

A investigação em fusão nuclear conduziu a progressos notáveis nas últimas décadas, permitindo enfrentar com confiança a próxima etapa destinada a demonstrar a viabilidade da fusão como fonte de energia, o projecto ITER.

Neste trabalho expõem-se os princípios básicos da fusão e o modo de funcionamento de um futuro reactor. Apresentam-se os progressos científicos e os avanços tecnológicos da fusão e descreve-se o projecto ITER. Finalmente analisa-se o papel relevante que a fusão deverá desempenhar nas opções energéticas para o futuro, tendo em conta a sua potencial capacidade de produzir energia eléctrica em larga escala, de forma competitiva e com reduzido impacto ambiental.

M. E. MANSO e C. A. F. VARANDAS

Instituto Superior Técnico

Centro de Fusão Nuclear, Associação EURATOM / IST

Instituto Superior Técnico - Av. Rovisco Pais,

P-1049-001 Lisboa, Portugal

emilia@cfn.ist.utl.pt / cvarandas@cfn.ist.utl.pt

# FUSÃO NUCLEAR OPÇÃO ENERGÉTICA PARA O FUTURO

A Agência Internacional de Energia prevê que o consumo mundial de energia duplique nos próximos 40 anos. Actualmente cerca de 80% do consumo é assegurado pelos combustíveis fósseis, situação que não é sustentável pelas graves alterações atmosféricas que está a provocar e porque estes combustíveis deverão estar esgotados num futuro próximo (começando pelo petróleo). São, por isso, necessárias opções energéticas alternativas de grande escala, sendo a fusão nuclear uma dessas opções.

Numa reacção de fusão, pequenas quantidades de matéria dão origem a enormes quantidades de energia:  $3,136 \times 10^{-29}$  kg de combustível originam 17,59 MeV. Comparando com as reacções químicas, 1 milhão de vezes menos poderosas que as nucleares, tem-se, por exemplo, que cerca de um litro de combustível de fusão produz a mesma energia que 6600 toneladas de carvão.

A produção comercial de energia eléctrica a partir da fusão de átomos leves, tal como acontece no Sol e nas estrelas,

# AR, UMA ÉTICA O

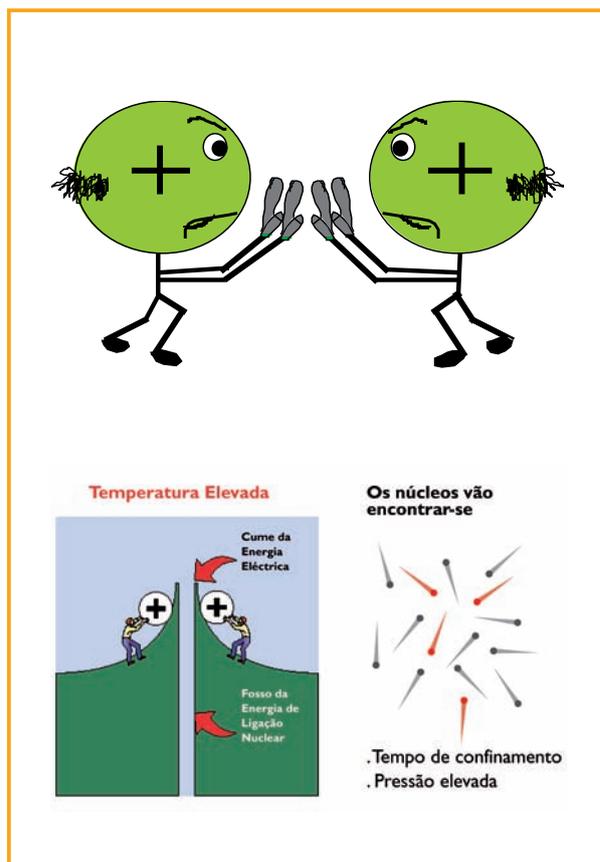


Fig. 1 - Condições para que ocorram as reacções de fusão.

porá à disposição do homem uma fonte alternativa de energia de larga escala, com baixo impacto ambiental. Numa altura em que a fusão nuclear vai entrar numa etapa decisiva, o projecto ITER, destinado a demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da fusão, é importante perceber os princípios básicos desta nova forma de energia, o seu estado de desenvolvimento e as perspectivas futuras.

## PRINCÍPIOS BÁSICOS DA FUSÃO NUCLEAR

Para conseguir uma reacção de fusão é necessário aproximar dois núcleos que, devido a terem carga do mesmo sinal (positiva), têm tendência a repelir-se (Fig. 1). Para ultrapassar esta barreira natural e chegar à zona muito próxima do núcleo onde se manifestam as forças nucleares (Fig. 1), é preciso que os núcleos possuam uma energia considerável.

