



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:
1.0, Fevereiro 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 eletricidade 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?*

- + *Conjunto de algumas ideias para 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, sobre energia, sobre o nuclear e sobre a fusão nuclear e sou 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 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 insegurança mas a



A energia do futuro
não vem dos

recursos



vem
do

conhecimento

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) e de que forma estas energias nucleares são diferentes mas como poderão ambas contribuir para a descarbonização. 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 eficiência energética ou a quantidade de electricidade que será produzida. Grande 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 curiosidade suficiente 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

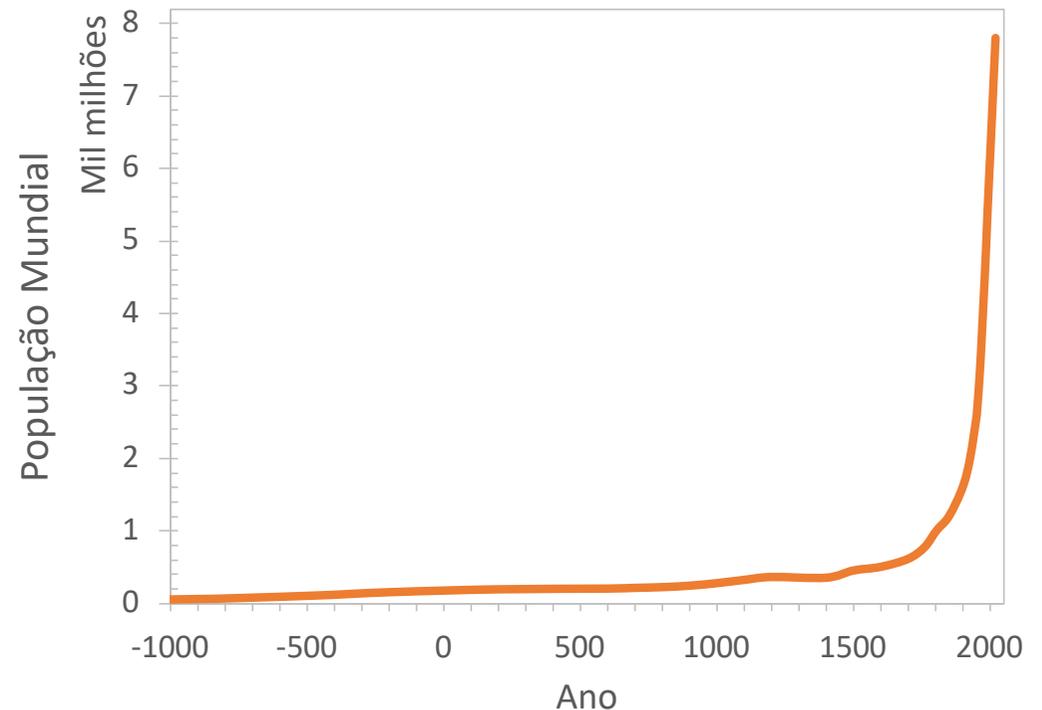


Fontes de energia seguras e sustentáveis são essenciais para manter um nível de vida adequado para toda a população mundial

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

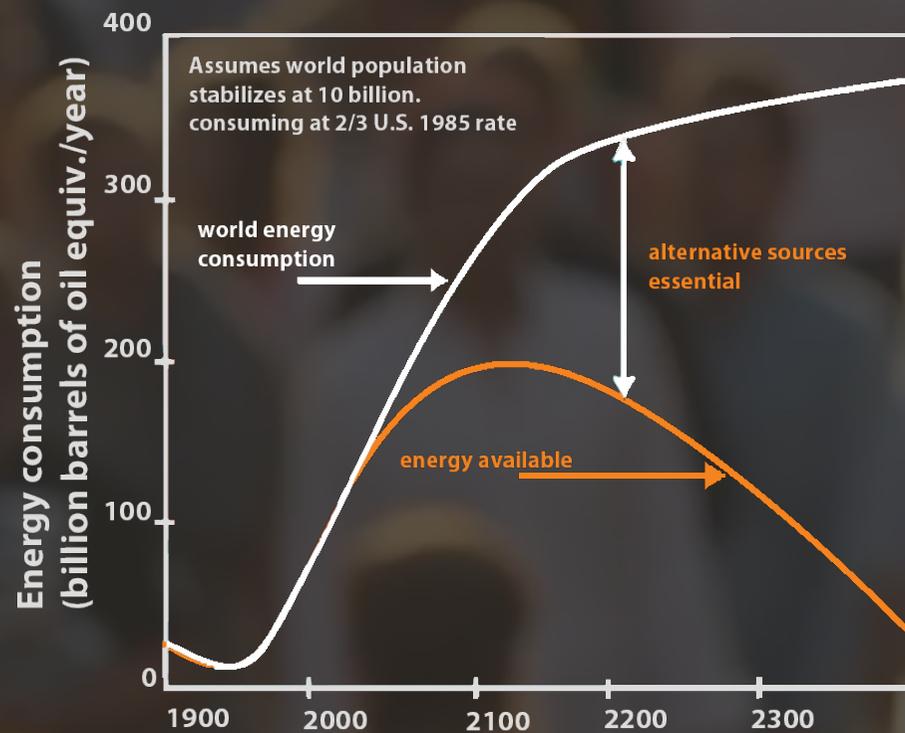
As possíveis poupanças em energia no mundo industrializado serão fortemente ultrapassadas pelas necessidades crescentes do mundo em vias de desenvolvimento: diversos cenários apontam para pelo menos o dobro, eventualmente o triplo, da procura energética durante o este século.

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 7 900 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. 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.

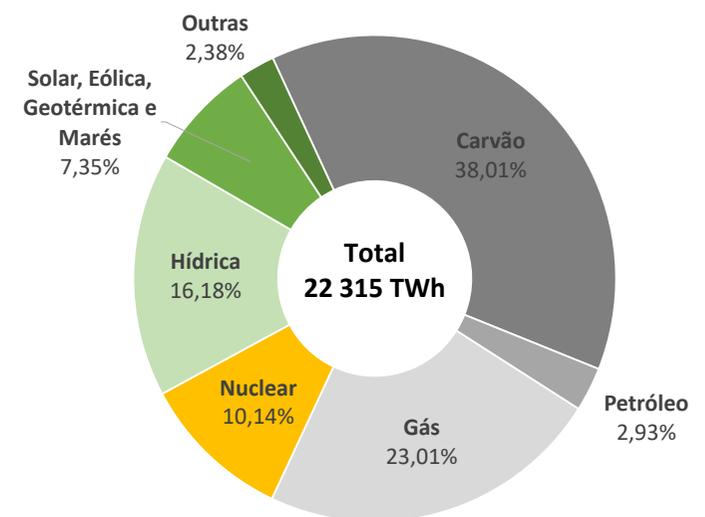
De acordo com a IEA no seu “2021 World Energy Outlook” a procura de carvão foi particularmente elevada na primeira metade

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 de 6%. De acordo com a IEA, dependendo das condições climáticas 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

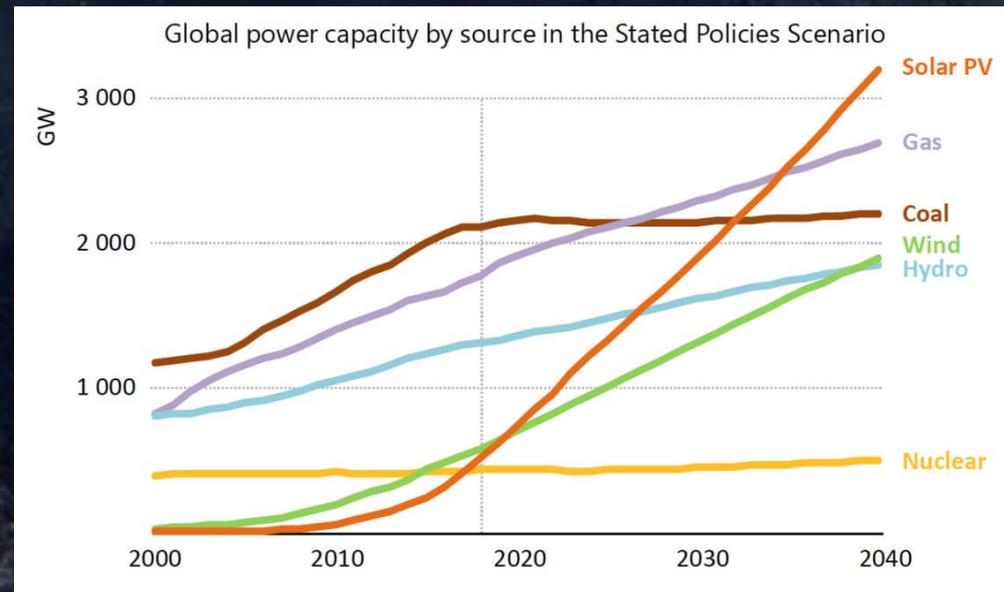


64% da electricidade provém da queima de combustíveis fósseis (Fonte: IEA Electricity Information 2019)

carvão deverá ter chegado a 9% em 2021 (um record absoluto de 10350 terawatt-hora).

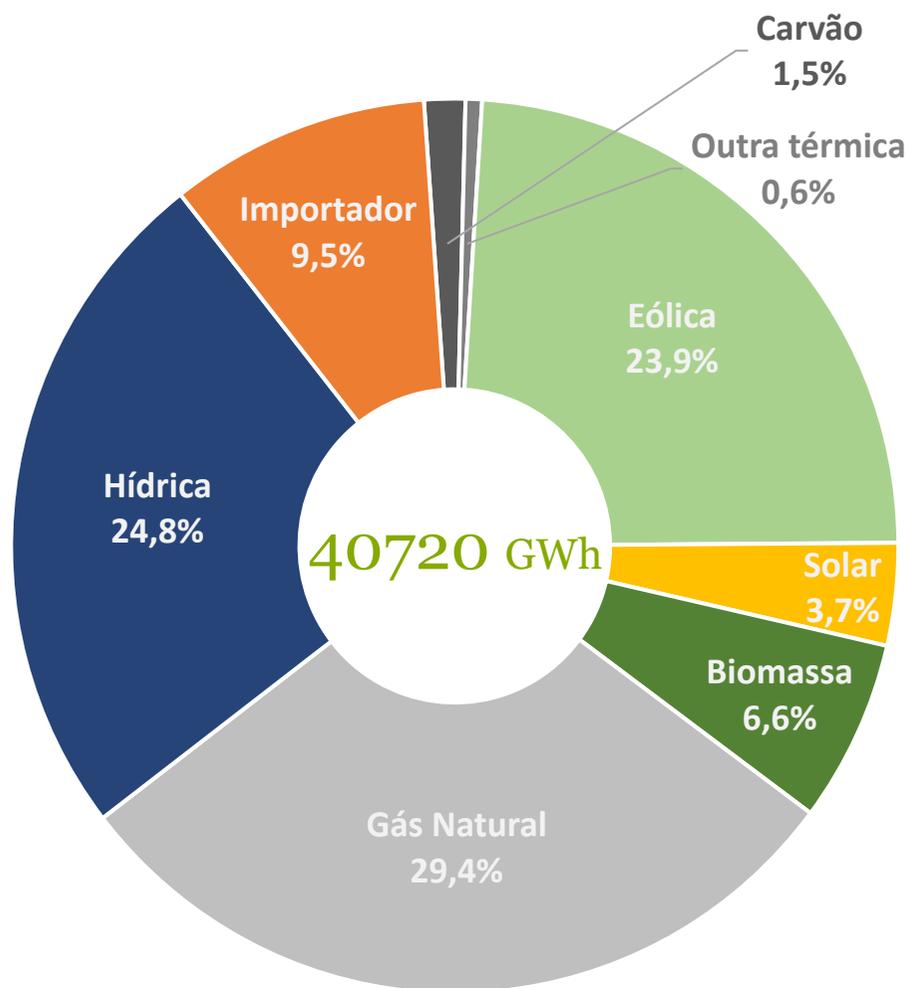
O consumo mundial de carvão não tem diminuído apesar das metas de descarbonização.

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. Na China, onde é produzida mais de 50% da electricidade global baseada na queima de carvão, estima-se que o consumo de carvão aumento 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 Ias renováveis serão responsáveis por quase metade da produção de electricidade (fonte: IEA World Energy Outlook 2019)

Produção de electricidade em Portugal em 2021

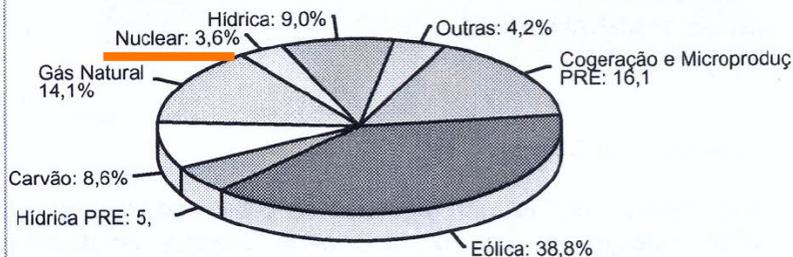


Distribuição por fontes de energia da produção eléctrica em Portugal no ano de 2021 (Fonte: ren.pt)



Fontes de Energia

A electricidade facturada foi produzida a partir das seguintes fontes de energia*



*O mix apresentado corresponde ao verificado no mês de Novembro de 2010.

Portugal não consome energia nuclear?

Portugal tem a vantagem de ter a sua costa atlântica, que lhe dá uma riqueza eólica considerável. Tem também um bom índice de irradiação solar, com 1 kW por metro quadrado de irradiação. No entanto, consoante o dia, Portugal poderá importar até 25% da sua electricidade de Espanha, segundo o Electricity Map (<https://app.electricitymap.org/zone/PT>). Nos

dias quentes de verão, sem vento, a nossa capacidade eólica diminui. A eficiência dos painéis solares fotovoltaicos também decresce. Nestes dias Portugal fica dependente de gás natural, vendo-se assim incapaz de cumprir limites de emissões. Com um nível tão elevado de electricidade importada podemos dizer que não consumimos energia nuclear? A resposta é não.

A resposta é negativa uma vez que 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 ativa 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,.

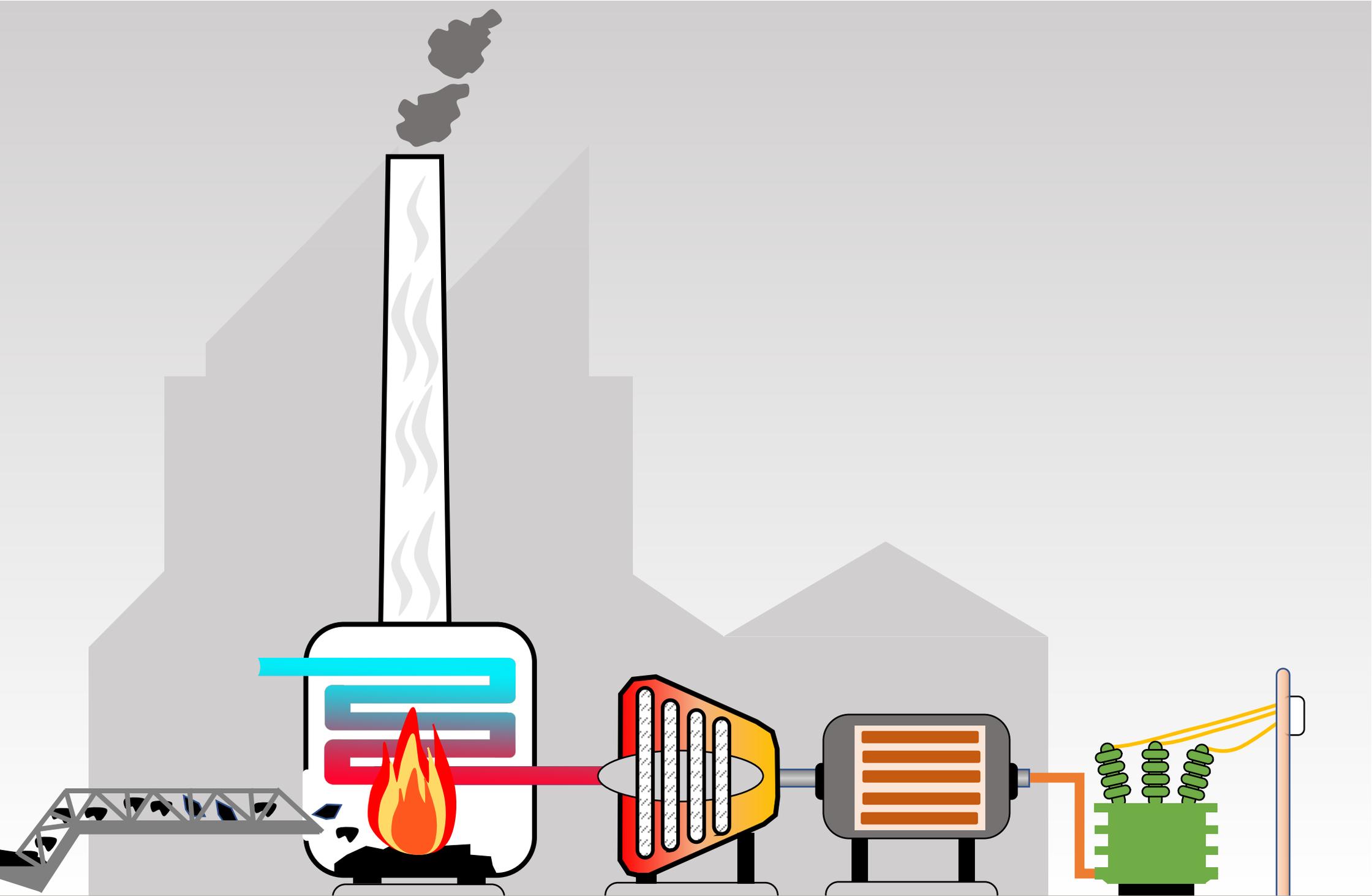
Sendo a fonte de energia utilizada neste tipo

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.





O caminho da descarbonização

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

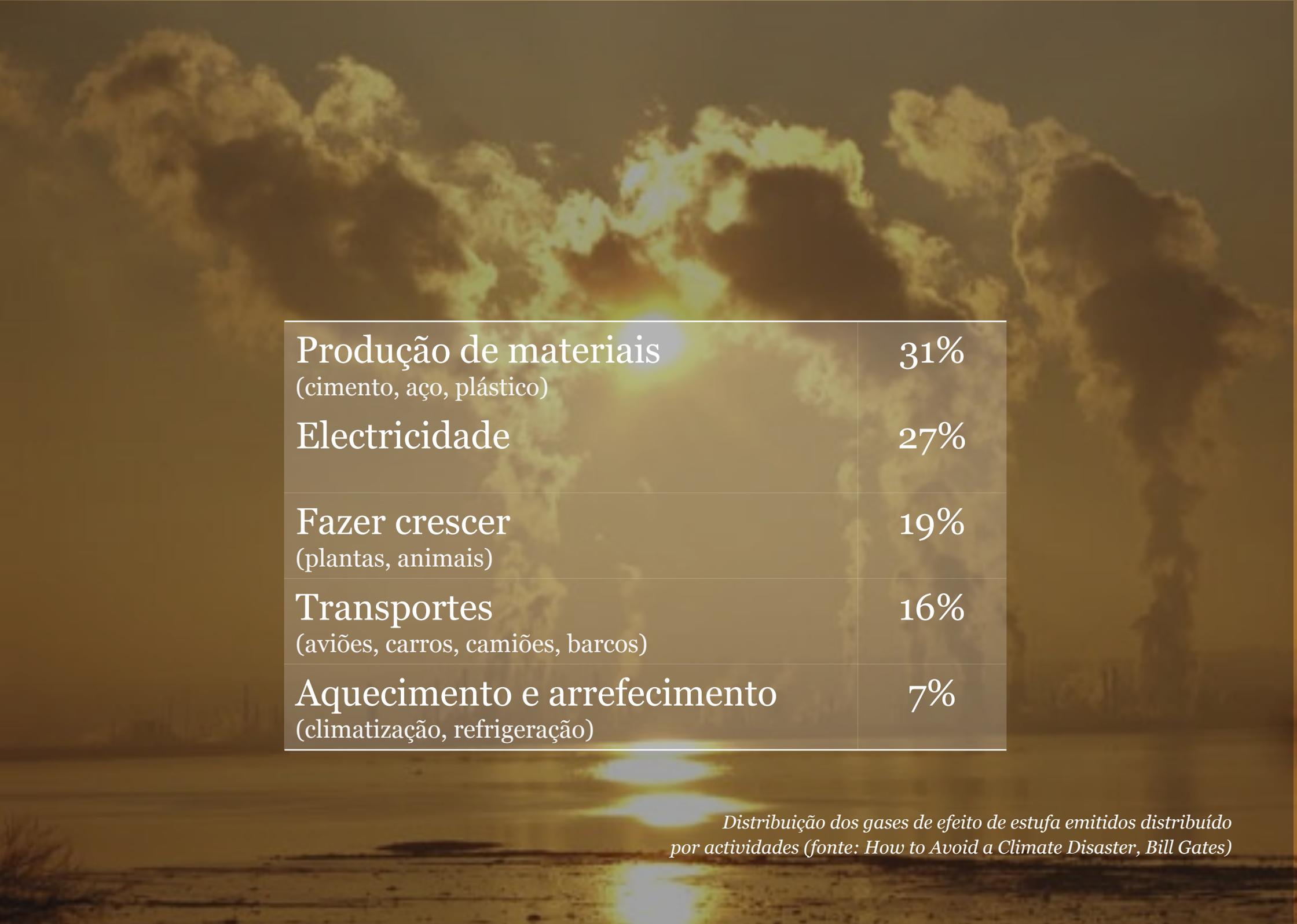
O plano para evitar (ou mitigar dado o estado actual da situação) as alterações climáticas, deve considerar todas as actividades que geram gases causadores de efeito de estufa. Entre estas os carros e produção de electricidade recebem grande parte da atenção no entanto, o transporte de passageiros representam 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.

“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)

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.



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 atrativo. 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 eletricidade Europeia. A Noruega, Suécia, Áustria, Finlândia, e França aparecem normalmente a verde, com uma produção de CO2 inferior a 100g por cada kWh de eletricidade 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.



