

PROGRAMA NACIONAL DE ENERGIA POR FUSÃO

RESUMO

A fusão nuclear – processo de energização das estrelas – promete uma fonte quase inesgotável de energia com baixo impacto ambiental. O ideal da fusão vem sendo perseguido desde o início da era atômica, encontrando-se em vias de se tornar realidade. Em vista do grande progresso atingido nas últimas décadas, há condições de se dar o passo decisivo, envolvendo a construção de um reator destinado a gerar mais energia que a consumida, e a produzir uma reação auto-sustentada. Assim, até o final de 2002 a União Européia, o Japão e a Rússia devem chegar a um acordo sobre a localização de uma máquina internacional – International Thermonuclear Experimental Reactor - Fusion Energy Advanced Tokamak (ITER-FEAT) – capaz de estabelecer definitivamente as bases experimentais da energia por fusão utilizando tokamaks convencionais.

Nos Estados Unidos também ocorre uma ampla discussão sobre a construção do próximo experimento de fusão por confinamento magnético, que deverá operar nas condições dos futuros reatores. Há um grande interesse nos resultados recentes apresentados por regimes avançados de confinamento e por novos conceitos, como o tokamak esférico, que poderiam atingir as condições de operação dos reatores em máquinas mais eficientes, menores e mais simples. O propósito do plano americano é acelerar o conhecimento científico sobre plasmas de fusão. Entretanto, não está descartada a participação americana num experimento internacional, desde que esta participação mostre-se efetiva considerando os ganhos científicos que poderão advir de um experimento doméstico de menor custo. Embora novos experimentos, baseados no tokamak esférico, apresentem resultados promissores, não substituem o ITER-FEAT em seu plano atual de desenvolvimento da engenharia de fusão. Por outro lado, pode ser que, após o ITER-FEAT, a construção de centrais de geração de energia seja mais econômica se forem utilizados os tokamaks esféricos ou outros conceitos em desenvolvimento.

No Brasil, as condições da pesquisa em plasmas de fusão foram revigoradas com a entrada em operação, nos últimos anos, de máquinas de pequeno e médio porte com infra-estrutura mínima para a realização de experimentos científicos com relevância para o esforço internacional. Estas máquinas permitem realizar pesquisas tanto na área de aquecimento e geração de corrente por injeção de radiofrequência, importante para todos os conceitos, como na área específica dos tokamaks esféricos. Entretanto, não é possível avançar de maneira significativa sem apoio governamental, e formulação de uma política oficial consistente sobre o desenvolvimento da fusão no Brasil e sua inserção no cenário internacional.

O presente documento, após apresentar uma visão perspectiva do papel da fusão e seu estágio atual de desenvolvimento no mundo, submete a proposta de ações visando estabelecer um **Programa Nacional de Energia por Fusão**. Uma lista de ações é apresentada, fundamentando-se: na retomada imediata do plano de implantação do Laboratório Nacional de Plasma, com utilização da infra-estrutura já existente nos grupos atuantes; no encetamento das negociações para definição do papel brasileiro em acordos internacionais; e na formulação de um plano urgente de pesquisa de curto prazo, com duração em torno de cinco anos, capaz de colocar o País numa situação de maior participação no panorama internacional.

Os planos elaborados sob os auspícios do Conselho de Ministros da União Européia, no final de 2001, conclamam uma linha rápida de ações que, passando pela construção do ITER-FEAT, poderia levar à produção de eletricidade por fusão em cerca de 35 anos. Embora este pareça um horizonte longínquo do ponto de vista político atual, não há legado mais importante que apoiar projetos e iniciativas que poderão eventualmente libertar a humanidade de sua dependência dos combustíveis fósseis, provendo a energia necessária para combater a pobreza das nações sem produzir efeitos catastróficos no clima mundial.

1. PERSPECTIVA

O suprimento de energia é um dos requisitos mais importantes para a manutenção e o desenvolvimento da existência humana. Isto é evidenciado pelo forte e contínuo aumento no consumo mundial de formas primárias de energia ocorrido em praticamente todas as regiões do mundo, durante as últimas décadas, com exceção do bloco constituído pelas economias em transição (Leste Europeu sob domínio da antiga URSS), como mostra a Figura 1. De fato, o caso das economias em transição ilustra de maneira dramática o forte vínculo entre utilização de energia e desenvolvimento econômico. O consumo mundial deve aumentar ainda mais, não só e principalmente devido ao aumento da população mostrado na Figura 2, mas também devido à contínua industrialização, notadamente das economias emergentes na Ásia e na América Latina conforme também mostra a Figura 2. Todavia, o suprimento global de energia consiste primordialmente de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, cuja utilização não é compatível com um desenvolvimento sustentável. Não somente tais fontes são finitas, como também a combustão continuada e crescente de hidrocarbonetos contribuirá cada vez mais para a degradação do meio-ambiente, em decorrência da emissão maciça de dióxido de carbono para a atmosfera. Desta forma, torna-se imperativo encontrar alternativas energéticas viáveis para substituição dos combustíveis fósseis em futuro próximo.

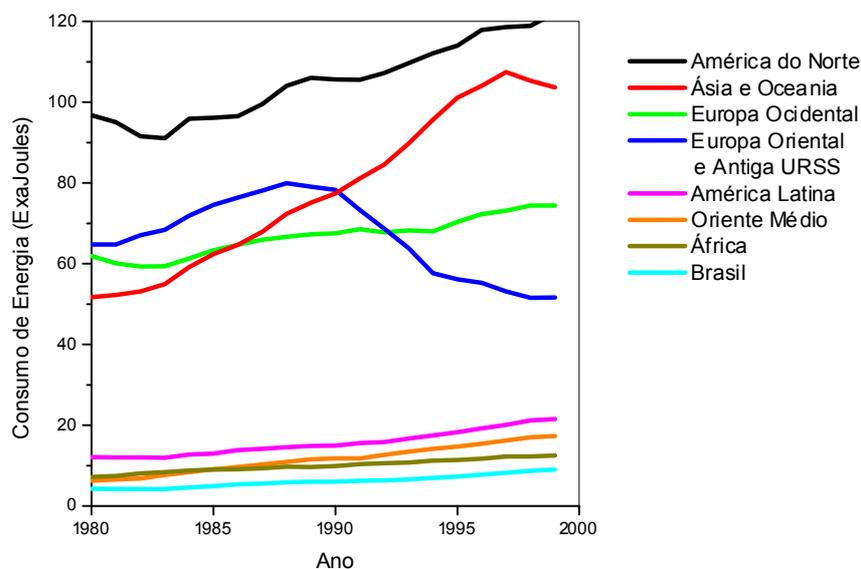


Figura 1. Consumo de energia em ExaJoules (10^{18} J) por regiões: 1980-1999
(Fonte: U.S. Energy Information Administration).