A fusão exige, por isso, que o meio que reage possua temperaturas muito elevadas, tipicamente da ordem de 100

milhões de graus Celsius (10 keV). A temperaturas tão elevadas, os electrões separam-se dos núcleos e a matéria fica no estado de plasma. O plasma é um meio ionizado, com comportamento colectivo e macroscopicamente neutro (Fig. 2), que existe na Natureza sob diversas formas; na realidade, 99 por cento da matéria do Universo encontra-se na forma de plasma, o quarto estado da matéria.

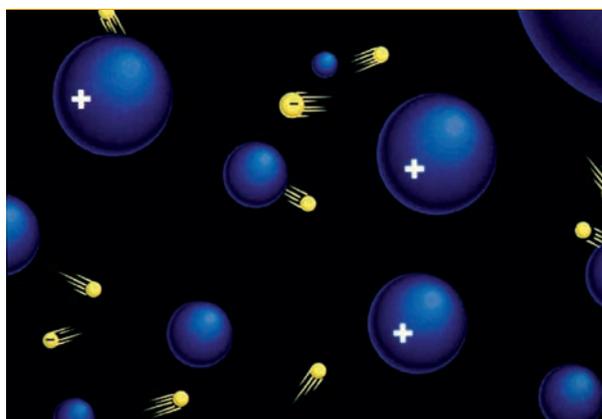


Fig. 2 - Representação esquemática de um plasma.

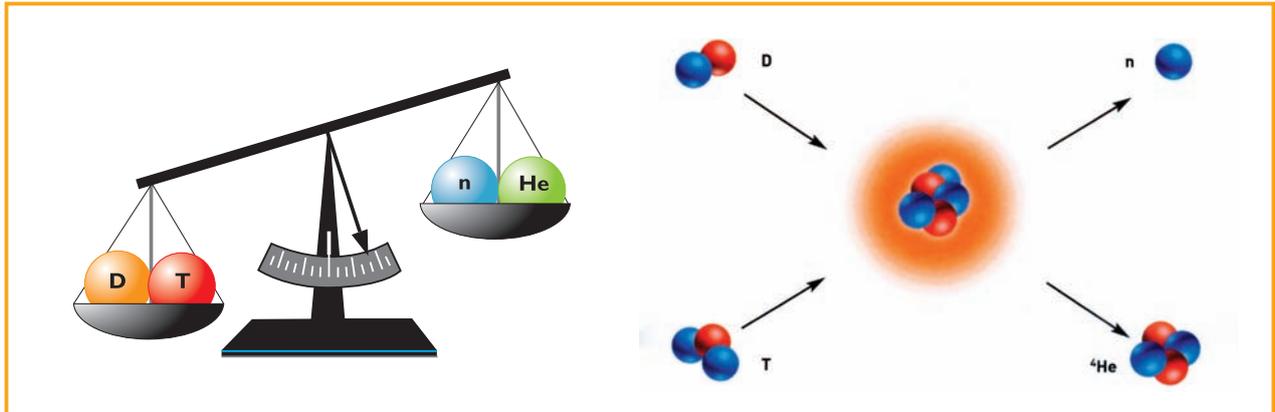
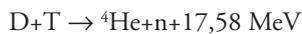


Fig. 3 - Reações de fusão com deutério e trítio.

### Combustível de fusão nuclear

A reacção de fusão mais fácil de conseguir actualmente na Terra é a que envolve deutério (D) e trítio (T), dois isótopos do hidrogénio (Fig. 3). Esta mistura já foi usada em dois dispositivos experimentais de fusão, os tokamaks TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*), nos Estados Unidos, e JET (*Joint European Torus*), na Europa.



Como veremos adiante, os combustíveis primários da fusão são o deutério e o lítio, uma vez que o trítio é obtido a partir do lítio, no interior do próprio reactor.

### Condições necessárias à obtenção de energia na fusão nuclear

Para que a fusão possa ser utilizada como fonte de energia é necessário que, além da temperatura elevada, o plasma esteja confinado o tempo suficiente para garantir que o conjunto de partículas carregadas sofra um número suficiente de reacções de fusão. Define-se um tempo de confinamento de energia,  $\pi$ , como o tempo que o plasma quente leva a perder a sua energia (por radiação, convecção e condução), quando se cortam abruptamente as suas fontes de aquecimento. O tempo  $\pi$  caracteriza, de certa forma, o isolamento térmico do plasma.

