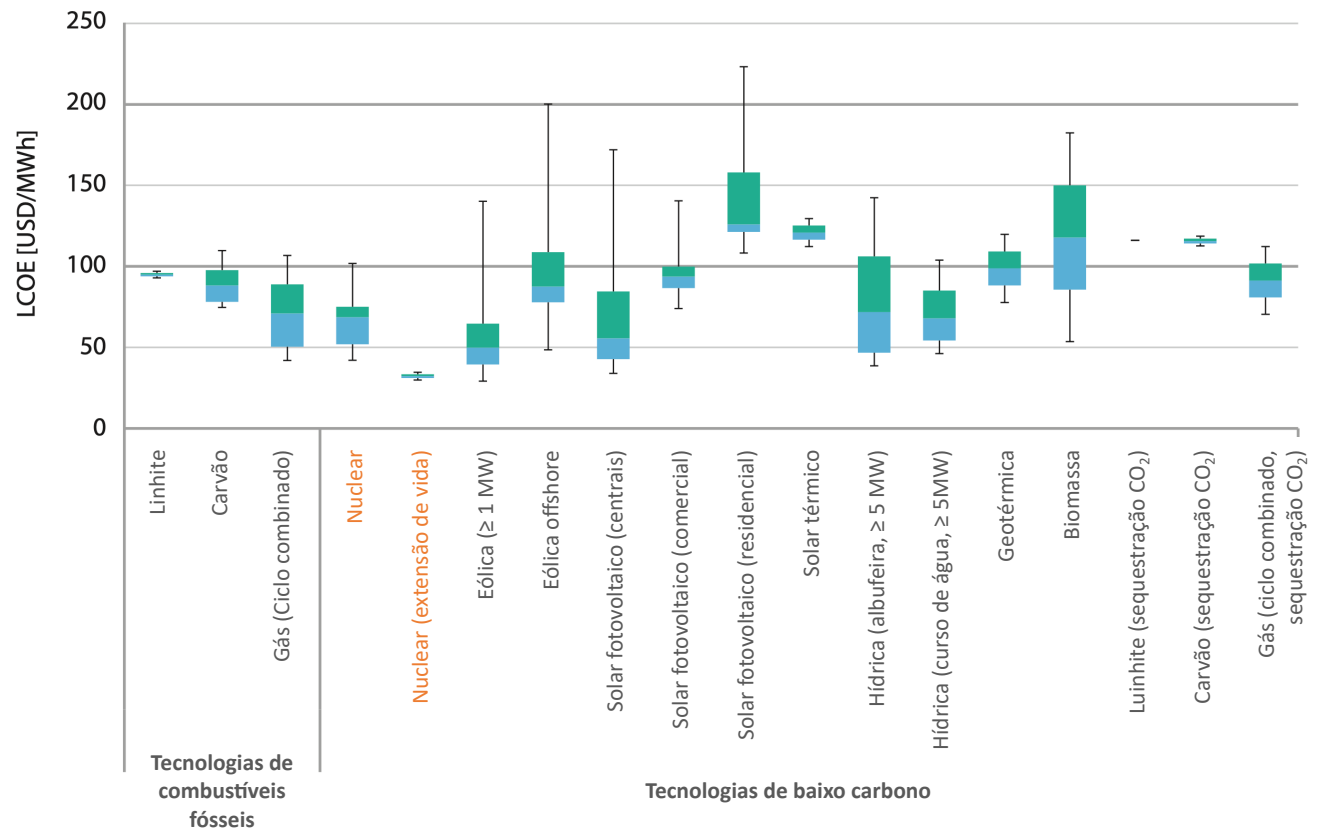
Em muitos lugares, a energia nuclear é competitiva com os combustíveis fósseis como meio de geração de electricidade. Os custos de eliminação de resíduos e desmantelamento são normalmente incluídos na totalidade nos custos operacionais. Se os custos sociais, sanitários e ambientais dos combustíveis fósseis 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.

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 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)



O mito da 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. A realidade é que 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.

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 hidroelétrica 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. Um 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

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 construir uma visão crítica.



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.

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 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.

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.

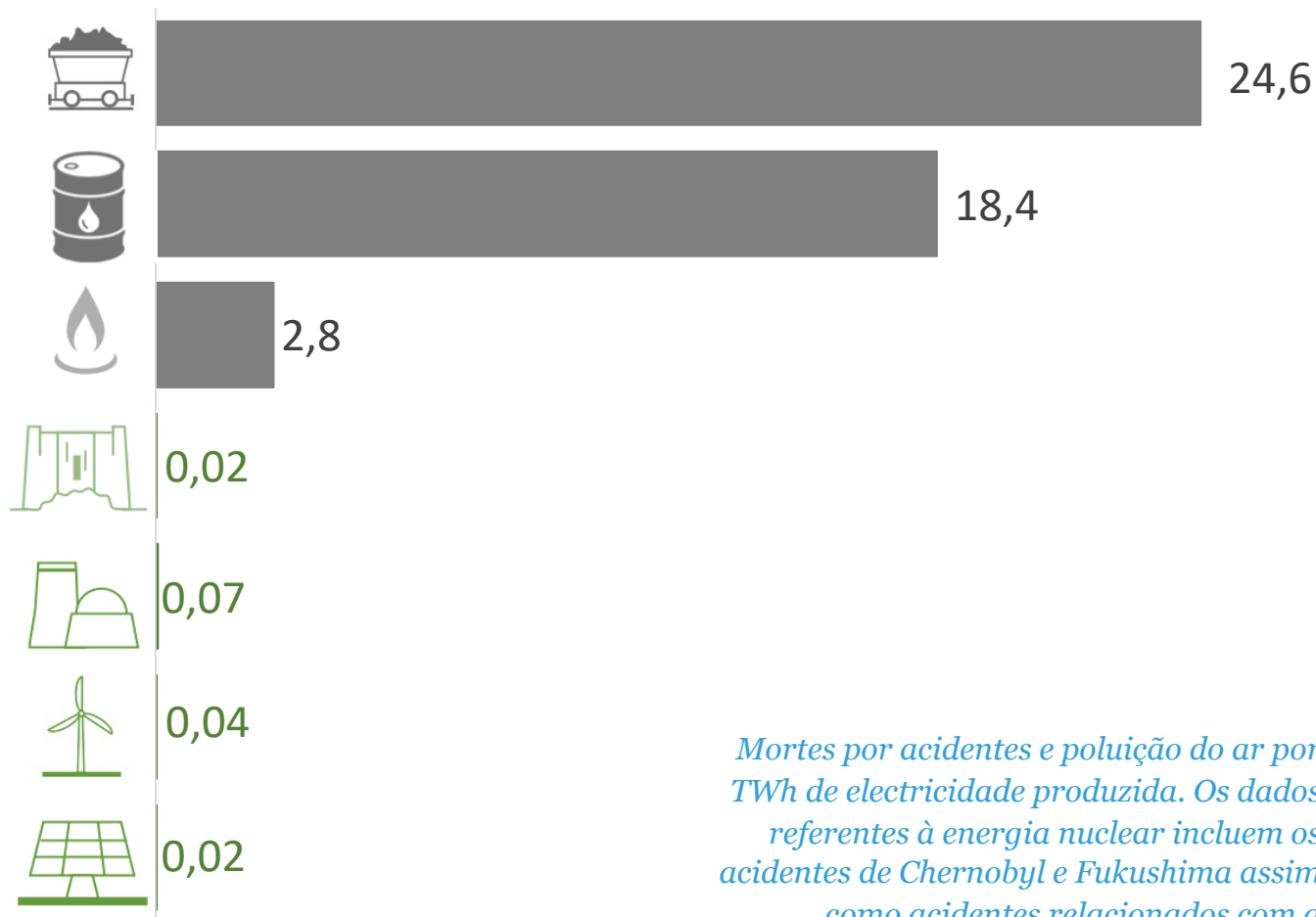
A pergunta correcta a fazer é “Quantas vidas a energia nuclear salvou?”, ou “Quantas vidas poderiam ter sido salvas se os países não a tivessem abandonado?”. Após o desastre nuclear de Fukushima em 2011, a Alemanha anunciou planos para eliminar gradualmente a geração de energia nuclear: no período de 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 contrário.

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 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.

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.

Mortes por acidentes e poluição do ar / TWh



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>)

* 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.

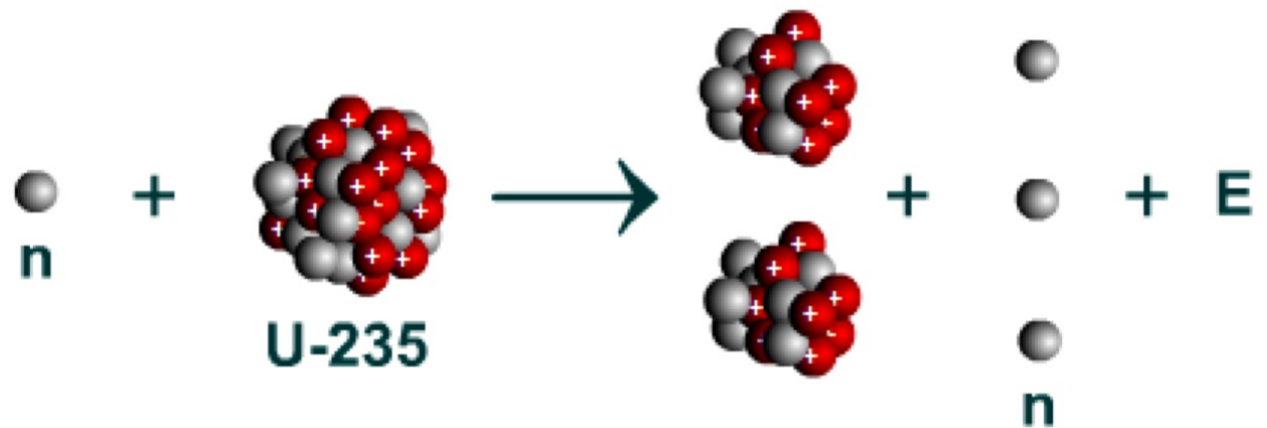
Energia Nuclear

2

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.

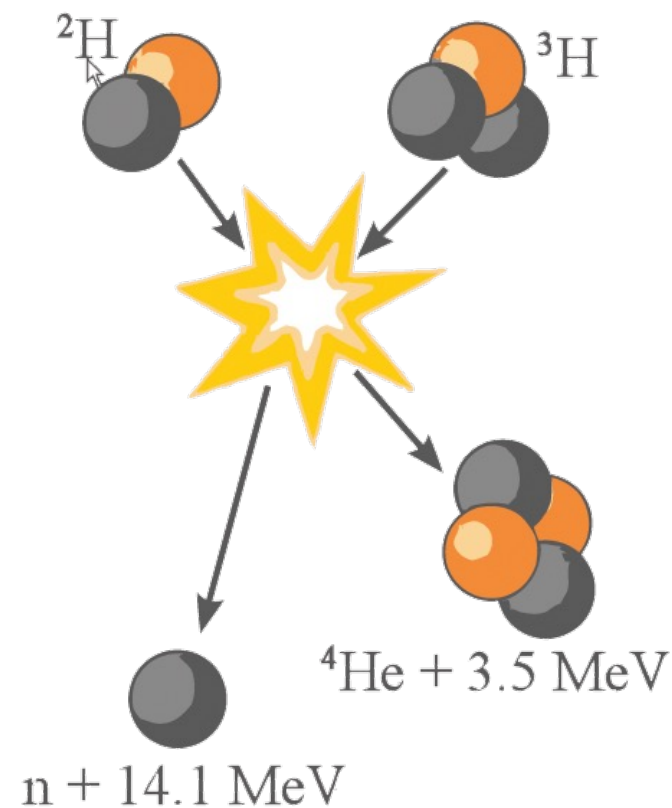
Na fissão (ou cisão) nuclear, que ocorre nas centrais nucleares espalhadas pelo planeta, um núcleo pesado, como o Urânio, é convertido em dois elementos mais leves, libertando energia. No núcleo de cada átomo de Urânio-235 (U-235) existem 92 prótons e 143 neutrões. O arranjo das partículas dentro do 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 reacção 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.



A Fissão Nuclear consiste na desagregação de átomos de um elemento pesado

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 das 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.



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 dos seus 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 m³ de gás natural.

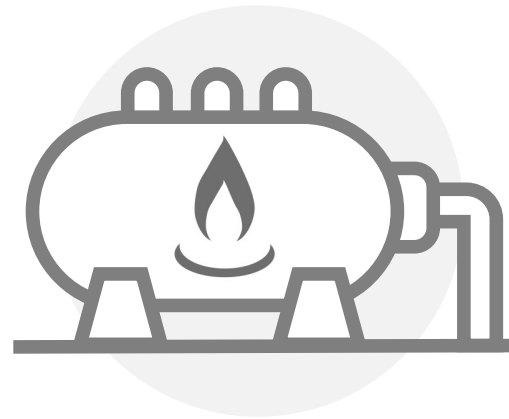
Um pedaço de urânio do tamanho de uma bola de golfe, pesando apenas 780 gramas, pode fornecer energia suficiente para cobrir todas as necessidades de um ser humano ao longo da sua vida, incluindo electricidade, locomoção automóvel, viagens de avião, alimentos e produtos manufacturados, num total de 6,4 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 radioactivos 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)

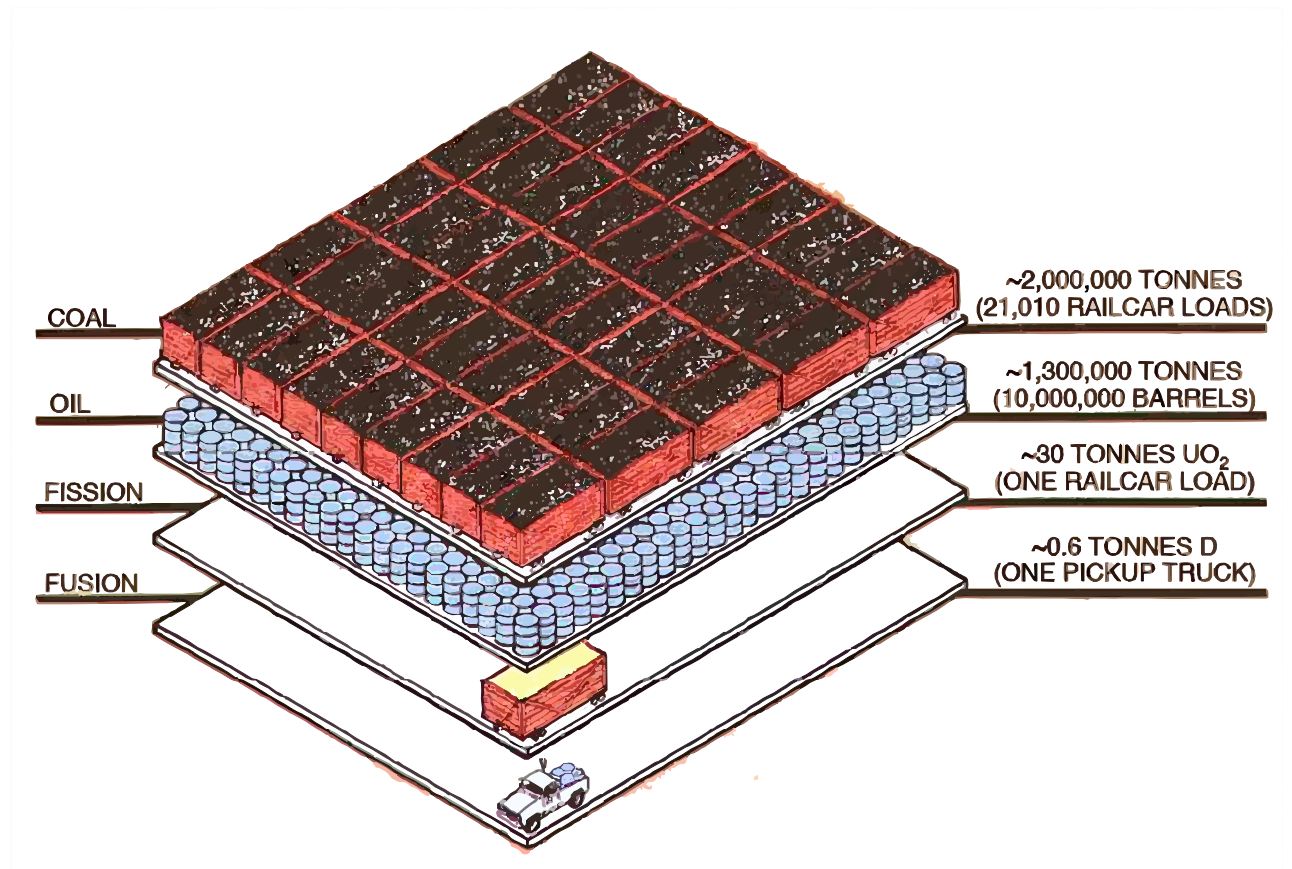
Densidade de energia na fusão nuclear

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.

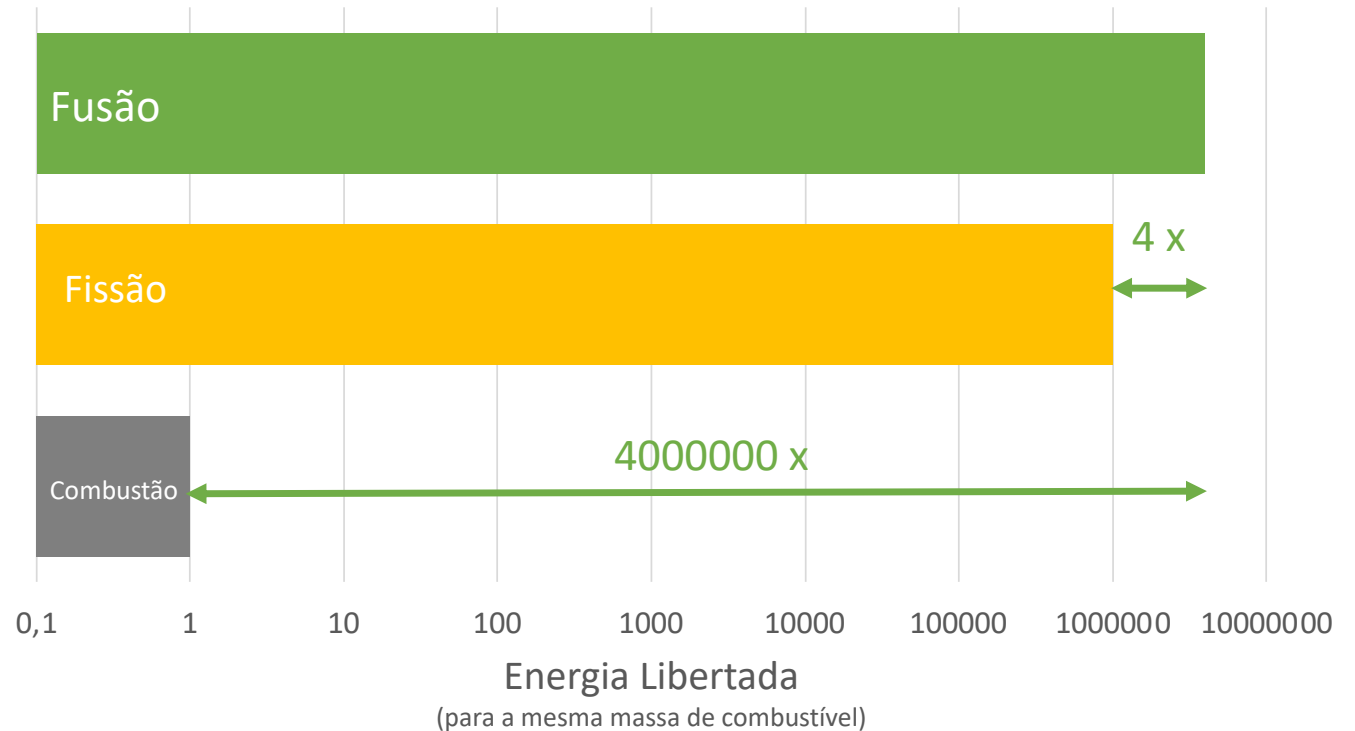
A Fusão Nuclear, comparativamente, permite gerar quase quatro milhões de vezes mais energia do que a que é produzida na queima de carvão, petróleo ou gás.

A fusão tem um enorme potencial como fonte de energia de baixas emissões de carbono. A

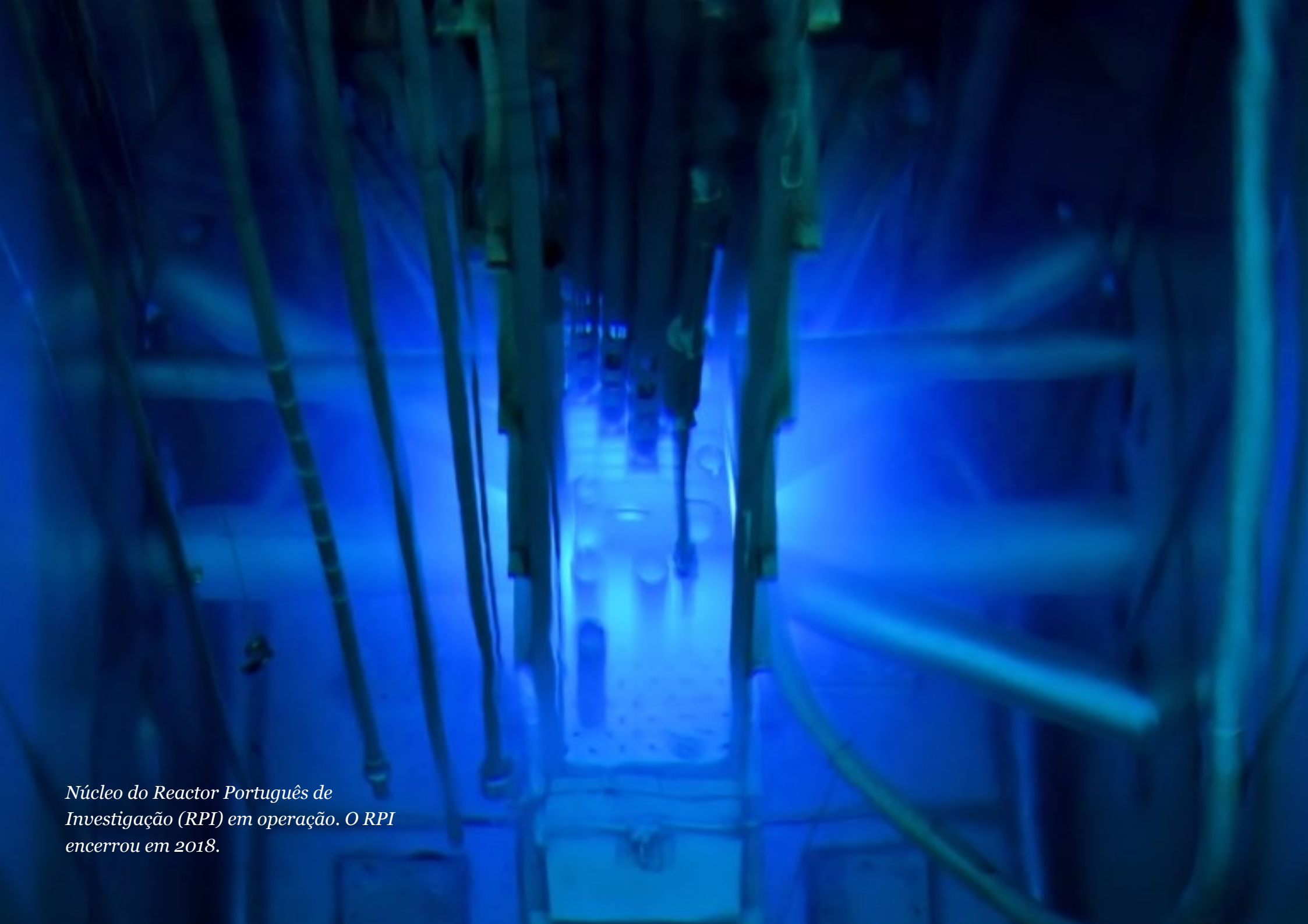


Eficiência das reacções nucleares. Combustível necessário para alimentar uma central de 1 GW durante um ano

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.



