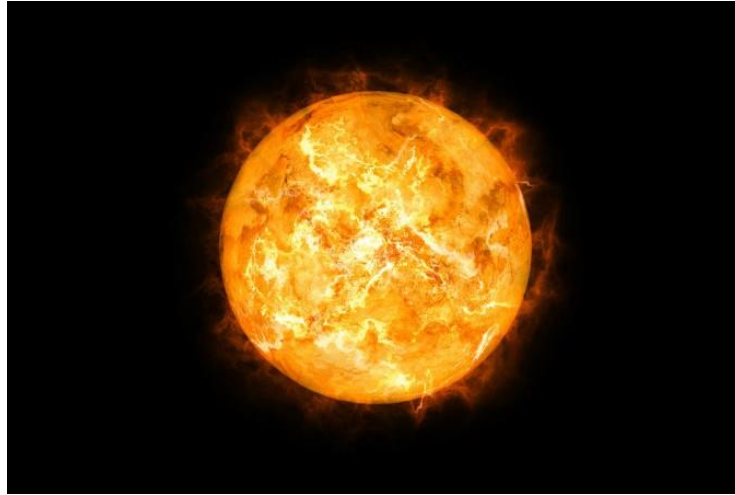




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



**Reatores de Fusão:**  
**Confinamento Magnético e Confinamento Inercial**

**Nelson Jesus de Carvalho Graça**  
**(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica

—  
Ramo de Energia

Orientador:

Professor Rui Alberto Serra Ribeiro dos Santos

Júri:

Presidente: Professor Mário Augusto de Andrade Moreira

1ºVogal: Professor Rui Alberto Serra Ribeiro dos Santos

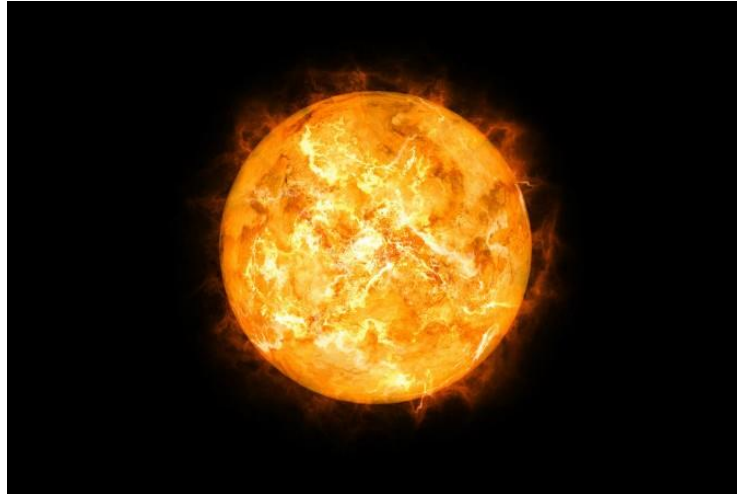
2ºVogal: Professor Jorge Miguel de Brito Almeida Sampaio

Lisboa, Dezembro de 2015





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



**Reatores de Fusão:**  
**Confinamento Magnético e Confinamento Inercial**

**Nelson Jesus de Carvalho Graça**  
**(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica

—  
Ramo de Energia

Orientador:

Professor Rui Alberto Serra Ribeiro dos Santos

Júri:

Presidente: Professor Mário Augusto de Andrade Moreira

1ºVogal: Professor Rui Alberto Serra Ribeiro dos Santos

2ºVogal: Professor Jorge Miguel de Brito Almeida Sampaio

Lisboa, Dezembro de 2015



# Resumo

A fusão nuclear tem vindo a ser ao longo dos anos objeto de vários estudos e de um grande investimento em investigação, sendo que no presente existem duas técnicas que se revelam as mais promissoras no futuro. São elas o confinamento magnético e o confinamento inercial, duas técnicas diferentes, mas com o mesmo fim, conseguir um resultado líquido positivo do ponto de vista energético para a fusão, bem como provar que a fusão nuclear consegue rivalizar com as restantes fontes de energia e ocupar um lugar de destaque no mundo, tornando a energia nuclear mais amiga do ambiente.

Este trabalho incide sobretudo na comparação entre estas duas técnicas tendo como ponto de partida as características de cada uma para posteriormente concluir através de vários estudos qual das duas pode funcionar como central de energia ligada à rede elétrica.

## **Palavras-chave:**

Fusão nuclear

Confinamento magnético

Confinamento inercial

Viabilidade económica

Radiação



# **Abstract**

Nuclear fusion has been over the years the subject of several studies and a great deal of research, and there are two techniques that are now mainstream and are the most promising to achieve nuclear fusion with a net energy output. These are magnetic confinement and inertial confinement, two quite different techniques, but with the same purpose, to prove that nuclear fusion can indeed compete with other energy sources and occupy a prominent place in the world, as the most friendly to the environment.

This work focuses on the comparison of these two techniques, and the starting point is the characterization of each one to subsequently compare them through various studies to better understand which of them can work better as a power plant connected to the grid.

## **Keywords:**

Nuclear fusion

Magnetic confinement

Inertial confinement

Economic viability

Radiation



## **Agradecimentos**

Ao professor Rui Santos, quero agradecer o acompanhamento e a supervisão indispensáveis à realização deste trabalho. As reuniões semanais propostas pelo professor foram essenciais para a evolução do trabalho, na medida que possibilitou a troca constante de ideias e de ensinamentos que juntamente com o trabalho de pesquisa tornaram possível a conclusão da dissertação.

Um sincero agradecimento à minha família que tornou possível a minha passagem pelo ensino superior e aos meus amigos, que ao longo destes anos académicos demonstraram sempre um enorme apoio.



# Índice

Resumo .....	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos .....	v
Índice .....	vii
Índice de Tabelas .....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
Lista de Acrónimos.....	xvii
Lista de Unidades e Conversões .....	xix
1 – Introdução.....	3
1.1 - Enquadramento .....	3
1.2 – Motivação e Objetivos .....	3
1.3 – Estrutura do documento .....	4
1.4 – Notação .....	4
2 – Fusão Nuclear .....	7
2.1 - Breve história da fusão nuclear .....	7
2.2 - A Fusão no Sol .....	9
2.2.1 - Fusão na terra.....	10
2.3 - Processo de fusão .....	12
2.3.1 - Processo de decisão.....	12
2.3.1.1 - Critério de Lawson .....	14
2.3.1.2 - Abundância de trítio .....	17
2.3.2 - Escolhas possíveis.....	18
3 - Confinamento Magnético.....	23
3.1 - História .....	23
3.2 - ITER .....	25
3.2.1 - Tokamak - Constituição.....	25

3.2.1.1 - Sistema magnético.....	25
3.2.1.2 - Câmara de vácuo .....	28
3.2.1.3 - Cobertura.....	29
3.2.1.4 - Divisor.....	29
3.2.1.5 - Sistemas de diagnóstico .....	30
3.2.1.6 - Aquecimento externo .....	31
3.2.1.7 - Crióstato .....	32
3.2.1.8 - Sistemas externos .....	33
3.2.2 - Tokamak – Funcionamento .....	37
4 - Confinamento Inercial.....	41
4.1 - História .....	41
4.1.1 – Fusão nuclear no confinamento inercial.....	45
4.1.1.1 – Condição para o confinamento inercial .....	45
4.1.1.2 – Métodos para alcançar a fusão.....	46
4.2 - NIF.....	49
4.2.1 - NIF - Constituição.....	49
4.2.1.1 - Laser glass .....	50
4.2.1.2 - Interruptor ótico.....	50
4.2.1.3 - Espelho deformável.....	51
4.2.1.4 - Cristais de crescimento rápido .....	51
4.2.1.5 - Controlo Computacional .....	51
4.2.1.6 - Linha de feixes .....	52
4.2.2 - NIF – Funcionamento .....	56
4.2.2.1 - Potência das lâmpadas.....	57
4.2.2.2 - Cápsula .....	57
5 - Confinamento Magnético e Inercial.....	63
5.1 - Viabilidade económica .....	63

5.1.1 - Preço da eletricidade .....	63
5.1.1.1 - ITER .....	64
5.1.1.2 - NIF .....	64
5.1.1.3 – Redução dos custos.....	66
5.1.2 – Desenvolvimento da fusão nuclear .....	66
5.2 Radiação.....	68
5.2.1 Semelhanças e diferenças entre o CM e o CI.....	68
5.2.2 Problemas comuns nos materiais do divisor e na primeira parede “first wall” .....	70
5.2.3 Componentes e materiais para os sistemas de diagnóstico .....	71
5.2.4 Instalações para simular as condições de radiação.....	75
5.3 – Problemas na gestão dos materiais da fusão nuclear .....	75
5.3.1 - Efeito do carbono-14 e do trítio nos materiais dos reatores .....	78
5.3.2 – Estratégia para substituição de materiais radioativos .....	79
5.4 – Pesquisa e evolução tecnológica dos processos da fusão nuclear.....	80
5.4.1 – Fibras óticas.....	80
5.4.2 – Comportamento das bolhas de hélio no tungsténio .....	82
5.4.3 – Alto desempenho dos <i>Hohlraums</i> com Urânio empobrecido.....	84
6 - Conclusões .....	91
Bibliografia.....	95



## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 - Diferenças entre as origens das radiações no ITER e no NIF .....	69
Tabela 2 - Ambientes de radiação no ITER e no LMJ (números aproximados).....	71
Tabela 3 - Problemas e requisitos para a reciclagem de materiais radioativos .....	77
Tabela 4 - Sumário dos valores dos diferentes ensaios. ....	86



## Índice de Figuras

Figura 1 - Fusão Nuclear entre o deutério e o trítio.....	10
Figura 2 - Plasma obtido através do aquecimento de um gás.....	11
Figura 3 - Gráfico representativo da energia de ligação dos elementos.....	12
Figura 4 - Estrutura de diferentes átomos de hidrogénio e hélio.....	13
Figura 5 - Ganho de energia com a fusão de deutério e do trítio. ....	14
Figura 6 - Comparação entre os diferentes isótopos, relativamente às suas secções eficazes. ....	14
Figura 7 - Critério para se dar a ignição do plasma, que é o produto da densidade com o tempo de confinamento em função da temperatura.....	15
Figura 8 - Condições necessárias para ocorrer a fusão em termos de pressão do plasma e tempo de confinamento. ....	16
Figura 9 - Reações de fusão, tendo deutério e lítio como combustível.....	18
Figura 10 - Esquema simplificado para um reator de fusão nuclear. ....	19
Figura 11 - Comparação dos três maiores Tokamaks construídos entre os anos 70 e 80, para demonstrar que a potência da fusão aumenta diretamente com o aumento do tamanho do reator, como consequência do aumento da quantidade de plasma. ....	24
Figura 12 - Ordem cronológica dos reatores de fusão tendo em conta a temperatura, densidade e tempo de confinamento.....	24
Figura 13 - Constituição do reator do ITER: 1-Sistema magnético; 2- Câmara de vácuo; 3- Cobertura; 4- Divisor; 5- Sistema de diagnóstico; 6- Aquecimento externo; 7- Crióstato. ....	25
Figura 14 - Sistema magnético do ITER, formado pelo campo toroidal, campo poloidal e o solenoide central.....	26
Figura 15 - Corte vertical do reator do ITER, onde se observam os ELMs.....	27
Figura 16 - Corte vertical da câmara de vácuo (1), onde se pode observar a cobertura (2) e o divisor (3).....	29
Figura 17 - Três componentes do divisor: alvo vertical exterior e interior e a cúpula.	30
Figura 18 - Representação do crióstato, que é um dos maiores componentes do ITER.	33
Figura 19 - Circuito fechado D-T.....	35
Figura 20 - Processo de fusão no ITER.....	38
Figura 21 - Esquema do sistema de laser. ....	41

Figura 22 - Níveis de energia dos átomos, que produzem laser em dois processos (excitação e decaimento). .....	42
Figura 23 - Quatro lasers: a) Laser Cyclops; b) Laser Janus; c) Laser Argus ; d) Laser Shiva. ....	43
Figura 24 - Energia e pico de potência do NIF comparado com os seus antecessores. .	44
Figura 25 - Comparação entre duas técnicas de interação com as cápsulas de combustível. ....	48
Figura 26 - Passos para atingir a <i>fast ignition</i> . ....	49
Figura 27 - A linha de feixe do NIF, onde se pode observar o caminho de um dos feixes de laser até à sua chegada à câmara de vácuo. ....	50
Figura 28 - Uma das duas linhas de feixes presentes no NIF.....	52
Figura 29 - Esquema das óticas finais do NIF.....	54
Figura 30 - Camadas no interior da cápsula da técnica indirect-drive. ....	55
Figura 31 - Variação da energia quando o comprimento de onda dos lasers é alterado e energia após a reação de fusão. ....	56
Figura 32 - Complexo do <i>Nacional Ignition Facility</i> , que acolhe o maior e mais energético laser do mundo. Pode-se observar também a câmara de vácuo.....	57
Figura 33 - Ilustração do <i>Hohlraum</i> utilizado no NIF. ....	58
Figura 34 - Processo de fusão, desde o aquecimento das paredes do <i>Hohlraum</i> até à ignição do combustível nos 100.000.000°C. Este processo demora cerca de $66 \times 10^{-9}$ s a ser concluído.....	59
Figura 35 - Ciclo de uma central de fusão de confinamento inercial. ....	65
Figura 36 - Relação entre a fiabilidade do reator e o COE, com a fluência dos neutrões na cobertura. ....	66
Figura 37 - Impacto do investimento ao longo dos anos. ....	67
Figura 38 - Espectro de frequência da radiação não ionizante. ....	69
Figura 39 - Comparação dos vários componentes do reator ACT-1, com o nível de CI ao longo do tempo. ....	77
Figura 40 - Ciclo de reciclagem e de limpeza dos componentes.....	78
Figura 41 - Manutenção de um reator de fusão nuclear, como o ITER. ....	80
Figura 42 - Fibra ótica em forma de fita, desenvolvida em Livermore.....	81
Figura 43 - Formação da nano estrutura <i>fuzzy</i> no tungsténio.....	83
Figura 44 - Comparação entre a taxa de crescimento lento e rápido das bolhas de Hélio. Os átomos de Hélio estão a azul e os do Tungsténio a vermelho.....	84

Figura 45 - Características do <i>Hohlraum</i> nas experiências realizadas. ....	86
Figura 46 - Forma do hot-spot, com imagens de raio X de topo e de lado. Em baixo os neutrões dispostos na cápsula, a 13-17MeV na zona da cor vermelha e 6-12MeV na turquesa.....	87



## Lista de Acrónimos

CM	Confinamiento magnético
CI	Confinamiento inercial
ITER	<i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i>
NIF	<i>National Ignition Facility</i>
COE	<i>Cost of electricity</i>
NPV	<i>Net present value</i>



## Lista de Unidades e Conversões

eV	Elétrão-Volt ( $1\text{eV} = 1,60217657 \times 10^{-19}\text{J}$ )
K	Kelvin ( $1\text{K} = -272.15^\circ\text{C}$ )
dpa	Unidade que mede o dano de deslocamento por átomo, 1dpa é a energia que foi imposta ao átomo para ele se deslocar.
Gy	Grey, unidade que mede o dano da radiação ionizante, 1Gy é a dose da radiação que um material absorveu ( $1\text{J/Kg}$ ).
MWa	Média de MWh, num determinado período
T	Tesla
atm	Atmosfera ( $1\text{atm} = 101325\text{Pa} = 1,01325\text{bar}$ )
$\mu$	Micro ( $10^{-6}$ )
n	Nano ( $10^{-9}$ )
p	Pico ( $10^{-12}$ )



# Capítulo 1

## Introdução

*Neste capítulo é apresentado o enquadramento, a motivação e os objetivos da dissertação, bem como a sua estrutura e organização.*



# **1 – Introdução**

## **1.1 - Enquadramento**

A fusão nuclear tem vindo a sofrer uma grande evolução nos últimos anos, apesar de no início do século XX parecer muito complicado atingi-la, não só pela falta de meios mas também por falta de investigação quer teórica quer experimental. Em 1946 George Thomsom propôs o primeiro modelo de um reator de fusão nuclear, que consistia basicamente numa câmara chamada “torus” confinada por um campo magnético toroidal para conter o combustível. Já a primeira reação de fusão foi conseguida em 1952, com a detonação da bomba “Ivy Mike”, uma bomba termonuclear, que utilizava uma reação de fissão nuclear para criar as condições para a fusão nuclear. Depois destes dois acontecimentos e com a descoberta do laser em 1960, foi possível fazer uso da potência dos laser, aquecendo muito rapidamente uma cápsula de combustível e provocar como consequência uma reação de fusão.

Presentemente, existem duas comunidades que estão empenhadas em fazer do sonho uma realidade, uma vez que dispõem dos meios necessários para provar de uma vez por todas que a fusão nuclear pode de fato rivalizar com outras fontes de energia, já consolidadas no mercado energético. Por um lado temos o confinamento magnético, grande aposta de um projeto europeu com a colaboração de vários países, que assenta na utilização de ímanes para confinar o plasma quente. Temos por outro lado, o confinamento inercial, um projeto dos EUA, que utiliza lasers para aquecer e provocar fusão numa pequena cápsula de combustível.

## **1.2 – Motivação e Objetivos**

Em comparação com os reatores de fissão nuclear, os de fusão proporcionam um ganho de energia superior, o combustível existe em maiores quantidades e os níveis de radiação são menores, o que conduz a uma diminuição do lixo radioativo. Por estes fatores, é essencial estudar de uma forma detalhada o que será o futuro da fusão nuclear assente nas duas tecnologias mais promissoras neste momento (confinamento magnético e inercial).

O principal objetivo deste trabalho é comparar essas duas abordagens, para avaliar as tecnologias associadas a cada reator, não só em termos de funcionamento, mas também da sua viabilidade a nível económico. Podemos assim tentar concluir se os enormes

investimentos envolvidos, podem ou não dar garantias de sucesso em cada um dos cenários propostos.

### **1.3 – Estrutura do documento**

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, por forma a possibilitar uma melhor compreensão do problema em estudo e também para que seja possível uma evolução gradual dos conhecimentos adquiridos.

No capítulo 1 faz-se a introdução ao tema e expõe-se o enquadramento, a motivação e os objetivos propostos. É também apresentada a estrutura do documento e a notação.

O capítulo 2 apresenta a evolução da fusão nuclear ao longo dos séculos, bem como as medidas que se terão de tomar para que seja possível realizá-la na terra em segurança. É também apresentado o primeiro modelo de um reator de fusão nuclear.

No capítulo 3 é iniciado o estudo mais aprofundado do que é o confinamento magnético, com uma introdução histórica do mesmo e o modo de funcionamento do principal reator em funcionamento que assenta nesta tecnologia. No final é feita uma descrição do modo de funcionamento do reator.

No capítulo 4 é apresentado a outra tecnologia em estudo, o confinamento inercial, onde se descreve a história, as características e o modo de funcionamento do reator.

No capítulo 5 é feito um estudo comparativo das duas tecnologias, em termos de viabilidade económica e níveis de radiação. São ainda apresentados alguns problemas na gestão dos materiais radioativos e os novos estudos em prática no presente.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

### **1.4 – Notação**

As figuras, tabelas e equações são numeradas de forma contínua ao longo do documento. As referências bibliográficas são numeradas de forma sequencial e a sua identificação é apresentada entre parêntesis retos [], segundo a norma IEEE 2006. As expressões em língua estrangeira são apresentadas em itálico. Existe também uma lista de acrónimos e de unidades e conversões.

# Capítulo 2

## Fusão Nuclear

*Neste capítulo é feita uma introdução à fusão nuclear, através de um enquadramento histórico e com a apresentação de alguns fatos inerentes à sua aplicação na terra. Termina com a descrição das tecnologias em melhor posição para alcançarem a fusão nuclear.*



## 2 – Fusão Nuclear

### 2.1 - Breve história da fusão nuclear

A fusão nuclear teve, como todos os grandes desenvolvimentos científicos, uma evolução gradual, que começou com os avanços da química no século XIX, nomeadamente com a confirmação que diferentes elementos químicos podem converter-se noutros espontaneamente, ou seja, com a descoberta da radioatividade no final do século XIX. Com base nesta descoberta, foram desenvolvidos no século XX, métodos para transformar elementos em outros elementos. Começou-se por se dividir e fundir átomos e só no início do mesmo século é que se percebeu finalmente que a fusão ocorria desde a criação do universo e que era responsável pela criação de todos os elementos químicos conhecidos [1].

A história da fusão tem três grandes etapas, que levaram à conclusão que a energia irradiada pelas estrelas é proveniente da fusão de elementos. A primeira parte da história é a equivalência entre massa e energia expressa na famosa equação de Albert Einstein,  $E=mc^2$ , proposta em 1905. Em 1919, depois da I Guerra Mundial, Francis William Aston, descobriu que a massa de quatro átomos de hidrogénio é um pouco maior do que a massa de um átomo de hélio, e que portanto, ao combinar dois átomos de hidrogénio para formar um átomo de hélio é libertada energia. Este facto foi posteriormente confirmado com um espectrómetro de massa. Estas duas importantes descobertas levaram Artur Eddington e outros cientistas, a propor em 1920, que a massa pode ser convertida em energia nas estrelas se quatro átomos de hidrogénio se fundirem, o que leva à criação de um átomo de hélio. O único problema é que para a física clássica, o sol não é suficientemente quente para se dar a reação, e só com a chegada da dualidade onda-partícula proposta pelo físico francês Louis-Victor de Broglie em 1924 é que se tornou possível a Max Planck e Niels Bohr, no mesmo ano, criarem a mecânica quântica. A mecânica quântica descreve o comportamento da matéria e da energia em escalas subatómicas e é a base da física nuclear, disciplina que finalmente respondeu à questão de onde vem a energia das estrelas. Com esta descoberta, alguns físicos perguntaram-se de onde viriam os diferentes elementos químicos, a resposta era mais uma vez a fusão. Foi comprovado que a fusão de hidrogénio em hélio é apenas o início de uma cadeia de reações, e que mais tarde, a fusão de três átomos de hélio origina um átomo de carbono e todos os elementos mais pesados são formados numa série de reações mais complexas. Os aceleradores de partículas

tiveram aqui um papel determinante no estudo das diversas reações nucleares e das suas secções eficazes que traduzem a probabilidade de um determinado processo ocorrer. Assim, em última análise é possível conhecer todo o processo de formação de elementos nas estrelas e conhecer em detalhe o seu ciclo de vida [1].

A possibilidade de transformar energia em massa tornou-se mais real em 1938, com Otto Hahn e Fritz Strassman a demonstraram que ao bombardear urânio com neutrões, este se divide noutros elementos acompanhado da libertação de uma grande quantidade de energia. Foi a descoberta da fissão. Já a fusão foi mais complexa de atingir. Para ocorrer fusão, os núcleos dos átomos de hidrogénio têm que estar extremamente próximos (à escala nuclear), mas os núcleos têm uma carga elétrica muito forte que tende a separá-los, e conseqüentemente é necessária uma grande quantidade de energia para os fundir [1].

Apesar das dificuldades técnicas, a ideia de explorar a energia da fusão nuclear como fonte de energia foi considerada logo após a II Guerra Mundial. George Thomson, prémio nobel da física em 1937, impulsionado pelas experiências do seu pai, Joseph John Thomson, também prémio nobel da física em 1906 por produzir neutrões a partir de deutério, propôs em 1946 criar uma câmara chamada *torus*, confinada por um campo magnético toroidal através de um solenoide. Para ionizar o gás de deutério, Thomson utilizaria fontes externas de aquecimento, que iriam acelerar os eletrões e que por sua vez iriam transferir a sua energia para os núcleos de deutério presentes no plasma. Depois disso, e em poucos minutos, os núcleos de deutério conseguiam aquecer a mistura até aos 100keV, que é o ponto onde ocorre a fusão. Este projeto nunca foi concluído, mas foi possível perceber que ao usar campos magnéticos muito fortes era possível dar ao plasma tempo suficiente para que a fusão ocorresse. Investigações no mesmo sentido foram desenvolvidas nos EUA, na antiga União Soviética e no Reino Unido, onde a reação mais promissora entre os isótopos<sup>1</sup> de hidrogénio, pareceu ser a do deutério com o trítio, mas a utilização de campos magnéticos para confinar o combustível quente acabou por ser mais difícil do que se pensava [2].

A primeira reação de fusão ocorreu a 1 de Novembro de 1952, com a detonação da bomba “Ivy Mike” de 82t, onde o princípio de funcionamento era produzir uma reação de fissão para criar as condições necessárias para a reação de fusão, a chamada bomba

---

<sup>1</sup> Os isótopos de um determinado elemento têm o mesmo número de protões mas um número de neutrões (N) diferente, ou seja, têm o mesmo número atómico (Z) e diferente número de massa (A),  $[A = N + Z]$ . No caso do hidrogénio, com apenas um protão, o seu isótopo deutério tem um protão e um neutrão e o trítio tem um protão e dois neutrões.

termonuclear. Os neutrões provocam a fissão do combustível, processo que dá origem à libertação de uma grande quantidade de energia em forma de calor, que permite que o deutério se funda, e por ser uma reação muito rápida não é necessário campos magnéticos para a controlar [3].

Com os conhecimentos adquiridos pela explosão descontrolada da bomba de hidrogénio juntamente com a invenção do laser em 1960, tornou-se possível contornar a ideia de usar campos magnéticos para controlar o plasma. Os lasers conseguem concentrar grandes energias em alvos muito pequenos, o que deu origem à ideia de os usar aquecendo a altas temperaturas uma pequena cápsula de combustível numa série de mini explosões, em que o combustível para a fusão era confinado apenas pela sua própria inércia. Sendo uma reação muito rápida, não era necessário utilizar campos magnéticos na fusão nuclear, ou seja, foi a descoberta de uma segunda abordagem para o problema da temperatura [1].

As dificuldades científicas e técnicas encontradas pelas duas abordagens Confinamento Magnético (CM) e Confinamento Inercial (CI) têm causado uma longa espera na obtenção de resultados animadores. A busca da fusão provou ser um desafio muito difícil para a comunidade científica. Depois de muitos anos, a viabilidade científica da fusão via CM foi demonstrada e a próxima geração de experiências espera que o CI atinja resultados semelhantes [1].

