

**FUSÃO NUCLEAR:  
TRAZER O SOL PARA A TERRA**

**por**

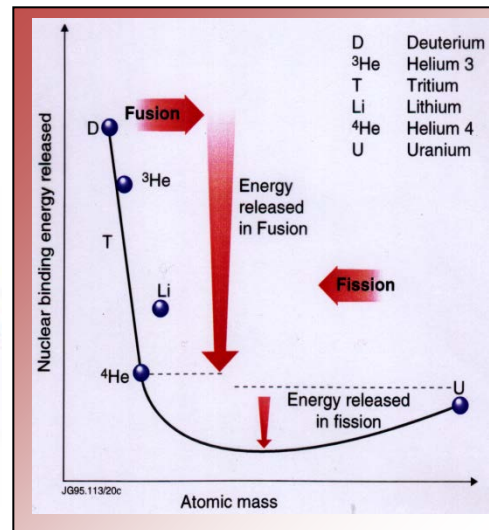
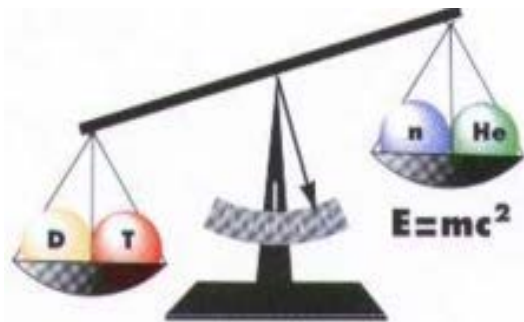
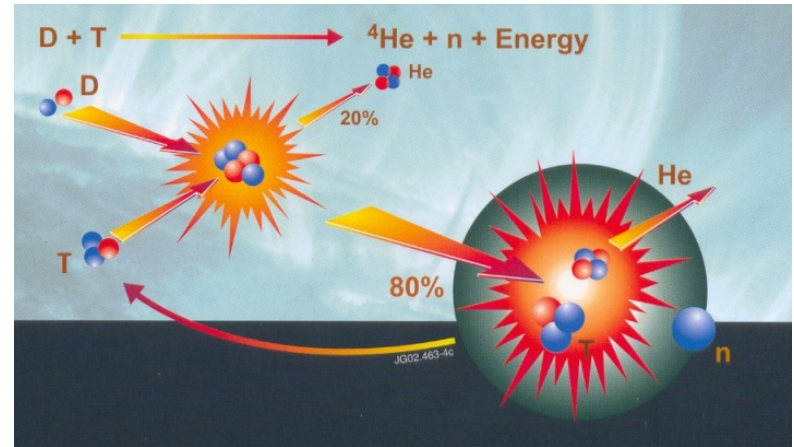
**Carlos Varandas**

# 1. INTRODUÇÃO

- **A luz e o calor provenientes do Sol:**
  - São uma das fontes de vida no nosso Planeta;
  - Estão na origem, directa ou indirectamente, dos combustíveis fósseis e de várias energias renováveis.
  
- **Esta enorme quantidade de energia resulta de reacções de Fusão Nuclear, que ocorrem no Sol e que envolvem núcleos de Hidrogénio.**
  
- **O Homem tenta, desde a década de 60 do século passado, reproduzir um Sol num laboratório, de modo a conseguir uma fonte de energia poderosa, limpa, praticamente inesgotável, intrinsecamente segura, amiga do ambiente e economicamente muito atractiva.**

## 2. FUSÃO NUCLEAR

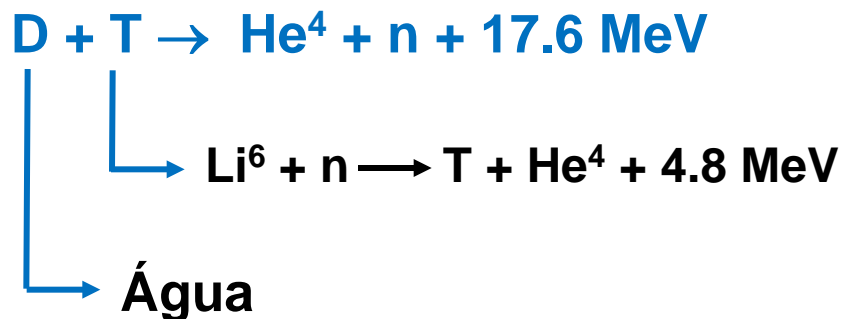
- A Fusão Nuclear consiste na coalescência de dois núcleos de elementos leves (Hidrogénio e seus isótopos Deutério (D) e Trítio (T)), com a formação de um elemento mais pesado e com redução da massa dos reagentes.