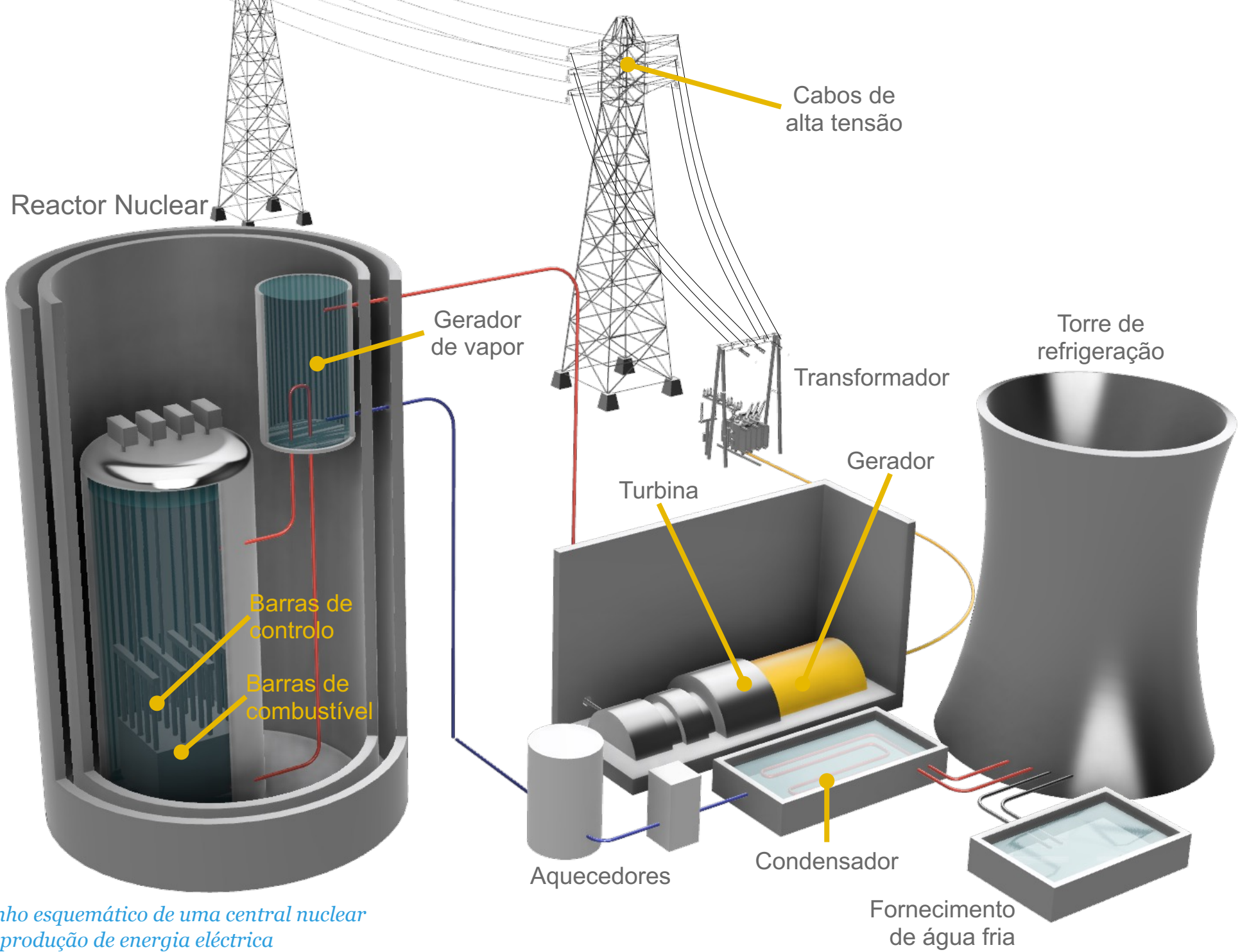
A reacção de fusão nuclear liberta 4000000 vezes mais energia que a queima de combustíveis fósseis



*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 fissão 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

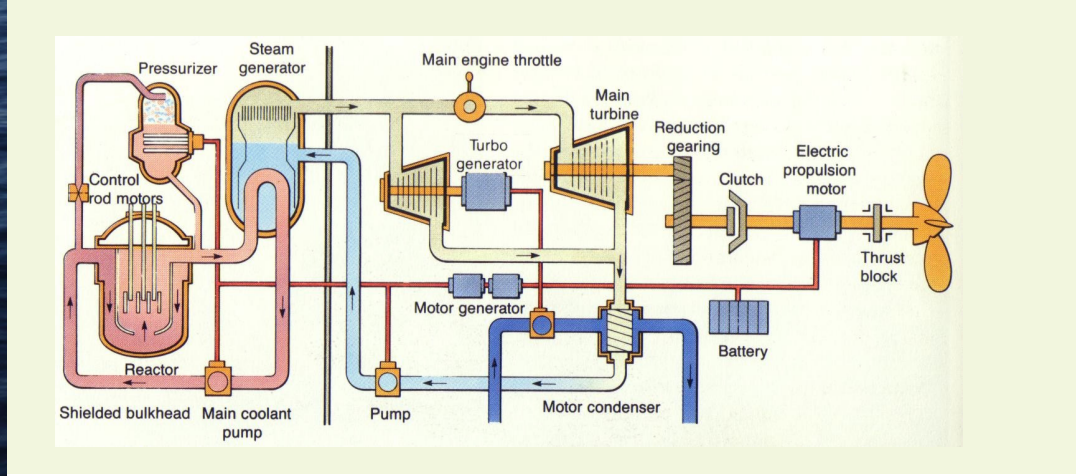
moderador ajuda a desacelerar os neutrões produzidos pela fissão para sustentar a reacção em cadeia. A reacção em cadeia é controlada através de barras moderadoras que absorvem os neutrões. As hastes de controlo/barras moderadoras podem ser inseridas no núcleo do reactor para reduzir a taxa de reacção 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 270° C produzindo vapor. O 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

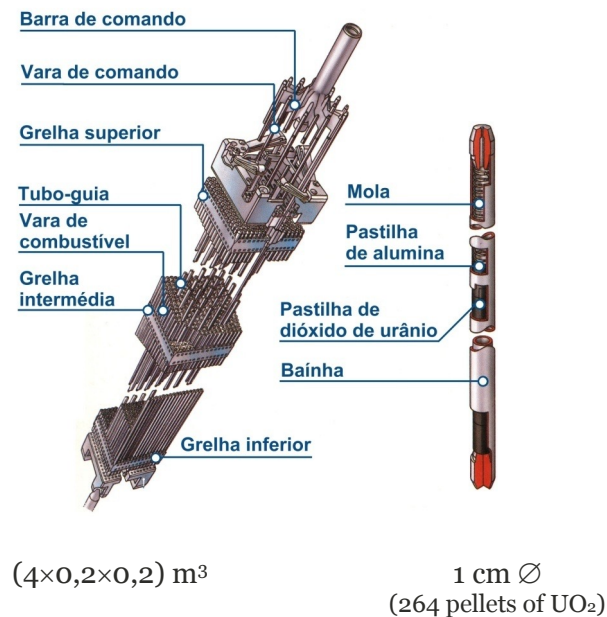
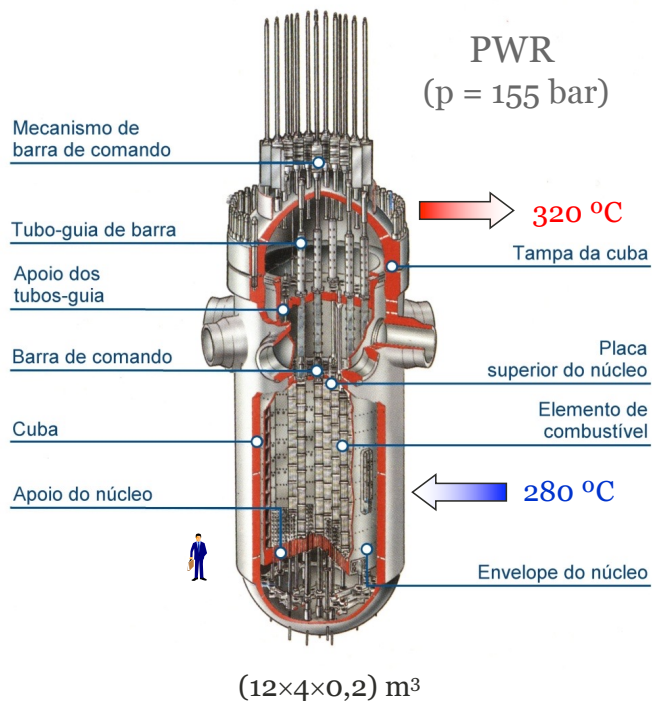
electricidade capaz de providenciar uma potência constante, conhecida como potência de base, de forma fiável e sem emitir gases causadores de efeito de estufa.

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 decaimento 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 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



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



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

tubos metálicos de cerca de 1 cm de diâmetro e cerca de 3.7 a 5 metros. 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. 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 água 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 - Light

water 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 bilhões 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 Plutônio 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



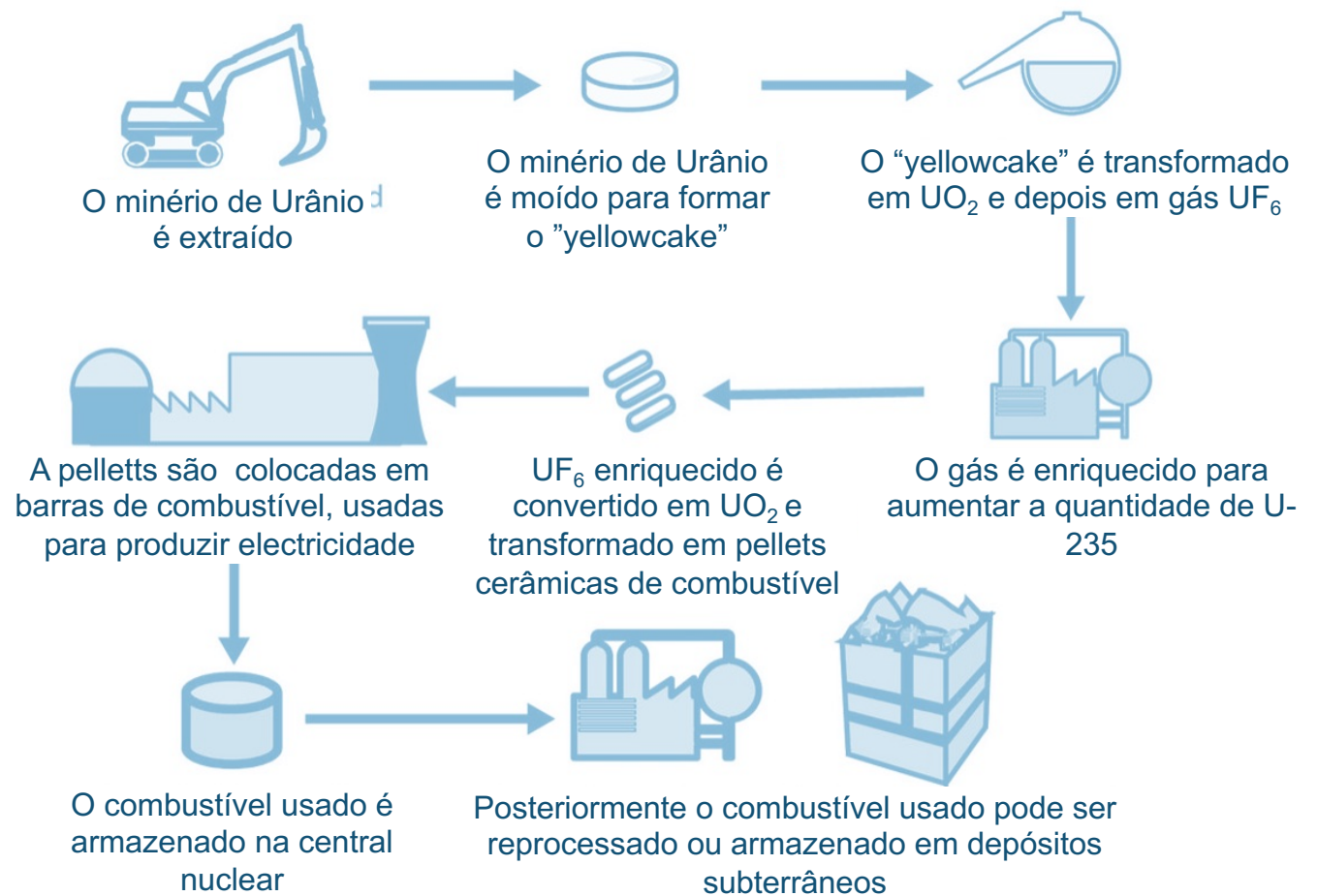
Óxido de Urânio, produzido a partir do “yellowcake”, é a forma combustível do Urânio usada em reactores nucleares (Crédito: Shamil Zhumatov/Reuters)

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.

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



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

vendas internacionais de energia nuclear estão sujeitas a rígidos controles 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

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 conseqüentemente 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 conseqüentes 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 do

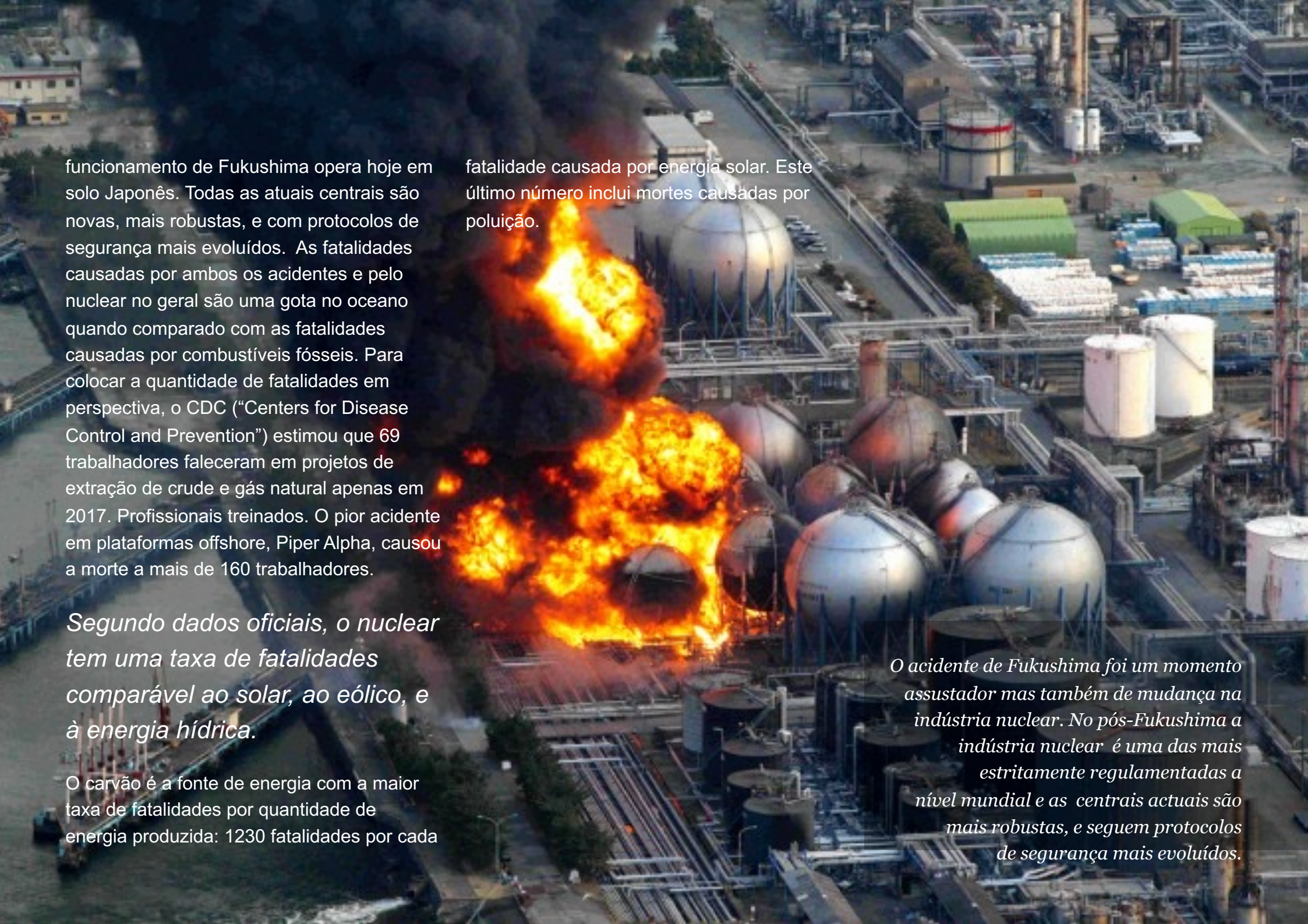
perigo potencial tanto da criticidade nuclear quanto da libertação dos materiais radioactivos resultantes da geração de electricidade com energia nuclear. Como em outras indústrias, o projecto e a operação de centrais nucleares visam minimizar a probabilidade de acidentes e evitar grandes conseqüências 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.

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

An aerial photograph of an industrial facility, likely a refinery or chemical plant, showing a large fire and explosion in the center. The facility includes several large spherical storage tanks, numerous pipes, and various industrial structures. The fire is bright orange and yellow, with a large plume of smoke rising from it. The surrounding area includes parking lots with cars and some green-roofed buildings.

funcionamento de Fukushima opera hoje em solo Japonês. Todas as atuais centrais 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. Profissionais treinados. O pior acidente em plataformas offshore, Piper Alpha, causou a morte a mais de 160 trabalhadores.

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

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.

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

*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 praticamente 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.

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



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>

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.

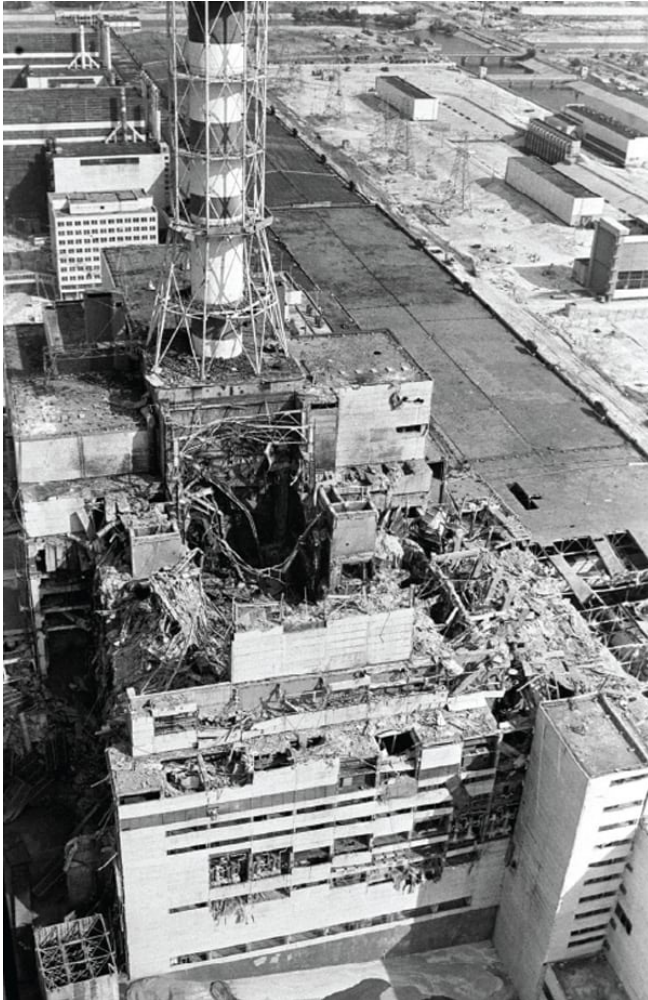
*Chernobyl**

Os reactores da Central de Chernobyl eram reactores do tipo RBMK-1000 de desenho e fabrico soviético. O RBMK-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 ejeção intensa do material do núcleo superaquecido e queima 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 aberto directo para o meio ambiente, exponenciado pelo arrastamento nos fumos da queima de 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

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



A Central de Chernobyl após a explosão

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 vítimas 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 cancro 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 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 2011 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 a libertação de material nuclear no ambiente circundante.

Chernobyl libertou cerca de 10 vezes a radiação do que a que foi libertada após o acidente de Fukushima.

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) 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.

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

O receio dos resíduos nucleares

O outro receio frequente está relacionado com os resíduos radioactivos. 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. Os resíduos podem ser de actividade alta e de actividade baixa. 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.

Os resíduos 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). 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 processo 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.

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 1kg de CO₂ 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 energia, equivalente em carvão, de vários países, mostra que cada cidadão necessitaria de aproximadamente um kilo de Urânio para satisfazer o seu consumo de electricidade durante o espaço de um ano.

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 há 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.

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 radioactivos. 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 radioactivos 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; estes são vitrificados em vidro e armazenados aguardando disposição final.

Os resíduos radioactivos 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 protecção 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)*

A excepcionalidade das situações de guerra

A indústria nuclear está entre uma 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 possível.

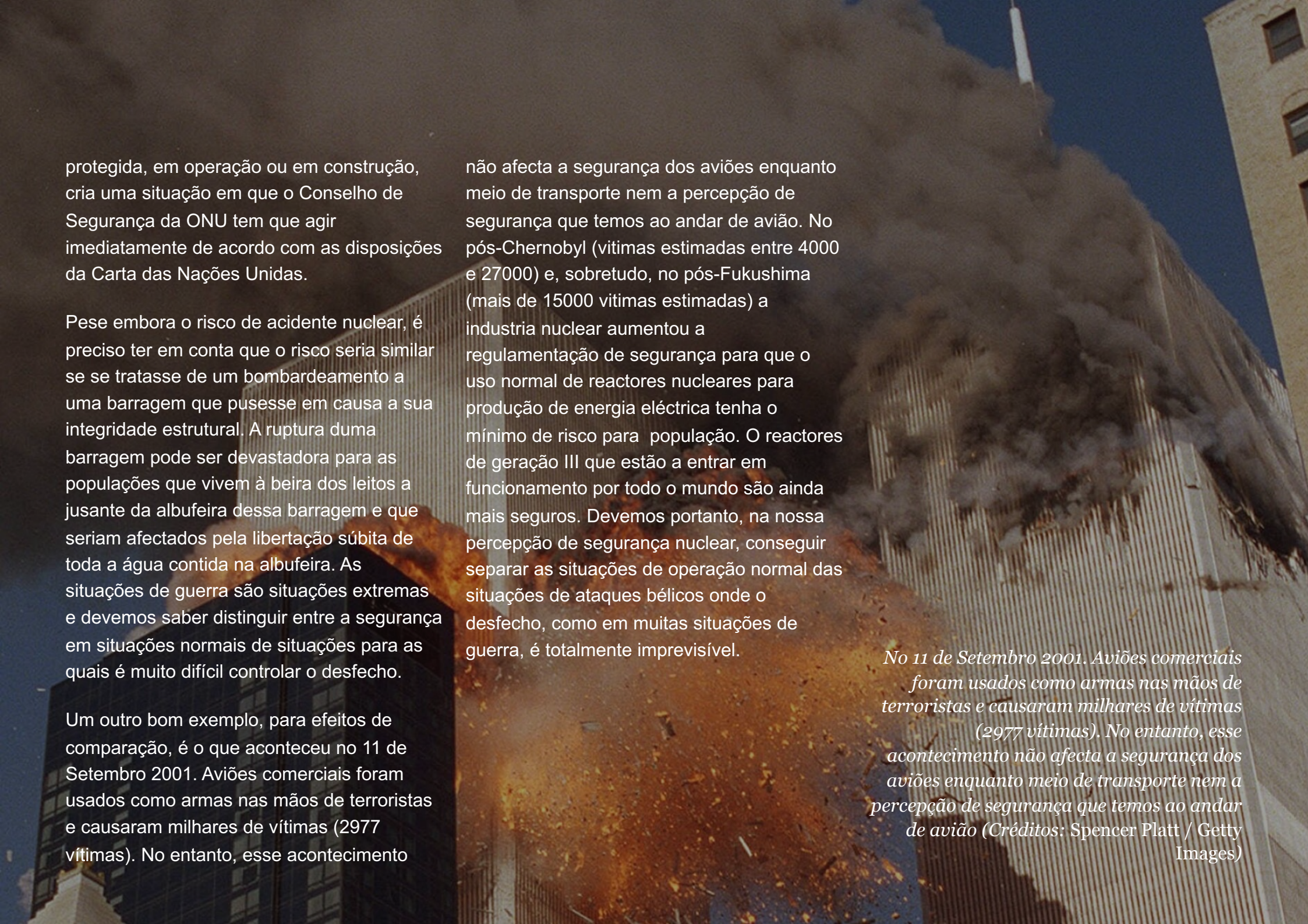
Infelizmente, apesar de toda a segurança e regulamentação a que estas centrais estão sujeitas, que inclui a construção de edifícios resistentes a terremotos de magnitude elevada e embates de aviões, situações de guerra como as vivenciadas na Ucrânia desde a invasão russa no final de Fevereiro de 2022, 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 edifício 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 já 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 radioactivo, 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. É preciso salientar 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”

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. 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 (vítimas estimadas entre 4000 e 27000) e, sobretudo, no pós-Fukushima (mais de 15000 vítimas estimadas) 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.

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)

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

As centrais nucleares são construídas para operações em tempos de paz, não para guerras.

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 projectados 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 não são projectados para resistir a uma explosão de grandes dimensões. 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 danificaria

gravemente o reactor nuclear e libertaria radiação na atmosfera. 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 resultaria num acidente similar a Chernobyl.