Estudos realizados em vários órgãos de planejamento energético, em todo o mundo, indicam claramente que o desenvolvimento sustentável, que satisfaça a necessidade de energia a partir da segunda metade deste século, só poderá ser realizado com base em três alternativas: fontes renováveis, reatores de fissão nuclear com ciclo regenerativo, e fusão termonuclear controlada. Dentre as **fontes renováveis**, as de energia solar e eólica têm os maiores impactos, devendo ser implantadas com vigor nas próximas décadas. Entretanto, sua distribuição é irregular e não uniforme, requerendo vastas áreas para captação e grandes instalações para armazenamento e distribuição, caso a energia não seja utilizada localmente. A instalação de usinas de **fissão nuclear regenerativa** poderia aliviar o lapso futuro de energia, mas esta solução agravaria os problemas de proliferação das armas nucleares e de armazenamento dos resíduos nucleares em escalas geológicas de tempo. Finalmente, a **fusão termonuclear controlada** necessita importantes desenvolvimentos tecnológicos para tornar-se uma fonte de geração de energia economicamente aceitável – o que também se aplica às outras opções energéticas em grande escala – mas oferece a melhor perspectiva

como uma fonte duradoura de energia. A solução apresentada pela fusão simplifica consideravelmente as questões de disponibilidade de energia, eliminação de resíduos e segurança.

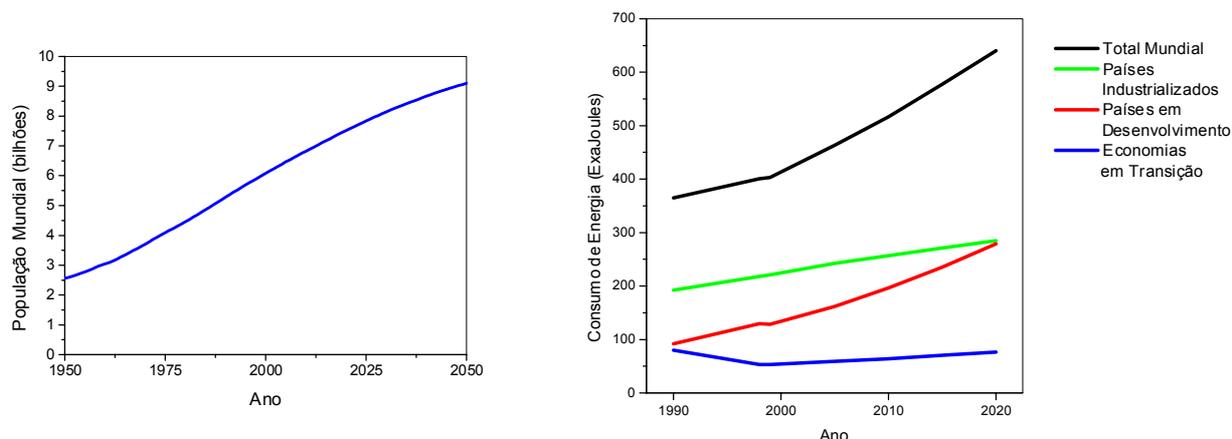


Figura 2. População mundial (à esquerda) no período 1950-2050 (Fonte: U.S. Bureau of the Census, International Data Base). Consumo previsto de energia (à direita) nas próximas décadas (Fonte: U.S. Energy Information Administration).

A fusão termonuclear de núcleos leves – deutério e trítio em particular – tem enorme potencial para tornar-se uma fonte de energia limpa e segura, não agressiva ao meio ambiente, e praticamente inesgotável. Centrais localizadas de fusão serão elementos importantes no futuro panorama energético, assim como fontes renováveis, podendo suprir eletricidade diretamente ou através de uma cadeia baseada na utilização de hidrogênio e células de combustível. Apesar do desenvolvimento de reatores de fusão termonuclear controlada representar um formidável desafio tecnológico – o maior já enfrentado pelo homem – a viabilidade científica do processo foi demonstrada na última década nos tokamaks JET (Joint European Torus) e TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), que são máquinas de confinamento magnético de concepção original soviética. A potência gerada por fusão apresentou um crescimento promissor, principalmente na última década, como mostra a Figura 3. Estes resultados estimularam a conclusão do projeto de um protótipo de reator termonuclear, denominado ITER-FEAT (International Thermonuclear Experimental Reactor – Fusion Energy Advanced Tokamak), dentro de um grande programa de colaboração internacional, do qual participam a Comunidade Européia, a Rússia, o Japão e o Canadá. Atualmente, vários locais estão sendo considerados para construção do ITER-FEAT, e uma decisão deverá ser tomada em breve. A situação da pesquisa em fusão termonuclear controlada em diversos países, em particular nos Estados Unidos, é apresentada resumidamente na próxima seção.

No Brasil não existe um programa oficial de pesquisa em fusão termonuclear controlada em andamento, apesar da atuação de alguns grupos nesta área. No final da década de 70 e início de 80 estes grupos foram convocados pelo Ministério das Minas e Energia – MME, órgão governamental então responsável pela pesquisa de fontes alternativas de energia primária em longo prazo, para realizar um programa de caráter nacional. Na época, a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN era responsável junto ao MME pela coordenação de um plano que vinha sendo elaborado desde 1978 e envolvia todos os grupos de pesquisa em fusão no país. Infelizmente, o plano não foi levado adiante por falta de recursos financeiros e mudança nas prioridades da CNEN. A pesquisa dos plasmas teve um novo ímpeto, com ênfase na fusão, a partir da criação em 1985 do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, e da aprovação do Programa Nacional de Plasma em setembro de 1987 pelo Exmo. Sr. Renato Archer, então Ministro da C&T. Este Programa reunia as atividades dos grupos atuantes no país e previa a criação de um Laboratório Nacional de Plasma. De maneira inusitada, a implantação do laboratório foi colocada em 1988 sob responsabilidade do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, sem atuação na área, que mudou seu enfoque e não chegou a implantá-lo. Apesar disso, os grupos de pesquisa em plasmas termonucleares continuaram seus

trabalhos de forma independente, porém seguindo em grande parte a orientação do Programa aprovado pelo MCT.

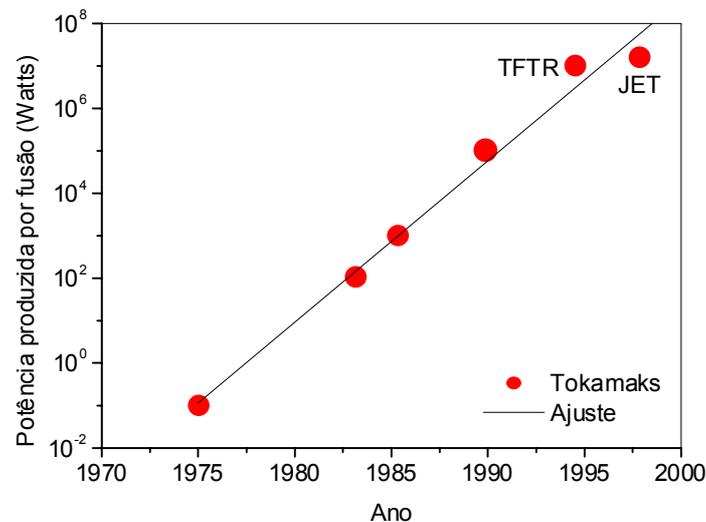


Figura 3. Avanço na potência produzida por fusão em laboratório.

