

FUSÃO NUCLEAR: em que estado estamos?

António João Caeiro Heitor Coelho¹

¹ Aluno do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Física Tecnológica do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Resumo

Produzir energia elétrica de forma limpa e segura é possível através de reações de fusão nuclear. Fazê-lo de forma econômica e sustentável tem sido alvo de intensa investigação principalmente em reatores experimentais do tipo *tokamak*. Desde a sua conceção em meados do século passado até à atualidade, muitas barreiras tecnológicas foram derrubadas, mas o caminho a percorrer ainda é longo. Neste artigo, procura-se dar uma visão geral de quatro desafios atuais cuja solução será determinante na viabilidade deste tipo de reatores como fonte de energia no futuro.

Introdução

Existem diversas propostas para a produção de energia elétrica através de reações de fusão nuclear. De todas elas, a que se encontra num nível de investigação mais avançado é, sem dúvida, o confinamento magnético num *tokamak*, um reator em forma de donut que possui um campo magnético toroidal muito forte (produzido por bobinas poloidais) que confina as partículas, *prendendo-as* às linhas de campo (ver Fig. 1).

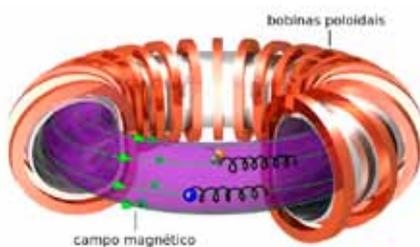
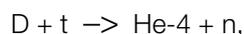


Fig. 1 - Esquema de um tokamak

O combustível dos futuros reatores de fusão nuclear será constituído pelos isótopos de hidrogénio deutério (D) e trítio (T) que se fundem na forma



libertando esta reação uma energia de 17,6 MeV sob a forma de energia cinética do hélio-4 e do neutrão (n), e que será recolhida e transformada em energia elétrica. A temperatura dentro de um reator de fusão é cerca de 10^8 K, que é, nada mais nada menos, uma ordem de grandeza acima da temperatura no centro do nosso Sol. Obviamente que a estas temperaturas os átomos de D e T encontram-se

ionizados. Temos então uma sopa de eletrões e iões dentro dos nossos reatores de fusão, ou seja, um plasma [1].

O início da fusão nuclear data de meados do século passado e, deste então, uma longa história tem vindo a ser escrita por uma comunidade internacional de cientistas empenhados em trazer à luz do dia uma nova forma de energia limpa, segura e (quase) infinita. Muitos *tokamaks* foram construídos, muita tecnologia foi inventada, mas os obstáculos sempre pareceram mais do que as soluções. Afinal, estamos a falar de um reator onde é necessário confinar partículas carregadas através de campos magnéticos extremamente elevados, de forma a atingir temperaturas muito altas sem comprometer os materiais que constituem as paredes internas do reator.

Em 2012, foram traçados oito objetivos sob o acordo *European Roadmap to fusion energy* assinado por 28 países europeus, de entre os quais Portugal faz parte através do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN), e que dita as oito missões a cumprir de forma a ter-se eletricidade produzida por fusão em 2050 [2].

Neste artigo, pretende-se fazer a análise de algumas dessas missões, nomeadamente o estado em que se encontram, e de outros aspetos tecnológicos relevantes sem os quais dificilmente se produzirá energia elétrica por esta via de forma sustentável.

1. Exaustão do calor – configuração com um divisor

Após a reação do deutério com o trítio, o neutrão produzido escapa para as paredes do reator onde a sua energia será recolhida. Já o núcleo de hélio, como é carregado, fica preso às linhas de campo magnético. Contudo, além de circular às voltas das linhas de campo, irá também difundir perpendicularmente a elas em direção às paredes. É quando chega à fronteira do plasma que é transportado ao longo das linhas de campo abertas em direção

ao divisor em vez de ir contra as paredes – ver Fig 2. O objetivo do divisor é então recolher a energia do hélio que lá chega assim como fazer a sua exaustão e de outras eventuais impurezas. Note-se contudo que as placas do divisor vão estar sujeitas a um fluxo de calor de 10 MW/m^2 [3], o que é um grande desafio do ponto de vista da conservação do material de que é feito (em termos de comparação, este valor é uma ordem de grandeza acima do valor a que uma nave espacial está sujeita ao reentrar na atmosfera).

