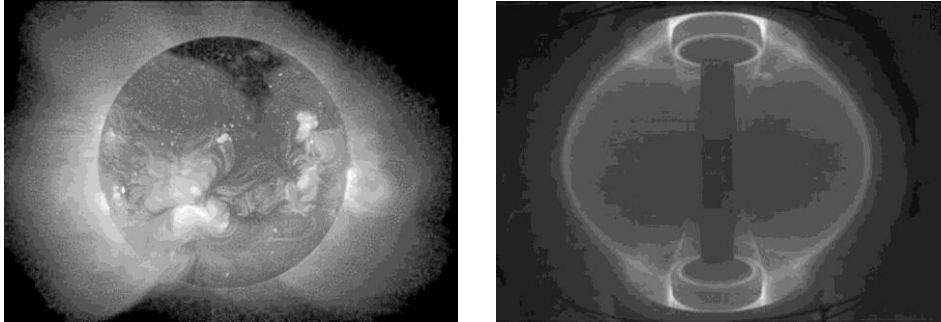


Tokamak

A vida na Terra e todas as outras formas de energia têm origem na fusão.



O objetivo das pesquisas em fusão trazer para Terra a mesma fonte de energia existente nas estrelas.

Fusão na natureza - As estrelas produzem sua própria energia pela fusão nuclear de átomos leves. A fusão do hidrogênio, por exemplo, mantém o Sol brilhante fornecendo energia por bilhões de anos.

Comentário histórico - Em 1929 Robert d'E. Atkinson e Fritz G. Houtermans propuseram que a energia do Sol seria liberada por reações termonucleares. Entretanto, o processo detalhado pelo qual as estrelas geram sua energia pela fusão do hidrogênio (ciclos do hidrogênio e do carbono) foi descrito independentemente por Hans Albrecht Bethe e Carl Friedrich von Weizsäcker somente em 1938.

Fusão no laboratório - O mais audacioso e difícil projeto defrontado por cientistas e engenheiros, até o momento, é o de criar e controlar na Terra a fonte de energia das estrelas. As reações de fusão requerem temperaturas acima de 100 milhões de graus Celsius, quando toda a matéria está no estado de plasma totalmente ionizado. É necessário também que uma certa quantidade de plasma de deutério-trício, submetida a estas altas temperaturas, seja confinada por campos magnéticos intensos durante um tempo suficiente para que as reações de fusão possam acontecer e inflamar os reagentes, mantendo a temperatura do plasma.

A principal meta da pesquisa em fusão é desenvolver centrais elétricas para gerar eletricidade de uma maneira eficiente. Atualmente, as condições alcançadas em laboratório estão próximas das condições de ignição necessárias para um reator a fusão. Entretanto, os estudos prosseguem para resolver os complexos problemas que envolvem o plasma de fusão.

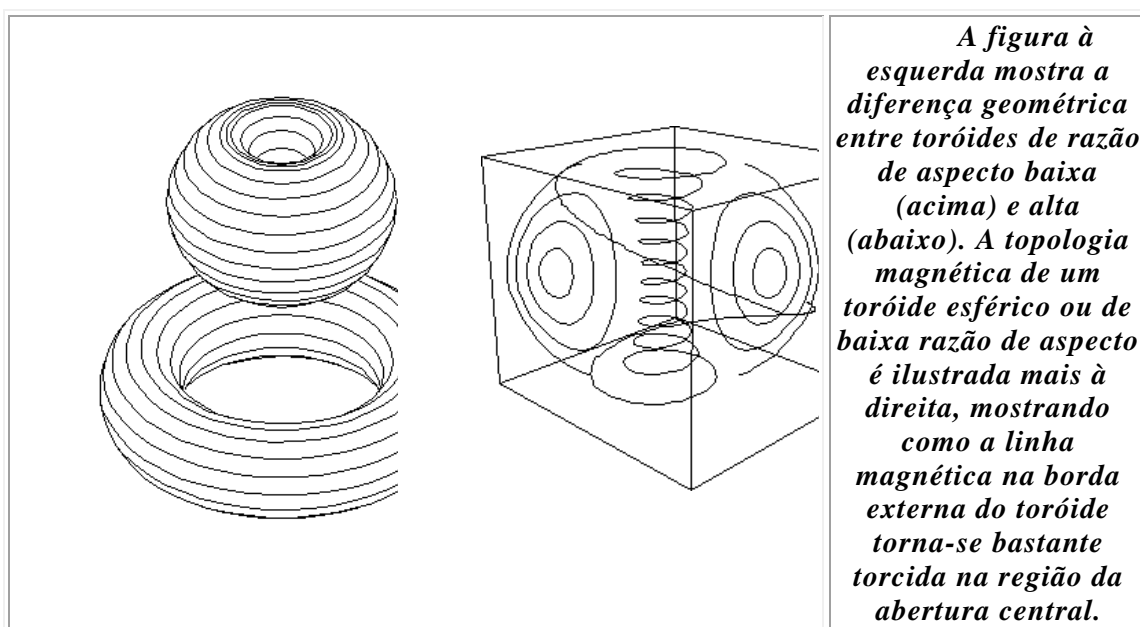
Durante os últimos 25 anos, houve um aumento considerável da potência produzida pela fusão em laboratório. Num futuro próximo todas as condições de plasma necessárias para iniciar e sustentar um plasma de fusão termonuclear serão plenamente atingidas. Todavia, muitos problemas tecnológicos ainda terão que ser resolvidos visando um reator economicamente viável.