# 3. VANTAGENS DA FUSÃO NUCLEAR

- Poderosa
  - Em cada reacção de Fusão Nuclear libertam-se 17.6 MeV enquanto numa reacção de combustão se libertam apenas 5 eV
- Limpa
  - Não há libertação de gases de efeito de estufa para a atmosfera

- Praticamente inesgotável



Portugal é um dos maiores produtores de lítio	
Lítio	
Terra	30 000
Oceanos	30x10 <sup>6</sup>

- Meia banheira de água + lítio da bateria de um portátil produzirão a mesma electricidade que 40 toneladas de carvão.

- **Amiga do ambiente**

- ❑ Não há transporte de elementos radioactivos fora da central;
- ❑ Não há produção de lixo radioactivo de muito longa vida.

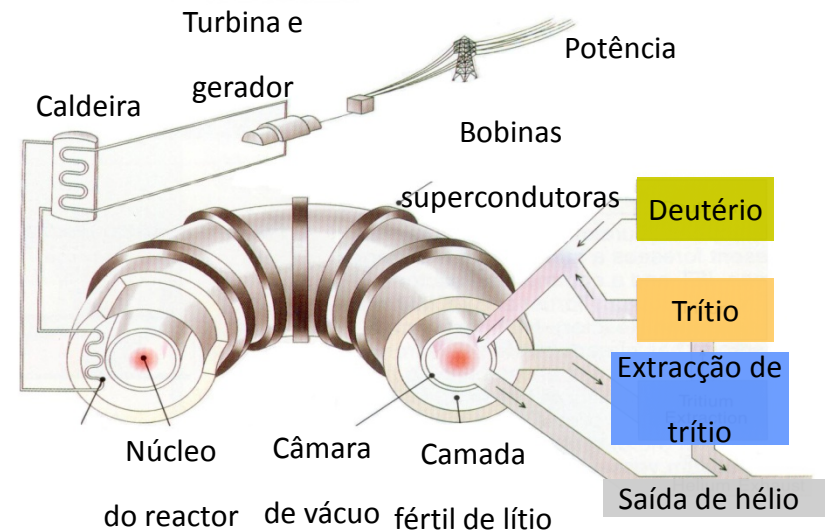
- **Segura**

- ❑ Como os combustíveis entram para o interior do reactor à medida que são consumidos:

(i) Nunca há grande quantidade de combustível no interior do reactor

(ii) Em caso de avaria, as reacções param quase instantaneamente através do fecho da admissão do combustível.

- ❑ As perdas de equilíbrio do plasma conduzem ao seu transporte para as paredes do reactor e à interrupção imediata das reacções.