As centrais nucleares não são construídas para resistir a ataques militares e as piscinas de arrefecimento do combustível usado e os depósitos/contentores para armazenagem a seco dos resíduos são alvos particularmente vulneráveis, e contêm mais radioatividade do que os próprios reactores, mas sem as várias camadas de contenção que os reactores normalmente têm. Se um projétil atingir o reservatório de combustível irradiado da central, que contém o combustível irradiado já usado e que ainda está radioativo, ou se um incêndio se alastrar para o reservatório

de combustível irradiado, poderá haver libertação de radiação. Geralmente a piscina onde é armazenado o combustível usado não está no edifício de contenção e, como tal, é mais vulnerável. Se a piscina for drenada devido a um bombardeamento, o combustível no interior podem incendiar-se e o calor elevado pode formar uma nuvem radioactiva. Se uma bomba ou míssil atingir directamente os contentores de armazenamento a seco estes poderão libertar uma quantidade substancial de material radioactivo.

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



*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 material radioactivo irradiado (combustível usado) na central de Zaporíjia, Ucrânia. Se uma bomba ou míssil atingir directamente os contentores de armazenamento a seco estes poderão libertar uma quantidade substancial de material radioactivo para o ambiente

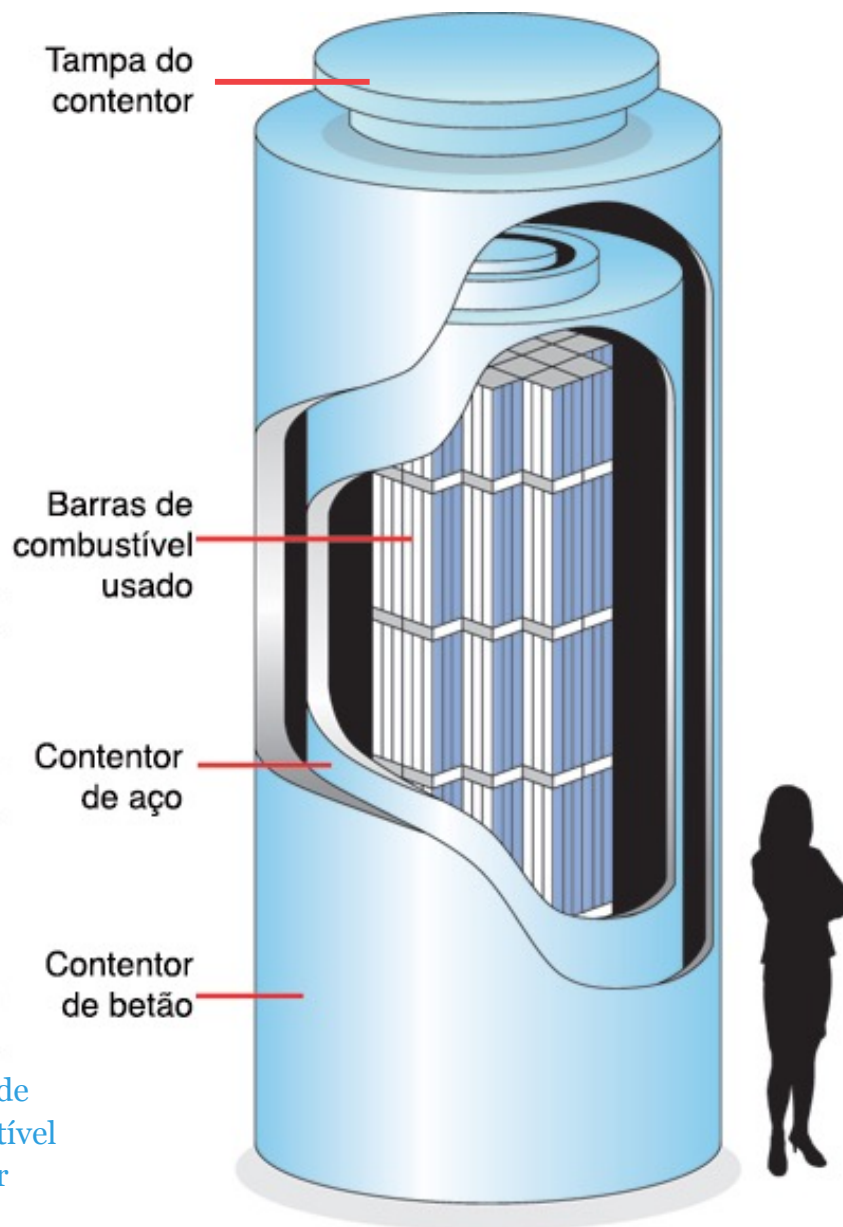


Diagrama de um contentor de armazenamento de combustível usado (Créditos: US Nuclear Regulatory Commission)

Falha nos sistemas auxiliares de arrefecimento

Os sistemas de protecção do reactor desligam-no automaticamente em caso de mau funcionamento ou devido a actividade sísmica. 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-scrum 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 sendo necessário manter a circulação de água dos circuitos de arrefecimento responsáveis pela remoção do calor residual do reactor até que este fique numa situação de segurança, o 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 significativos 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 eléctrica 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 ficam sem combustível e os sistemas de refrigeração falham, 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 pressão suficiente para romper o edifício de contenção em poucos dias. Nesta janela temporal os operadores poderão ainda conseguir colocar os sistemas de refrigeração novamente em operação. Além dos sistemas de refrigeração dos reactores, manter o combustível nuclear usado seguro é outra preocupação. Normalmente este combustível está armazenado em piscinas de arrefecimento adjacentes ao edifício de contenção. Estas piscinas não só estão menos protegidas, como podem armazenar mais combustível do que os próprios reactores. As piscinas com o combustível irradiado 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 barris secos. Caso o sistema de arrefecimento deixe de funcionar, o combustível irradiado começa a superaquecer e o seu revestimento de 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

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.

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 única 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 numa transição global para um 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.

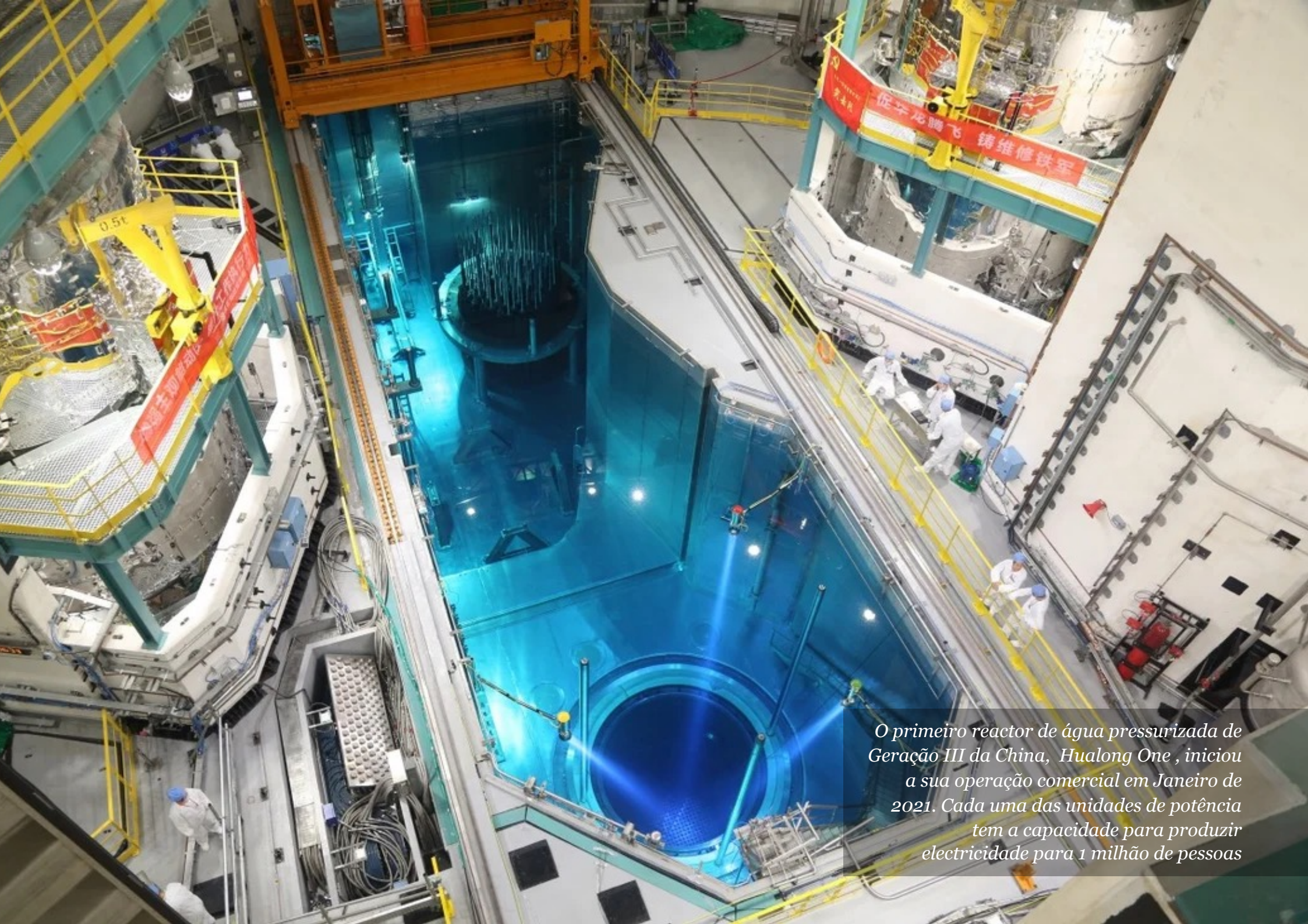
Habitualmente são distinguidas diferentes gerações de reactores. Os reactores de Geração I foram desenvolvidos em 1950-60 tendo o último reactor desta geração sido encerrado no Reino Unido em 2015. Os reactores de Geração II estão amplamente presentes na frota actual americana e francesa e em vários outros países. Os primeiros reactores de Geração III (e III+) estão em operação no Japão havendo mais a 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 standardizado 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 por 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.

GERAÇÃO I



Shippingport

GERAÇÃO II



Diablo Canyon

GERAÇÃO III/III+

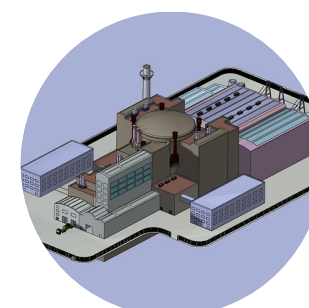


Kashiwazaki



Olkiluoto

GERAÇÃO IV



Astrid

Primeiros protótipos

Produção comercial de
electricidade

Reactores avançados e evolutivos

Projectos inovadores

- Shippingport
- Dresden
- Magnox
- Fermi-I

- Reactores de água pressurizada (PWR)
- Reactores de água fervente (BWR)
- CANDU

- CANDU 6
- System 80+
- AP600

- Melhorias evolucionárias no design
- Economia melhorada
- Segurança melhorada

- ABWR
- ACR1000
- AP1000
- APWR
- EPR
- ESWR

- Altamente económicos
- Segurança operacional avançada
- Resíduos mínimos
- Resistente à proliferação
- Segurança física robusta

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030

2040

Evolução dos reactores nucleares

A revolução dos pequenos reactores modulares

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 um desenho único). Uma das soluções para reduzir o custo pode ser a adopção de projetos modulares 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.

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

Usados para geração de energia, calor de processo, dessalinização ou outros usos industriais. Os projetos SMR podem empregar água leve como refrigerante ou outros refrigerantes, como gás, metal líquido ou sal fundido. 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

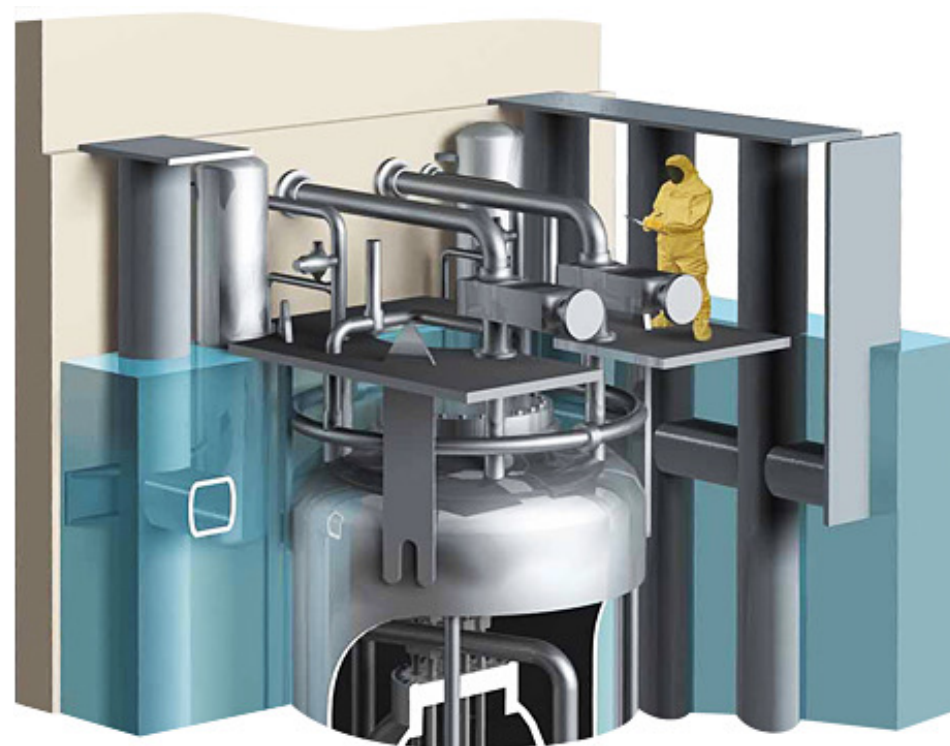
de radioactividade para o meio ambiente em caso de acidente. Também muitos são projectados para serem colocados abaixo do nível do solo, permitindo uma resistência alta às ameaças terroristas. Os SMRs também reduzem os requisitos de combustível exigindo reabastecimentos menos frequentes, a cada 3 a 7 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 e 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.

A revolução SMR, e todos os outros projetos concorrentes de Geração III+ e Geração IV, mostram que a tecnologia nuclear não parou. É um erro julgar o potencial das novas formas de produzir energia nuclear com base em acidentes como Fukushima e Chernobyl. Este tipo de julgamento é similar a julgar a segurança de um Airbus A380 com o registro de acidentes de um avião comercial da

década de 1970. 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.



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

+ *Fusão Nuclear*

2.2

A Fusão Nuclear é a energia das estrelas



*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 o processo pelo qual as estrelas, incluindo o Sol, geram a sua energia. Numa reação de fusão, os núcleos atômicos “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.

Sob estas condições, a fusão de Hidrogénio em Hélio pode ser facilmente mantida. 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

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).

O plasma costuma ser denominado como o 4º estado da matéria

Como se forma um plasma?

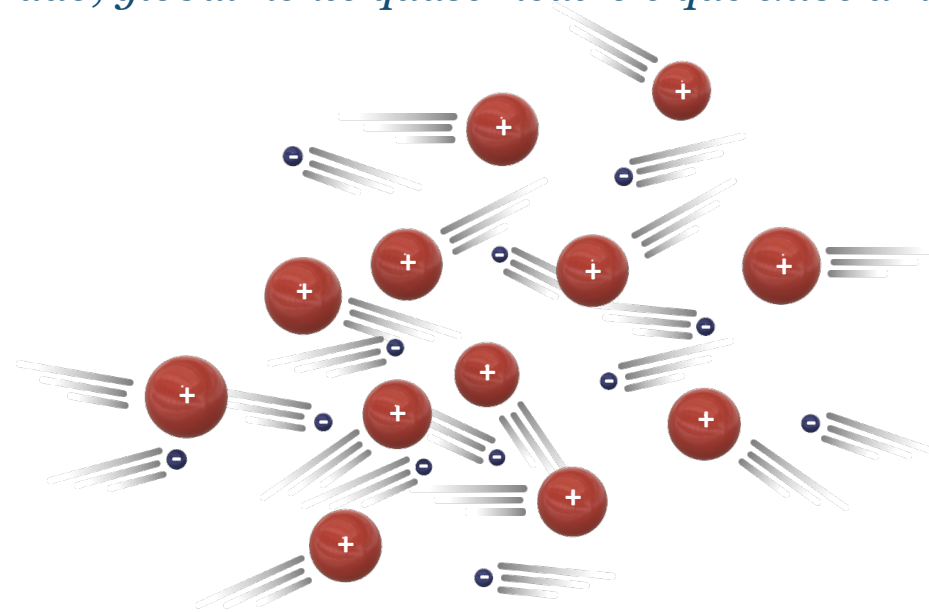
Para se formar um plasma é necessário energia que permita ionizar um gás até que este atinja o estado de plasma



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

O que é um plasma?

Um plasma é um gás ionizado, globalmente quase-neutro e que exhibe 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 atracção eléctrica dos seus núcleos atómicos.

Meio neutro

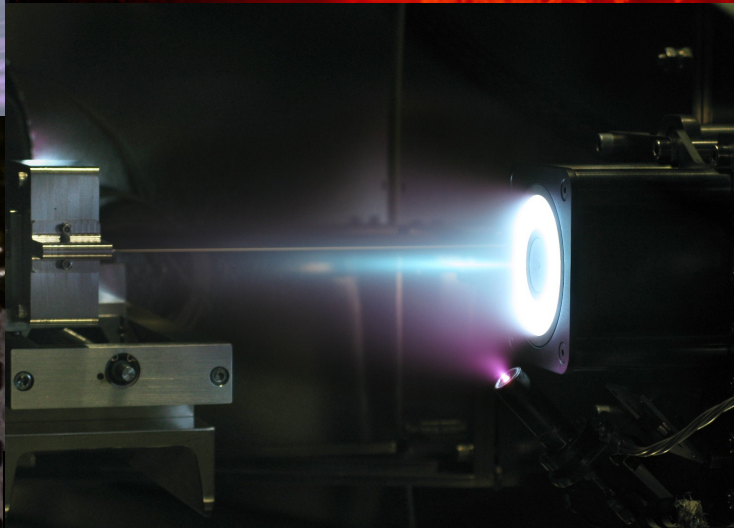
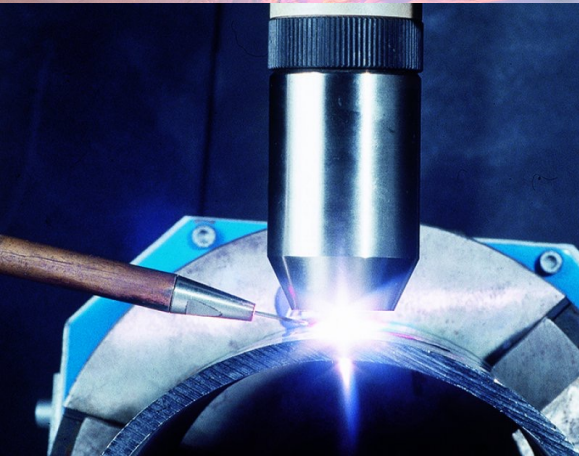
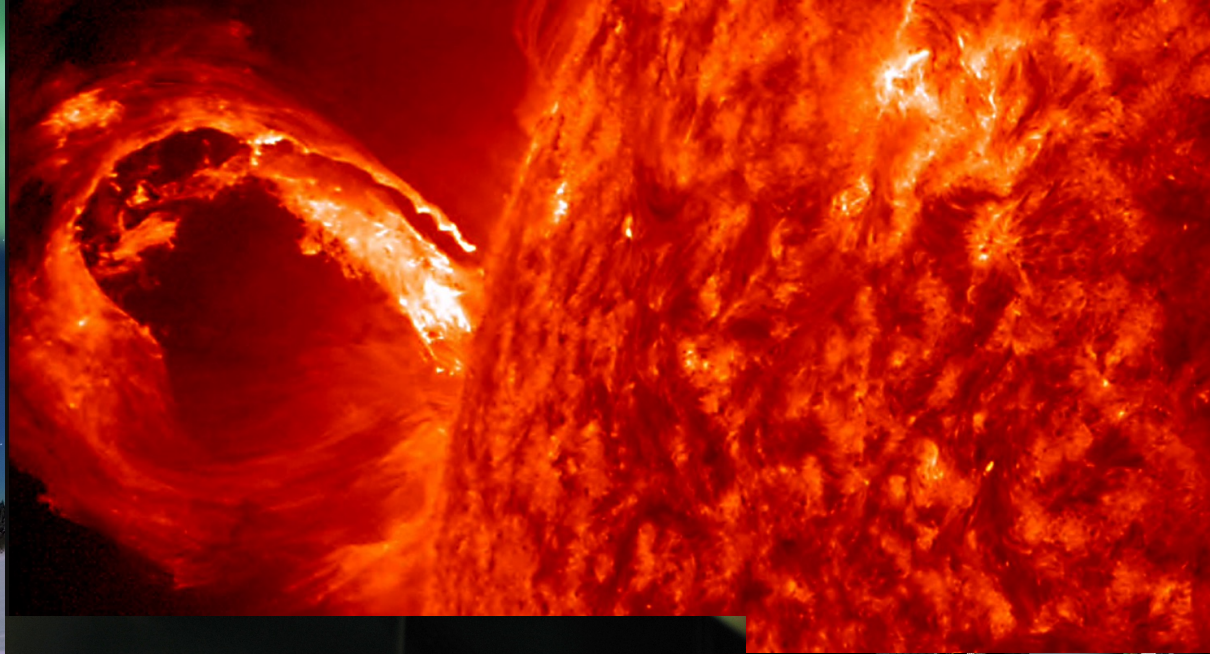
O plasma comporta-se como uma “nuvem” de protões, neutros e electrões livres diferentemente dos gases que são constituídos por átomos e moléculas neutras. Além disso, as partículas de carga eléctrica positiva (protões) e negativa (electrões) do plasma atraem-se mutuamente, mas têm dificuldade em ligarem-se, 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

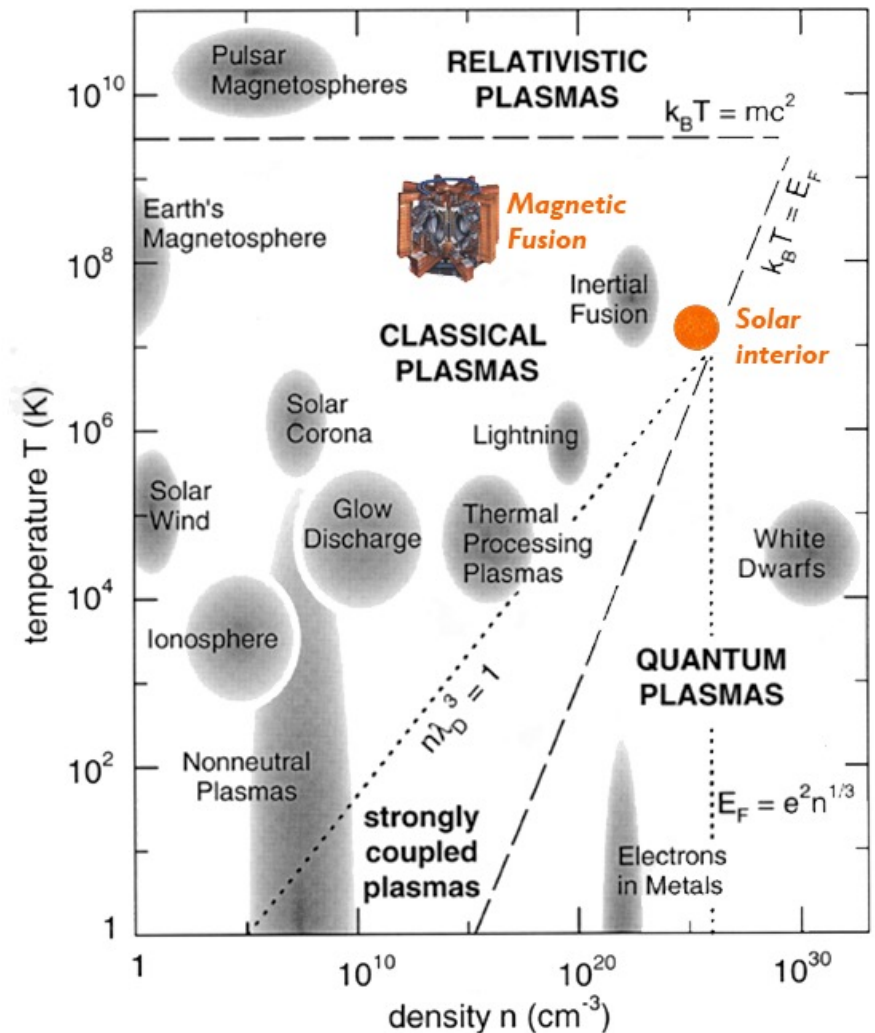


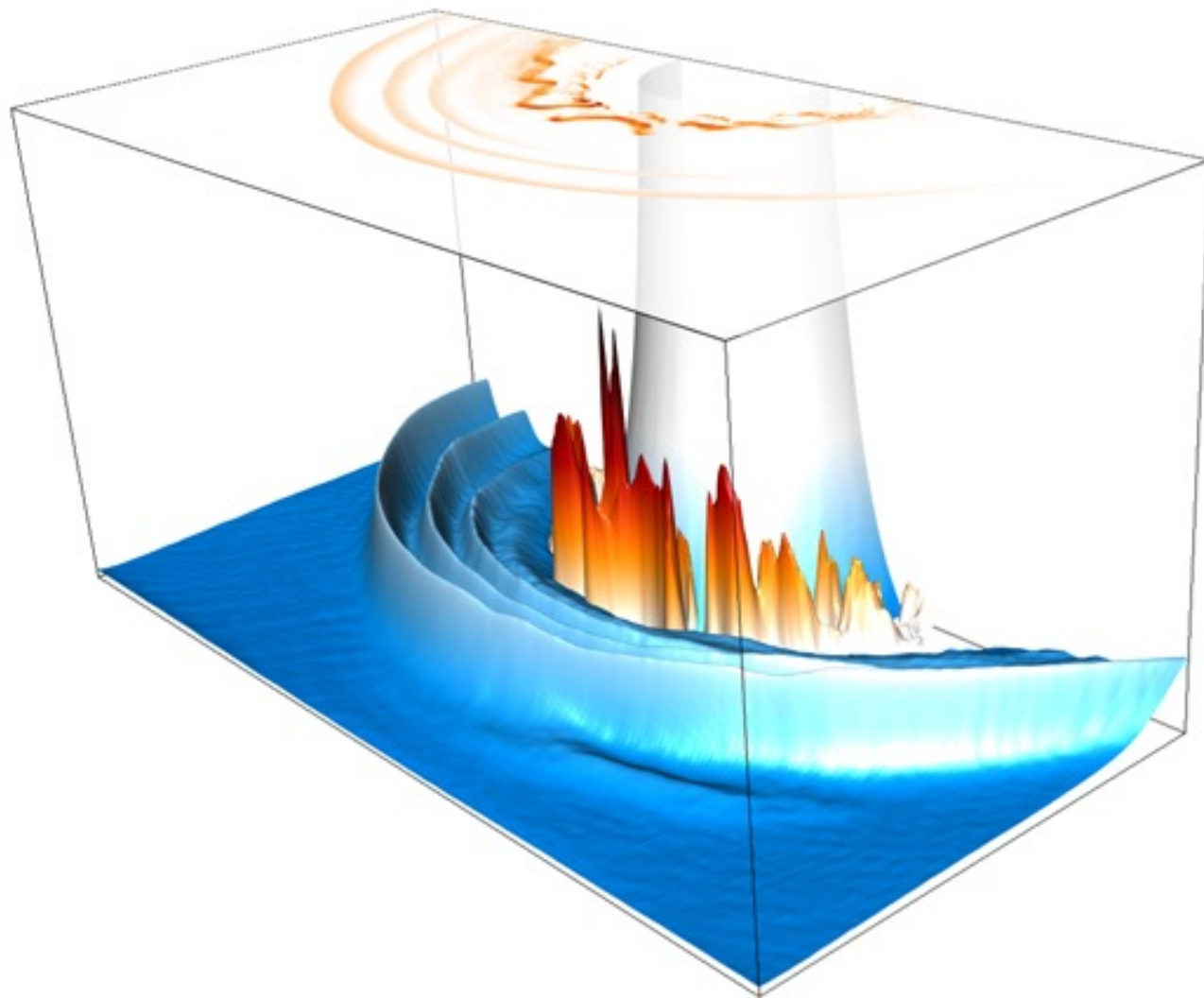


Os plasmas estão amplamente presentes na natureza e no nosso dia-a-dia. Nesta página estão ilustrados alguns exemplos para além das estrelas e entre muitos possíveis: o plasma ejetado durante uma tempestade solar e que atinge o nosso planeta sob a forma de vento solar, as auroras boreais, os relâmpagos, 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.