## **2.2 - A Fusão no Sol**

Fusão é o que acontece no núcleo do sol, o calor e a luz que se sentem na terra é resultado das reações nucleares no interior do sol. Os núcleos de hidrogénio colidem e fundem-se em átomos de hélio mais pesados e são libertadas grandes quantidades de energia. A força gravitacional proporcionou as condições perfeitas para a fusão desde a formação do Universo, logo a seguir ao período de expansão rápida. Esta força, juntamente com as nuvens de hidrogénio criaram corpos maciços estelares no início do universo. A fusão ocorre dentro dos seus núcleos, onde a pressão e temperatura são extremamente elevadas - quanto mais quente é o núcleo, maior é a velocidade dos átomos (agitação térmica) e mais provável é a colisão a altas velocidades, de tal forma que a barreira da repulsão electrostática (Força de Coulomb<sup>2</sup>) é superada devido às altas temperaturas (a temperatura do Sol varia entre os 6000°C na superfície e os 15 milhões

---

<sup>2</sup> Força de Coulomb: lei da física que descreve a interação eletrostática entre partículas eletricamente carregadas. O resultado pode ser uma força atrativa ou repulsiva, dependendo dos sinais das cargas que interagem.

de graus Celsius no núcleo). Quando dois átomos de hidrogénio se fundem criam um átomo de hélio, mais pesado, a massa de hélio resultante não é a soma exata dos átomos iniciais, logo alguma massa é perdida e uma grande quantidade de energia é libertada. Como Einstein descreve na sua fórmula ( $E=mc^2$ ), basta uma pequena quantidade de massa para que o resultado da reação de fusão seja muito energética [4].

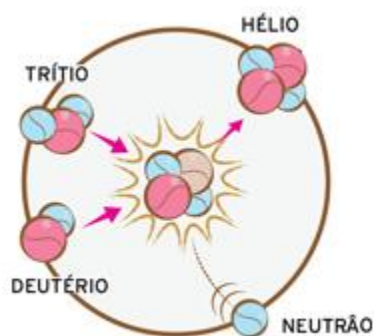


Figura 1 - Fusão Nuclear entre o deutério e o trítio.

A cada segundo, o nosso sol transforma 657 milhões de toneladas de hidrogénio em cerca de 653 milhões de toneladas de hélio, libertando 4 milhões de toneladas de energia radiante (fotões) [4].

### 2.2.1 - Fusão na terra

Sem as condições do sol, a fusão na terra tem exigido uma abordagem diferente para poder responder à necessidade de condições extremas de pressão e temperatura. Um dos principais problemas é como ultrapassar a barreira de Coulomb devida à repulsão das cargas positivas dos núcleos e das nuvens eletrónicas dos mesmos. Para ultrapassar a repulsão dos eletrões elimina-se a sua presença nos átomos, através de gases sobreaquecidos – plasma, também chamado o quarto estado da matéria. O plasma não tem forma nem volume definido, conduz eletricidade e responde intensamente à aplicação de campos magnéticos, onde núcleos carregados positivamente se movimentam num mar de eletrões livres. Um gás pode transformar-se em plasma de duas maneiras: através da aplicação de campos elétricos intensos ou submetendo-o a altas temperaturas, onde o resultado é sempre a dissociação parcial ou completa dos eletrões dos respetivos núcleos [1].

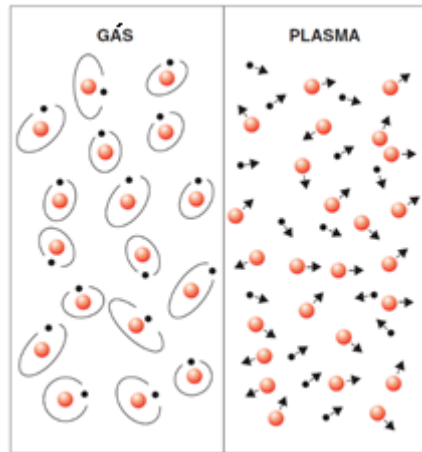


Figura 2 - Plasma obtido através do aquecimento de um gás.

Um outro problema é conseguir controlar a fusão nuclear. A cerca de um milhão de graus Celsius alguns núcleos começam a ter velocidade suficiente para ultrapassar a barreira de Coulomb e colidem, no entanto a estas temperaturas o balanço energético é ainda negativo. A temperatura a partir da qual é possível obter energia sem haver necessidade de fornecê-la (balanço energético positivo) chama-se temperatura de ignição [1].

Fundir hidrogénio liberta menos energia por núcleo do que fissionar urânio, mas existem mais átomos num grama de hidrogénio do que num grama de urânio, e portanto a fusão liberta mais energia para a mesma massa. A fusão foi já conseguida em vários reatores. No entanto a instabilidade do plasma faz com que a reação não se torne autossustentável, ou seja, um dos grandes desafios tecnológicos é construir um sistema que mantenha o plasma estável enquanto os núcleos se fundem. O desenvolvimento de reatores que possam produzir de forma eficaz energia começou há cerca de 50 anos, e é um dos maiores desafios quer científico quer de engenharia dos nossos dias. A energia proveniente da fusão é quase ideal, os reatores de fusão não podem ficar supercríticos, visto que a fusão não tem massa crítica e a única fonte radiativa é o trítio, que é um dos combustíveis da fusão, embora que em comparação com a fissão nuclear, o lixo radioativo final é bastante menor [1].

## 2.3 - Processo de fusão

### 2.3.1 - Processo de decisão

Para que a fusão ocorra é necessário combinar pelo menos três condições: que os elementos utilizados para a fusão sejam tais que no processo seja libertado uma grande quantidade de energia; que a probabilidade da fusão acontecer seja grande (grande secção eficaz) e que os elementos a fundir sejam suficientemente abundantes na natureza [1].

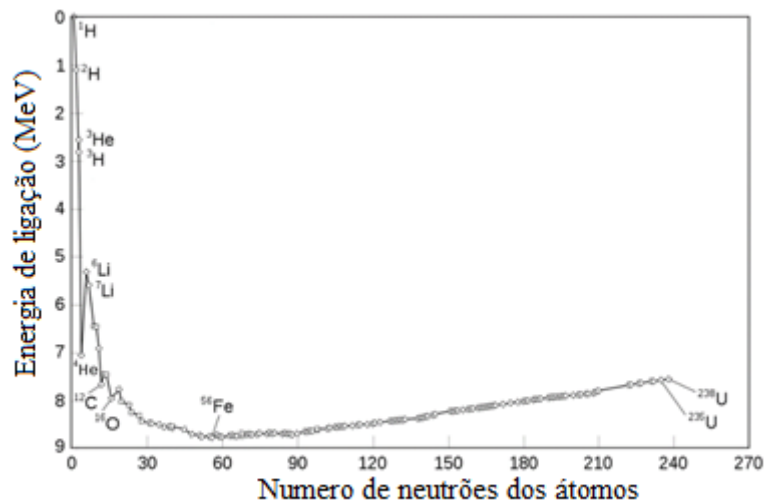


Figura 3 - Gráfico representativo da energia de ligação dos elementos.

A figura 3 quantifica as energias das ligações dos átomos. Quanto maior for a energia de ligação, mais estáveis os núcleos se tornam. O processo de fusão existe em núcleos mais leves, onde é libertada a energia equivalente à diferença entre as massas dos átomos, o mesmo acontece para a fissão, mas com átomos mais pesados, que libertam energia quando se separam. Para a fusão, podem ser utilizados sobretudo isótopos de hidrogénio e de hélio que combinados entre si levam a uma libertação de energia maior ou menor consoante as características de cada um [5].

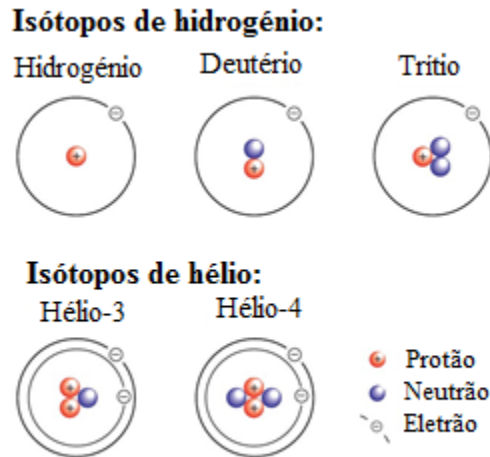


Figura 4 - Estrutura de diferentes átomos de hidrogénio e hélio.

Em princípio, as reações de fusão entre os isótopos mais leves são:

- $p + p \rightarrow {}^2\text{He} \Rightarrow$  Reação impossível, o  ${}^2\text{He}$  é instável.
- ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma \Rightarrow$  Reação improvável, tem uma secção eficaz muito baixa mas tem uma energia resultante de  $Q=23,8\text{MeV}$ .
- ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p \Rightarrow$  Elementos com secções eficazes e libertação de energia altas,  $Q=18,3\text{MeV}$ , mas o  ${}^3\text{He}$  é pouco abundante na terra, a sua abundância é maior na lua, incorporada na camada superior, embora seja de qualidade reduzida.
- ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n \Rightarrow$  Reação **D-D**, tem secção eficaz e libertação de energia aceitáveis,  $Q=3,3\text{MeV}$ , e o deutério é muito abundante na terra, encontrando-se na água.
- ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n \Rightarrow$  Reação **D-T**, tem secção eficaz e libertação de energia alta,  $Q=17,6\text{MeV}$ . O deutério é muito abundante, já o trítio não existe naturalmente na terra, podendo no entanto ser produzido diretamente no reator, como será discutido mais à frente.

[6]

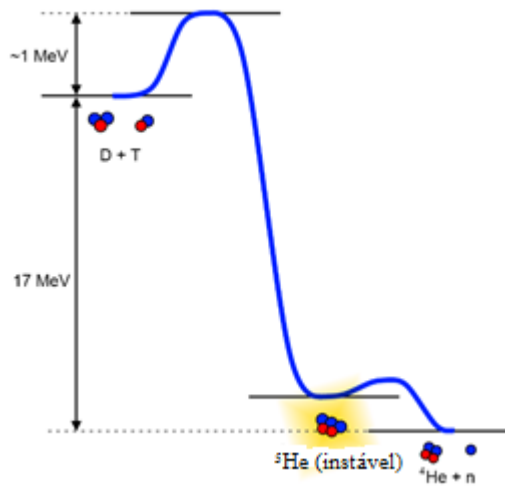


Figura 5 - Ganho de energia com a fusão de deutério e do trítio.

Dentro das reações referidas anteriormente, as que apresentam melhores resultados tendo em conta a energia libertada, secção eficaz e a abundância são entre o Deutério-Deutério e Deutério-Trítio, sendo a reação D-T ( ${}^2\text{H} - {}^3\text{H}$ ) a que tem maior secção eficaz [1].

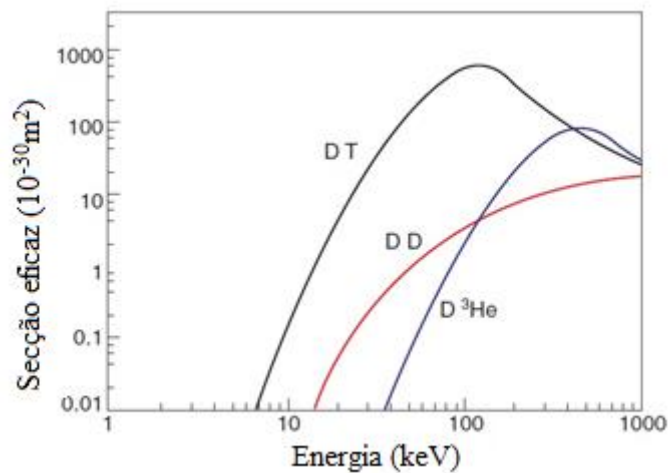


Figura 6 - Comparação entre os diferentes isótopos, relativamente às suas secções eficazes.

### 2.3.1.1 - Critério de Lawson

Para confirmar se a reação anterior (D-T) é sustentável, é necessário que esta obedeça ao critério de Lawson. Este critério, criado por John Lawson, em 1955, físico no *Atomic Energy Establishment* em Harwell na Inglaterra, relaciona três variáveis, a densidade do plasma ( $n$ ) que representa o número de iões por metro cúbico, o tempo de confinamento ( $\tau_E$ ) que é determinado pela qualidade do campo magnético em segundos (o tempo de confinamento é superior com uma melhor isolamento magnética) e a temperatura ( $T$ ) em

keV. O critério determina se um dado conjunto de condições físicas uma combinação de combustível conduz à produção de mais energia do que aquela que é necessária para a criar [1].

A fusão produz um neutrão, que por não ter carga elétrica não interage com campos magnéticos e um átomo de hélio, denominado partícula *alfa* que por ter carga elétrica positiva fica presa no campo magnético do reator. As partículas alfa produzidas vão aumentando sucessivamente a temperatura do plasma até a reação atingir o *Breakeven*, tornando-a autossuficiente e com isso imune às perdas, como por exemplo as perdas por radiação – *Bremsstrahlung* [6].

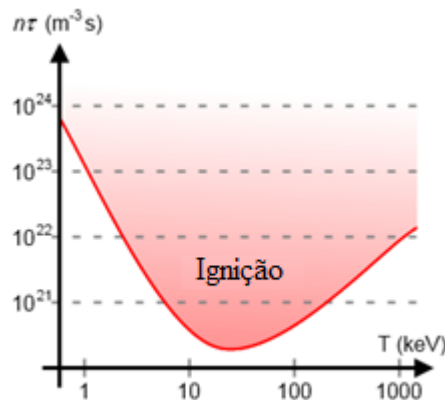


Figura 7 - Critério para se dar a ignição do plasma, que é o produto da densidade com o tempo de confinamento em função da temperatura.

Para estabelecer as condições de confinamento para atingir o *Breakeven*, é necessário igualar a potência que a partícula *alfa* dá ao sistema à potência das perdas da reação.

A equação da potência da partícula *alfa* é expressa por:

$$P_{\alpha} = \frac{1}{4} \cdot n^2 \cdot \overline{\sigma v} \cdot k \cdot E \quad (1)$$

onde  $n$  é o número de íons D-T por unidade de volume ( $m^{-3}$ ), com uma mistura de 50:50,  $\overline{\sigma v}$  é a taxa de fusão ( $m^3 s^{-1}$ ), i.e., a velocidade média ( $v$ ) com que os átomos com uma determinada secção eficaz média ( $\sigma$ ) se fundem a uma dada temperatura,  $k$  é a constante de Boltzmann que vale  $1,6 \times 10^{-16}$  J/keV e  $E$  é a energia que a partícula alfa transfere para o plasma, 3,5 MeV.

A potência total devida às perdas pode ser escrita como:

$$P_L = \frac{3 \cdot n \cdot k \cdot T}{\tau_E} \quad (2)$$

Ao igualar as duas potências obtemos:

$$n \cdot \tau_E = \frac{12}{3,5 \times 10^3} \cdot \frac{T}{\bar{\sigma v}} \quad (3)$$

Como a condição para a ignição é uma função da temperatura vamos usar o mínimo valor possível para termos ignição que de acordo com o gráfico da figura 7 ocorre para uma temperatura de 30keV (300 milhões de graus Celsius). A essa temperatura, o coeficiente toma o valor  $\left(\frac{T}{\bar{\sigma v}}\right)_{min} \approx 5 \times 10^{22} keV m^{-3} s$  o que implica que

$$(n \cdot \tau_E)_{min} = 1,7 \times 10^{20} m^{-3} s \quad (4)$$

A condição é depois obtida fazendo uso do facto de que a temperatura à qual a reação tem maior probabilidade de acontecer é entre os 10 e os 20keV (nessa gama de temperaturas, pode-se considerar que o  $\bar{\sigma v} \approx T^2$ ). Ao multiplicar a equação 4 por T, o lado esquerdo fica independente da temperatura, enquanto o lado direito fica dependente do produto de três fatores:

$$T \cdot n \cdot \tau_E = 3 \times 10^{21} keV m^{-3} s \quad (5)$$

O valor do coeficiente no critério de Lawson pode ainda sofrer uma modificação, quando é adicionada a dependência com o perfil do plasma, i.e., a densidade, a temperatura e a pureza do mesmo,

$$T \cdot n \cdot \tau_E = 6 \times 10^{21} keV m^{-3} s \quad (6)$$

Assim, obtemos o valor mínimo de confinamento para atingir o *Breakeven* [1].

Se as condições do critério de Lawson forem satisfeitas, a reação de fusão irá consumir todo o combustível e gerar energia em que cerca de 20% surge em forma de calor e 80% é gasto na energia cinética dos neutrões produzidos.

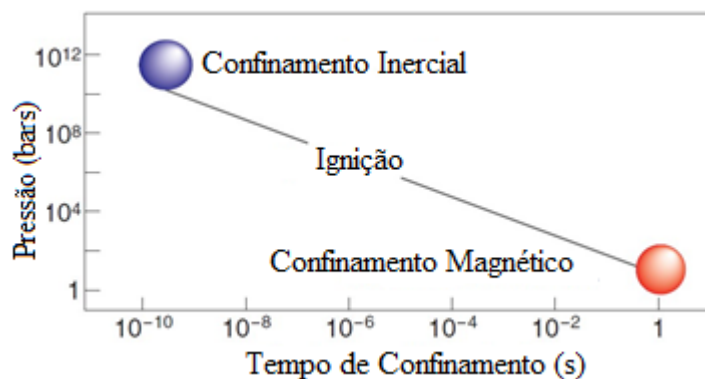


Figura 8 - Condições necessárias para ocorrer a fusão em termos de pressão do plasma e tempo de confinamento.

No critério de Lawson, a densidade do plasma pode ser substituída pela sua relação com a temperatura e pressão de forma que a análise possa ser feita em termos da pressão do plasma e do tempo de confinamento. Na figura 8 mostramos a pressão em função do tempo de confinamento para o critério de Lawson com parâmetros típicos, o que nos permite comparar os cenários CM e CI. Para ocorrer a fusão no CM é necessário um tempo de confinamento maior para uma pressão menor, já no CI, é necessário uma pressão maior para um tempo de confinamento menor. Em ambos os casos a temperatura é muito elevada, em torno dos 100-200 milhões de graus Celsius (10-20keV) [1].

### 2.3.1.2 - Abundância de trítio

Com a escolha da reação D-T como sendo a que apresenta os melhores resultados, temos ainda de averiguar se a abundância de trítio é ou não um problema. O deutério é encontrado na água líquida numa parte em 6700 e uma grama de deutério produz 300GJ de eletricidade. Desta forma, será necessário extrair cerca de 1000t de deutério para satisfazer o consumo de eletricidade atual em todo o mundo. Com apenas 3,8 litros de água podemos produzir, utilizando a fusão, mais energia do que com 1136 litros de gasolina. Na terra, considerando toda a água disponível, temos cerca de 1015t de deutério, que são portanto suficientes para fornecer energia quase indefinidamente. O trítio por sua vez, não existe em grandes quantidades na terra e tem conseqüentemente de ser criado de tal forma que cada átomo de trítio consumido origine a produção de pelo menos outro átomo de trítio para que a central apresente uma boa fiabilidade. Um reator que utilize a fusão D-T pode produzir trítio através do neutrão resultante da reação, que colidindo com lítio presente no *blanket*<sup>3</sup> (cobertura) produz trítio. O lítio tem três prótons no seu núcleo e existe no *blanket* em dois isótopos: com três neutrões ou com quatro neutrões [1].

As reações dos neutrões com o lítio são então:

- ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.8\text{MeV}$
- ${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + n - 2.5\text{MeV}$

---

<sup>3</sup> Cobertura interior que envolve o reator de fusão, constituído por módulos de lítio e de berílio.

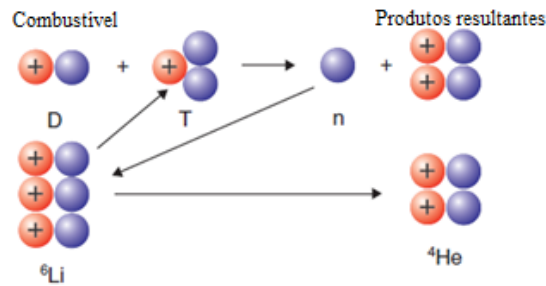
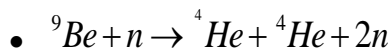


Figura 9 - Reações de fusão, tendo deutério e lítio como combustível.

A reação do lítio-6 é mais provável com neutrões lentos, é uma reação exotérmica e liberta cerca de 4,8MeV. Já a reação com o lítio-7 é endotérmica e ocorre apenas com neutrões rápidos e absorve 2,5MeV. O lítio natural é composto por 92.6% de lítio-7 e 6.4% de lítio-6, logo um quilograma de lítio irá produzir 105GJ de eletricidade [1].

Para que a produção de trítio satisfaça as necessidades do reator é necessário produzir mais neutrões, visto que estes podem ser absorvidos pela estrutura do reator e não chegar aos módulos de lítio presentes na cobertura. Para isso, são utilizados módulos de berílio, que ao interagirem com os neutrões produzem mais neutrões na reação.



Com estes módulos, a produção de trítio aumenta consideravelmente, embora que nem todos os módulos da cobertura sirvam para a produção de trítio e de neutrões. Em ambos os reatores estudados, existem muitos sistemas associados ao controlo da reação, como os sistemas de aquecimento e diagnóstico que retiram espaço aos módulos de produção [1].

### 2.3.2 - Escolhas possíveis

Tendo como base tudo o que é necessário para a fusão acontecer na Terra, um possível esquema de uma central de energia nuclear de fusão é ilustrada na figura 10, onde são utilizados deutério e trítio como combustível. A energia produzida pela reação é absorvida pela camada de lítio que delimita o reator, o trítio originado pela reação dos neutrões com o lítio é depositado de novo do reator para que a reação não pare e o calor provocado pelas reações é direcionado para um gerador que converte vapor em eletricidade.

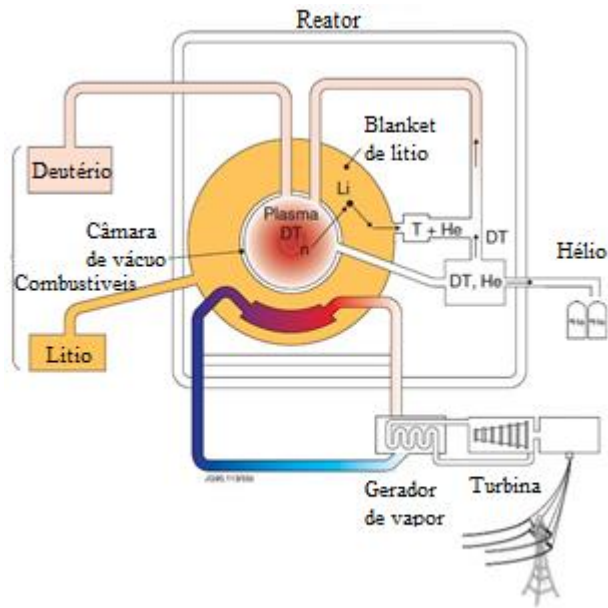


Figura 10 - Esquema simplificado para um reator de fusão nuclear.

Este modelo simples pode dar origem a um grande número de ideias para construir o melhor reator de fusão, mas neste momento existem dois reatores que parecem ser mais prometedores em termos de resultados desde a descoberta da fusão, são eles o reator de Confinamento Magnético no *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)* em França, e o reator de Confinamento Inercial, uma tecnologia recente, no *National Ignition Facility (NIF)* em Livermore nos EUA.

No ITER, ainda em construção, a fusão vai basear-se no conceito de *Tokamak* de confinamento magnético, no qual o plasma é contido numa câmara de vácuo em forma de *donut*. O combustível é uma mistura de deutério e trítio, que aquecidos atingem temperaturas de 150 milhões de graus Celsius, até formar um plasma quente. Os intensos campos magnéticos são produzidos por bobinas supercondutoras que rodeiam a estrutura interna e permitem conter o plasma para que ele não toque na estrutura do *Tokamak*.

O reator de confinamento inercial no NIF assenta em pressupostos diferentes, onde o aquecimento para as reações é feito através de lasers muito potentes, em que os sinais são amplificados milhões de vezes e são concentrados num único ponto dentro do reator, o chamado alvo. Este alvo é uma cápsula de combustível de tamanho reduzido, que contém uma mistura de deutério e de trítio. Quando o alvo é penetrado pelos vários lasers é sujeito a uma grande pressão, aquece muito rapidamente o que conduz à fusão dos elementos. A temperatura para manter a reação não é problema, já que a reação é muito rápida e para manter o reator operacional são lançadas várias cápsulas de combustível.



# Capítulo 3

## Confinamento Magnético

*Neste capítulo é feita uma explicação de toda evolução dos reatores de confinamento magnético, bem como a exposição do processo e das características do reator do International Thermonuclear Experimental Reactor.*



## 3 - Confinamento Magnético

### 3.1 - História

Em meados dos anos 50, foram construídos os primeiros reatores de fusão nuclear, sendo a União Soviética, Estados Unidos, França e Japão os principais países que ao longo dos anos contribuíram com experiências para o desenvolvimento deste tipo de reatores. No final de 1950, no *Kurchatov Institute*, em Moscovo nasceu o conceito *Tokamak*, um dispositivo em forma de *donut* com um revolucionário sistema de CM para conseguir conter o combustível com a temperatura necessária para que ocorresse fusão nuclear. Este tipo de conceito revolucionou a investigação em fusão nuclear, uma vez que os excelentes resultados levaram físicos e engenheiros em todo o mundo a optarem por esta forma para a construção dos seus reatores. Em 1970, o sucesso dos *Tokamaks* era claro e sua utilização unânime. No entanto, as centrais eram relativamente pequenas, o que fazia com que o procedimento para que o plasma atingisse as temperaturas desejáveis fosse incerto. As temperaturas do plasma eram inicialmente apenas cerca de 1/10 da temperatura necessária para a ignição e o tempo de confinamento estava longe do desejado. Embora a compreensão do *Tokamak* e do seu funcionamento estivesse ainda no início, os físicos perceberam que a temperatura do plasma e o tempo de confinamento pareciam aumentar de forma proporcional ao aumento da corrente que se fazia atravessar o plasma. Finalmente chegou-se à previsão de que se a corrente nos *Tokamaks* fosse de cerca de 3MA poder-se-ia alcançar finalmente o *breakeven* [7].

Os Estados Unidos começaram então a construção do *Princeton Large Torus* (PLT) de 1 MA que começou a operar em 1975 e que em 1978 conseguiu um registo histórico, quando atingiu uma temperatura recorde de 60 milhões de graus Celsius. Já na europa, começou em 1978 a construção do *Joint European Torus* (JET), financiado pela União Europeia e construído em Culham, Reino Unido. O JET teria uma corrente de 3 MA, mas já na fase de *design* os físicos decidiram aumentar a sua potência para os 4,8 MA, podendo ainda atingir os 7MA graças à excelente equipa de engenheiros liderada por Paul-Henri Rebut. O reator começou a operar em 1983. A par das novidades vindas da europa, os Estados Unidos decidiram iniciar a construção de um segundo reator em *Princeton*, o *Tokamak Fusion Test Reactor* (TLTR) de 2,5MA com uma mistura 50/50 de deutério e trítio, que seria menor que o JET mas com campos magnéticos mais intensos. O Japão



tendo 50MW de potência de entrada. Com os conhecimentos entretanto adquiridos durante a operação do ITER, está prevista ainda a construção de uma central de fusão nuclear em 2030, para poder extrair energia elétrica da reação de fusão [9].