Para que a fusão seja rentável do ponto de vista energético, é ainda necessário que a energia produzida pelas reacções de fusão exceda largamente as perdas térmicas do plasma. Esta condição impõe um limite inferior ao produto da densidade ( $n_c$ ) pelo tempo de confinamento de energia ( $\pi$ ), dado pelo critério de *Lawson*:

$$n_c \cdot \pi > f(Q)$$

em que  $Q$ , factor de amplificação de energia, é a relação entre a potência de fusão produzida e a potência de aquecimento (exterior) fornecida ao plasma. A igualdade  $Q = 1$  significa que a potência gerada pelo plasma é igual à potência que lhe é fornecida do exterior. Este estado, conhecido por *breakeven*, é aproximado nos dispositivos experimentais actuais com melhor desempenho ( $Q = 0,6$  no JET). O valor  $Q = \infty$  significa que a potência exterior fornecida ao plasma é nula. Neste caso, o plasma é auto-sustentado e diz-se que se atingiu a “ignição”.

### FUSÃO NAS ESTRELAS E NA TERRA

As condições necessárias para que a fusão ocorra no Sol e nas outras estrelas são garantidas, naturalmente, por forças gravitacionais muito intensas (Fig. 4). Este confinamento gravítico não é possível na Terra. Há, contudo, duas vias alternativas para obter a fusão nos laboratórios: o confinamento magnético e o confinamento inercial.

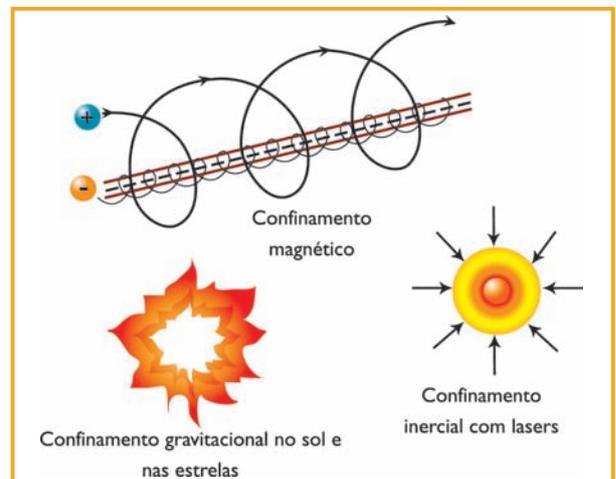


Fig. 4 - Vários tipos de confinamento de um plasma de fusão.

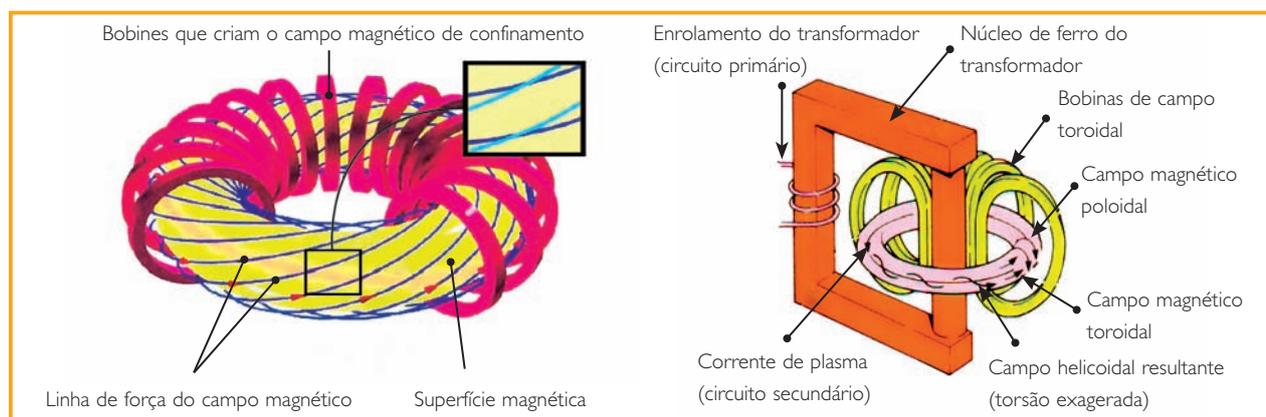


Fig. 5 - Configuração magnética num tokamak.

### Confinamento magnético

Como o plasma, representado esquematicamente na Fig. 2, é um fluido electricamente condutor (embora globalmente neutro), quando se lhe aplicam campos magnéticos, as partículas carregadas (iões e electrões) descrevem trajectórias em forma de hélice enrolando-se em volta das linhas do campo, ficando deste modo capturadas (Fig. 4). É este o princípio do confinamento magnético, o qual necessita de tempos de confinamento da ordem do segundo (fusão lenta), dado que as densidades do plasma são muito baixas (da ordem de  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ).