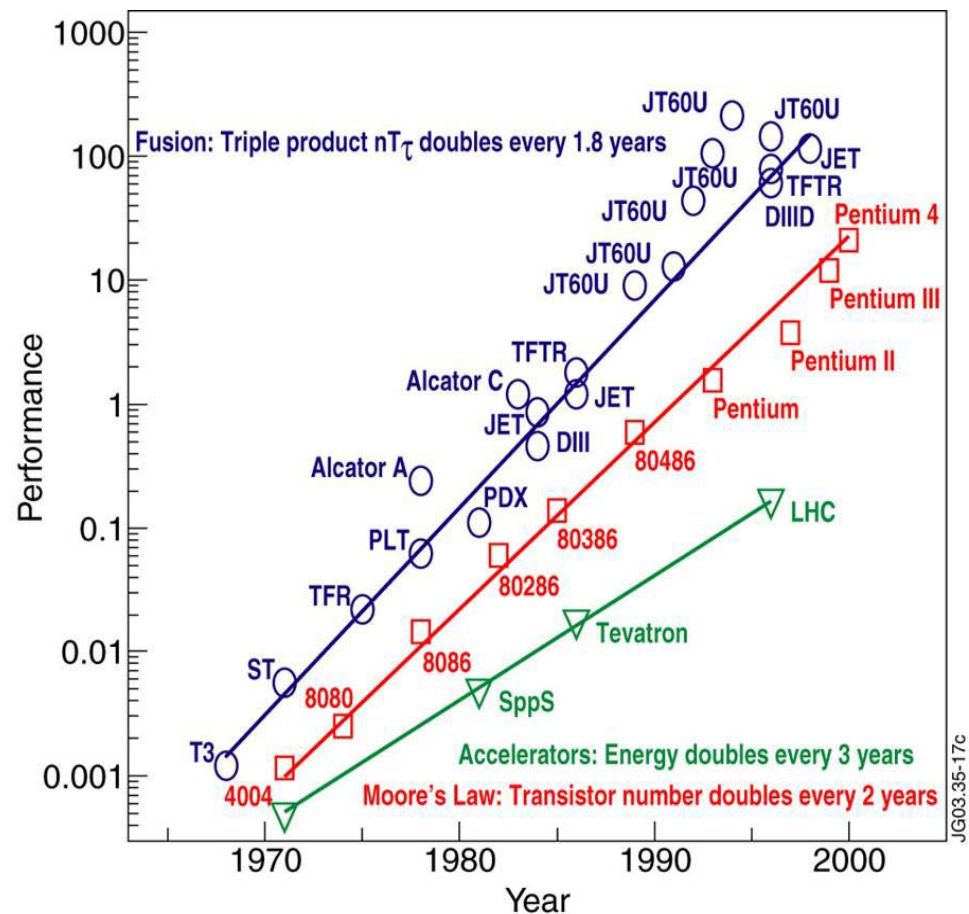
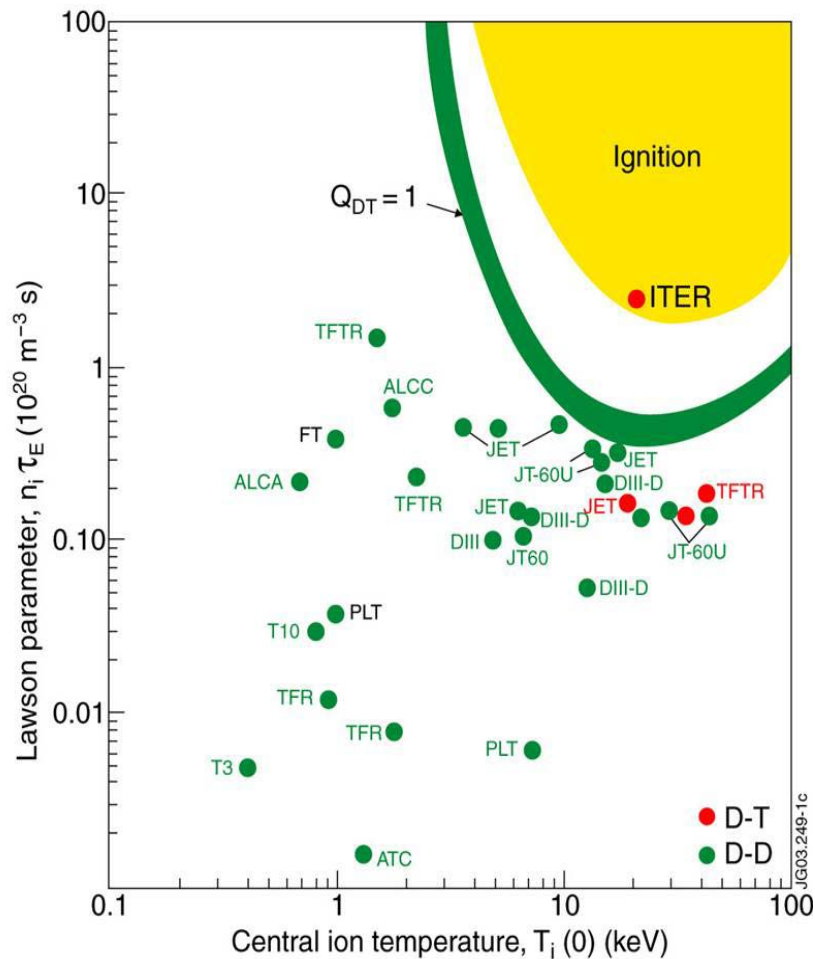
- **Economicamente atractiva**