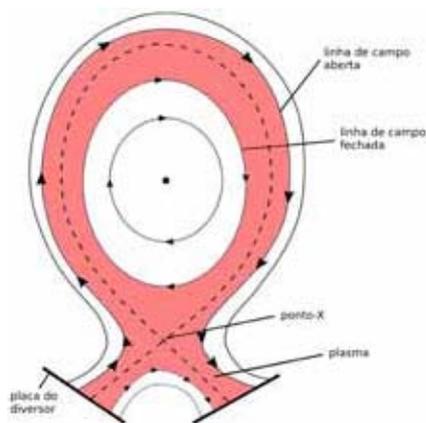


Fig. 2 - Secção poloidal do tokamak. Note-se na localização das placas do divisor.

Muitos dos primeiros divisores implementados eram feitos de grafite, mas a retenção de deutério e trítio era enorme já que o carbono se gosta de ligar aos átomos de hidrogénio para formar hidrocarbonetos. As perdas de combustível com placas de carbono eram, assim, insustentáveis e outra alternativa foi encontrada: tungsténio, que é um material, entre várias outras vantagens, com uma taxa de retenção de hidrogénio bastante mais baixa. Esta não é, no entanto, a única solução projetada para o futuro a longo prazo quando a potência térmica dos reatores for significativamente superior às atuais. Nesses casos, o tungsténio poderá não ser vantajoso e, como tal, atualmente uma das áreas de investigação mais ativas consiste no desenvolvimento de divisores de metal líquido [4], que, do ponto de vista teórico, são indubitavelmente superiores, mas que ainda têm um longo caminho pela frente até serem viáveis do ponto de vista prático.

2. Bobinas supercondutoras

Quanto maior for o campo magnético toroidal produzido pelas bobinas poloidais, maior será o tempo de confinamento das partículas no centro do plasma uma vez que estas se encontram mais agarradas às linhas de campo e a taxa com que difundem para as paredes do reator é menor. Recordemos que para uma bobina produzir um campo mais intenso, é necessário que a corrente que flui nela seja mais elevada; ora esta corrente é óhmica e, portanto, dissipa calor com o quadrado da corrente (lei de Ohm). Como tal, para compensar as

perdas, é necessário fornecer uma potência muito elevada às bobinas. Tomemos como exemplo o caso do JET, um tokamak no Reino Unido com bobinas de cobre, onde a potência elétrica fornecida às bobinas é da ordem dos 500 MW (cerca de duas ordens de grandeza acima da potência atualmente produzida pelas reações de fusão!) [5]. Devido a esta elevada potência que é necessário fornecer, as bobinas apenas podem trabalhar durante algumas dezenas de segundos e, durante esse tempo, são constantemente arrefecidas com água, caso contrário derreteriam.

Em suma, se queremos tempos de confinamento maiores e uma fração de potência elétrica que alimenta as bobinas não muito elevada (para que o reator de fusão seja economicamente viável), não podemos arquitetar bobinas óhmicas para o futuro. A solução está em usar bobinas supercondutoras (SC) já que a resistividade de um material supercondutor é nula e, portanto, não dissipa calor. O primeiro *tokamak* a operar com bobinas deste tipo foi o T-7 na URSS em 1979. Atualmente, existem mais *tokamaks* a operar com bobinas SC de NbTi (nióbio-titânio), mas projeta-se que no futuro os campos magnéticos mais fortes serão produzidos por Nb₃Sn (trinióbio de estanho).

Apesar de não haver dissipação óhmica num supercondutor, isso não significa que não se gaste energia durante o seu funcionamento. Aliás, as bobinas consomem dezenas de megawatts para funcionar. Porquê? Porque estes materiais referidos só se tornam SC a temperaturas muito baixas, aproximadamente a 4 K, e isso significa que é necessário um sistema de refrigeração a hélio líquido bastante rigoroso.

Mas a história da supercondutividade não fica por aqui. Em março de 2018, foi anunciada uma colaboração entre o MIT e uma companhia privada, a *Commonwealth Fusion Systems*, para a construção de um protótipo de reator mais pequeno do que os tokamaks convencionais e com bobinas SC a *alta* temperatura feitas de óxido de ítrio-bário-cobre [6]. Este material apresenta características SC a temperaturas mais elevadas do que os materiais já referidos (a cerca de 140 K), o que significa que os gastos energéticos e económicos com o sistema de refrigeração são menores. Apesar de ser um material bastante promissor, preveem-se ainda pelo menos três anos de investigação para provar que, de facto, este material é viável para a construção das bobinas.