### Confinamento inercial

Nesta configuração são utilizados lasers muito potentes ou feixes de partículas que são focados num pequeno alvo, constituído por uma pequena cápsula de combustível formado por deutério e trítio (Fig. 4). O alvo é comprimido a densidades 1000 superiores às densidades típicas dos materiais sólidos e aquecido a temperaturas de cerca de 100 milhões de graus Celsius. As reacções de fusão ocorrem durante um tempo muito curto, da ordem de alguns bilionésimos de segundo (fusão rápida), uma vez que a densidade de combustível nas cápsulas é muito elevada ( $10^{27} \text{ m}^{-3}$ ).

### Tokamak

Até agora o confinamento magnético toroidal do tipo tokamak, de concepção russa, tem sido aquele que tem produzido melhores resultados, sendo, por isso, a configuração que se encontra mais desenvolvida.

As geometrias cilíndricas foram as primeiras a ser utilizadas mas deixavam escapar o plasma pelas extremidades. Para evitar esta situação, o cilindro foi fechado sobre si mesmo numa configuração toroidal semelhante à da câmara de ar

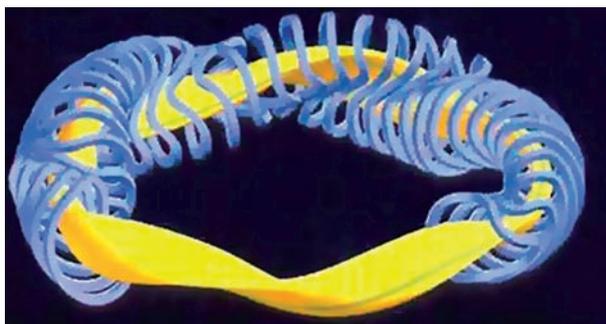
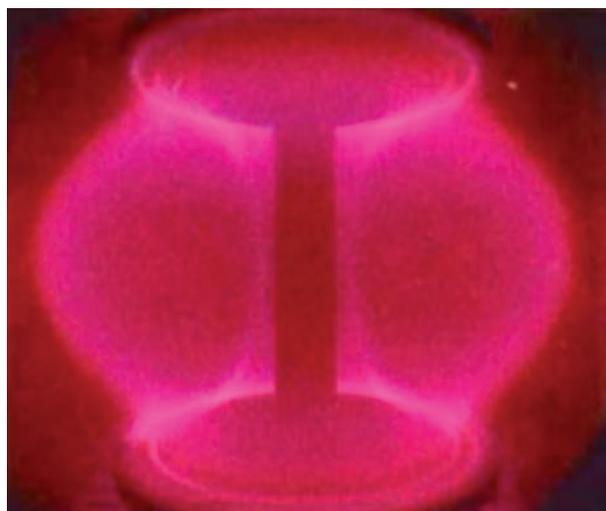
de um pneu (Fig. 5). No entanto, a curvatura (e, consequentemente, a força centrífuga) em conjunto com a não homogeneidade do campo magnético (mais elevado na parte interior do toróide do que na parte exterior) dão origem à deriva das partículas carregadas; os iões e os electrões têm tendência a separar-se e acabam por escapar do “aprisionamento magnético”. Para compensar este efeito as linhas do campo magnético devem ser helicoidais (Fig. 5), o que se consegue adicionando ao campo magnético toroidal um outro campo que lhe é perpendicular, o campo poloidal.

O campo magnético poloidal de um tokamak é criado por uma corrente axial que circula no próprio plasma, criada por indução magnética, comportando-se o plasma como o secundário do transformador (Fig. 5). O plasma assim originado designa-se por plasma indutivo. Um tokamak funciona, em princípio, em regime pulsado, uma vez que não é possível variar indefinidamente no tempo o fluxo magnético que circula no núcleo do transformador. Esta impossibilidade resulta da saturação do ciclo de histerese do ferro ou do fim da variação no tempo da corrente do primário.

O tokamak pode, no entanto, operar em regime contínuo desde que a corrente axial seja gerada de forma não indutiva, o que se consegue utilizando as ondas electromagnéticas e/ou os feixes de partículas usados no aquecimento auxiliar do plasma.