- O preço do kW.h de electricidade produzida por Fusão Nuclear deve ser semelhante ao das centrais híbridas.

# 4. DESVANTAGEM DA FUSÃO NUCLEAR

- Apesar dos esforços e dos investimentos feitos nos últimos 50 anos, a Fusão Nuclear ainda não é uma tecnologia energética.

- Contudo, houve progressos significativos



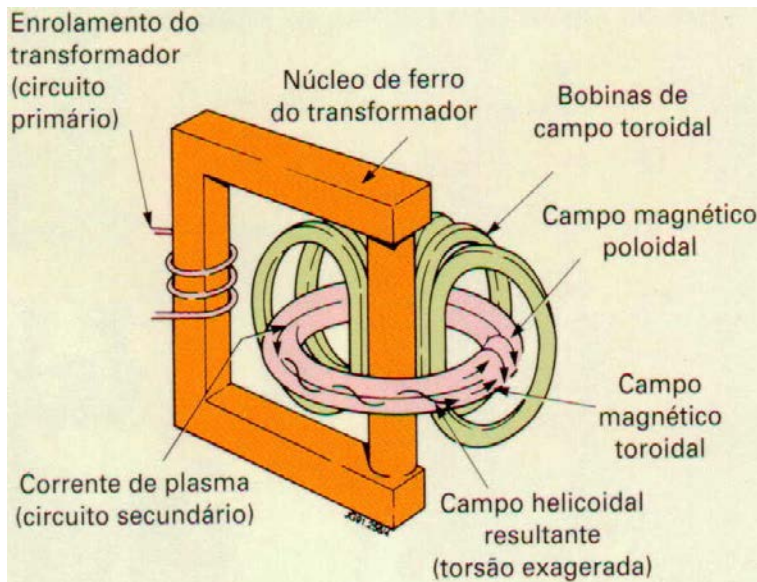
# 5. DIFICULDADES DA FUSÃO NUCLEAR

- É necessário aquecer os reagentes até temperaturas muito elevadas (da ordem dos 10 a 20 keV), às quais os reagentes se encontram no quarto estado da matéria: **plasma**.
- O primeiro método é o chamado aquecimento óhmico através da passagem de uma corrente eléctrica num meio condutor.
- O aquecimento óhmico deixa de ser efectivo para temperaturas da ordem de 1 keV.
- É preciso recorrer a outros métodos de aquecimento:
  - Aquecimento por partículas neutras;
  - Aquecimento por micro-ondas
  - Auto-aquecimento pelas partículas alfa geradas nas próprias reacções de fusão nuclear
- Os dois primeiros métodos ainda não estão disponíveis para as condições de operação de um reactor de fusão nuclear
- O terceiro método ainda não foi totalmente testado

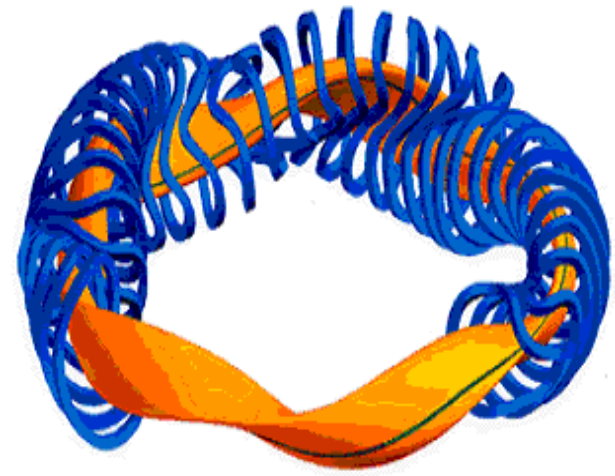


- A estas temperaturas tão elevadas, o plasma não pode tocar nas paredes do recipiente onde está contido.
  - Vamos usar dispositivos experimentais toroidais e conter o plasma através de um campo magnético, de intensidade elevada.
  - As duas configurações mais usadas são o tokamak (onde até agora se obtiveram os melhores resultados) e o stellarator