O tokamak é o engenho mais promissor, até o momento, para a obtenção da fusão termonuclear. Consiste num toróide (formato de um pneu de carro) no qual uma câmara de vácuo contém um anel de plasma confinado por campos magnéticos retorcidos.

Nota - a palavra tokamak é um acrônimo das palavras russas *toroidal'naya kamera magnitnoi katushki*, que Toróide Esférico

O toróide esférico é um tokamak no qual a abertura central do toróide é reduzida ao tamanho mínimo tecnicamente factível. Em geral, esta abertura central deve ter um tamanho suficiente para conter a parte interna das bobinas toroidais. Nos projetos atuais, esta abertura deve ser suficientemente grande para acomodar também o solenóide do sistema de aquecimento ôhmico. Na verdade, um dos tópicos mais importantes da pesquisa em tokamaks, atualmente, é o estudo e desenvolvimento de métodos eficientes de geração e sustentação de corrente no plasma em estado estacionário, ou seja, sem que se use o efeito pulsado do transformador e eliminando o solenóide ôhmico. Isto será possível, em grande parte, por meio do controle preciso da corrente termoelétrica de auto-sustentação (corrente de reforço, ou usando o termo em inglês, corrente de *bootstrap*) dentro do plasma. O desenvolvimento de métodos apropriados de aquecimento auxiliar e de controle do perfil de corrente se torna ainda mais necessário em tokamaks esféricos.

Razão de aspecto -A característica geométrica mais importante num tokamak é a razão de aspecto; um número maior do que um e que corresponde à razão entre os raios maior e menor do toróide.



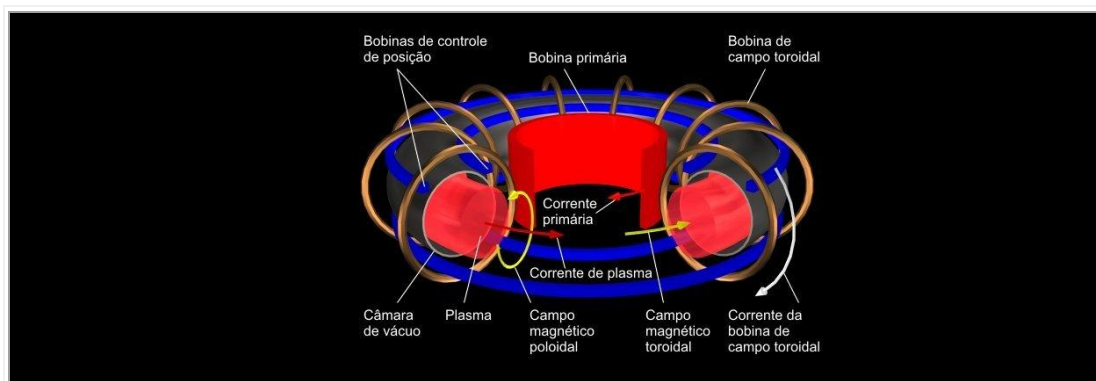
Tokamaks de alta e baixa razão de aspecto - A operação nos grandes tokamaks existentes até o momento depende basicamente de campos magnéticos toroidais intensos e do fato de que estas máquinas devem ter dimensões relativamente grandes. Tipicamente, o componente toroidal da indução magnética nestas máquinas é da ordem de $B \sim 4$ T, no centro do plasma, e o raio maior do toróide é de aproximadamente $R \sim 3$ m. Estes tokamaks convencionais têm razão de aspecto $A = R/a \sim 3$, considerada alta para os padrões atuais de