### Stellarator e outros dispositivos experimentais

O confinamento magnético do dispositivo experimental designado por stellarator (Fig. 6) assenta totalmente em correntes que circulam em bobinas exteriores ao plasma, sendo esta configuração intrinsecamente contínua. Há ainda outro tipo de dispositivos experimentais: o reversed-field pinch e uma versão mais compacta do tokamak, o tokamak esférico (Fig. 7). Este dispositivo experimental poderá vir a

Fig. 6 - Campos magnéticos num *stellarator*.Fig. 7 - Plasma num *tokamak* esférico.

dar contribuições importantes para o projecto dos futuros reactores de fusão, conduzindo a uma economia na sua construção e operação.

### Aquecimento do plasma

O aquecimento devido à corrente que circula no plasma de fusão (aquecimento ohmico) não é suficiente para que as reacções de fusão ocorram, tornando-se necessário usar métodos adicionais de aquecimento, através de:

- Injecção de partículas neutras de alta energia, sendo as partículas do feixe ionizadas no plasma e confinadas pelo campo magnético;
- Ondas electromagnéticas com frequências características do meio. Neste caso, a energia das ondas é transmitida ao plasma e a frequência das ondas permite definir qual a espécie de partículas (iões ou electrões) que vai ser aquecida e a região do plasma onde se dará o aquecimento.

As reacções de fusão num futuro reactor deverão ser em

número suficiente para que a energia dos núcleos de hélio (partículas alfa), que permanecem confinados no plasma, se torne o método de aquecimento dominante ( $Q > 5$ ).

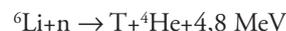
### REACTOR DE FUSÃO

A Fig. 8 apresenta o esquema de um reactor de fusão. A mistura de combustível é injectada na câmara (1) onde, graças aos sistemas de confinamento e de aquecimento, passa ao estado de plasma e é “queimado” (2). O plasma produz cinzas (átomos de hélio) e energia, sob a forma de radiação ou de partículas carregadas (3), que abandonam a sua energia na “primeira parede”, que constitui o primeiro obstáculo material que encontram para além do plasma. A energia cinética dos neutrões, por sua vez, é convertida em calor na camada fértil (*breeding blanket*) (4), que é o elemento situado depois da “primeira parede”, dentro da câmara de vácuo. Esta câmara isola o espaço onde se dão as reacções de fusão do exterior. A camada fértil desempenha assim várias funções: (i) recupera a energia dos neutrões; (ii) regenera o trítio necessário à reacção de fusão; (iii) protege a câmara de vácuo e o sistema magnético, reduzindo consideravelmente o fluxo e a energia dos neutrões.

A primeira parede, a camada fértil e a câmara de vácuo são arrefecidas por um sistema de extracção de energia. Esta energia é utilizada para produzir vapor, que vai ser usado para gerar energia eléctrica (5).

### Produção de trítio

O trítio necessário para as reacções de fusão existe em quantidades muito reduzidas na Natureza. No reactor, será produzido localmente através do bombardeamento com neutrões (produzidos na reacção de fusão) da camada fértil de lítio, utilizando a seguinte reacção:



### Materiais

Tal como em qualquer instalação sujeita a um fluxo de partículas de alta energia (como, por exemplo, num reactor de fissão e num acelerador), os materiais que constituem a estrutura do reactor de fusão serão activados. A escolha de materiais com tempo de decaimento rápido vai permitir minimizar a quantidade de detritos radioactivos e diminuir o impacto ambiental da fusão. A validação de materiais de baixa activação exige uma fonte de neutrões de 14 MeV, cujo desenvolvimento é o objectivo de um programa internacional designado por *International Fusion Material Irradiation Facility* (IFMIF).