*Tokamak*



↓ *Stellarator*



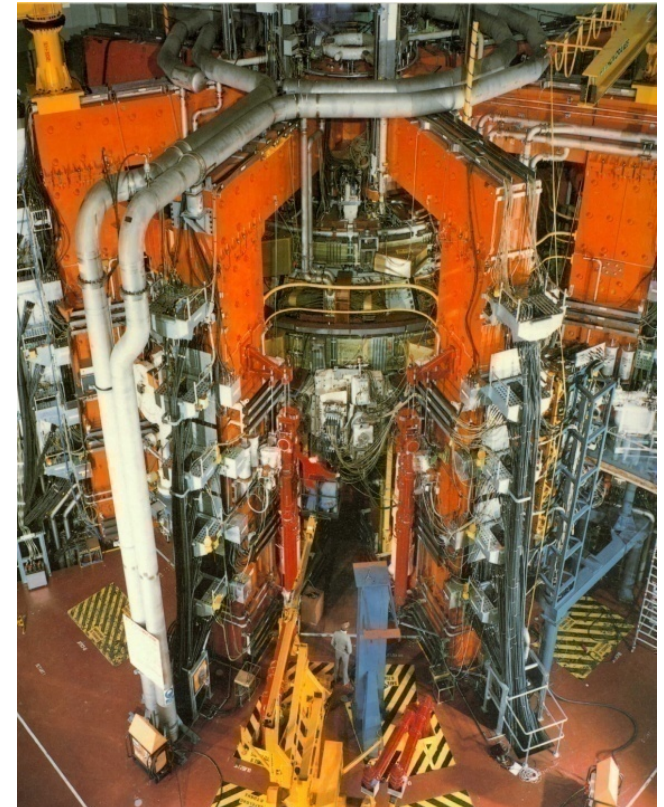
- A existencia de um campo magnético toroidal quebra a estabilidade do plasma, devido à existencia de um gradiente do campo perpendicular ao próprio campo.

- **No plasma existem gradientes de densidade e de temperatura.**
  - **Estes gradientes originam instabilidades**
    - **Estas instabilidades originam perdas de energia e até disrupções, as quais conduzem à redução do tempo de operação e podem originar danos graves nas componentes da câmara de vácuo que estão em contacto com o plasma**
  - **Estas instabilidades têm de ser previstas e controladas. O controlo em tempo real é essencial na operação de um reactor de fusão**
  
- **Um reactor de fusão tem neutrões com energia e fluência muito elevadas.**
  - **Os materiais têm de ter propriedades muito especiais**
  - **A manutenção de um reactor de Fusão é feita remotamente**
    - **Ainda não há materiais qualificados para a operação de longa duração de um reactor de fusão.**

- Um reactor de fusão tem uma quantidade significativa de partículas alfa.
  - Estas partículas alfa podem originar instabilidades e ajudam a aquecer o plasma.
    - A Física das partículas alfa só será estudada no ITER.
    - É necessário desenvolver novos diagnósticos
  
- É necessário obter energia estacionária a partir de um dispositivo que funciona em regime pulsado, devido à saturação do núcleo de ferro do seu solenóide central
  - Há duas formas de resolver este problema:
    - Ou se produz o dobro da energia, sendo metade enviada para a rede e a outra metade armazenada para depois ser enviada para a rede
    - Ou se usam dois reactores a operar alternadamente

