

FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA

Paulo Hiroshi Sakanaka
Instituto de Física "Gleb Wataghin"
Universidade Estadual de Campinas
13.100 - Campinas - SP.

É feita uma revisão simplificada sobre a pesquisa de Fusão Termonuclear Controlada, com o intuito de apresentar a sua motivação, o objetivo, as condições necessárias e meios adotados para atingir o objetivo.

Plasma, Fusão, Tokamak

1. INTRODUÇÃO

A procura de fontes alternativas de energia para substituir o petróleo cuja reserva está a caminho da extinção é cada vez mais premente. Com o atual crescimento de consumo de energia o campo petrolífero mundial, com seus 30Q de reserva*, estará fadado a ficar seco dentro de 50 a 70 anos.

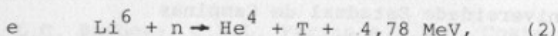
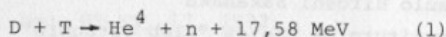
Várias fontes alternativas de energia podem ser optadas, tais como, carvão mineral com 300Q de reserva, urânio com 350Q, solar com 3600Q/ano, deutério (isótopo pesado de hidrogênio) com 4.10^9 Q e outras.

O deutério é utilizado para reações de fusão nuclear que produzem quantidades enormes de energia. Estas reações não produzem isótopos radioativos danosos como as reações de fissão nuclear de urânio.

O deutério é encontrado em quantidades grandes: 0,015% do hidrogênio natural é deutério. Neste sentido a energia de

(*) Define-se Q como unidade de energia igual a 10^{18} BTU ou aproximadamente 10^{21} Joules.

fusão é limpa, geograficamente bem distribuída (pelo menos o combustível) e pode ser considerada inesgotável. As reações de fusão nuclear que serão utilizadas para a obtenção de energia são



sendo D representando o deutério, T o trítio (outro isótopo de hidrogênio), Li o lítio-6, n o neutron e He^4 a partícula α (hélio). O trítio é um isótopo instável com uma vida média de 11 anos, portanto, não existe na natureza. O Li^6 existe na natureza em abundância. O ciclo se processa primeiro produzindo um trítio com a reação de lítio-6 com o neutron e depois trítio reagindo com deutério produzindo um neutron, fechando assim, o ciclo. Só um grama de combustível D-T, quando for totalmente queimado, produz uma quantidade de energia equivalente a 94 MWh.

Perante esta quantidade grande de energia, porém ainda não disponível, é natural que se queira desenvolver pesquisa para encontrar meios de libertá-la.

No capítulo seguinte serão expostas as condições necessárias para esta libertação. Em seguida, serão explorados vários esquemas de pesquisa com o objetivo de resolver problemas de fusão nuclear controlada.

2. CRITÉRIO DE LAWSON

Um reator de fusão termonuclear controlada é mostrado esquematicamente na figura 1. Na câmara de combustão a mistura de deutério com trítio é aquecida a altas temperaturas e confinada por campo magnético. Os neutrons produzidos em reações de fusão nuclear são capturados pelos átomos de lítio na manta aparadora produzindo a reação nuclear (2) aquecendo-se e produzindo trítio. A manta capta também o calor produzido na câmara de reação nuclear. O lítio da manta é então transportado para um trocador de calor onde aquece a água. Esta irá acionar uma máquina térmica. Por seu lado, o

lítio resfriado volta para a manta, deixando no caminho o trítio, o qual misturado com deutério irá suplementar o combustível.

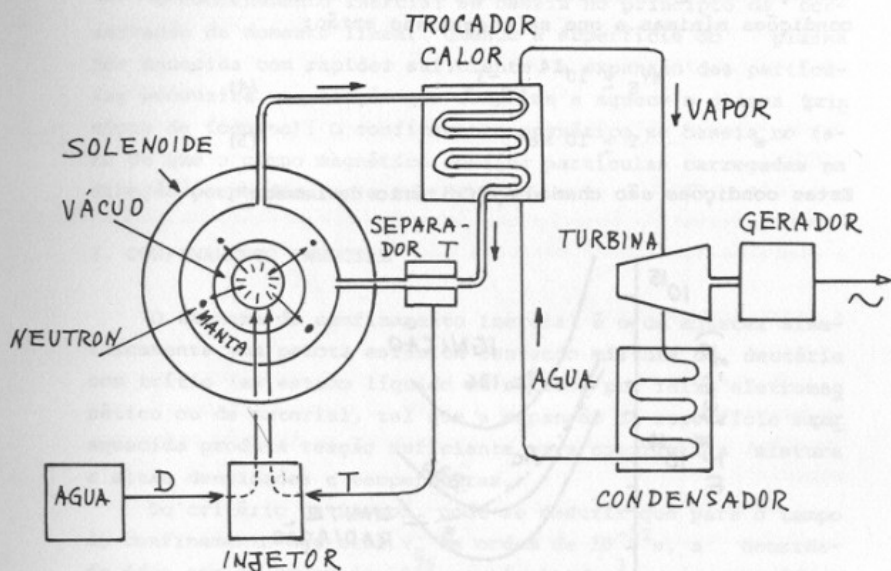


Fig.1 - Esquema de Reator de Fusão Termonuclear Controlada

O calor produzido na câmara de reação e na manta é transformado em energia elétrica com uma eficiência η . O ganho Q seria definido como razão de energia elétrica produzida por energia elétrica necessária para produzir tal energia.