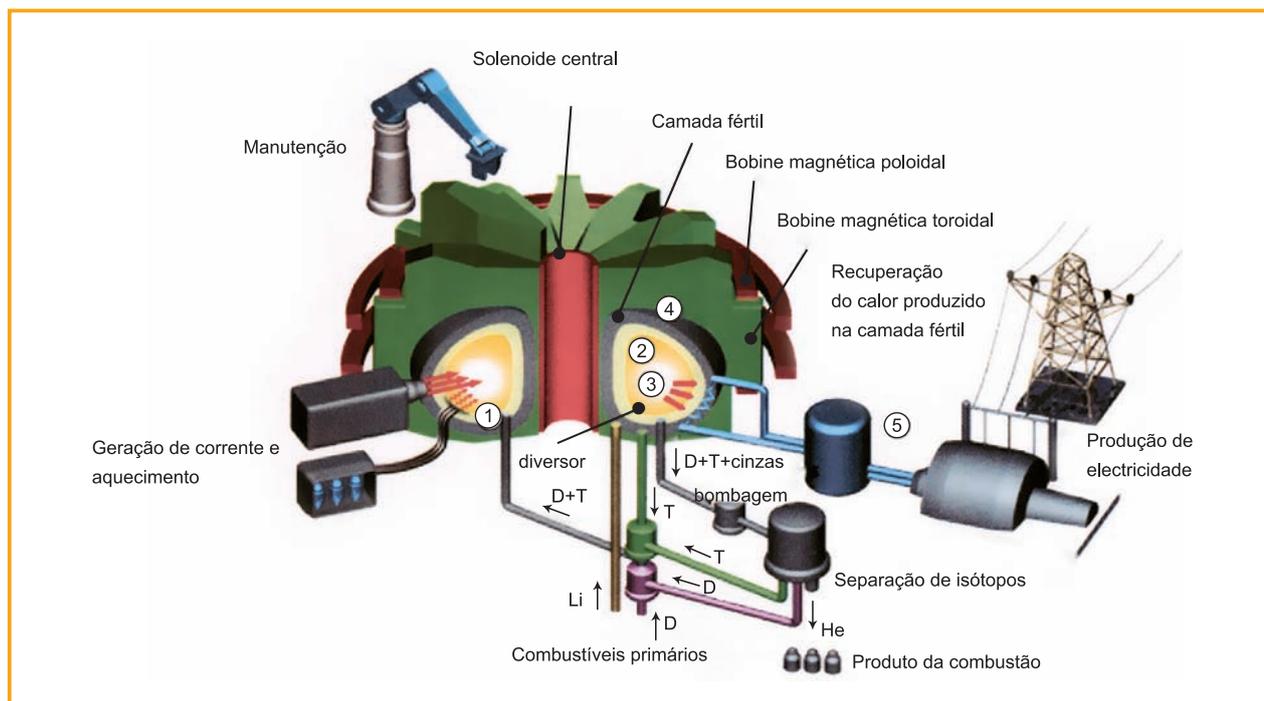


Fig. 8 - Esquema de um reator de fusão[1].

## VANTAGENS DA FUSÃO

A fusão nuclear é uma fonte potencial de energia limpa, “amiga” do ambiente, segura, praticamente inesgotável e economicamente atractiva.

### Combustíveis

Os combustíveis básicos, deutério e lítio, são abundantes e encontram-se bem distribuídos geograficamente. O deutério pode ser extraído de forma económica da água do mar (33 gramas por metro cúbico). Os recursos em deutério representam mais de 10 milhões de anos do consumo mundial anual de energia! Os recursos em lítio que são abundantes e estão bem distribuídos na Terra estão estimados para 2 000 anos, existindo a possibilidade de serem estendidos para vários milhões de anos assim que houver tecnologia para extrair o lítio da água do mar.

### Segurança

No caso de ocorrer qualquer tipo de acidente basta fechar a torneira de admissão do combustível para que as reacções de fusão cessem quase instantaneamente. Além disso, nas condições em que ocorrem as reacções de fusão, o plasma é muito pouco denso (alguns gramas de combustível para um volume superior a 1000 m<sup>3</sup>), pelo que a quantidade de

combustível presente no dispositivo experimental é muito pequena. Por outro lado, qualquer perturbação descontrolada do meio leva ao seu arrefecimento, cessando rapidamente as reacções de fusão. Ou seja, não existem reacções em cadeia e a continuação das reacções numa situação de descontrolo é intrinsecamente impossível.

### Ausência de poluição

A fusão, tal como as energias renováveis e a fissão, não produz gases com efeito de estufa ou poluição atmosférica.

### Baixa radioactividade

Nenhum dos combustíveis de base (deutério e lítio) ou o produto da reacção (hélio), são tóxicos ou radioactivos. O trítio, que é radioactivo, é um elemento que se decompõe em hélio por emissão de electrões pouco energéticos (5,7 keV) e tem um período de decaimento relativamente curto (12,3 anos). Mas, embora a sua radiotoxicidade seja baixa, num futuro reator é necessário ter em conta o facto de o trítio permear os meios materiais.

Os materiais que constituem a estrutura do reator serão activados. A investigação na área dos materiais permite prever a utilização de materiais de tempo de decaimento rápido, que vão minimizar a quantidade de detritos radioactivos.