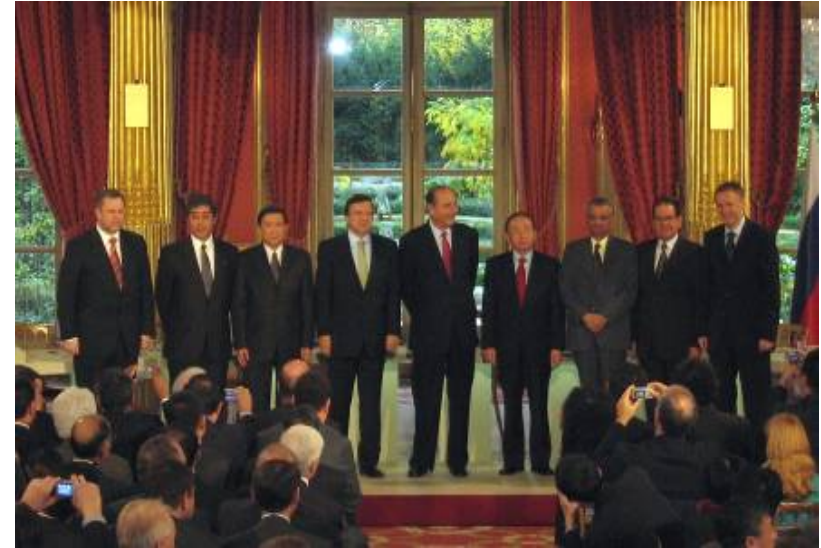
# 6. ESTADO DA INVESTIGAÇÃO EM FUSÃO NUCLEAR

- Duas experiências (TFTR e JET) já conseguiram realizar reacções controladas de Fusão Nuclear, **embora com factores de amplificação de energia (Q) menores que 1.**
- O JET (Joint European Torus) é:
  - ❑ O maior tokamak em operação no Mundo;
  - ❑ A única máquina que actualmente pode operar com misturas de D e T;
  - ❑ A experiência que tem o recorde mundial de amplificação de energia: **Q~0.6, 16MW de potência de fusão, durante 3 s, gastando 25 MW para manter o plasma.**
- O JET é um projecto comunitário, **sediado em Culham**, onde participam todos os Estados Membros da Euratom: **UE mais a Suíça.**



- O ITER “**International Thermonuclear Experimental Reactor**” está actualmente a ser construído em Cadarache, no âmbito de uma ampla colaboração internacional.

- Euratom
- Japão
- Estados Unidos
- Federação da Rússia
- Correia do Sul
- India
- China



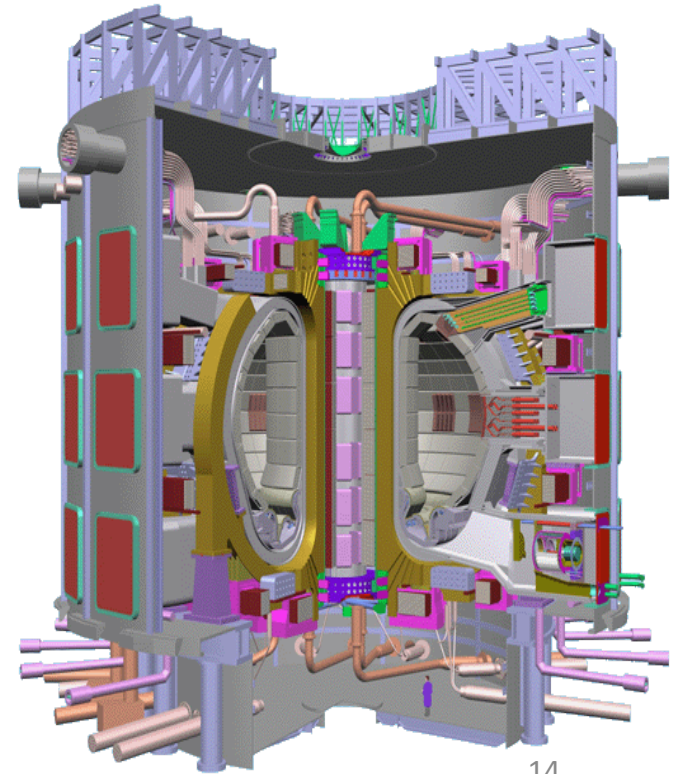
- O ITER será de facto o primeiro **reactor experimental de Fusão Nuclear**.