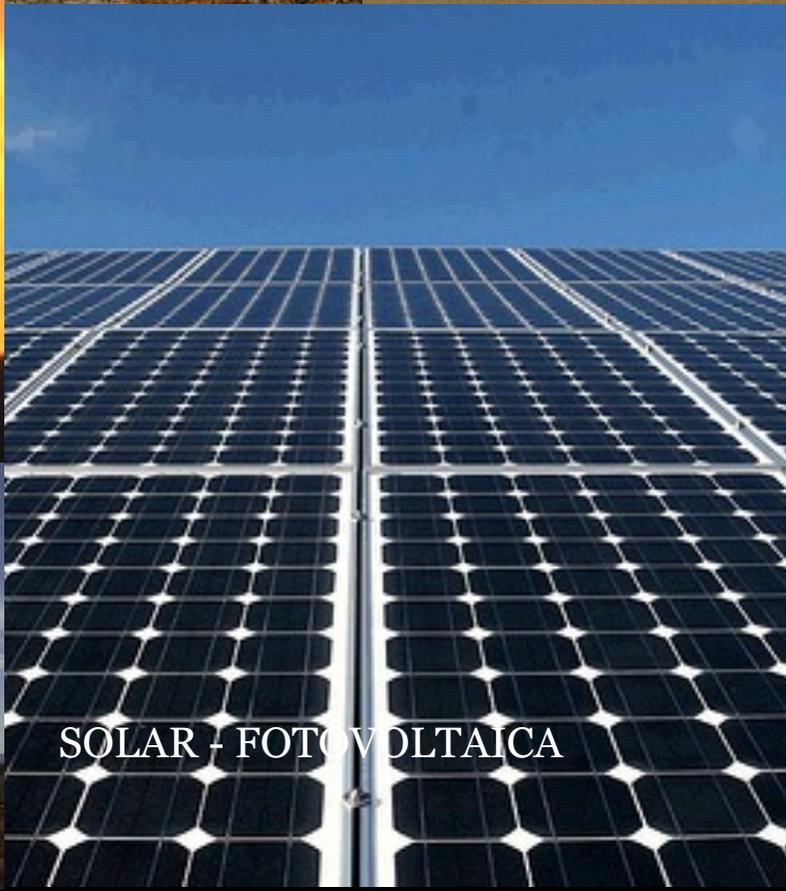
SEQUESTRAÇÃO DE CARBONO



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.

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 reatores em 15 anos, com um tempo médio de construção por reator 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 esbata-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

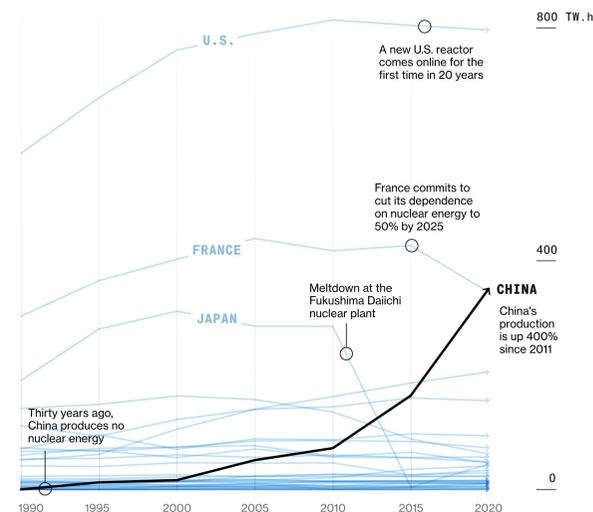
que a EDF reduza a sua dependência do produção de eletricidade a partir de energia nuclear, o que irá acontecer. Em parte devido a alterações climáticas — os reactores necessitam de água para o seu arrefecimento que começa a escassear nas suas redondezas —, mas principalmente por pressão de grupos ambientalistas, devido a receios com a idade das centrais.

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 também 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. 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 atual 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.



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 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 eletricidade 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 eletricidade pode causar grandes pressões ambientais ou sociais.

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 quebrados 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 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!

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.

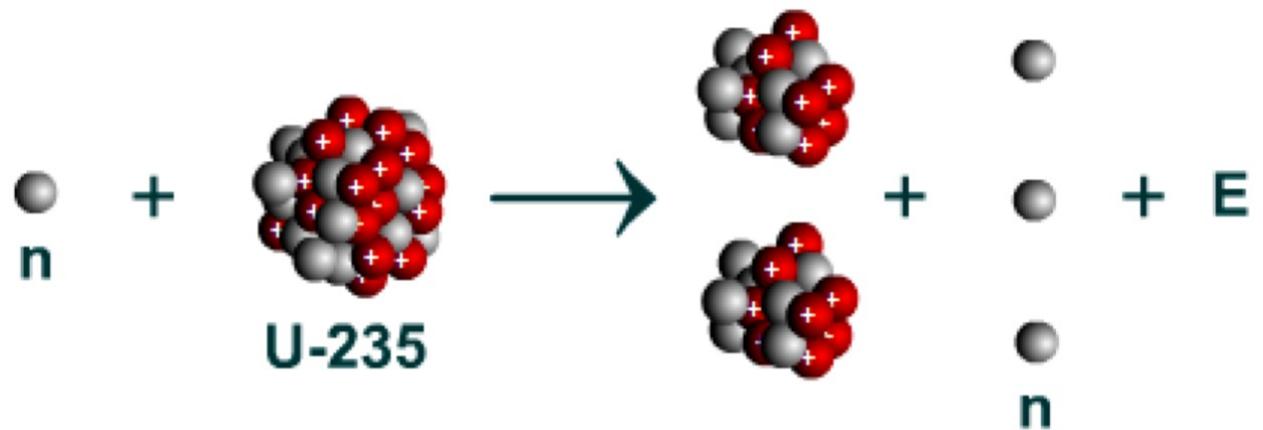
Energia Nuclear

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.

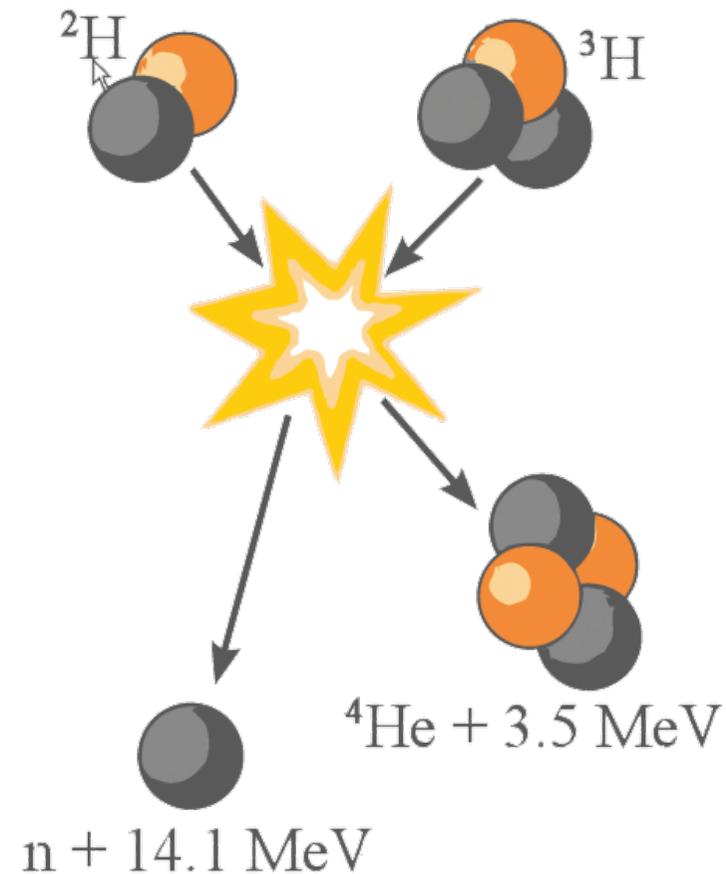
A fissão (ou cisão) nuclear, que ocorre nas centrais nucleares espalhadas pelo planeta, um núcleo pesado, como o urânio, é convertido em dois elementos mais leves, libertando energia. No balanço entre a repulsão eléctrica, entre todos os prótons no núcleo, e a atracção da força forte que “cola” prótons e neutrões no núcleo, o equilíbrio entre massa e energia dá-se no isótopo de Ferro 55, o elemento mais estável do universo.



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.

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.



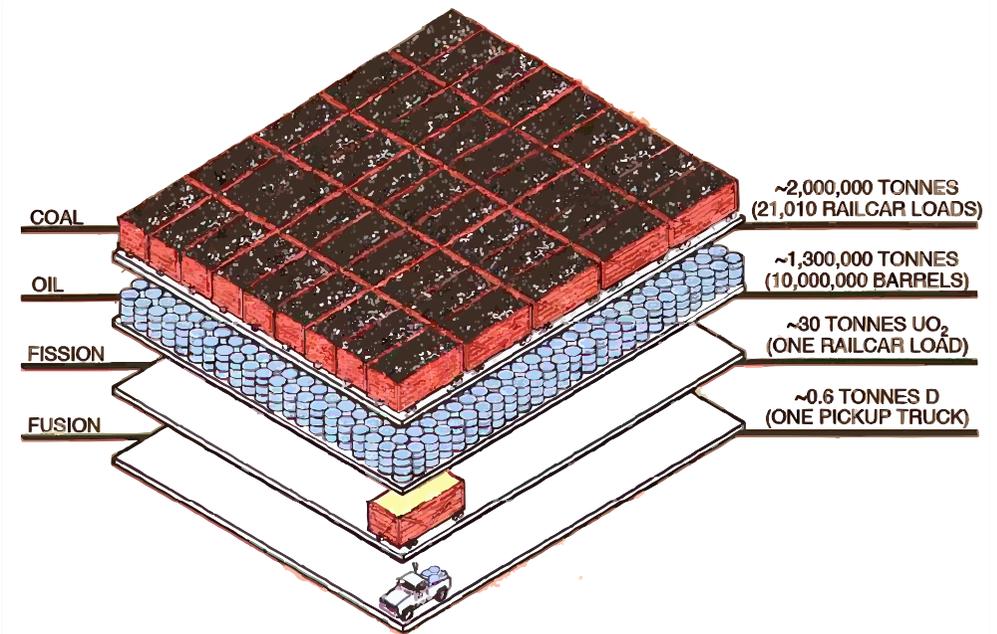
Reacção de fusão nuclear entre dois isótopos do Hidrogénio, O Deutério e o Trítio

Sobre a 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 reações de fusão será usada para gerar eletricidade.

A fusão tem um enorme potencial como fonte de energia de baixas emissões de carbono. A fusão nuclear, representa uma fonte de eletricidade 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. 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.



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

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.

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 radioativos de elementos comuns, tóxicos para o ambiente durante milhares de anos, enquanto a fusão nuclear gera produtos limpos (hélio e neutrões), que só tornam radioativos os materiais à sua volta por dias.

A reacção de fusão nuclear liberta 10 000 000 vezes mais energia que a queima de combustíveis fósseis

Energia libertada na reacção

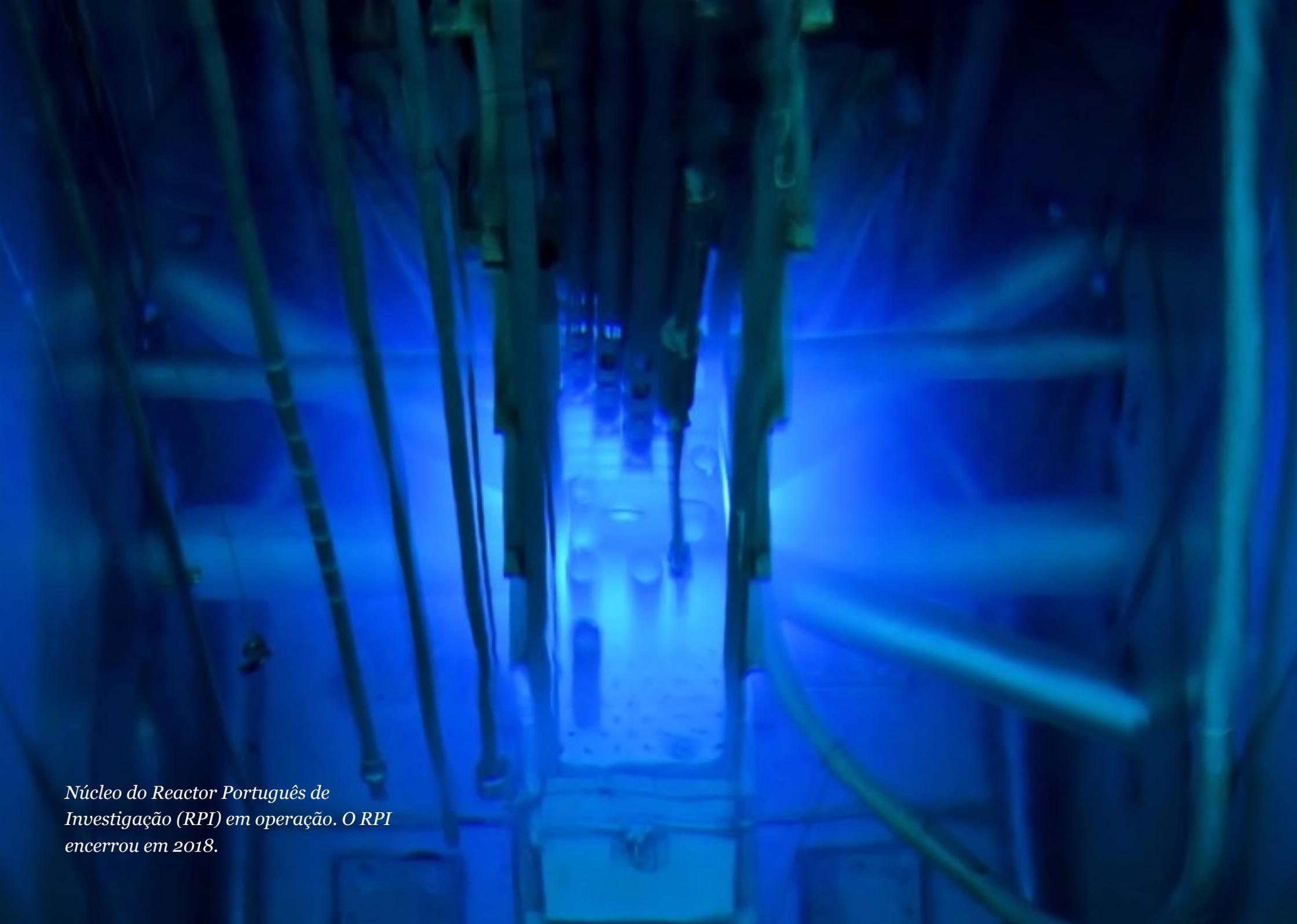
Combustão

x100 000

Fissão Nuclear

x100

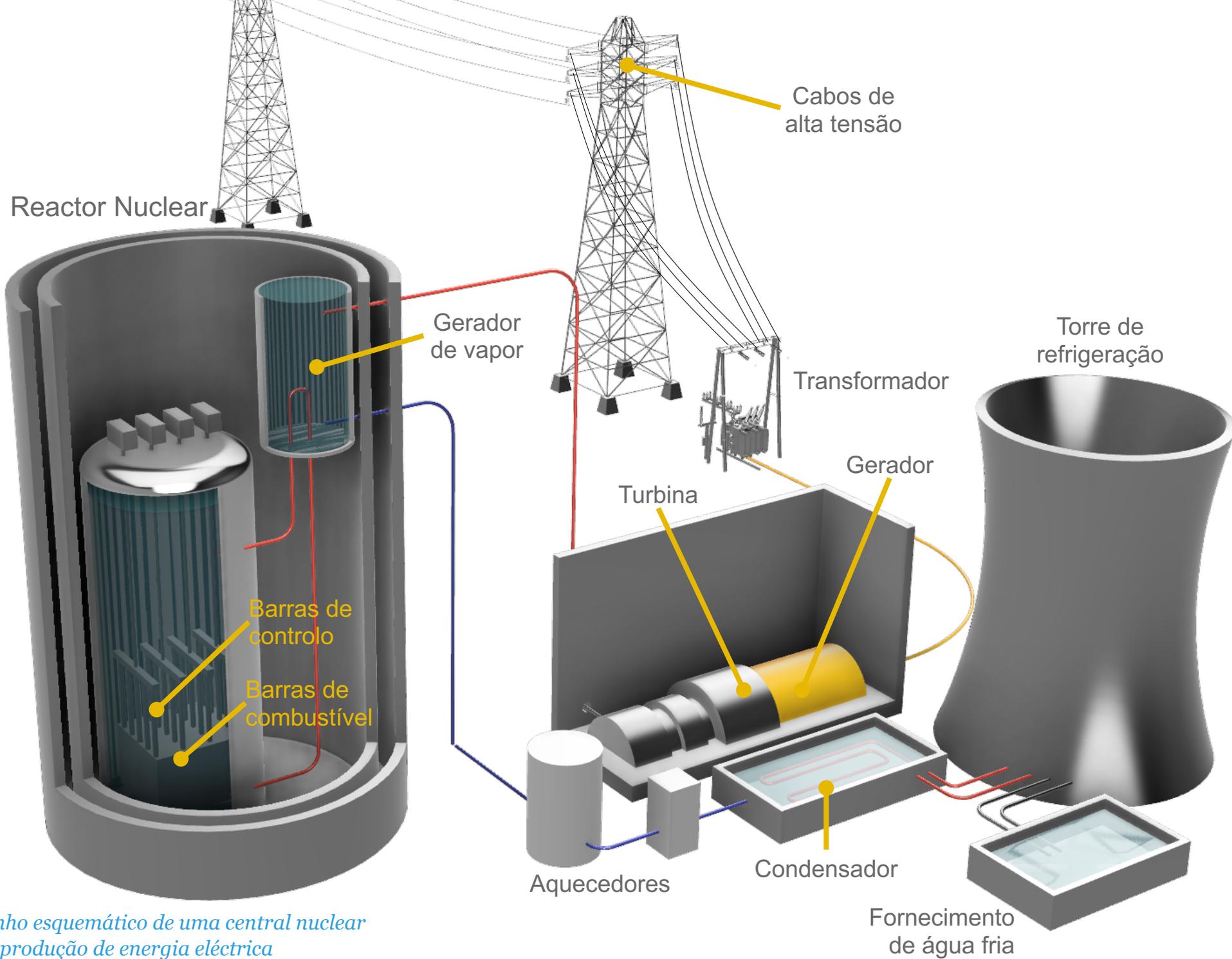
Fusão Nuclear



*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 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. Esta reacção em cadeia é controlada através de barras moderadoras que absorvem os neutrões. 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 eletricidade. O vapor é arrefecido até condensar em

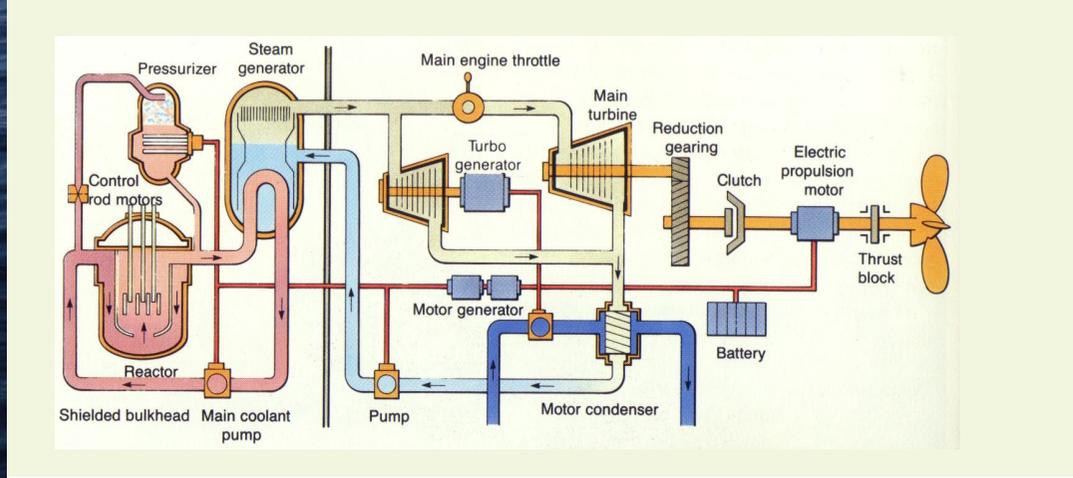
água numa estrutura separada denominada de chaminé de coluna de refrigeração ou usam a água de lagos, rios ou do oceano. A água arrefecida é reutilizada para produzir novamente vapor

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. O Urânio é um elemento naturalmente enriquecido e abundante na Terra (Portugal já teve minas de Urânio na zona da Urgeiriça no distrito de Castelo Branco). O decaimento do Urânio

quando cindem ou decaem liberta calor que aquece a crosta terrestre. Um processo similar acontece no interior dos reactores. O Urânio é convertido em pellets de combustível de cerâmica com milhões de núcleos de Urânio. Cada pellet produz a mesma quantidade de energia que 560 litros de petróleo. As pellets são empilhadas em barras de metal com o combustível de cerca de 3.7 metros. Um conjunto de barras de combustível com mais de 200 barras é chamado de célula combustível. Dependendo da sua potência o reactor contém cerca de duas centenas de células de combustível. 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 fissão 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.



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 helices.

Tipos de reactor nuclear

Existem vários tipos de reactores nucleares.

Os mais comuns são :

Reactor de água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor) nos quais a água a alta pressão dentro do reactor previne esta de ferver. 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 que não iremos detalhar: Reactor avançado arrefecido a gás (AGR - Advanced gas-cooled reactor); LWGR - Light water graphite-moderated reactor; Reactor de Neutrões Rápidos (FNR - Fast neutron reactor); e Reactor arrefecido a gas de alta temperatura (HGTR - High temperature gas-cooled reactor).

Prospecção e processamento do combustível nuclear

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

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

Os elementos radioactivos

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

99% do Urânio é U-238. Infelizmente o usado nas centrais nucleares é U-235. O U-238 pode ser processado em plutónio que também é cindível. Uma vez minerado a escória de Urânio é enviada para uma central de processamento onde é concentrado para se tornar combustível das centrais. O concentrado é fabricado lavando o Urânio da escória recorrendo a ácidos. No fim a escória é transformada em U-308, a forma combustível do Urânio que é transformada em pellets.

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.

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.

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 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.

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 pode 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 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. 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 barris 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 eneegia, equivalente em carvão, de vários países, mostra que cada cidadão necessitaria de aproximadamente um kilo de Urânio para satisfazer o seu consumo de eletricidade 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. Mas devido à quantidade de carvão que se queima, as cinzas de carvão são mais radioactivas que resíduos 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 melhorados 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.