**NOTA: Os dados e características da constituição do reator do ITER, baixo descritos foram obtidos em [iter.org](http://iter.org) [9]**

## 3.2 - ITER

A primeira fase do ITER aconteceu em 2010, com o início da construção de edifícios científicos e de instalações para a realização de experiências, foram necessários cerca de 500 trabalhadores e prevê-se que o número ascenda até 2000 no pico de construção que irá ser em 2017. Durante 2014 e até 2019, vários componentes vão ser produzidos *on site* uns devido ao seu tamanho o que impossibilita o transporte e outros por serem construídos por empresas que integram o projeto ITER. Prevê-se ainda, que as operações de montagem irão exigir cerca de 1500 horas de trabalho num período de 4 anos.

### 3.2.1 - Tokamak - Constituição

O reator do ITER tem 7 componentes principais e vários sistemas externos para providenciar as condições necessárias para a fusão.

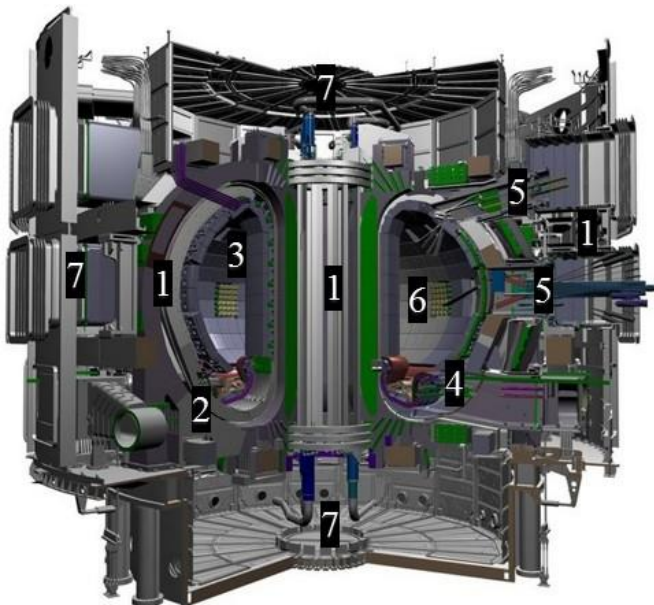


Figura 13 - Constituição do reator do ITER:  
1-Sistema magnético; 2- Câmara de vácuo;  
3- Cobertura; 4- Divisor; 5- Sistema de diagnóstico; 6- Aquecimento externo; 7- Criostato.

#### 3.2.1.1 - Sistema magnético

O sistema magnético do ITER é constituído por um campo toroidal, um campo poloidal, um solenoide central e bobinas de correção para controlar os *Edge Localized*

*Modes* (ELMs)\*. Para criar os campos magnéticos supercondutores necessários para confinar e moldar o plasma dentro da câmara de vácuo, é necessária uma grande potência, logo, o sistema necessita de ter grande eficiência. As bobinas do campo toroidal e poloidal encontram-se entre a câmara de vácuo e o crióstato (onde são arrefecidas e protegidas dos neutrões), são constituídas por cabos supercondutores que para alcançar a supercondutividade, têm de ser arrefecidos com hélio supercrítico<sup>4</sup> a 4K (- 269°C). As bobinas do campo toroidal e o solenoide central são desenhados de forma a poderem atingir os 13T e portanto construídas com uma liga especial de estanho e neodímio (Nd<sub>3</sub>Sn). Já as bobinas do campo poloidal e as bobinas de correção são feitas a partir de neodímio e titânio (NbTi). O sistema magnético tem de resistir às forças eletromagnéticas resultantes durante a operação e ser capaz de demonstrar a continuidade de serviço, sem acusar fadiga.

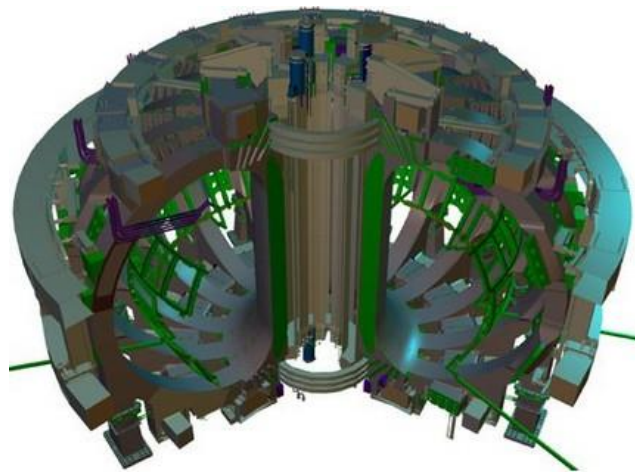


Figura 14 - Sistema magnético do ITER, formado pelo campo toroidal, campo poloidal e o solenoide central.

\**Edge Localized Modes* (ELMs):

Os ELMs ocorrem nas extremidades do plasma e podem danificar os componentes do reator (cobertura) e influenciar o comportamento do plasma. A primeira abordagem pensada para acabar com o problema foi de reduzir a pressão do plasma, o que é pouco eficaz, pois reduz o poder de confinamento de energia, essencial para atingir a fusão. A segunda, foi em vez de ser extinguir a falha, reduzir o seu volume até a um ponto em que seja possível controlá-la, com o objetivo de limitar os danos que estas falhas têm sobre os componentes. Este procedimento é conhecido pela técnica de *resonant magnetic*

---

<sup>4</sup>Fluído (hélio) supercrítico é qualquer substância cuja temperatura e pressão estão acima do seu ponto crítico. Acima do ponto crítico é impossível definir se é líquido ou gasoso.

*perturbation* (RMP) de atenuação dos ELMs. Ela consiste essencialmente em aplicar pequenos campos magnéticos para abrir pequenos buracos nas extremidades do plasma, para assim reduzir a pressão e com isso reduzir os ELMs. Um fato interessante sobre esta técnica é que quando a pressão do plasma diminui, os ELMs aumentam, e em teoria, menos pressão conduz a menos ELMs, porque existe uma menor motivação do plasma para libertar energia e partículas. Assim, se com a redução da pressão os ELMs aumentam deverá existir um outro fator que afete esta segunda técnica. Para determinar esse fator foram conduzidas várias experiências tendo-se chegado à conclusão de que se formam no plasma umas estruturas em forma de lóbulos causadas pela aplicação da técnica de RMP que atiram partículas para fora do seu curso normal (ao longo do plasma), alterando a sua rota e o seu destino. Algumas dessas partículas acabam fora do campo magnético, o que afeta a sua forma e diminui a pressão do plasma, e é neste ponto que os ELMs são criados, embora sejam em maior número a sua energia é menor, o que permite um maior controlo. Esta é a principal vantagem desta técnica, embora a estratégia dos engenheiros do ITER passe pela completa extinção dos ELMs num futuro próximo [10].

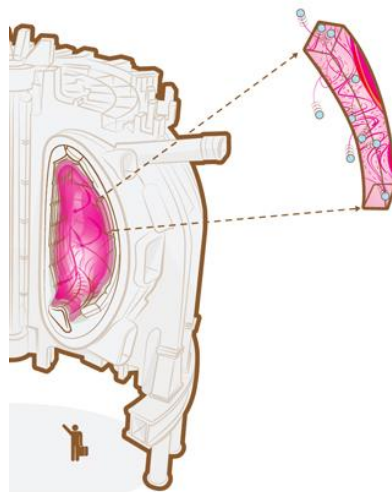


Figura 15 - Corte vertical do reator do ITER, onde se observam os ELMs.

#### 3.2.1.1.1 - Campo toroidal

O campo toroidal (CT) é constituído por 18 ímanes, que produzem um campo magnético em redor do *torus*, cuja principal função é limitar as partículas do plasma. O CT do ITER foi projetado para conseguir produzir uma energia de 41GJ e um campo magnético máximo de 11,8T, as suas bobinas pesam 6.540t e os condutores necessários para as construir têm uma extensão total de 80.000km.

#### 3.2.1.1.2 - Campo poloidal

Os ímanes do campo poloidal (CP) obrigam o plasma a manter-se fora das paredes da cobertura, o que contribui para manter a sua forma conduzindo a uma maior estabilidade. O CP é induzido tanto pelos ímanes que o constituem, bem como pela corrente que atravessa o plasma. O sistema é constituído por 6 bobinas horizontais independentes colocadas fora da estrutura dos ímanes do CT. Devido ao seu tamanho, cinco das seis bobinas são fabricadas *on site* em Cadarache e a bobina mais pequena é contruída fora das instalações do ITER. As 6 bobinas são constituídas por condutores que vão ter diferentes materiais de acordo com a necessidade da operação, cada um exibe diferentes características tendo em conta a corrente e temperatura máxima.

#### 3.2.1.1.3 - Solenoide central

O solenoide central é essencialmente um grande transformador que é a espinha dorsal do sistema magnético, contribui para o fluxo indutivo que dirige o plasma, para a formação das linhas de campo na zona do divisor e também para controlar a estabilidade vertical. Tem na sua constituição 6 bobinas independentes, juntas por uma estrutura de pré-compressão vertical que permite ao ITER mudar parâmetros no plasma para testar diferentes cenários de operação até 17MA e cobrir funcionamentos indutivos e não indutivos. Cada bobina baseia-se numa pilha de múltiplas unidades de enrolamentos, que minimiza as junções. A isolamento elétrica de *glass-polyimide* permite uma capacidade operacional em alta tensão, testada até 29kV.

#### 3.2.1.2 - Câmara de vácuo

A câmara de vácuo em aço inoxidável fornece um ambiente em vácuo para a reação de fusão, está contida dentro do crióstato e atua como a primeira barreira de contenção de segurança, tem 6m de diâmetro interno, 19m de largura, 11m de altura e pesa 8.000t. As paredes são duplas para arrefecimento com água e tem 44 janelas que proporcionam o acesso à câmara de vácuo para operações de controlo remoto, sistemas de diagnóstico, aquecimento e sistemas de vácuo.

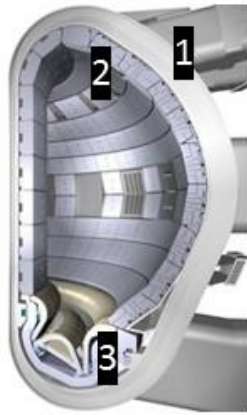


Figura 16 - Corte vertical da câmara de vácuo (1), onde se pode observar a cobertura (2) e o divisor (3).

### 3.2.1.3 - Cobertura

A cobertura cobre as superfícies interiores da câmara de vácuo (primeira parede), proporciona a blindagem necessária para a proteger, bem como aos ímãs supercondutores, do calor e dos fluxos de neutrões da reação de fusão. Os neutrões são desacelerados na cobertura, onde a sua energia cinética é transformada em energia térmica e posteriormente são recolhidos pelos *coolants*. É esta energia térmica que será utilizada para produzir energia elétrica através de turbinas de vapor, numa futura central ligada à rede elétrica. Para se poder fazer a manutenção, a cobertura é constituída por 440 módulos individuais de 4,6t, cada um tem uma primeira proteção descartável que enfrenta o plasma e um escudo semipermanente dedicado à blindagem dos neutrões. O elemento que constitui a primeira proteção será o berílio, devido às suas propriedades físicas únicas para suportar as altas temperaturas do plasma, o resto do escudo é feito a partir de cobre de alta resistência e aço inoxidável. Numa fase posterior do projeto ITER, serão usados módulos experimentais de lítio para a criação de trítio (*breeding concepts*), para que a futura central de fusão seja autossustentável, a produzir o seu próprio trítio.

### 3.2.1.4 - Divisor

Localizado na parte inferior da câmara de vácuo, o divisor é composto por 54 cassetes remotamente removíveis, cada uma constituída por três componentes voltados para o plasma (alvos verticais exteriores e interiores e a cúpula). Os alvos estão situados na interseção das linhas de campo magnético, onde as partículas de plasma de alta energia atingem os componentes e transformam a sua energia cinética em térmica.

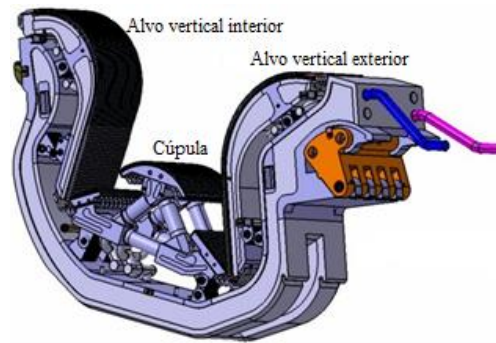


Figura 17 - Três componentes do divisor: alvo vertical exterior e interior e a cúpula.

O calor recebido por estes componentes é muito intenso, e é por isso muito importante uma correta escolha dos materiais que a constituem. Apenas alguns materiais são capazes de suportar temperaturas que rondam os  $3000^{\circ}\text{C}$  durante os 20 anos de vida do reator do ITER. É portanto necessário testar vários materiais quando o reator estiver operacional (*breeding concepts*). O primeiro divisor vai ser construído em fibra de carbono reforçada (CFC), um material que apresenta a vantagem de se ser supercondutor a altas temperaturas. Já a segunda geração vai ser de tungsténio, que oferece uma baixa erosão e um longo tempo de vida útil (presentemente e devido ao custo de operação, o ITER está a projetar lidar só com tungsténio logo de início).

### 3.2.1.5 - Sistemas de diagnóstico

Um extenso sistema de diagnóstico será instalado no ITER, para fornecer os dados necessários para controlar, avaliar e otimizar o desempenho do plasma e promover a compreensão física do mesmo. Estes dados compreendem, medições de temperatura e densidade, concentração de impurezas e de partículas e o tempo de confinamento. O sistema é composto por cerca de 50 sistemas de medição individual, desenhados a partir de uma gama de técnicas modernas de diagnóstico de plasmas, incluindo lasers, raio-X, câmaras de neutrões, monitores de impurezas, espectrómetros de partículas, bolómetros de radiação, pressão e análise de gases e fibras óticas. Este sistema é essencial, pois vai lidar com uma nova gama de fenómenos não previamente ligados aos sistemas de diagnóstico, isto é, vão ter de conseguir medir vários valores com grande exatidão e precisão, enquanto suportam grandes fluxos de neutrões jamais vistos nas máquinas atuais.

### 3.2.1.6 - Aquecimento externo

O plasma do ITER terá de conseguir atingir os 150 milhões de graus Celsius, pois é a essa temperatura limite para que se dê a fusão do combustível. Para esse efeito, no *Tokamak* irá existir um feixe de neutrões e duas fontes de ondas eletromagnéticas de alta frequência, para proporcionar 50MW de potência de entrada (*input*). Depois do plasma atingir a temperatura de ignição, estes sistemas podem ser reduzidos, ou totalmente desligados, pois os núcleos de hélio resultantes da reação são suficientes para manter a temperatura do plasma.

#### 3.2.1.6.1 - Feixe de neutrões

O injetor do feixe de neutrões é usado para injetar partículas não carregadas de alta energia para o plasma, onde por meio de colisões, transferem a sua energia para as partículas do plasma. Antes da injeção, os átomos de deutério têm que ser acelerados fora do *Tokamak* até atingirem uma energia cinética de cerca de 1MeV e apenas os átomos com carga elétrica (positiva ou negativa) podem ser acelerados através do campo elétrico. Seguidamente os eletrões são removidos dos neutrões dos átomos para criar um ião carregado positivamente. Depois deste procedimento e antes do feixe atuar, os neutrões têm que ganhar o seu eletrão perdido, para isso, entram em células que contêm gás. Este processo é essencial porque se um ião carregado positivamente entrar para a câmara de vácuo vai ser defletido pelo campo magnético que atua no plasma e assim perde-se o efeito do feixe de neutrões.

O grande volume do plasma do ITER impôs novas técnicas para este método de injeção, as partículas vão ter de se deslocar 3 a 4 vezes mais rápido do que nos sistemas conhecidos anteriormente a fim de conseguirem penetrar dentro do plasma. Para esse efeito, e como os iões positivos tornar-se-ão difíceis de neutralizar, vai ser criada uma fonte de iões negativos, que são mais fáceis de neutralizar, sendo no entanto mais difíceis de criar e controlar.

Dois injetores estão previstos para o ITER e um terceiro será usado para diagnóstico.

#### 3.2.1.6.2 - Ciclotrão de iões

O ciclotrão de iões e eletrões é um método de aquecimento, que utiliza ondas de rádio em diferentes frequências para produzir um aumento de temperatura no plasma. No aquecimento de ressonância do ciclotrão de iões, a energia é transferida para os iões do

plasma por um feixe de alta intensidade de radiação eletromagnética, com uma frequência de 40 a 55MHz. Para isso acontecer, é usado um gerador para produzir ondas de rádio com altas frequências para depois serem transportadas ao longo de uma linha de transmissão até à antena, localizada na câmara de vácuo.

#### 3.2.1.6.3 - Ciclotrão de eletrões

O aquecimento de ressonância do ciclotrão de eletrões excita os eletrões no plasma através de um feixe de alta intensidade de radiação eletromagnética a uma frequência de 170GHz (frequência de ressonância dos eletrões), o que faz aumentar a temperatura do plasma. Por sua vez, os eletrões transferem a energia absorvida para os iões através de colisões. Este sistema é também utilizado para depositar calor em locais muito específicos no plasma, para minimizar a acumulação de instabilidades que conduzem ao seu arrefecimento. Em comparação com aquecimento de iões, o de eletrões tem a vantagem de que o feixe pode ser transmitido através do ar, o que simplifica a montagem e a manutenção, visto que, pode situar-se afastado da câmara de vácuo. A energia é fornecida por poderosos *girotrons* de alta frequência, com 1MW, a operar a 170GHz com uma duração de impulsos de 500s.

#### 3.2.1.7 - Crióstato

O crióstato é uma estrutura em aço inoxidável que envolve a câmara de vácuo e os ímanes supercondutores, proporcionando um ambiente frio em vácuo. É constituído por uma única peça em forma de cilindro, reforçado horizontalmente e verticalmente por vigas, tem 29,3m de altura, 28,6m de largura e é rodeado por uma camada de betão (bioescudo) com 2 metros de espessura. O crióstato tem entradas para fornecer acesso aos vários sistemas que operam no ITER, sistemas de refrigeração, aquecimento auxiliar e sistemas de diagnóstico. Existe também, um espaço entre o crióstato e a câmara de vácuo para permitir a expansão e contração térmica das estruturas.

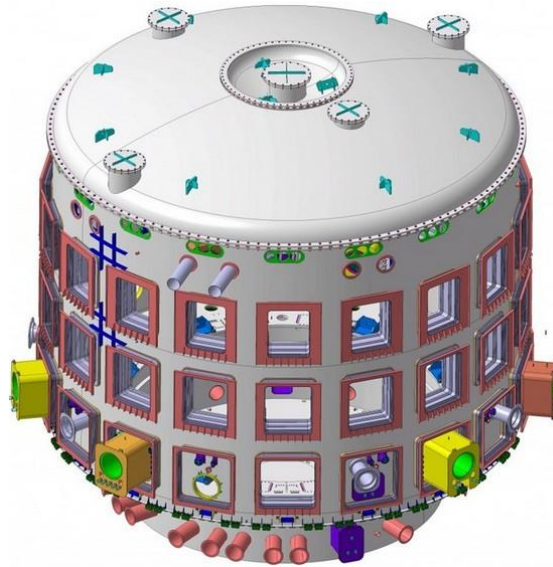


Figura 18 - Representação do crióstato, que é um dos maiores componentes do ITER.

### 3.2.1.8 - Sistemas externos

#### 3.2.1.8.1 - Sistema de vácuo

A câmara de vácuo com  $1400\text{m}^3$  e o crióstato com  $8500\text{m}^3$  necessitam do maior sistema de vácuo já alguma vez construído para proporcionar as condições para a reação de fusão. O sistema utiliza uma bomba de vácuo para retirar todas as fontes de moléculas orgânicas antes de se iniciar o processo de fusão, visto que, estas moléculas podem ser divididas no plasma o que destabiliza a reação. Esta bomba também é necessária para criar uma baixa densidade, cerca de um milhão de vezes menor que a densidade do ar. Depois desta primeira técnica são utilizadas bombas mecânicas e bombas criogénicas para extrair o ar da câmara de vácuo e do crióstato até que a pressão no interior atinja um milionésimo da pressão normal (1atm). Esta operação demora entre 24 e 48 horas no ITER devido à sua dimensão. Os principais sistemas de bombagem são as 6 bombas de escape do *torus*, 4 bombas criogénicas para o sistema de injeção de neutrões e 2 bombas criogénicas para o crióstato e para os ímanes supercondutores, que serão arrefecidos por hélio supercrítico.

#### 3.2.1.8.2 - Sistema criogénico

O sistema criogénico do ITER produz a refrigeração necessária com um sistema de criodistribuição que é constituído por linhas criogénicas e por caixas frias (*cold boxes*). O sistema é composto por três refrigeradores de hélio, que fornecem a potência de refrigeração necessária através da criodistribuição e por dois refrigeradores de nitrogênio

que fornecem a energia para os escudos térmicos e permitem fazer um pré-arrefecimento do hélio. A distribuição de potência de refrigeração é feita através de caixas de criodistribuição para o arrefecimento dos ímanes e das bombas criogénicas, e um complexo sistema de linhas de transferência localizadas tanto dentro do *Tokamak* como dentro dos edifícios dos sistemas criogénicos. Os sistemas vão fornecer também o arrefecimento inicial aos ímanes, aos escudos térmicos e às bombas criogénicas para que se atinja o vácuo na câmara de vácuo e no crióstato. Para arrefecer os ímanes é utilizado hélio supercrítico a 4K (-269°C) que vai estar rodeado pelo crióstato e por um escudo térmico arrefecido também com hélio a 80K (-193°C). Além disso, hélio supercrítico a 4K vai arrefecer painéis da absorção criogénica, para conseguir altas velocidades de bombagem e de vácuo no crióstato e no *torus*. O armazenamento e a recuperação do inventário de hélio (cerca de 25t) são conseguidos por tanques de gás com hélio a 4K e a 80K.

O sistema criogénico do ITER será o segundo maior sistema deste tipo alguma vez construído (depois do *Large Hadron Collider* do CERN), com uma potência instalada de refrigeração de 65kW a 4,5K (hélio) e 1300kW a 80K (nitrogênio).

#### 3.2.1.8.3 - Controlo remoto

Quando o ITER der início à operação, será impossível realizar modificações de fundo, realizar inspeções ou reparar qualquer dos componentes do *Tokamak*. É portanto fundamental ter prontas técnicas fiáveis e robustas para manipular e trocar componentes que podem chegar a ter 50t. O processo de reparação utiliza um controlador remoto para separar e colocar o componente danificado numa caixa de transporte. Na abertura que fica na estrutura é colocada uma porta temporária para impedir a contaminação. A caixa é movida através de canais de ar ao longo das células quentes até ao lugar onde irá ser reparada. O processo é então revertido para levar o componente de volta.

#### 3.2.1.8.4 - Fonte de energia

O ITER vai funcionar com uma gama de energias que varia entre os 110MW e os 620MW (para períodos de pico de 30s). A energia elétrica é fornecida através de um circuito que alimenta a região de Cadarache a 400V, nas instalações do ITER a tensão é transformada para 69kV através de três transformadores. Existe também um plano de contingência a cargo de dois geradores a diesel.

### 3.2.1.8.5 - Ciclo do combustível

Para iniciar o processo de fusão, todo o ar e impurezas são extraídos da câmara de vácuo, depois, os potentes ímãs são ligados e o combustível gasoso de baixa densidade é introduzido na câmara de vácuo por um sistema de bombas, com uma taxa média de transferência de  $200\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ . Uma vez concluído este processo, uma corrente elétrica é aplicada ao sistema que ioniza o gás para transformá-lo em plasma.

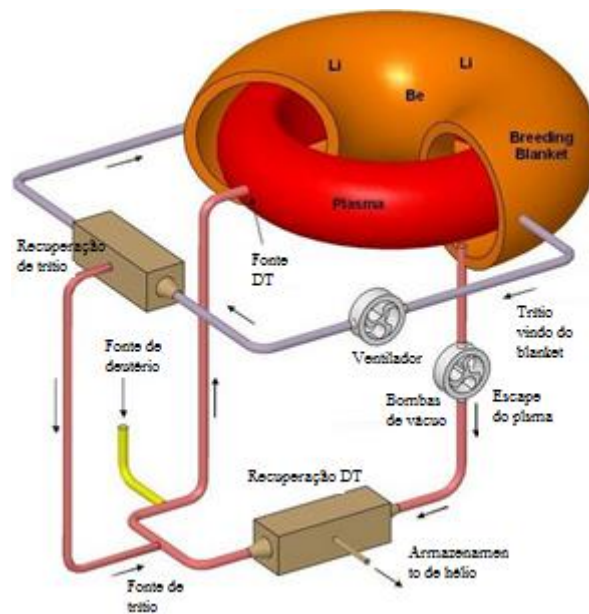


Figura 19 - Circuito fechado D-T.

Quando a densidade do plasma for satisfatória, são injetadas as pastilhas congeladas de deutério-trítio a uma velocidade de  $3600\text{km/h}$  para penetrarem profundamente no núcleo do plasma e também para controlarem os ELMs. A injeção tem-se verificado bastante eficaz, especialmente porque se desenvolveu um método que permite que as pastilhas descrevam trajetórias curvilíneas de modo a que atinjam os ELMs, onde eles são particularmente prejudiciais.

Apenas um grama de combustível está presente na câmara de vácuo durante toda a operação e o combustível que não é utilizado flui para o divisor, onde é bombeado para fora e reciclado.

### 3.2.1.8.6 – Células quentes

O complexo das células quentes (*hot cell*) é necessário para fornecer um ambiente seguro para reparar, renovar ou eliminar os componentes que estiveram em contacto com

os neutrões resultantes da reação ou também para os componentes que sofreram a contaminação por berílio, pó de tungsténio ou trítio.

Para realizar a descontaminação de trítio, os materiais são introduzidos numa câmara confinada que contém sistemas de análise para minimizar as emissões e resíduos. Todos os resíduos são tratados, embalados e armazenados temporariamente no complexo das células quentes antes de serem entregues às autoridades francesas.