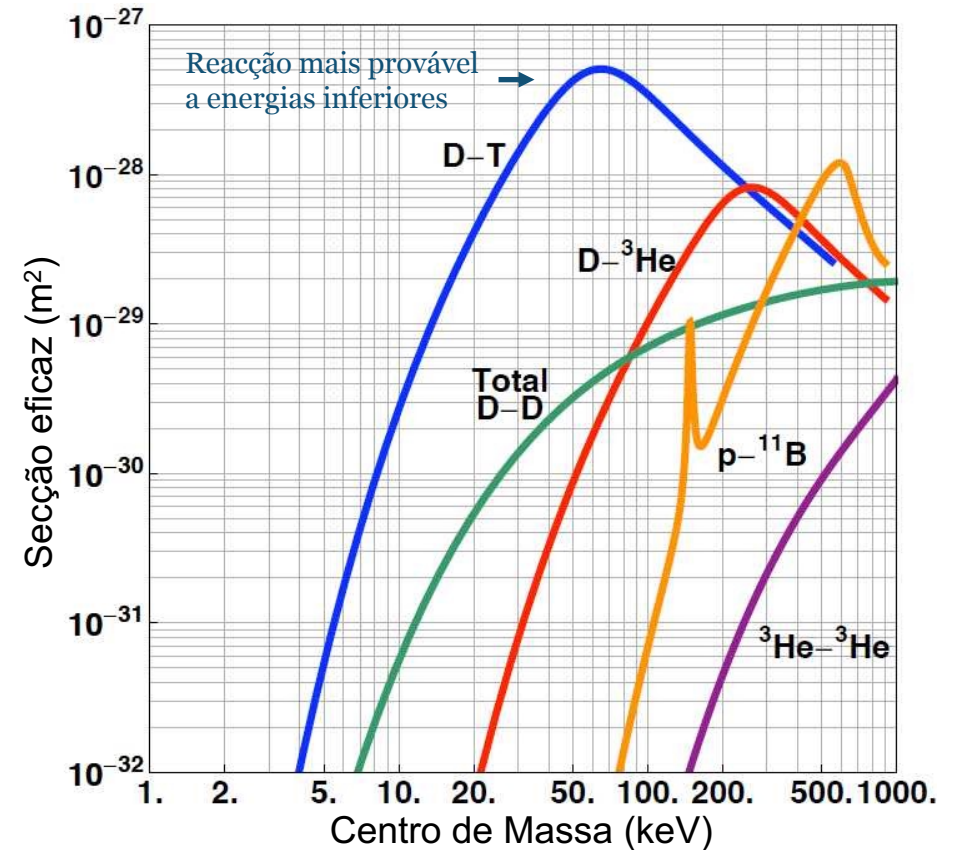
Geração de ondas de choque magnetizadas em miniatura
(Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear)

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 ínfimas 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 a 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 °C)

Tempo de confinamento (τ): 4-6 s

Densidade do plasma (n): $1-2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (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.

Fusão Nuclear por Confinamento Magnético

3

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 eléctrica 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, 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.

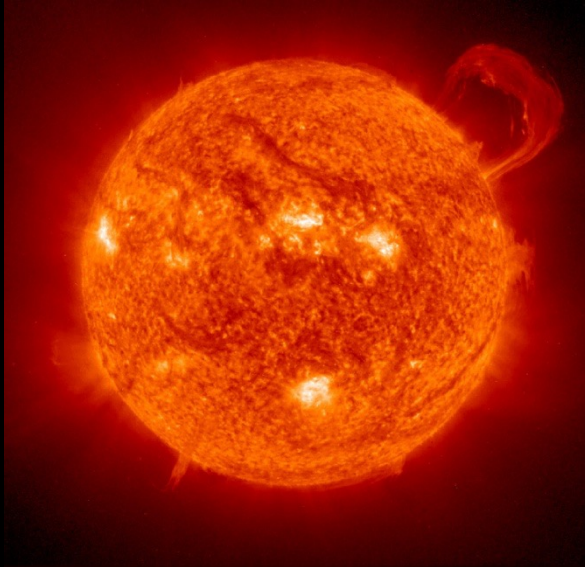
Como um plasma apropriado para a fusão é muito quente não pode ser contido normalmente e tem de evitar o contacto com as paredes materiais (que para além de danificá-las, também arrefece o plasma). Para tal, pode-se aproveitar o facto do plasma ser constituído basicamente de partículas carregadas eletricamente apesar de, como um todo, o plasma permanecer neutro. A ideia é usar campos magnéticos e correntes eléctricas 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

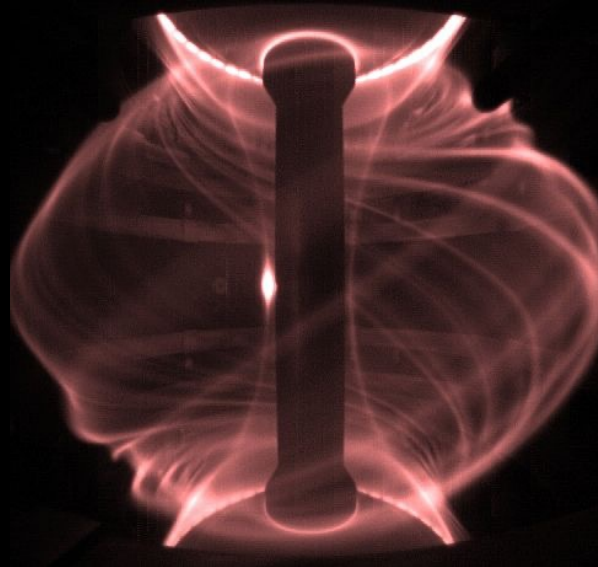
tokamak, tem sido o foco principal das actividades de investigação em fusão desde então.

O Confinamento Magnético é o mais promissor para produção de energia

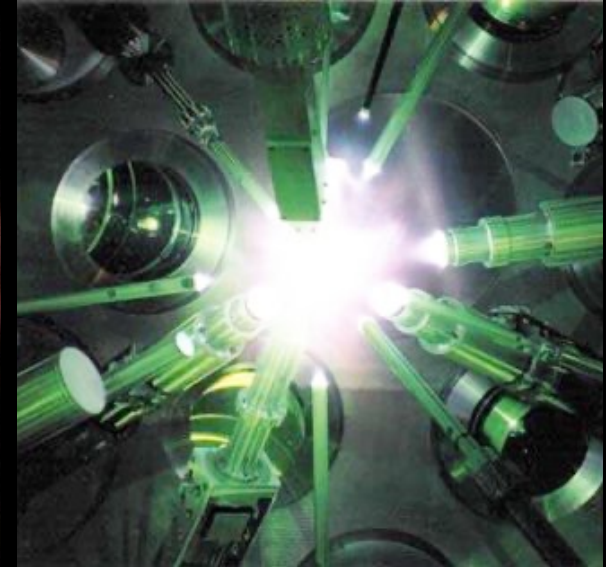
O sucesso do tokamak levou à construção de grandes dispositivos que entraram em operação na primeira metade da década de 1980, como o Joint European Torus (JET) na Europa em Culham, Reino Unido e o Tokamak Test Fusion Reactor (TFTR) na Princeton Plasma Physics Laboratório, EUA. Por todo o mundo foram 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 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.

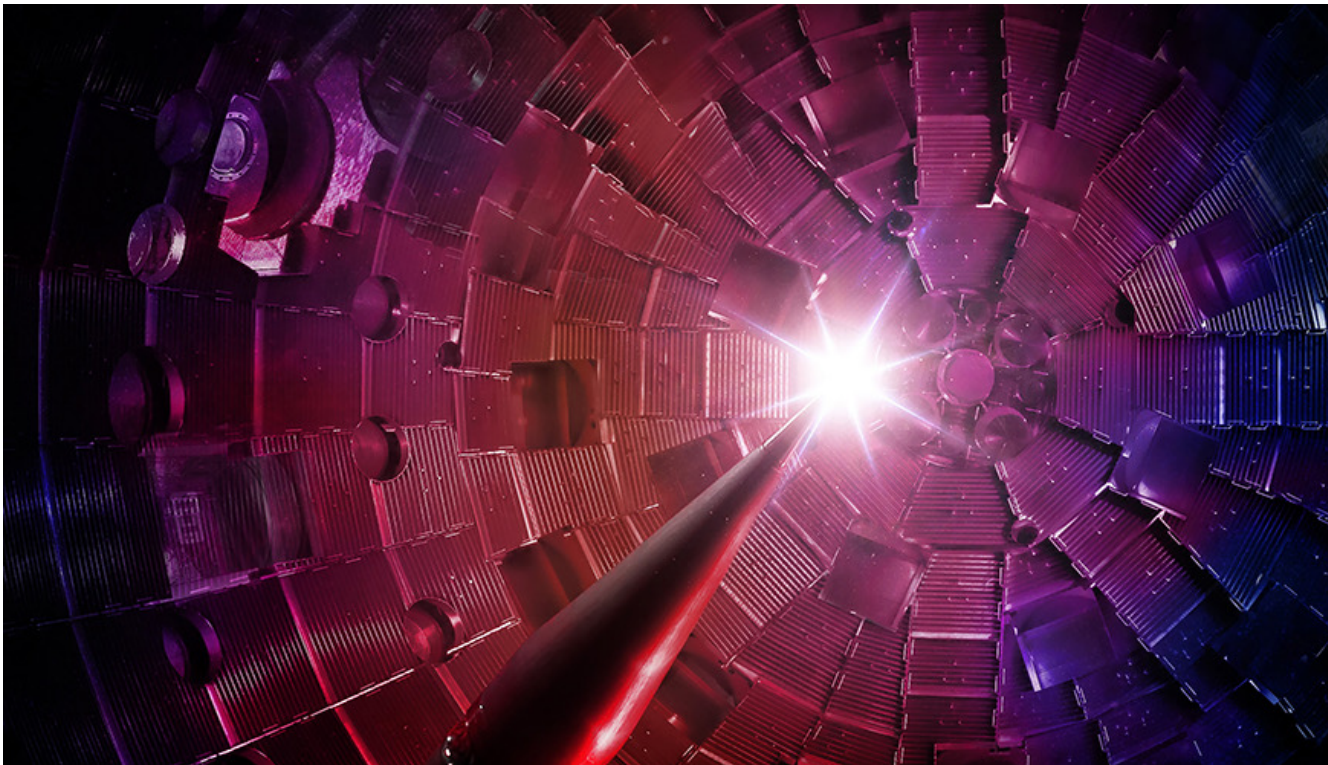
A ideia inicial era fazer incidir em simultâneo vários lasers sobre uma cápsula cheia de DT - deutério e trítio, outro isótopo do hidrogénio - que precisam de vencer uma barreira de energia ligeiramente menor do que dois núcleos de deutério para se fundir) para que a cápsula, ao explodir, comprimissem o gás no seu interior, até temperaturas e densidades tais que criassem as condições para a fusão de todo o combustível da cápsula.

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 comprimissem 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 como aquecedor da cápsula DT.

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 têm sido compreender e ultrapassar os desafios da turbulência no processo de compressão.



This rendering of the inside of NIF's target chamber shows the target positioner moving into place. Pulses from NIF's high-powered lasers race through the facility at the speed of light and arrive at the center of the target chamber within a few trillionths of a second of each other, aligned to the accuracy of the diameter of a human hair. (Créditos: Lawrence Livermore National Laboratory)

Os resultados obtidos no início de Agosto de 2021 são um avanço extraordinário. Ainda não foi atingido o ganho de 1, o objetivo da NIF, mas existe agora um caminho identificado para a fusão nuclear com lasers e podemos esperar mais resultados nos próximos meses.

Um dos objetivos da fusão nuclear é converter estes avanços fundamentais no desenho de uma central de produção de energia elétrica. 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.

O que é a fusão nuclear por confinamento magnético?

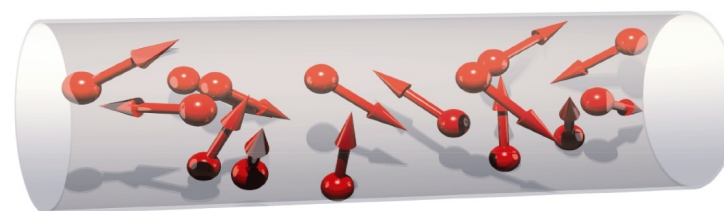
As reacções de fusão ocorrem quando os núcleos têm velocidade suficiente para ultrapassar as forças repulsivas entre as suas cargas eléctricas. No caso das reacções D-T, são necessárias temperaturas acima de 100 milhões °C, bem acima da temperatura para a qual um gás está completamente ionizado e se 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.

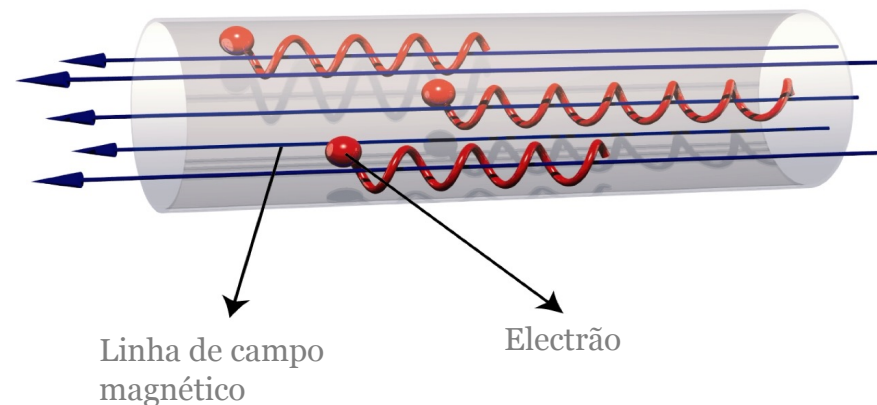
O conceito de confinamento magnético consiste em aplicar um campo magnético elevado para confinar o movimento das partículas do plasma. O campo magnético previne as partículas de entrarem em contacto com a parede do reactor, nas quais dissipariam a sua energia.

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



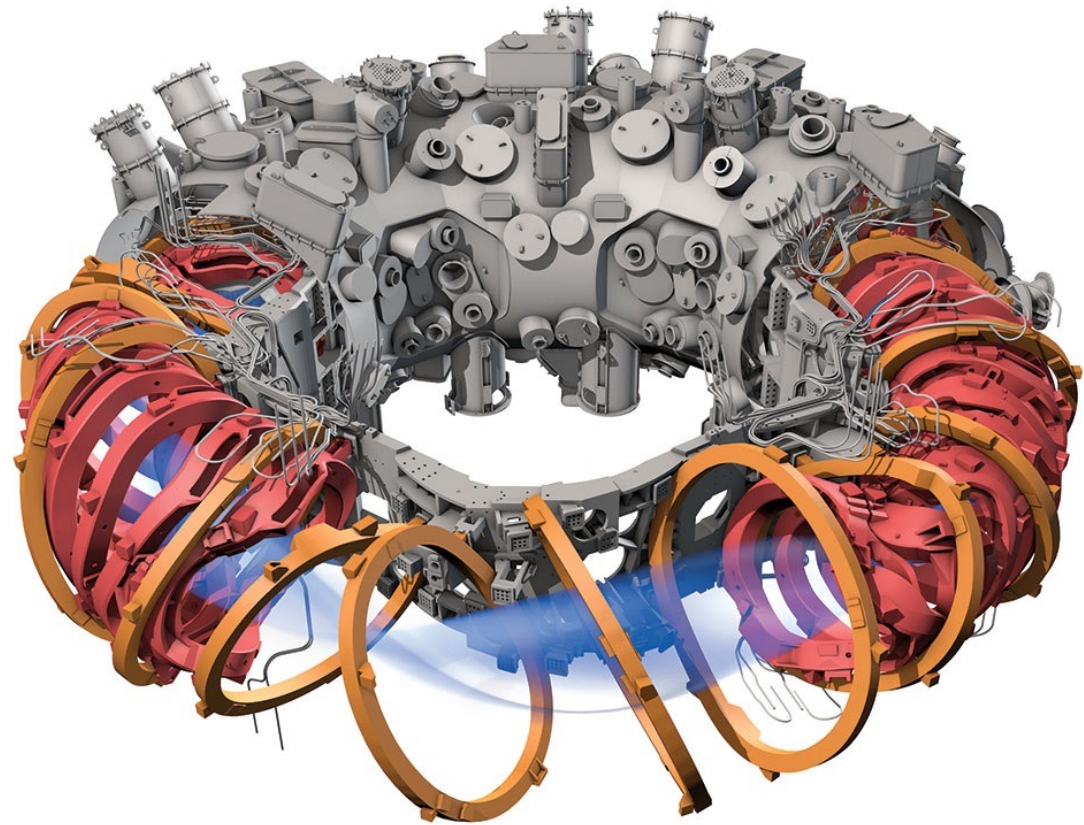
Com campo magnético



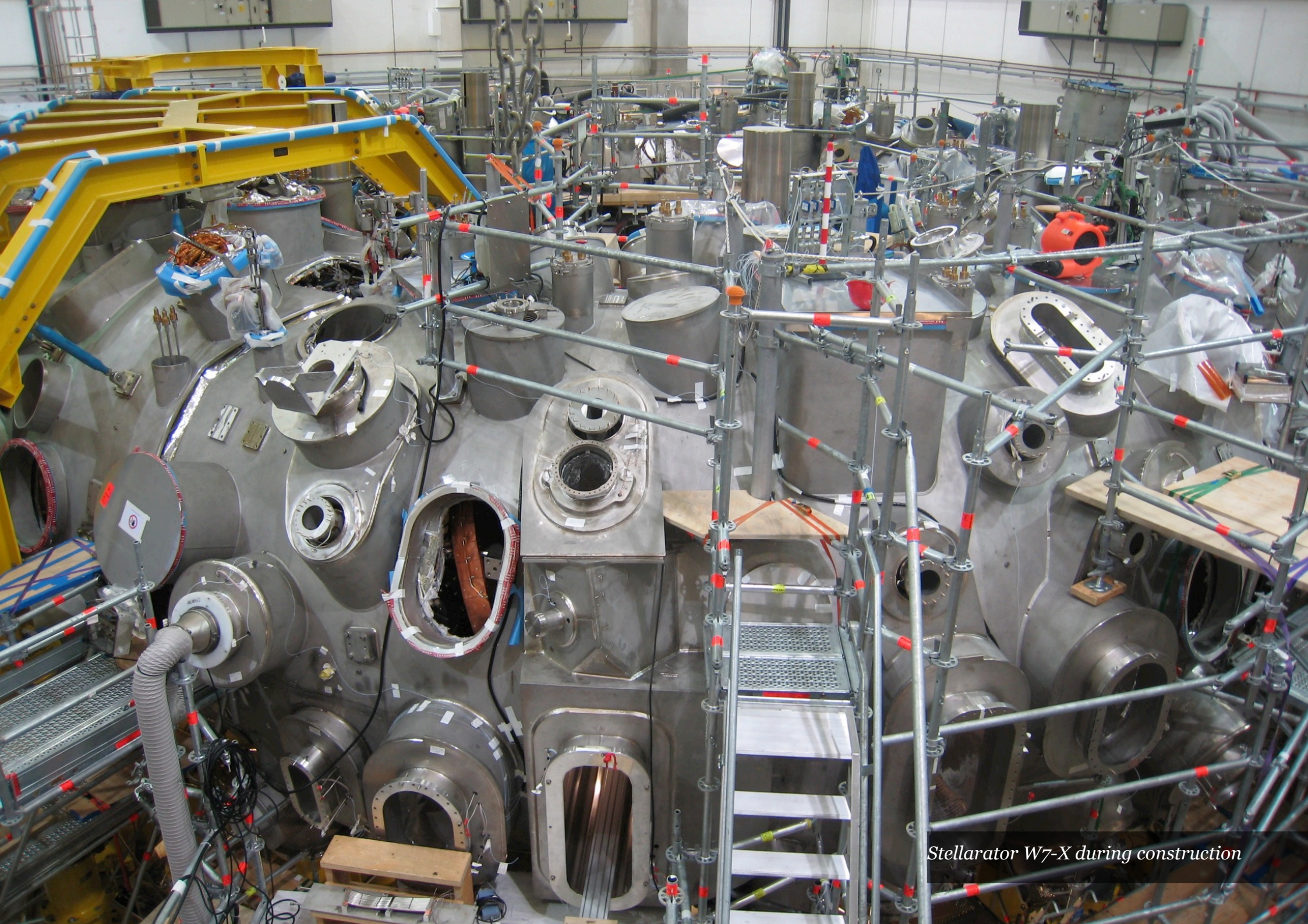
As partículas carregadas descrevem movimentos circulares no campo magnético limitando o seu movimento da direcção perpendicular ao campo magnético

Stellarators

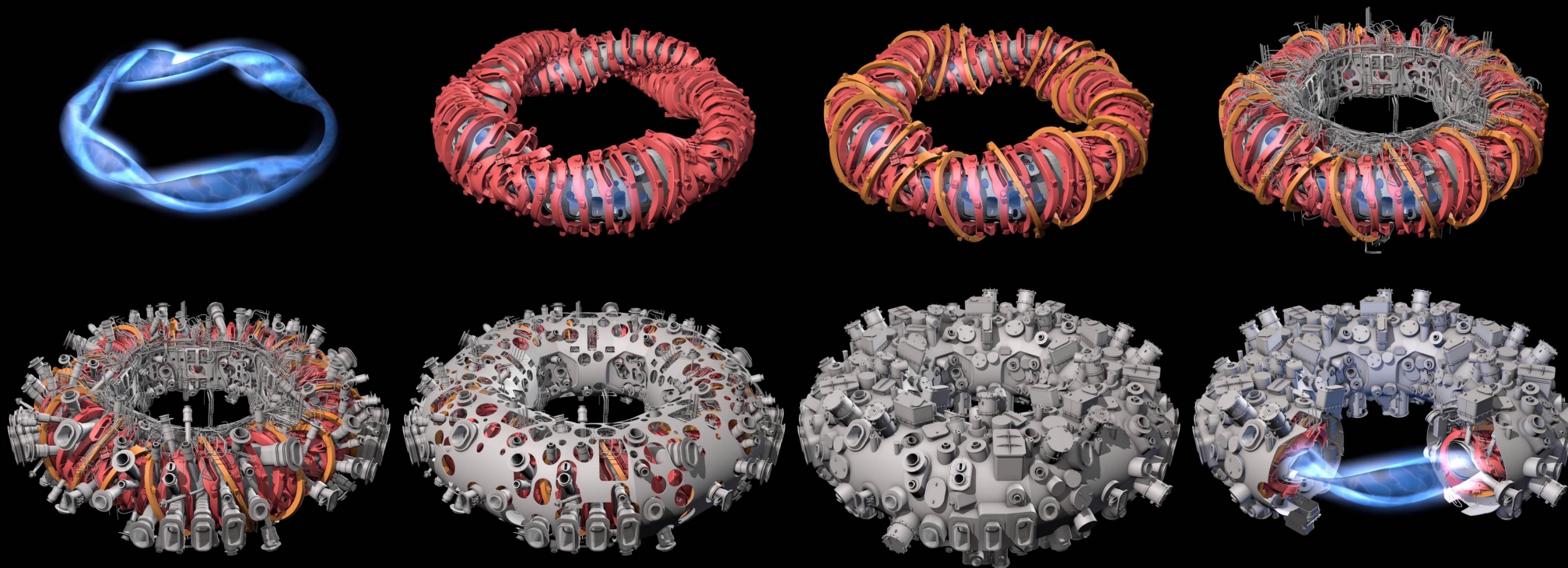
Os stellarators usam bobinas magnéticas que produzem campos magnéticos extremamente fortes (no W7-X o campo magnético é de 3T ou seja ~100000 vezes o campo magnético à superfície da Terra), e torcidos, que se enrolam ao longo duma geometria toroidal. Os stellarators têm algumas vantagens sobre os tokamaks: requerem a injeção 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 bobinas magnéticas e menor volume de plasma. 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.