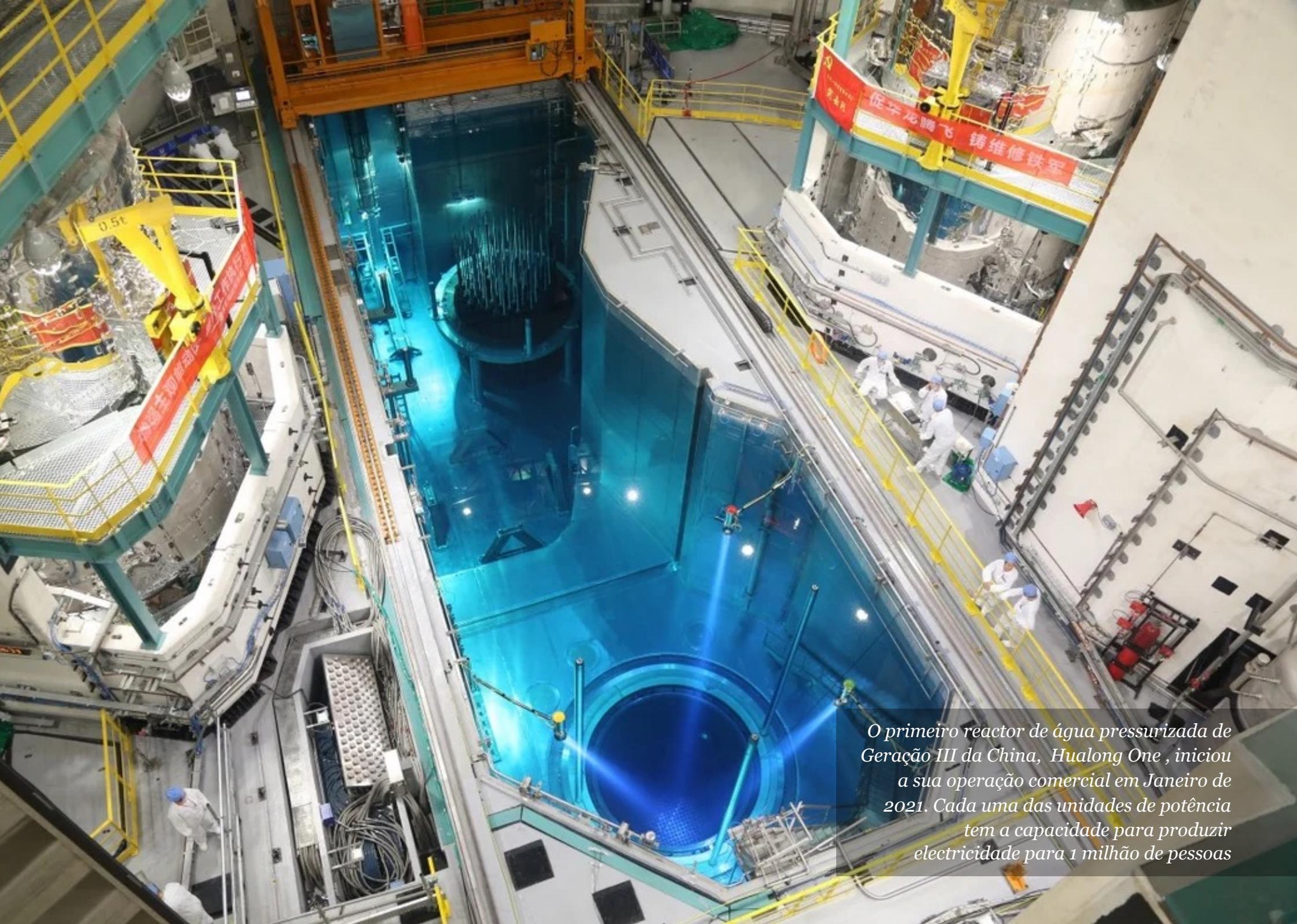
Habitualmente são distinguidas diferentes gerações de reactores. Os reactores de Geração I foram desenvolvidos em 1950-60 tendo o último reactor desta geração sido encerrado no Reino Unido em 2015. Os reactores de Geração II estão amplamente presentes na frota actual americana e francesa e em vários 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.

Fornecedores de reactores nos Estados Unidos, Japão, Europa, Rússia, China e outros têm dezenas de designs de reactores novos em estado avançado de planeamento ou em construção, enquanto outros estão na

fase de investigação e desenvolvimento. Os reactores de Geração IV estão em fase de Investigação e Desenvolvimento ou numa fase conceptual.

Os reactores de terceira geração têm:

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



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

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).

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 criadas uma task force internacional que partilha I&D para o desenvolvimento de tecnologias de 6 tipos reactores de Geração IV. Quatro destes são reactores de neutrões rápidos. Todos estes reatores 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+

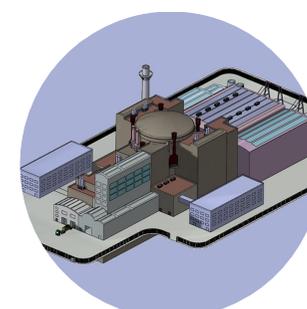


Kashiwazaki



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

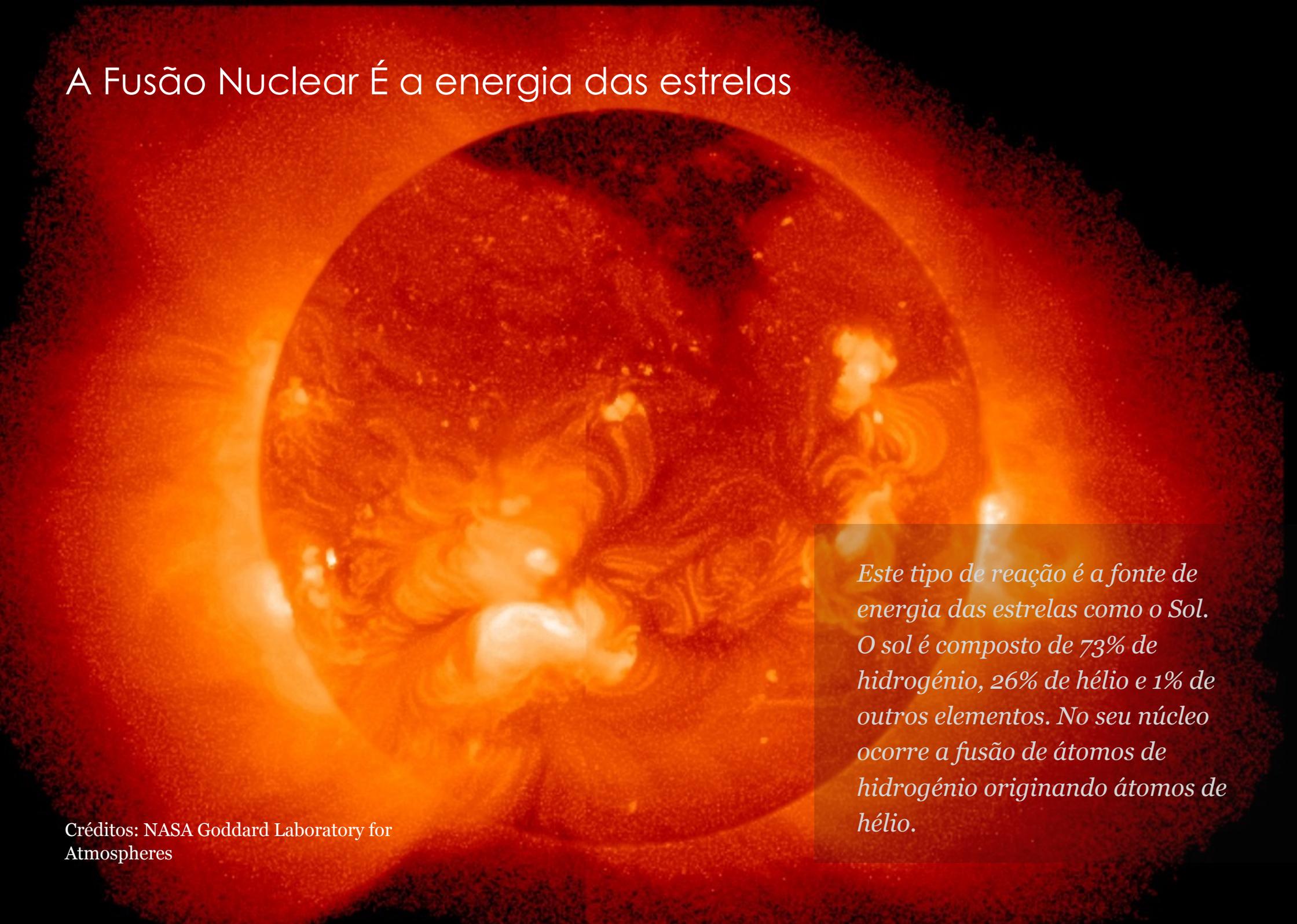
2040

Evolução dos reactores nucleares

+ *Fusão Nuclear*

2.2

A Fusão Nuclear É a energia das estrelas



Este tipo de reação é a fonte de energia das estrelas como o Sol. 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

As reacções de fusão nuclear ocorrem num meio denominado plasma

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

Créditos: UKAEA

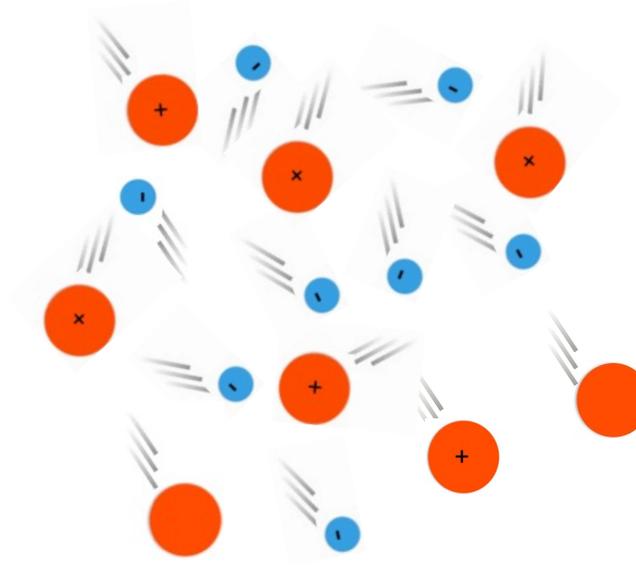
Como se forma um plasma?

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



O que é um plasma?

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



Gás Ionizado

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

Meio neutro

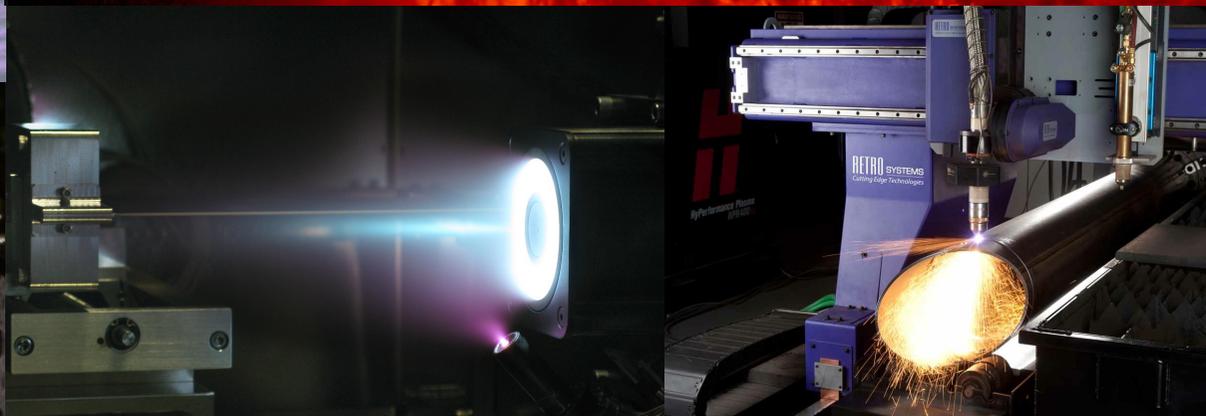
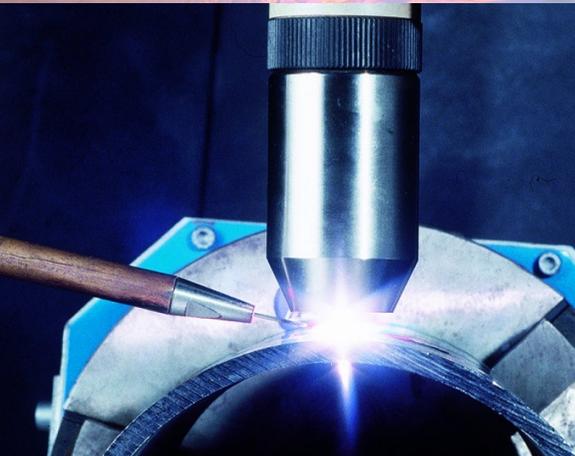
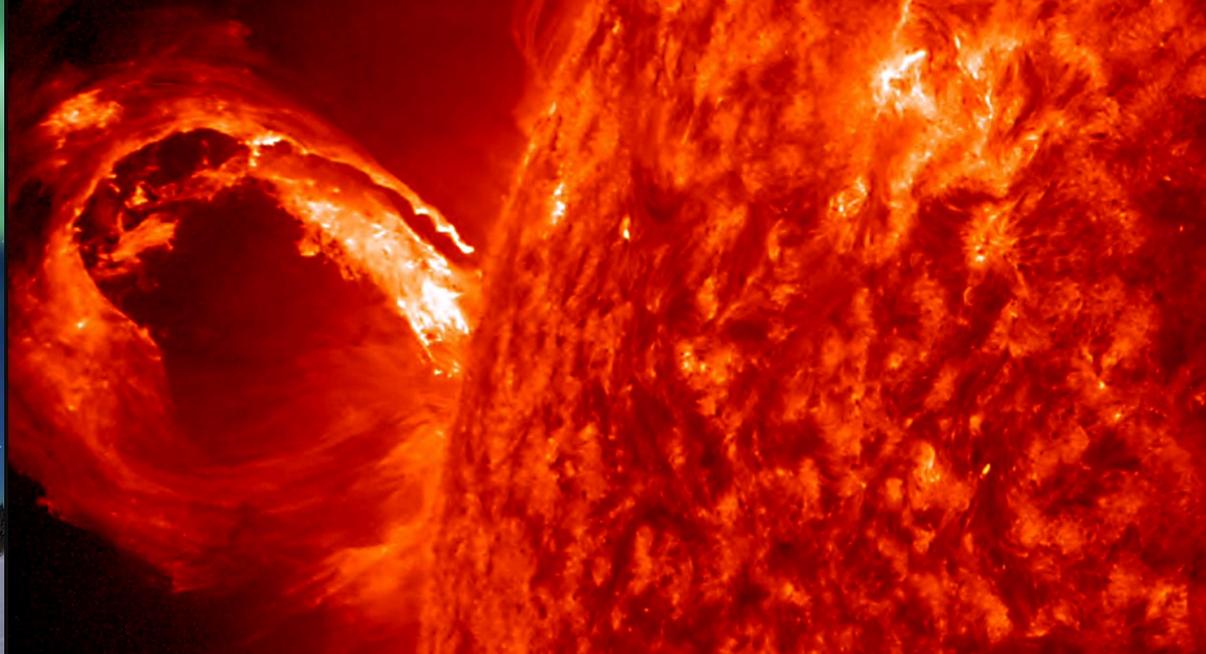
O plasma comporta-se como uma “nuvem” de protões, neutrões e electrões livres diferentemente dos gases que são constituídos por átomos e moléculas neutras. Além disso, as partículas de carga eléctrica positiva (protões) e negativa (electrões) do plasma atraem-se mutuamente, mas têm dificuldade em ligarem-se,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

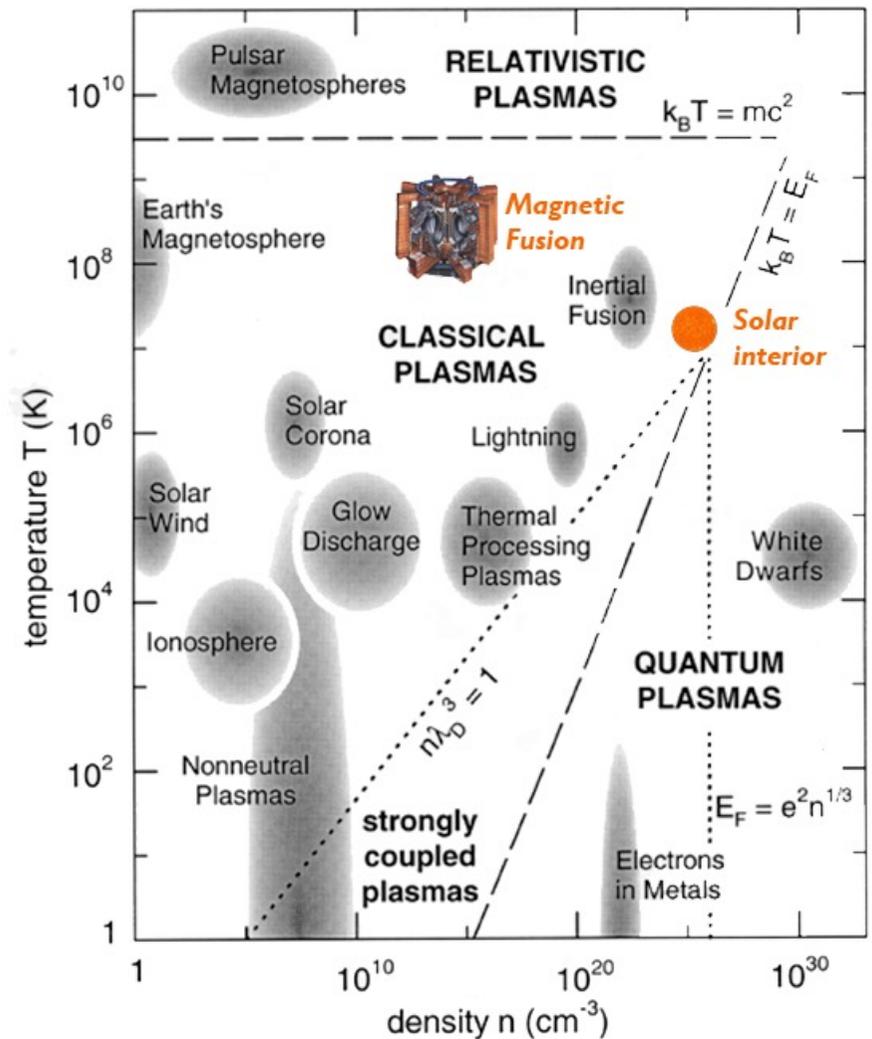


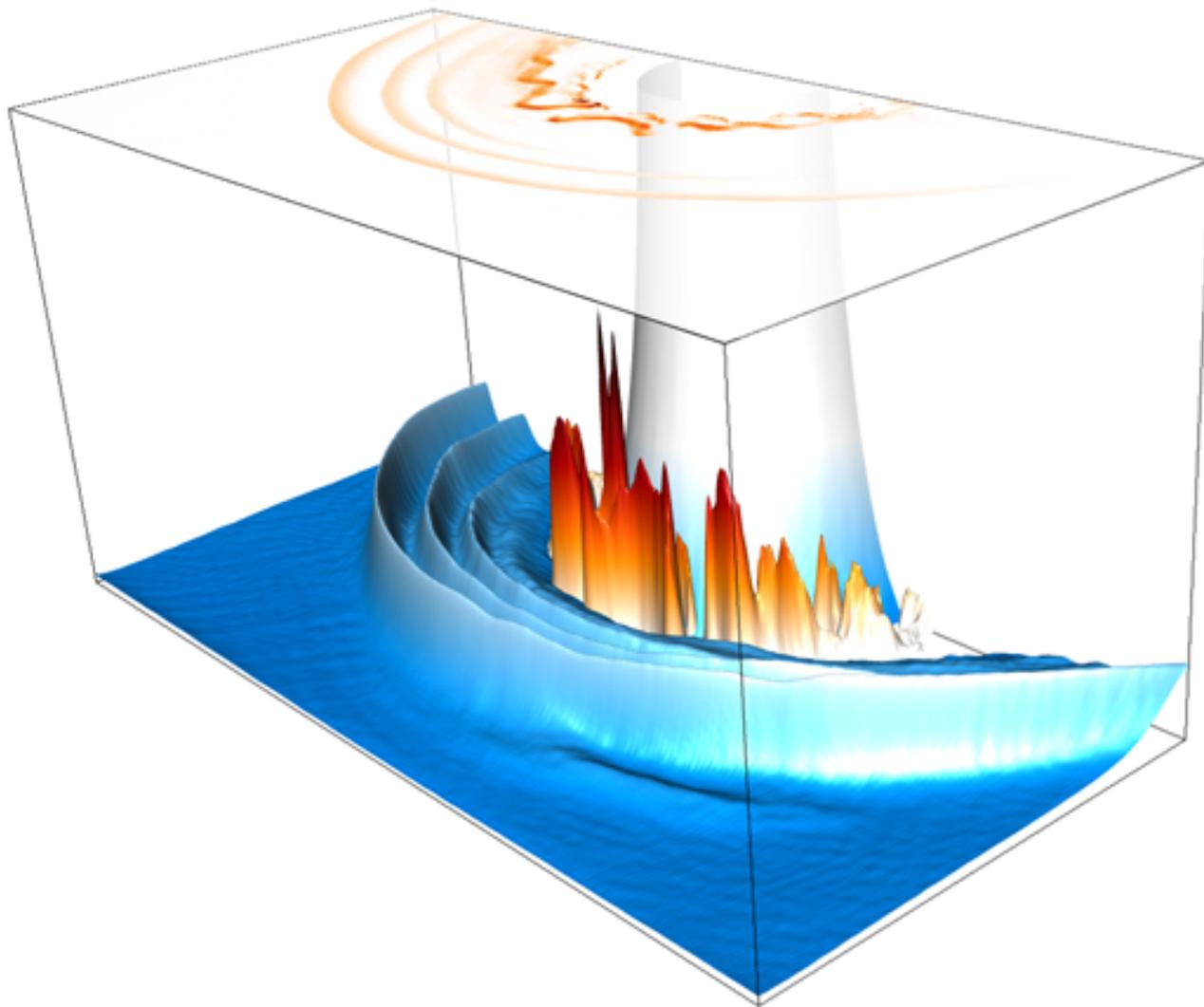


Os plasmas estão amplamente presentes na natureza e no nosso dia-a-dia. Nesta página estão ilustrados alguns exemplos para além das estrelas e entre muitos possíveis: o plasma ejetado durante uma tempestade solar e que atinge o nosso planeta sob a forma de vento solar, as auroras boreais, os relâmpagos,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

Os plasmas possuem densidade e temperatura e densidade 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.