Apesar do nível das pesquisas realizadas por grupos brasileiros ter avançado bastante, a ponto do Brasil ter atualmente a liderança Latino-Americana na área da Física dos Plasmas em geral e da Fusão, em particular, não há como avançar além do estágio atual das pesquisas em fusão sem apoio governamental oficial e sem participação em colaborações internacionais. Naturalmente, não existem recursos humanos e financeiros suficientes para realizar um programa de desenvolvimento de reatores ambicioso e autóctone. Por outro lado, tendo em vista o planejamento estratégico em escala mundial de fontes alternativas de energia para a segunda metade deste século, seria desastroso o País ficar ausente do esforço internacional de pesquisa em fusão.

O estágio atual de decisões que estão sendo tomadas sobre a construção do ITER-FEAT, e a elaboração de um programa alternativo para desenvolvimento de reatores termonucleares com a colaboração de diversos países, que está sendo discutido nos Estados Unidos, oferecem uma oportunidade única para o Brasil se inserir no esforço mundial na área. A participação num programa internacional de porte, embora certamente modesta, trará o benefício de acesso a conhecimentos científicos e tecnológicos avançados, capacitando o país para implementar a produção termonuclear de energia no futuro, quando necessária. Porém, a participação em colaborações internacionais requer que o Brasil tenha um programa oficial aprovado, que permita assumir compromissos de longa duração, sem interrupção de financiamento, e com possibilidade de formação de um corpo adequado de especialistas.

Os grupos de pesquisa em física dos plasmas termonucleares vêm, através deste documento, propor ao Ministério da Ciência e Tecnologia a realização de um Programa Nacional de Energia por Fusão, que deverá ser iniciado com a reativação do processo de implantação do Laboratório Nacional de Plasma, de forma a concentrar e organizar os esforços dos atuais grupos de pesquisa. Este programa seria coordenado pelo MCT, com a participação de um Conselho Técnico-Científico formado por especialistas no setor e membros dos grupos participantes. Este programa poderia, posteriormente, evoluir no sentido de abranger outras formas avançadas de produção de energia, incluindo, por exemplo, fontes renováveis e transformando o Laboratório Nacional de Plasma num **laboratório de energias do futuro**.

Na próxima seção é apresentado um resumo do estágio atual da pesquisa em fusão termonuclear controlada, tanto no cenário internacional como no Brasil. Uma proposta é apresentada na última seção, delineando-se ações que levariam à elaboração e execução do Programa Nacional de Energia por Fusão.

2. SITUAÇÃO DA PESQUISA EM FUSÃO

A fusão de núcleos leves é a fonte de energia nas estrelas. É a fusão do hidrogênio que mantém o Sol gerando energia por bilhões de anos. Em geral, a energia nuclear pode ser obtida pela união de núcleos leves (fusão) ou rompimento de núcleos pesados (fissão), com a formação de elementos intermediários, como ilustra a Figura 4. Em ambos os casos, a diminuição de massa no processo leva à liberação de energia de acordo com a equação de Einstein, $E=mc^2$. Efetivamente, a fusão resulta numa liberação de energia por unidade de massa maior do que a fissão. Para aplicações na geração de energia por fusão a mistura reagente mais favorável é formada pelos isótopos do hidrogênio, isto é, deutério e trítio, participando numa reação que leva à formação de hélio, também ilustrada na Figura 4. Uma quantidade suficiente de reagentes deve ser aquecida a temperaturas acima de 100 milhões de graus, durante um tempo suficientemente longo para que as reações de fusão ocorram em número considerável, mantendo o processo. Nestas temperaturas toda a matéria se encontra no estado de plasma.

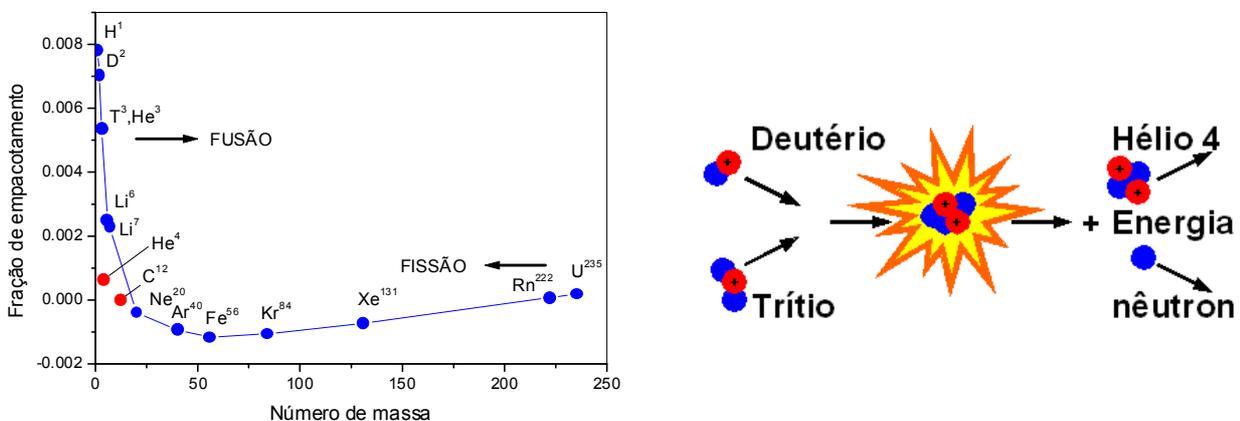


Figura 4. A fração de empacotamento (à esquerda) corresponde à diferença de massa por partícula fundamental (próton e nêutron) no núcleo, em relação ao C¹² tomado como padrão, e a unidade. A reação de um deutério e um trítio (à direita) para formar um núcleo de hélio e um nêutron é acompanhada pela conversão de 0,375% da massa em energia.

O avanço da pesquisa em fusão termonuclear controlada pode ser avaliado através da condição necessária para se manter uma reação termonuclear de forma sustentada. Esta condição, denominada critério de Lawson, por ter sido formulada pelo físico britânico John David Lawson em 1957, é expressa como $n \times \tau_E \times T > (2 \times 10^{20} \text{m}^{-3}) \times (1 \text{s}) \times (10^8 \text{K})$, para um reator utilizando deutério e trítio como combustível. Neste produto, denominado **parâmetro de fusão**, n é a densidade do plasma, em partículas/m³, τ_E é o tempo de confinamento de energia, em segundos, e T é a temperatura do plasma, em graus Kelvin. O balanço de energia utilizado no critério de Lawson é mostrado na forma de diagrama de blocos na Figura 5. Este diagrama mostra que uma parte da energia gerada no reator é utilizada para manter a temperatura do plasma por meio de uma fonte de aquecimento. Na condição de ignição, mais demandante, a reação passa a ser auto-sustentada, não havendo necessidade da fonte externa de aquecimento do plasma. O critério de Lawson e a condição de ignição são também mostrados de maneira gráfica na Figura 5.