Lawson (1) desenvolveu uma fórmula que relaciona o produto $n\tau_E$, densidade dos íons n por tempo médio de confinamento de energia, τ_E , como uma função única de temperatura do plasma, tendo como parâmetros a eficiência η e o ganho Q .

$$n\tau_E = F(T; \eta, Q) \quad (3)$$

A condição de $Q=1$, a de "breakeven" ou de empate, é apresentada na figura 2 tendo como parâmetro valores de eficiência η . Considerando que o limite de tolerância de material mais resistente é da ordem de 1 MW/m^2 de radiação, o range de variação dos parâmetros, mesmo para $Q=1$, é muito pequeno. As condições mínimas a que se chegam são então:

$$n\tau_E \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s} \quad (4)$$

$$\text{e} \quad T \geq 10 \text{ keV}. \quad (5)$$

Estas condições são chamadas "Critério de Lawson".

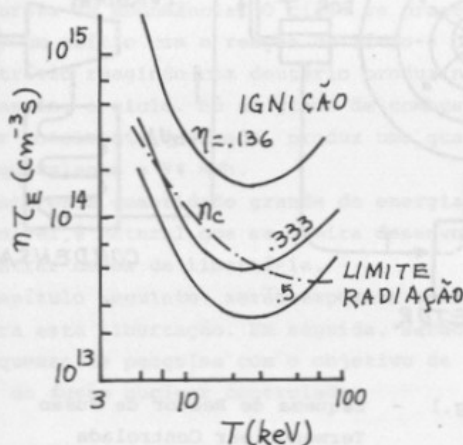


Fig.2 - Critério de Lawson

Supondo-se que as limitações de material contra o fluxo de radiação forem superadas, a temperatura e/ou densidade poderiam ser aumentadas até que a energia produzida na geração de partículas α superasse a energia perdida na forma de calor. Nestas condições não é mais necessário aquecimento externo do plasma atingindo o que é chamada "condição de ignição". Nestas condições, a "chama" de fusão se mantém sozinha.

A temperatura de 10 keV equivale a 100 milhões de graus Kelvin. Qualquer material a esta temperatura, está total-

mente ionizado, chamado estado de plasma, e para confiná-lo é necessário um meio não material.

Dois esquemas básicos de confinamento são pesquisados:

(a) confinamento inercial e (b) confinamento magnético.

O confinamento inercial se baseia no princípio de conservação de momento linear. Quando a superfície do plasma for aquecida com rapidez suficiente, a expansão das partículas produzirá uma reação que comprime e aquece o plasma (princípio de foguete). O confinamento magnético se baseia no fato de que o campo magnético confina partículas carregadas na direção perpendicular a sua direção.

3. CONFINAMENTO INERCIAL

O esquema de confinamento inercial é o de aquecer simetricamente uma pelota esférica contendo mistura de deutério com trítio (em estado líquido ou sólido) por feixe eletromagnético ou de material, tal que a expansão da superfície superaquecida produza reação suficiente para comprimir a mistura a altas densidades e temperaturas.

Do critério de Lawson, pode-se deduzir que para o tempo de confinamento inercial τ_E da ordem de 10^{-12} s, a densidade deve ser da ordem de 10^{26} partículas/cm³, o que significa uma compressão de líquido da ordem de 1000. O feixe para produzir tal façanha pode ser gerado por sistemas de laser ou fontes de feixe de partículas, chamados impulsores.

Para "breakeven" exigem-se sistemas de laser capazes de gerar uma energia da ordem de 100 kJ a 1 MJ com potência de 100 a 1000 TW e eficiência acima de 1%. Exige-se também uma alta eficiência de transferência de energia de laser para plasma. Dois tipos de laser que podem satisfazer estas exigências são os de CO₂ e Nd-Vidro fosfatado ou silicatado. O de CO₂ tem boa eficiência (2%) mas é ineficiente com respeito ao acoplamento de energia entre laser e plasma, devido a comprimento de onda longo. Os sistemas de laser de Nd-Vidro têm bom acoplamento mas baixa eficiência (~ 0,1%).