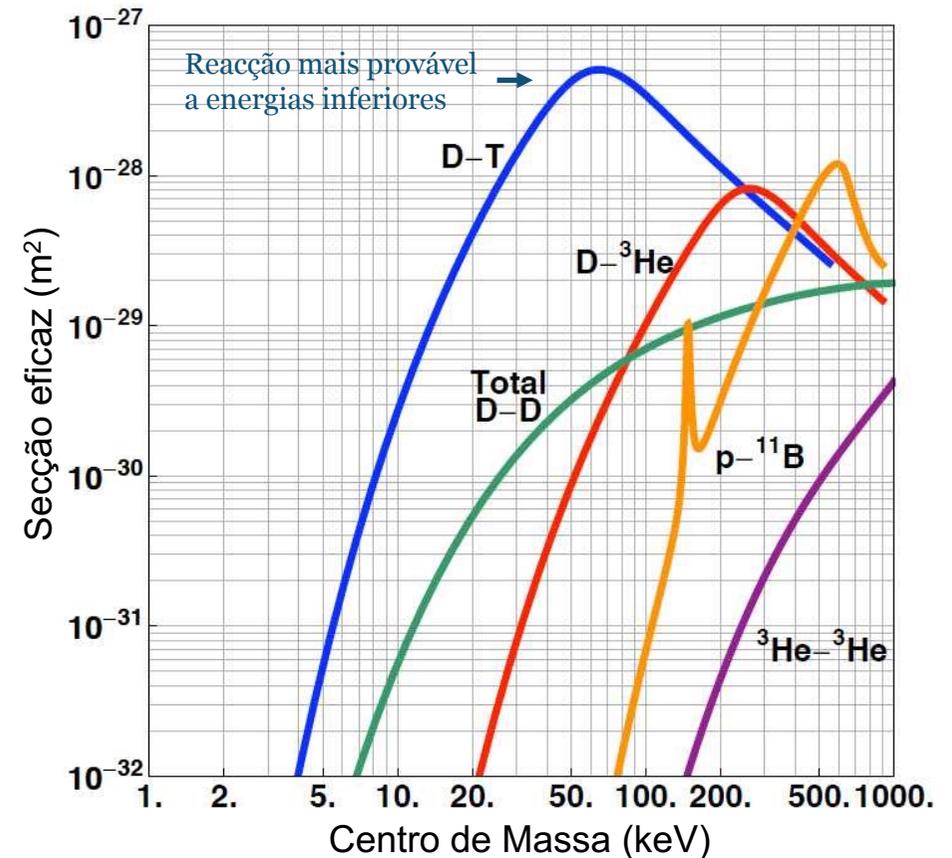
Geração de ondas de choque magnetizadas em miniatura
(Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear)

Reacções de fusão nuclear

A 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 100.000 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.

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 elétrica entre dois núcleos, que obriga a lançar os núcleos uns contra os outros a energias muito elevadas.

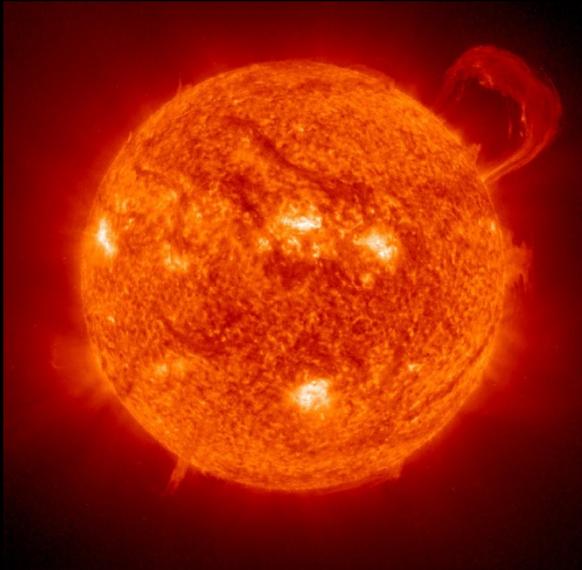
No interior do Sol (a temperaturas de 10 – 15 milhões °C), da fusão dos núcleos de hidrogénio resulta Hélio: este processo fornece a energia que, sob a forma de radiação solar, garante a vida sobre a Terra. No Sol, o “combustível” é aquecido e confinado por acção da gravidade. Na Terra, o confinamento 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.

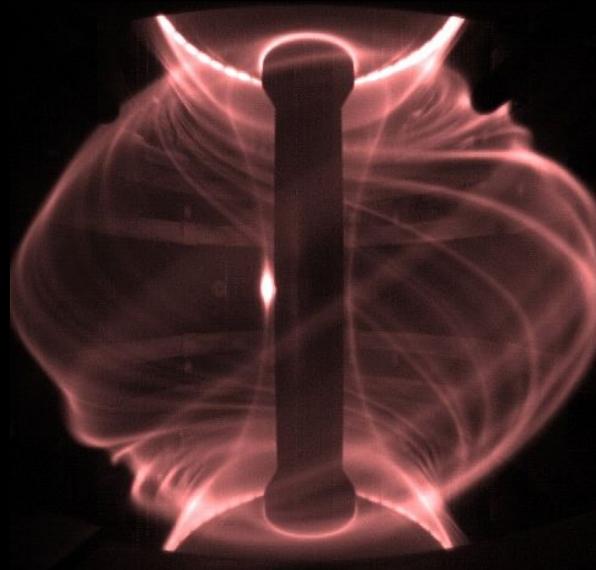
Como um plasma apropriado para a fusão é muito quente não pode ser contido normalmente e tem de se evitar o contacto com as paredes materiais (que para além de danificá-las, também arrefece o plasma). Para tal, pode-se aproveitar o facto do plasma ser constituído basicamente de partículas carregadas eletricamente apesar de, como um todo, o plasma permanecer neutro. A ideia é usar campos magnéticos e correntes elétricas induzidas no plasma de maneira a desviar convenientemente as trajetórias

das partículas de modo a mantê-las sempre dentro de uma região do espaço. A isto se chama “confinamento magnético”.

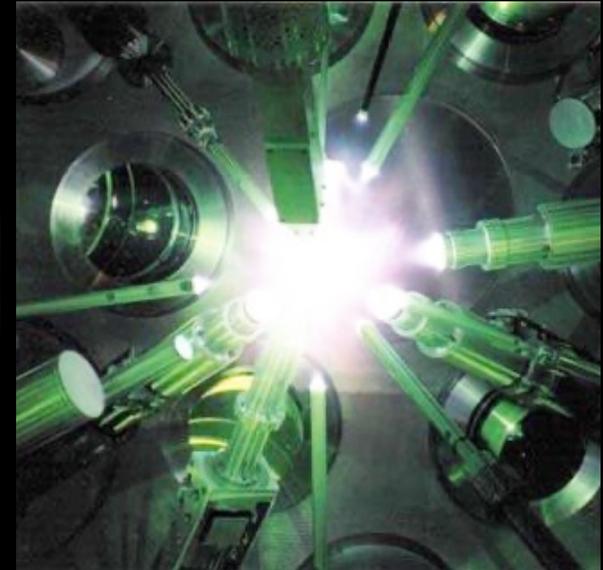
O Confinamento Magnético é o mais promissor para produção de energia



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.

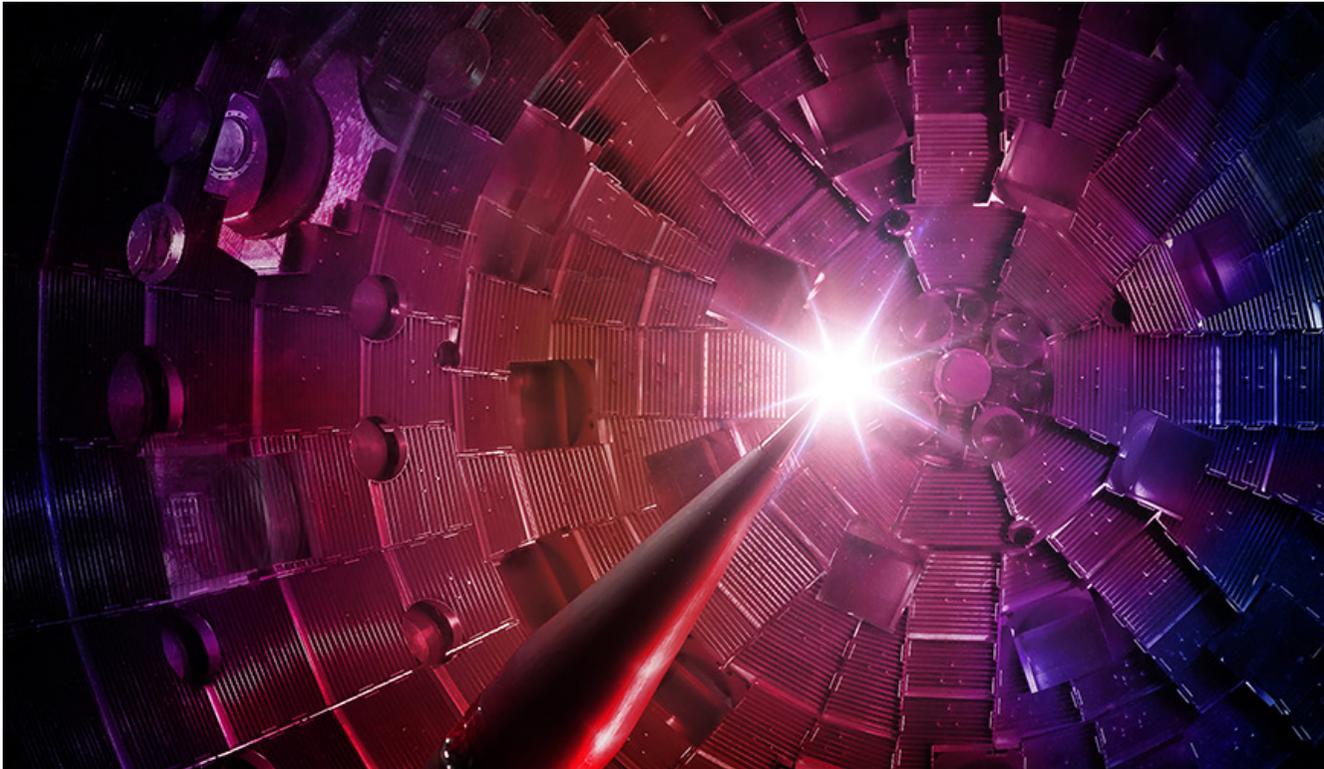
A ideia inicial era fazer incidir em simultâneo vários lasers sobre uma cápsula cheia de DT - deutério e trítio, outro isótopo do hidrogénio - que precisam de vencer uma barreira de energia ligeiramente menor do que dois núcleos de deutério para se fundir) para que a cápsula, ao explodir, comprimissem 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?

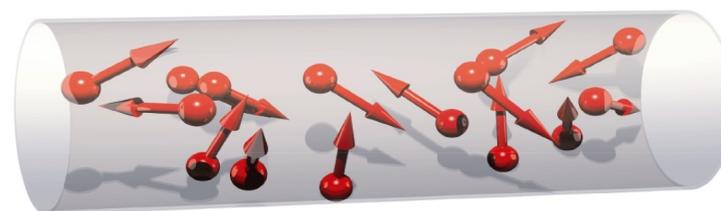
As reacções de fusão ocorrem quando os núcleos têm velocidade suficiente para ultrapassar as forças repulsivas entre as suas cargas eléctricas. No caso das reacções D-T, são necessárias temperaturas acima de 100 milhões °C, bem acima da temperatura para a qual um gás está completamente ionizado e se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

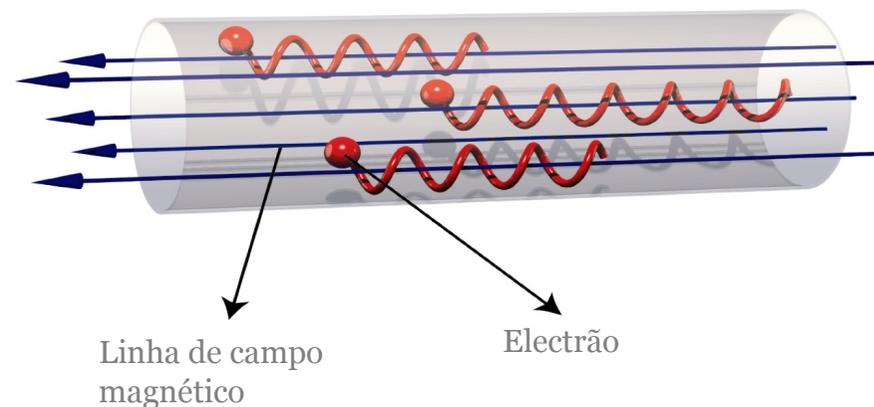
O conceito de confinamento magnético consiste em aplicar um campo magnético elevado para confinar o movimento das partículas do plasma. O campo magnético previne as partículas de entrarem em contacto com a parede do reactor, nas quais dissipariam a sua energia.

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



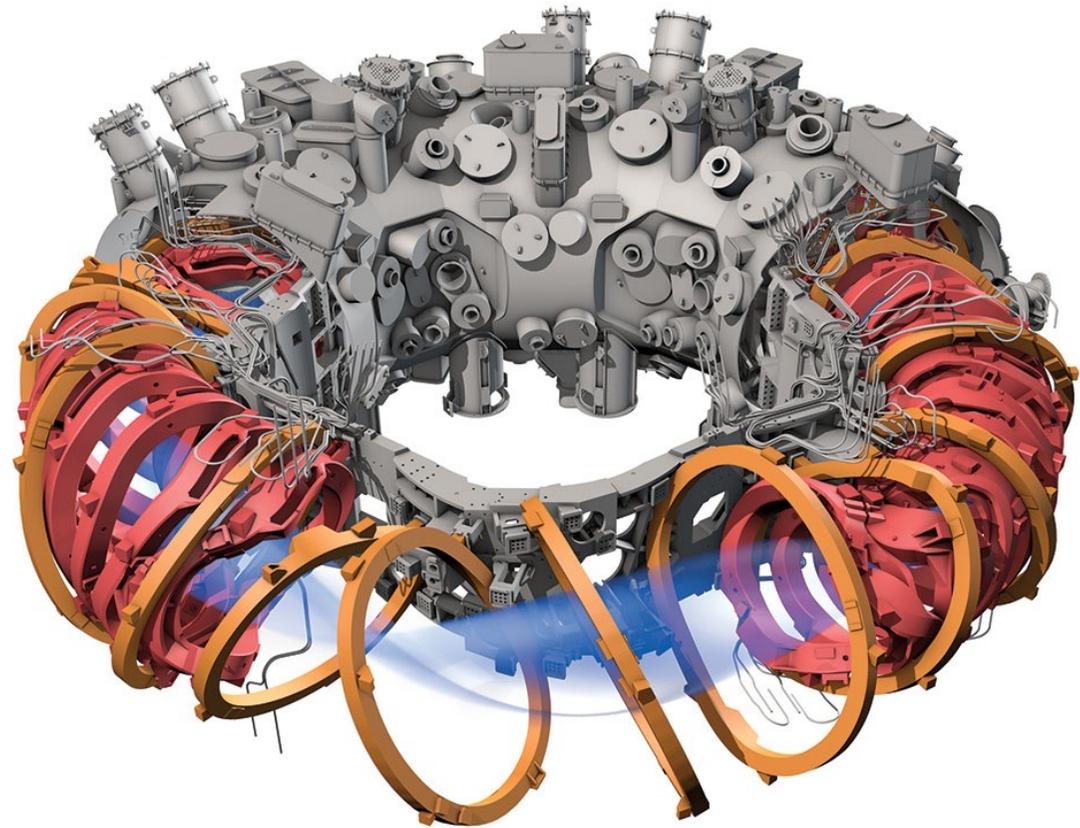
Com campo magnético



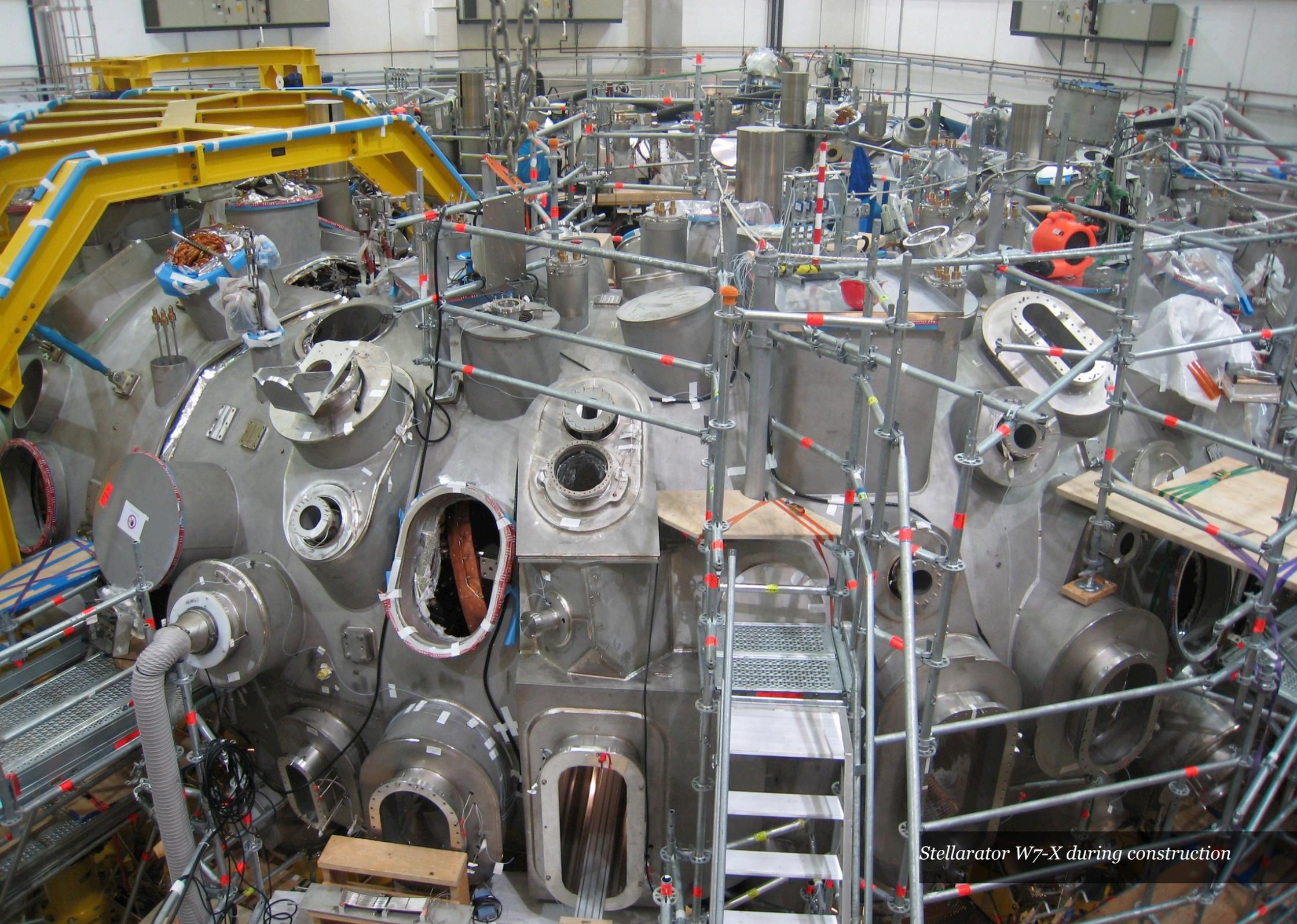
As partículas carregadas descrevem movimentos circulares no campo magnético limitando o seu movimento da direcção perpendicular ao campo magnético

Stellarators

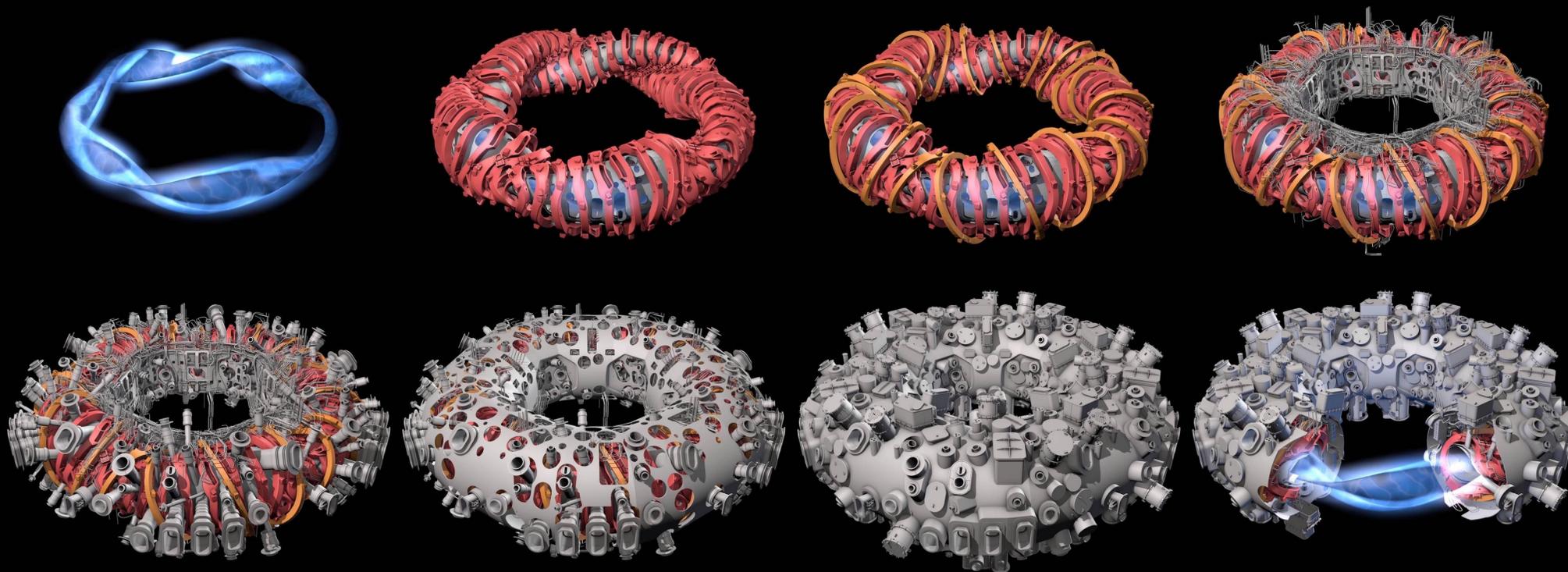
Os stellarators usam bobinas magnéticas que produzem campos magnéticos extremamente fortes (no W7-X o campo magnético é de 3T ou seja ~100000 vezes o campo magnético à superfície da Terra), e torcidos, que se enrolam ao longo duma geometria toroidal. Os stellarators têm algumas vantagens sobre os tokamaks: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