*Stellarator Wendelstein7-X
(W7.X, Germany)*



Stellarator W7-X during construction



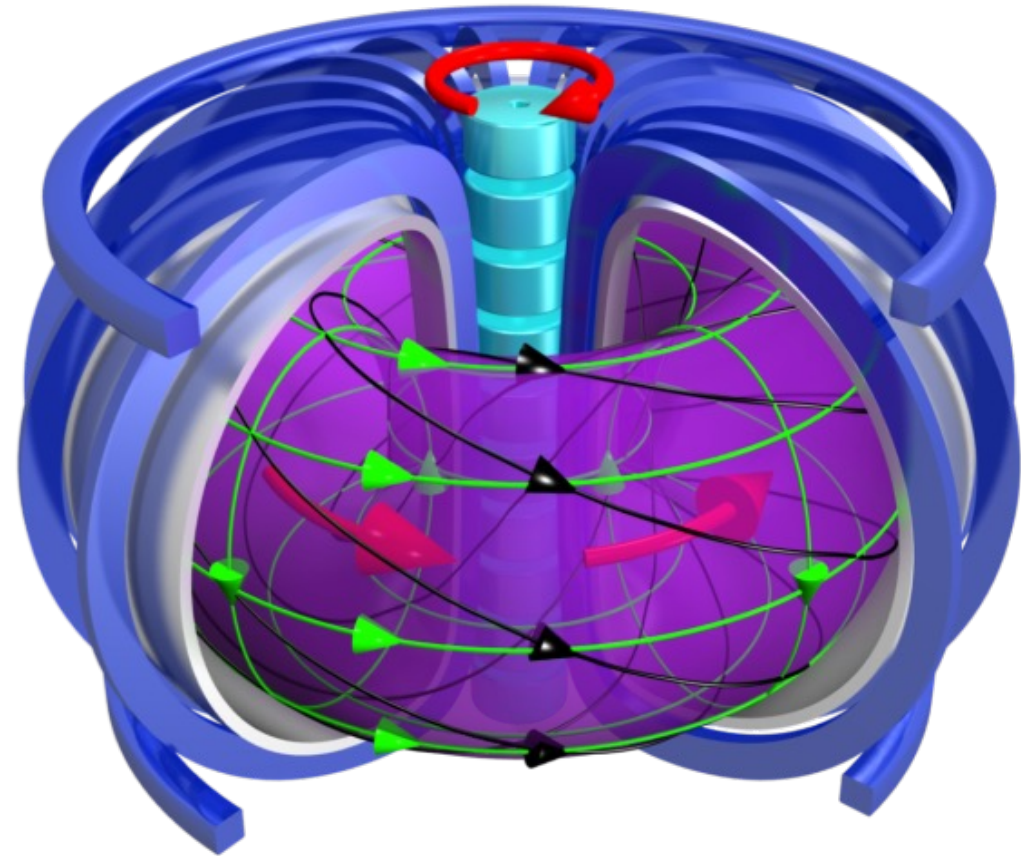
Wendelstein 7-X, é o primeiro stellatrator otimizado de larga-escala. Necessitou do investimento de 1.1. milhões de horas de trabalho para montar, usando um dos modelos de engenharia mais complexo alguma vez imaginado, e tem de suportar enorme variações de temperatura, e forças enormes. Um contentor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

Tokamak

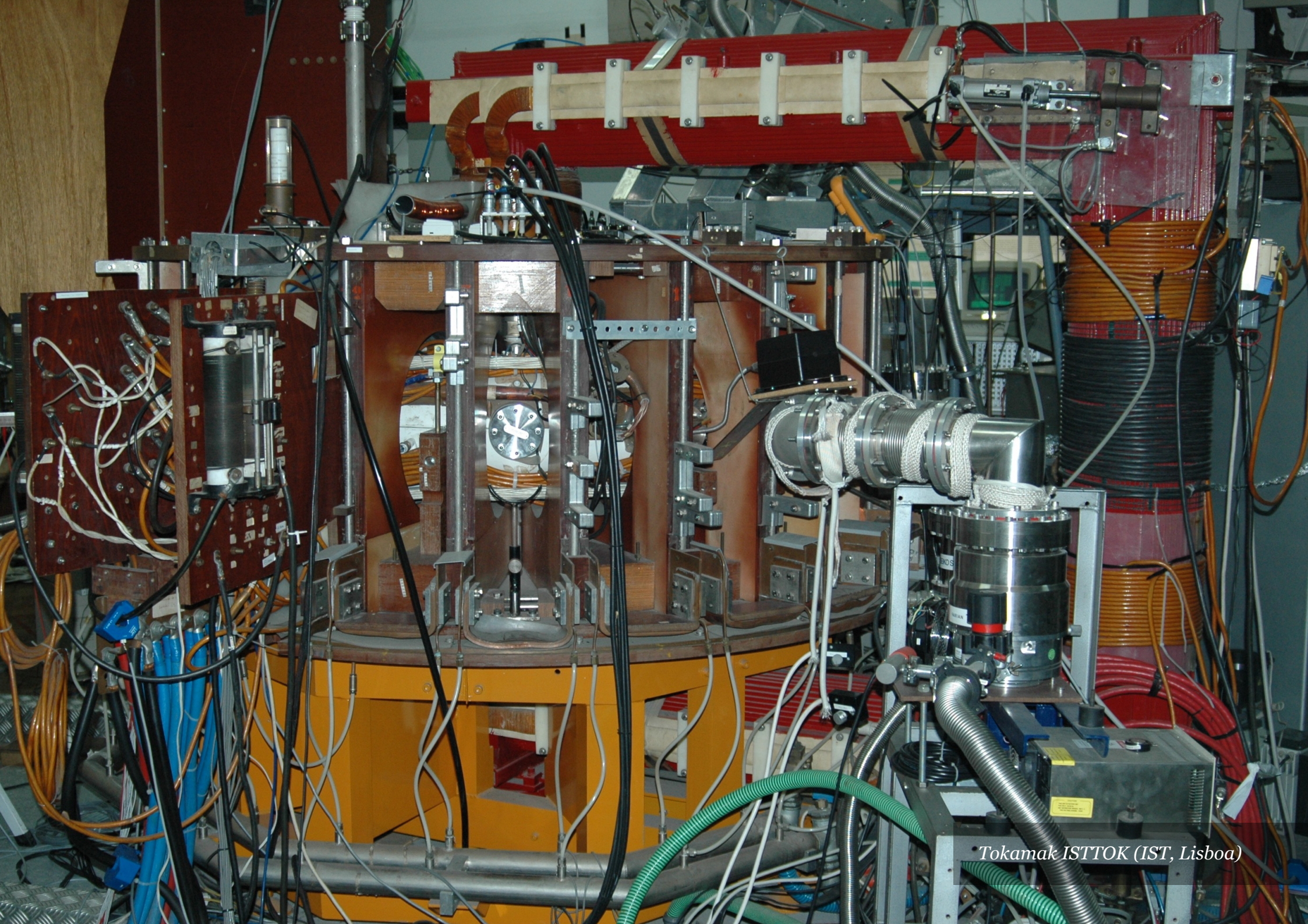
Câmara Toroidal de confinamento Magnético

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 bobinas separadas de forma homogênea 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 tem de induzida no plasma por um solenoide 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



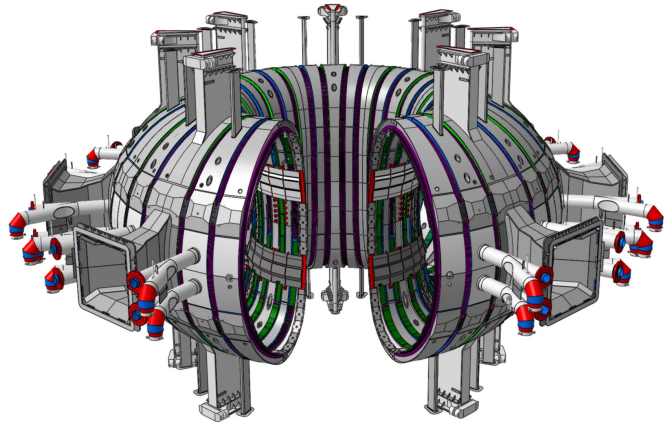
Desenho esquemático de um tokamak e do campo magnético helicoidal produzido pelas bobinas toroidais e pela corrente de plasma



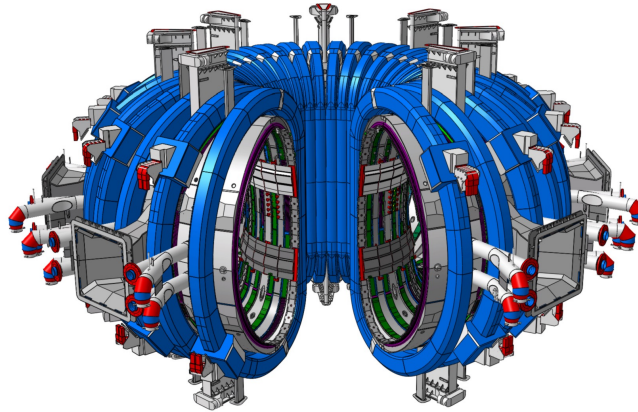
Tokamak ISTTOK (IST, Lisboa)

Anatomia duma máquina de fusão

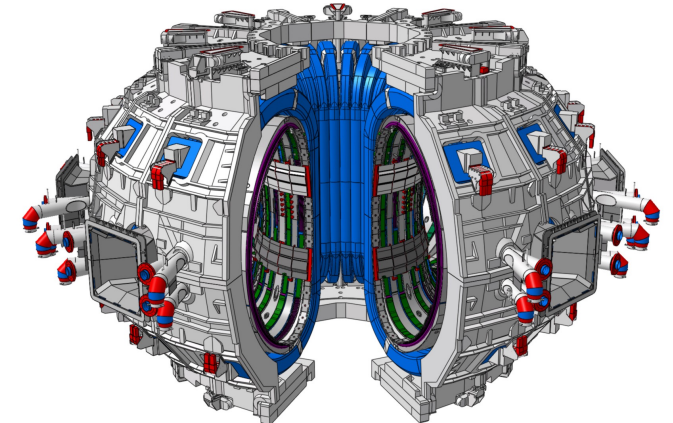
O JET é actualmente o maior máquina de fusão nuclear em operação e é aqui usado para ilustrar alguns dos componentes que compõe um tokamak



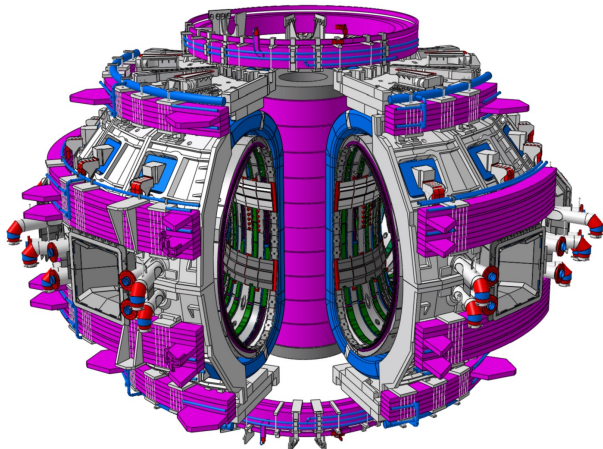
Câmara de Vácuo



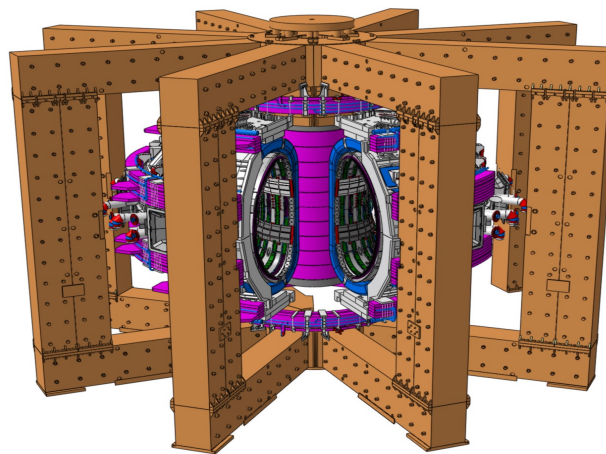
*Bobinas Magnéticas Toroidais
(arrefecidas com Galden)*



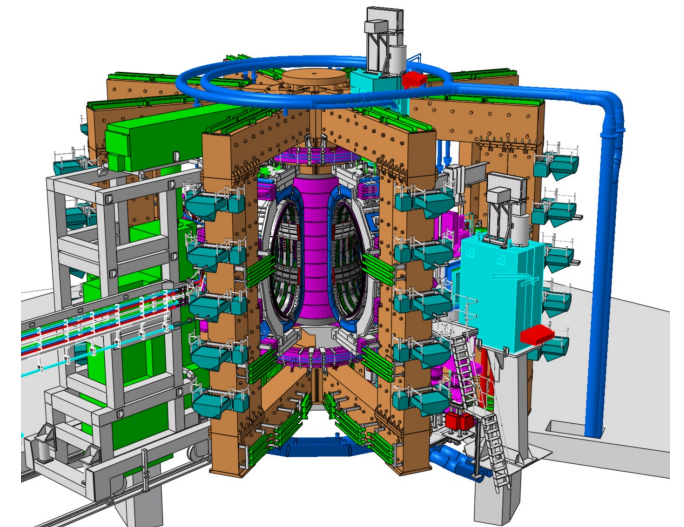
Estrutura de suporte



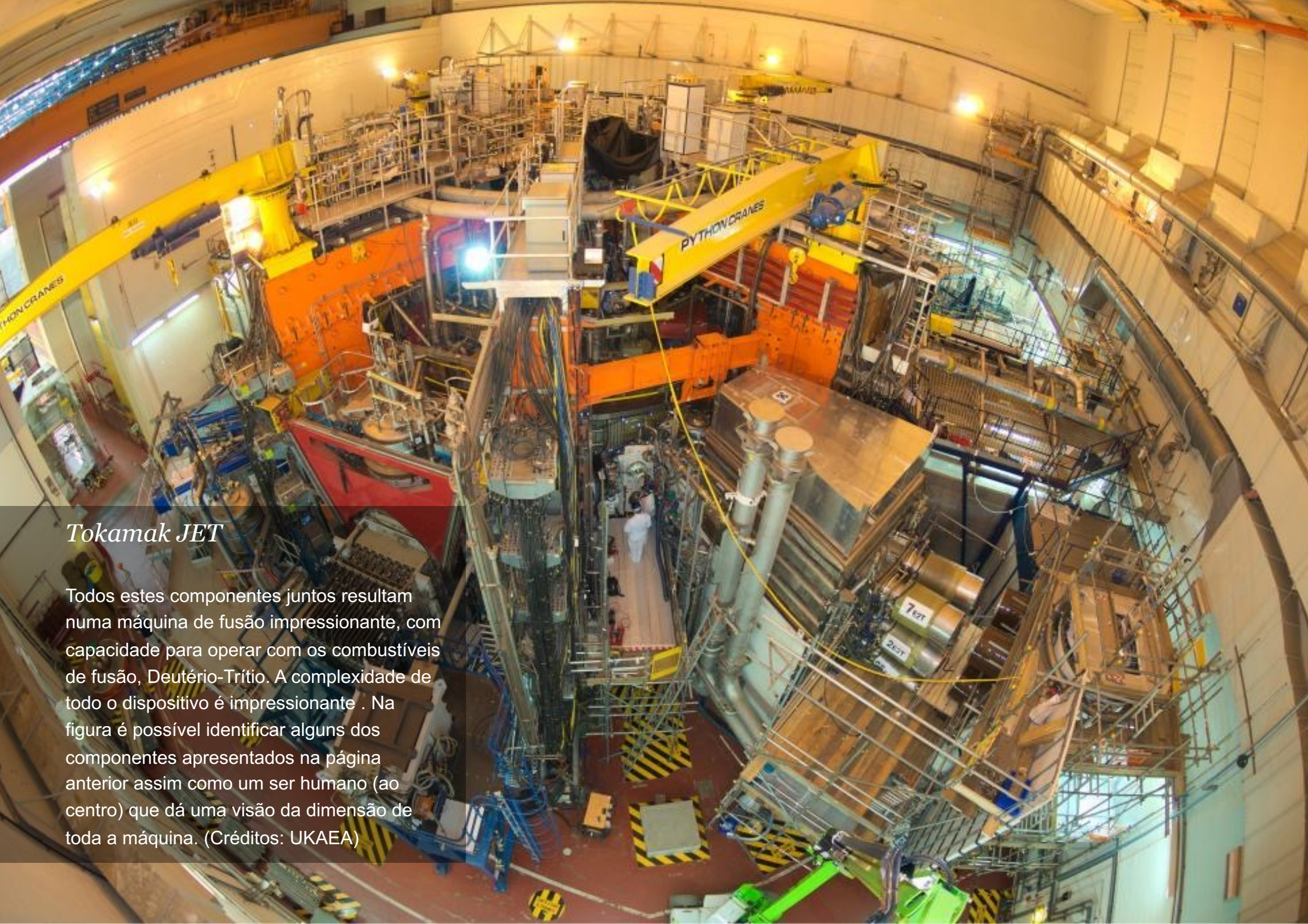
Bobinas Poloidais



Núcleo do Transformador

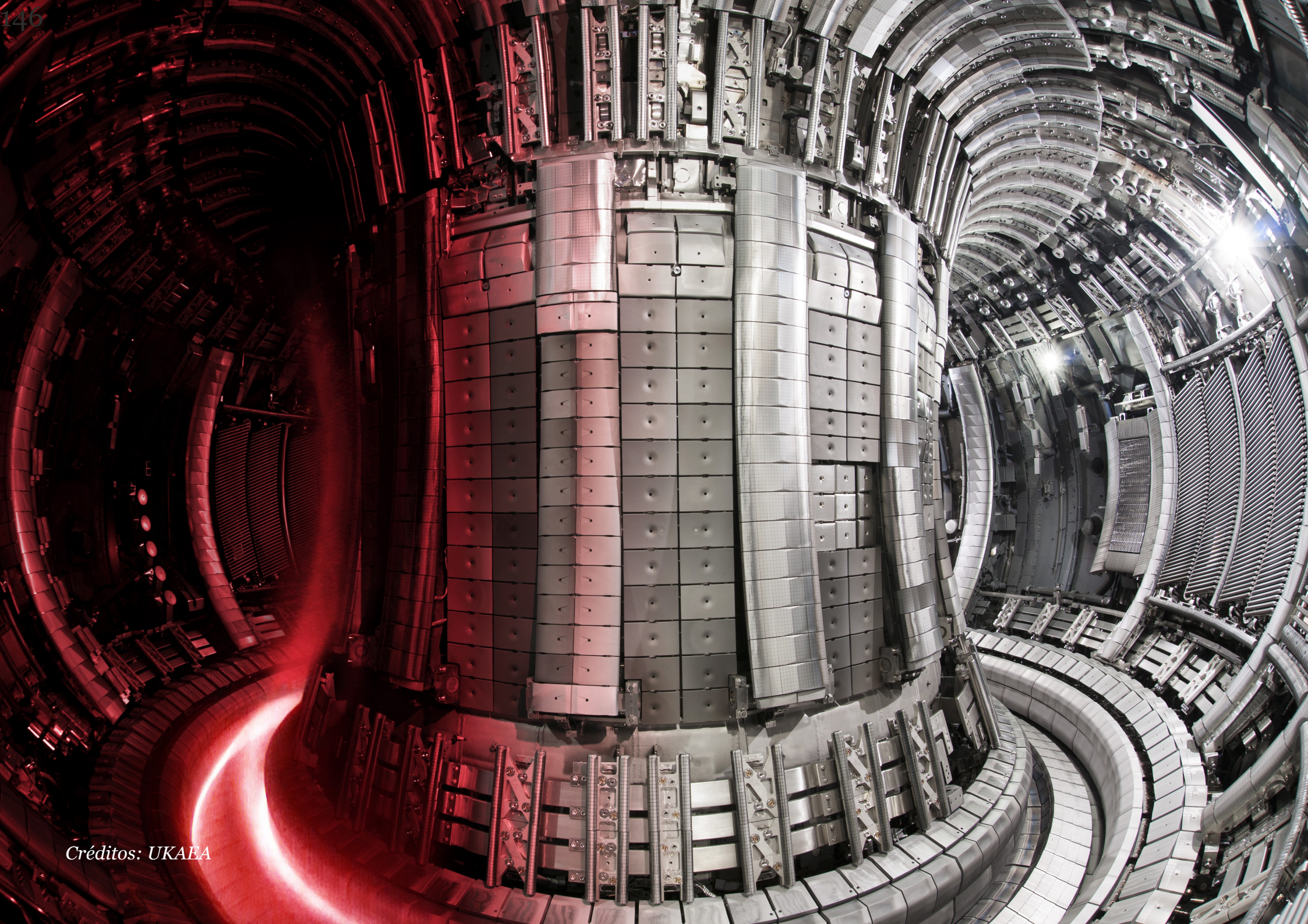


Sistemas auxiliares



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 do plasma está a temperaturas típicas da fusão nuclear (da ordem dos 150 milhões

de °C). 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.