#### 3.2.1.8.7 - Sistema de refrigeração a água

Os sistemas do *Tokamak* irão produzir em média cerca de 500MW de calor durante um ciclo do plasma e mais de 1000MW durante a fase de queima do plasma. É portanto necessário extrair o calor dos componentes que estão sujeitos a estas temperaturas. O ITER vai utilizar o sistema de remoção de calor em que o calor que o reator liberta é transportado pelo sistema de água de arrefecimento do *Tokamak* para um componente intermédio para depois ser guiado para as torres de arrefecimento, onde termina o processo. É neste local que é adicionada água vinda do canal Provence, para continuar o processo de arrefecimento. Por outro lado, a água que sai do sistema, passa numa série de bacias de controlo, onde é testada tendo em conta os parâmetros de controlo, como a temperatura (máx.:30°C), pH, presença de hidrocarbonetos, cloretos e trítio. Apenas a água que preencha estes critérios rigorosos estabelecidos pelas autoridades locais é libertada para o rio Durance. Durante as operações, o fluxo combinado de toda a água em circulação no sistema de arrefecimento é de aproximadamente 33m<sup>3</sup>/s que flui através de tubos com diâmetro nominal de 1,6m.

#### 3.2.1.8.8 - Tritium Breeding

Como referido anteriormente, o trítio e o deutério vão ser utilizados para abastecer a reação de fusão no ITER. Mas, enquanto o deutério pode ser extraído da água, o fornecimento de trítio é mais limitado e complexo (atualmente estimado em 20kg em todo o mundo). Para resolver este problema, o ITER vai produzir o seu próprio trítio, com a interação dos neutrões que escapam do plasma com os módulos de lítio contidos na cobertura. Para produzir 800MW de energia, uma central de fusão nuclear necessita de cerca de 300g de trítio. Este é um aspeto determinante do ITER como reator experimental porque espera-se que venha a servir de modelo para as futuras centrais comerciais, uma vez que irá proporcionar um ambiente de fusão real para testar os protótipos de cobertura reprodutores de trítio (*Test Blanket Modules*).

### 3.2.2 - Tokamak – Funcionamento

O funcionamento do *Tokamak* pode ser visto na figura 20 que passamos agora a descrever em pormenor. Para se iniciar o processo de fusão nuclear no ITER, é necessário criar vácuo através de bombas mecânicas e de bombas criogénicas, tanto na câmara de vácuo como no crióstato. Seguidamente são ligadas as 80 bobinas que constituem o campo magnético toroidal e é injetada a mistura de deutério e de trítio em forma de gás com baixa densidade [1.1]. Concluídos estes dois passos, o solenoide central é ligado [1.2], e ao ser percorrido por eletricidade produz tensão no gás dentro da câmara que quebra as ligações entre os eletrões e os átomos, transformando-os em iões que formam uma sopa de partículas, o chamado plasma [1.3]. Para o plasma se expandir e preencher a totalidade do *Tokamak*, são ligados os ímanes que constituem o campo magnético poloidal e à medida que isso acontece, a sua temperatura aumenta até a um máximo de 10 milhões de graus Celsius [1.4]. Para aumentar ainda mais a temperatura, são ligados os feixes de neutrões e micro-ondas e lançados átomos de deutério para que se atinja temperaturas em torno dos 100-200 milhões de graus Celsius, quente o suficiente para que o deutério e o trítio se fundam [1.5]. A fusão nuclear D-T, produz neutrões de alta energia, que vão colidir com a cobertura aquecendo-a e produz também partículas de hélio que depositam a sua energia de novo no plasma, o que o mantém quente. A cinza<sup>5</sup> resultante da fusão dos elementos vai sendo forçada a sair para o divisor [1.6]. A pequena distância que existe entre a temperatura extrema do plasma e a temperatura em torno do zero absoluto dos ímanes vai ser o maior gradiente de temperatura conhecido no universo [1.7].

Para manter a temperatura do plasma é necessário que ele seja alimentado constantemente com as pastilhas D-T e o combustível que não é consumido é extraído pelo divisor e injetado de novo na câmara [1.8].

---

<sup>5</sup> A cinza da fusão nuclear, é relativa à partícula alfa (hélio) produzida depois da reação D-T, embora que fisicamente não se assemelhe a cinza. Tem esse nome, porque depois de ser produzida e de transferir a sua energia para o plasma, não terá qualquer uso prático.

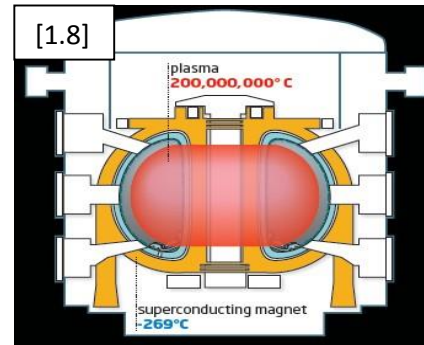
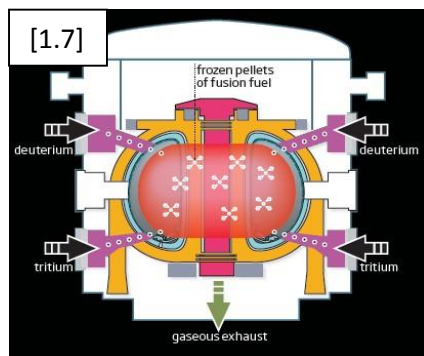
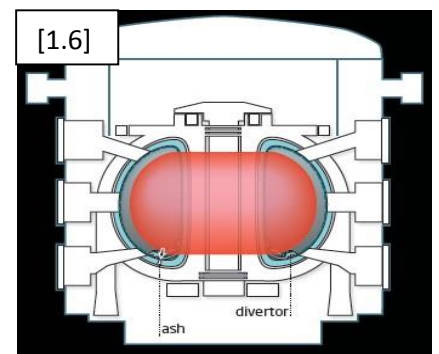
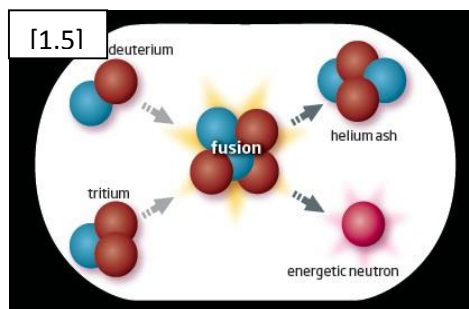
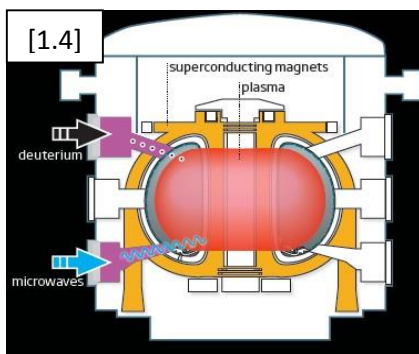
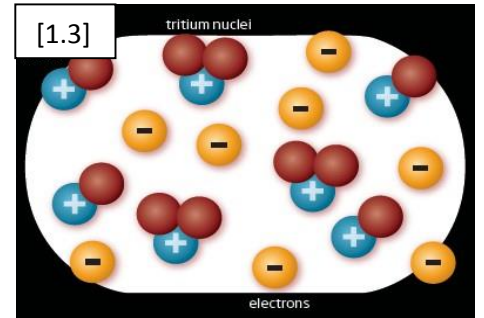
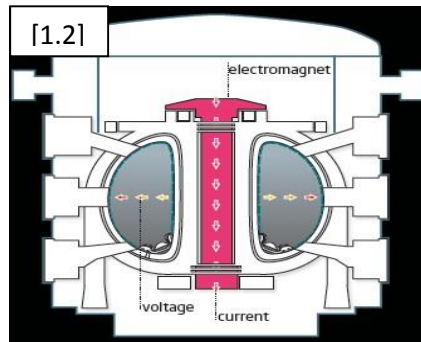
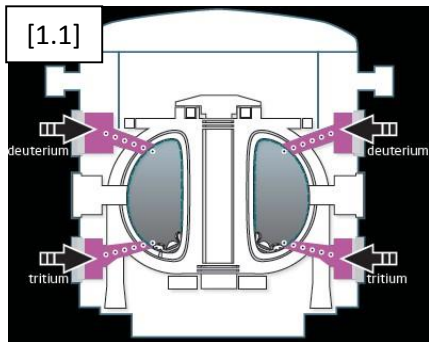


Figura 20 - Processo de fusão no ITER.

# Capítulo 4

## Confinamento Inercial

*Neste capítulo é feita uma explicação de toda evolução dos reatores de confinamento inercial, bem como a exposição do processo e das características do reator do National Ignition Facility.*



## 4 - Confinamento Inercial

### 4.1 - História

A ideia do CI, teve início com o desenvolvimento do laser “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” em 1958, quando Arthur Schalow e Charles Townes publicaram um artigo na *Physical Review* sobre *optical masers* “*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”, que é um aparelho que produz ondas eletromagnéticas (micro-ondas no caso do *maser* e luz visível no caso do *laser*) através de emissão de radiação devida a transições de elétrons entre camadas eletrônicas, radiação esta posteriormente amplificada. Este artigo levou Theodor Mainman a construir o primeiro laser operacional nos laboratórios *Hudge Research* em 1960. Para esse fim, utilizou um rubi sintético para passar as ondas eletromagnéticas produzidas através do *maser*, de um nível de energia superior para um nível inferior (*gain medium*<sup>6</sup>) [11].

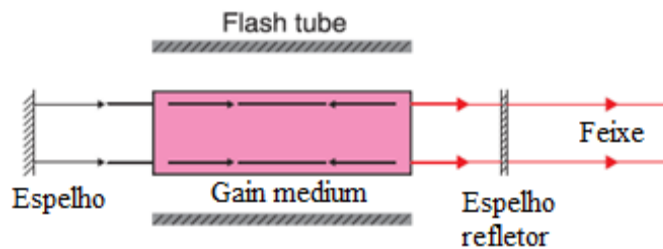


Figura 21 - Esquema do sistema de laser.

Para produzir o laser é necessário que exista um *gain medium*, onde as moléculas são excitadas de um estado de energia normal (*ground state*) até um estado mais energético (*metastable state*). Quando o *flash tube* está carregado emite uma luz intensa e os fótons que daí resultam que tenham o comprimento de onda adequado podem excitar os elétrons, que a partir de um determinado ponto são induzidos a decair num processo chamado *stimulated emission*. Um único fóton criado pelo *flash tube* é responsável pelo decaimento de um elétron excitado, que por sua vez produz um segundo fóton, que estão em fase e com a mesma direção que os fótons iniciais. A estrutura para a criação do laser comporta dois espelhos colocados nas extremidades do tubo para formar uma cavidade de ressonância, que pode modificar o comprimento de onda dos fótons, quando se altera a

---

<sup>6</sup> *Gain medium* é um fator determinante no laser já que permite mudar a sua frequência. Para funcionar, é excitado por uma fonte, que podem ser por exemplo lâmpadas.

distância entre os dois espelhos. Os fótons são refletidos de um lado para outro, até que todos os elétrons tenham decaído, isto tudo em nano-segundos. Os primeiros lasers produzidos situavam-se na zona do infravermelho, mas com os desenvolvimentos tecnológicos, foi possível também chegar aos comprimentos de onda na zona do visível, ultravioleta e raios-X [1].

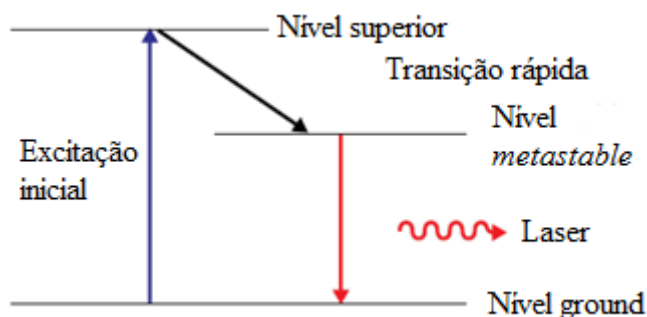


Figura 22 - Níveis de energia dos átomos, que produzem laser em dois processos (excitação e decaimento).

O passo seguinte que conduziu à utilização do laser na fusão nuclear deu-se em 1963 quando Nicolai Basov e Alexandr Prokhorov, físicos no *Lebedev Institute* em Moscovo, conseguiram atingir a fusão nuclear fazendo incidir um laser num pequeno alvo. Imediatamente se concluiu que a potência dos lasers era ainda bastante fraca o que levou a um rápido desenvolvimento tecnológico com vista a criação de lasers mais potentes. Em 1972 foi dado um passo essencial nessa evolução descrito num artigo publicado na revista *Nature* por John Nuckolls e colaboradores do *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), onde relatam as linhas de orientação para poder atingir a fusão nuclear. Um mega Joule (1MJ) era a energia necessária para que os lasers conseguissem aquecer e comprimir as cápsulas de combustível, dentro de *Hohlraum*<sup>7</sup>, construídas a partir de metais pesados, como o ouro. Para tal, eram usados pequenos pedaços de vidro que continham um elemento raro, o neodímio (Nd) para amplificar o feixe de infravermelho (IR). Quando os lasers entravam nas cavidades da cápsula eram transformados em raios-X por interação com a primeira parede interior da cápsula. Os raios-X conseguem um maior poder de penetração e também anulam as possíveis irregularidades dos feixes de laser, embora se perca alguma energia nesta transformação ela é compensada pelo melhor aquecimento. Esta técnica é conhecida como *indirect drive*,

<sup>7</sup> É uma cavidade ou área oca, onde as paredes estão em equilíbrio com a energia radioativa do interior. É usado nas experiências de *indirect drive*, para proteger a cápsula de combustível.

que contrasta com o *direct drive*, em que os lasers são apontados diretamente para a cápsula [1].

Iniciaram-se então as construções dos primeiros lasers no *Lawrence Livermore National Laboratory* a fim de estudar as condições do CI a partir de uma cápsula de combustível D-T. A breve cronologia desta construção é:

- Laser *Janus*, em 1974, com dois feixes infravermelhos e espelhos de neodímio, o laser atingia os 100J.

- Laser *Cyclops*, em 1974, com um feixe, serviu de teste para a construção do laser *Shiva*. Utilizava também espelhos de neodímio.

- Laser *Argus*, em 1976, com dois feixes infravermelhos e espelhos de neodímio. Conseguiu atingir 1kJ, numa cápsula de  $10^{-4}$ m de diâmetro. Foi o primeiro a realizar experiências com raio-X produzidos pela interação dos infravermelhos com as paredes da cápsula (*Hohlraum*).

- Laser *Shiva*, em 1977, com 20 feixes infravermelhos que proporcionavam 10kJ de potência. O reator nunca atingiu a ignição, porque no decurso das experiências realizadas os físicos chegaram a conclusão que a frequência dos infravermelhos não era a mais indicada, pois ao interagirem com os elétrons a temperatura final ótima era atingida antes de se chegar à pressão ótima para à ignição. Para contornar esse facto, foi introduzido um dispositivo para transformar os infravermelhos em ultravioleta ("*Optical Frequency Multiplier*"<sup>8</sup>) à entrada do reator. Os raios ultravioleta são mais energéticos e têm portanto menor comprimento de onda, o que possibilita a ignição do plasma.

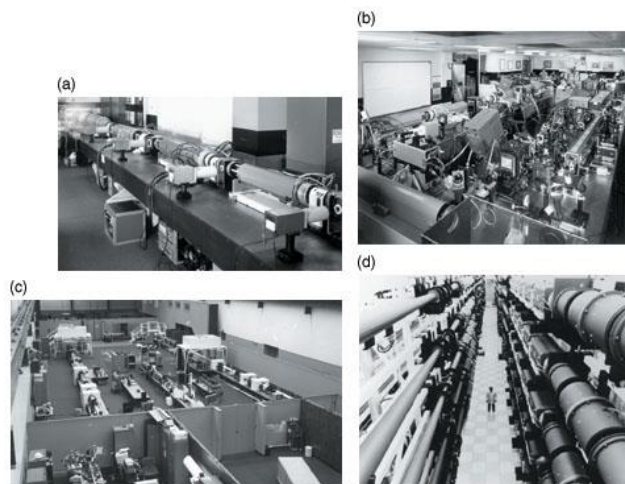


Figura 23 - Quatro lasers: a) Laser Cyclops; b) Laser Janus; c) Laser Argus ; d) Laser Shiva.

<sup>8</sup>Os fótons ao interagirem com um material não linear (KDP - *potassium dihydrogen phosphate*), sofrem um aumento de energia e conseqüentemente uma redução do comprimento de onda.

- Laser *Nova*, em 1984, com 10 feixes de infravermelhos de 30kJ, transformados em ultravioleta quando entram no reator. O rendimento deste laser, ficou aquém do esperado, dando origem a apenas 1013 neutrões por alvo. Isto deveu-se a instabilidades que causavam turbulência quando os lasers entram na cápsula.

[12]

Para a mistura da cápsula ser perfeita, é preciso fazer confluir os feixes em simultâneo na cápsula, para que o calor gerado se concentre num único ponto e proporcione um aumento de temperatura gradual. Caso contrário vários pontos da cápsula são aquecidos muito rapidamente de forma não uniforme, o que desestabiliza o plasma (instabilidades de *Rayleigh – Taylor*<sup>9</sup>). Depois de perceberem isto, os físicos fizeram várias experiências para que a geração seguinte de lasers pudesse ser capaz de atingir os resultados esperados [1].

Em 2009 foi construído no *Lawrence Livermore National Laboratory*, o projeto NIF – *National Ignition Facility*, assente nos desenvolvimentos dos seus antecessores. Os seus 192 feixes proporcionam 1,8MJ de potência e ao contrário dos seus antecessores, o NIF já comprovou que o CI é uma aposta credível para alcançar a fusão nuclear e a próxima geração de centrais nucleares com base na tecnologia CI está já planeada para 2020 com o projeto LIFE. O projeto LIFE assenta na tecnologia desenvolvida para o NIF e o objetivo é estar a produzir energia para a rede 2030 [13].

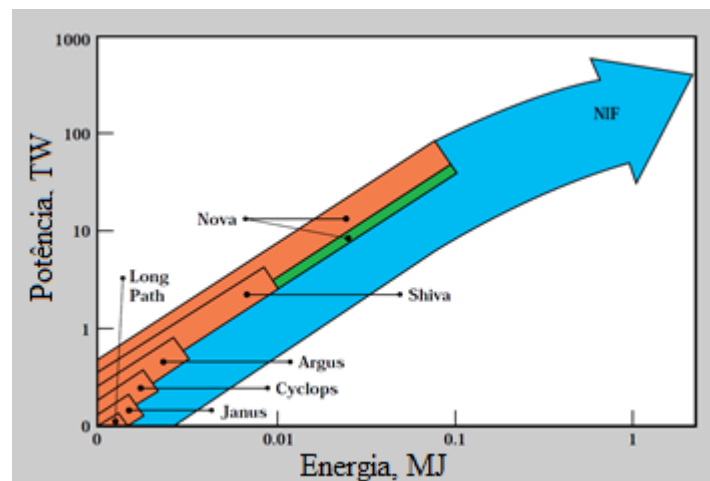


Figura 24 - Energia e pico de potência do NIF comparado com os seus antecessores.

<sup>9</sup> Instabilidades entre dois fluidos com diferentes densidades, ocorre quando o fluido menos denso empurra o fluido mais denso.

## 4.1.1 – Fusão nuclear no confinamento inercial

### 4.1.1.1 – Condição para o confinamento inercial

As condições para o confinamento inercial, são um pouco diferentes das condições expressas no capítulo 2, uma vez que a energia produzida na reação por um impulso do laser tem que superar a energia investida no seu aquecimento. Para isso, adicionamos à equação 1 a duração do impulso ( $\tau$ ), em segundos e a eficiência da conversão da energia ( $\epsilon$ ), ou seja, a eficiência da transformação do aquecimento e produção dos lasers, até ao aquecimento da cápsula. Lawson considerou que toda a reação de fusão iria necessitar de uma eficiência mínima de  $\epsilon \approx 0,33$ . A potência escreve-se agora:

$$P_f = \frac{1}{4} \cdot n^2 \cdot \overline{\sigma v} \cdot k \cdot E \cdot \tau \cdot \epsilon \quad (7)$$

A equação 7 é relativa à potência da reação de fusão, uma vez que utiliza a energia da reação D-T, 17,6 MeV. À equação 2 é retirado o tempo de confinamento e ao igualá-la à equação 7 obtemos:

$$n \cdot \tau = 6,82 \times 10^{-4} \cdot \frac{T}{\overline{\sigma v}} \cdot \epsilon^{-1} m^{-3} s \quad (8)$$

A cápsula é inicialmente comprimida até atingir a densidade e a temperatura correta para a reação, depois o combustível começa a ser queimado e o seu raio,  $r$ , expande-se até 25% do seu tamanho inicial, logo:

$$\tau \approx \frac{r}{4 \cdot v_i} \quad (9)$$

onde o  $v_i$  é a velocidade de expansão da cápsula.

$$v_i = 2 \times 10^5 \cdot T^{0,5} m s^{-1} \quad (10)$$

Ao substituir o valor de  $\tau$  na equação 8 obtemos:

$$\begin{aligned} n \cdot \frac{r}{4 \cdot v_i} &= n \cdot \frac{r}{4 \cdot 2 \times 10^5 \cdot T^{0,5}} > 6,82 \times 10^{-4} \cdot \frac{T}{\overline{\sigma v}} \cdot \epsilon^{-1} (=) \\ (=) n \cdot r &> 545 \cdot \frac{T^{1,5}}{\overline{\sigma v}} \cdot \epsilon^{-1} m^{-2} \end{aligned} \quad (11)$$

Tanto no confinamento magnético, como no confinamento inercial, a temperatura mais provável para a reação é entre os 10 e 20keV, onde  $\frac{T^{1,5}}{\overline{\sigma v}} \approx 2,1 \times 10^{23} keV^{1,5} m^{-3}$  e

$$n \cdot r > 1,15 \times 10^{26} \cdot \epsilon^{-1} m^{-2} \quad (12)$$

A expressão em cima, pode ser escrita em termos de densidade do plasma, com  $\rho = n \cdot 4,18 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$ :

$$\rho \cdot r > 0,48 \cdot \epsilon^{-1} \text{ kg m}^{-2} \quad (13)$$

A equação 13, é a condição de *Breakeven* para o confinamento inercial [1].

#### 4.1.1.1.1 – Compressão da cápsula

Antes da compressão a cápsula tem um raio inicial,  $r_o$  e é comprimida por um fator  $c$ , ou seja,  $r = \frac{r_o}{c}$ . O número inicial de iões D-T por unidade de volume é  $n = c^3 \cdot n_o$  e a densidade do plasma é  $\rho = c^3 \cdot \rho_o$ . Ao substituir estes valores na equação 13 e com a densidade inicial,  $\rho_o \approx 300 \text{ kg m}^{-23}$ , da mistura D-T não comprimida, obtemos:

$$c^3 \cdot \rho_o \cdot \frac{r_o}{c} > 0,48 \cdot \epsilon^{-1} (=) c^2 > 160 \cdot (r_o \cdot \epsilon)^{-1} \quad (14)$$

A compressão necessária de uma cápsula com um raio inicial de 1 mm e com uma eficiência,  $\epsilon = 1\%$ , para alcançar o *Breakeven* é de  $c \approx 13$ , no entanto, devido às limitações da linha do feixe, o valor da eficiência é menor. O tamanho da cápsula é também limitado pelo número máximo de expulsões que podem ser realizadas com segurança numa central elétrica [1].

#### 4.1.1.2 – Métodos para alcançar a fusão

Muito brevemente foi referido anteriormente que existem atualmente duas técnicas para alcançar a fusão controlada no CI que passaremos a descrever agora em mais detalhe. Existe ainda uma terceira técnica, denominada *fast ignition* (ignição rápida) que se encontra em fase de estudo.

A primeira e a mais intuitiva, é a que consiste em apontar diretamente a energia dos lasers para aquecer e comprimir a cápsula de combustível, o chamado *direct drive*. A densidade é extremamente elevada e as colisões duram pouco tempo devido à rápida extinção do plasma. Os lasers são uma peça vital na compressão da cápsula e por conseguinte é necessário fazê-los incidir de forma uniforme em toda a superfície da cápsula, que pelo mesmo motivo tem configuração esférica. A energia e a pressão que os lasers fornecem à cápsula, causam a ablação do combustível e um aumento de temperatura (de baixa densidade) na superfície, que envolve o núcleo de grande densidade com temperatura inferior. Estas duas regiões estão em equilíbrio por estarem sujeitas à mesma pressão. Para que se dê a ignição do plasma, o núcleo da cápsula tem de ter uma

temperatura superior a 5keV, sendo que o produto da densidade pelo diâmetro da cápsula tem de ser superior a  $0,3\text{g}/\text{cm}^2$ . Contudo, alcançar um aumento de temperatura uniforme ao longo da superfície esférica da cápsula é extremamente difícil e tem tido sido alvo de muitos estudos ao longo dos últimos anos. O projeto atual mais importante que usa a abordagem do *direct drive* é o projeto OMEGA na *University of Rochester Laboratory for Laser Energetics*, com 60 feixes de laser. O NIF, foi também desenhado para poder realizar experiências com o *direct drive*, tendo no entanto apostado numa nova técnica que passamos a descrever [14].

Para combater as dificuldades do *direct drive*, foi criada uma segunda abordagem, que utiliza raios-X para aquecer uniformemente a cápsula de combustível. A montagem da cápsula de combustível no *indirect drive* é feita no interior do *Hohlraum*, feita a partir de materiais com elevado número atômico, como o ouro. Os *Hohlraum* podem ser cilíndricos, com duas entradas para os lasers (LEHs – *Laser Entrance Holes*), ou tetraedros (quatro faces triangulares) com quatro entradas. Múltiplos feixes de laser passam através das entradas para interação com as paredes do *Hohlraum* evitando o contato direto com a cápsula. Esta interação cria raios-X que ao contrário do laser aquecem e comprimem de forma uniforme a cápsula de combustível a partir de dentro. Embora esta técnica seja menos eficaz no aquecimento e compressão que o *direct drive*, o enorme benefício de ser mais uniforme, tornou-a na primeira aposta do NIF. Para isso, o NIF teve de construir múltiplos feixes de laser, para combater algumas limitações a nível da simetria na entrada dos lasers na cápsula. Uma outra preocupação que teve de se ter em conta foi a degradação da camada de ouro, que pode alterar as direções dos raios-X e a interação entre o plasma dentro da cápsula e os lasers (*Laser Plasma Interactions* – LPI). Para isso foi introduzido um gás de 80% hidrogénio e 20% hélio no interior do *Hohlraum* para assegurar a integridade da parede e assim assegurar a reação. No entanto, este procedimento aumenta a densidade do plasma dentro do *Hohlraum* que pode levar a interações entre o plasma e o laser. Uma outra particularidade importante foi a necessidade do aumento da potência dos lasers, para superar a distância entre a cápsula e a parede do *Hohlraum*, que pode variar de acordo com as diferentes topologias de *Hohlraum* [14].