- **Objectivos**

- Demonstrar a viabilidade científica e técnica da Fusão Nuclear como fonte de energia**

**500 MW, 300 s,  $Q \geq 5-10$**

- Testar a operação em simultâneo de todos os componentes e sistemas necessários à operação de um reactor de Fusão Nuclear**



- **Dificuldades do Projecto**
  - ❑ **Complexidade científica e tecnológica;**
  - ❑ **Contribuições em espécie;**
    - (i) Dificuldades acrescidas na integração;**
    - (ii) Aumento do preço global do projecto;**
  - ❑ **Diferentes estados de desenvolvimento em Fusão Nuclear dos vários Parceiros.**

## 7. FUTURO

- **A nível internacional as próximas etapas são:**
  - **A construção de dispositivos experimentais para a qualificação de materiais para reactores de Fusão Nuclear**
  - **A concepção, projecto e construção de um Reactor de Demonstração (DEMO), cuja missão é provar a possibilidade de gerar energia eléctrica a partir de reacções de Fusão Nuclear.**
  - **A construção de um protótipo de um reactor comercial.**
  
- **A nível Europeu é necessário:**
  - **Manter o carácter integrado do Programa de Fusão da Euratom, através da realização de um European Joint Project (EJP) pelo Eurofusion, um consórcio que integra os vários Membros da Euratom.**
  - **Construir um tokamak de investigação para substituir o JET e formar experimentalistas para a operação do ITER.**
  - **Manter as actividades de I&D em Stellarators**