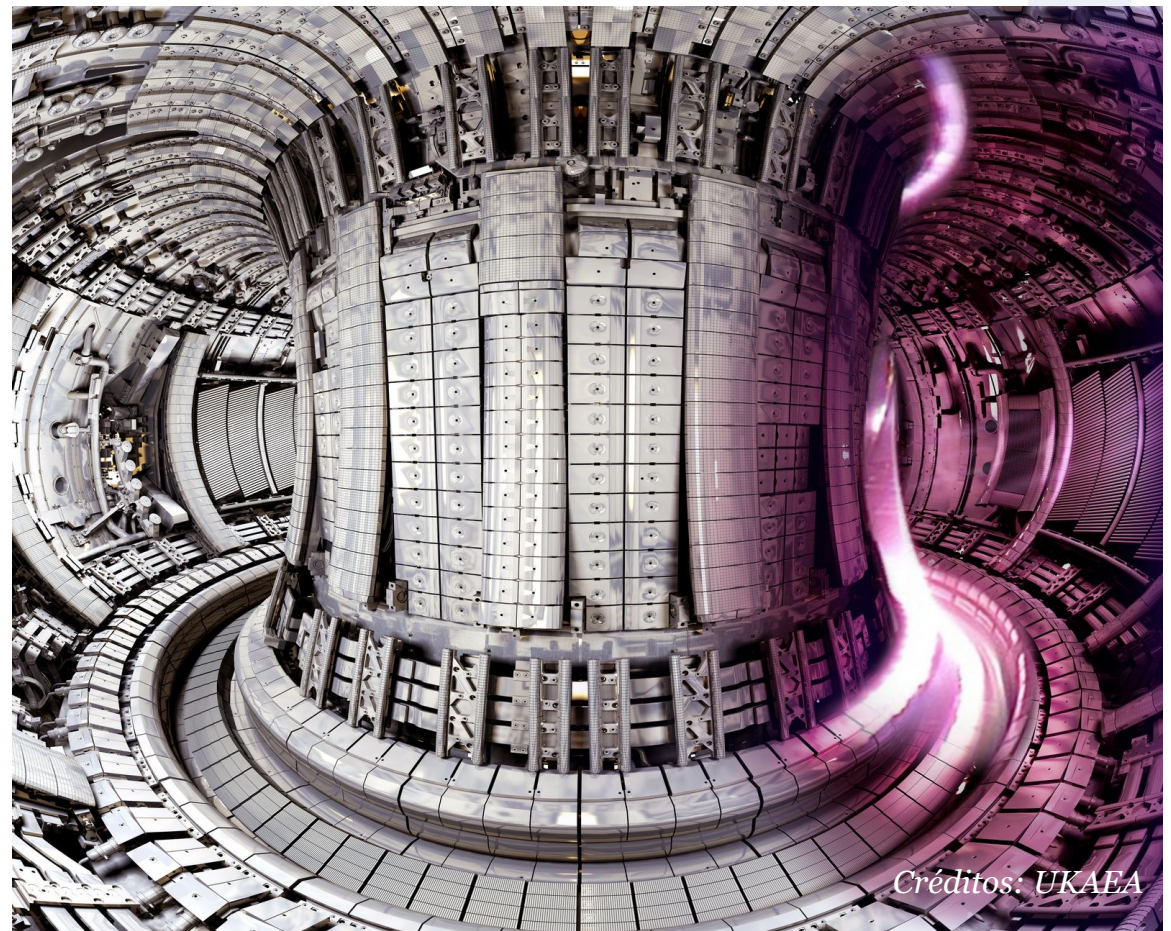
Telha de Berílio do JET derretida após experiências, devido a partículas rápidas do plasma que conseguiram escapar aos campos magnéticos que confinam o plasma(Créditos: UKAEA)

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 utilizado 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

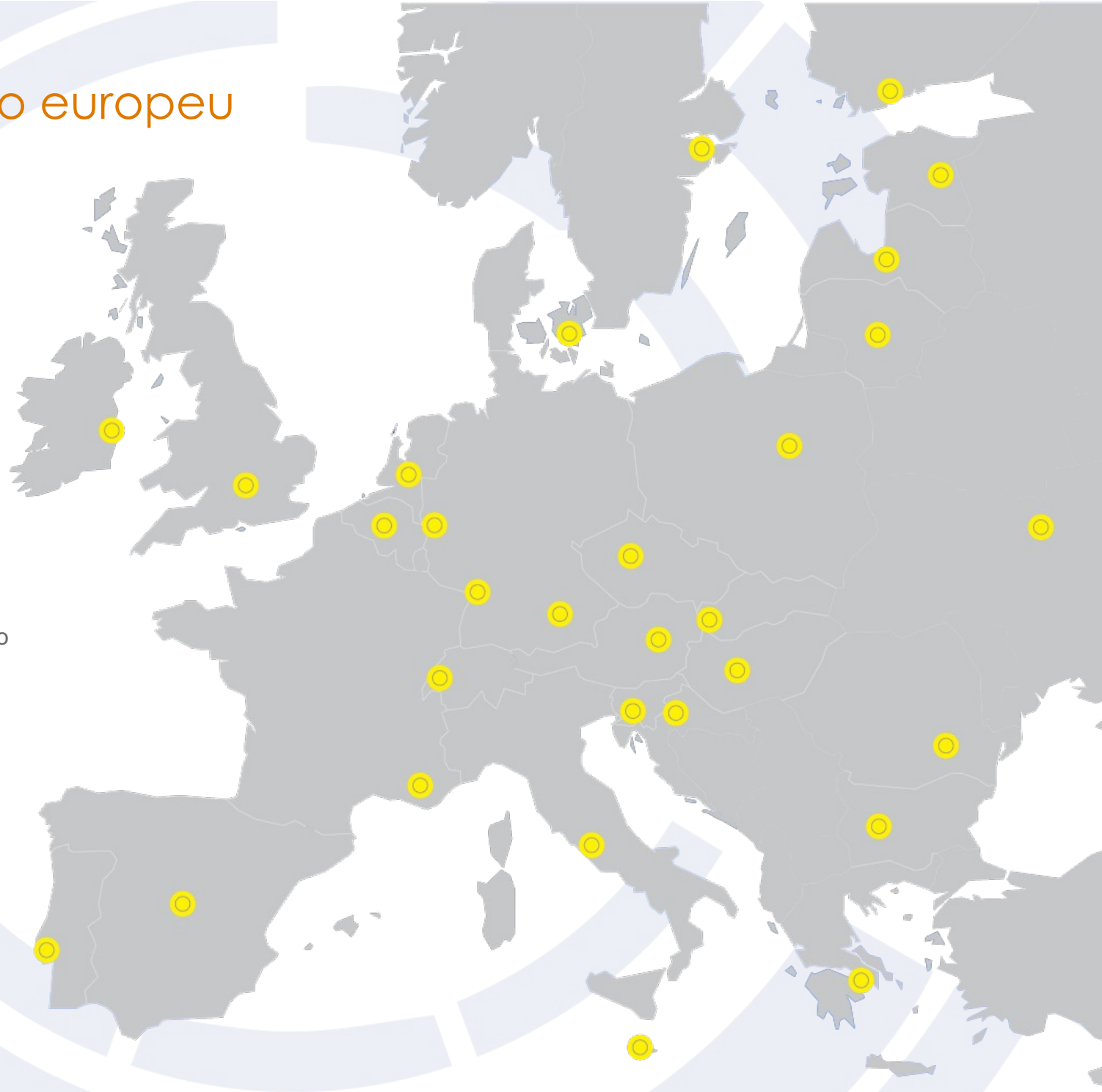


Créditos: UKAEA

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?

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 °C, insuficiente para manutenção das reacções de fusão.

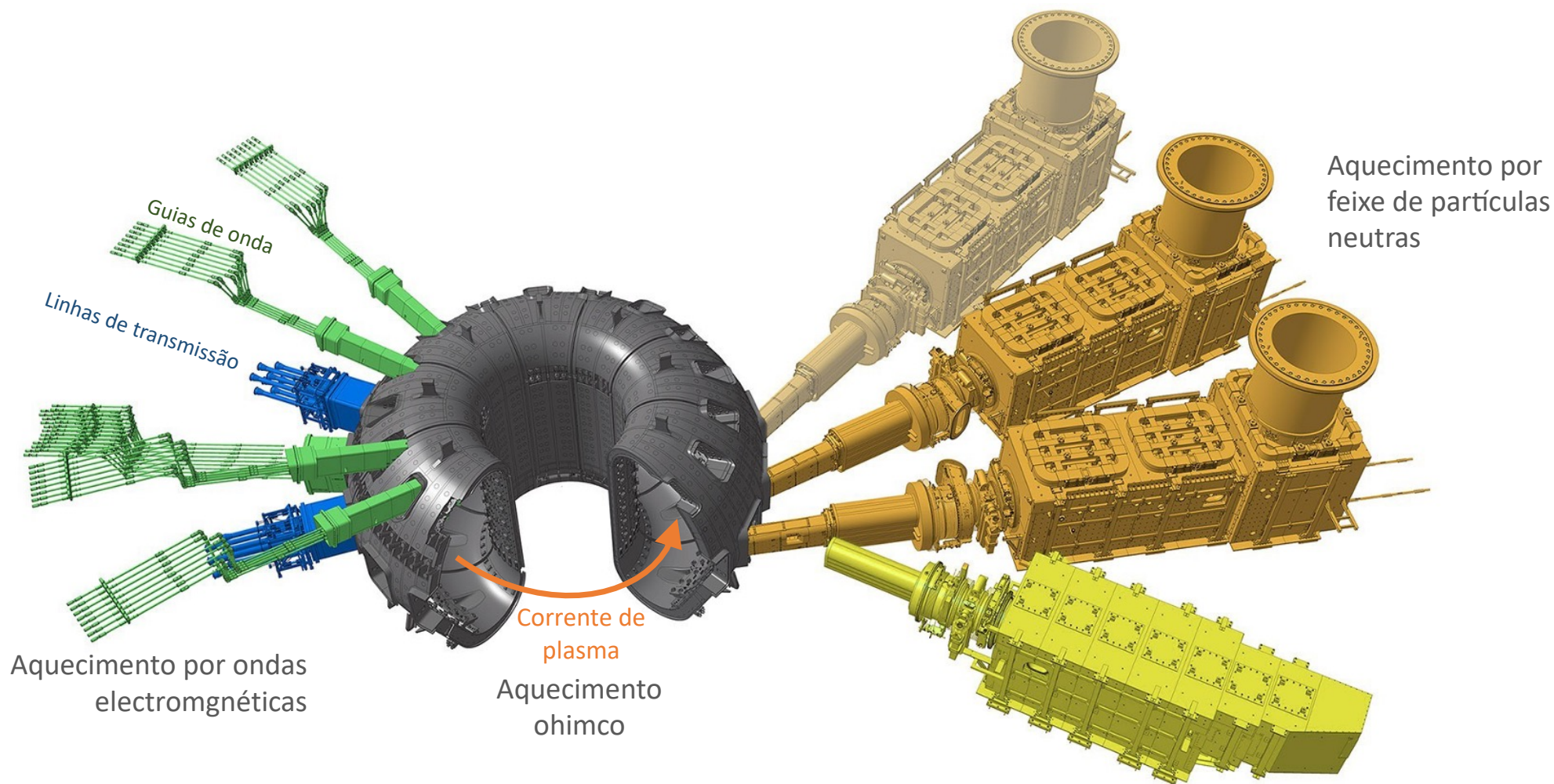
Para que a fusão termonuclear ocorra de forma auto-sustentada num reactor, são necessárias temperaturas do plasma 10 vezes mais elevadas.

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

Na Injeção 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 dum 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.

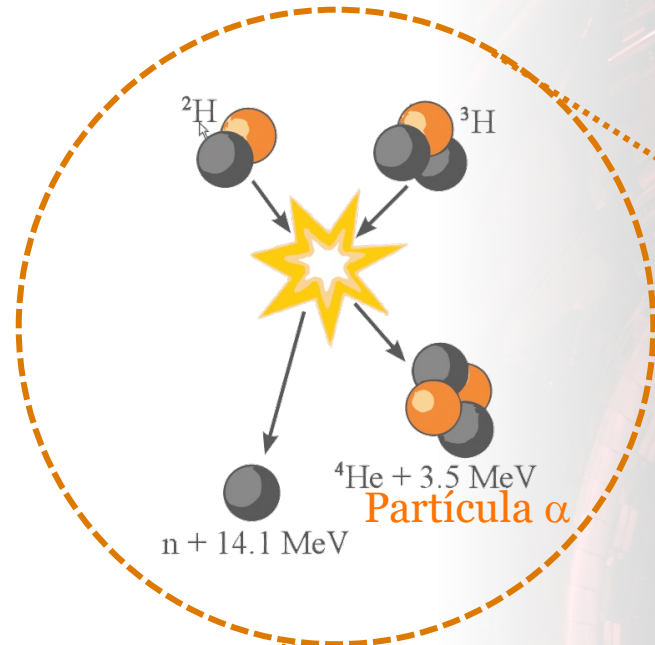
São usadas diferentes fontes de RF: klistrões (até ~ 10 GHz) principalmente para o ICR, girotrões (até algumas centenas de GHz) para o ECR.



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

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 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 duplica o anterior recorde de energia de fusão de 21,7 megajoules obtido em 1997. O resultado surge 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.

Os dados obtidos com estas experiências cruciais 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 DT shot 99971 obtained in 21st
December 2021 (Credit: EUROfusion
consortium)*

Em Dezembro de 2021 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

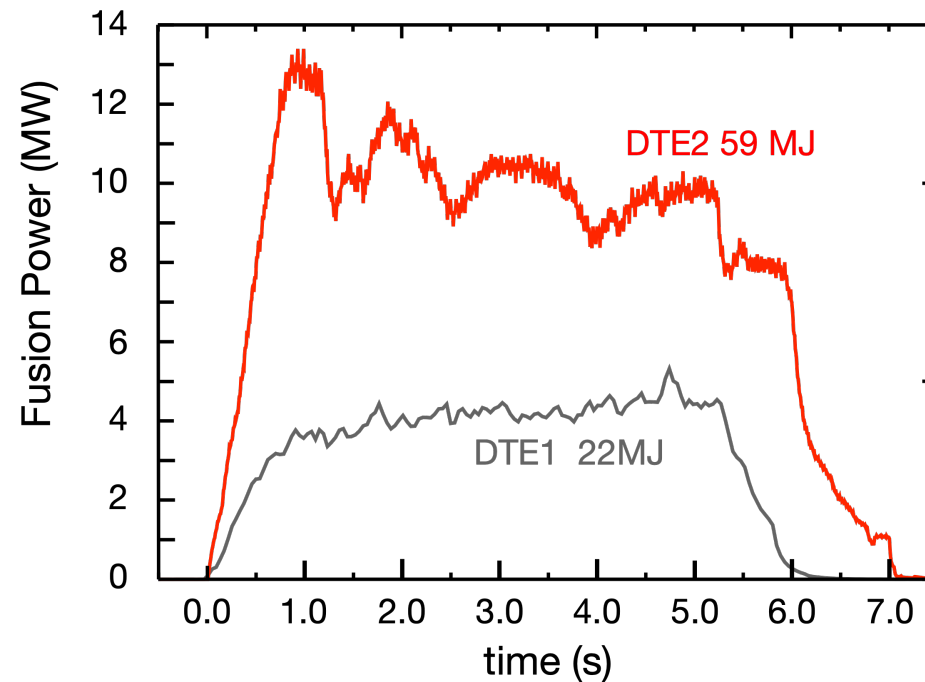
O valor recorde de 59 megajoules de energia de fusão sustentada demonstra o potencial da fusão nuclear

Estes resultados estão completamente alinhados com as previsões, fortalecendo o papel do reactor ITER

Megajoules e Megawatts explicados

Nesta experiência recorde, o JET produziu um total de 59 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). 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.



Fusion output comparison between the 1997 and 2021 records

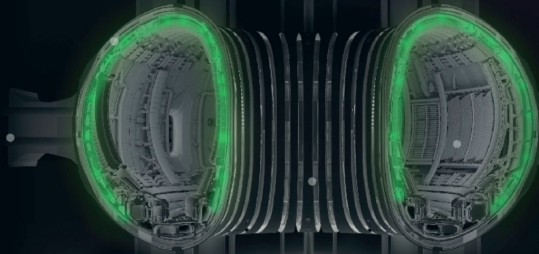


“Um impulso sustentado de fusão baseada na mistura deutério-trítio a este nível de energia – quase à escala industrial – representa uma confirmação avassaladora para todos os que estão envolvidos no esforço global da investigação em fusão. Para o ITER, os resultados do JET dão uma forte confiança de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

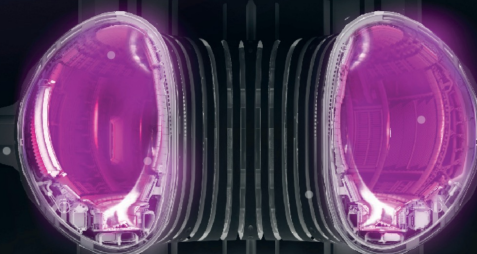
- Dr. Bernard Bigot, Diretor Geral do ITER:

Porque é este resultado importante?

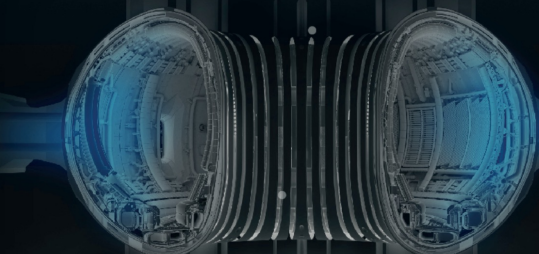
A campanha experimental denominada de DTE2 é a experiência mundial de energia de fusão mais relevante nos últimos 20 anos . Tem como objectivo produzir níveis elevados de energia de fusão de forma sustentada em condições similares à de uma central de fusão por um período de tempo record.



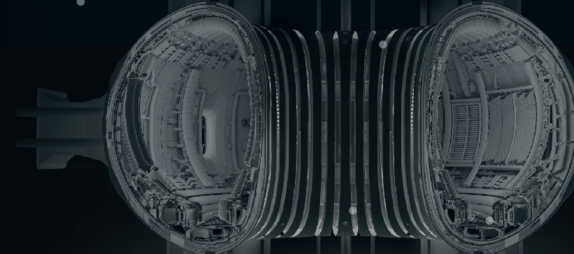
• Testar os materiais usados no ITER para otimizar a performance da operação



• 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

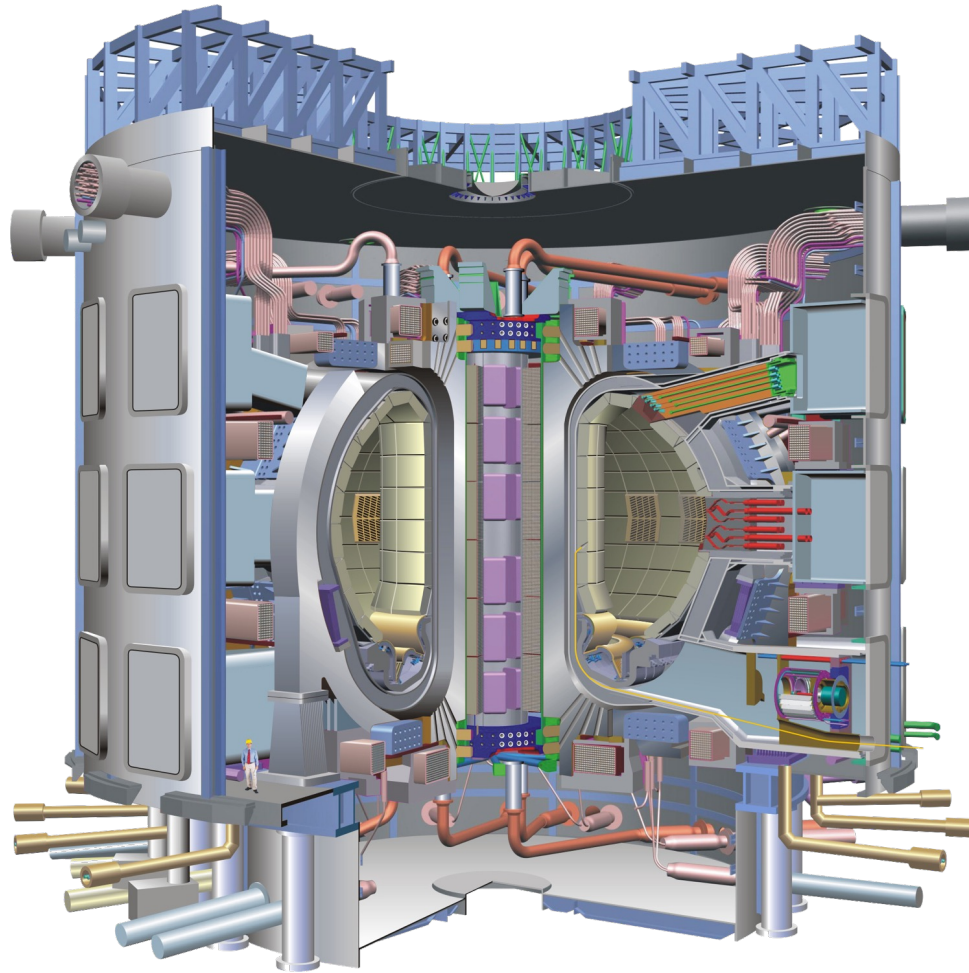


“As Nações Unidas estabeleceram a ação climática como um dos Objetivo de Desenvolvimento Sustentável. Numa altura em que todos nós vemos e vivenciamos em primeira mão os efeitos das alterações climáticas, estes resultados demonstram a urgência de encontrar soluções alternativas para este problema, e 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*

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

Assembly Hall

Torus Hall

Créditos: ITER



O complexo do ITER

No coração das instalações científicas dos ITER está o complexo do tokamak, um edifício 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 mais 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 edifício necessitou de 16000 toneladas de vigas, 150000 m³ 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.



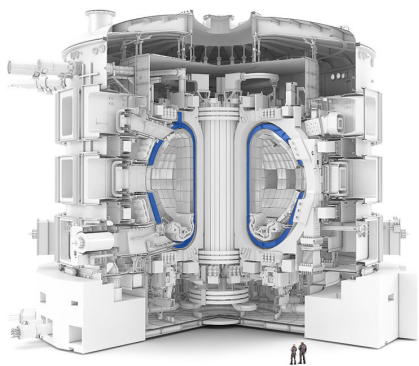
O complexo do tokamak é uma estrutura qualificada para aplicações nucleares com betão reforçado com uma estrutura de aço muito apertada (na fotografia)



Créditos: ITER

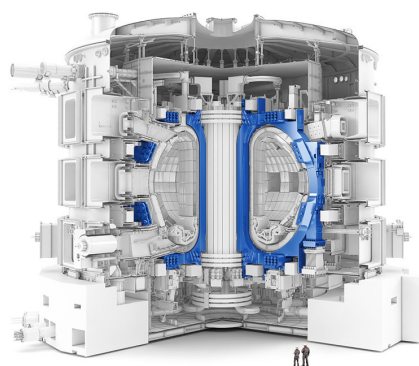
O poço do tokamak ITER é onde está instalado o tokamak. A estrutura circular à volta é o escudo biológico feito de betão com paredes de até 3,2 metros de espessura

Anatomia do ITER



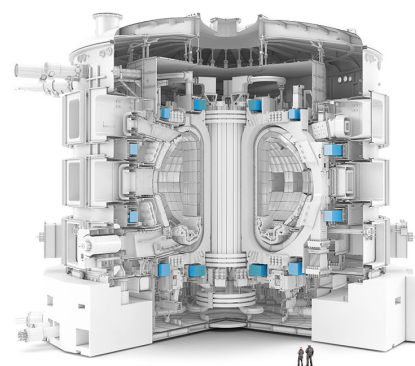
Câmara de Vácuo

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

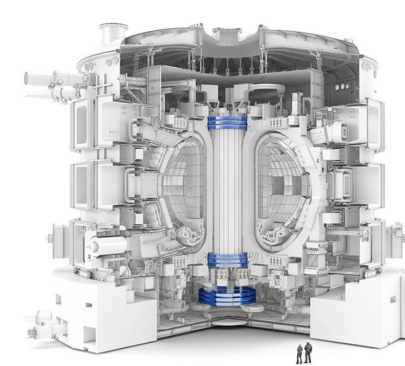
Um total de 18 bobines toroidais irão operar no ITER para criar uma potente gaiola magnética para confinar o plasma ultra-quente. Quando energizada com corrente (68 000 A) o campo magnético atingirá os 11.8 T – cerca de 250000 vezes o campo magnético da Terra!. Cada bobine mede 17x9 m e pesa 320 toneladas..