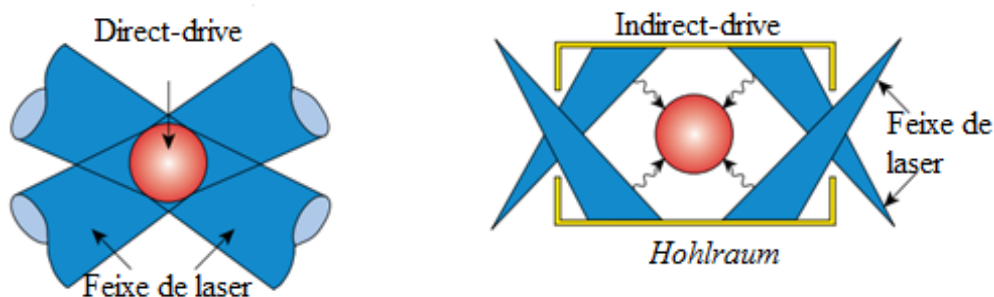


Figura 25 - Comparação entre duas técnicas de interação com as cápsulas de combustível.

A alternativa a estas duas técnicas é a chamada *fast ignition*, que consiste num sistema de dois lasers com diferentes características. O primeiro laser, chamado laser de compressão, deposita a sua energia de centenas de kilo Joule em nano-segundos na cápsula D-T, que causa a impulsão da cápsula de forma diferente. Como a potência do laser é abaixo do mega Joule, a cápsula não entra em ignição, embora que o seu núcleo atinja uma temperatura e pressão elevada. De seguida, o alvo é atingido por um laser de curta duração, na ordem dos pico-segundos, o chamado laser de ignição. Enquanto, os lasers das técnicas anteriores aqueciam as camadas exteriores da cápsula, o laser de ignição, devido a sua grande potência e baixa largura de banda, causa a abertura de um buraco na camada exterior, devido à *ponderomotive pressure*<sup>10</sup>, que alcança  $10^{11}$  bar e um impulso de  $3 \times 10^{20} \text{W/cm}^2$ . Depois de entrar no centro denso da cápsula, o laser excita os eletrões conduzindo a um aumento de temperatura. O laser tem de ter uma potência que garanta que a sua energia vai ser suficiente para aquecer o núcleo até às temperaturas de ignição e também uma duração de acordo com a seguinte igualdade:

$$t_{ei} < t_{laser} < t_d \quad (15)$$

em que o  $t_{ei}$ , é o tempo da junção dos eletrões com os iões (cerca de  $10^{-12}$ s) e o  $t_d$ , o tempo de desintegração da cápsula, isto é, o tempo em que uma onda de som demora a propagar ao longo do núcleo ( $10^{-11}$ s). Isto traduz-se num tempo de laser na ordem dos pico-segundos ( $10^{-12}$ s) [14].

<sup>10</sup> Força que pode aprisionar os eletrões, geralmente é fraca e só aumenta de valor caso a potência do laser aumente

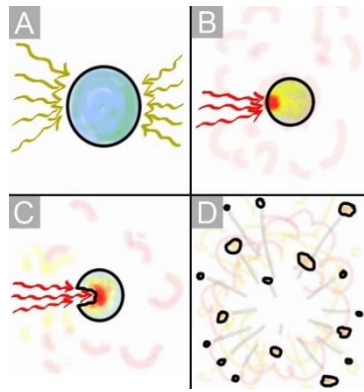


Figura 26 - Passos para atingir a *fast ignition*.

Das três técnicas, a *fast ignition* é a mais recente, sendo que os resultados são promissores e serão certamente alvo de mais estudos e desenvolvimentos no futuro. Se esta técnica for implementada, a potência dos lasers pode ser reduzida com um fator de 10. Isto é significativo, já que diminui drasticamente o tamanho que é necessário para os amplificadores [14].

**NOTA:** *Os dados e características da constituição do reator do NIF, baixo descritos foram obtidos em [llnl.gov](http://llnl.gov) [15]*

## 4.2 - NIF

O projeto teve início em 1990 e ficou concluído em 2008. A construção e o comissionamento deste projeto seguiram caminhos paralelos, enquanto os físicos faziam as operações/experiências para melhorar e aumentar o número de lasers disponíveis no reator, os engenheiros seguiram com a construção das primeiras instalações. O NIF ficou operacional em Março de 2009 e conta com os lasers mais energéticos e mais precisos do mundo.

### 4.2.1 - NIF - Constituição

O NIF tem com cerca de 40000 óticas que orientam, refletem e amplificam os 192 lasers para um pequeno alvo de deutério e trítio. Tem vários sistemas que conduzem e auxiliam as operações e uma linha de feixes que proporciona a potência correta para ocorrer a fusão.

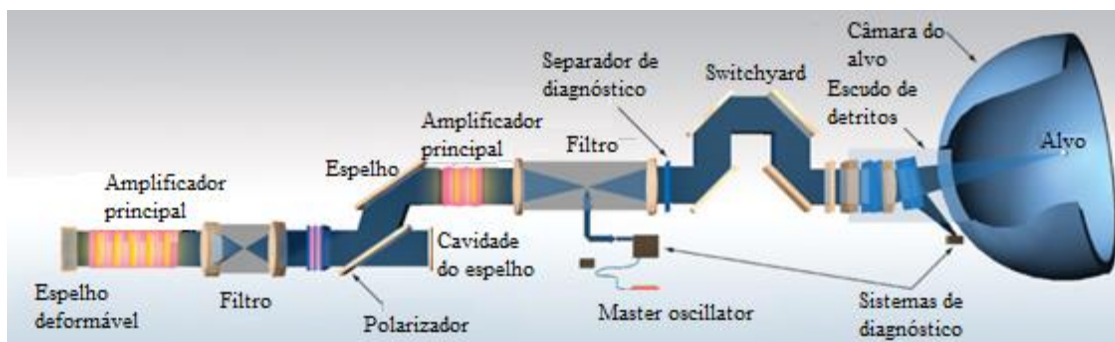


Figura 27 - A linha de feixe do NIF, onde se pode observar o caminho de um dos feixes de laser até à sua chegada à câmara de vácuo.

#### 4.2.1.1 - Laser glass

O *Laser Glass* é o coração do NIF, é o material que amplifica o sinal dos lasers para que fiquem com a energia necessária para realizar a fusão nuclear. Utilizam como *gain medium*, átomos de neodímio (Nd) adicionados ao vidro de fosfato e para reduzir as perdas por reflexão são posicionados num ângulo específico (ângulo de Brewster<sup>11</sup>). Para conseguir produzir a quantidade necessária para o funcionamento do NIF (cerca de 42kg de vidro), foi necessário desenvolver um novo método de produção, numa parceria com *Hoya Corporation* (EUA) e *SCHOTT* (EUA), em que o vidro é produzido continuamente e ao ser arrefecido, é cortado e polido de acordo com as especificações do NIF. Este método, é 20 vezes mais rápido e 5 vezes mais barato do que os métodos tradicionais e apresenta uma melhor qualidade.

Cada linha de feixe contém dois amplificadores (amplificador principal e de potência) que amplificam os 192 feixes de lasers. Os amplificadores estão cercados por lâmpadas, que medem 180cm, e que excitam os átomos de neodímio, para proporcionar um ganho de 1W. Estas lâmpadas são arrefecidas através de gás de nitrogênio que é injetado nos amplificadores.

#### 4.2.1.2 - Interruptor ótico

O interruptor ótico, denominado *plasma electrode pockels cell* (PEPC) que contém um cristal de KDP, é um elemento importante na cadeia de amplificação dos sinais e foi criado pelo LLNL. Este aparelho, juntamente com um polarizador, funciona como um interruptor, que permite aos feixes do laser entrarem na secção de amplificação para

<sup>11</sup> Ângulo de Brewster, é um ângulo para o qual, a reflexão anula completamente a componente paralela da onda em relação ao plano de incidência. Com isso, a onda refletida só tem a componente perpendicular à direção de propagação.

serem amplificados e desta forma, tornar o aumento de energia mais eficiente, pois permite múltiplas passagens pelo vidro de amplificação. Quando o laser obtém a energia necessária para a fusão, o interruptor ótico muda a sua polaridade (configuração normal), o que permite que o laser, já amplificado viaje para o amplificador de potência e de seguida para a câmara de vácuo.

#### **4.2.1.3 - Espelho deformável**

O espelho deformável é uma ótica, que utiliza um conjunto de atuadores para dobrar a sua superfície para compensar os erros das ondas injetadas pelos feixes. Existe um espelho para cada laser e estão localizados depois do amplificador principal. Trinta e nove atuadores estão ligados aos espelhos, que se afastam e aproximam para corrigir as distorções dos lasers, que têm a sua origem nas distorções térmicas, imperfeições dos materiais óticos e aquecimento das lâmpadas dos amplificadores. Com a ajuda destes espelhos, os feixes de laser conseguem alcançar os 100 $\mu$ m, que é menos que o diâmetro de um cabelo humano, o que aumenta o controlo dos feixes e ajuda na sua focagem.

#### **4.2.1.4 - Cristais de crescimento rápido**

O NIF tem 480 óticas, produzidas através de cristais de KDP, que têm uma característica especial que reflete, refrata e separa a luz. Os cristais têm duas funções, rotação de polarização e conversão de frequência. Os cristais KDP são utilizados no PEPC, como visto anteriormente e também para converter os feixes de infravermelhos em ultravioleta. Os 192 feixes de laser passam por 48 sets de óticas, que transformam a seu comprimento de onda de  $1\omega$  na zona de infravermelho para  $3\omega$  de ultravioleta.

As técnicas para o crescimento dos cristais foram melhoradas ao longo da construção do NIF, os cristais que demoravam 2 anos a crescer pela forma tradicional, demoram agora cerca de 2 meses.

#### **4.2.1.5 - Controlo computacional**

Para se alcançar a fusão, os lasers do NIF têm que atingir o alvo num intervalo de bilionésimos de segundos, alinhados a 50 $\mu$ m, com a frequência e intensidade corretas. Para isso são necessários cerca de 60 mil pontos de controlo. Cinco milhões de linhas de código que correm em dois mil computadores tornam possível ao NIF disparar de forma eficaz os lasers várias vezes durante um dia. A sala de controlo do NIF é inspirada na sala

do *National Aeronautics and Space Administration's Mission Control* em Houston, no Texas, nela é observado a amplificação dos lasers, bem como a câmara de vácuo.

#### 4.2.1.6 - Linha de feixes

##### 4.2.1.6.1 - Sistema de injeção de feixes

Para obter um bom rendimento, cada feixe do NIF tem que ser gerado com grande precisão e cada um dos 192 feixes têm que conseguir penetrar no alvo ao mesmo tempo para otimizar a reação de fusão. Para isso, o NIF utiliza o sistema de injeção de feixes (*injection laser system – ILS*), que é responsável por gerar um determinado impulso com uma determinada forma, ajustar a energia dos feixes e também ajustar o tempo que cada feixe demora a chegar ao alvo. O sistema, engloba um *master oscillator room* (MOR), 48 módulos de pré-amplificação (PAM), 48 *inputs sensor package* (ISP) e 24 sistemas de transporte de pré-amplificação (*pre amplifier beam transporte system - PABTS*):

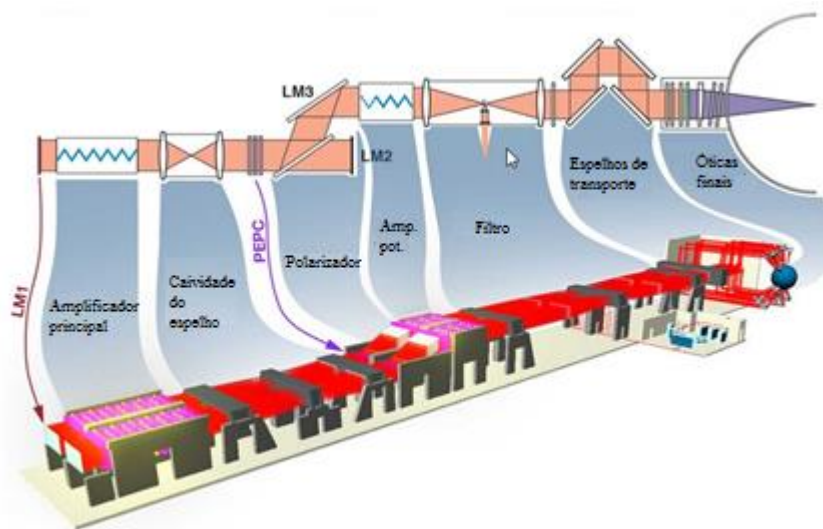


Figura 28 - Uma das duas linhas de feixes presentes no NIF.

- Os impulsos dos feixes do NIF são criados no MOR através de um sistema de fibra ótica, onde é gerado um impulso com poucos nano-Joules e com um diâmetro de poucos micrómetros. Depois de ser criado é dividido e amplificado, repetidamente, com a ajuda de filtros (separadores e amplificadores) a fim de criar 48 feixes que serão moldados de acordo com as experiências a realizar.

- Os PAMs englobam duas etapas de amplificação. Na primeira, a energia dos impulsos é amplificada de 750pJ até aos 15mJ, com um fator de amplificação de 20 milhões. Na

segunda etapa, os impulsos são amplificados e moldados com um fator de 10 mil. Os PAMs realizam as seguintes moldagens:

- *Spatial shaping* que torna o feixe “quadrado” mais intenso nos limites (*edges*) para compensar o elevado ganho no centro dos amplificadores;
- *Spectral shaping e beam smoothing*, para eliminar pontos quentes e pontos escuros, através de mudanças rápidas nos comprimentos de onda nos feixes.
- *Temporal shapping*, para garantir que o feixe dos lasers chega com a energia necessária ao alvo.

A energia de output dos PAMs pode variar entre 10mJ e os 10J.

- Os ISPs alinham os PAMs e o sistema principal de lasers, medem a energia de saída dos PAMs, bem como o perfil e a forma dos feixes. Devido à falta de *inputs* durante o processo de transporte, a energia de saída dos PAMs tem de ter um determinado valor para causar a ignição do alvo. Para isso é usado um foto díodo que mede a energia dos PAMs num curto espaço de tempo a fim de garantir o valor correto.

- O par de feixes produzidos em dois PAMs é dividido em quatro feixes no PABTS, que consegue ajustar o rácio de separação (percentagem de luz nos quatro feixes) e também, através de espelhos, consegue alterar a distância que cada feixe percorre.

#### 4.2.1.6.2 - Amplificadores

Cada linha dos 192 feixes tem duas secções de amplificadores, o amplificador principal e o amplificador de potência, que têm a função de controlar as características espacial, espectral e temporal dos lasers. São responsáveis pelo aumento da energia dos lasers, através da interação dos átomos de neodímio presentes do vidro, que transferem a sua energia em forma de fótons para os feixes.

#### 4.2.1.6.3 - Sistema criogénico

O arrefecimento do alvo e da mistura D-T é feito através do sistema criogénico, que mantém a temperatura em torno dos 18K (-255°C) e proporciona a estabilidade mecânica para colocar o *Hohlraum* no centro da câmara de vácuo num curto espaço de tempo, com uma precisão de 10µm.

#### 4.2.1.7.4 - Óticas finais

As óticas finais (*final optics assemblies* - FOAs) são os últimos elementos do sistema de feixes e os primeiros na zona da câmara de vácuo. Cada FOA contém quatro módulos

de óticas que incorporam os sistemas de focagem, de condicionamento do feixe, conversores de frequência e diagnóstico de amostras.

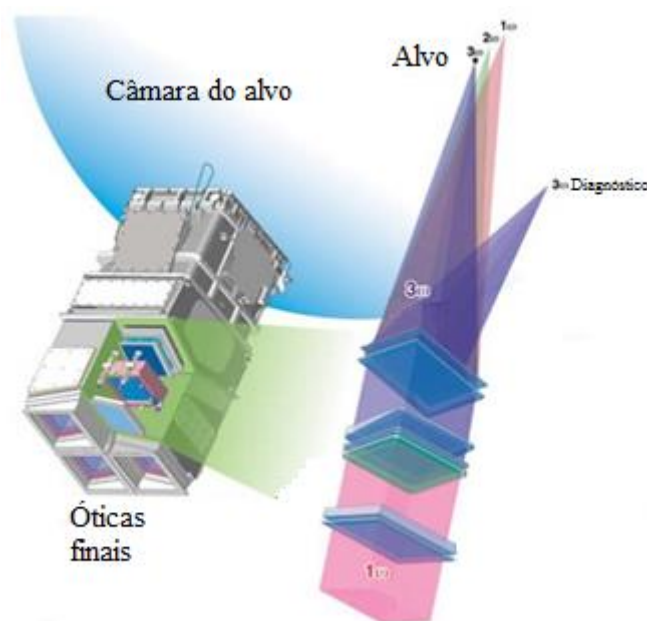


Figura 29 - Esquema das óticas finais do NIF.

Os 192 feixes estão ligados à câmara de vácuo em grupos de quatro através de 48 FOAs, que estão distribuídos nas partes superior e inferior da câmara, para promoverem a correta e simétrica orientação dos feixes. Através de pequenos ajustes nos espelhos finais, é possível apontar os feixes para diferentes localizações dentro do *Hohlraum* para promover uma variedade de experiências.

O neodímio do NIF gera uma onda com 1053nm ( $1\omega$ ) na zona do infravermelho, mas, como visto anteriormente, a fusão via CI é mais eficiente quando se usa uma onda de ultravioleta com 351nm ( $3\omega$ ). Para fazer essa alteração, o feixe de infravermelho passa por dois cristais de KDP. O primeiro altera o seu comprimento de onda para 527nm ( $2\omega$ ) que é uma onda visível verde, já o segundo cristal, mistura a sua radiação com o que resta da radiação infravermelha, para produzir a onda ultravioleta de 351nm ( $3\omega$ ).

#### 4.2.1.7.5 - Alvo

Os alvos utilizados no NIF são desenhados e fabricados de acordo com valores pré conhecidos de densidade, concentração e suavidade da superfície da cápsula. Os valores extremos de temperatura e de pressão durante as experiências, tornam a cápsula vulnerável se existirem quaisquer imperfeições no fabrico das mesmas. Como resultado, as cápsulas têm que ser mecanicamente fabricadas com uma precisão de micrómetros e

algumas das suas ligações não podem exceder os 100nm. As cápsulas de 1,1mm de raio, são ocas, dentro de um cilindro (*Hohlraum*) de 5mm de diâmetro. A cápsula tem uma proteção exterior chamada *ablator*, que não só proporciona proteção térmica, como faz com que a cápsula só se desintegre quando a reação de fusão atinga a ignição. Para isso é constituída por várias camadas de materiais resistentes, como o berílio, cobre, Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) para protegerem o combustível solido a 18,3K de deutério e trítio (que pode incluir 0,75% de hidrogénio), que é em gelado para reduzir a densidade do gás dentro da cápsula (0,3mg/cc). Ao utilizar uma camada de gelo é necessário ter em conta a sua rugosidade, pois se tiver muito relevo irá provocar instabilidades de Rayleigh-Taylor, logo foi necessário limitar a espessura do gelo para menos de 1mm, para que se consiga um bom desempenho.

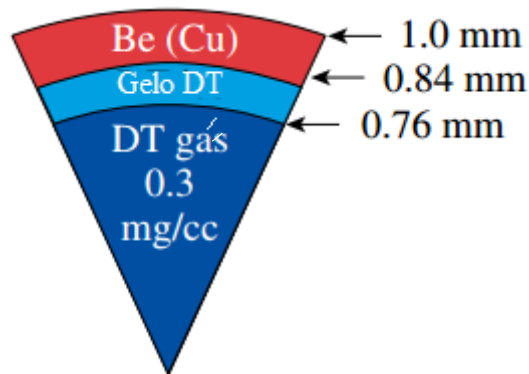


Figura 30 - Camadas no interior da cápsula da técnica indirect-drive.

Nas experiências do NIF é usado um tubo para encher a cápsula com o combustível (em mais ou menos 30 mins), por já se encontrar dentro do *Hohlraum* na câmara de vácuo, só depois é que o sistema criogénico arrefece e cria a camada de gelo. Os estudos feitos sugerem que o tubo não irá influenciar as impulsões da cápsula, embora que no processo de enchimento possa criar uma assimetria térmica, o que leva a uma variação na espessura do gelo à volta do tubo (geralmente uma espessura maior, já que a temperatura do tubo é menor) [16].

Já na superfície da cápsula, o NIF desenvolveu várias técnicas pioneiras de polimento para a manter extremamente lisa, que podem remover ou reduzir imperfeições menores que 150nm. Este aspeto é muito importante, dado que, as partículas superiores a  $5\mu\text{m}$  de diâmetro que se encontrem dentro da cápsula podem interferir com o aquecimento e compressão do combustível, o que inviabiliza a reação de fusão.

#### 4.2.1.7.6 - Câmara de vácuo

Quando os 192 feixes chegam à câmara de vácuo depositam mais de 500 trilhões de Watts em 20 microssegundos. Para poder extrair toda a informação vital para a pesquisa da fusão, a câmara de vácuo é rodeada por sistemas de diagnóstico, que examinam em cada minuto a chegada dos lasers e a sua interação com o alvo. A estrutura da câmara é constituída por betão, com 30m de altura e 30m de diâmetro. Já a câmara de vácuo, tem 10m de diâmetro e é constituída por painéis de alumínio com 10cm cada, revestidos por uma camada de boro com uma espessura de 0,3m, para absorver os neutrões da reação de fusão. Os feixes entram na câmara em grupos de quatro chamados *quads*, cada dois *quads* forma um *bundle* e cada seis *bundles* forma um *cluster*. Quatro *clusters*, dois em cada lado da câmara, englobam os 192 feixes de lasers do NIF.

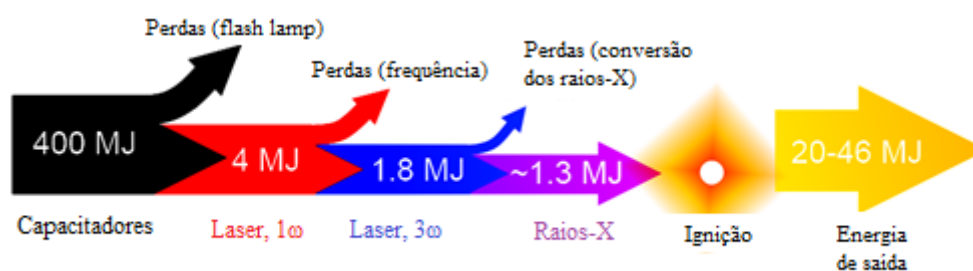


Figura 31 - Variação da energia quando o comprimento de onda dos lasers é alterado e energia após a reação de fusão.

#### 4.2.2 - NIF – Funcionamento

Os 192 feixes de lasers percorrem cerca de 1500m, do *master oscillator*, onde são criados, até ao centro na câmara de vácuo, onde interagem com a mistura D-T. Do início até ao fim, a energia total dos lasers passa de poucos nano-Joules até 4MJ. O *master oscillator* gera um impulso, muito pequeno e com pouca energia, que pode variar entre os 100ps até os 25ns. Este impulso com pouca energia é então conduzido e separado através de fibras óticas para os 48 módulos de pré-amplificação, para se iniciar a primeira amplificação e condicionamento. Depois deste primeiro processo, os feixes são divididos em quatro para serem injetados nos 192 sistemas de amplificação que contêm o amplificador de potência, onde acontece a primeira amplificação. No amplificador principal, os PEPC fecham o circuito à volta dos 11 sets de vidro de amplificação, o que proporciona um melhor rendimento a toda a instalação do NIF, sem eles, o NIF teria de ter mais 230m para realizar a amplificação necessária. Depois de passarem quatro vezes

pelo amplificador principal, os feixes passam novamente pelo amplificador de potência antes de aumentarem a velocidade até atingirem o alvo. Enquanto os feixes vão sendo amplificados, os espelhos deformáveis asseguram a qualidade dos mesmos, monitorizando a sua uniformidade e suavidade [17].



Figura 32 - Complexo do *Nacional Ignition Facility*, que acolhe o maior e mais energético laser do mundo. Pode-se observar também a câmara de vácuo

#### 4.2.2.1 - Potência das lâmpadas

Depois do *master oscillator* gerar o impulso inicial, mais de 7500 lâmpadas de dois metros de comprimento são ligadas através de grandes condensadores, com o objetivo de fornecer energia aos átomos de neodímio no vidro de amplificação, para que, quando os lasers deixarem os pré amplificadores, os amplificadores seguintes estejam já com a potência correta para realizarem a amplificação. O complexo sistema de espelhos, conhecido como *switchyards*, reajusta os 192 lasers para uma configuração esférica para que os lasers possam ser focados para o centro da câmara de vácuo. Este complexo é bastante robusto, pois tem de ser capaz de lidar com as vibrações e ainda assim manter os seus equipamentos operacionais. Depois de ajustados, os lasers de infravermelhos são convertidos em ultravioleta e são focados novamente para poderem entrar nas melhores condições na câmara de vácuo.

#### 4.2.2.2 - Cápsula

A interação dos lasers com a cápsula é realizada de modo indireto (*indirect drive*), que como visto anteriormente acarreta vários fatores que influenciam o comportamento do plasma. Um deles é o aquecimento feito por parte dos raios-X, que será limitado por forma a diminuir tanto as instabilidades de Rayleigh-Taylor como as instabilidades hidrodinâmicas (dinâmica de fluídos). Os limites foram fixados, com um limite inferior,

quando a potência é menor e as instabilidades Rayleigh-Taylor são menores e com um limite superior, quando a potência é maior e as instabilidades hidrodinâmicas são menores. Posto isso, o valor da potência do laser foi em parte calculado para balancear estas duas instabilidades, estando as temperaturas do raio-X entre os 250eV e os 350eV.