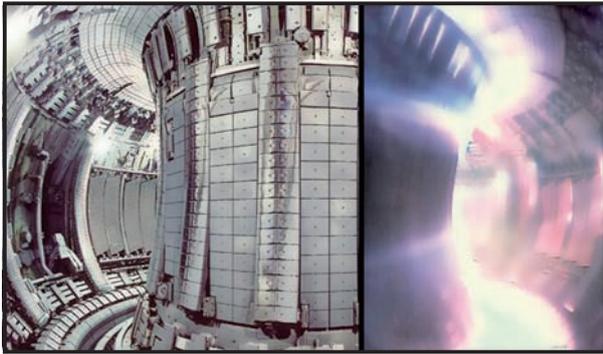


Fig. 9 - Interior do tokamak JET: (a) sem plasma; (b) com plasma.

Entre 50 e 100 anos após a paragem do reactor (dependendo dos avanços da investigação em materiais de baixa activação), será possível reciclar os detritos radioactivos e reintroduzi-los novamente na produção de energia de fusão.

**Aspectos económicos**

Existem vários modos de estimar os custos da energia obtida a partir de futuros reactores de fusão nuclear, baseados em modelos mais conservadores, que têm por base a extrapolação do desempenho previsto para o ITER com materiais convencionais, e outros que admitem materiais mais avançados e operações a temperaturas mais elevadas. Mesmo nos cenários mais conservadores, os estudos apontam para custos competitivos da energia de fusão, especialmente tendo em conta que deverá ser imposta num futuro próximo uma taxa sobre a quantidade de carbono produzido.

**PROGRESSOS EM FUSÃO NUCLEAR**

As primeiras experiências de confinamento magnético foram realizadas nos Estados Unidos da América em 1938. Em 1958 estabeleceram-se as primeiras colaborações internacionais na área da fusão nuclear. A nível europeu a investigação é coordenada pelo Tratado EURATOM; esta organização, completamente integrada, tem tido uma contribuição fundamental para a posição dominante que a Europa tem em fusão nuclear.

Em 1968 os cientistas russos anunciaram o desempenho superior do tokamak, que rapidamente suplantou as outras configurações. Vários tokamaks (de dimensões modestas) foram construídos em diversos países: Alemanha, França, Inglaterra, Itália, Estados Unidos, Federação Russa e Japão. Foi nestes dispositivos que foram desenvolvidos os meios de diagnóstico e controlo do plasma e os métodos de aquecimento, que levaram a um progresso rápido da compreensão da física dos plasmas de fusão e das tecnologias associadas ao processo de fusão. No fim dos anos 80 foram lançados vários projectos de tokamaks de grande dimensão: JET (EU), JT-60 (Japão) e TFTR (US). A França construiu em 1988 um tokamak (Tore Supra) dispondo de bobinas supercondutoras, destinado a preparar a física e a tecnologia de um futuro reactor com funcionamento contínuo. A descoberta nos anos 80 de um regime de funcionamento com confinamento superior (modo H) revelou-se fundamental, sendo actualmente o regime de referência para o funcionamento do ITER.

O tokamak JET (Fig. 9) é actualmente o maior tokamak do mundo e aquele onde foram conseguidos os resultados mais espectaculares: em 1997 foram obtidos 16 MW de potência de fusão com um factor de amplificação de

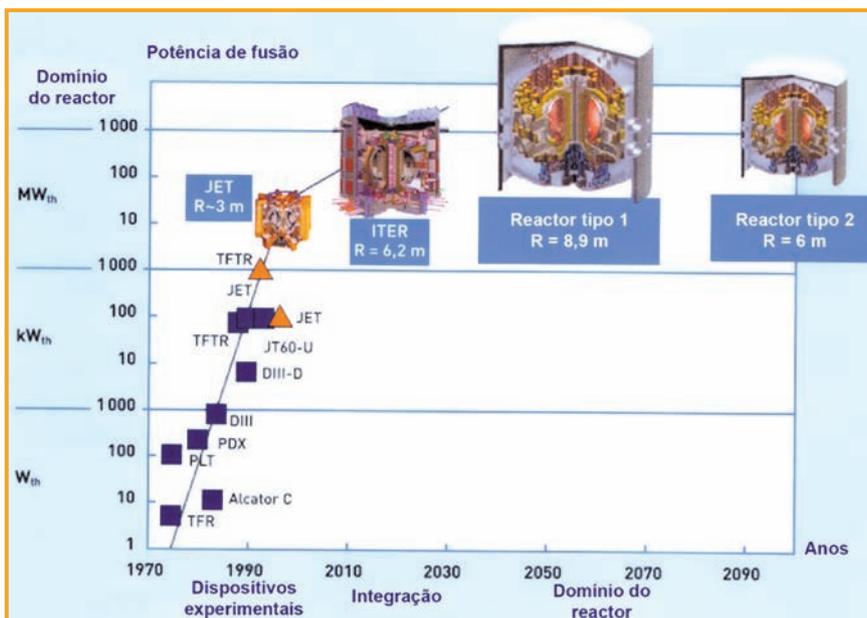


Fig. 10 - Avanços na fusão nuclear desde 1970 e caminho em direcção ao reactor de fusão nuclear [1].