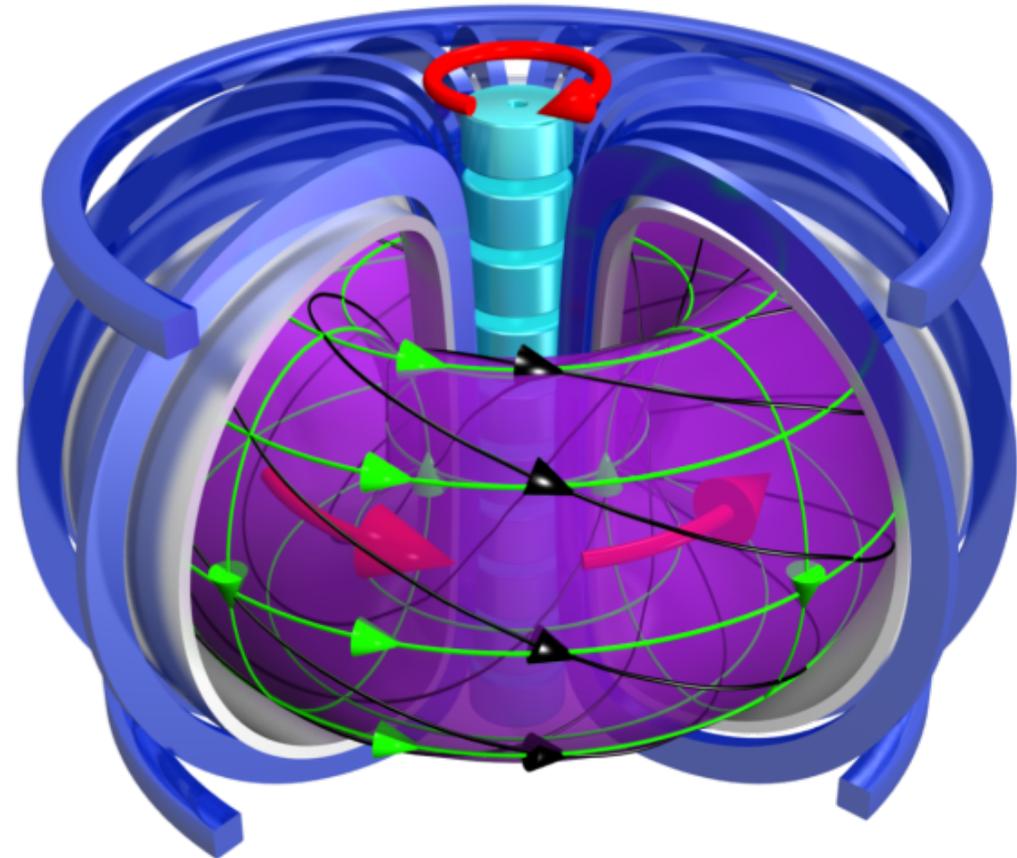
Wendelstein 7-X, é o primeiro stellarator otimizado de larga-escala. Necessitou do investimento de 1.1. milhões de horas de trabalho para montar, usando um dos modelos de engenharia mais complexo alguma vez imaginado, e tem de suportar enorme variações de temperatura, e forças enormes. Um contentor de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

Tokamak

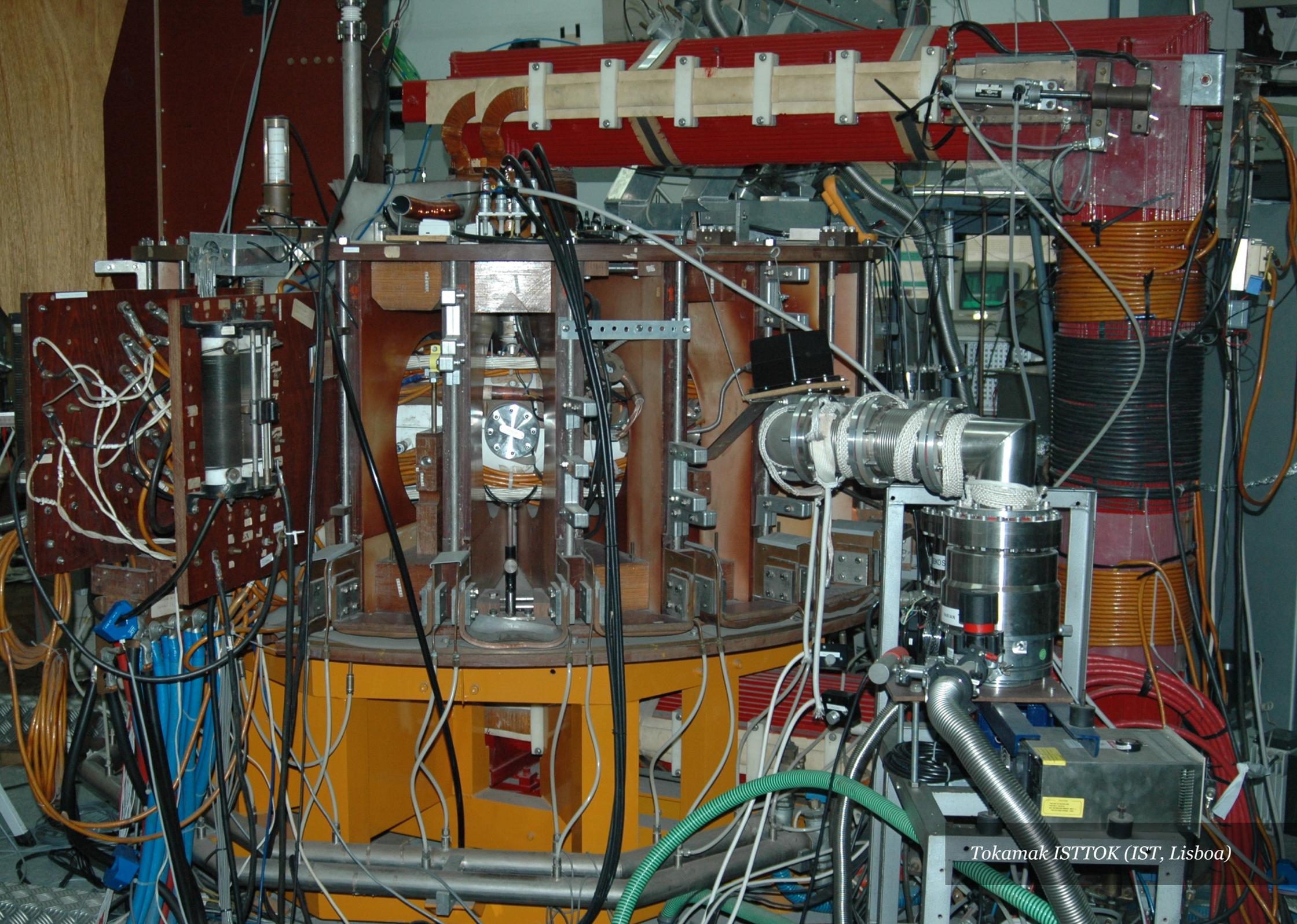
Câmara Toroidal de confinamento Magnético

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



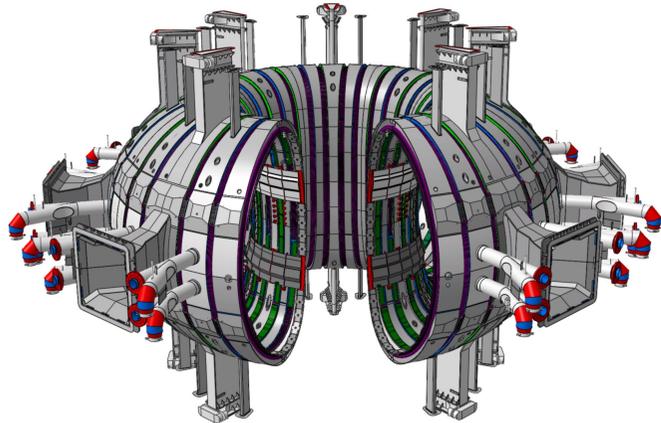
Desenho esquemático de um tokamak e do campo magnético helicoidal produzido pelas bobinas toroidais e pela corrente de plasma



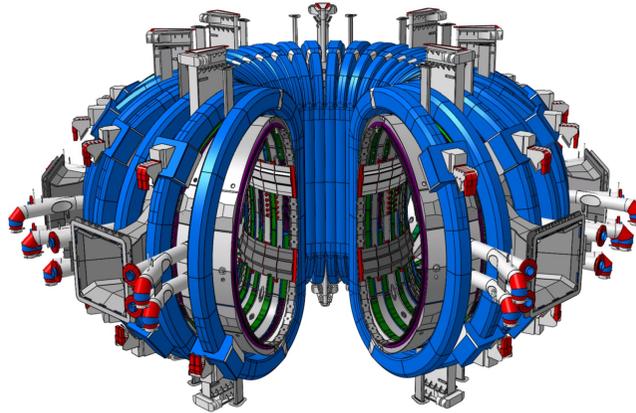
Tokamak ISTTOK (IST, Lisboa)

Anatomia duma máquina de fusão

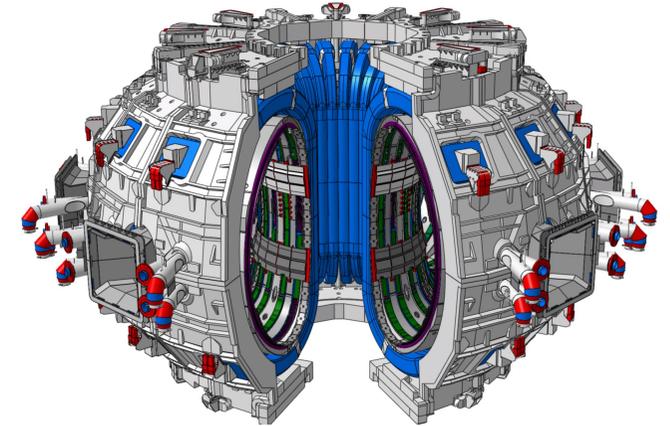
O JET é actualmente o maior máquina de fusão nuclear em operação e é aqui usado para ilustrar alguns dos componentes que compõe um tokamak



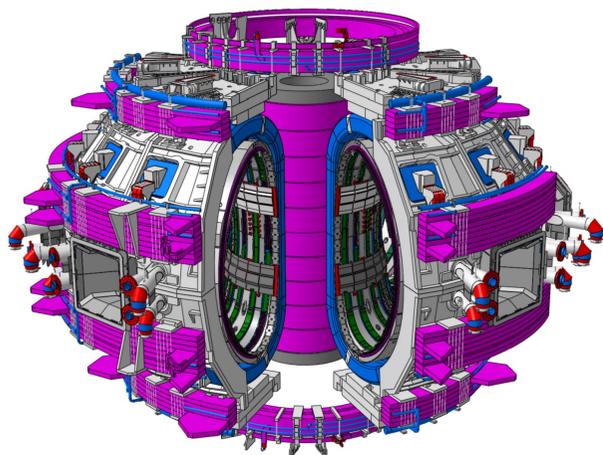
Câmara de Vácuo



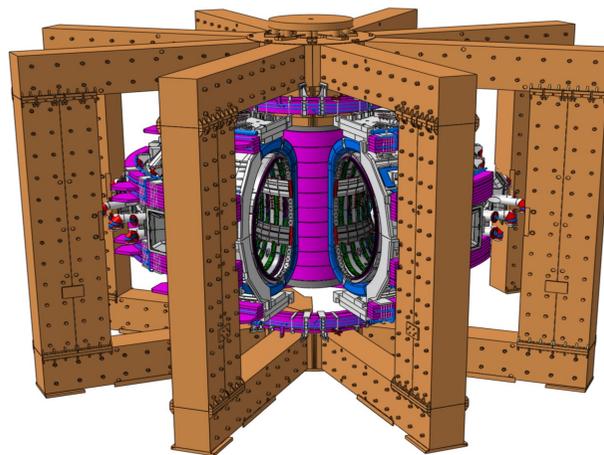
*Bobines Magnéticas Toroidais
(arrefecidas com Galden)*



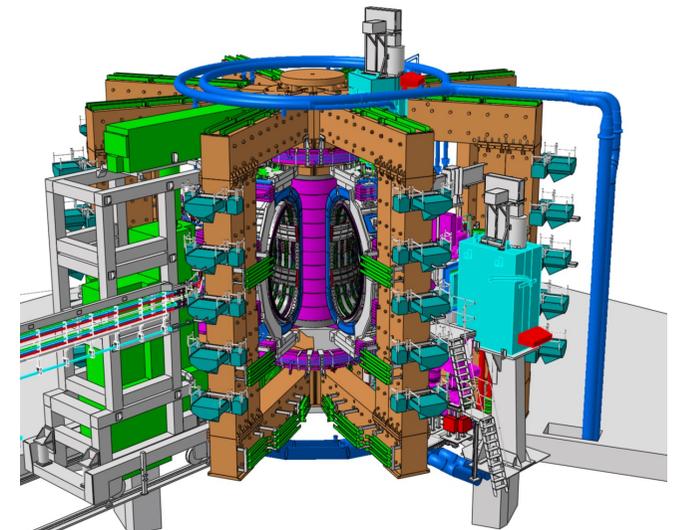
Estrutura de suporte



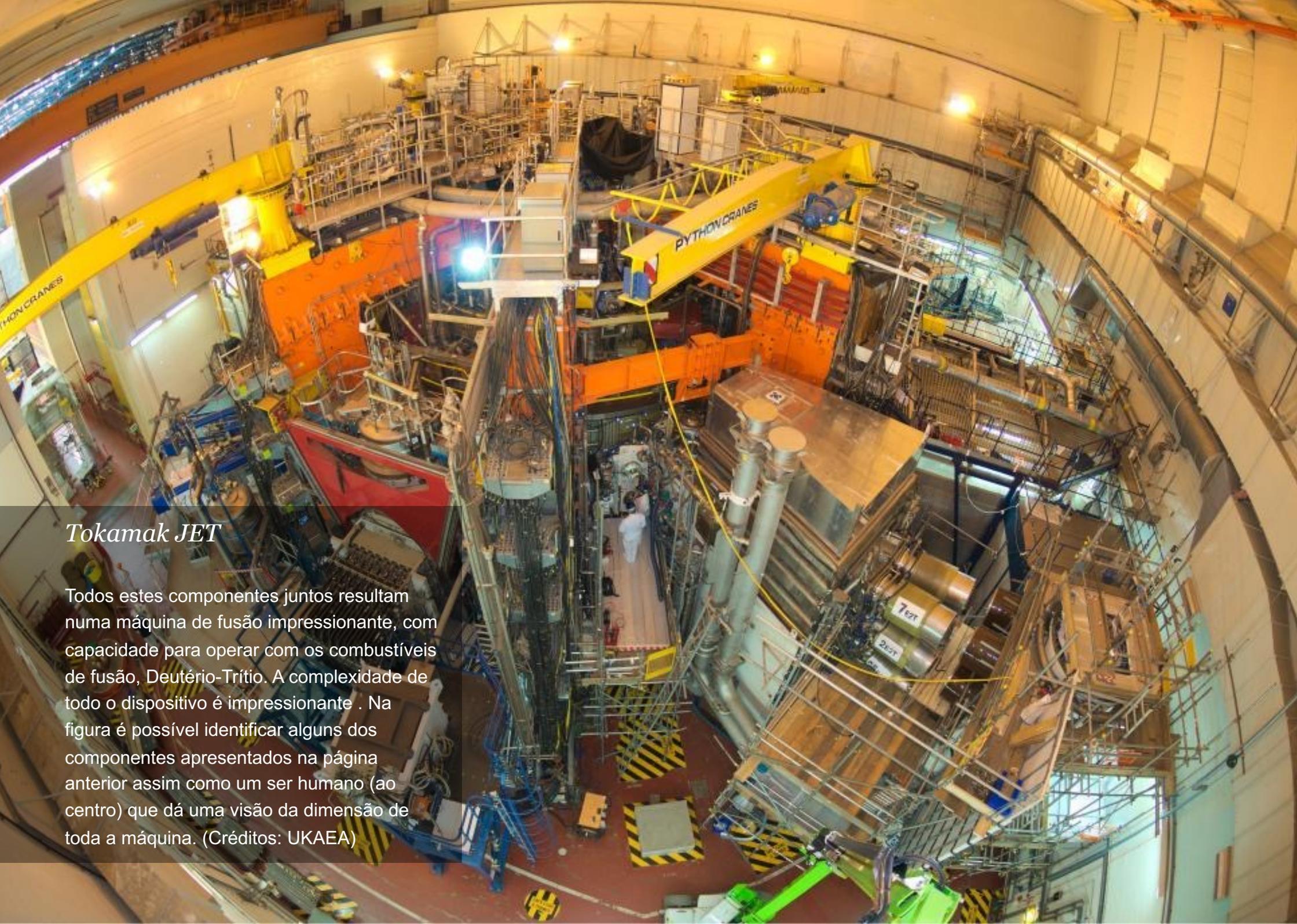
Bobines Poloidais



Núcleo do Transformador

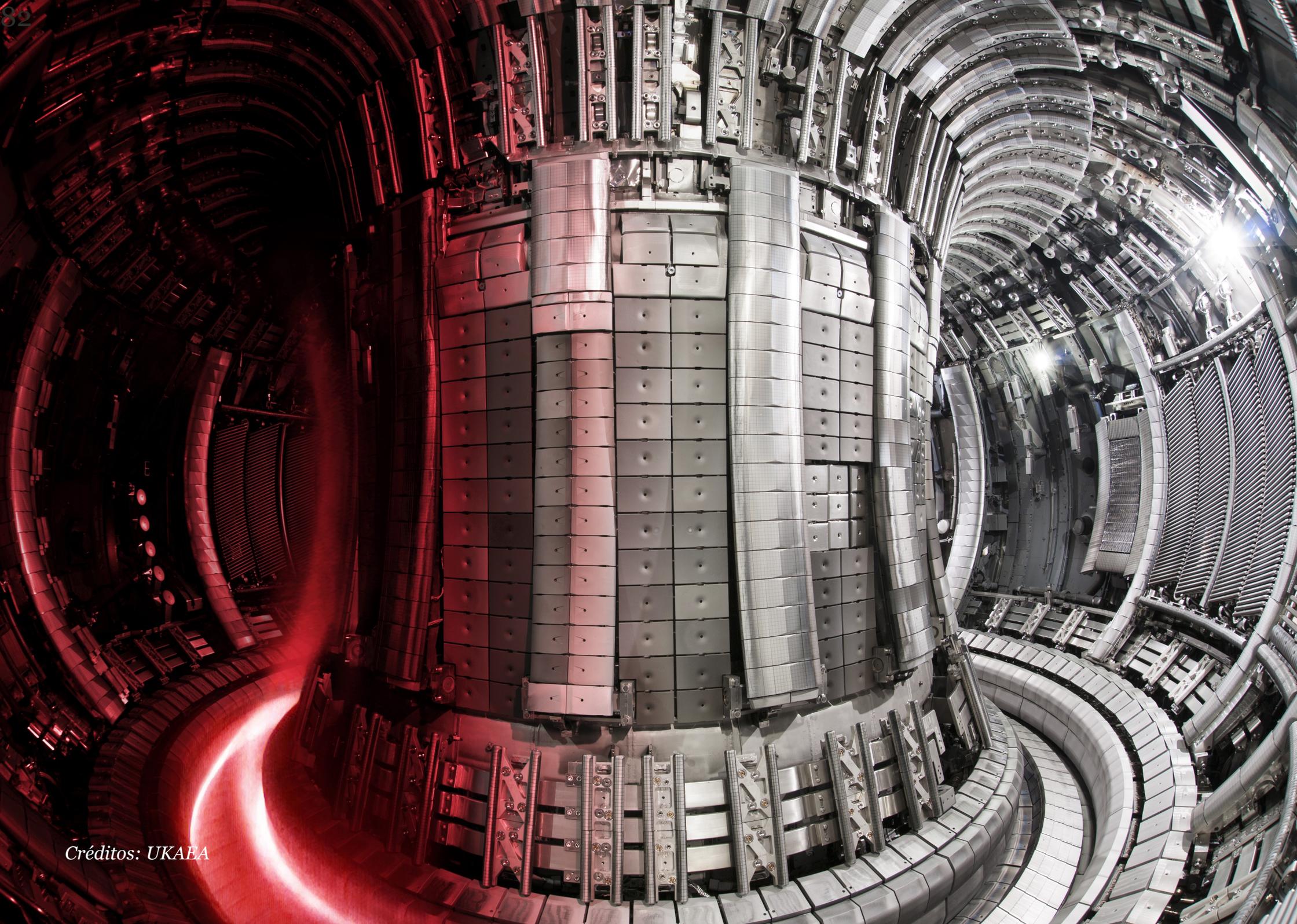


Sistemas auxiliares



Tokamak JET

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



Créditos: UKAEA

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

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

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

Na imagem à esquerda está sobreposta uma fotografia do plasma durante a operação. O plasma é mantido afastado das paredes por acção dos campos magnéticos que o confinam. A fotografia foi efectuada no espectro visível e capta sobretudo a radiação resultante da interação do plasma com o diversor na zona inferior da câmara. A zona central 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.