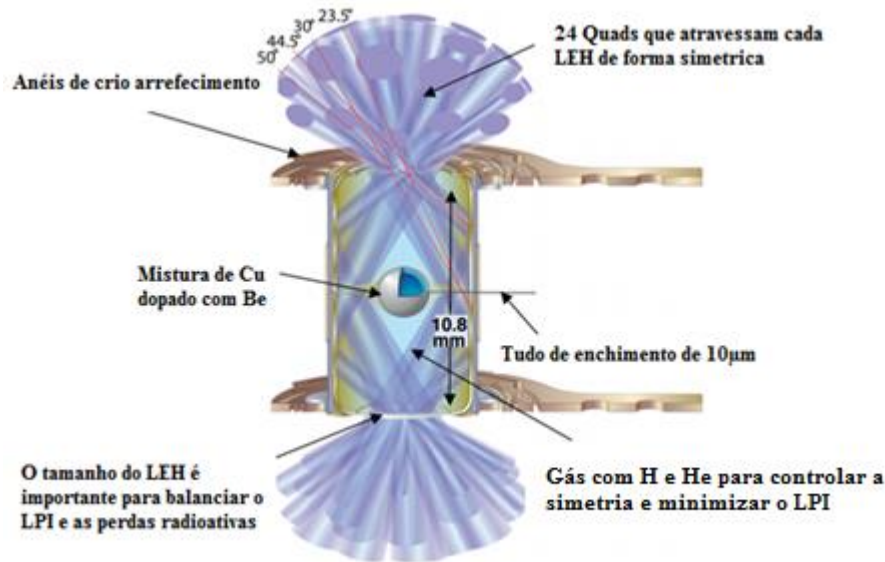


Figura 33 - Ilustração do Hohlraum utilizado no NIF.

Os lasers UV quando entram na cavidade (LEH) do *Hohlraum*, vão interagir com a camada de ouro presente na parede interior [2.1], o que cria um “banho” de raios-X, com a duração de  $10 \times 10^{-9}$  s [2.2]. Estes raios-X aquecem muito rapidamente a cápsula, até causarem o *blowoff* da mesma em  $15 \times 10^{-9}$  s. Depois dá-se a compressão da camada de combustível durante  $17 \times 10^{-9}$  s, que faz aumentar a pressão no interior da cápsula para assim criar o *hot spot* [2.3] onde a temperatura chega aos 100 milhões de graus Celsius. Neste ponto a energia cinética começa a ser transformada em energia térmica, a reação de fusão acontece e o combustível é queimado antes que o *Hohlraum* se desintegre - o que acontece em  $20 \times 10^{-9}$  s [2.4]. Ao retirar a energia dos núcleos atômicos, o NIF espera produzir 10 a 100 vezes mais energia do que a necessária para iniciar a reação de fusão.

Em comparação com a gasolina, um litro de água pesada gera tanta energia, como 7,5 milhões de litros de gasolina, e é neste ponto que o NIF espera ter maior trunfo para que as futuras centrais energéticas via fusão nuclear sejam bem aceites pela comunidade.

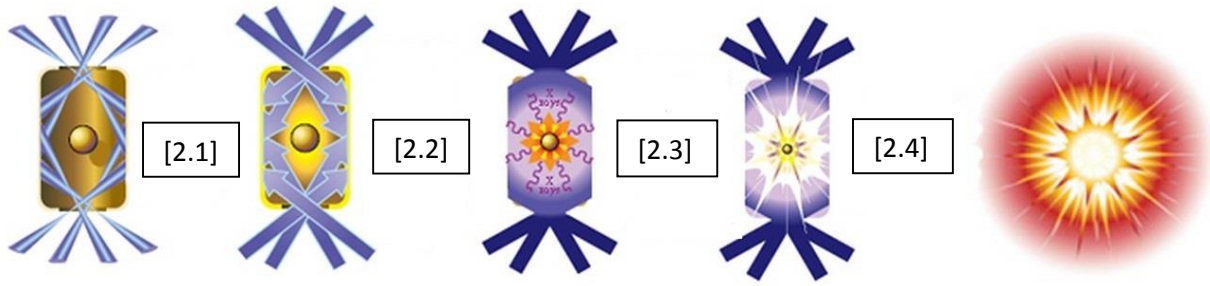


Figura 34 - Processo de fusão, desde o aquecimento das paredes do *Hohlraum* até à ignição do combustível nos 100.000.000°C. Este processo demora cerca de  $66 \times 10^{-9}$  s a ser concluído.



# Capítulo 5

## Confinamento Magnético e Inercial

*Neste capítulo é feita a comparação entre os dois confinamentos, onde se mostra os principais problemas a que cada um é sujeito, bem como se expõe os problemas ligados à fusão nuclear.*



## 5 - Confinamento Magnético e Inercial

### 5.1 - Viabilidade económica

Como todas as novas tecnologias, a fusão nuclear irá necessitar de estudos que comprovem o seu valor, sendo a viabilidade económica um dos mais importantes. Sem gerar receitas (lucro), a fusão nunca se irá afirmar no mercado mundial de energia.

#### 5.1.1 - Preço da eletricidade

O saldo final é contabilizado ao relacionar o preço por kWh que a eletricidade terá à saída da central, com os custos fixos iniciais, como os custos de construção e investimento inicial, os custos de operação e os custos externos, que podem variar consoante o nível de poluição, os acidentes e o lixo que a central produz.

Através da seguinte equação, obtemos os custos da eletricidade (COE – *Cost of electricity*):

$$COE = \frac{\sum_t (C_t + OM_t + F_t + R_t + D_t) \cdot (1 + r)^{-1}}{\sum_t E_t (1 + r)^{-1}} \quad \left[ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (16)$$

onde, o  $C_t$  é o capital inicial, o  $OM_t$  os custos de operação e manutenção, o  $F_t$ , o custo do combustível, o  $R_t$  o custo associado aos componentes substituídos durante a operação do reator, o  $D_t$  os custo de descomissionamento, o  $E_t$  a energia e por fim o  $r$  que simboliza a entrada de capital com a venda da eletricidade, logo é visto como um desconto [18].

Os índices acima descritos podem ainda ser incluídos em três grupos:

-O capital inclui o capital inicial, os custos de preparação, construção e comissionamento da central nuclear, os custos associados aos trabalhadores, às matérias-primas utilizadas e aos sistemas que suportam a construção (geradores, ventiladores, telecomunicações, etc). Para ser comparado com outras centrais de energia, o capital inicial tem de ser relacionado com a potência da central (€/kWh) e pode ser calculado tendo em conta o custo de financiamento, ou seja, se o custo de financiamento for incluído, o capital inicial aumenta em relação ao tempo que demora a construção e se não for, é como que a central fosse construída instantaneamente, com capital inicial fixo.

-Os custos de operação incluem os custos do combustível, os custos de operação e manutenção (O&M), os custos de descomissionamento e os custos inerentes ao depósito

do combustível e do lixo. São calculados tendo em base toda a vida da central e são expressos em €/kWh.

- Os custos externos são geralmente zero, mas pode-se incluir os custos relacionados com acidentes radioativos, que podem em parte ser pagos pelo governo onde a central se encontra.

A fórmula anterior pode ainda ser simplificada em termos de custo (C), potência (P) e tempo de funcionamento (t), para melhor compreensão:

$$COE = \frac{C}{P * t} \left[ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (17)$$

### 5.1.1.1 - ITER

Para testar a fiabilidade do ITER, a *European Power Plant Conceptual Study* – PPCS conduziu um estudo económico para prever o preço do custo da energia. Ao relacionar o investimento (5 biliões de euros) e a potência à saída do reator (500 MW), concluiu-se que o valor vai-se fixar entre os de 0,03-0,10 €/kWh. O custo ainda pode ao final de uns anos ser inferior, uma vez que os planos tecnológicos estão sempre a evoluir e por isso, o custo tende a baixar [18].

### 5.1.1.2 - NIF

O preço de custo da eletricidade para o NIF pode ser encontrado ao achar em primeiro lugar a potência de saída,  $P_{out}$ :

$$P_{out} = E_{pump} * f * \left[ G * \eta_{th} - \frac{1}{\eta_{pump}} \right] \quad (18)$$

Onde o  $E_{pump}$  é a energia injetada em cada cápsula por cada disparo, 1,8 MJ, o  $f$  é a frequência, ou seja, o número de disparos por segundo, que se prevê que se cheguem aos 10 disparos/s, mas neste momento não é possível no NIF (experiências realizadas no outro laser do LLNL, o laser Mercury indicam que será possível num futuro próximo). O  $G$  é o ganho ou o rácio da energia em cada reação e os dois coeficientes,  $\eta_{th}$  e  $\eta_{pump}$ , são relativos ao calor gerado da reação e ao rendimento dos lasers, respetivamente. A geração de calor tipicamente não vai além dos 40%, por isso o  $\eta_{th}$  vai estar entre os 0,3 e os 0,4. As lâmpadas usadas no NIF para excitar o Nd, proporcionam um rendimento de 0,66%, o que é um pouco baixo e para melhorar este rendimento, o laser Mercury está a testar a utilização de díodos para o mesmo efeito e conseguiu atingir os 5% de rendimento [5].

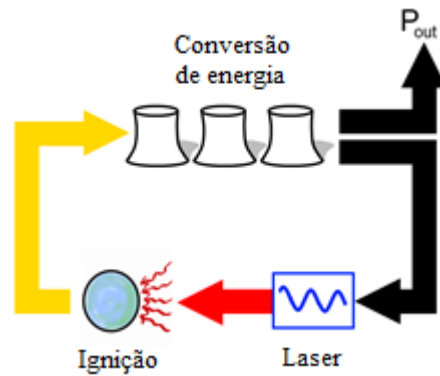


Figura 35 - Ciclo de uma central de fusão de confinamento inercial.

Para que uma central tenha lucro, é necessário que a energia de saída seja maior do que a de entrada, logo terá de ter um ganho positivo. Neste aspeto, o NIF espera ter um ganho maior que 1200, que é um pouco irrealista neste momento. Atualmente com a utilização de lâmpadas, o valor está nos 20, no entanto optando pela utilização de díodos (laser Mercury), o NIF poderá ter um ganho entre 65 a 170.

$$G \geq \frac{3}{\eta_{th} \cdot \eta_{pump}} \quad (19)$$

Ao usar o valor máximo de cada variável chegamos ao valor possível de  $P_{out(max)}$

$$P_{out} = 1,8 * 10 * \left[ 170 * 0,4 - \frac{1}{0,05} \right] = 8640 \text{ MW} \quad (20)$$

Um outro fator para o preço da central é o preço do combustível, o lítio custa cerca de 23€/Kg, a água pesada cerca de 44€/Kg e o deutério 240€/Kg (valores médios no mercado dos EUA. Para o cálculo final, utilizou-se uma estimativa de 30 anos de funcionamento da central, uma potência de 10GW (100% de rendimento) e a nível monetário, para uma central deste nível prevê-se um custo total de 10 biliões de dólares ( $\approx$  9 biliões de euros).

$$COE = \frac{9^9 \text{€}}{10^6 \text{ kW} * (24 * 365 * 30) \text{ h}} = 0,0034 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \quad (21)$$

O resultado é muito otimista, dado que possui valores que podem variar muito e também porque se considerou o rendimento igual a 100%, logo o valor atual seria pelo menos, uma ordem de grandeza maior, ou seja  $\approx$  0,03€/kWh. Este valor pode ser ainda ajustado com as melhorias tecnológicas do CI, dado que 74% dos custos são relativos aos lasers, edifícios para albergar os lasers e a óticas [5].

### 5.1.1.3 – Redução dos custos

Uma parte crucial da fusão é o desenvolvimento contínuo da tecnologia, que permite a redução de custos. Os materiais para a fusão nuclear desempenham neste aspeto um papel importante, já que ao tolerarem melhor as condições da fusão, podem alongar a sua vida útil e assim reduzir os custos de descomissionamento, de operação e manutenção. Dentro dos materiais utilizados nos reatores, aqueles que podem representar essa redução são, a primeira parede, a cobertura e o divisor, pois estão em maior contato com o plasma.

O gráfico da figura 36, relaciona a viabilidade da central e o COE com a fluência dos neutrões, que é diretamente proporcional ao aumento da capacidade da cobertura.

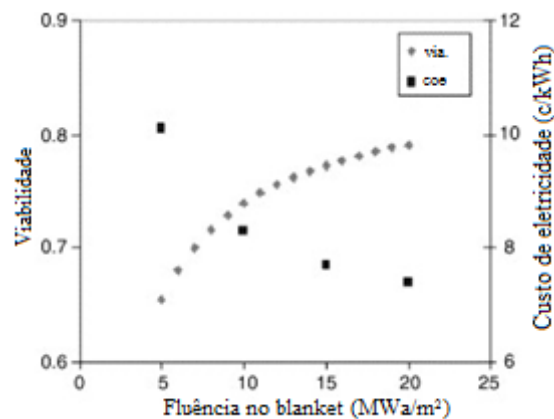


Figura 36 - Relação entre a fiabilidade do reator e o COE, com a fluência dos neutrões na cobertura.

Uma maior capacidade de proteção aos neutrões por parte da cobertura, leva a um aumento de fiabilidade o que diminui o COE. A fluência de neutrões com que a cobertura consegue lidar é essencial que seja maior que 5(MWa/m<sup>2</sup>) e não maior que 20MWa/m<sup>2</sup>, porque a curva tende a estabilizar depois deste valor. Já o divisor terá de ter uma vida útil igual ao superior a 2 anos para poder ter um rendimento aceitável. Para trocar qualquer um destes materiais é necessário que o reator pare de funcionar totalmente, logo é de grande importância melhorar os seus rendimentos [18].

### 5.1.2 – Desenvolvimento da fusão nuclear

O preço do desenvolvimento da fusão nuclear rege-se pelo custo do desenvolvimento de novos materiais e também pelo custo inerente à probabilidade de falha, isto é, a probabilidade de a fusão não conseguir chegar aos resultados que pretendemos e o

investimento cessar. O valor líquido (NPV<sup>12</sup> – *Net Present Value*), é calculado com o valor de todo o investimento menos o valor de desenvolvimento e os valores variam consoante a cotação do mercado energético. Depois de se fazer análise de todos os números, concluiu-se que a fusão nuclear terá um NPV positivo, pois supera os valores de mercado das outras energias e também os próprios valores gastos no seu desenvolvimento, mesmo incluindo a probabilidade de falha. O NPV encontra-se entre os 400 e 800 biliões de dólares, mesmo quando se desconta o valor do desenvolvimento (10 a 20 biliões de dólares) e inclui-se uma taxa de mercado de 10 a 20%. Ao incluir-se a probabilidade de falha, o valor de NPV fica entre os 100 e 400 biliões de dólares, o que indica que se a energia da fusão tivesse uma taxa de mercado de 1% ainda teria lucro.

Uma maneira de aumentar o NPV pode passar pelo aumento do capital investido, pois com mais investimento, o tempo de desenvolvimento pode reduzir. O gráfico da figura 37 demonstra a probabilidade do desenvolvimento ser acelerado em cada fase, construção ou desenvolvimento de novos materiais através de um maior investimento. Até a um certo ponto é possível investir para encurtar o tempo de desenvolvimento, sem retirar valor líquido (NPV).

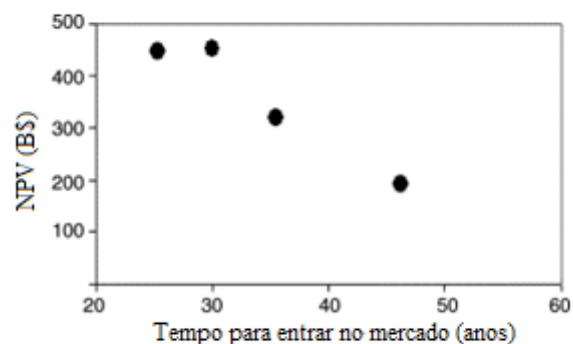


Figura 37 - Impacto do investimento ao longo dos anos.

Embora que para o caso da DEMO<sup>13</sup>, assente em desenvolvimentos agressivos, ou seja rápidos, o investimento adicional não trará nenhum benefício, uma vez que é pouco provável que um grande desenvolvimento seja feito com sucesso num curto espaço de tempo [18].

<sup>12</sup> *Net present value* é definido pela soma dos valores recebidos (ganhos) com os custos num período de tempo.

<sup>13</sup> DEMO, segunda geração a seguir ao ITER, assente nos mesmo pressupostos, mas com desenvolvimentos/melhorias ao nível do rendimento do plasma e dos materiais. A sua construção está prevista para meados de 2030, quando o ITER estiver 100% operacional.

## 5.2 Radiação

A próxima geração de reatores de fusão nuclear (ITER/NIF), irá necessitar de sistemas que sejam capazes de operar, sem interrupções ou falsas leituras em ambientes de extrema exigência tecnológica. A fusão nuclear origina níveis muito altos de radiação, como neutrões, raios gama, iões de altíssimas energias e por vezes estilhaços e detritos da reação, o que influencia de forma decisiva as leituras dos principais aparelhos de diagnóstico e controlo da reação de fusão dentro do reator. No entanto, estas radiações têm diferentes consequências nos dois tipos de confinamentos, começando desde logo pela diferença entre o tempo dos impulsos para a criação do plasma. No CI o impulso é da ordem das centenas de nano-segundos, enquanto que no CM (ITER) é de centésimos de segundo.

### 5.2.1 Semelhanças e diferenças entre o CM e o CI

Embora algumas das fontes que causam danos aos diversos componentes do reator tenham a mesma origem, as suas consequências diferem de tecnologia para tecnologia. O resultado da fusão e dos fluxos de radiação no CI são de natureza cíclica, através de impulsos da ordem das centenas de nano-segundos e têm a sua origem nas partículas alfa (hélio) resultantes da fusão nuclear e nos restos de iões de deutério e de trítio não consumidos na reação. O CM é realizado em condições mais estáveis, com impulsos de grande duração de centésimos de segundos e os fluxos de radiação têm origem nos ELMs e em discontinuidades do plasma. O CM tem um valor de energia depositada superior ao do CI, mas no entanto, os picos de potência no CI superam os do CM, uma vez que os seus iões são mais penetrantes, a energia é depositada mais profundamente, o que causa mais danos nos materiais. A duração dos impulsos e a difusão do calor são também aspetos a ter em conta, para isso, os materiais que suportam os ELMs no CM, são uma boa aposta para o CI, já que podem aguentar o calor originado pelas expulsões, que podem originar ruturas e a fusão de materiais [20].

As radiações que os dois confinamentos estão sujeitos, provem dos raios gama e dos neutrões, que podem danificar os componentes óticos e dificultar a ativação do plasma. O fluxo e a influência dos neutrões é maior no CM, e a dose de raios gama é maior no CI.

Tabela 1 - Diferenças entre as origens das radiações no ITER e no NIF

	CM (ITER)	CI (NIF)
Produto da fusão e radiação	Condições estáveis (impulsos longos)	Natureza cíclica (impulsos)
Radiação (emissões)	i) Edge localized modes (ELM) ii) Descontinuidades do plasma	i) Partícula alfa ii) Detritos de íões D e T não queimados

Esta variedade de fontes de radiações pode induzir alterações físicas nas propriedades dos materiais, com efeito na performance dos sensores, que são influenciados pelas cargas de radiação a que os seus isoladores estão sujeitos, uma vez que podem alterar a condutividade, RIC<sup>14</sup>, o que leva a alteração da carga do sensor (leituras erradas). As radiações podem também provocar falsos sinais, por exemplo, a radiação induzida, EMF<sup>15</sup> pode ocorrer em cabos com isolamento, o que provoca falsas tensões, já nos sistemas óticos, a luminescência pode levar a falsos sinais nas fibras óticas e nas janelas [21].

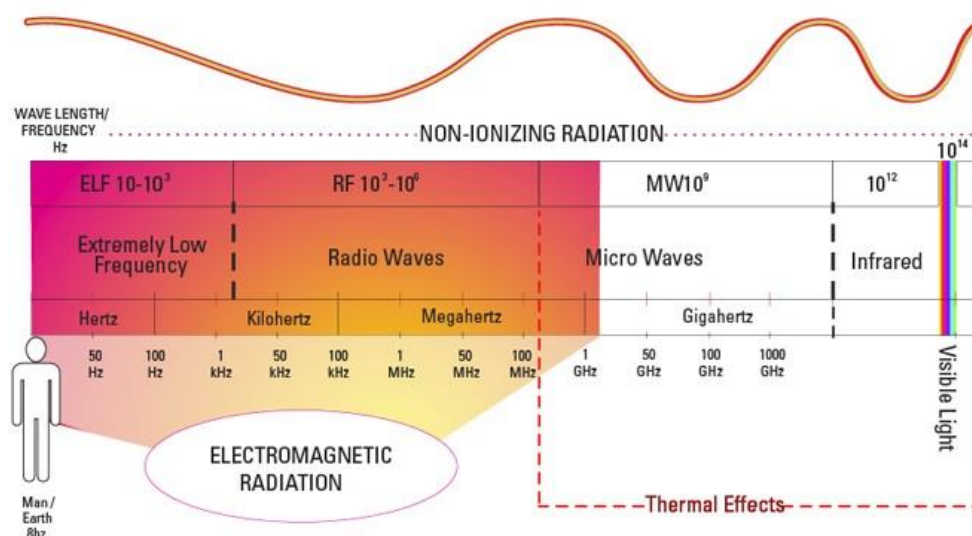


Figura 38 - Espectro de frequência da radiação não ionizante.

<sup>14</sup> Radiation Induced Conductivity, condutividade da radiação induzida. A radiação pode alterar as propriedades físicas dos condutores.

<sup>15</sup> Electromagnetic fields, é um tipo de radiação que toma a forma de onda entre a zona de baixas frequências (>8 Hz) até às micro ondas (<1 GHz)

### **5.2.2 Problemas comuns nos materiais do divisor e na primeira parede “first wall”**

É determinante que se encontrem novos materiais para combater os problemas das radiações, já que os existentes, do ponto de vista termomecânico não asseguram o bom funcionamento quando sujeitos a grandes perturbações. Isto é, perturbações com temperaturas que excedem os 30.000K na superfície, que podem levar a perda de massa e a estragos na estrutura do reator. No caso dos ELMs no CM e da partícula alfa do CI, as temperaturas vão alcançar os 3.000K, perto do limite onde os materiais se fundem e abaixo do limite onde se começam a formar fissuras. A comunidade do CI, tem vindo a desenvolver materiais alternativos que possibilitem o uso de “paredes secas” na câmara do reator, com raio reduzido ( $R < 5-6\text{m}$ ). Estes novos materiais têm de ter uma grande superfície, para assegurar o volume das cargas térmicas intensas e uma boa condutividade em altas temperaturas, para impedir o aquecimento excessivo, devido às limitações de remoção de calor. Para além dos materiais à base de carbono, existe um elemento que até agora tem mostrado bons resultados, o tungsténio, que para o CM é utilizado no divisor e no CI na armadura. No CI, a armadura feita deste material, enfrenta um sério problema devido às vagas de hélio que provocam bolhas de hélio durante a fusão nuclear, o que tem como consequência a exfoliação e o enfraquecimento dos materiais que pode levar a perdas fatais de energia. Este problema também é enfrentado pelo CM e uma maneira de o minimizar, não sendo um aspeto trivial de conseguir, é com o desenvolvimento de materiais porosos, que facilitam a libertação do hélio e de outros elementos leves e também com materiais que se possam regenerar, isto é, nano cristais onde as vagas possam viajar facilmente para os limites do reator para não se formarem grandes aglomerados de hélio. A comparação da tabela 2 é entre o ITER e o Laser Mega Joule (LMJ) construído em Bordéus, França, que apresenta valores da mesma ordem de grandeza do NIF [22].

Tabela 2 - Ambientes de radiação no ITER e no LMJ (números aproximados)

Localização	Radiação	CM (ITER)	CI (LMJ)
Nível de radiação na primeira parede ("first hall")	Fluxo de neutrões	$3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}$	$5 \times 10^{18} \text{ n/disparo}$ ; $1,5 \times 10^{16} \text{ n m}^{-2}$ em 1 ns, equivalente a $1,5 \times 10^{25} \text{ m}^{-2} \text{ s}$
	Fluência de neutrões (fim de vida)	$3 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$	$10^{21} \text{ n/30 anos}$ ; $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$
	Radiação ionizante (raios gama) (Gy/s)	$2 \times 10^3$	$10^{10}$
	Fluxo energético de iões/átomos ( $\text{m}^{-2}$ )	$5 \times 10^{19}$	-
Nível de radiação no primeiro componente da cobertura no CM e no CI	Fluxo de neutrões	$1 \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}$	$5 \times 10^{16} \text{ n m}^{-2}$ em 0,5 ns, equivalente a $10^{26} \text{ m}^{-2} \text{ s}$
	Fluência de neutrões (fim de vida)	$2 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$	$10^{19} \text{ m}^{-2}$
	Radiação ionizante (raios gama) (Gy/s)	$10^2$	$10^{10}$
	Fluxo energético de iões/átomos ( $\text{m}^{-2}$ )	$10^{18}$	-

### 5.2.3 Componentes e materiais para os sistemas de diagnóstico

Os sistemas de diagnóstico são decisivos para a supervivência da reação de fusão, podendo facilitar e minimizar o tempo de atuação para uma determinada falha, logo as duas comunidades têm todo o interesse em juntarem os seus esforços para conseguirem os melhores materiais e as melhores técnicas para esses sistemas. São quatro as áreas mais influenciáveis pela radiação, nomeadamente os componentes óticos (janelas, espelhos e fibras óticas), cabos com isolamento mineral, eletrônica e diagnóstico de neutrões.

Nos componentes óticos, as janelas e os espelhos formam o conjunto mais importante, dado que no CM são responsáveis pelas transmissões de informação para os sistemas de diagnóstico e no IC pela amplificação dos feixes de laser. Para estes materiais o maior problema é a radiação gama e os neutrões e no caso das janelas ainda existe a preocupação da degradação e da contaminação na sua superfície, embora que no caso do CI é também devido à potência dos lasers, mas não vai ser considerado nesta comparação. Os materiais à base de sílica (KU1) aplicados às janelas do CM, demonstram uma boa resistência à

absorção da radiação induzida (RIA)<sup>16</sup> e à luminescência da radiação induzida (RIL)<sup>17</sup>, embora que para ser verdade as janelas tenham de ficar situadas em regiões com baixos raios de radiação ( $<100\text{Gy/s}$ ,  $<10^{-9}\text{dpa/s}$ ), o que requer o uso de refletores dielétricos de grande potência. No caso do CI, os níveis de radiação em cada impulso fazem do RIL um problema, apesar da grande blindagem, neste aspecto os conhecimentos adquiridos pelas duas comunidades trariam efeitos positivos para ambos, uma vez que se as janelas forem corretamente desenvolvidas, podem operar em elevadas temperaturas, em torno dos 600K com o efeito de poder extinguir as emissões e com isso reduzir os níveis de RIA e aumentar o tempo de vida das mesmas. A degradação das janelas no CI é um outro foco de preocupação uma vez que reduz o nível que cada uma suporta os danos dos lasers, o que pode levar à falha do sistema. Este problema já tem uma possível solução, que passa pela utilização de “persianas” que reduzem as emissões e de um sistema que limpa as superfícies das janelas através de impulsos de baixa intensidade, que podem ser benéficos a longo prazo. A colaboração neste aspeto é também importante, pois pode auxiliar na introdução de métodos de deteção *on site* e assim melhorar a resposta dos sistemas [20], [23].