confinamento magnético ($a \sim I$ m se refere ao raio menor do plasma). Os tokamaks de baixa razão de aspecto, ou tokamaks esféricos, têm a vantagem de serem mais compactos para um dado volume de plasma e de operarem com campos magnéticos menos intensos. Estas características levam naturalmente a custos menores para a construção destas máquinas. O aumento de estabilidade do plasma, devido às linhas fortemente torcidas na região da abertura central destes dispositivos, faz com que os tokamaks esféricos possam operar com razões elevadas de pressão do plasma em relação à pressão magnética, o que é bastante vantajoso para futuros reatores. Entretanto, esta vantagem só se torna efetiva para razões de aspecto menores que $A \sim$

Tokamaks

Tokamaks significam câmara toroidal e bobinas magnéticas.

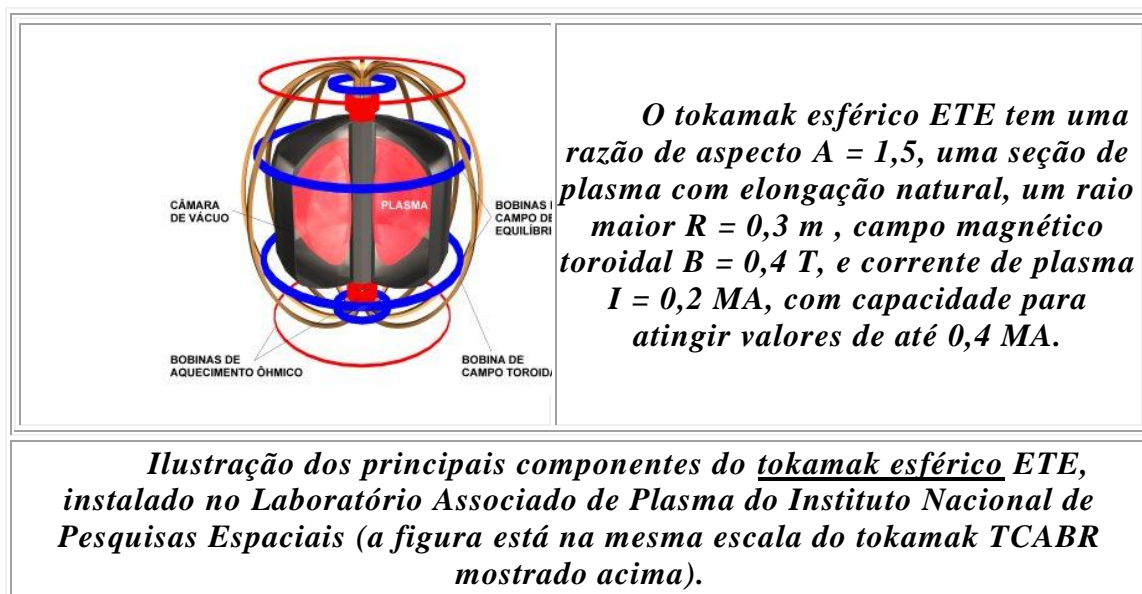
Configuração de um tokamak - Uma corrente elétrica transitória que circula na bobina primária de um tokamak induz no anel de plasma uma corrente, que servirá tanto para aquecê-lo como para produzir um campo magnético poloidal. O outro componente importante do campo magnético corresponde ao campo magnético toroidal, gerado por correntes elétricas que circulam nas bobinas de campo toroidal ao redor do toróide. Além disso, correntes que circulam nas bobinas de controle de posição geram campos magnéticos auxiliares que modificam o campo poloidal, equilibrando o anel de plasma e controlando sua posição dentro da câmara. A combinação dos campos poloidal e toroidal conduz ao confinamento adequado do plasma em tokamaks.