Bobines Poloidais

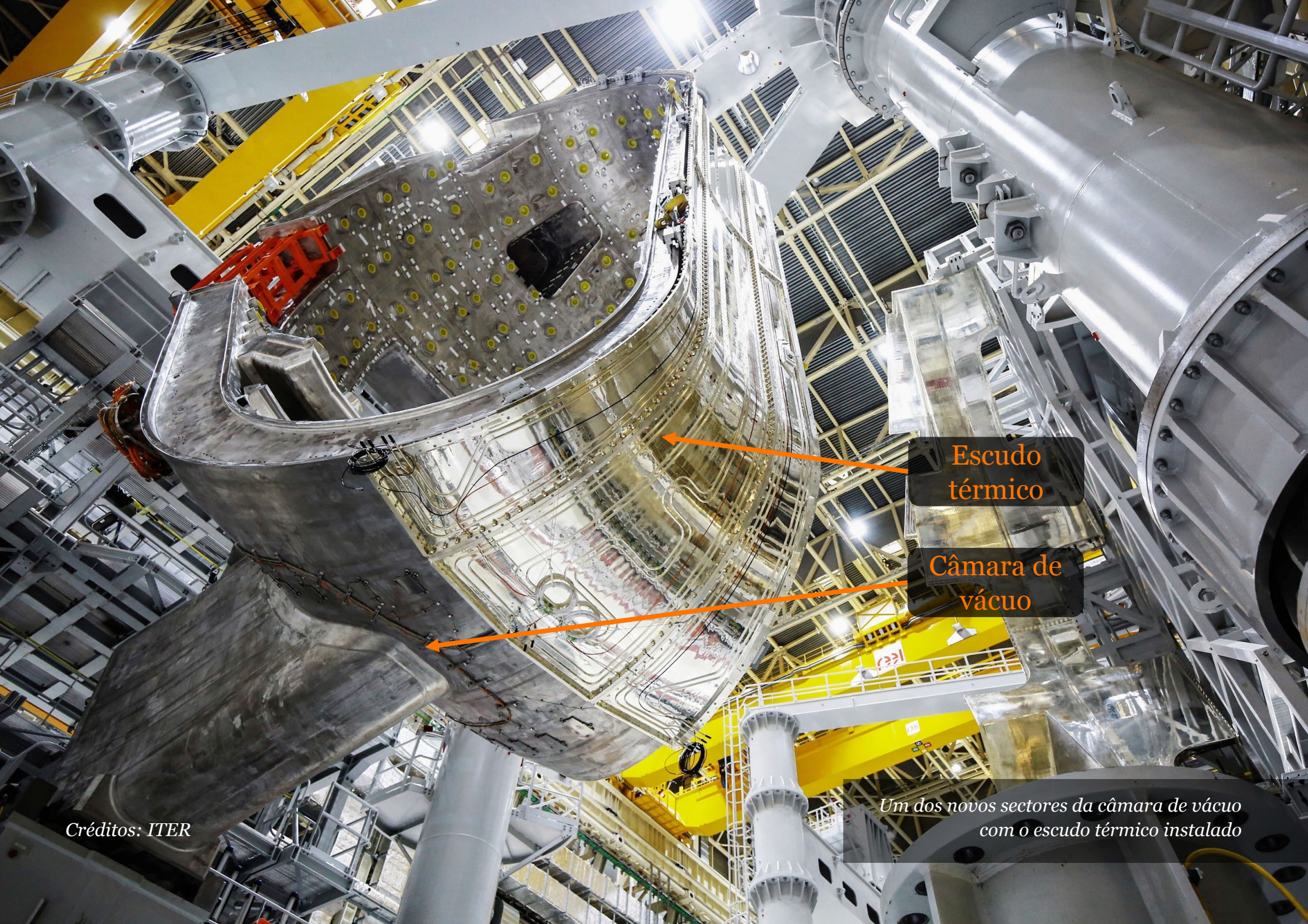
O ITER irá operar com 6 bobines toroidais, que asseguram a forma e estabilidade do plasma ultra-quente.

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 inferior. 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.

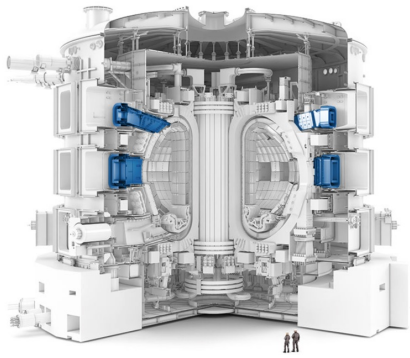


Escudo
térmico

Câmara de
vácuo

Créditos: ITER

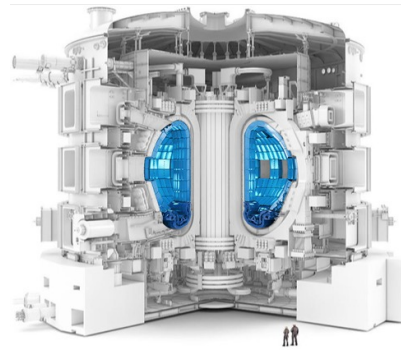
Um dos novos sectores da câmara de vácuo
com o escudo térmico instalado



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.

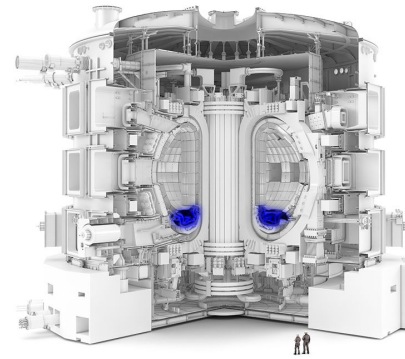
O ITER Terá cerca de 50 diagnósticos que oferecerão um visão sem paralelo do plasma e garantirão uma operação suave do dispositivo.



Parede

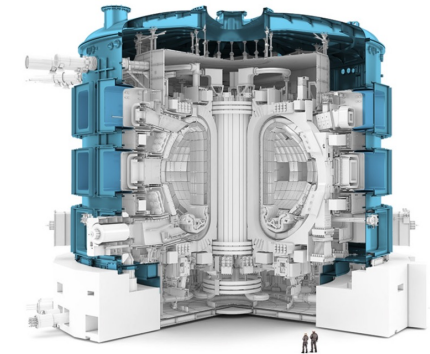
As temperaturas extremamente quentes das reacções de fusão serão sentidas pelos componentes que estão no interior da câmara de vácuo, também conhecidos como “plasma facing components”, devido à sua exposição a um calor e fluxo de neutrões elevados. .

A parede consiste de 440 módulos, que cobrem a parede da câmara de vácuo.



Diversor

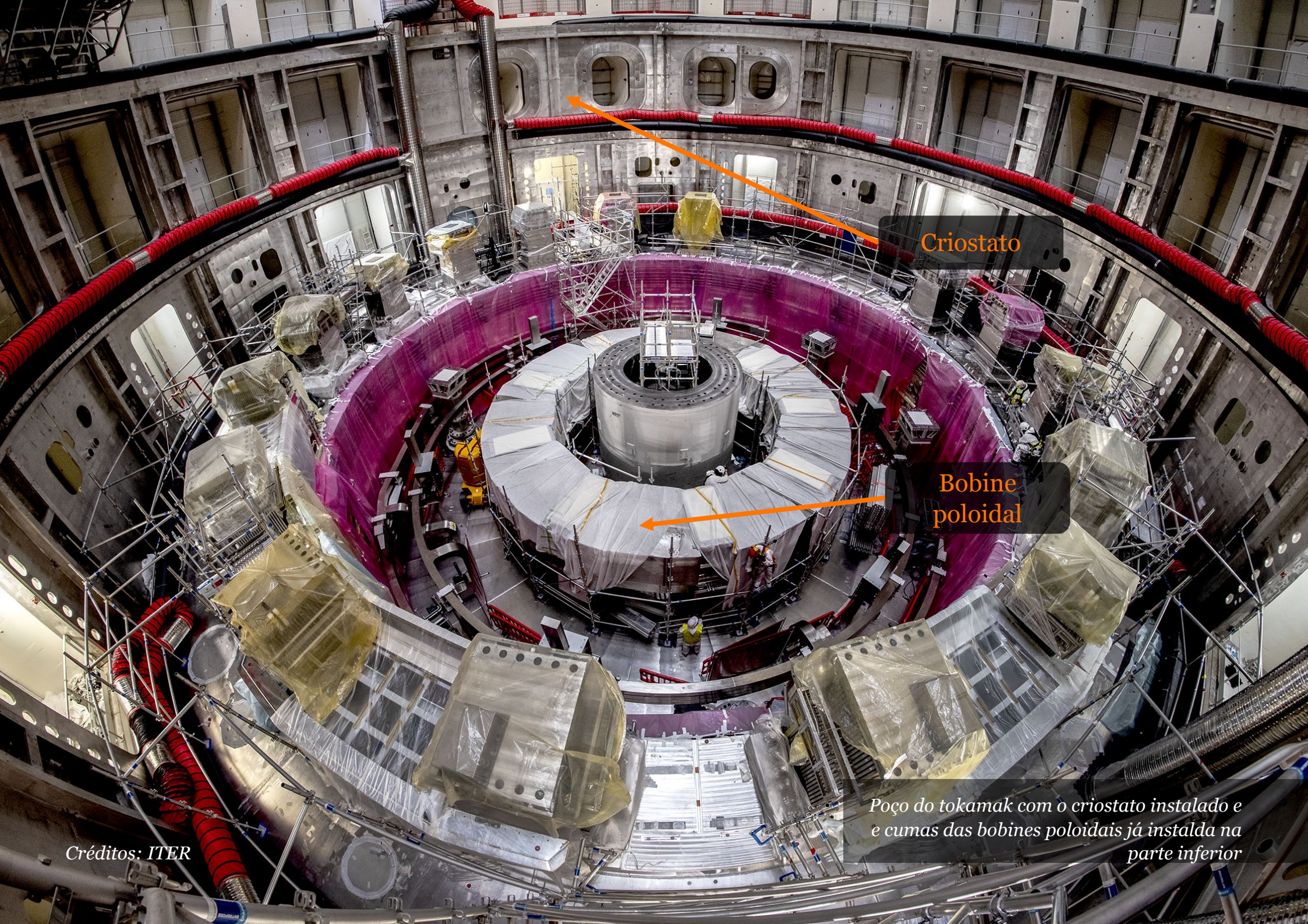
Quando o ITER estiver em operação os gases resultantes da reacção de fusão serão bombeados com o auxílio de 6 bombas criogénicas pela parte inferior do reactor onde se encontra o diversor. O diversor consiste de 54 cassetes, localizadas na parte inferior da câmara de vácuo.



Criostato

O ITER estará sujeito a variações extremas de temperatura. Dentro das bobinas magnéticas circulará Hélio líquido para abaixar a sua temperatura até aos $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os escudos térmicos das bobinas 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.



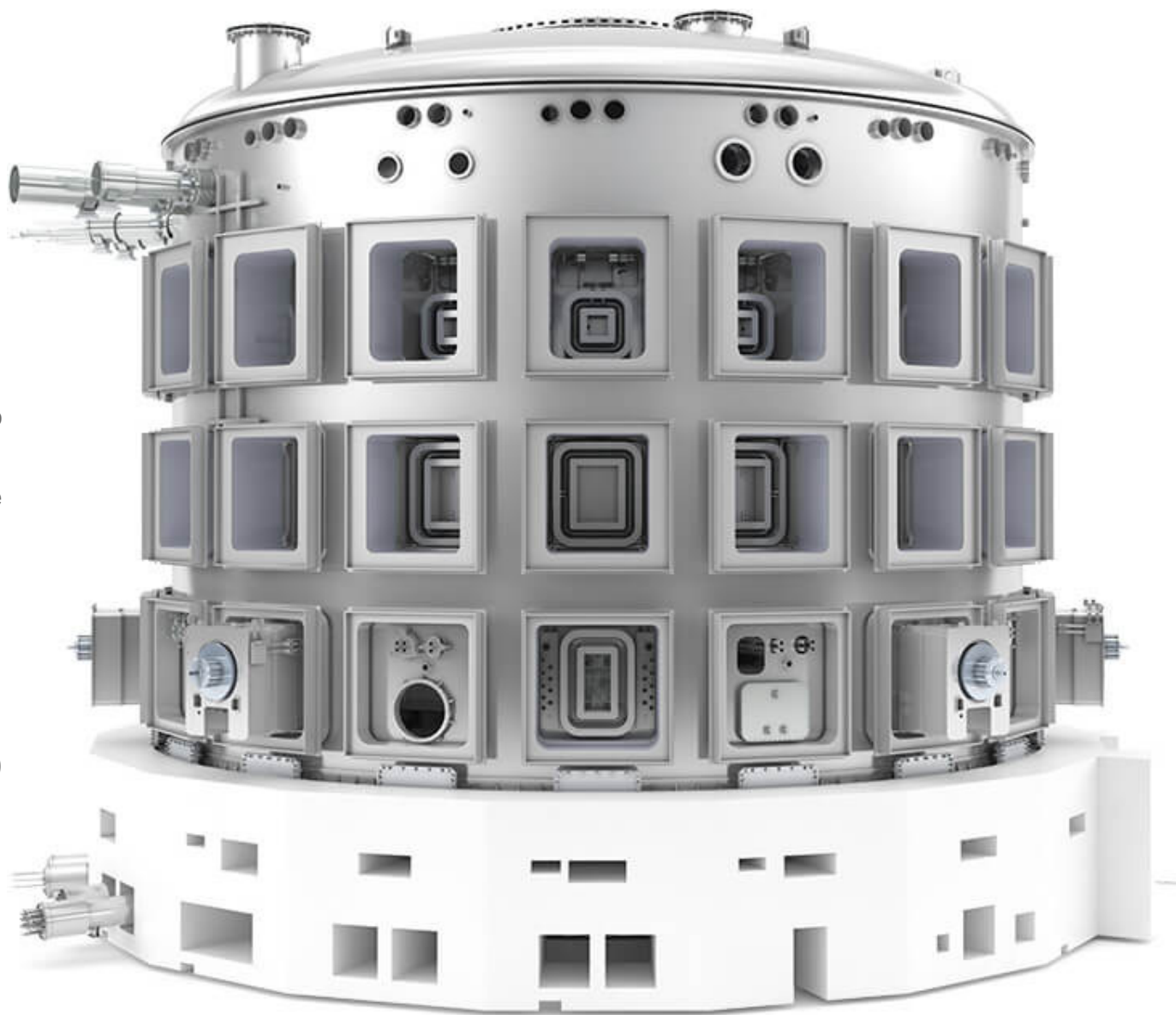
Criostato

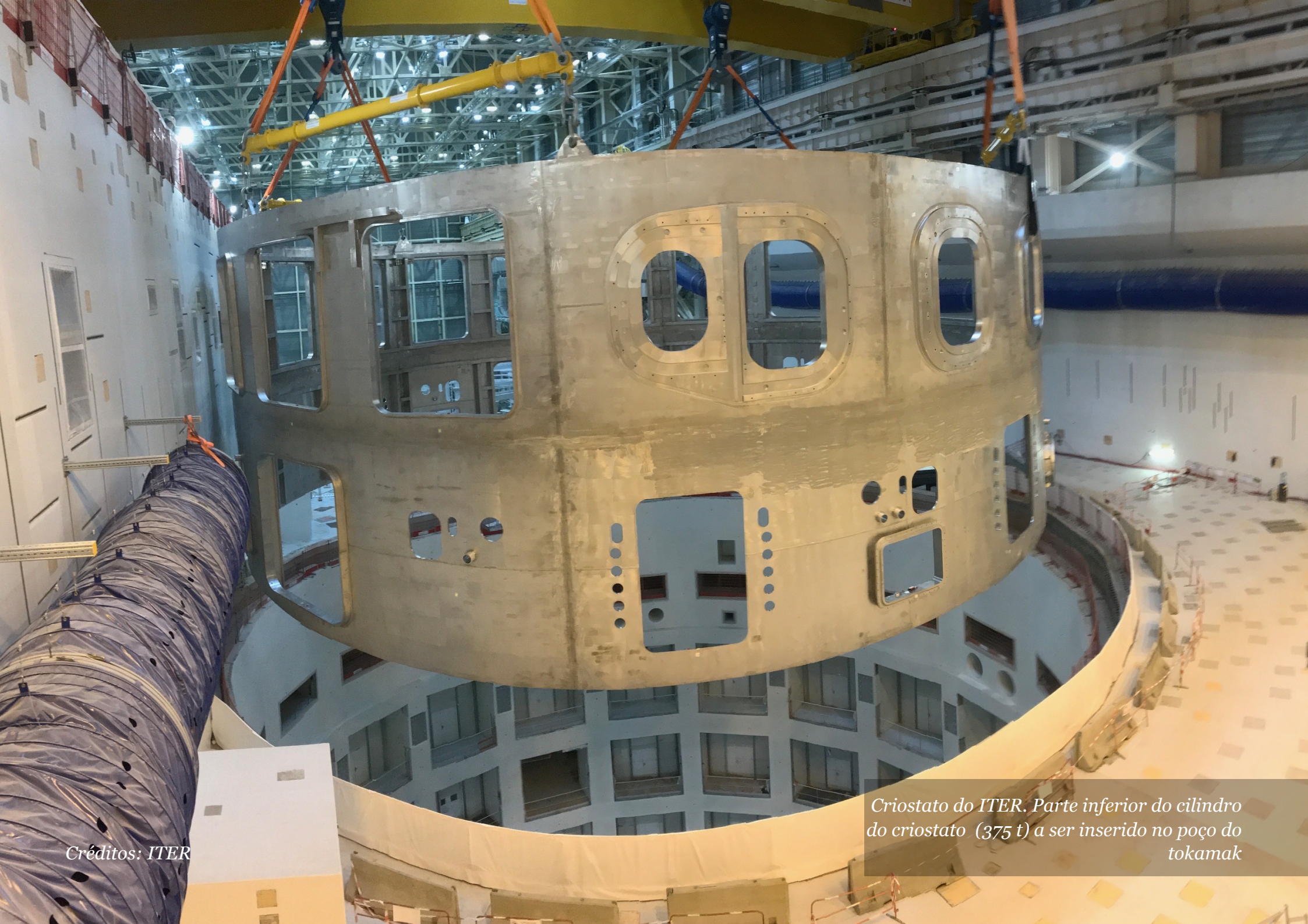
Bobine poloidal

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

O criostato de 29 m x 29 m envolve completamente a câmara de vácuo e as bobinas supercondutoras. O criostato tem duas funções: providenciar um ambiente de vácuo a componentes críticos (as bobinas 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.

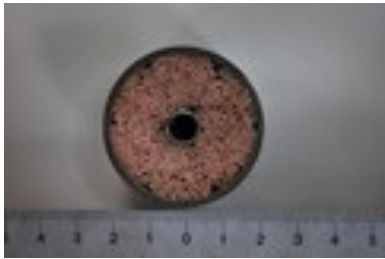




Créditos: ITER

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 Niobídeo-Estanho (niobium-tin, Nb₃Sn) necessárias para as bobinas toroidais



360 t

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



23,000 t

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



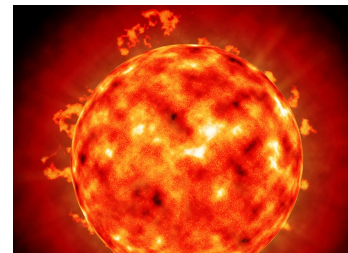
360,000 t

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



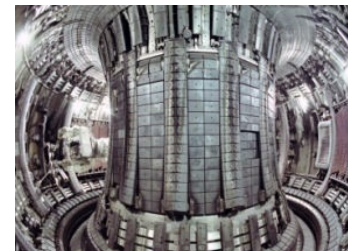
10⁷ componentes

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



150 milhões °C

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



840 m³

Mais de 10 vezes o volume do JET



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 bobinas toroidais do ITER
(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 reacções 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

A fusão não partilha da insegurança associada à fissão nuclear não havendo o risco de ser uma descarga descontrolada, pelo que não há nenhum risco de incidentes como Chernobil ou Fukushima.

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 reator de fusão nuclear, pode ocorrer uma disrupção, libertando instantaneamente uma quantidade significativa de energia em direcção das paredes mas a reação extingue-se

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.



*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

O reactor de DEMOnstração, 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 pra 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. O desenho deste tipo de infraestrutura requer que se tenha em consideração, não só os requisitos da física, mas também as limitações de engenharia e tecnológicas.

O desenho do DEMO melhor documentado é o da União Europeia, cujo desenho conceptual tem vindo a ser desenvolvido pela EUROfusion. Os requisitos para o DEMO

apontam para a capacidade de produzir electricidade e colocar na rede de distribuição eléctrica uma potência de 300 a 500 MW. Um outro aspecto importante deste reactor 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.

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 divisor 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.

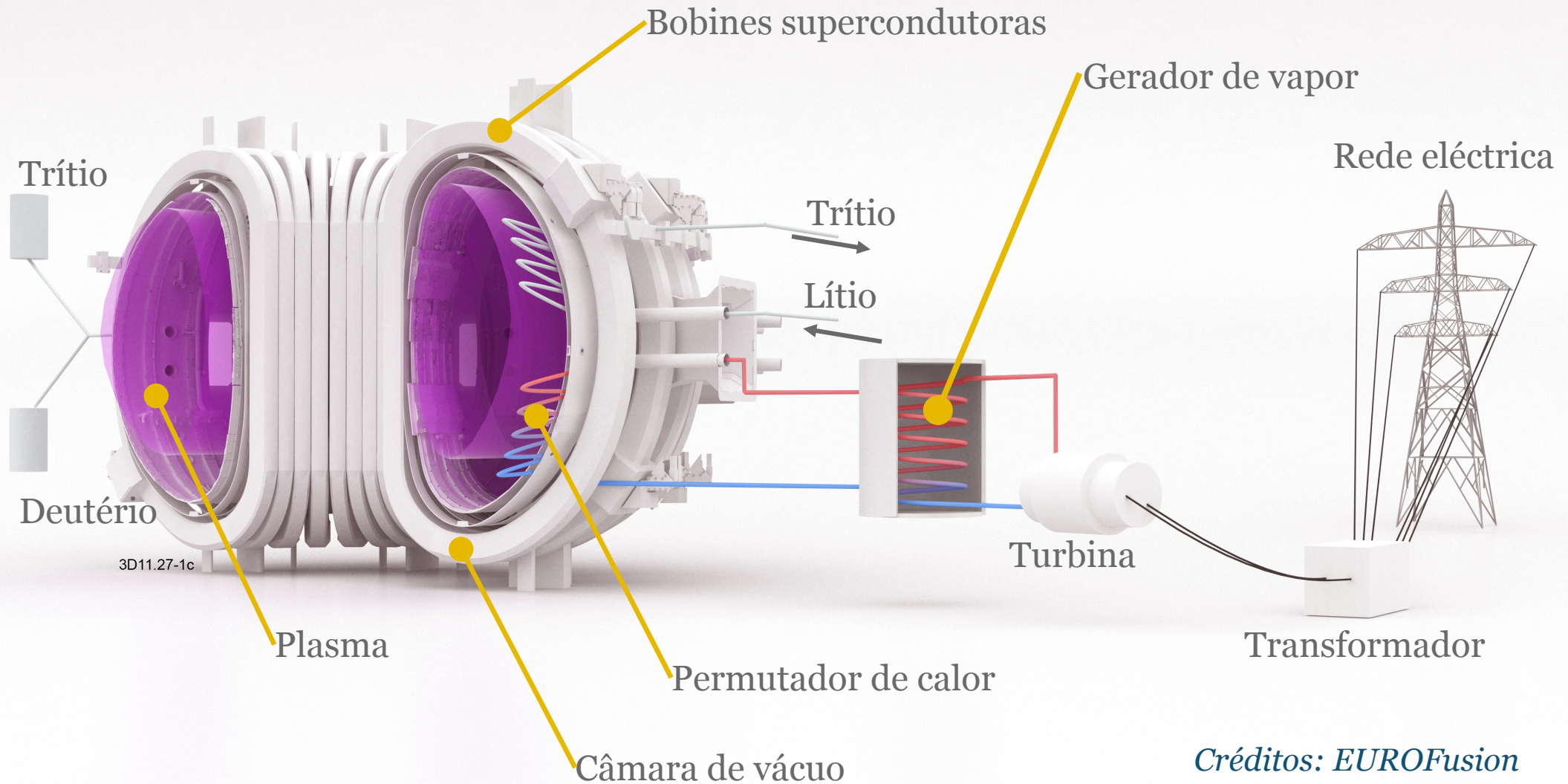
- Escolha da duração de pulso mínima e dos sistemas de aquecimento adequados
- Desenho para que todas as actividades de manutenção possam ser efectuadas remotamente através de manipuladores
- Incorporação de requisitos de segurança nuclear desde a fase de desenho conceptual do reactor

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.