As aplicações mais comuns para as fibras óticas são a transmissão de informação recolhida pelos componentes de medição, no caso do CI, o seu uso proporciona o controlo e a monitorização da performance dos lasers, como por exemplo, a intensidade e sincronismo dos impulsos, no CM, são usadas nos sistemas de diagnóstico dos detetores e sensores de corrente no plasma através do efeito Faraday<sup>18</sup>. Esta vasta gama de aplicações requer que as fibras sejam capazes de suportar as radiações e os comprimentos de onda UV até à zona do visível (para aplicações de sensores) e no limite do infravermelho (para transferência de dados em alta velocidade). A espessura das janelas torna intoleráveis fibras muito longas, pois para grandes comprimentos existe um acréscimo de RIA e de RIL, o que é de evitar, assim a produção das fibras óticas torna-se num ponto vital, pois pode reduzir absorção inicial e a RIA e aumenta o RIL, logo, é

---

<sup>16</sup> Radiation Induced Absorption é uma função da dose de radiação, tanto a ionização com os danos por deslocamento (a radiação pode provocar a migração de lacunas de forma a dar origem quer à recombinação como à formação de defeitos estáveis), produzem uma acumulação de defeitos que levam a absorção de grandes quantidades de raios UV e infravermelho.

<sup>17</sup> Radiation Induced Radioluminescence é uma função da taxa de radiação e é causada pela excitação de uma impureza (defeito) através da produção por ionização, por eletrões ou por lacunas.

<sup>18</sup> Efeito de Faraday é um fenómeno de polarização (medida da variação do vetor do campo elétrico em relação ao tempo) da luz através da relação entre a eletricidade e o magnetismo. Pequenas correntes elétricas que se encontram dentro dos átomos, quando são colocadas em fortes campos magnéticos, tendem a modificar-se o que produz a rotação do plano de polarização.

necessário melhores estratégias para não só combater este aspeto, mas também para combater possíveis falhas na linha de montagem das fibras, pois podem levar a falhas graves. O desenvolvimento por parte do CM em materiais inovadores como a fluorite, a sílica e a adição de hidrogénio para reduzir o RIA, tem vindo a mostrar bons resultados, pois permite um aumento da temperatura de operação, o que leva a menores índices de radiação como no caso das janelas e espelhos. A possível colaboração no processo das fibras pode levar à descoberta, devido às diferentes experiências, de novos e melhores materiais e também a uma melhor parametrização na fabricação das fibras [20].

Em relação aos cabos, os sistemas do CM vão utilizar cabos MI<sup>19</sup>, que são muito robustos, tolerantes à radiação, ideais para aplicações com pouca tensão e frequência e conseguem operar em vácuo e em elevadas temperaturas. No caso do CI e devido aos limites de comprimento de onda dos cabos MI, os cabos a usar são dielétricos com alta frequência, PTFE/CH. Na radiação, o uso de cabos é geralmente associado a três tipos de efeitos de radiação, o RIC, força eletromotriz da radiação induzida (RIEMF<sup>20</sup>) e possivelmente a força eletromotriz da temperatura induzida (TIEMF<sup>21</sup>). Em ambos os confinamentos o RIC é de comum interesse, pois manifesta-se de maneira diferente em estados estáveis e em estados transitórios. A principal preocupação no CM advém da combinação entre tensões e correntes com efeitos térmicos (TIEMF) e no CI da radiação induzida pelos impulsos, em que a sua origem é ainda incerta, mas pensa-se que tenha origem na combinação entre o RIC, o RIEMF e os EMP<sup>22</sup> (impulsos eletromagnéticos). Devido ao prazo de conclusão pretendido pelas duas comunidades ser diferente e às diferenças entre as duas tecnologias, a sobreposição de conhecimentos é limitada, só os estudos para a compreensão dos fenómenos físicos em cada tecnologia são relevantes para uma possível colaboração [24].

Os neutrões e as radiações gama, produzem de modo direto ou indireto, efeitos dentro dos componentes (circuitos) que podem progressivamente com a acumulação da radiação ionizante corromper os sinais analógicos e digitais dos sensores. Este efeito pode ser

---

<sup>19</sup> Mineral-insulated cables, são feitos de barras de cobre dentro de um tubo circular de cobre, em que os espaços são preenchidos por óxido de magnésio em pó seco inorgânico.

<sup>20</sup> Radiation Induced Electromotive Force, é a força eletromotriz provocada pela radiação, que afeta os sistemas de diagnóstico e cabos.

<sup>21</sup> Temperature induced Electromotive Force, é a força eletromotriz provocada pela temperatura, que destrói os cabos de diagnóstico.

<sup>22</sup> Electromagnetic pulse, é uma pequena explosão eletromagnética, que pode ocorrer em forma de radiação, campo elétrico ou magnético, dependendo da fonte.

criado a partir de uma simples partícula ionizante, SEE<sup>23</sup> (*Single Event Effect*) ou então a partir de uma forte explosão de partículas ionizantes. No CI, as partículas ionizantes, são produzidas entre pico a nano-segundos e algumas delas podem ter a energia suficiente para sair da câmara de vácuo, durante a compressão do alvo. No CM, os componentes eletrônicos estão o mais afastados possível da câmara de vácuo, onde a radiação é menor, no entanto nem sempre é possível realojar os aparelhos nessas localizações, logo, é necessário aparelhos com componentes mais resistentes, para que não alterem o seu comportamento quando sujeitos a radiação. Para isso, têm sido desenvolvidos, projetos em ambientes com um elevado nível de radiação, a fim de testar os novos componentes. Um destes ambientes é o CERN que auxilia os engenheiros a projetar qual será a arquitetura mais favorável para que se proteja ao máximo os componentes das radiações [20].

A medição do nível absoluto da emissão dos neutrões é um requisito nas experiências dos dois confinamentos, detetores, espectrómetros e todos os sistemas de diagnóstico têm de ser calibrados consoante a tecnologia que vão lidar. No CI, a fonte do plasma tem início em “um pequeno ponto”, logo a emissão dos neutrões pode ser medida e os aparelhos totalmente calibrados a longas distâncias (5 a 100m) do alvo. No CM, o plasma tem uma origem extensa e a integração de todo o volume é necessária para obter a emissão total dos neutrões. Para isso, alguns engenheiros estão a estudar a dependência espacial das emissões dos neutrões para a correta leitura do valor total. Enquanto as fontes de neutrões dos dois confinamentos são diferentes tanto no tempo de duração como na extensão, os sistemas de diagnóstico requerem em ambos, uma potente calibração, para isso, as novas experiências apontam para o uso de folhas de cobre para calibrar (*cross calibration sources*) e numa segunda abordagem está a ser testado um detetor de protões, onde a sensibilidade absoluta é baseada no cálculo de valores previamente conhecidos da secção eficaz da dispersão elástica e da geometria de neutrões e protões. No CI, existe ainda uma terceira abordagem, onde a calibração dos detetores é feita no laser OMEGA a pequenas distância do alvo e a sensibilidade é calibrada de acordo com as distâncias do NIF ou do LMJ. A calibração no OMEGA melhora o funcionamento dos detetores em 10%, em princípio, os detetores usados no CM, podem também ser calibrados no OMEGA.

---

<sup>23</sup> Single Event Effect: os neutrões e as partículas alfa, podem num só evento causar graves modificações nos circuitos, como por exemplos nos módulos de RAM.

#### **5.2.4 Instalações para simular as condições de radiação**

As instalações de simulação deverão simular os campos de neutrões e de radiação gama, as taxas dos danos por ionização e por deslocamento, ambientes de radiação em vácuo e também condições para prever o stress mecânico. No caso dos isoladores, é essencial fazer testes para determinar se as propriedades físicas são mantidas durante as operações dos reatores, como por exemplo em condições onde a condutividade elétrica aumenta significativamente devido a radiação ionizante (RIC). Os fluxos, os espectros de energia, os rácios dos átomos de hélio e as janelas dos reatores de fissão (onde eram testados), não são se igualam aos valores dos reatores de fusão, pois as suas grandezas são diferentes e a sua acessibilidade é pequena, o que reduz as experiências *on site*, logo é necessário criar mais reatores de fusão para ajudar os reatores de primeira geração comercial (NIF e ITER). Nos aceleradores de partículas é possível obter níveis elevados de danos por radiação e por deslocamento, com pouca ou nenhuma ativação nuclear, embora que este poder de não ativação nuclear seja uma desvantagem para os aceleradores. Uma outra desvantagem é o limitado poder de penetração e o volume da radiação que alcançam, isto significa que só pequenos equipamentos podem ser testadas de uma vez [20].

Uma vez que o número destas instalações é reduzido em todo o mundo, é necessária uma colaboração entre as duas comunidades, para partilhar os dados já recolhidos e para propor novas experiências.

### **5.3 – Problemas na gestão dos materiais da fusão nuclear**

A entrada de uma central de fusão nuclear em funcionamento acarreta vários problemas e ao ser uma nova fonte de energia nuclear, não pode cometer os mesmos erros da fissão nuclear (lixo radioativo). Os problemas passam pela gestão dos materiais em final de vida ou danificados devido às fortes radiações a que são expostos e também o que fazer com os produtos resultantes da reação (lixo radioativo). Para estudar estes problemas, o *International Energy Agency Program on Environmental, Safety and Economic*, desenvolveu um estudo tendo em vista a gestão dos materiais radioativos, para avaliar o seu final de vida útil, partindo do princípio que os materiais podem ser limpos, reciclados ou eliminados, por já não estarem nas melhores condições [25].

A fusão nuclear gera pouco lixo radioativo, no entanto existe um aumento dos esforços para que esse lixo não seja enterrado no solo. Limpar ou reciclar é uma solução mais

ecológica, não só para os materiais de uma central em funcionamento, mas também para uma central em final de vida. Em princípio todos os materiais podem ser reciclados para serem usados em outras centrais, embora que em alguns casos terão de sofrer modificações na sua estrutura devido ao seu tamanho. A ideia de reciclar não tem haver só com o impacto ambiental, uma vez que é impossível construir uma segunda geração de centrais de fusão nuclear com materiais virgens (novos). Por exemplo, em todo o mundo existem cerca de 80.000t de berílio e a produção em 2012 ficou-se nas 230t, para construir uma central, a PPCS, calculou que são precisos 560t e esse valor não se fixa por aí, uma vez que os materiais que contêm berílio têm de ser trocados a cada 5 anos, devido às fortes interações com os neutrões que os modificam internamente, logo esse valor tende a aumentar [25].

O projeto ARIES-ACT-1\*\* (*Advanced Research Innovation and Evaluation Study*) previu que os seus materiais num espaço de 50 anos, continuariam viáveis e operacionais, mantendo uma taxa de fiabilidade de 85%. Os únicos que iriam sofrer alteração, devido à sua proximidade com a reação de fusão, eram a primeira parede, a cobertura e o diversor, que tem de ser substituído a cada 5 anos [25].

\*\* Projeto ARIES-ACT-1:

Foi fundado em 1988, pela *Fusion Energy Sciences, U.S. Department of Energy*, tem como missão estudar a viabilidade dos reatores de fusão. As suas experiências assentam no desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas para poderem não só reduzir os gastos, mas também reduzir o tempo de execução. Ao longo do tempo foi possível descobrir valores que até aí eram uma incógnita. Tais como, o rácio necessário para a produzir trítio dentro do reator, a dose de neutrões por reação, o valor máximo de radiação que os materiais suportam, os tempos de vida útil de todos os componentes que constituem o reator, etc... O reator do ACT-1 é diferente do reator do ITER, já que desenvolveu uma cobertura e uma primeira parede com uma estrutura de silício e carbono (SiC), que tem grande eficiência térmica e é resistente à radiação, pois não influencia o seu funcionamento [26].

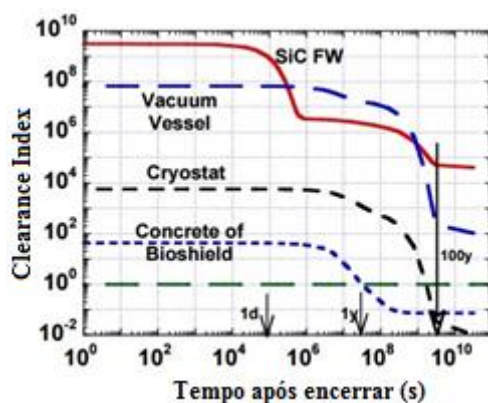


Figura 39 - Comparação dos vários componentes do reator ACT-1, com o nível de CI ao longo do tempo.

No seguimento das experiências, foi possível descobrir os *clearance index* (CI), regulados pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA) de alguns dos componentes do ACT-1. O gráfico da figura 39 mostra que o crióstato está livre da radiação ao fim de aproximadamente 70 anos e o bioescudo, feito de cimento ao final de 1 ano. Já os outros componentes, como a primeira parede (FW) e a câmara de vácuo não ficam completamente livres da radioatividade ao longo dos anos.

A maior parte dos estudos feitos nos projetos do ARIES, indicam que será possível reciclar e limpar os materiais, embora ainda se esteja numa fase precoce desse processo. A tabela 3 mostra quais os tópicos a melhorar caso se avance para a reciclagem.

Tabela 3 - Problemas e requisitos para a reciclagem de materiais radioativos

Problemas	Requisitos
Extração de materiais radioativos dentro de componentes complexos	Programa de pesquisa e desenvolvimento
Separação radioquímica	Equipamento remotos resistentes à radiação
Tratamento remoto	Processos de montagem reversíveis para facilitarem a separação de materiais
Propriedades dos materiais reciclados	Armazenamento de baixo custo
Gestão dos resíduos provenientes da reciclagem. Nível de resíduos radioativos	Necessidade da indústria aceitar materiais reciclados
Energia necessária para a reciclagem	Infraestruturas para a reciclagem
Capacidade da central de reciclagem e o nível de apoio dos governos	

Caso estes melhoramentos sejam feitos, um possível diagrama de decisões é ilustrado na figura 40.

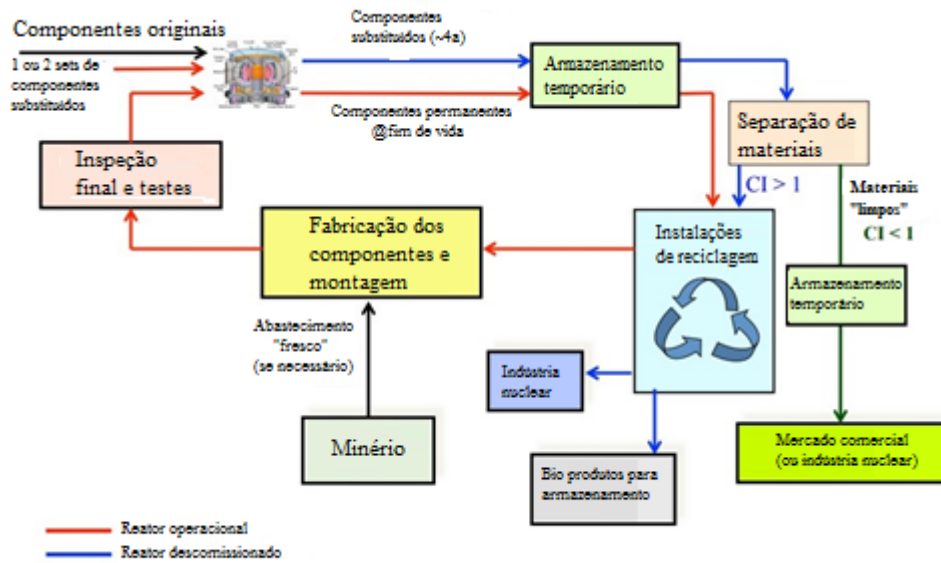
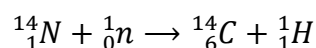


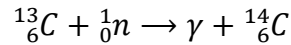
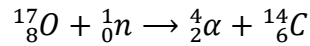
Figura 40 - Ciclo de reciclagem e de limpeza dos componentes.

Quando um material é retirado do reator existem sempre um tempo de armazenamento obrigatório. Depois são tomadas decisões consoante o tipo de material, ou seja, se é necessário que volte ao reator, por ainda estar operacional, é reciclado e caso necessite são lhe garantidas peças novas para ser de novo e depois das devidas inspeções introduzido no reator, mas se por algum motivo o reator estiver a ser descomissionado, os materiais são reciclados e introduzidos em novos reatores. Este é um processo que pode beneficiar muito a energia nuclear, que necessita destes pequenos aspetos para se tornar uma fonte de energia amiga do ambiente [27].

### 5.3.1 - Efeito do carbono-14 e do trítio nos materiais dos reatores

A fusão quando comparada com a fissão revela-se uma fonte de energia mais económica, com custos iniciais aceitáveis e com custos externos reduzidos que em parte são provocados pela presença nas estruturas internas dos reatores de fusão do isótopo radioativo do carbono,  $^{14}\text{C}$ . Este isótopo tem um tempo de meia vida de 5730 anos e a sua produção depende da concentração de impurezas de  $^{14}\text{N}$  nos metais e no berílio (cobertura), de  $^{17}\text{O}$  na água de refrigeração e cimento. Pode ainda ser criado através do  $^{13}\text{C}$ .





A abundância de  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  e  ${}^{13}\text{C}$ , nos seus elementos naturais é respetivamente de 99,634%, 0,0373% e 1,109%. A produção de  ${}^{14}\text{C}$ , num material que contenha 1ppm de nitrogénio, com uma fluência de neutrões de  $1\text{MW ano/m}^2$  é de 0,11MBq e a mesma concentração de oxigénio e carbono origina 38Bq e 3,2Bq, respetivamente [25].

De acordo com o código das regulações da *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) nos EUA, se a concentração de carbono  ${}^{14}\text{C}$  exceder os  $3\text{TBq/m}^3$ , o lixo radioativo não poderá ficar instalado à superfície, mas sim em instalações de baixo de terra. Uma dessas instalações fica situada no Japão a 50m da superfície, que aceita materiais com níveis de radiação até os 100MBq/Kg. Já a instalação de El-Cabri em Espanha, trabalha com emissões menores, de 3,7MBq/Kg. No sentido de reduzir estas emissões, o reator ARIES-ACT-1, trabalha com uma cobertura de SiC, que tem níveis menores de nitrogénio, o que permite não só aumentar a segurança, mas também torna-se economicamente mais atrativa, uma vez que, se a concentração de nitrogénio nos materiais não exceder os 80 ppm, os níveis de carbono de acordo com a NRC vão ser respeitados [28].

Um outro elemento radioativo ligado à fusão nuclear, é o trítio, produzido diretamente na cobertura com módulos de lítio, em que os materiais que o contêm podem ser reciclados entre 10 a 60 anos depois de retirados do reator. Este tipo de procedimento é impossível com o  ${}^{14}\text{C}$ , porque nas operações de reciclagem, o carbono reage facilmente com o oxigénio e o hidrogénio, que é praticamente impossível de eliminar das instalações, o que forma  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) e  $\text{CH}_4$  (metano) e numa escala menor  $\text{CO}$  (monóxido de carbono) e  $\text{C}_2\text{H}_6$  (etano). Uma solução possível seria criar (com mais investimento) um novo tipo de controlo remoto, onde os materiais que contêm carbono são aprisionados durante as operações para não entrarem em contacto com nenhum outro elemento.

### 5.3.2 – Estratégia para substituição de materiais radioativos

Um dos problemas na gestão dos materiais radioativos é o tempo despendido nas ações de manutenção dentro do reator, para tal, em vez de se retirar só a peça em questão, retira-se a estrutura que a suporta, assim reduz-se o tempo de operação e a fiabilidade do reator não fica posta em causa, como é ilustrado na figura 41. Depois de a estrutura ser retirada

é orientada para o complexo das células quentes (*hot cell*), onde se irá proceder com forme o tipo de material, por exemplo, se se tratar de um peça que contenha metal, é mantida abaixo dos 550°C, para que a sua estrutura não seja comprometida e possa voltar ao reator. O complexo das células está ligado ao sistema de arrefecimento para que seja possível regular a temperatura (aquecer ou arrefecer).

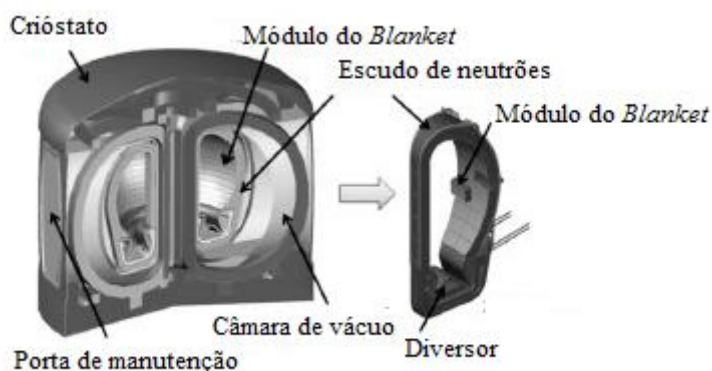


Figura 41 - Manutenção de um reator de fusão nuclear, como o ITER.

Ao fazer a manutenção aos módulos da cobertura, é necessário ter especial atenção aos metais que lá se encontram, como o berílio e o lítio, porque depois de serem descontaminados ainda existem vestígios de  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  e  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ . Estas pequenas amostras terão de ser armazenados durante 12 anos até atingirem a temperatura indicada para serem misturados com cimento (abaixo dos 65°C para prevenir a evaporação de água no cimento). Depois disto, o tamanho da mistura é reduzido até os 1,6m<sup>3</sup> para reduzir o espaço de armazenamento. Está previsto que o tamanho necessário para albergar os materiais da cobertura e do diversor (com uma substituição periódica), seja de 100m<sup>2</sup> [25].

## 5.4 – Pesquisa e evolução tecnológica dos processos da fusão nuclear

### 5.4.1 – Fibras óticas

O desenvolvimento das fibras óticas a partir de 1970 revolucionou a indústria das telecomunicações. As fibras óticas têm uma grande largura de banda e podem transportar ondas eletromagnéticas sem as afetar, uma vez que são quase imunes às interferências eletromagnéticas. Uma outra função que tem atualmente é a do transporte de lasers, bastando para isso, criar uma mistura de iões raros numa estrutura de fibra de vidro e

bombardear os íons através de díodos laser (parecidos com os que geram a luz nos apontadores de laser). Ao juntar a energia de muitos díodos é possível aumentar a potência dos lasers e assim construir um sistema de ondas contínuas que emitem fótons estáveis e extremamente focados, o que possibilita a sua utilização em aplicações científicas. As fibras têm um funcionamento ótimo quando a energia que transportam é uniforme ao longo do tempo, sendo a sua única limitação as altas energias, em forma de impulsos.

Estudos nos laboratórios de *Livermore* (NIF), sugerem que as fibras, podem gerar 30 a 40kW de potência, embora fique ainda muito aquém do fator de 100 que os laboratórios esperam conseguir para os sistemas de energia. Para tentar resolver o problema da limitação da energia transportada pelas fibras, uma equipa liderada pelos físicos Jay Dawson e Mike Messerly estão a estudar uma forma de criar uma fibra com uma estrutura diferente da original, pois os seus estudos concluíram que era impossível obter os resultados que todos esperam com a topologia cilíndrica que as fibras têm [29].

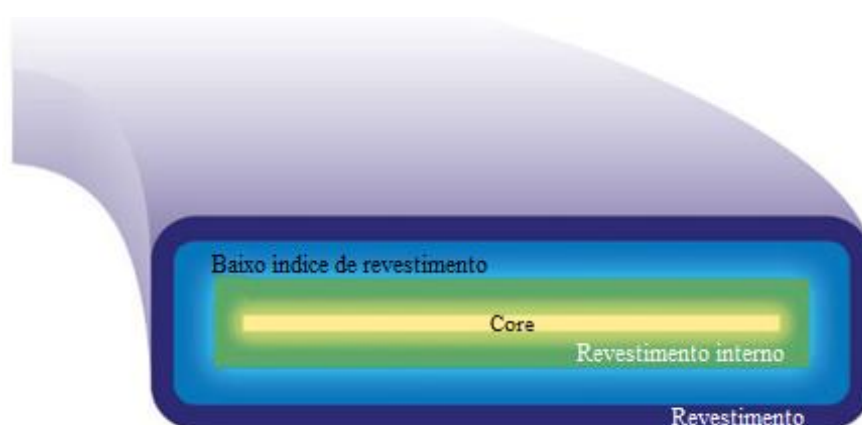


Figura 42 - Fibra óptica em forma de fita, desenvolvida em Livermore.

As fibras tradicionais quando são dobradas, provocam uma grande atenuação na luz, ou seja, é como tentar dobrar uma barra de alumínio. Já as fibras em forma de fita podem, em virtude da sua largura, ser dobradas em pequenos eixos e ainda assim transportar grandes quantidades de energia. Os investigadores do *Laboratory Directed Research and Development Program*, estão não só a tentar criar um modelo mais abrangente ao contruir um sistema que transporte 30kW, bem como a desenvolver um novo método de fabricação de fibras. O objetivo é criar uma fibra que possa amplificar os feixes além dos limites tradicionais, para que o novo modelo de fibras possa rivalizar com os tradicionais lasers sólidos (cristais) [29].

### 5.4.2 – Comportamento das bolhas de hélio no tungsténio

Um dos desafios para o sucesso da comercialização de uma central de fusão nuclear, é o desenvolvimento de materiais que possam tolerar as condições extremas que a fusão provoca, devido às temperaturas extremas e ao grande fluxo de isótopos de hidrogénio, neutrões e átomos de hélio. Um dos materiais utilizados para lidar com estas condições extremas é o tungsténio (utilizado no divisor no ITER e candidato a ser o principal constituinte do reator DEMO), um dos materiais disponíveis atualmente com maior dureza. Quando os átomos de hélio são bombardeados contra os materiais que contêm tungsténio formam aglomerados (bolhas), que em número suficiente, podem provocar a movimentação dos átomos de tungsténio e formar nano estruturas (*fuzzy nanostructure*), que vão afetar a integridade do material e a qualidade do plasma, arrefecendo-o. Estas cavidades, podem ser preenchidas por trítio, afetando seriamente a reação de fusão [30].