Principais componentes de um sistema de confinamento magnético do tipo tokamak.

Aquecimento de plasma - A maneira mais eficiente de aquecer o plasma num tokamak é fazer com que circule através dele uma corrente induzida pela bobina primária. Esta bobina representa o circuito primário de um transformador no qual o anel de plasma constitui o circuito secundário. Funciona como um aquecedor elétrico onde o calor gerado depende da intensidade da corrente e da resistência elétrica. Entretanto, a resistividade do plasma diminui à medida que sua temperatura aumenta, tornando o processo de aquecimento menos eficiente. A temperatura máxima que pode ser atingida em tokamaks por aquecimento resistivo (aquecimento ôhmico) é de aproximadamente 3×10^7 K, duas vezes maior que a temperatura no centro do Sol, mas que é menor do que a necessária para fazer com que um reator funcione, aproximadamente 10^8 K. Em experimentos que utilizam máquinas do tipo tokamak, técnicas de aquecimento auxiliar tem sido utilizadas para atingir temperaturas de até 5×10^8 K (mais que 30 vezes a temperatura no centro do Sol). Os dois métodos principais de aquecimento adicional

consistem na injeção de feixes de partículas neutras de alta energia e de ondas de radiofrequência de vários tipos.



http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Tokamaks.htm

Reações de Fusão

Reações nucleares - Conforme a equação $E = mc^2$, deduzida por Albert Einstein em 1905, pode-se obter energia a partir de reações entre núcleos atômicos que originem produtos com massa inferior à massa inicial do sistema. A equivalência entre massa e energia é de 931,5 MeV por unidade de massa atômica ($1\text{ eV} = 1,602177 \times 10^{-19}\text{ J}$, $1\text{ u.m.a.} = 1,660565 \times 10^{-27}\text{ kg}$). A energia nuclear pode ser obtida a partir da ligação entre dois núclídeos leves (fusão) ou da cisão de núcleos pesados (fissão).

A energia disponível por núcleo é dada pela fração de empacotamento $P = (M - A)/A$, onde M é a massa real do núcleo dada em u.m.a. e A é o número de massa atômica do núcleo. Por convenção, o carbono 12 possui massa atômica exatamente igual a 12 u.m.a, correspondendo a $P=0$. Os núcleos mais estáveis estão na região compreendida entre o argônio e o criptônio.

Comentário Histórico - Francis William Aston construiu o primeiro espectrômetro de massa eficiente em 1919, baseado num instrumento inventado por Joseph John Thomson em 1912. Aston fez medidas precisas das massas atômicas de quase todos os isótopos que ocorrem naturalmente. Seus estudos mostraram, por volta de 1927, que os núcleos de dimensão média, nas vizinhanças do ferro, são os mais empacotados. Energia seria liberada se esses núcleos fossem produzidos a partir de reações envolvendo núcleos provenientes de um dos dois extremos do gráfico acima. Na realidade, seus estudos já mostravam que a fusão nuclear produziria bem mais energia por unidade de massa do que a fissão.

Reações de fusão - A principal reação de fusão que ocorre no interior do Sol se dá entre dois prótons (núcleos de hidrogênio), liberando energia numa taxa

extremamente lenta que não apresenta importância para produção de energia industrial (esta reação resulta em alta geração de energia no Sol devido à enorme quantidade de hidrogênio termicamente isolado existente no seu centro). Para aplicações em fusão, as reações mais importantes envolvem deutério e trício (os isótopos mais pesados do hidrogênio) e o isótopo raro de hélio 3. A reação que ocorre mais facilmente é aquela em que o deutério se funde com o trício produzindo uma partícula alfa (núcleo de hélio 4) e um nêutron, conforme a reação 3 abaixo.