3. Paredes resistentes aos neutrões

Como vimos no início, um dos produtos da reação de fusão é o neutrão com uma energia de aproximadamente 14 MeV (os restantes 3,6 MeV pertencem ao hélio). Os neutrões, uma vez que não têm carga, não ficam presos às linhas de campo magnético e fogem imediatamente para as paredes do reator. Estas possuem três funções distintas: produzir trítio a partir dos neutrões que chegam, absorver a sua energia cinética e proteger as outras partes do reator por trás das paredes, nomeadamente as bobinas e o criostato. A parede, ou *blanket* no termo inglês, é assim bastante complexa, sendo constituída por diferentes componentes como se pode ver na Fig. 3.

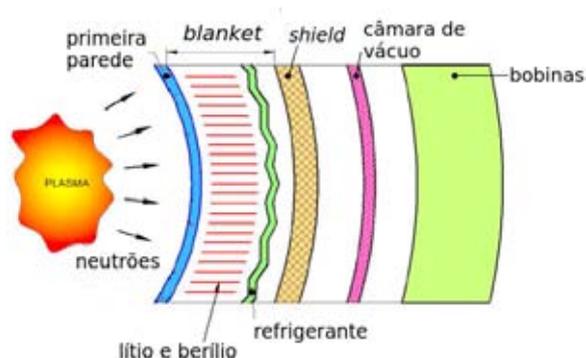


Fig. 3 - Esquema do *blanket* (parede) de um tokamak

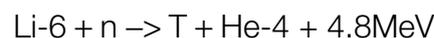
Quando um material, especialmente se for metal, é sujeito à irradiação de neutrões, as suas propriedades mudam de três formas distintas: incha (ou seja, as suas dimensões aumentam), fica mais duro (i.e., o comportamento plástico surge a pressões mais elevadas) e fica mais quebradiço (ou seja, parte-se a uma temperatura menor do que antes de ser irradiado). Todos estes fenómenos devem ser tidos em conta quando se arquitetam as paredes do reator, nomeadamente a *primeira parede* que está sujeita ao primeiro impacto; se o material de que é constituída não for otimizado para tal, então não vai sobreviver muito tempo. Há ainda outro aspeto importante a ter em conta que tem que ver com a ativação dos materiais após serem irradiados por neutrões.

Estas restrições, material forte e que não se torne radioativo após irradiação por neutrões, levam a que o material de eleição para a primeira parede seja o Eurofer [7], um aço inoxidável, onde o tradicional níquel é substituído por crómio devido à ativação do primeiro com neutrões. Esta liga, apesar de cumprir estes dois requisitos essenciais, tem um problema: a partir de temperaturas da ordem dos 500 °C começa a perder a sua rigidez; uma vez que se pretende que o refrigerador do *blanket* esteja entre os 800 °C-1000 °C (já que a eficiência da conversão em energia elétrica é superior a temperaturas mais altas), então a janela de temperatura do Eurofer poderá comprometer o desempenho do reator e outra solução terá de ser encontrada [3].

Existe, portanto, uma grande necessidade de se realizarem testes que validem não só o Eurofer, mas todos os outros materiais dentro do reator expostos à irradiação de neutrões. Para resolver esta questão, a comunidade de fusão propôs a construção do IFMIF - *International Fusion Irradiation Facility* -, onde serão produzidos fluxos de neutrões relevantes, i.e. da ordem daqueles que se espera nos futuros reatores, e com o pico de energia nos 14 MeV. A sua construção deverá iniciar-se no início da próxima década e é tida como um passo fundamental para o futuro dos reatores de fusão.

4. Produção de trítio autossuficiente

Tal como já foi referido, uma das funções do *blanket* do reator é a produção de trítio. Enquanto que o deutério existe com bastante abundância na água do mar, o trítio existe de forma residual na natureza já que tem uma semivida de 12,3 anos. Os reatores de fusão terão assim de produzir o seu próprio trítio através de uma reação com lítio que será um dos metais presentes na parede:



À primeira vista tudo parece ser fantástico: temos lítio nas paredes, o neutrão provém das reações de fusão no plasma, produzimos trítio e ainda ganhamos 4.8 MeV de graça. Não é, no entanto, assim tão simples uma vez que nem todos os neutrões vão reagir com o lítio: o *blanket* é finito e, por isso, existirão sempre perdas, os neutrões que forem parar à área do divisor não são recuperáveis, e também há neutrões que vão simplesmente ser absorvidos na primeira camada da parede, não chegando ao lítio. É, então, necessário um multiplicador de neutrões para compensar estas perdas, o que é conseguido através da reação dos neutrões com berílio ou chumbo. É assim possível ter um número de átomos de trítio produzido nas paredes por cada neutrão produzido no plasma, o chamado TBR (*Tritium Breeding Ratio*) [8], igual a 1. Ainda assim, isto não é suficiente. É preciso ter um TBR acima de 1 por três razões: o trítio tem uma semivida relativamente curta o que significa que a cada ano se perde 6 % do stock armazenado; há perdas inevitáveis uma vez que o combustível está sempre a ser reciclado passando pelas bombas de vácuo e todas as outras tubagens; cada reator deve produzir uma quantidade de trítio suficiente para que outro novo reator tenha trítio para começar a trabalhar (~7 kg).

A produção de trítio de forma autossuficiente é assim um dos grandes desafios. O ITER, que é o maior tokamak a ser construído atualmente, não irá produzir o seu próprio trítio (à semelhança de todos os outros tokamaks existentes atualmente), mas serão realizadas várias provas de conceito com diferentes tipos de *blanket* de forma a testar a sua viabilidade.

Conclusão

O acordo *European Roadmap to fusion energy* foi assinado por 28 países europeus em 2012 e tinha em vista traçar as missões prioritárias a serem cumpridas para trazer energia elétrica produzida em reatores de fusão nuclear à luz do dia. Das oito missões que constam do documento [2], três delas foram referidas neste artigo (os pontos 1, 3 e 4). Um outro ponto, o das bobinas SC, foi aqui explorado por estar na linha da frente no que a nova tecnologia diz respeito. Em todos os desafios aqui explorados verificámos uma semelhança: existem soluções a curto prazo, mas que, a longo prazo, o que na gíria de fusão corresponde invariavelmente a cenários de reatores com potências térmicas bastante superiores, essas mesmas soluções poderão não ser escaláveis e, portanto, alternativas serão necessárias. Atualmente já existem mestrados em Fusão Nuclear em vários países da Europa [9], onde os alunos se especializam nesta matéria. Isto demonstra não só a sua importância, mas também o quão necessário é continuar a fazer investigação nesta área. Só assim é que se derrubarão as barreiras que nos impedem de chegar ao futuro.

Referências

- [1] Os princípios básicos das reações de fusão nuclear assim como os conceitos elementares relacionados com a forma de operação de um tokamak já foram abordados em pelo menos dois artigos da Gazeta: M. E. Manso e C. A. F. Varandas, “Fusão Nuclear, Uma opção energética para o futuro”, *Gazeta da Física*, Vol. 29, Fascículo 1-2 (2006); C. Varandas, “O ITER no caminho para a energia de Fusão Nuclear”, *Gazeta da Física*, Vol. 32, Nº 1 (2009)
- [2] EUROfusion, “European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy” (<https://www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>)
- [3] A. J. H. Donné et al, “Scientific and technical challenges on the road towards fusion electricity”, *Journal of Instrumentation*, Vol. 12 (2017)
- [4] T. W. Morgan et al, “Liquid metals as a divertor plasma-facing material explored using the Pilot-PSI and Magnum-PSI linear devices”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 60, Nº 1 (2018)
- [5] J. L. Duchateau, “Superconducting magnets for fusion”, *Clefs CEA*, Nº 56 (Winter 2007-2008)
- [6] MIT, “MIT and newly formed company launch novel approach to fusion power” (<http://news.mit.edu/2018/mit-newly-formed-company-launch-novel-approach-fusion-power-0309>)
- [7] Fusion For Energy, “Test Blanket Modules” (<http://fusionforenergy.europa.eu/media-corner/newsview.aspx?content=955>)
- [8] M. Mahdavi e E. Asadi, “Estimates of Tritium Produced Ratio in the Blanket of Fusion Reactors”, *Open Journal of Microphysics*, Vol. 3, Nº. 1, pp. 8-11 (2013).
- [9] Dois exemplos são os mestrados em Eindhoven University of Technology e University of York.



António Coelho, é finalista do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica no IST. Representou Portugal na XIX Olimpíada Ibero-americana, tendo aí obtido uma menção honrosa. A sua área de eleição é a física dos plasmas, encontrando-se atualmente a realizar a sua tese de mestrado em fusão nuclear.