A simulação desses comportamentos é feita a partir dois métodos computacionais, o modelo de Monte Carlo (MC), que é um método estatístico que se baseia numa amostra aleatória para obter resultados numéricos, ou seja, são realizadas inúmeras simulações para calcular as probabilidades heurísticamente e através da dinâmica molecular (MD), que é uma simulação de movimentos físicos de átomos e moléculas. Os estudos foram feitos com a colaboração da Euratom e o Japão, com a equipa a ser liderada por Naoaki Yoshida, que fez a sua pesquisa com a ajuda do simulador de plasma no *National Institute for Fusion Science* e do supercomputador HELIOS no *Computational Simulator Centre of International Fusion Energy Research Center (IFERC-CSC)* [31].

A primeira alteração é na superfície do tungsténio (cobertura), localizada acima das bolhas de hélio, uma vez que quando a bolha começa a aumentar o seu tamanho, vai provocar a expansão da superfície (figura 43.a). Essa expansão foi estudada através do uso de simulações MD, que concluiu que as bolhas conseguem alterar a superfície devido ao *stress* dos átomos de tungsténio, ou seja, da tensão que as bolhas provocam nos átomos que num estado normal estariam estáveis. A simulação híbrida MD-MC 3D<sup>24</sup>, é o mecanismo próprio para estudar a criação de estruturas perpendiculares à superfície (figura 43.b), que são criadas quando a bolhas são muito grandes. O volume da superfície

---

<sup>24</sup> O método da simulação híbrida MD-MC utiliza de forma alternada os modelos MD e MC. Para reproduzir a formação da estrutura fuzzy e dos processos de concentração de hélio, é utilizado o MC, porque é visto como um comportamento aleatório. Já as alterações feitas na superfície do tungsténio devido à pressão das bolhas, é representado pela mecânica clássica, logo é utilizado o modelo MD.

que é alterado corresponde ao volume total da bolha de hélio dentro da estrutura do material (figura 43.c).

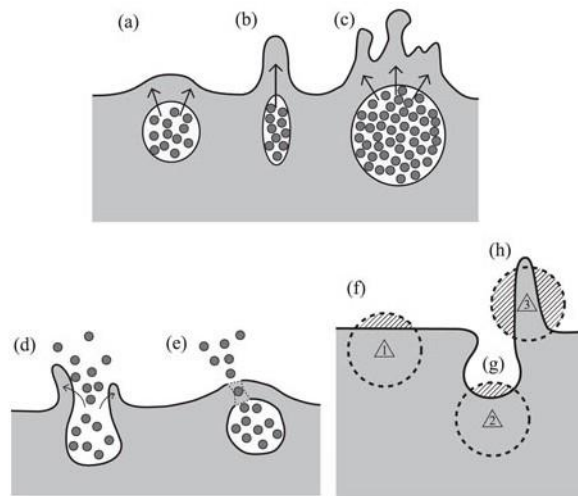


Figura 43 - Formação da nano estrutura *fuzzy* no tungstênio.

A segunda alteração que pode acontecer é a ruptura da superfície, quando a pressão da bolha é extremamente elevada (figura 43.d), entre os 6GPa (MD-MC) e os 10GPa (MD 3D). Em algumas das simulações MD-MC 3D, a cobertura não chegava a explodir, e os átomos de hélio eram lentamente absorvidos e lançados para a câmara de vácuo. Isto acontece, porque nas simulações as bolhas de hélio são mais pequenas (nanómetros) que as bolhas medidas experimentalmente, o que mantém a estrutura do tungstênio, independentemente de existir a explosão da bolha (figura 43.e).

Por último, é a tendência para as bolhas aparecerem nas zonas de baixo das concavidades em vez das zonas convexas, que pode ser explicada se considerarmos a difusão e a agregação dos átomos de hélio. A difusão acontece quando os átomos de hélio viajam de um potencial mínimo do tungstênio, para outro potencial também mínimo. A energia de migração foi avaliada em 0,06eV pela teoria do funcional da densidade (*Density Functional Theory* - DFT)<sup>25</sup> e por ser tão pequena e pelos átomos de hélio se expandirem em todas as direções, a difusão do hélio torna-se mais rápida que a formação das nano estruturas *fuzzy*. Depois de se difundirem, os átomos podem chegar à superfície do tungstênio e serem libertados para a câmara de vácuo, ou então chegar às bolhas de hélio, onde ficam presos, com uma energia de ligação entre os 2,5 e os 5eV. Uma vez que a energia de ligação é maior do que a energia de difusão, os átomos vão ficar presos nas

<sup>25</sup> A teoria do funcional da densidade, é uma teoria quântica usada em química quântica e física de sólidos para resolver sistemas de com muitos corpos, como por exemplo, cálculos da energia de ionização.

bolhas durante muito tempo. Sendo uma difusão isotrópica, a área que o átomo de hélio pode atingir é caracterizada pelas circunferências descritas na figura 43, com a sua origem (triângulos 1, 2 e 3) a caracterizar as suas possíveis movimentações, a partir de uma superfície plana (figura 43.f), de uma área côncava (figura 43.g) e de uma área convexa (figura 43.h). A probabilidade do átomo escapar durante um determinado período de tempo é inversamente proporcional ao volume entre a região do vácuo e a área de difusão, logo é mais provável que o átomo escape numa zona convexa do que numa área côncava. Assim, as bolhas de hélio tendem a formar-se e a aglomerar-se em zonas mais côncavas [31].

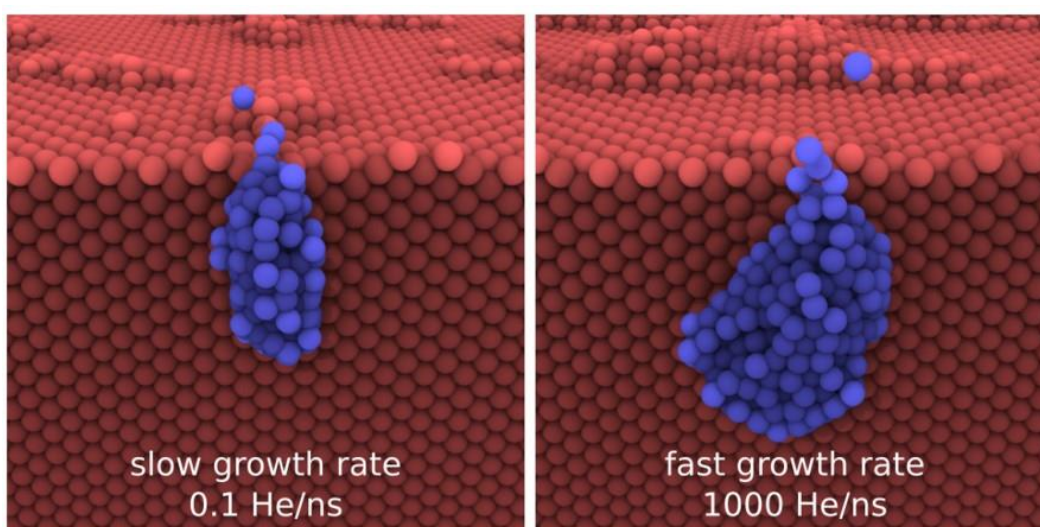


Figura 44 - Comparação entre a taxa de crescimento lento e rápido das bolhas de Hélio. Os átomos de Hélio estão a azul e os do Tungsténio a vermelho.

Estas três alterações são só o início da formação das estruturas fuzzy já que as simulações híbridas só conseguem abranger os estados iniciais da formação das estruturas e portanto é necessário prosseguir o estudo com mais simulações. No mesmo sentido, não foi possível confirmar quais as condições para a formação das estruturas quando a energia de irradiação do hélio fosse superior a 20eV, numa temperatura de superfície entre os 1000 e os 2000K [31].

### 5.4.3 – Alto desempenho dos *Hohlraums* com urânio empobrecido

O desempenho dos *Hohlraums* é de extrema importância já que pode reduzir a potência dos lasers. Nesse sentido, o NIF tem vindo a estudar a adição de novos materiais tanto no *Hohlraum* como no ablator da cápsula. As primeiras experiências foram feitas com *Hohlraum* de ouro (Au), que demonstrou bons resultados uma vez que conseguiu aumentar a energia de saída, de 351TW / 1,3MJ no ensaio N130501 (Naammdd) até

428TW / 1,9MJ no N131119, que neste momento é o limite da energia do laser no NIF. Por este facto é que a otimização do alvo se tornou importante para aumentar a velocidade das impulsões da cápsula e passa pela utilização de *Hohlraums* feitos de materiais com elevado número atómico. Como a utilização do ouro atingiu o limite da potência do laser, o NIF tem feito experiências com *Hohlraum* com uma camada de urânio empobrecido (*depleted uranium* – DU) entre as camadas de ouro, embora em algumas experiências se tenham obtido bons resultados, noutras obtiveram-se os piores de sempre. O urânio torna o *Hohlraum* mais opaco, logo a energia necessária para aquecer as paredes poderá ser menor, facto confirmado com as primeiras experiências a concluírem que havia uma melhor performance que equivalia a uma potência de pico adicional de 6,5% nos *Hohlraum* de ouro ( $\approx 25$ TW). Posto isto, a experiência realizada teve por base cápsulas com duas espessuras, uma de  $175\mu\text{m}$  (“T1”) e outra  $195\mu\text{m}$  (“T0”), o *ablator* delas sendo diferente em termos de tamanho, é igual em termos da constituição, com uma camada exterior de um polímero denominado CH, seguida de uma camada de CH dopada com silicone (Si). O combustível é a camada seguinte da cápsula, tendo  $69\pm 1\mu\text{m}$  de espessura, arrefecido a 18,6K e formado por THD (74% de trítio, 24% de hidrogénio e 2% de deutério). De seguida existe a camada de gás com THD (figura 45.d). Já o *Hohlraum* tem um comprimento de 9,43mm e diâmetro de 5,75mm. A camada de Du tem uma espessura de  $7,0\mu\text{m}$  e está situada entre duas camadas de Au, com a exterior a ter  $22,3\mu\text{m}$  e a interior de  $0,7\mu\text{m}$  (espessura total é igual à espessura de um *Hohlraum* de Au) (figura 45.b). A pequena camada de Au presente no interior do *Hohlraum* serve não só para proteger a camada de DU da oxidação, que iria levar uma menor performance, mas também para manter o comportamento do *Hohlraum* como se fosse de Au, até à chegada do laser. Um outro fator importante é poder usar-se as mesmas condições, i.e, o tempo de chegada do laser [32].

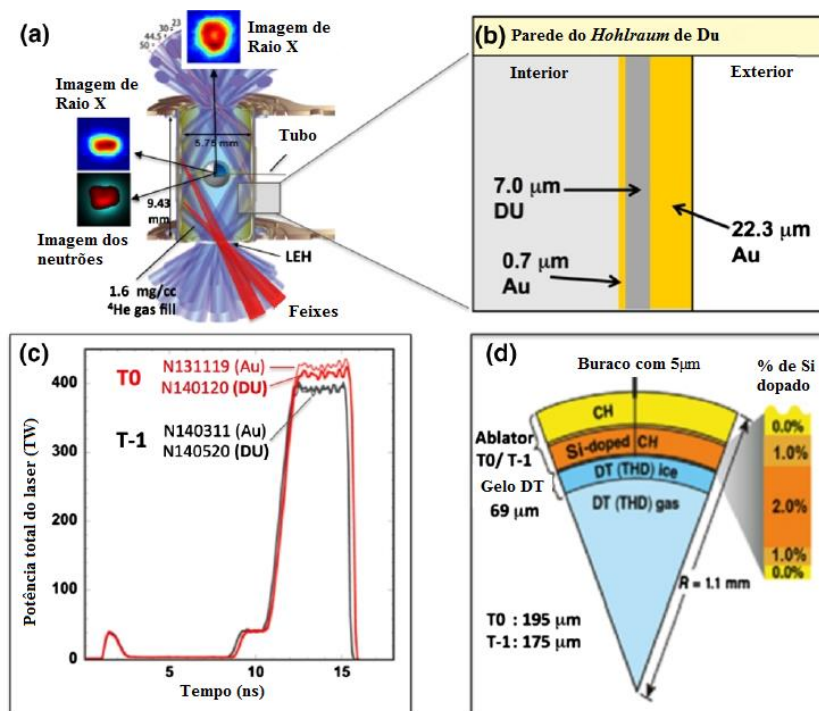


Figura 45 - Características do *Hohlraum* nas experiências realizadas.

A comparação dos *Hohlraums* de Du com os de Au realizou-se tendo em base as duas espessuras da cápsula, ou seja, para cada uma delas realizou-se dois ensaios. Ao observar o gráfico da figura 45.c, conclui-se que os ensaios com T1 utilizaram menos potência dos laser e os dois tipos de *Hohlraum*, obtiveram valores muito parecidos, comprovados na tabela 4. Num outro sentido os testes com T0 demonstraram uma maior variação, com a utilização de Au (N131119) a necessitar de mais 12TW relativamente ao DU (N140120).

Tabela 4 - Sumário dos valores dos diferentes ensaios.

	T0			T1	
	N131119	N140120	N140304	N140311	N140520
<i>Hohlraum</i>	Au	Du	Du	Au	Du
Espessura da camada CH da cápsula ( $\mu\text{m}$ )	193,9	195,2	194,1	177,2	178,4
Potência de pico do laser (TW)	426	414	442	391	393
Energia do laser (MJ)	1,908	1,852	1,863	1,745	1,764
Temperatura dos iões DT (keV)	$4,83 \pm 0,15$	$5,14 \pm 0,15$	$5,85 \pm 0,15$	$5,36 \pm 0,15$	$5,54 \pm 0,15$
Ganho de neutrões ( $\times 10^{15}$ )	$5,98 \pm 0,13$	$9,25 \pm 0,17$	$9,28 \pm 0,19$	$6,06 \pm 0,12$	$8,98 \pm 0,17$

Apesar dos resultados serem semelhantes aos do N13119, o N140120 foi o primeiro grande ensaio com a cápsula DU, onde se obteve uma melhoria não só no número total de neutrões, que aumentou 50%, como na temperatura dos iões, que passou de  $4,83 \pm 0,15 \text{ keV}$  para  $5,14 \pm 0,15 \text{ keV}$ . Um outro ponto-chave, para além da melhoria do

número de neutrões, é o *hot-spot*, que como se pode observar na figura 46, melhorou a sua forma quando se utilizou o DU, já que obteve uma maior convergência e a sua forma tornou-se mais estável. O tamanho do hot-spot tornou-se mais pequeno (visão do topo) e a forma de donut, observada no N131119 é inexistente. Ao existirem imperfeições no hot-spot, aumenta o risco de falha da reação, uma vez que as impulsões que resultam das interações dos iões vão amplificá-las e a simetria do hot-spot<sup>26</sup> torna-se ineficaz [32].

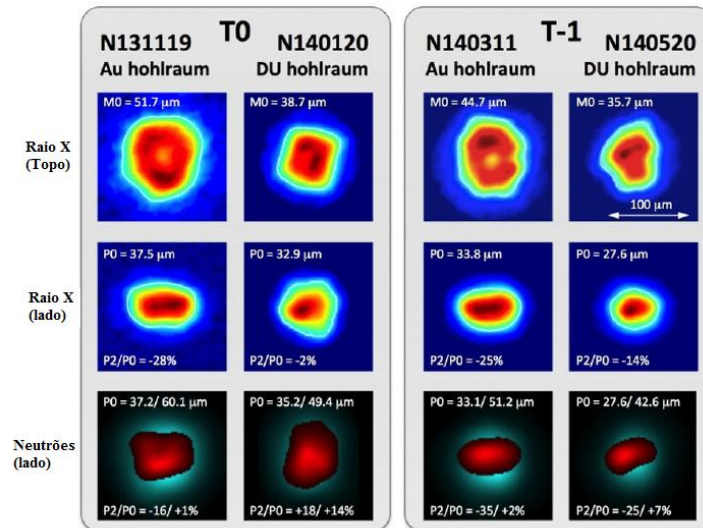


Figura 46 - Forma do hot-spot, com imagens de raio X de topo e de lado. Em baixo os neutrões dispostos na cápsula, a 13-17MeV na zona da cor vermelha e 6-12MeV na turquesa.

O N140304 na tabela 4, corresponde a uma tentativa de aumentar a potência do laser, que comparado com o N140120 obteve mais 28TW. Neste ensaio houve um aumento da temperatura dos iões de  $5,14 \pm 0,15 \text{keV}$  (N140120) para  $5,85 \pm 0,15 \text{keV}$  (N140304), o que demonstra uma maior velocidade de impulsões, já o número total de neutrões não obteve nenhuma melhoria.

Graças à redução das instabilidades com a utilização de DU, é possível concluir que, não só ajudam no aumento das movimentações dos iões como na velocidade das impulsões. Em termos de neutrões, as três experiências com DU geraram um total de  $9 \times 10^{15}$  neutrões, mais 50% comparado com o Au. Ao observar os hot-spot é possível concluir que mais de 50% da produção de neutrões é devida ao aquecimento adicional da partícula alfa, que deposita a sua energia no hot-spot. Em suma, estas primeiras

<sup>26</sup> Simetria do hot-spot é uma função de toda a física da conversão da luz do laser até ao raio-X, do material do *Hohlraum*, da condução do calor ao longo da parede, das interações do laser-plasma e da propagação do laser.

experiências com Au foram um ponto de viragem, pois demonstraram uma melhor performance, apesar dos muitos requisitos na fabricação dos alvos [32].

# Capítulo 6

## Conclusões

*Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões acerca do trabalho desenvolvido nos capítulos anteriores.*



## 6 - Conclusões

A comparação entre o confinamento magnético e inercial, revelou-se muito complicada dadas as diferenças não só no funcionamento como na construção das estruturas dos reatores. Consequentemente, não foi possível prever qual a tecnologia que no futuro representará melhor a fusão nuclear, do ponto de vista da sua exploração comercial, não só porque ainda estão em desenvolvimento, como também porque nos resultados apresentados até ao momento são mais as semelhanças do que as diferenças. Sendo certo que quer a física quer a tecnologia envolvidas nos dois métodos são muitíssimo diferentes, os resultados em termos de custos e benefícios são em muitos aspetos semelhantes.

O estudo da viabilidade económica demonstrou que para o caso do confinamento magnético, o COE está estimado entre 0,03-0,10€/kWh e que no caso do confinamento inercial é de cerca de 0,03€/kWh. Embora os valores sejam semelhantes, estando certamente dentro da mesma ordem de grandeza, a margem de variação é grande por estar dependente, como descrito ao longo deste trabalho, de vários fatores, e em particular da escolha dos materiais (materiais de longa duração) que podem alterar a durabilidade e até a viabilidade da central e com isso diminuir o COE. Neste estudo ficou também claro que o NPV (valor líquido) neste momento se fixa entre os 100 e 400 biliões de dólares para cada central. Este valor engloba os custos fixos e variáveis, bem como as taxas de mercado, isto é, a percentagem da energia que é consumida pelo mercado. A leitura de diversas fontes deixou claro que há uma opinião quase unânime que para aumentar o NPV é necessário aumentar o investimento, com vista a reduzir o tempo de desenvolvimento. No entanto deve notar-se que em certos casos específicos, como resulta da análise efetuada para a DEMO, esse aumento de capital não traz qualquer benefício, uma vez que o projeto está assente em desenvolvimentos agressivos (rápidos).

As dificuldades encontradas na gestão dos efeitos que a radiação tem sobre os principais componentes dos reatores, levaram a uma estreita e interessante colaboração entre as duas comunidades, com uma troca constante de informação, de forma a diminuir não só o tempo mas também os gastos associados ao desenvolvimento de materiais capazes de resistir a altíssimos níveis de radiação. Um outro fator a ter em conta é a pesquisa duplicada, ou seja, se um confinamento já tiver um material identificado, como sendo resistente à radiação, então o outro confinamento não terá de gastar recursos na pesquisa desse mesmo material.

A gestão dos materiais radioativos é ainda um assunto crítico para as duas comunidades, uma vez que existe uma grande pressão para que não se cometa os mesmos erros que para a fissão nuclear em relação ao lixo radioativo, que embora seja muito inferior, é provavelmente o maior foco de críticas pela comunidade mais céptica. O estudo feito pela *International Energy Agency Program on Environmental, Safety and Economic*, concluiu que a melhor estratégia será limpar, reciclar e eliminar os componentes radioativos dos reatores e assim reduzir a quantidade de lixo radioativo que é provocado sobretudo com os materiais que contêm vestígios de  $^{14}\text{C}$ . Esta estratégia beneficia também a construção dos futuros reatores, uma vez que privilegia a reutilização de materiais de reatores descomissionados em reatores novos.

A continuação da investigação com vista ao melhoramento e compreensão da fusão nuclear é inevitável. Como exemplo, discutimos a investigação de ponta em fibras óticas, que fazem parte não só do CI como do CM. A sua evolução traduz-se claramente num melhor rendimento para alguns procedimentos. A influência das bolhas de hélio no tungsténio, que em casos extremos pode parar a reação de fusão é também bastante interessante, embora neste momento seja impossível confirmar alguns dos valores das simulações já realizadas. Com as experiências realizadas com os *Hohlraums*, foi possível confirmar que pequenas variações, como por exemplo da sua espessura, podem originar melhores desempenhos, embora que, como no caso anterior, ainda se esteja numa fase de desenvolvimento.

Em suma, a fusão nuclear tem tudo para ser a energia do futuro assente nestes dois confinamentos, ambos têm tudo para vingar e ganhar uma posição de destaque no mercado mundial de energia.

**Referências**

**Bibliográficas**



## Bibliografia

- [1] G. McCracken e P. Stott, *Fusion - the energy of the universe*, Elsevier, 2005.
- [2] Encyclopedia, "George Paget Thomson," 2008. [Online]. Available: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830905363.html>.
- [3] Mostly Odd, "Ivy Mike:How the H-bomb vaporised an island," 26 Abril 2013. [Online]. Available: <http://www.mostlyodd.com/ivy-mike-how-the-h-bomb-vaporised-an-island/>.
- [4] ITER, "What is fusion," 2015. [Online]. Available: <http://www.iter.org/sci/whatisfusion>.
- [5] R. Hamerly, "Laser fusion: lighting the earth with exploding stars," 29 Novembro 2010. [Online]. Available: <http://web.stanford.edu/~rhamerly/cgi-bin/Ph240/Ph240-2.php>.
- [6] R. Santos, *Fusão Nuclear*, Lisboa: ISEL, 2015.
- [7] New Scientist, "ITER: A brief history of fusion," 9 Outubro 2009. [Online]. Available: <https://www.newscientist.com/article/dn17952-iter-a-brief-history-of-fusion/>.
- [8] Wikipedia, "Fusion Power," 4 Julho 2015. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_power).
- [9] ITER, "ITER," 2015. [Online]. Available: <https://www.iter.org/>.
- [10] Euro-Fusion, "Plasma fingers point to the taming of the ELM," 28 Junho 2012. [Online]. Available: <https://www.euro-fusion.org/newsletter/plasma-fingers-point-to-the-taming-of-the-elm-2/>.
- [11] Wikipedia, "Laser," 2015. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>.
- [12] Lawrence Livermore National Laboratory, "Empowering Ligth - Historic accomplishments in laser research," 7 Outubro 2002. [Online]. Available: <https://str.llnl.gov/str/September02/September50th.html>.
- [13] LIFE, "Life Project," 2015. [Online]. Available: <https://life.llnl.gov/index.php>.
- [14] K. B. Wharton, "Laser-Plasma interactions relevant," 1998. [Online]. Available: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/236504.pdf>.
- [15] Lawrence Livermore National Laboratory, "Lawrence Livermore National Laboratory," 2015. [Online]. Available: <https://lasers.llnl.gov/>.
- [16] LLE Review, "Cryogenic DT and D2 Targets for Inertial Confinement Fusion," 2005.
- [17] Lawrence Livermore National Laboratory., "How NIF works," 2015. [Online]. Available: [https://lasers.llnl.gov/content/assets/docs/news//pk\\_how\\_nif\\_works.pdf](https://lasers.llnl.gov/content/assets/docs/news//pk_how_nif_works.pdf).

- [18] D. Ward, I. Cook, Y. Lechon e R. Saez, "The economic viability of fusion power," Elsevier, 2009.
- [19] World Nuclear Association, "The economics of nuclear power," 2015. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power/>.
- [20] J. Alvarez, *Potencial common radiation problems for components and diagnostics in future magnetic and inertial confinement fusion devices*, Elsevier, 2011.
- [21] Safespace, "What is EMF," 2013. [Online]. Available: <http://www.safespaceprotection.com/overview-electromagnetic-fields.aspx>.
- [22] J. Bourgade e A. Costley, *Diagnostic components in harsh radiation environments: possible overlap in R&D requirements of IC and MF systems*, Lawrence Livermore National Laboratory, 2008.
- [23] S. Zinkle e L. Mansur, "Radiation Effects in Materials," 1 Novembro 2002. [Online]. Available: <https://www.jlab.org/intralab/calendar/archive02/HPC/talks/mansur.pdf>.
- [24] R. Vila, *Latest data on TIEMF*, Nice, 2007.
- [25] B. N. Kolbasov, *Some technological problems of fusion materials management*, Elsevier, 2014.
- [26] ARIES, "Overview of ARIES ACT-1 study," 26 Fevereiro 2013. [Online]. Available: <http://aries.ucsd.edu/LIB/MEETINGS/1302-USJ-PPS/Najmabadi.pdf>.
- [27] L. El-Guebaly, *Recycling of radioactive materials - a must requirement for fusion*, University of Wisconsin-Madison, 2013.
- [28] G. Aiello e A. Gasse, "The TAURO SiC/SiC breeding blanket," [Online]. Available: [ferp.ucsd.edu](http://ferp.ucsd.edu).
- [29] K. Fury, "A new shape for optical fiber lasers," Lawrence Livermore National Laboratory, 2011.
- [30] Los Alamos National Laboratory, "LANL researchers simulate helium," 4 Agosto 2015. [Online]. Available: <http://www.lanl.gov/discover/news-stories-archive/2015/August/simulating-helium-bubble-behavior.pdf>.
- [31] A. Takayama, Y. Oda e A.M. Ito, "Molecular dynamics and Monte Carlo hybrid simulation for fuzzy tungsten nanostructure formation," 15 Junho 2015.
- [32] American Physical Society, "Demonstration of High Performance in Layered," 20 Outubro 2015.