1. $D^2 + D^2 \rightarrow (He^3 + 0,82 \text{ MeV}) + (n^1 + 2,45 \text{ MeV})$
2. $D^2 + D^2 \rightarrow (T^3 + 1,01 \text{ MeV}) + (H^1 + 3,03 \text{ MeV})$
3. $D^2 + T^3 \rightarrow (He^4 + 3,52 \text{ MeV}) + (n + 14,06 \text{ MeV})$
4. $D^2 + He^3 \rightarrow (He^4 + 3,67 \text{ MeV}) + (H^1 + 14,67)$

- As reações 1 e 2 têm a mesma probabilidade de ocorrer.
- A seção de choque da reação 3 é aproximadamente 100 vezes maior do que a das reações 1 e 2 para energias abaixo de 100 keV; uma vez que T^3 é produzido como produto da reação 2, a reação 3 ocorrerá espontaneamente.
- A reação 4 predomina para altas energias de impacto, acima de 400 keV.

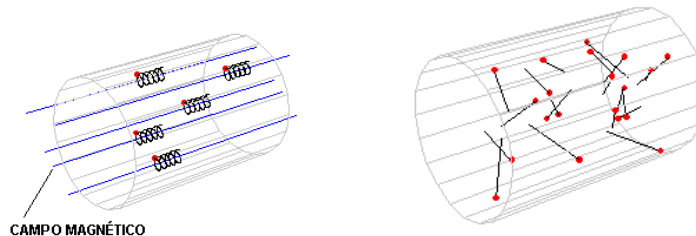
Para que uma reação de fusão possa ocorrer, os núcleos devem colidir com uma energia suficientemente alta para vencer a barreira coulombiana (força de repulsão entre cargas de mesmo sinal), de maneira que a distância de separação seja da ordem das dimensões do núcleo atômico. O efeito de tunelamento quântico é mais forte nas reações deutério-trício, resultando numa seção de choque elevada para energias de impacto relativamente baixas.

Comentário Histórico - Os cientistas Ernest Rutherford e Marcus Laurence Elwin Oliphant demonstraram pela primeira vez, em 1934, a praticabilidade das reações de fusão exotérmicas envolvendo átomos leves. Eles usaram dêuterons (núcleos de deutério, o isótopo estável do hidrogênio) que eram acelerados em tubos de descarga de alta intensidade bombardeando alvos sólidos de deutério. O resultado foi a formação de hélio 3 e um nêutron com energia próxima de 2,5 MeV (reação 1 acima). Para dêuterons com energia de 100 keV a liberação de nêutrons por dêuteron era de apenas 1 em 10 milhões. No mesmo ano, juntamente com Paul Harteck, eles voltaram a bombardear dêuterons em alvos de deutério e obtiveram trício, o isótopo de hidrogênio que é moderadamente radioativo, novamente numa reação exotérmica (reação 2). Este tipo de bombardeamento não é eficiente para a produção de energia uma vez que uma grande quantidade de energia é utilizada para fazer com que poucos núcleos se fundam. Para que as reações de fusão sejam eficientes, o processo deve ocorrer de forma auto-sustentável, como no interior do Sol.

Confinamento de Plasma

Confinamento gravitacional - A força gravitacional nas estrelas comprime a matéria, em sua maior parte composta de hidrogênio, a níveis de densidade e temperatura muito elevados no centro das estrelas, fazendo com que o processo de fusão encontre seu ponto de ignição. Este mesmo campo gravitacional compensa as enormes forças de expansão térmica fazendo, desta forma, com que as reações termonucleares numa estrela, assim como no Sol, ocorram de maneira controlada e estável.

Confinamento magnético - Sem contar com a massa necessária para obter campos gravitacionais intensos, a fusão a ser obtida em laboratório na Terra deve ser controlada por outros meios que não os gravitacionais. Além disso, é praticamente impossível obter em laboratório densidades tão altas quanto às que existem no centro das estrelas. Torna-se mais factível, para a obtenção da fusão controlada, trabalhar com densidades de gás mais baixas e aumentar a temperatura para níveis bem maiores do que aqueles existentes no centro do Sol. Em tais níveis de temperatura toda a matéria se encontra na forma de plasma. Felizmente, o plasma consiste em um gás de partículas carregadas sujeitas a interações eletromagnéticas podendo, portanto, ser confinado por campos magnéticos que possuam uma geometria apropriada. O campo magnético age como um recipiente que não sofre a ação do calor, como ocorre com recipientes sólidos comuns, e não constitui uma fonte de impurezas que, em excesso, podem evitar com que as reações de fusão ocorram.