Dois esquemas básicos têm sido desenvolvidos para propiciar as condições de fusão em plasmas termonucleares. No esquema denominado **confinamento inercial**, procura-se maximizar a densidade do plasma termonuclear em detrimento do tempo de confinamento de energia. Por outro lado, no esquema denominado **confinamento magnético**, o objetivo é obter um tempo de confinamento de energia superior a um segundo, em plasmas de baixa densidade.

No **confinamento inercial**, são utilizados feixes de lasers potentes, ou de partículas de alta energia, para comprimir uma pequena pastilha (diâmetro da ordem de 1-3 mm), de deutério e trítio,

a densidades da ordem de vinte vezes a densidade do chumbo. Nesta condição, o plasma atinge a temperatura de ignição, de aproximadamente 10^8 K, e as reações de fusão são iniciadas. Embora o tempo característico em que o plasma termonuclear é mantido antes de se perder por expansão térmica seja bastante curto, da ordem de 10^{-10} s, o número de reações de fusão é suficiente para produzir mais energia que a gasta para comprimir a pastilha.

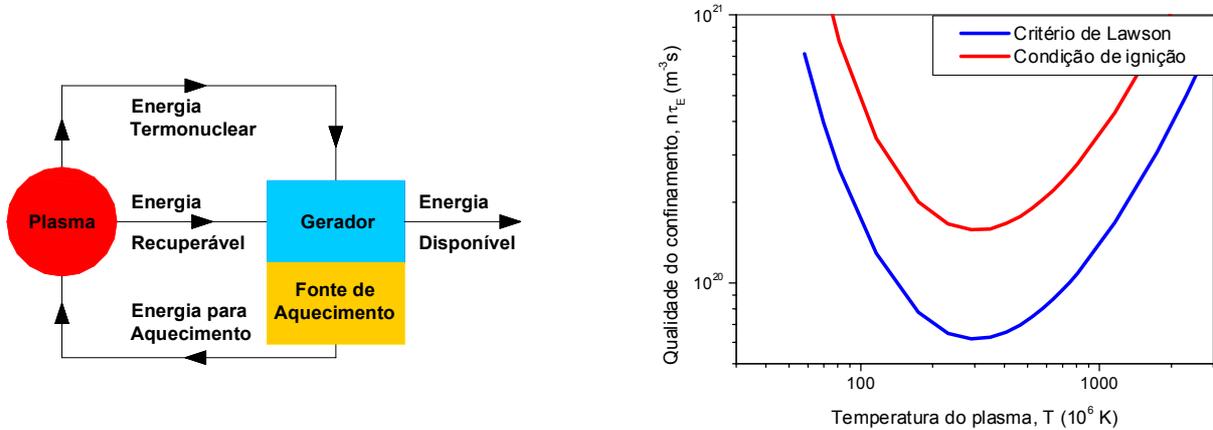


Figura 5. Diagrama de blocos (à esquerda) do balanço energético, e apresentação gráfica (à direita) do critério de Lawson e da condição de ignição num reator de fusão termonuclear controlada.

No **confinamento magnético**, campos magnéticos especialmente configurados são utilizados para confinar plasmas de baixa densidade por tempos bastante longos, superiores a dezenas de segundos em grandes máquinas. Em alguns dispositivos, em particular em tokamaks, parte do campo magnético de equilíbrio é produzido por correntes que circulam no próprio plasma e, portanto, o aquecem por efeito Joule. Mesmo assim, para atingir temperaturas termonucleares é necessário utilizar, ao menos na fase inicial de operação, **sistemas auxiliares de aquecimento**, que se baseiam, por exemplo, na absorção de ondas eletromagnéticas e na injeção de feixes de partículas neutras energéticas.

Na Figura 6 são mostradas esquematicamente as regiões de operação dos dois esquemas de fusão, num diagrama densidade versus tempo de confinamento de energia. Este diagrama também indica que os parâmetros de plasma, para obtenção de fusão por confinamento inercial, tornam este esquema adequado para simulação de explosões termonucleares relevantes na fabricação de artefatos bélicos. Por isto, a pesquisa em confinamento inercial de plasmas tem sido feita em projetos sigilosos, tornando esta área inadequada para colaborações internacionais e de pouco interesse para o País. Assim, o enfoque deste documento será na situação atual da pesquisa em confinamento magnético de plasmas.

O sistema mais avançado para confinamento magnético de plasmas é o **tokamak**. Este dispositivo foi inventado no final da década de cinquenta por cientistas soviéticos e, já na década de setenta, foi adotado por todos os grandes laboratórios de fusão. O nome é um acrônimo para *câmara toroidal magnetizada*, em russo. Num tokamak, o plasma é produzido dentro de uma câmara de vácuo com forma toroidal. O campo magnético de confinamento é produzido pela corrente que circula no próprio plasma. Um outro campo, denominado campo toroidal e usualmente bem mais intenso que o gerado pela corrente de plasma, é produzido por bobinas externas e superposto ao anel de plasma para mantê-lo estável.

Apesar de sua simplicidade conceitual, o tokamak superou todos os outros esquemas de confinamento magnético de plasma com relação aos três parâmetros do critério de Lawson. Na Figura 7 é mostrado o impressionante progresso alcançado por diferentes tokamaks desde a década de sessenta. Os valores do parâmetro de fusão alcançados nos maiores tokamaks, JET, em Culham - Inglaterra, JT-60U, em Naka - Japão, e TFTR, em Princeton - Estados Unidos, chegaram bem próximos do patamar necessário para viabilização dos futuros reatores termonucleares.

Atualmente, o JET é o maior tokamak em operação; o volume de plasma é de 140 m^3 . Nesta máquina foram obtidos valores recordes para o produto de fusão, $n \times \tau_E \times T = 1 \times 10^{28} \text{ (m}^{-3} \text{ s K)}$, e para a potência produzida por reações de fusão, 16 MW. Estes resultados se mostraram tão promissores que levaram à proposta de construção de um protótipo de reator por fusão, baseado no conceito tokamak, o ITER-FEAT mencionado na primeira seção.