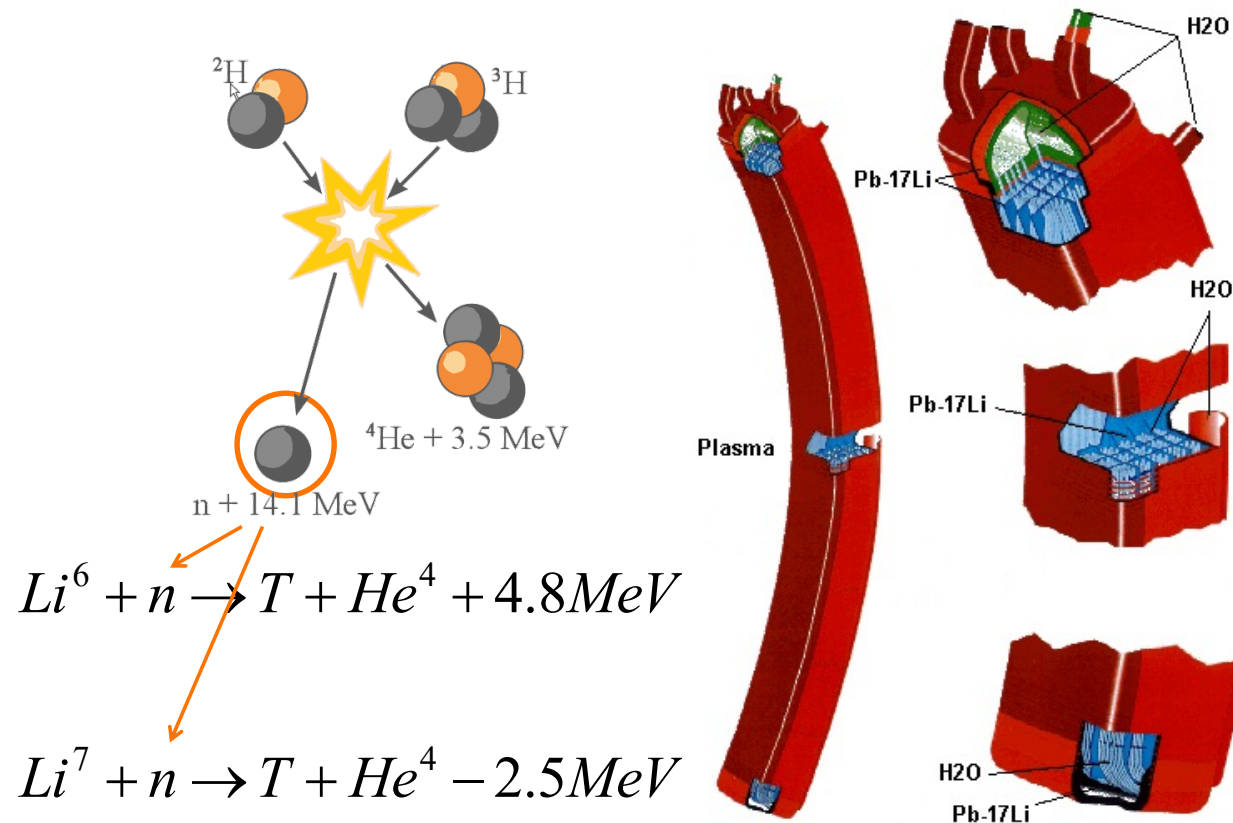
Central eléctrica de fusão nuclear

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



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 .



Desenho conceptual do "Tritium Breeding Blanket" e as reacções 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

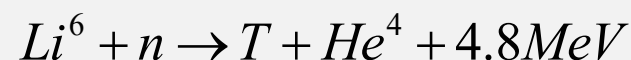
reacção de fusão é essencial para futuros reactores de larga escala para produção de electricidade. No caso do ITER, o Trítio usado será adquirido do inventário mundial para ser usado nos 20 anos de operação. O ITER providenciará uma oportunidade única para testar o conceito do “Breeding Blanket” denominados “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 “Breeding 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 Lítio 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?



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?

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.

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.

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-

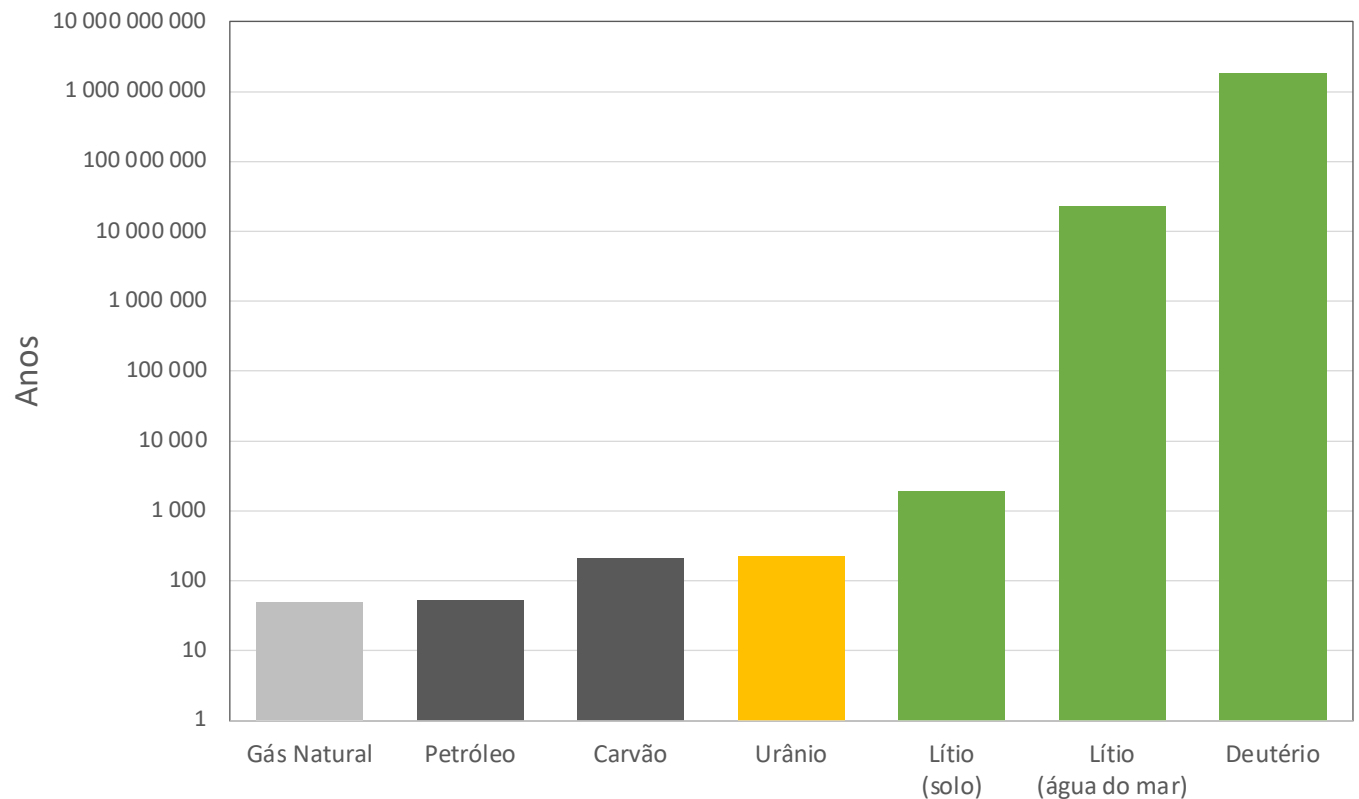
Deutério é limitada apenas pela quantidade de deutério nos oceanos. A forma mais simples de fusão, usando o Lítio extraído de minérios, poderá durar até quase 2000 anos mesmo assumindo que 1/3 da procura mundial de electricidade estimada para 2100 é suprida recorrendo à fusão nuclear. Usando o mesmo 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 fusão 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”.



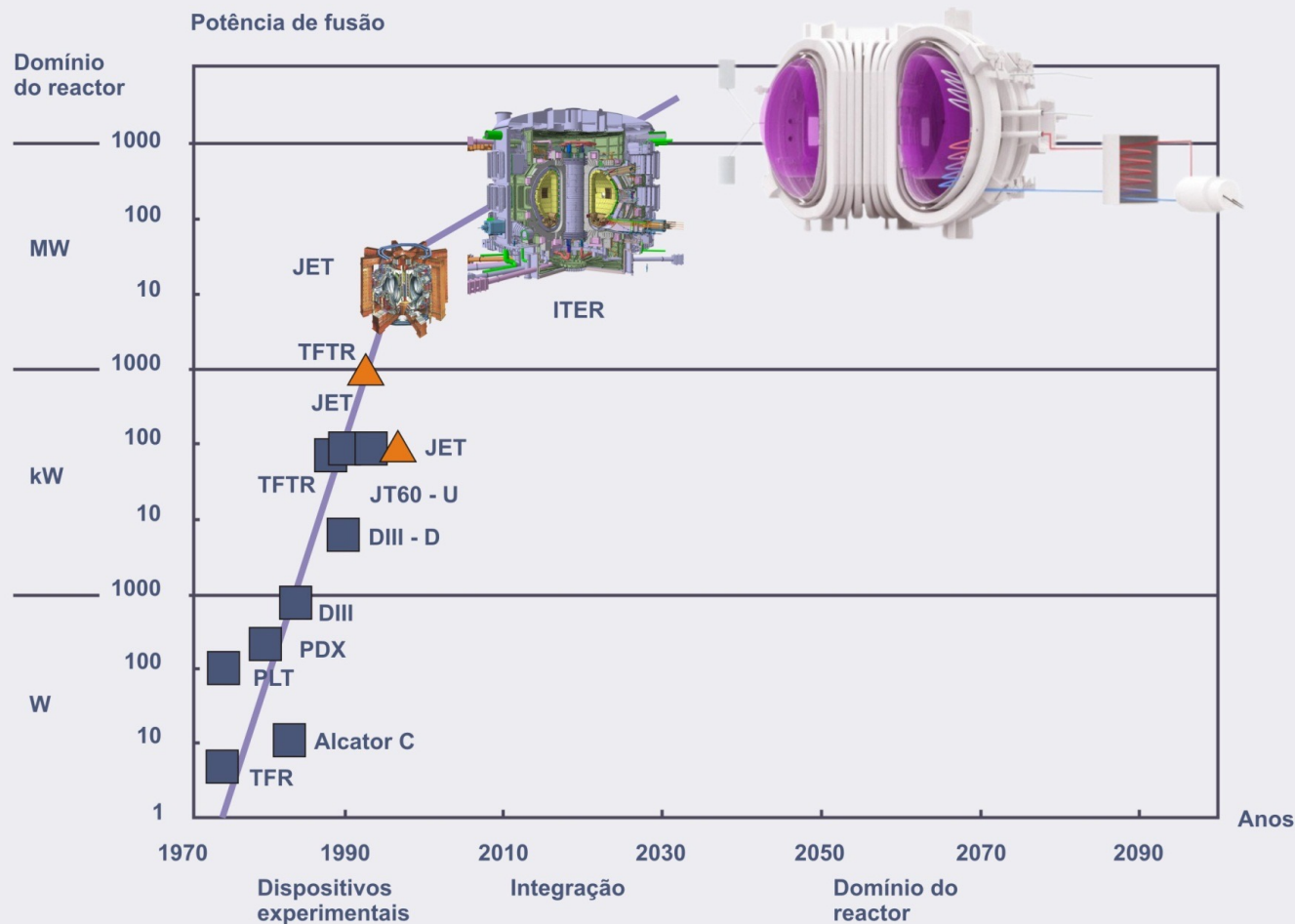
Quando teremos energia de fusão?

A investigação em fusão nuclear sofreu avanços significativos ao longo das últimas 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

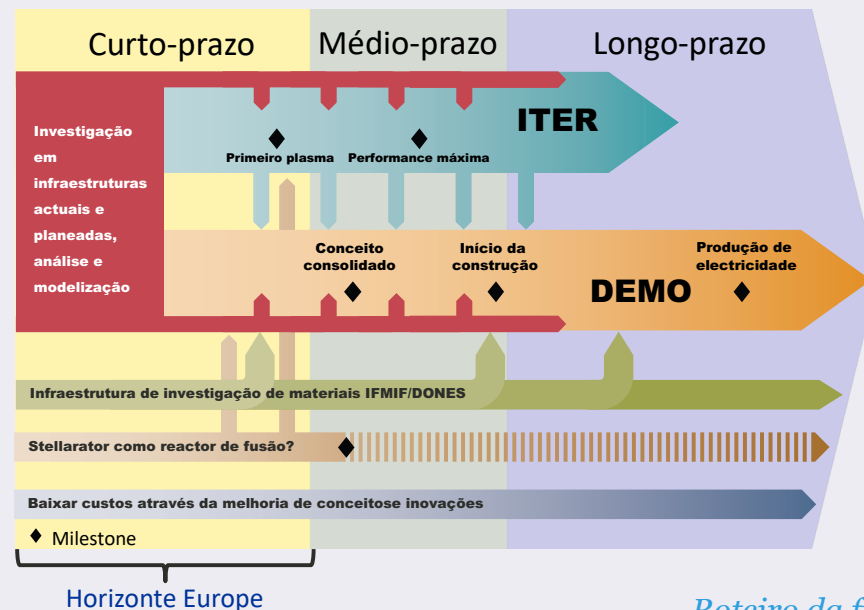
- Construção do ITER
- Investigação e Desenvolvimento em apoio do ITER
- Operação Deutério- Trítio no JET
- Desenho conceptual do DEMO
- Investigação e Desenvolvimento para o DEMO
- Construção duma infraestrutura de testes d materiais, IFMIF-DONES
- Exploração científica e tecnológica do conceito stellarator

Médio-prazo

- Primeira exploração científica e tecnológica do ITER
- Primeira exploração do IFMIF-DONES
- Fase de design de engenharia do DEMO com envolvimento industrial
- Desenvolvimento 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

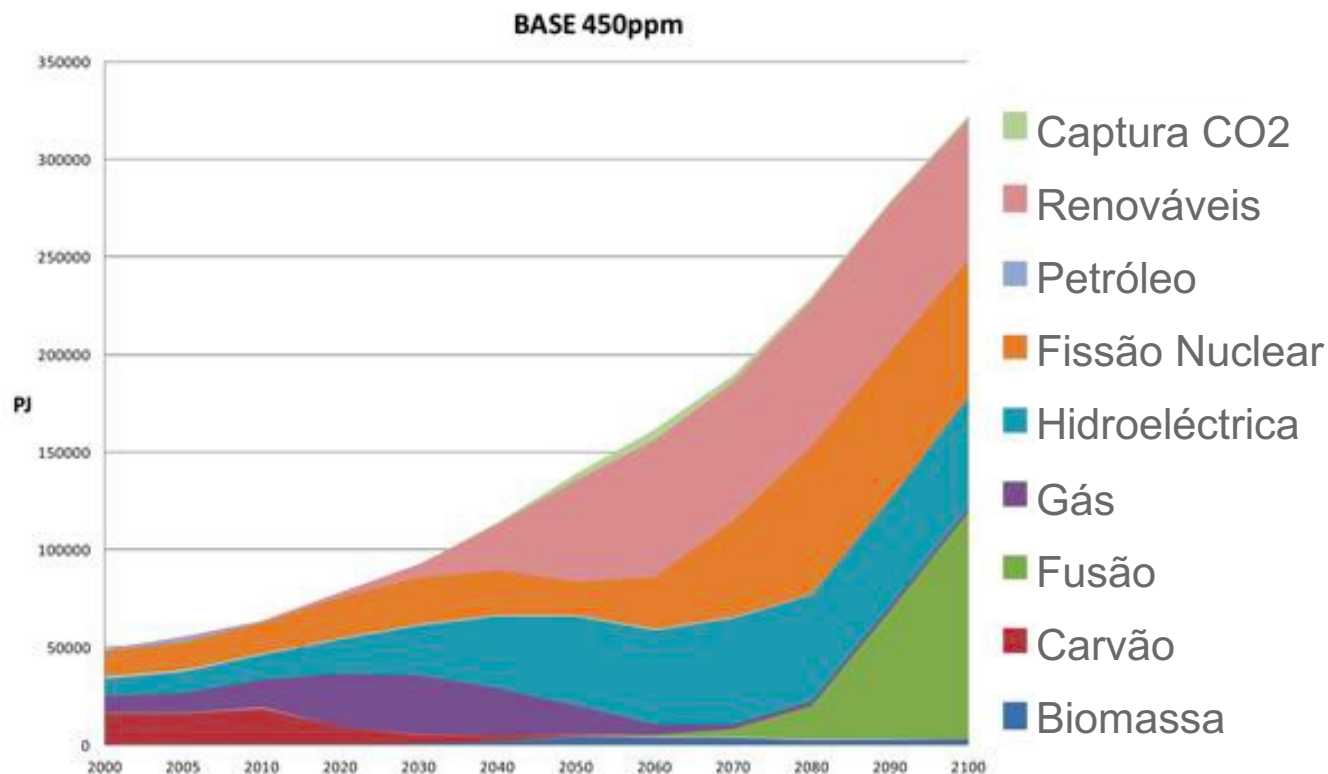


Roteiro da fusão estabelecido pela Eurofusion

Quando é que a fusão nuclear vai estar pronta?

As simulações da penetração da energia de fusão no mercado prevêem 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.



Simulação da penetração da energia de fusão no mercado assumindo emissão de CO₂ limitada a 450ppm, (H. Cabal et al 2012)

Novos conceitos

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 cm³), 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 fluido 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

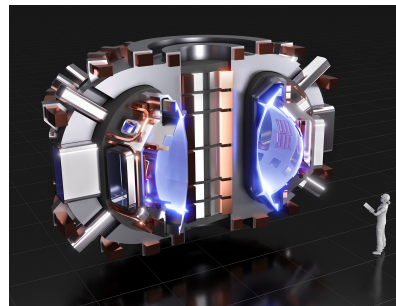
aceleradores de plasma para acelerar dois plasmas entre si e, em seguida, aquece-os com feixes de partículas.

Podemos esperar deste redobrado interesse e investimento em novas ideias e novos avanços que concretizem o presságio de um

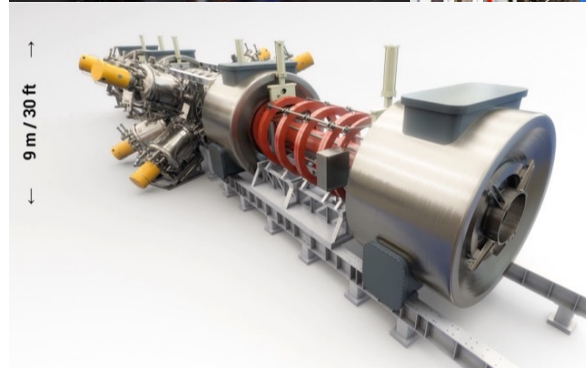
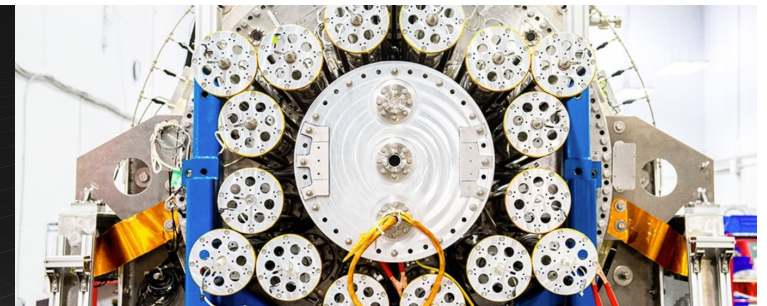
dos cientistas fundadores da investigação em fusão nuclear, Lev Artsimoch:

“Fusion will be ready when society needs it”

SPARC



General Fusion



TAE Technologies



First Light Fusion

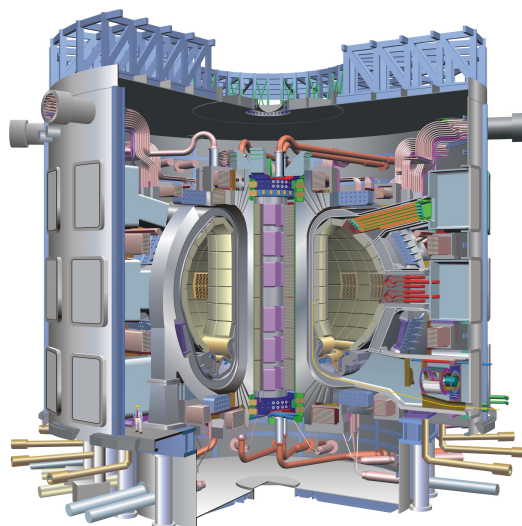
Existem vários conceitos alternativos a serem exploradas com recurso a investimento privado

Ideias a reter

4

Notas finais

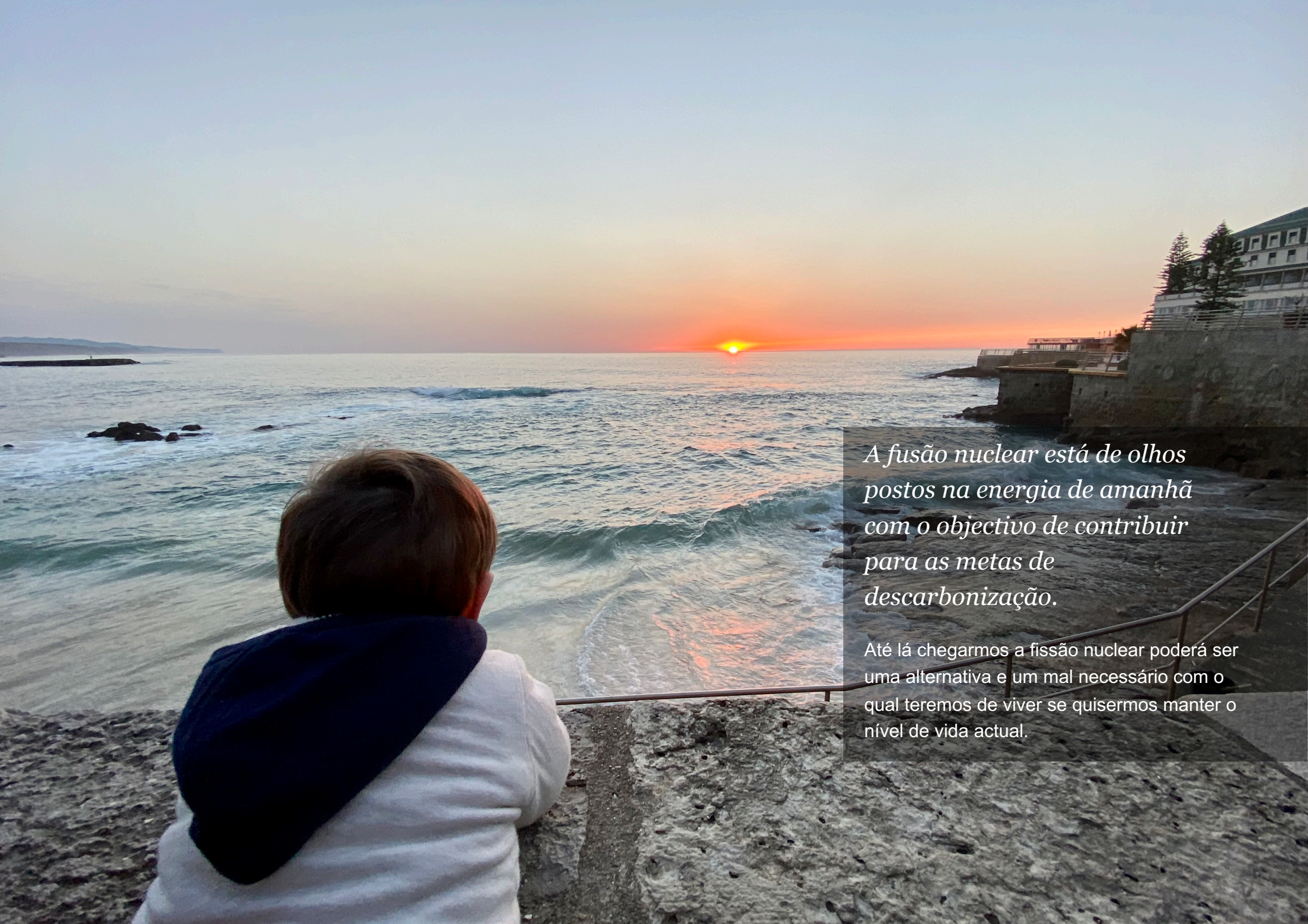
Nem toda a energia nuclear é má. A fusão nuclear é o mais próximo possível de energia nuclear amiga do ambiente. Progressos científicos significativos abrem a perspectiva de um futuro próspero e com energia barata, ilimitada e segura. A possibilidade de que a energia que chega às nossas casas possa vir 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. 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.

Recentemente a Comissão Europeia tenha 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 França empurram a ideia de que o nuclear é verde,

por causar emissões mínimas de gases com efeitos de estufa. Outros, como a Alemanha, veem-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 radioativos 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 milhares de milhões de euros em fundos europeus, ao longo dos próximos anos.



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 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

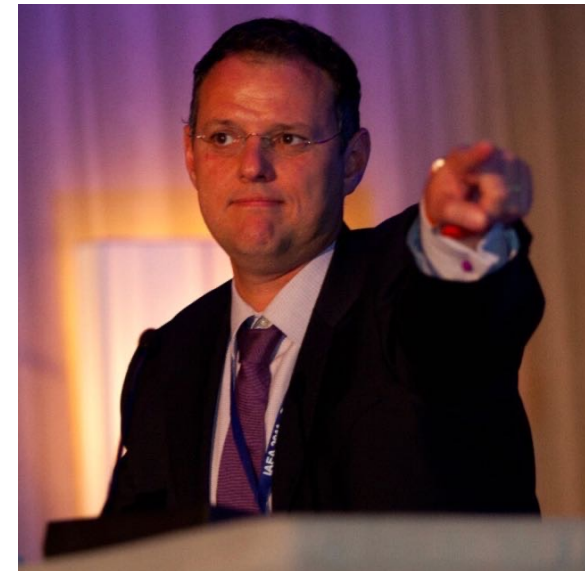


Facebook:
[IPFNLA](#)



LinkedIn:
[ipfn](#)

*Se quiser contactar
o Bruno:*



LinkedIn:
[bruno-soares-goncalves-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 2021
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

Nuclear 2.0: Why a Green Future Needs Nuclear Power, Mark Lynas

*Recursos online**

Página do ITER: www.iter.org

Página 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 Fevereiro 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 Principal com Habilitação 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.