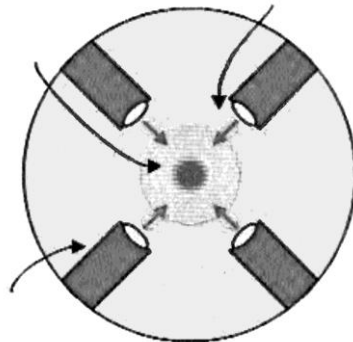
O movimento de partículas carregadas eletricamente fica restrito pela presença de um campo magnético. Na ausência de um campo magnético confinante, conforme ilustração à esquerda, partículas aquecidas movem-se em linhas retas de maneira aleatória, atingindo rapidamente as paredes do recipiente que as confinam. Quando um campo magnético é aplicado, conforme ilustração mais à direita, as partículas carregadas seguem um movimento espiralado ao redor das linhas de campo. Com a presença do campo magnético, o movimento das partículas através das linhas de campo é restrito, reduzindo-se, assim, o acesso às paredes do recipiente.

Confinamento inercial - Na fusão inercial um pulso de radiação é focalizado por um impulsor numa pequena cápsula de combustível, aquecendo rapidamente sua superfície. Uma onda de choque dirigida para o interior é então produzida pela expansão do material quente na superfície da cápsula, comprimindo o núcleo da mesma. Quando a mistura deutério-trício no núcleo é comprimida a densidades de aproximadamente 10^{30} partículas/m³, ocorre a ignição a temperaturas de 10^8 K. A inércia mantém o material da cápsula confinado durante tempo suficiente para que as reações

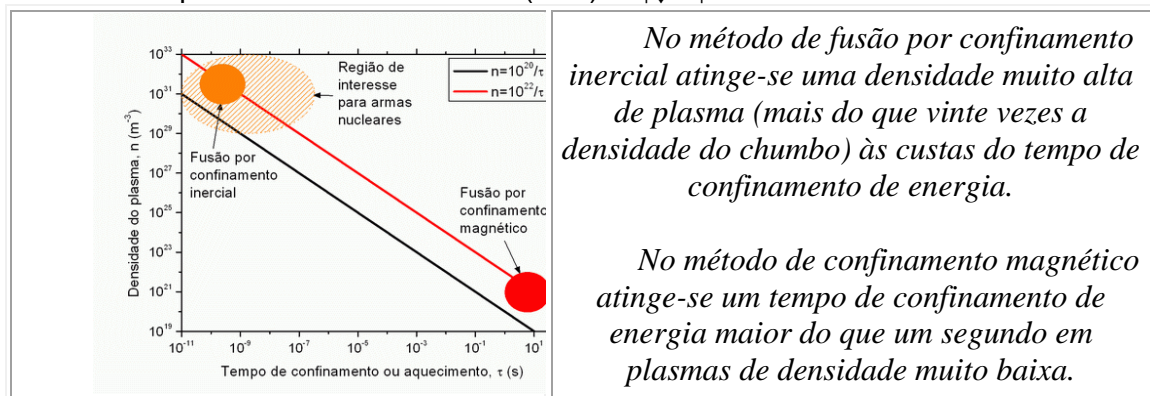
termonucleares ocorram em níveis tais que a energia liberada seja maior que a depositada pelo pulso de radiação. O pulso de radiação produzido pelo impulsor pode ser a luz de uma fonte de laser de alta energia focalizado diretamente no alvo ou, mais efetivamente, raios-X criados por meio de luz laser que atinge as paredes internas de um cilindro metálico oco que contém o alvo da fusão. Outros conceitos de impulsores inerciais compreendem aceleradores de íons leves ou pesados. Grandes instalações a laser estão atualmente se aproximando das condições de ignição por confinamento inercial.