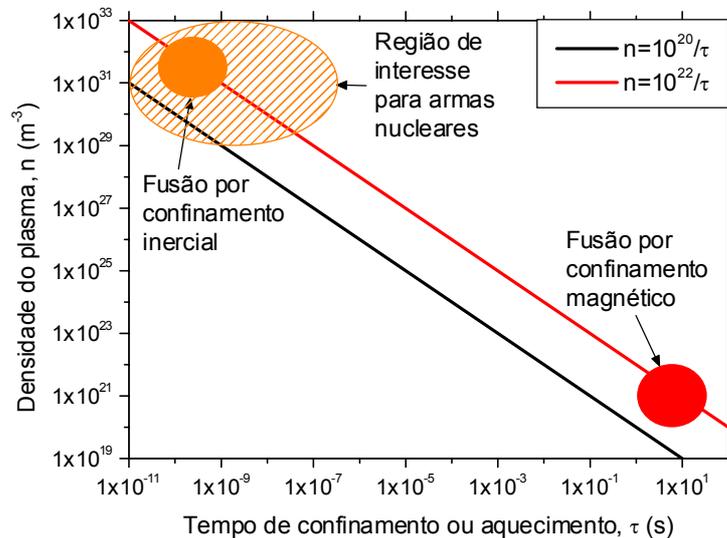


Figura 6. Regiões de funcionamento dos esquemas de confinamento inercial e magnético de plasmas termonucleares.

Os projetos, conceitual e de engenharia, do ITER-FEAT já estão concluídos. Protótipos de alguns componentes críticos estão sendo construídos e testados. Em particular, um modelo da bobina supercondutora (Nb₃Sn) foi construído e testado até um campo máximo de 8 T, acima do valor nominal previsto. O custo total do projeto, incluindo pessoal, é estimado em cerca de US\$ $4,2 \times 10^9$ (quatro bilhões e duzentos milhões de dólares americanos), em vinte anos. Comparado com outros projetos internacionais, como o “Super Collider”, este montante pode ser considerado modesto. Na Figura 8 é mostrado um desenho conceitual do ITER-FEAT.

Atualmente, as atividades para viabilização do projeto são conduzidas através de reuniões de negociação entre quatro participantes, denominadas “Negotiations on Joint Implementation of ITER”. De acordo com o comunicado à imprensa da última reunião, realizada em Tóquio, uma decisão final sobre a implementação do projeto, incluindo a escolha do local para sua instalação, deverá ser tomada até o final de 2002, para que a assinatura do acordo ocorra no início de 2003. Propostas oficiais para sediar o projeto já foram feitas pelo Canadá, pela França, pelo Japão e pela Espanha. O Canadá, em particular, oferece a contrapartida de fornecimento e manuseio de trítio para o projeto. Os Estados Unidos da América, que já participaram de uma fase extensa do projeto e depois se retiraram, têm um convite aberto para voltar a participar.

Outros países ainda podem solicitar oficialmente sua participação no projeto. No entanto, para contribuir efetivamente, será necessário levar em consideração seu cronograma. A fase de construção do reator deverá se estender por um pouco mais de oito anos. Quando entrar em operação, o ITER-FEAT deverá ser utilizado por cerca de dez anos. Após este período, espera-se que os principais resultados tenham sido obtidos, e será, provavelmente, mais econômico encerrar os experimentos e iniciar a construção de um reator de potência com blindagem mais adequada. Para diminuir custos, o sistema de blindagem e proteção de componentes do ITER-FEAT foi bastante simplificado, em relação à versão original do projeto. Além disso, também visando à redução de custos, foram eliminados os módulos que compõem o manto de lítio para geração de trítio, nesta primeira versão do reator.

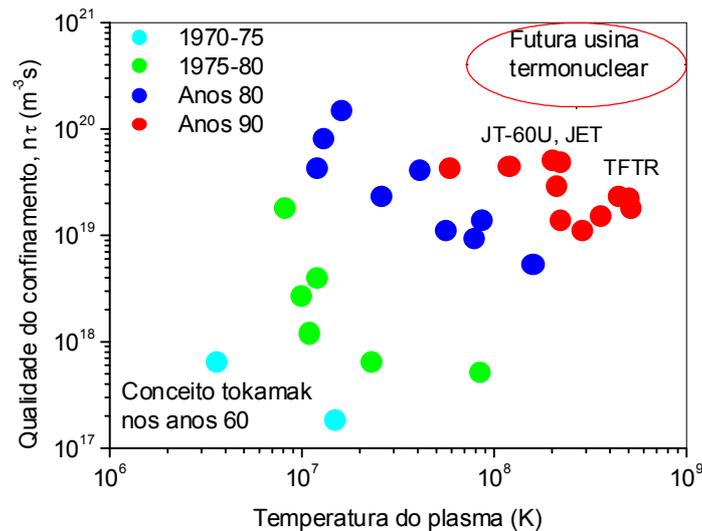


Figura 7. Durante as últimas quatro décadas, a fusão por confinamento magnético apresentou um progresso contínuo em termos da temperatura de plasma e do parâmetro de qualidade, medido pelo produto da densidade de plasma e do tempo de confinamento, em direção aos valores requeridos na operação de reatores termonucleares.

Embora o primeiro protótipo de reator termonuclear seja baseado no conceito convencional de tokamaks, outros esquemas alternativos têm sido intensamente investigados na última década. Em particular, destaca-se o conceito de **tokamak esférico**. Este esquema explora a dependência do campo toroidal com o inverso do raio do anel de plasma para reduzir custos e otimizar os valores de parâmetros físicos relevantes do plasma. De fato, o maior custo de tokamaks é o de produção do campo toroidal, sendo proporcional ao quadrado da intensidade do campo. Em tokamaks esféricos, é possível produzir plasmas estáveis em um campo toroidal com intensidade cerca de dez vezes menor que em tokamaks convencionais, reduzindo o custo da máquina por um fator substancial. Na Figura 9 é mostrado um esquema comparativo da escala de tokamaks esféricos e convencionais, para reatores termonucleares.

O conceito de tokamak esférico foi introduzido por dois pesquisadores do Laboratório de Oak Ridge, Estados Unidos, em 1986, Y.-K. Martin Peng e Dennis J. Strickler. No entanto, por volta desta mesma época, o Laboratório Associado de Plasma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE estava considerando a possibilidade de construir um tokamak de concepção semelhante e, já em 1987, apresentou um trabalho numa conferência internacional (*Energy Independence Conference on Fusion Energy and Plasma Physics*) descrevendo partes de seu projeto conceitual. Como um comentário adicional, vale a pena mencionar que o pesquisador chefe do grupo responsável pelo desenvolvimento posterior do tokamak START, em Culham, esteve presente nesta conferência e discutiu longamente com os autores do trabalho o projeto de tokamaks esféricos. Além disso, os dois primeiros encontros internacionais na área de tokamaks esféricos (*First and Second US-Brazil Experts' Workshop on Spherical Torus Experiments*) realizaram-se em maio e setembro de 1990, respectivamente no INPE e no Laboratório de Oak Ridge, com a presença de pesquisadores de todos os grandes laboratórios que mais tarde vieram a construir máquinas dentro deste conceito. Estes encontros tiveram lugar no âmbito do projeto intitulado *Fusion Energy Research on Spherical Torus*, dentro do “Programa Especial de Cooperação Brasil – EUA em Ciência e Tecnologia”, com a finalidade de revisar e otimizar o projeto brasileiro.