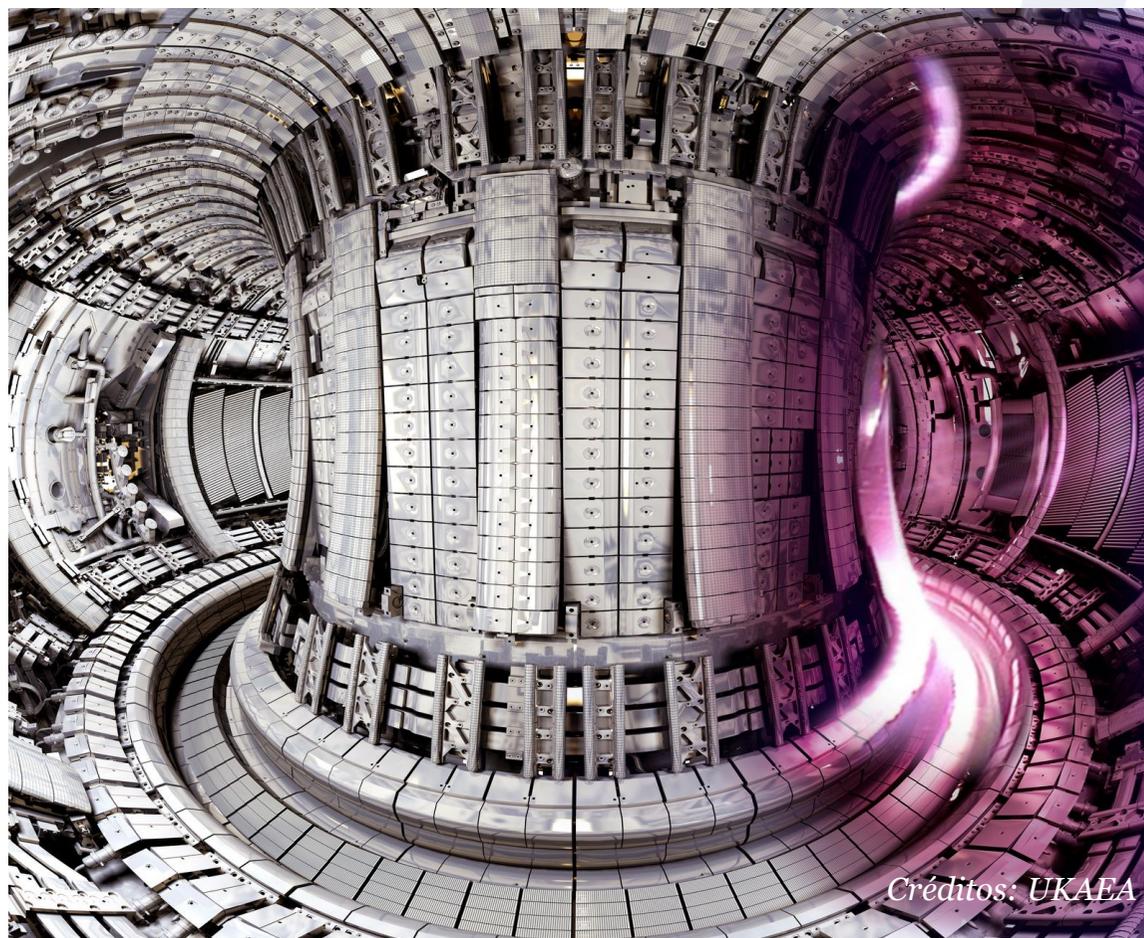
Telha de Berílio do JET derretida após experiências, devido a partículas rápidas do plasma que se conseguiram escapar aos campos magnéticos que confinam o plasma (Créditos: UKAEA)

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

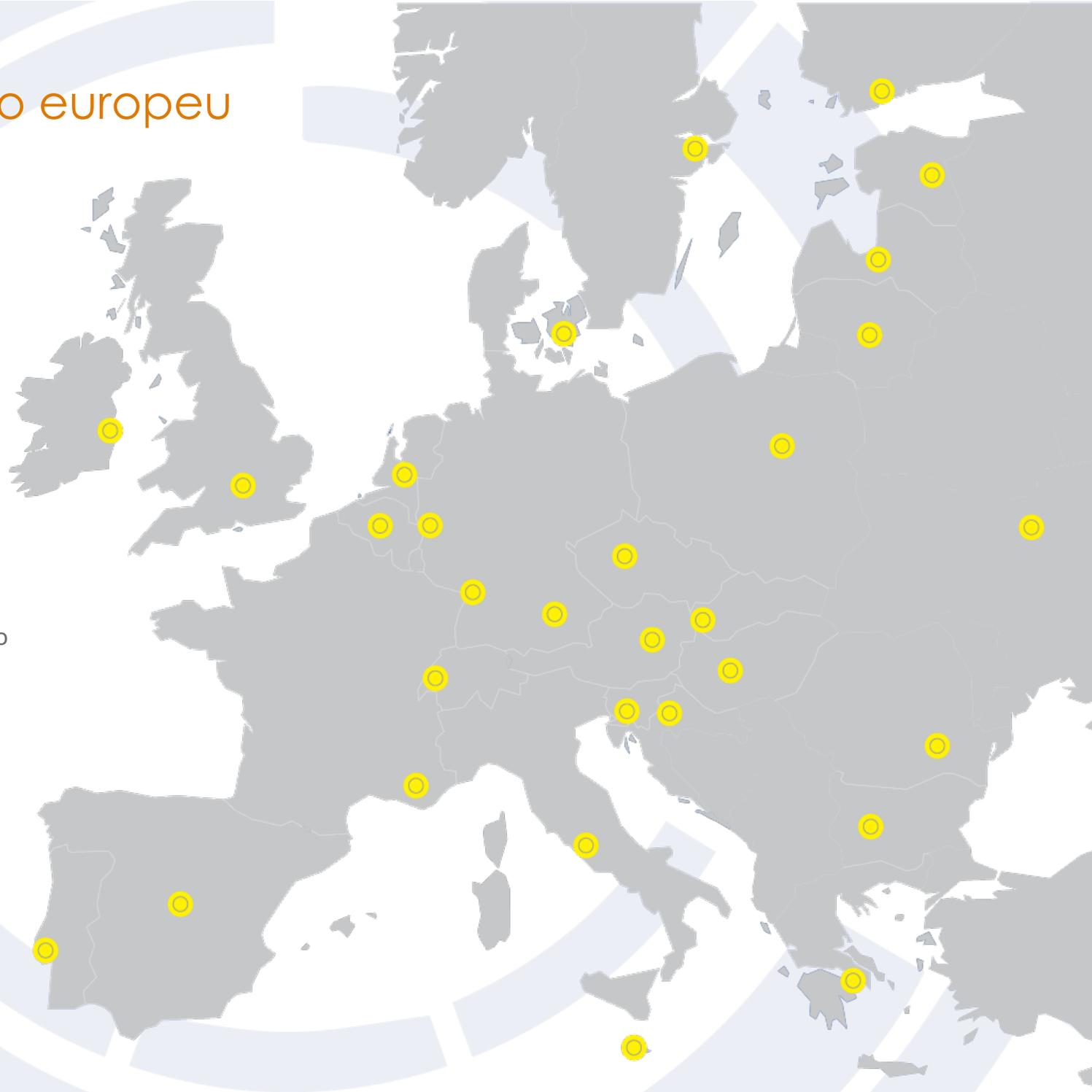


Créditos: UKAEA

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.

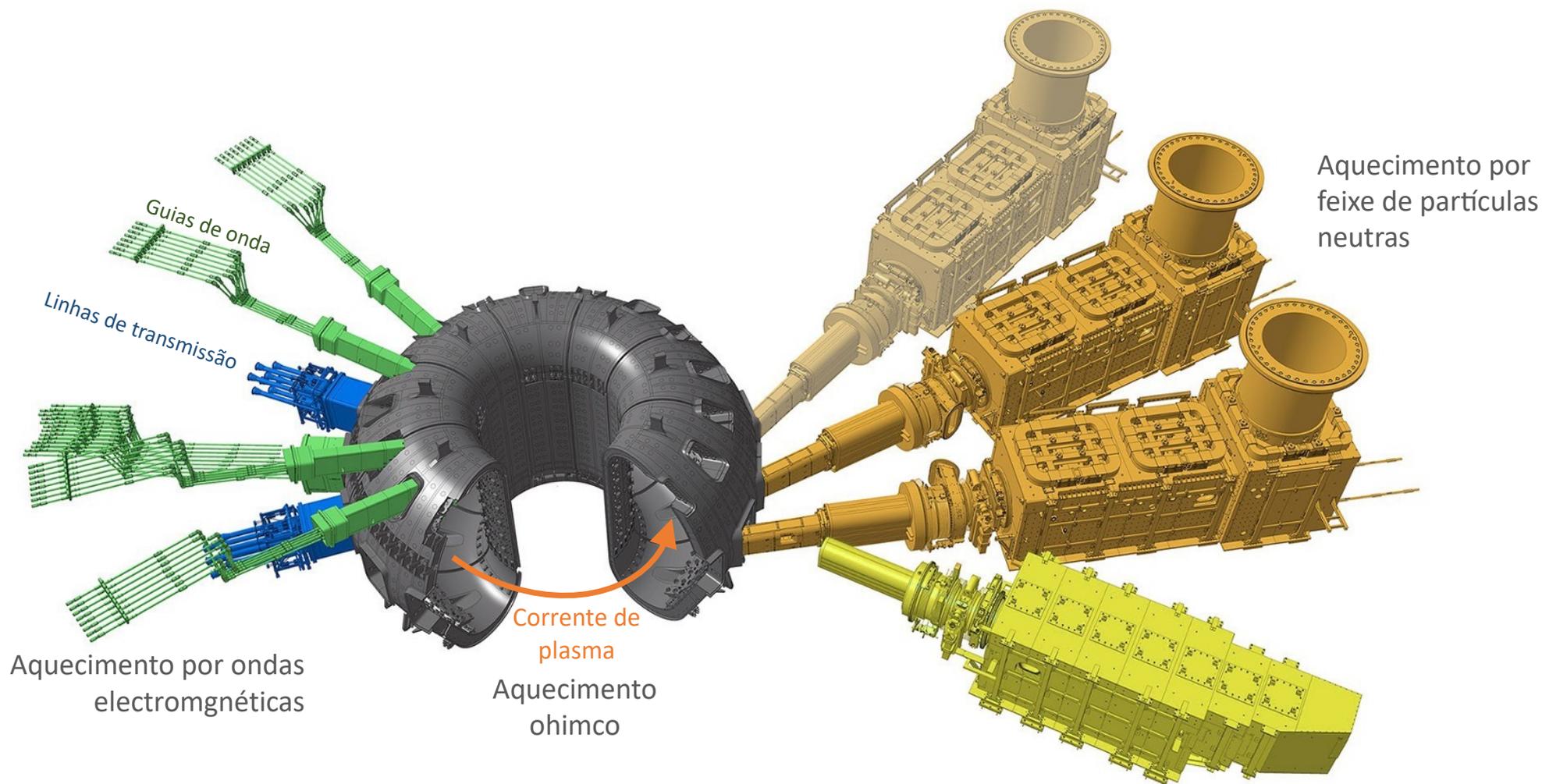
Para que a fusão termonuclear ocorra de forma auto-sustentada num reactor, são necessárias temperaturas do plasma 10 vezes mais elevadas.

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 portanto). Os aquecimentos na Ressonâncias Iónico-Ciclotrónica (ICR) e Electro-Ciclotrónica (ECR) são os mais usualmente utilizados .

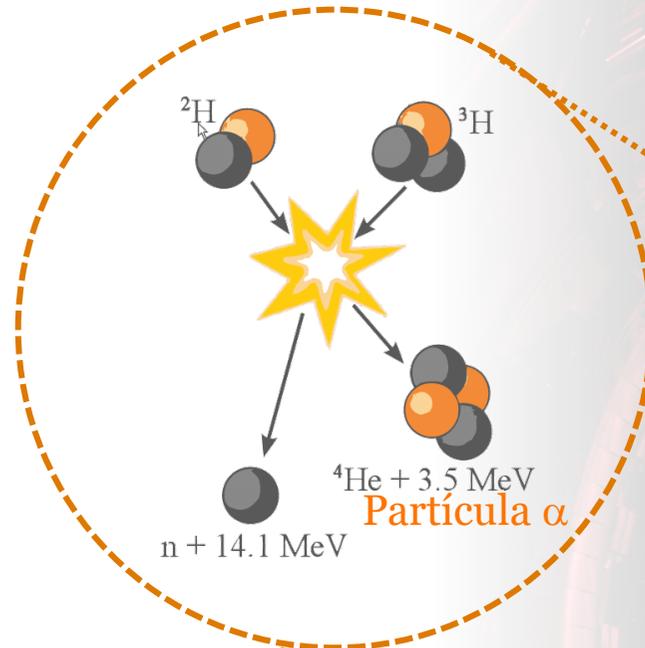
São usadas diferentes fontes de RF: klistrões (até ~ dez GHz) principalmente para o ICR, girotrões (até algumas centenas de GHz) para o ECR.



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, 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.

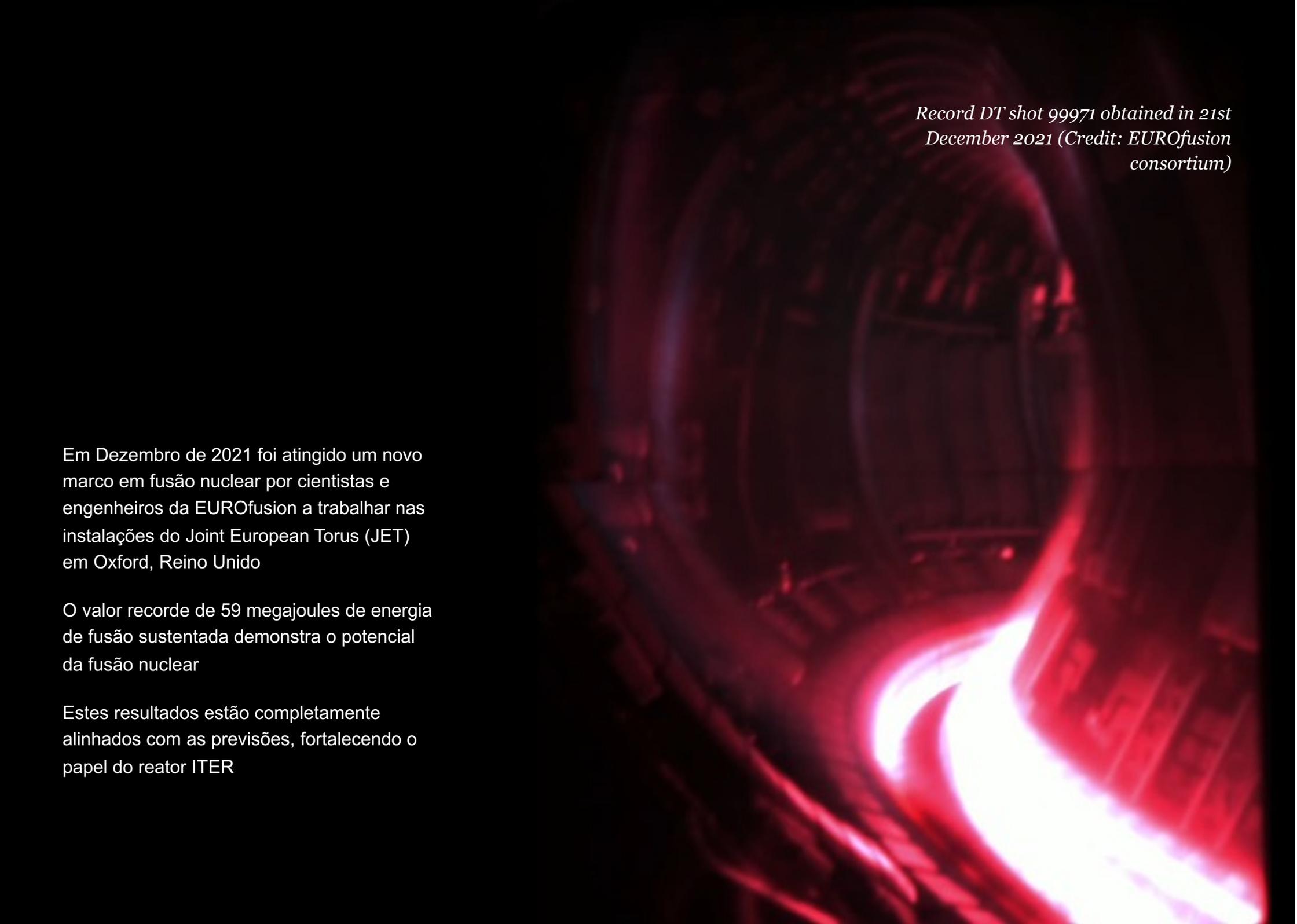
Os investigadores do consórcio EUROfusion – 4.800 especialistas, estudantes e técnicos vindos de toda a Europa, cofinanciados pela Comissão Europeia e incluindo investigadores do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) do Instituto Superior Técnico em Portugal – usaram o dispositivo Joint European 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

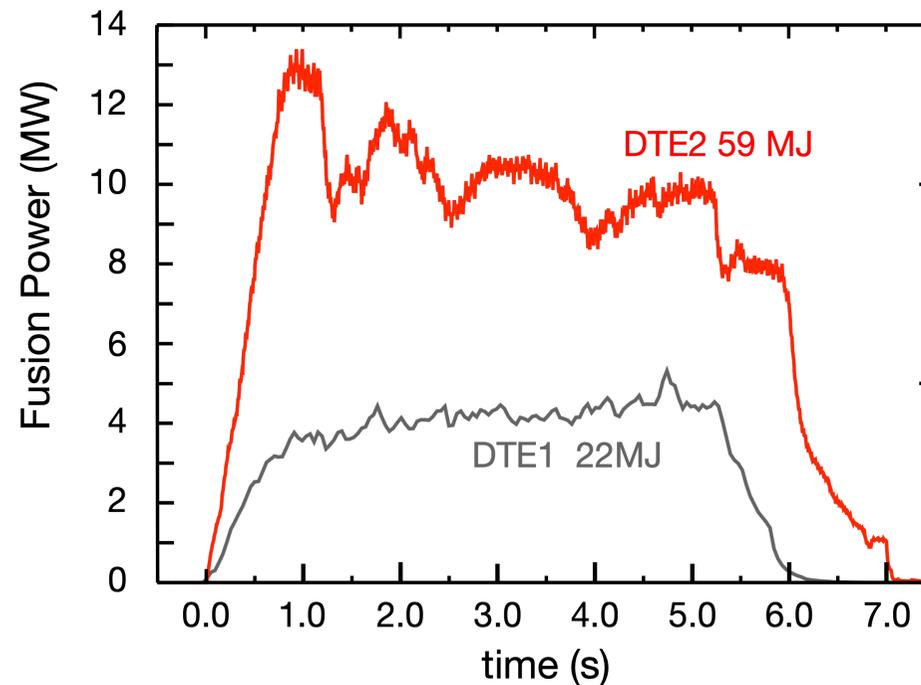
O valor recorde de 59 megajoules de energia de fusão sustentada demonstra o potencial da fusão nuclear

Estes resultados estão completamente alinhados com as previsões, fortalecendo o papel do reator 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.



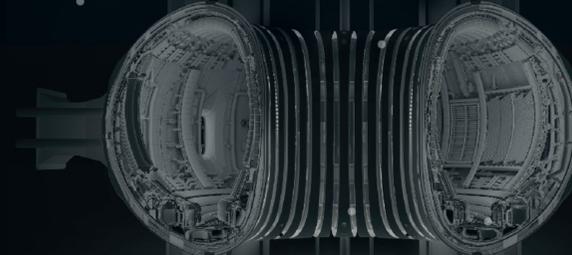
• Testar os materiais usados no ITER para otimizar a performance da operação



• 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

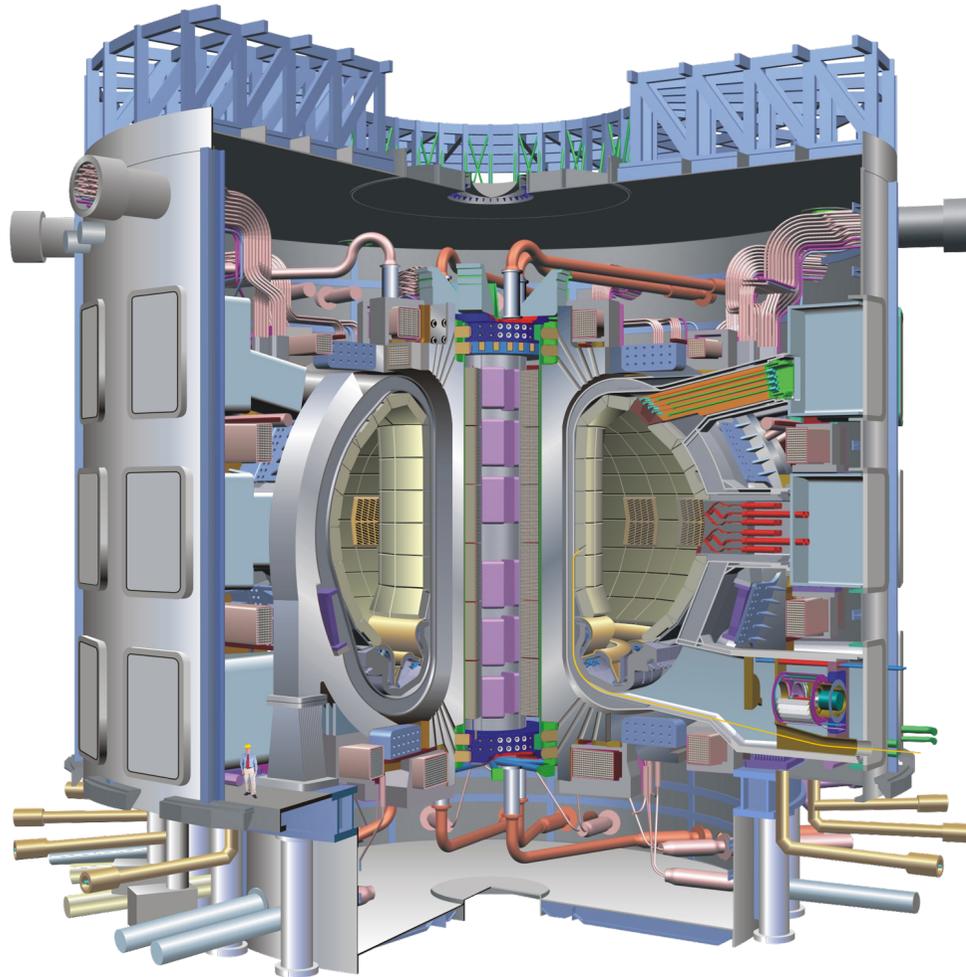


“As Nações Unidas estabeleceram a ação climática como um dos Objetivo de Desenvolvimento Sustentável. Numa altura em que todos nós vemos e vivenciamos em primeira mão os efeitos das alterações climáticas, estes resultados demonstram a urgência de encontrar soluções alternativas para este problema, e 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 viabilidade científica e técnica da energia de fusão ($P = 500 \text{ MW}$, $D = 300 \text{ s}$, $Q = 10 - 20$) e testar a integração de todas as tecnologias necessárias para uma central eléctrica de fusão nuclear



O ITER – projetado para demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da energia de fusão – será a maior instalação de fusão experimental do mundo. 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/>

Corte do reactor ITER (Créditos: ITER)

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 ais de 30 diferentes sistemas necessários para a operação da máquina. O complexo do tokamak é uma estrutura qualificada para aplicações nucleares com betão reforçado e apoiada em isoladores anti-sísmicos. O telhado está a 60 metros do chão e o piso da cave é aproximadamente a 11 metros de profundidade. O plano médio do tokamak fica situado ao nível do solo. A construção do 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.



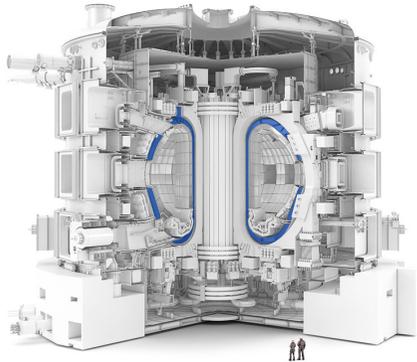
O complexo do tokamak é uma estrutura qualificada para aplicações nucleares com betão reforçado com uma estrutura de aço muito apertada (na fotografia)



Créditos: ITER

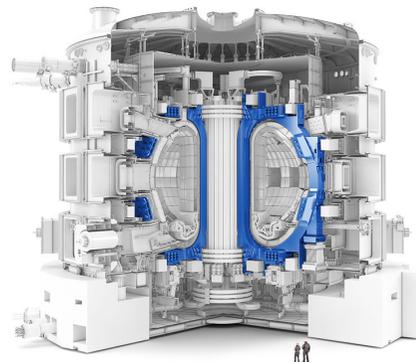
O poço do tokamak ITER é onde está instalado o tokamak. A estrutura circular à volta é o escudo biológico feito de betão com paredes de até 3,2 metros de espessura

Anatomia do ITER



Câmara de Vácuo

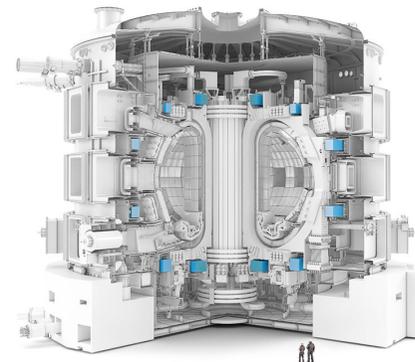
A câmara de vácuo do ITER é a câmara onde ocorrerão as reações de fusão e localiza-se no interior do criostato. Na câmara de formato toroidal (forma de donut), as partículas de plasma colidem e libertam energia sem tocarem nas paredes devido ao processo de confinamento magnético. A câmara é constituída 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.