Processos de obtenção - Confinamento inercial

- Minúsculas porções de D/T sólidos são rapidamente comprimidos e aquecidos por ondas de choque provenientes de laser de alta potência (aplicação militar)
- As partículas são confinadas pela própria inércia



Fusão por Confinamento Inercial (ICF): $n \uparrow \downarrow T \uparrow$

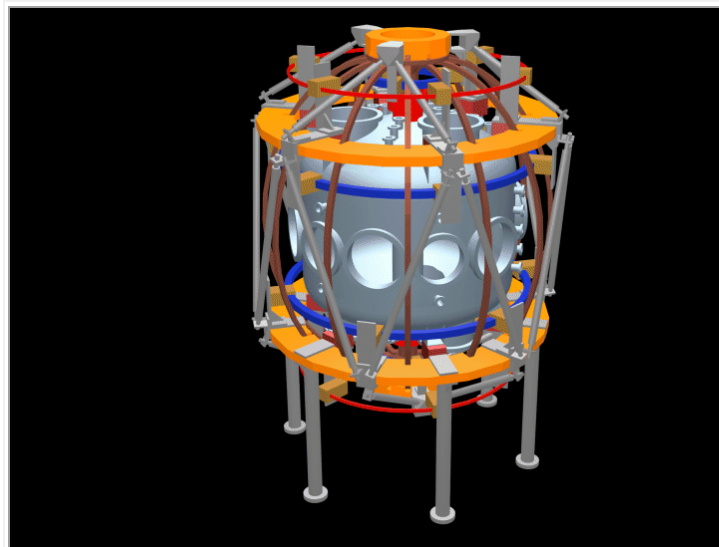


[http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Confinamento de Plasma.htm](http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Confinamento_de_Plasma.htm)

O Experimento Tokamak Esférico ETE

O ETE (**Experimento Tokamak Esférico**) é uma máquina dedicada ao estudo de plasma em tokamaks de baixa razão de aspecto. O ETE foi inteiramente projetado e construído no Laboratório Associado de Plasma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Os principais parâmetros do ETE são: raio maior $R = 0,30$ m, razão de aspecto $A = R/a = 1,5$ (a é o raio menor do plasma), indução magnética toroidal $B = 0,4$ T, e corrente de plasma $I = 0,2$ MA. A corrente de plasma pode atingir $\sim 0,4$ MA, dependendo do aumento da capacidade das fontes de potência atualmente disponíveis, e de um possível aumento do campo magnético para níveis em torno de 0,6 T. A razão de aspecto pode ser reduzida para até 1,3 se o solenóide de aquecimento ôhmico for

removido, mas isto depende dos desenvolvimentos futuros na área de geração de corrente não indutiva (sem usar o efeito transformador).



Visão artística do Experimento Tokamak Esférico ETE.

A configuração de baixa razão de aspecto requer um projeto cuidadoso das bobinas toroidal e poloidais, da câmara de vácuo, da estrutura mecânica e das peças que defrontam o plasma, que se devem adaptar ao volume central limitado do toróide.

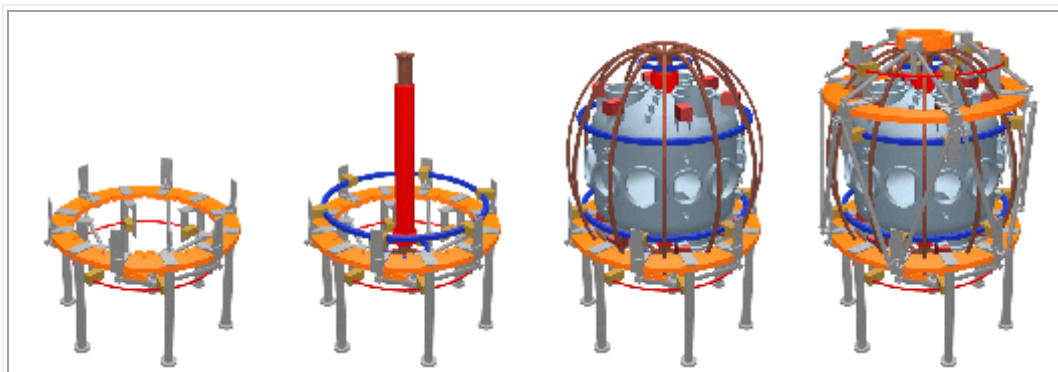


Ilustração de vários estágios de montagem do toróide esférico ETE.