Durante o ano de 1991, o Laboratório Associado de Plasma do INPE se associou ao Grupo de Plasma do Instituto de Física da Universidade de São Paulo – USP e juntos desenvolveram o projeto detalhado de um tokamak esférico, para ser construído no Brasil, que custaria cerca de US\$5×10⁶ (cinco milhões de dólares). Embora tenha recebido uma avaliação altamente positiva de especialistas estrangeiros, durante uma reunião de trabalho realizada no final de 1991 na USP, o projeto não foi apoiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e precisou ser

descontinuado. Caso tivesse sido aprovado, o Brasil certamente teria, pelo menos por algum tempo, a liderança científica nesta área. A continuidade desta atividade no Brasil é descrita mais adiante.

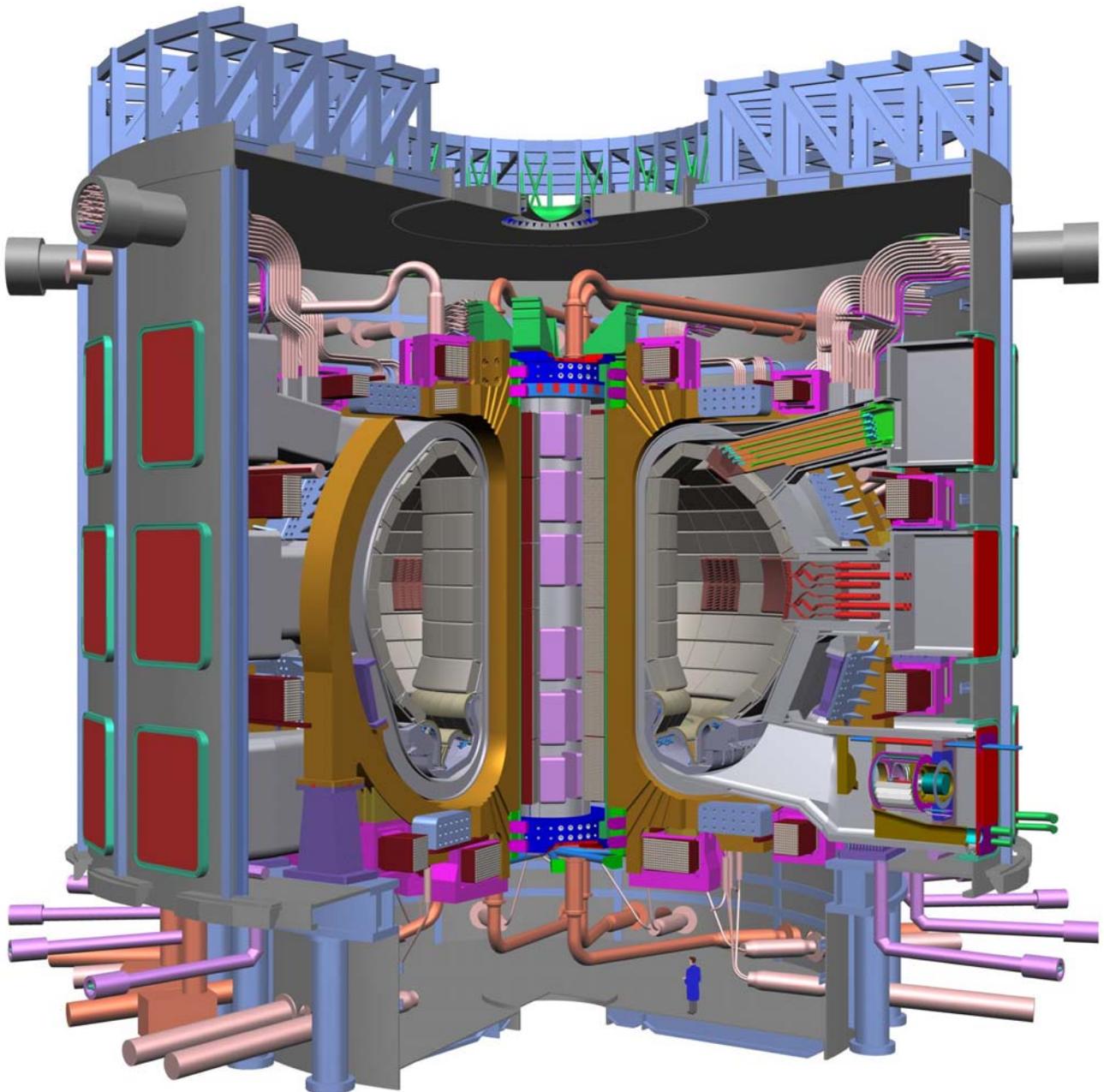


Figura 8. Concepção artística do ITER-FEAT (Fonte: <http://www.iter.org>).

No início da década de noventa, o primeiro tokamak esférico, START, foi construído no Laboratório de Culham, Inglaterra, e demonstrou desempenho compatível com as expectativas teóricas. O sucesso deste tokamak motivou o projeto e construção de outros tokamaks esféricos, em particular o MAST, também em Culham, o NSTX, no Laboratório de Princeton, Estados Unidos, e o GLOBUS, no Instituto Ioffe, em São Petersburgo, Rússia. Nas duas primeiras máquinas, são confinados plasmas com correntes acima de 1 MA, em campos magnéticos abaixo de 1 T. Entre os resultados positivos obtidos nestes tokamaks, em operação a partir de 1999, se destaca o tempo de confinamento de energia, de valor superior por pelo menos um fator dois ao previsto pela lei de escala utilizada para projetar o ITER-FEAT, baseada em resultados de tokamaks convencionais.

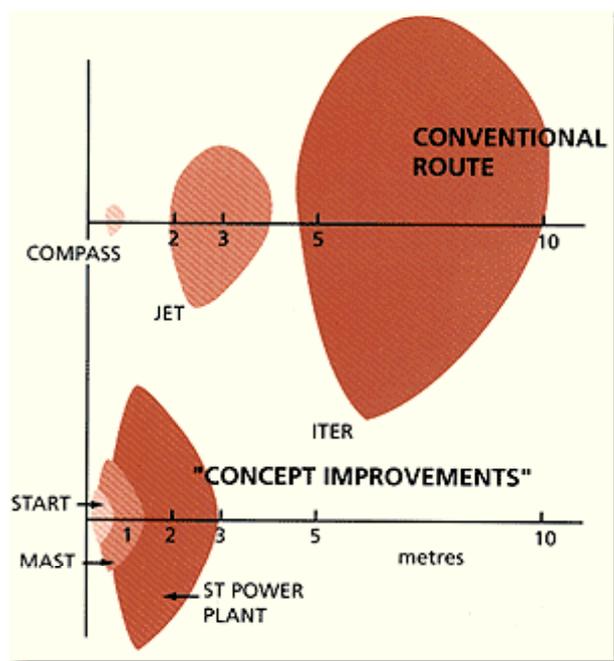


Figura 9. Esquema comparativo das escalas de reatores termonucleares baseados no conceito convencional de tokamaks (“Conventional Route”) e no conceito de tokamaks esféricos (“Concept Improvements”). START e MAST são tokamaks esféricos construídos no Laboratório de Culham, Inglaterra, e “ST Power Plant” se refere a um protótipo de reator termonuclear baseado no conceito de tokamak esférico (Fonte: <http://www.fusion.org.uk>).