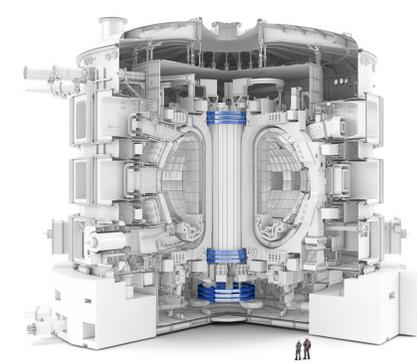
Quando energizada com corrente (68 000 A) o campo magnético atingirá os 11.8 T – cerca de 250000 vezes o campo magnético da Terra!. Cada bobine mede 17x9 m e pesa 320 toneladas..



Bobines Poloidais

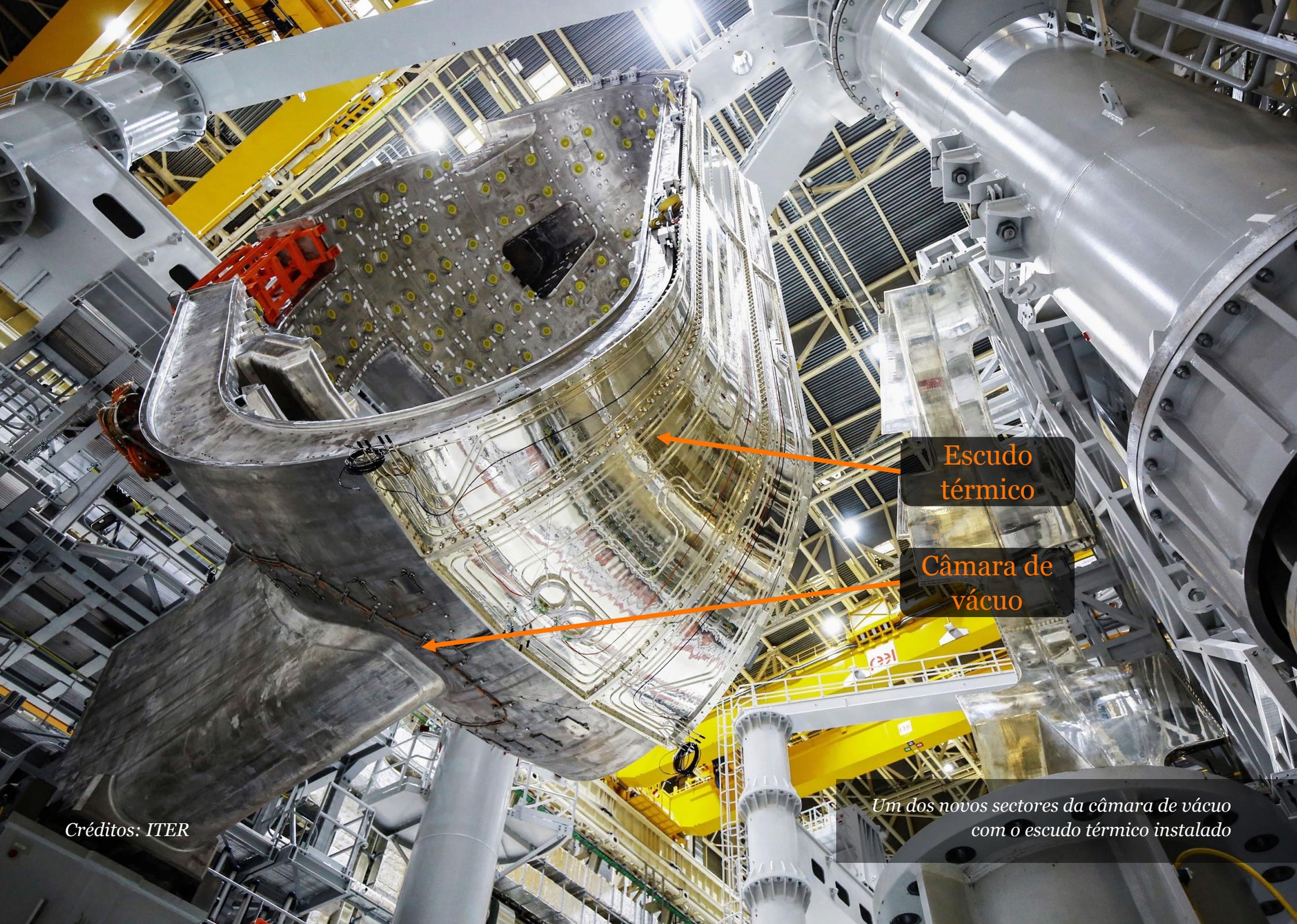
O ITER irá operar com 6 bobines toroidais, que asseguram a forma e estabilidade do plasma ultra-quente.

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.

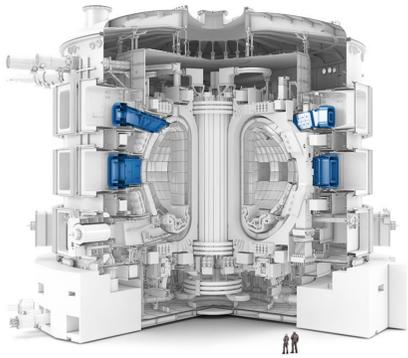


Escudo
térnico

Câmara de
vácuo

Créditos: ITER

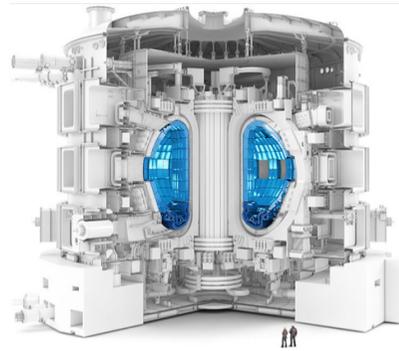
Um dos novos sectores da câmara de vácuo
com o escudo térmico instalado



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.

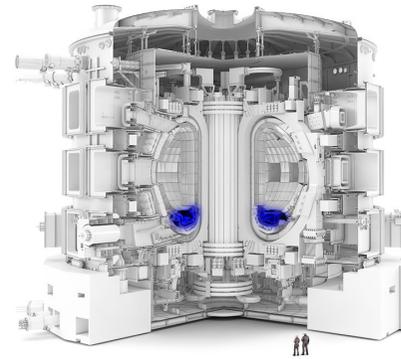
O ITER Terá cerca de 50 diagnósticos que oferecerão um visão sem paralelo do plasma e garantirão uma operação suave do dispositivo.



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. .

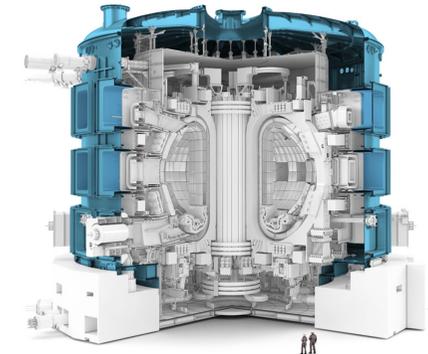
A parede consiste de 440 módulos, que cobrem a parede da câmara de vácuo.



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.

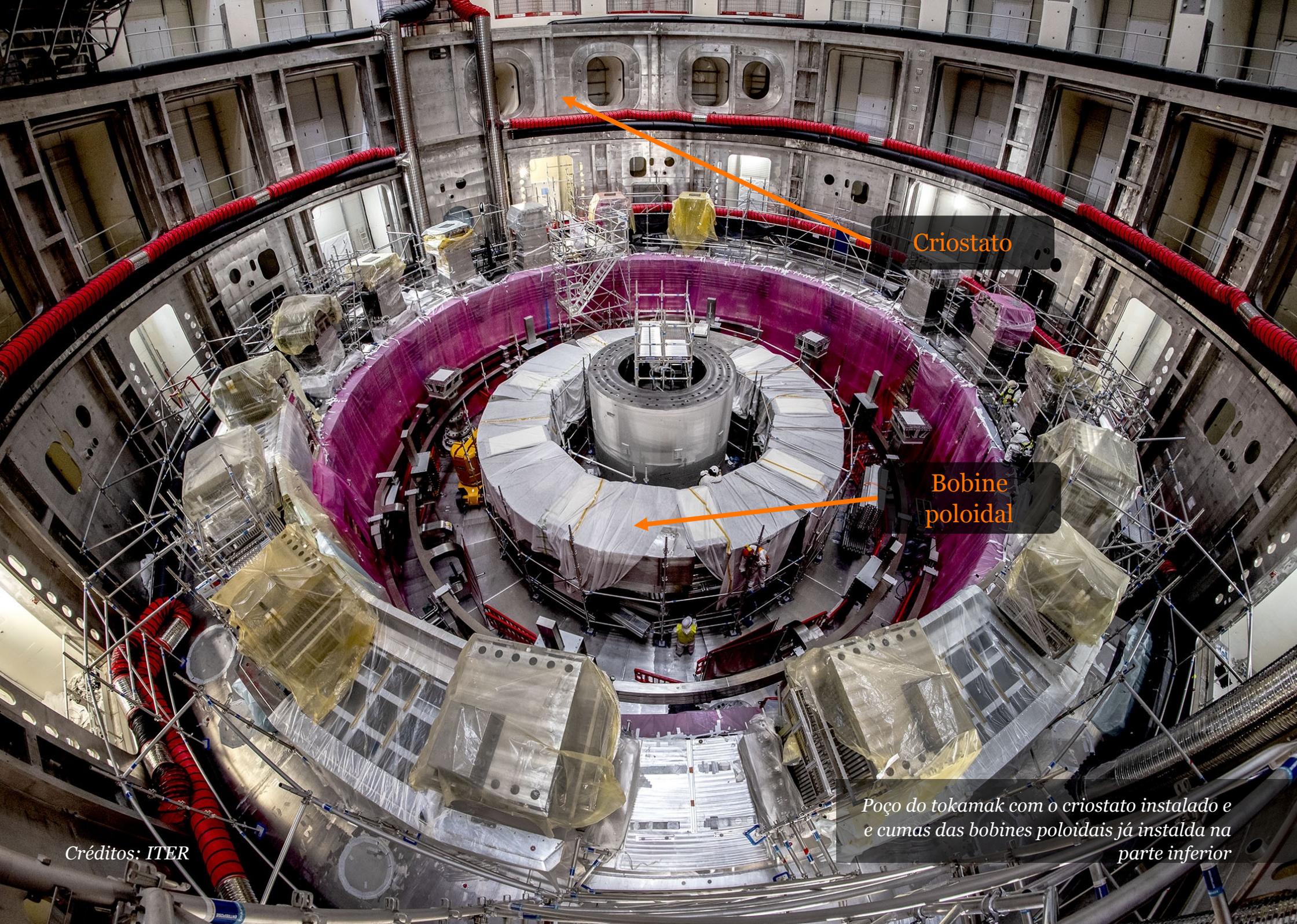
O diversor consiste de 54 cassetes, localizadas na parte inferior da câmara de vácuo.



Criostato

O ITER estará sujeito a variações extremas de temperatura. Dentro das bobinas magnéticas circulará Hélio líquido para baixar 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

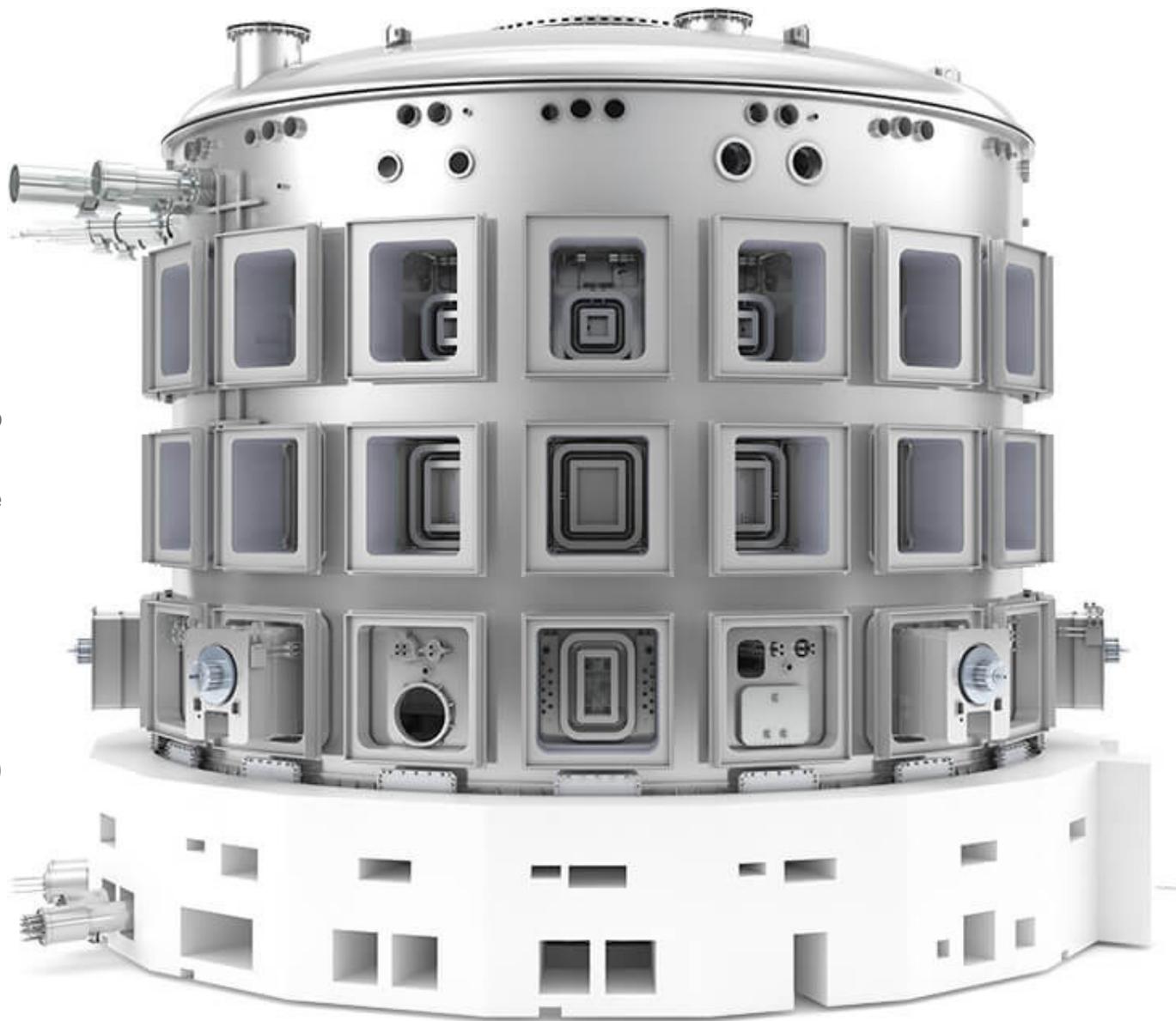
Bobine poloidal

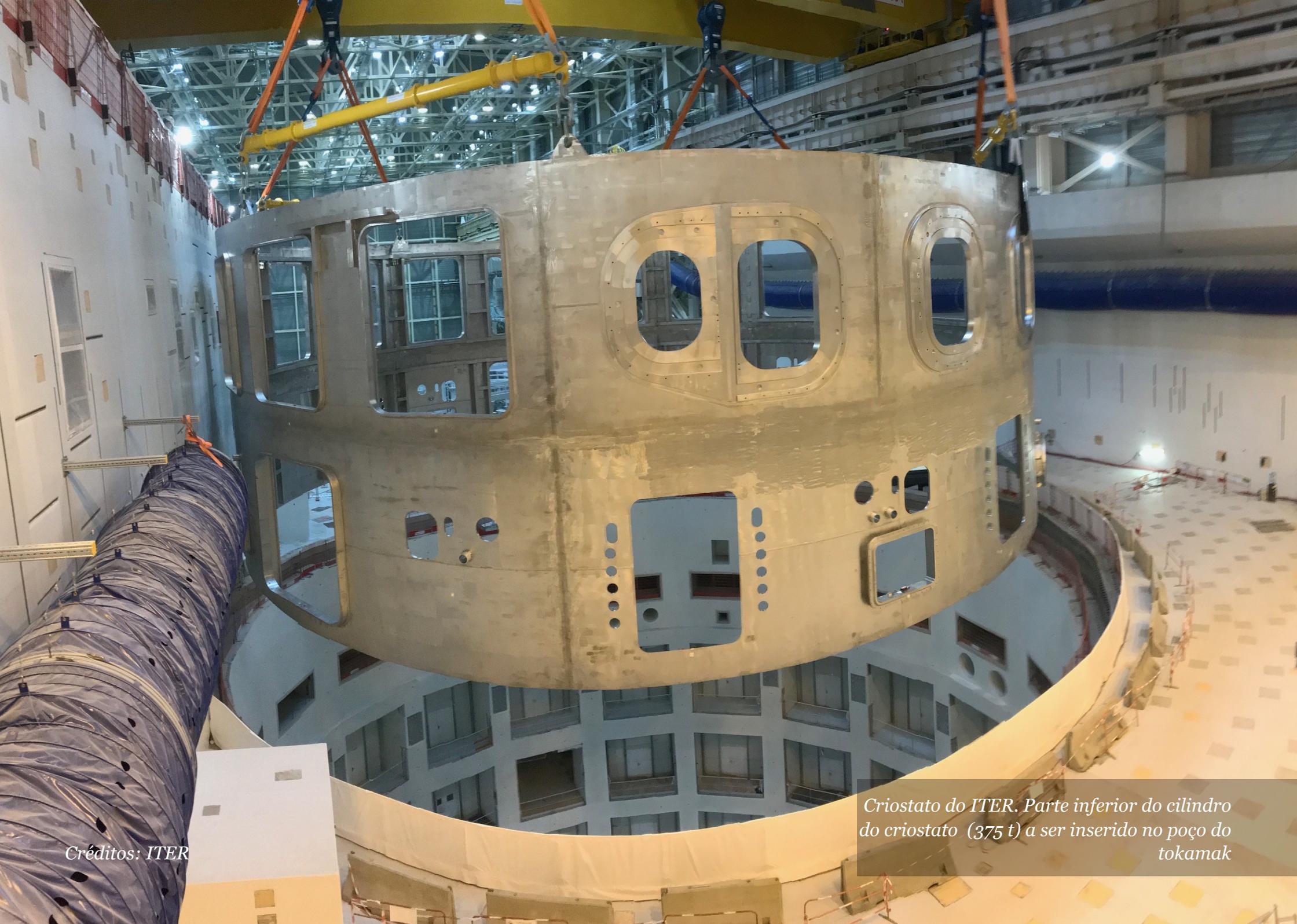
Poço do tokamak com o criostato instalado e cumas das bobines poloidais já instala da na parte inferior

Créditos: ITER

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)



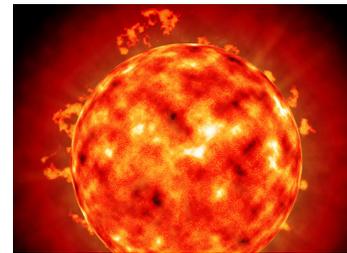
360,000 t

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



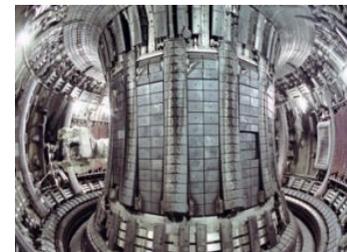
10⁷ componentes

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 reatores 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 numa 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 direção das paredes mas a reação extingue-se

Uma disrupção no tokamak JET. O plasma moveu-se em direção do topo da máquina onde se pode observar uma forte interação 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 fuão 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 Reoteiro 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.

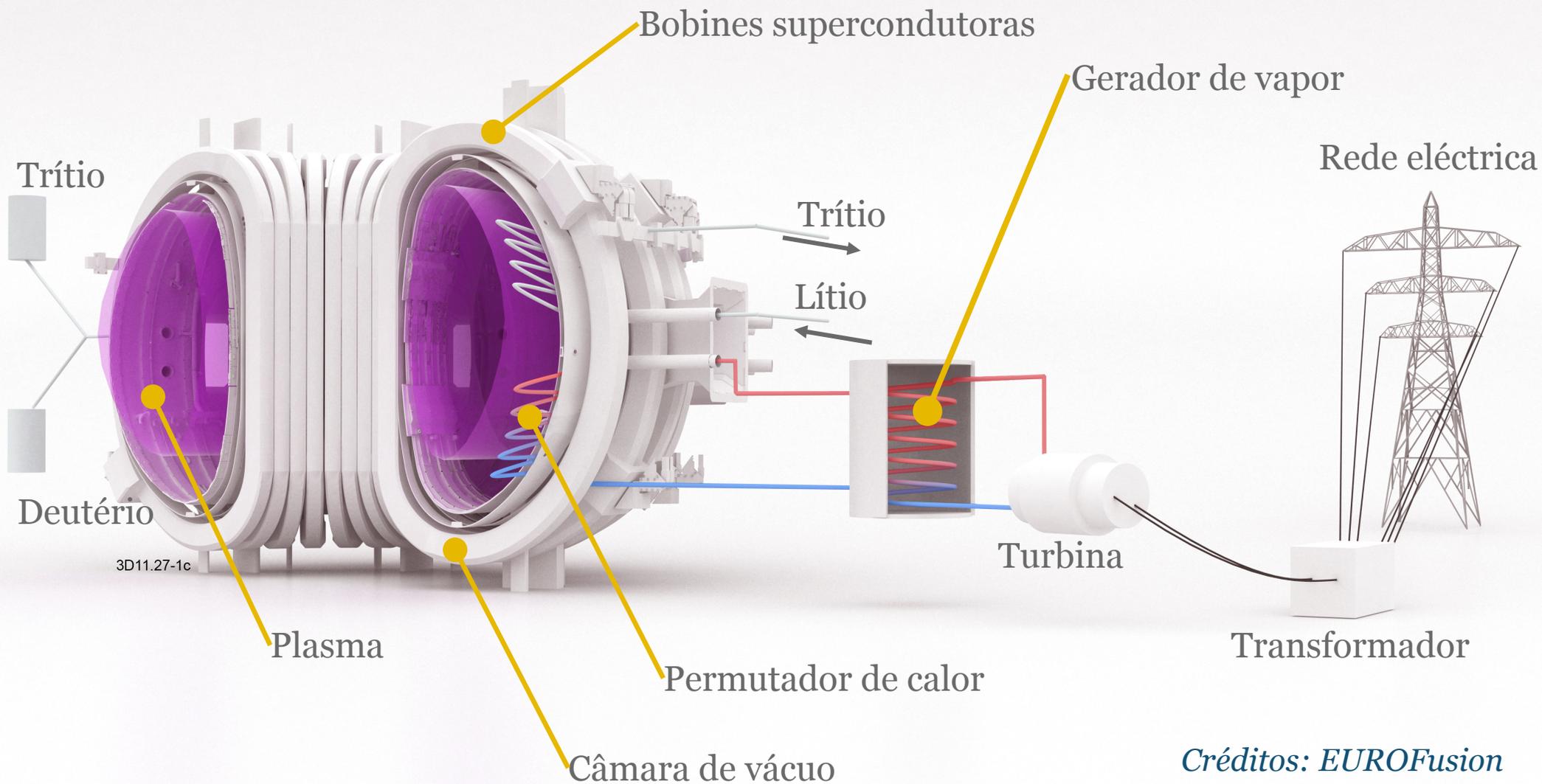
- Escolha da duração de pulso mínima e dos sistemas de aquecimento adequados
- Desenho para que todas as actividades de manutenção possam ser efectuadas remotamente através de manipuladores
- Incorporação de requisitos de segurança nuclear desde a fase de desenho conceptual do reactor

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.