Objetivos gerais do experimento ETE:

- Explorar as propriedades dos tokamaks de baixa razão de aspecto.
- Desenvolver diagnósticos de plasma (instrumentos para medidas em plasmas) apropriados para tokamaks esféricos.
- Treinar pessoal na operação de tokamaks (O ETE está aberto para colaboração com outros laboratórios e universidades).
- Explorar novas idéias no que diz respeito à geração de corrente durante a fase de iniciação do plasma e operação em estado estacionário. Realizar estudos para melhorar o confinamento do plasma (dependendo da implementação de métodos de aquecimento auxiliar).

Programa de pesquisa a curto prazo:

- Estudar o domínio dos parâmetros de operação dos tokamaks esféricos (regime ôhmico, valor mínimo da corrente nas bobinas do campo toroidal em relação à corrente de plasma, estabilidade do plasma).
- Estudar fenômenos do plasma da borda por meio de diagnósticos apropriados (reciclagem de partículas, impurezas, excitação de campo elétrico radial).
- Quem está envolvido nesta pesquisa?

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Dr. Edson Del Bosco | 7. Dr. Pedro José de Castro |
| 2. Dr. Gerson Otto Ludwig | 8. Mestre Carlos Shinya Shibata |
| 3. Dr. Joaquim José Barroso de Castro | 9. Mestre Joaquim Paulino Leite Neto |
| 4. Dr. Luiz Ângelo Berni | 10. Mestre Júlio Guimarães Ferreira |
| 5. Dra. Maria Célia Ramos de Andrade | 11. Mestre Rogério de Moraes Oliveira |
| 6. Dr. Mário Ueda | 12. Dr. Luis Filipe F. P. Wiltgem Barbosa* |
- *colaboração com UNIVAP

Outros grupos brasileiros com atividades experimentais em plasma de fusão

- O Departamento de Física Aplicada da Universidade de São Paulo (<http://www.if.usp.br>) desenvolve pesquisa em plasma de fusão em configurações de tokamak convencionais. As principais linhas de pesquisa para plasmas de fusão, nesta instituição, compreendem o aquecimento de plasmas e fenômenos de transporte induzidos por ondas de Alfvén no tokamak TCABR. O Instituto de Física da Universidade de Campinas (<http://www.ifi.unicamp.br>) e o Departamento de Física e Química da Universidade do Estado de São Paulo em Guaratinguetá (<http://www.feg.unesp.br>) se dedicam, principalmente, ao desenvolvimento de diagnósticos em plasmas quentes apropriados para tokamaks e constrições azimutais (theta-pinches).



http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Tokamak_Esferico_ETE.htm

Fusão nuclear

Combustíveis para a fusão

Os “combustíveis ” para um reator de fusão são:
Deutério e Lítio

.Deutério (D): isótopo estável com abundância de 1 parte em 6700 (30g/m³)

.Trítio (T): isótopo radioativo ($T_{1/2} = 12,3$ anos) decaimento beta para 3 He

D → praticamente inesgotável: obtido de águas de lagos e oceanos

T → não existe na natureza e deve ser produzido artificialmente

.A principal fonte de trítio é o lítio através do bombardeamento por nêutrons

$6 \text{ Li} + n \text{ (lentos)} \rightarrow \text{T} + 4 \text{ He} + 4,8 \text{ MeV}$

$7 \text{ Li} + n \text{ (rápidos)} \rightarrow \text{T} + 4 \text{ He} + n \text{ (lentos)} + 2,5 \text{ MeV}$

D → U\$1000/kg

6 Li → U\$40/kg Custo: Reservas:

(na taxa atual de consumo)

D → >Milhões de anos 6 Li → >30.000 anos (crosta)

Edson Del Bosco

Laboratório Associado de Plasma - LAP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

bosco@plasma.inpe.br

www.plasma.inpe.br

Fusão termonuclear controlada

III Encontro de Verão de Física do ITA
Instituto Tecnológico da Aeronáutica .ITA/CTA
18 a 22 de fevereiro de 2008