Apesar deste e de outros resultados físicos promissores, a configuração de tokamak esférico apresenta problemas, do ponto de vista de engenharia, para desenvolvimento de um reator termonuclear. Em particular, a coluna central da máquina, por onde tem que passar o lado interno das bobinas que criam o campo toroidal e o solenóide para induzir a corrente de plasma, é um elemento crítico. Como necessariamente tem que ser de pequeno diâmetro, não pode incluir proteções que suportem o alto fluxo de energia, superior a 1 MW/m^2 , previsto para a primeira parede de reatores termonucleares. Além disso, as dimensões reduzidas impedem a instalação de um solenóide adequado para manutenção da corrente de plasma por períodos longos. É importante lembrar que a operação em regime permanente de tokamaks convencionais sofre da mesma limitação quanto à utilização do efeito indutivo.

O problema da dissipação de energia na coluna central está sendo intensamente investigado e algumas soluções estão sendo propostas. No entanto, o problema da manutenção da corrente de plasma só pode ser solucionado por esquemas que não utilizem o efeito indutivo do solenóide interno. Entre as alternativas promissoras, se destaca a possibilidade de geração de corrente por ondas de Alfvén, excitadas por antenas externas à coluna de plasma, um tópico de interesse internacional que é proposto ser investigado pelos grupos de plasma do INPE e da USP.

Uma das razões alegadas para os americanos se retirarem do projeto ITER foi, justamente, a necessidade de investigar a viabilidade de conceitos alternativos promissores para o protótipo de um reator termonuclear, antes de se tomar uma decisão sobre o esquema mais conveniente. O orçamento americano para a pesquisa em fusão termonuclear controlada está sendo gradativamente aumentado e se espera que em breve seja tomada uma decisão sobre a política científica a ser seguida para viabilização de reatores termonucleares. Presentemente, está ocorrendo uma grande discussão interna nos Estados Unidos sobre o futuro do programa americano de fusão, envolvendo um plano de ações para os próximos cinco anos. Qualquer que seja a decisão, ela certamente será baseada em colaborações internacionais, nas quais espera-se que o Brasil possa participar. De fato, já foi feito um convite inicial para que o Brasil participe do esforço internacional de pesquisa sobre tokamak esféricos, através do Laboratório Associado de Plasma do INPE, dentro de uma

colaboração patrocinada pela Agência Internacional de Energia (IEA), que envolve também os laboratórios de Princeton e de Culham.

Como foi mencionado na primeira seção, no final da década de oitenta houve um grande esforço por parte dos grupos atuantes no Brasil em promover um programa de âmbito nacional, que contemplava a criação do Laboratório Nacional de Plasma. O Programa Nacional de Plasma previa a instalação de um tokamak de porte médio na USP, voltado principalmente à formação de pessoal, e o Laboratório Nacional de Plasma contaria com a colaboração dos grupos universitários e abrigaria um tokamak esférico de características inéditas na época, com forte ênfase na pesquisa dos meios de geração de corrente por ondas de radiofrequência. Com o insucesso desta tentativa – e quando ficou claro que não haveria recursos financeiros para construção de uma máquina de maior porte, que reunisse seus esforços – os grupos de fusão brasileiros passaram, a partir do início dos anos noventa, a atuar isoladamente, procurando alternativas para suas atividades experimentais. Assim, o grupo de plasma do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas recebeu auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq para instalar um pequeno tokamak, doado pelo Japão, dedicado principalmente ao desenvolvimento de instrumentos de diagnóstico do plasma magneticamente confinado. O grupo do Instituto de Física da Universidade de São Paulo conseguiu, com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, instalar um tokamak de porte médio vindo do Laboratório de Lausanne, Suíça. Nesta máquina, que é mostrada na Figura 10, o grupo da USP deu início a um programa centrado em estudos que visam à exploração de regimes avançados de confinamento envolvendo o aquecimento do plasma e a geração de corrente por ondas de Alfvén. Presentemente, estas atividades constituem um núcleo de pesquisa apoiado pelo programa PRONEX do CNPq. O grupo do Laboratório Associado de Plasma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por seu turno, refez o projeto da máquina originalmente destinada ao Laboratório Nacional, reduzindo drasticamente seu custo e desempenho. Com recursos da própria instituição, material doado do exterior e apoio da FAPESP, foi possível construir no país uma máquina de baixa razão de aspecto, ou tokamak esférico, de pequenas dimensões que é mostrado na Figura 11. Esta atividade está inserida num programa de pesquisa coordenado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

A instalação e início de operação das máquinas listadas no parágrafo anterior deram uma nova dimensão às pesquisas em plasmas de fusão no País. Levando em conta o desenvolvimento das pesquisas no cenário nacional e internacional, visualiza-se uma ótima, porém última, oportunidade de inserção do Brasil no esforço mundial pela independência energética. Independência esta que está sendo perseguida por outros países em desenvolvimento, como a Índia, a China e a Coreia, que possuem programas ambiciosos e independentes de energia por fusão. Recapitulando, a situação da pesquisa em fusão termonuclear controlada apresenta um cenário bastante promissor para o desenvolvimento de reatores e excelentes oportunidades para o Brasil participar efetivamente do esforço internacional. Ações efetivas se fazem necessárias para recuperar o tempo perdido nas últimas décadas.