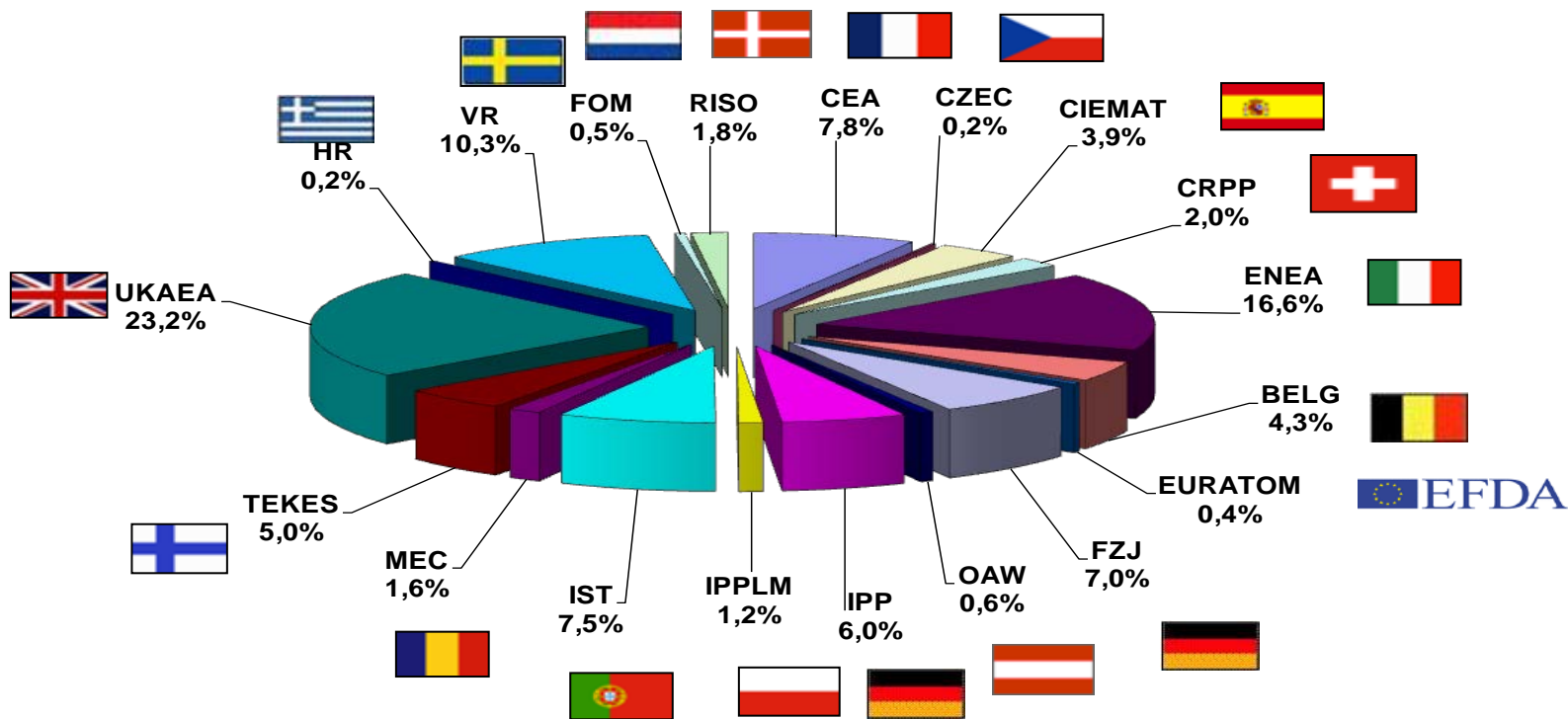


## **8. A FUSÃO NUCLEAR EM PORTUGAL**

- **Portugal participa no Programa de Fusão da Euratom desde a sua adesão às Comunidades Económicas Europeias, tendo sido celebrado em 1 de Janeiro de 1990 um Contrato de Associação entre o Instituto Superior Técnico (IST) e a EURATOM**
- **A Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica foi membra do JET Joint Undertaking**
- **O IST foi membro do European Fusion Development Agreement (EFDA)**
- **A Fundação para a Ciência e a Tecnologia integra o Eurofusion**
- **O Estado Português é membro do European Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy (Fusion for Energy (F4E)).**

- A coordenação técnica da participação Portuguesa no Programa de Fusão da Euratom compete ao Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN), **uma unidade de investigação do IST que tem o Estatuto de Laboratório Associado e que obteve a classificação máxima na avaliação recente das Unidades de Investigação pela FCT.**
  
- O IPFN participa em vários projectos internacionais, sendo líder de projectos nas áreas da:
  - **Reflectometria de Micro-Ondas**
  - **Controlo e Aquisição de Dados**
  - **Manipulação Remota**

- Portugal tem tido uma participação muito significativa no JET, onde tem obtido importantes resultados científicos e tecnológicos.



- No ITER, quer o IPFN quer empresas Portuguesas, já obtiveram contratos em valor total da ordem dos 7 milhões de Euros

## 9. PERSPECTIVAS PARA PAÍSES FORA DO ITER

- **O fornecimento seguro e sustentável de Energia é uma questão que deve ser acompanhada por todos os Países, dada a sua importância para o desenvolvimento e progresso das Populações.**
- **A investigação científica e o desenvolvimento tecnológico em Fusão Nuclear são complexos e dispendiosos, exigindo pessoal e indústrias altamente especializadas.**
- **Contudo, os Países devem acompanhar as actividades de I&D em Fusão Nuclear, de modo a terem os conhecimentos mínimos que lhes permitam acompanhar e compreender os resultados mais recentes, incluindo, no futuro, a operação de um reactor de Fusão Nuclear**

- **A melhor forma que os Países não envolvidos no ITER têm para participarem em actividades de I&D em Fusão Nuclear e a associação com Países envolvidos neste projecto.**
- **Portugal, e em particular o IPFN, estão certamente abertos para celebrarem Acordos de Colaboração com os Países da CPLP.**

# 10. CONCLUSÕES

- **A Fusão Nuclear tem um potencial enorme para dar uma contribuição muito significativa para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> para atmosfera, sem causar problemas graves às gerações futuras.**
- **O tempo que falta até à comercialização desta tecnologia energética depende do tipo (série ou paralelo) e dos montantes dos investimentos.**
- **Os estudos conceptuais apontam para a elevada atractividade económica da Fusão Nuclear.**