Os dois maiores sistemas de laser atualmente em operação são os do Instituto de Laser de Osaka, Japão, com seu siste

ma de CO_2 com 10kJ e 10TW (Lekko VIII) iniciado em 1982 e o de Nd-Vidro Fosfatado com 20 kJ e 40 TW (Gekko XII) iniciado em 1982 (2). Nos Estados Unidos deverão por em operação o sistema de CO_2 em Los Alamos (Antares) ainda este ano, com 40 kJ e 40 TW. O sistema de laser de Nd-Vidro em Livermore (Shiva/Nova) com seus 70 kJ e 140 TW (talvez) está previsto para entrar em operação em 1985.

Outros tipos de laser estão também sendo pesquisados, ca da um com características interessantes. São lasers de I, HF e KrF.

Com relação a impulsores materiais, estão em desenvolvimento feixes de íons leves, íons pesados e elétrons, porém, a pesquisa ainda está atrasada em relação a do laser.

4. CONFINAMENTO MAGNÉTICO

O sistema de confinamento magnético é caracterizado pela contenção de plasma pelas linhas de campo magnético que impede a saída de partículas carregadas na direção perpendicular.

Há muitos sistemas em estudo, cada um com configurações de linhas magnéticas diversas. Estes sistemas podem ser clas sificados segundo vários critérios. Com a relação a geome- tria os sistemas podem ser toroidal, linear e "outros"; com relação a topologia os sistemas são fechados ou abertos, con forme se as linhas magnéticas se fecham ou estão abertas; quan- to a regime de operação podem ser pulsado ou contínuo. Há uma figura de mérito chamada β , relação entre a pressão cinética e total (soma de pressões cinética e magnética), que é muito importante não só do ponto de vista da estabilidade do plas- ma como também do ponto de vista da eficiência de confina- mento. Com relação ao desenvolvimento, alguns estão altamen- te desenvolvidos a ponto de estarem perto da demonstração de "breakeven", chamada viabilidade científica, enquanto que ou- tros estão no estágio de demonstração do princípio de opera- ção. Porém, o caminho a seguir é ainda longo: após "breakeven", virá a demonstração da viabilidade de engenharia seguida da viabilidade econômica. O cronograma previsto para o desenvol-

vimento do primeiro reator de fusão nuclear controlada comercial é entre 30 a 40 anos, tempo suficiente para novos conceitos para sistemas de confinamento e novas tecnologias serem desenvolvidas.

A tabela I mostra um quadro atual de pesquisa para confinamento magnético. A figura 3 mostra o avanço da pesquisa para várias linhas de confinamento.

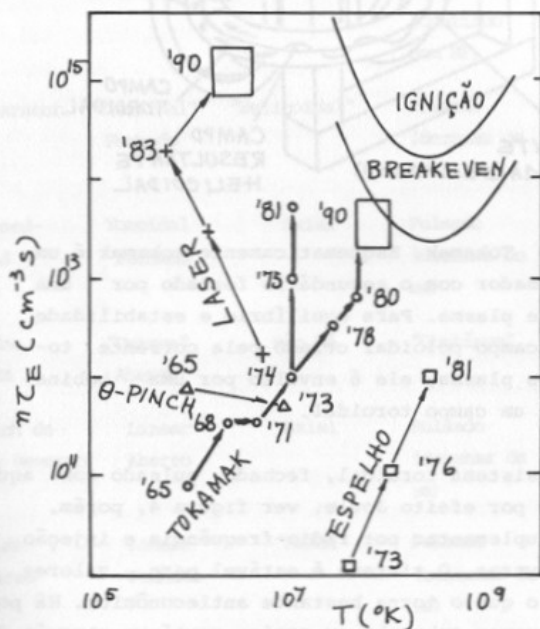


Fig.3 - Avanço na direção de "breakeven" para a pesquisa: tokamak, espelho, θ -pinch e laser.

A linha tokamak é presentemente a mais promissora, e portanto, maior esforço e maior investimento estão sendo aplicados nesta pesquisa.

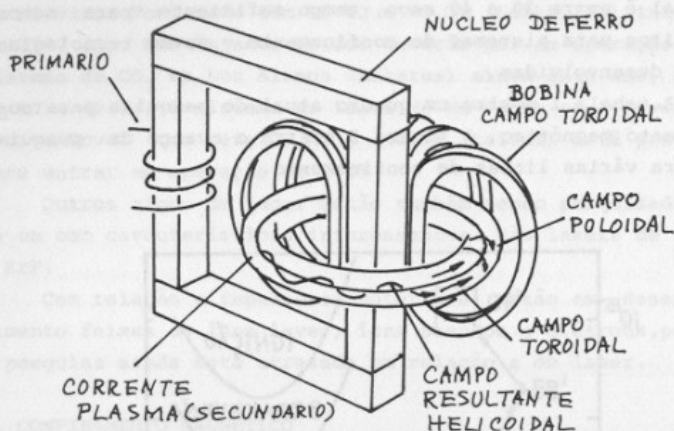


Fig.4 - Tokamak. Esquemáticamente tokamak é um transformador com o secundário formado por uma espira de plasma. Para equilíbrio e estabilidade, além do campo poloidal criado pela corrente toroidal no plasma, ele é envolto por uma bobina que cria um campo toroidal.