potência  $Q \cong 0,65$ , muito próximo das condições de *breakeven* ( $Q = 1$ ). O JET tem capacidade de realizar plasmas D-T e está equipado com as tecnologias associadas: gestão do ciclo do trítio e meios de manipulação por telecomando. Em 1998 o *diversor*, que é o componente do *tokamak* destinado a extrair as cinzas resultantes das reacções de fusão, foi totalmente substituído por manipulação telecomandada. Outros avanços notáveis em termos de confinamento do plasma, exploração de cenários de operação e desenvolvimento de tecnologias têm sido conseguidos noutros dispositivos experimentais mais pequenos e mais especializados. A próxima etapa consiste na integração de todos os resultados e tecnologias numa mesma instalação, o *tokamak* ITER.

A Fig. 10 apresenta os avanços obtidos desde 1970 e o caminho em direcção a um reactor capaz de produzir energia eléctrica a partir de reacções de fusão nuclear.

### Projecto ITER

O *International Thermonuclear Experimental Reactor*, (ITER) (Fig. 11), é uma experiência que vai funcionar em condições muito próximas das de um reactor de fusão. Será construído em Cadarache, França, no âmbito de uma colaboração à escala planetária, tendo como parceiros principais a Euratom, o Japão, a Federação Russa, os Estados Unidos da América, a China, a Coreia e a Índia e o seu início está previsto para 2006.

O objectivo principal do ITER é demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da energia de fusão por confinamento magnético. Este *tokamak* poderá produzir 500 MW de potência de fusão durante 400 segundos com o auxílio de 50 MW de potência de aquecimento, ou seja com uma amplificação de energia de um factor de 10 ( $Q = 10$ ), permitindo o estudo de plasmas de combustão, isto é, de plasmas em que o aquecimento devido às partículas alfa (núcleos dos átomos de hélio) geradas na reacção de fusão é dominante.

O ITER será o primeiro dispositivo experimental a integrar a maior parte das tecnologias essenciais ao reactor: bobinas supercondutoras de grande dimensão, capazes de criar elevados campos magnéticos, componentes expostos ao plasma arrefecidos activamente, gestão do trítio, manutenção completamente robotizada e módulos com camada fértil de lítio. Prevê-se que os períodos de construção e de exploração sejam, respectivamente, de 10 e 20 anos.

### FUTURO ENERGÉTICO

Tendo em conta os problemas actuais associados ao consumo de energia (em recursos e em custos ambientais),

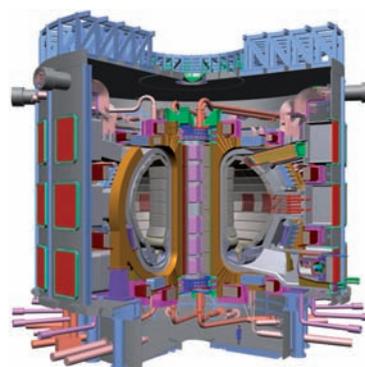


Fig. 11 - O *tokamak* ITER.

a geração de hoje tem a responsabilidade de preparar as bases do conhecimento das soluções energéticas do futuro. A fusão nuclear, processo de produção de energia no Sol e nas estrelas, com capacidade de produzir energia em larga escala e respeitadora do meio ambiente, deverá constituir uma opção energética indispensável para o futuro.

Os resultados obtidos até agora permitem prever o sucesso do projecto ITER, destinado a demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da fusão. A etapa seguinte será a construção de um dispositivo experimental com a capacidade de produzir energia eléctrica a partir da energia de fusão, o *DEMO*. Através de uma política de desenvolvimento paralelo das diferentes fases conducentes ao reactor comercial de fusão, prevê-se que a energia de fusão esteja disponível na segunda metade deste século.

Citando a famosa frase do físico Lev Artsimovitch em resposta à pergunta “Quando é que a fusão nuclear vai estar pronta?”, diremos “A fusão estará pronta quando a sociedade precisar dela”.

### BIBLIOGRAFIA

1. *Le Soleil et la Terre*, CLEFS – CEA n° 49, 2004.
2. *La Fusion Nucléaire*, J. Weisse, Que sais-je?, 2003.
3. “Energy Powering your World”, EFDA, 2002.
4. “Fusão Nuclear, Energia para o Futuro”, JET Joint Undertaking, 1995.