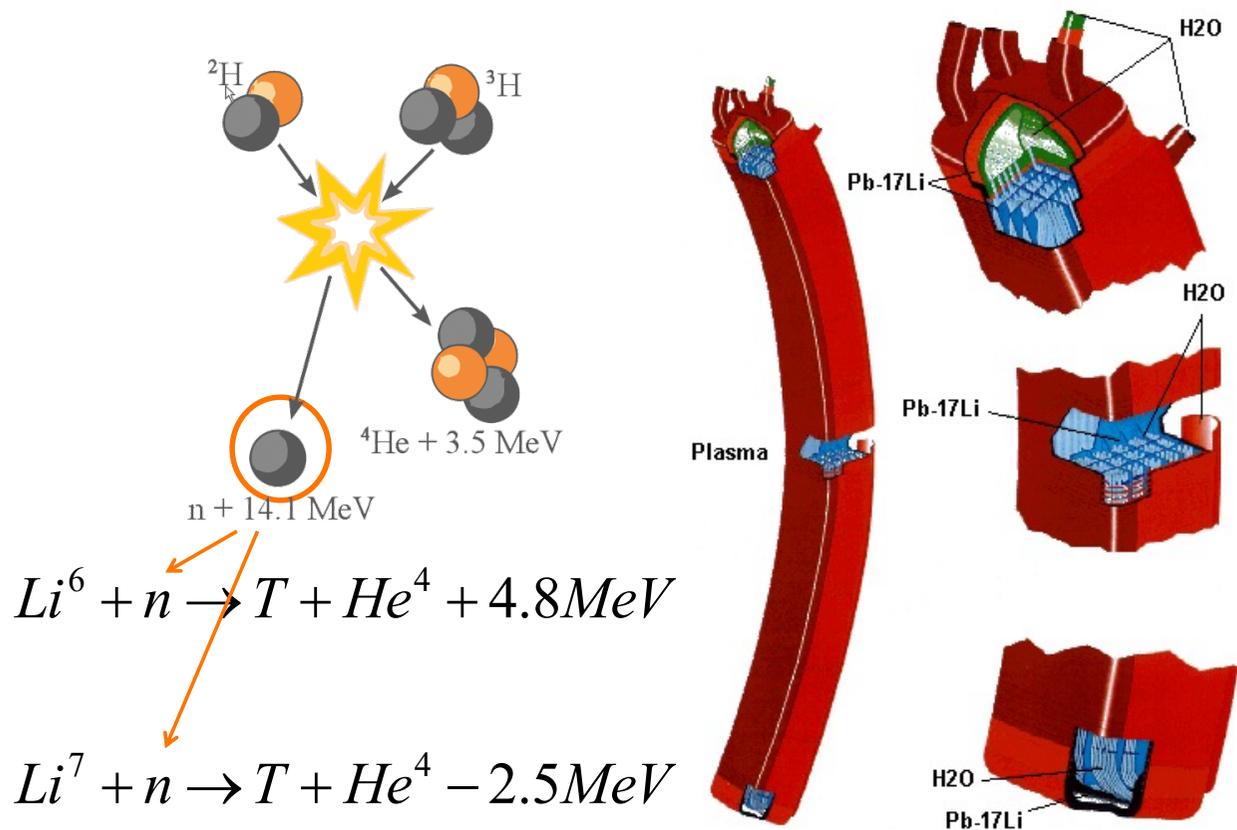
Central eléctrica de fusão nuclear

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.

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.

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).

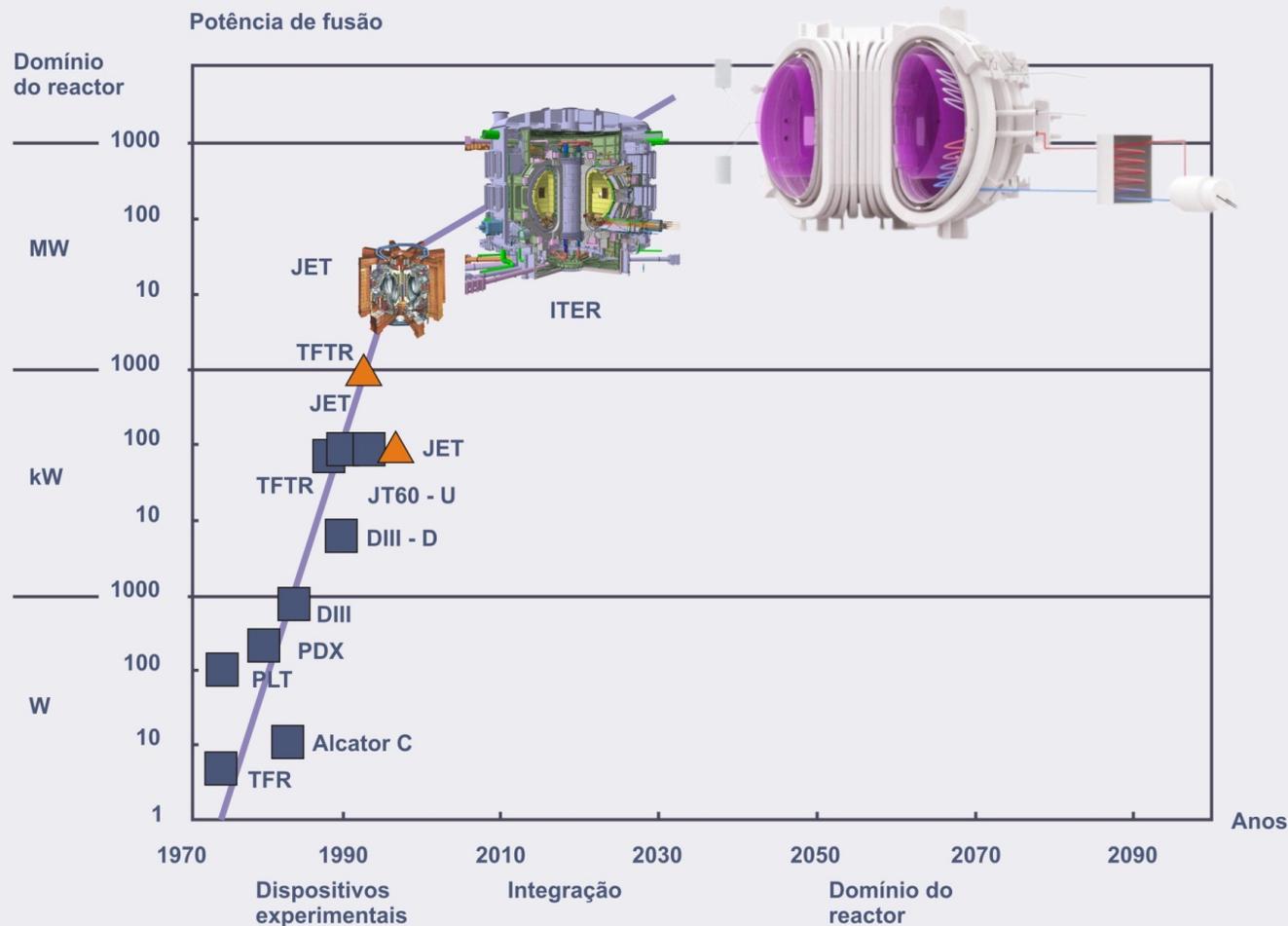
Quando teremos energia de fusão?

A investigação em fusão nuclear sofreu avanços significativos ao longo das últimas décadas e em breve estaremos em condições de construir e operar um reator de 1 GW em contínuo.

Nos próximos anos assistiremos a avanços significativos em várias frentes tecnológicas permitindo concretizar a operação de um reator 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

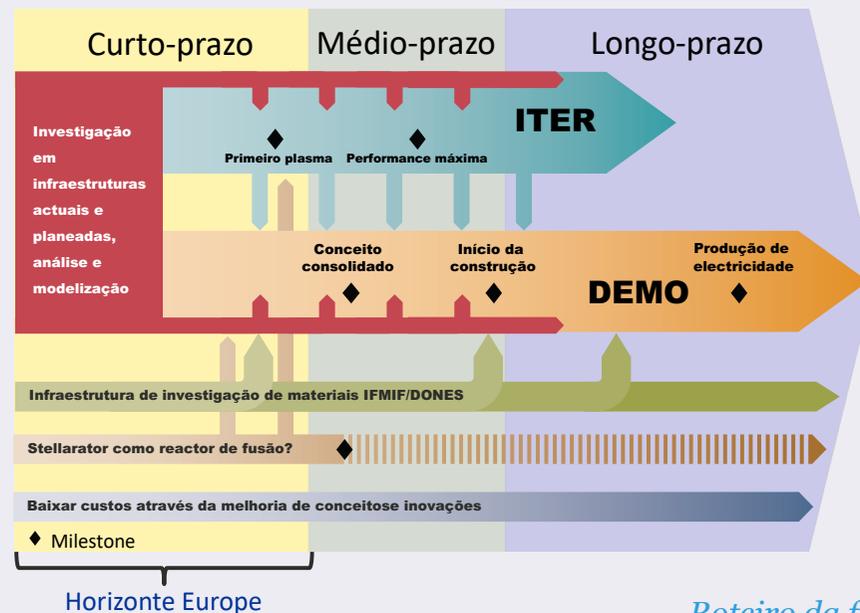
- Construção do ITER
- Investigação e Desenvolvimento em apoio do ITER
- Operação Deutério- Trítio no JET
- Desenho conceptual do DEMO
- Investigação e Desenvolvimento para o DEMO
- Construção duma infraestrutura de testes d materiais, IFMIF-DONES
- Exploração científica e tecnológica do conceito stellarator

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

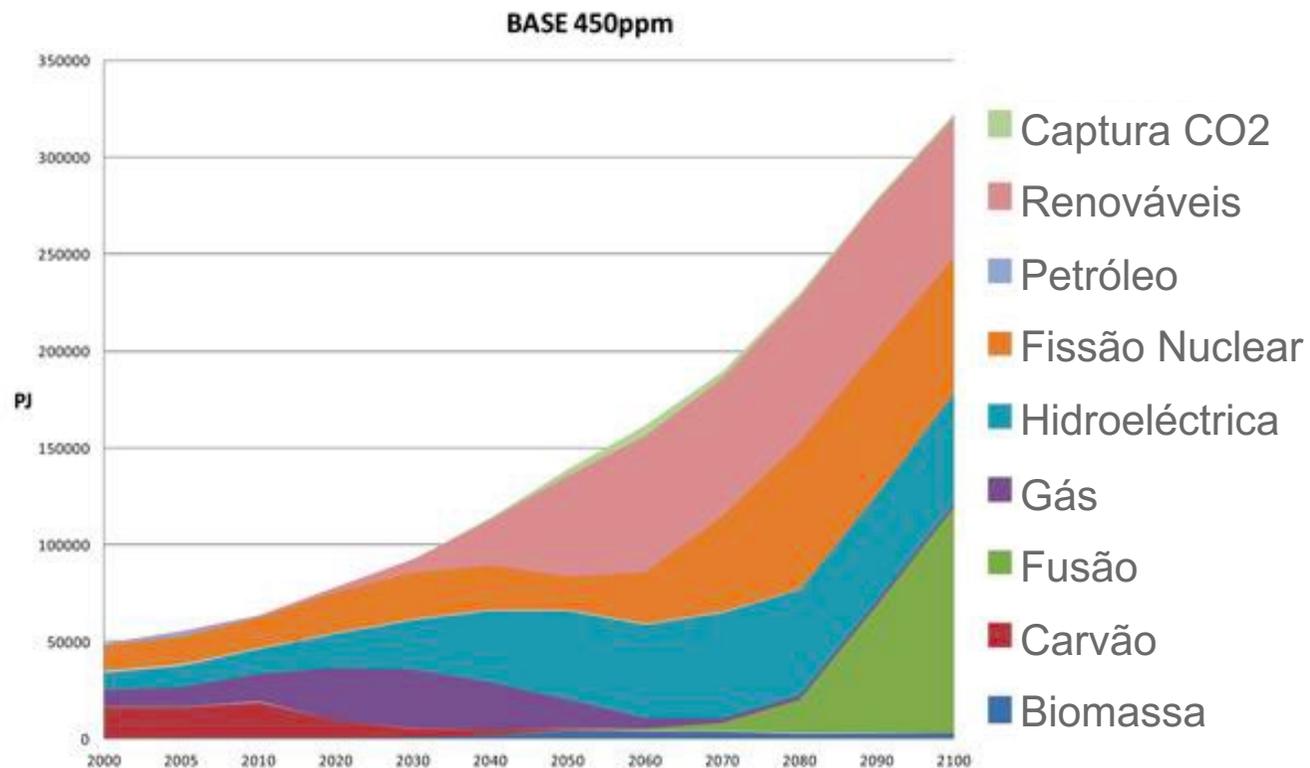


Roteiro da fusão estabelecido pela Eurofusion

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 EFDA-TIMES da penetração da energia de fusão no mercado assumindo emissão de CO₂ limitada a 450ppm, H. Cabal et al European Energy Conference 2012



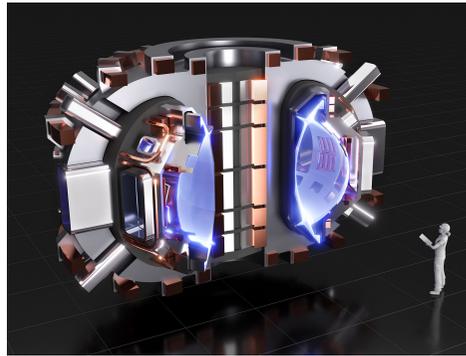
Novos conceitos

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 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:

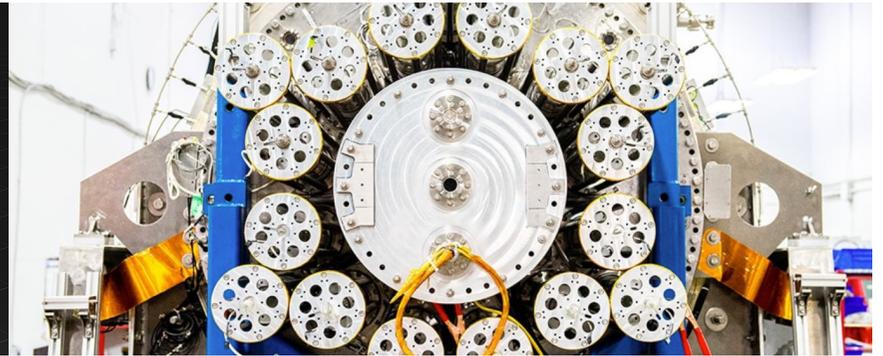
“Fusion will be ready when society needs it”

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

SPARC



General Fusion



TAE Technologies



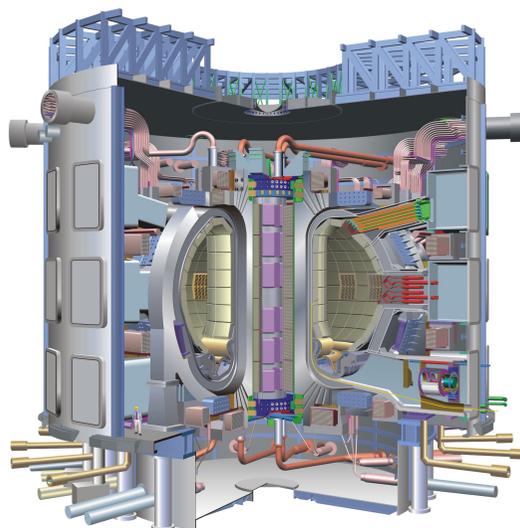
First Light Fusion

Ideias a reter

4

Notas finais

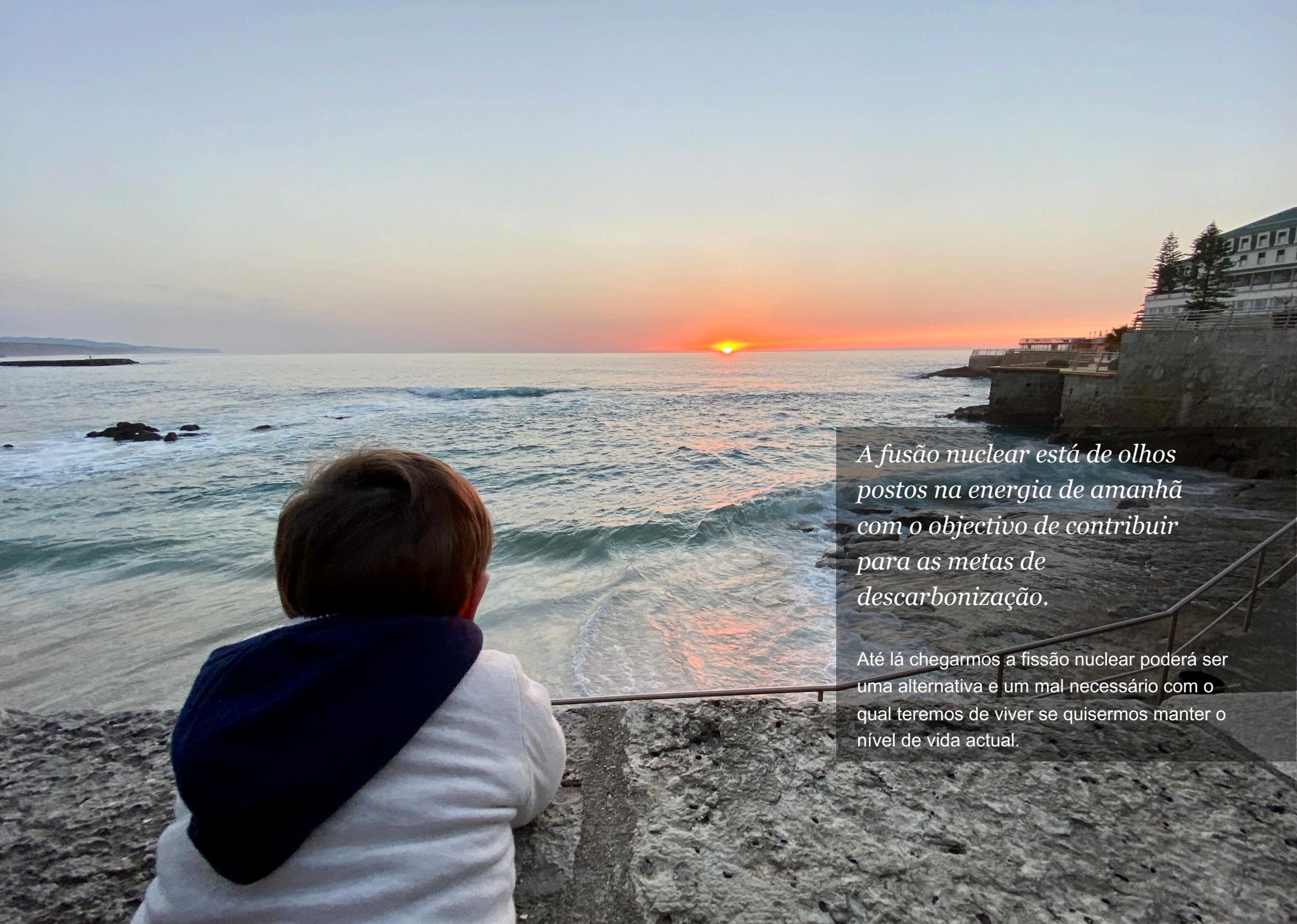
Nem toda a energia nuclear é má. A fusão nuclear é o mais próximo possível de energia nuclear amiga do ambiente. Progressos científicos significativos abrem a perspectiva de um futuro próspero e com energia barata, ilimitada e segura. A possibilidade de que a energia que chega às nossas casas possa vir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

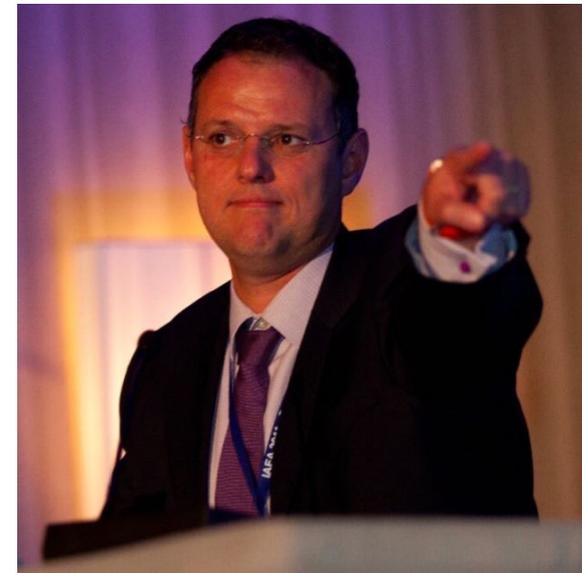


Facebook:
[IPFNLA](#)



LinkedIn:
[ipfn](#)

*Se quiser contactar
o Bruno:*



LinkedIn:
[bruno-soares-goncalves-106819212](#)



bruno@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

Bibliografia e Recursos online

Livros

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>)

*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>

* disponibilidade verificada em Fevereiro de 2022

Sobre o autor

Bruno Soares Gonçalves é Presidente do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear desde 2013 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” Desenvolveu actividade em 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.

Desde Maio de 2012 é o Presidente do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, do Instituto Superior Técnico.