Tokamak é um sistema toroidal, fechado, pulsado com aquecimento inicial por efeito Joule, ver figura 4, porém, com aquecimento suplementar por rádio-frequência e injeção de partículas neutras. O sistema é estável para valores de β abaixo de 5% o que o torna bastante antieconômico. Há possibilidade de operar tokamaks em regime contínuo através da geração de corrente toroidal, posicionando a antena tal que propagação de ondas de rádio-frequência tenha um sentido preferencial.

Atualmente, quatro grandes tokamaks estão no cenário internacional. O TFTR, dos Estados Unidos em Princeton, que iniciou a operação em 12/1982, o JET do Euratom em Culham, Inglaterra, cuja operação se iniciou em 06/1983, o JT-60 do Japão em Tokai com operação prevista para 1985 e T-15 da União Soviética. Todos estes tokamaks tem custado entre 200 a 500 M\$.

Tabela I. Classificação de Sistemas de Confinamento Magnético para Fusão Termonuclear Controlada.

(Parte A)

Sistemas	Geometria Topologia	Simetria	Regime	Beta
Tokamak	Toroidal Fechado	Axial	Pulsado (10ms-10s) (Contínuo com RF)	baixo < 5%
Stellarator	"Toroidal" Fechado	"Helicoidal"	Pulsado (dezenas de ms)	Baixo < 10%
Reversed- Field Pinch	Toroidal Fechado	Axial	Pulsado (dezenas de ms)	Intermediário < 20%
Espelho Tandem	"Outros" Aberto	não há	"Contínuo"	Intermediário < 20%
θ-Pinch de Campo Reverso	Linear Aberto	Axial	Pulsado (dezenas de μs)	Alto > 50%
Toroide Compacto	Linear Fechado	Axial	Pulsado (centenas de μs)	Intermediário < 20%

(Parte B)

Sistemas	Aquecimento	Estágio de Desenvolvimento $n\tau_E$	Investimento
Tokamak	Ohmico RF* NBI**	demonstração de "breakeven" $n\tau_E - 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$	Centenas de MUS\$
Stellarator	RF NBI	Intermediário	Dezenas de MUS\$
Reversed-Field Pinch	Turbulência	Começo do Intermediário	Alguns MUS\$
Espelho Tandem	NBI RF	Intermediário	Dezenas de MUS\$
θ -Pinch de Campo Reverso	Implosão Magnética	Intermediário	Alguns MUS\$
Toróide Compacto	Implosão Magnética	Demonstração do Princípio de Operação	< MUS\$

*RF - Aquecimento por rádio-frequência

**NBI - Aquecimento por injeção de partículas neutras

e pretendem demonstrar a viabilidade científica ou atingir condições próximas às da "breakeven".

5. PROGRAMA DE FUSÃO NO BRASIL

No Brasil seis grupos de plasmas fazem pesquisas com o plasma de interesse a fusão nuclear. São eles a UNICAMP, a USP, o INPE, o CTA, a UFF e a UFRGS.

O grupo da UNICAMP tem a linha de pesquisa com plasmas de alto-beta e aquecimento por rádio-frequência, tendo como sistemas principais o theta-pinch e toroide compacto. A USP se concentra em tokamak pequeno; o INPE a tecnologia e aquecimento por rádio-frequência, o CTA a fusão inercial com la ser de CO_2 , a UFRGS interação de ondas eletromagnéticas com plasma.

Há muita interação entre grupos, tendo já estabelecido um programa nacional de física de plasma e fusão nuclear ela borada com a iniciativa do Ministério das Minas e Energia.

6. CONCLUSÃO

A fusão Termonuclear Controlada abriria ao Mundo uma fonte inesgotável de energia limpa.

A ciência e tecnologia exigidas para tal liberação não estão ainda ao alcance da humanidade, porém, a pesquisa está cada vez mais intensificada e, espera-se, que dentro de 40 anos teremos reator de fusão nuclear comercial.

REFERÊNCIAS

- (1) J.D. Lawson, Proc. Phys. Soc. (London), B70, (1957) 6.
- (2) C. Yamanaka (Ed.) Proc. IAEA Technical Comm. Meeting on Advances in Inertial Confinement Fusion Research (Kobe, Japan), (1984), 13.

Projeto financiado pela FINEP, CNEN, CNPq e FAPESP.