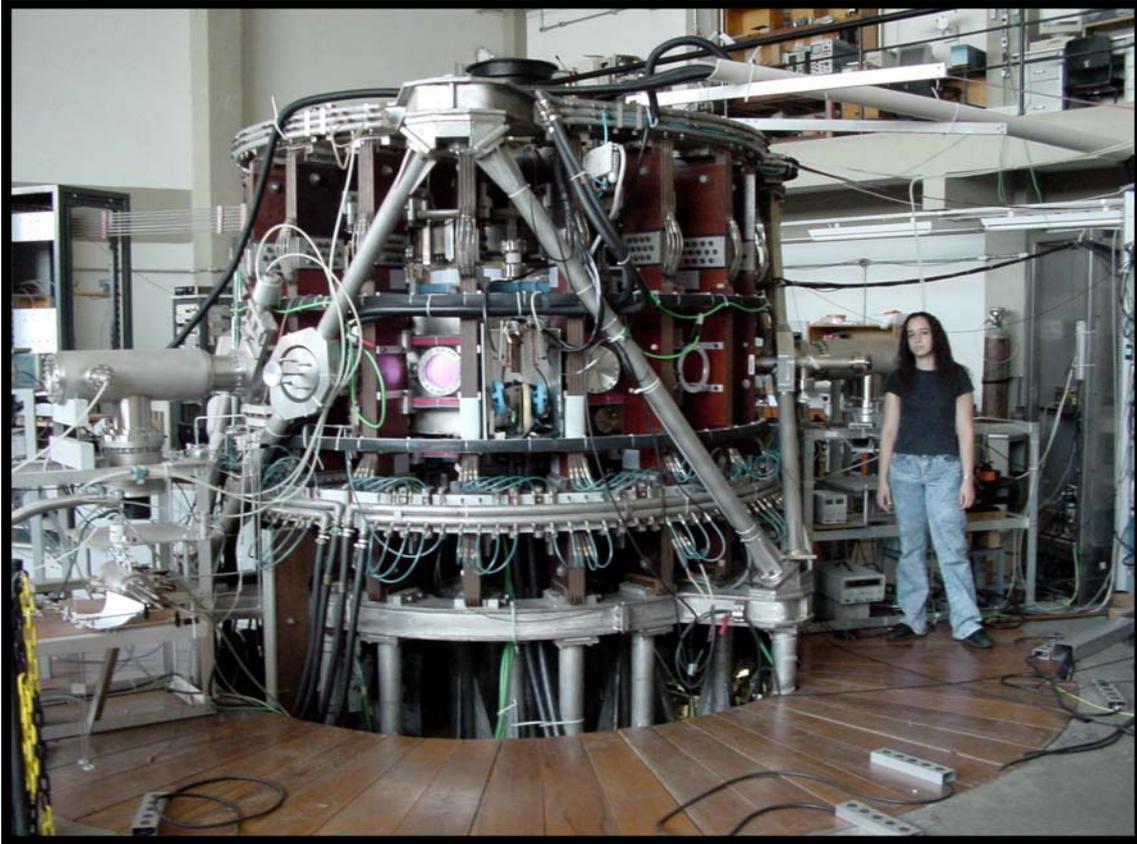


Figura 10. Tokamak convencional em operação no Instituto de Física da USP.

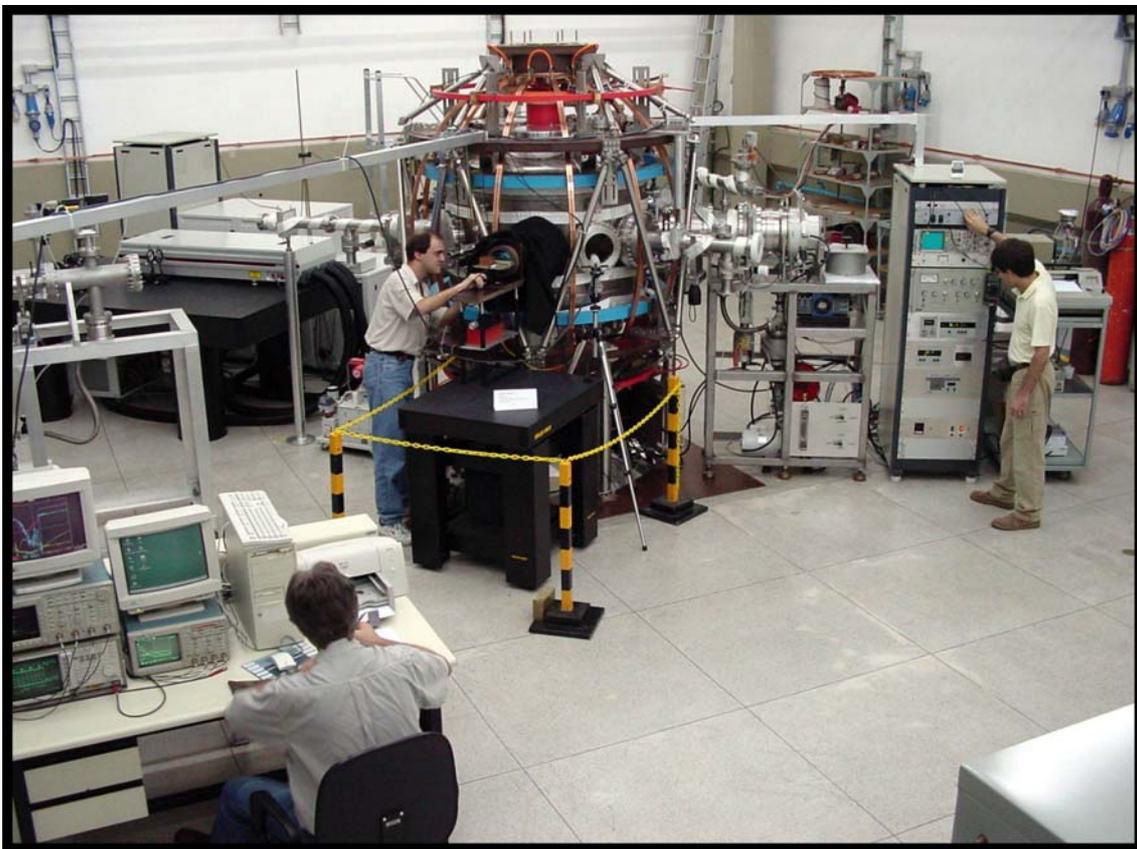


Figura 11. Tokamak esférico em operação no Laboratório Associado de Plasma do INPE.

3. PROPOSTA DE PROGRAMA

A criação de um Programa Nacional de Energia por Fusão tem por objetivo estratégico capacitar o País para o desenvolvimento, e futuro domínio, da tecnologia de geração de energia por fusão termonuclear controlada. A efetivação deste empreendimento só terá lugar com a realização de um programa de fusão que: (1) possibilite organizar as atividades dos grupos atuantes com aproveitamento da infra-estrutura já existente; (2) permita alocar recursos financeiros de forma suficiente e continuada; (3) contemple a formação e fixação de recursos humanos; (4) patrocine a cooperação técnico-científica em nível internacional; (5) envolva progressivamente a iniciativa privada no desenvolvimento tecnológico.

As ações imediatas para implementação do Programa seriam as seguintes:

- Reiniciar o processo de implantação do Laboratório Nacional de Plasma – LNP, aproveitando a infra-estrutura já existente e criando uma sede provisória. Este processo passaria pela transformação do Laboratório Associado de Plasma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, incluindo seu pessoal e instalações, em núcleo de formação do LNP (esta recomendação constava do programa originalmente aprovado em 1987, constituindo a maneira mais efetiva de iniciar a implantação a custo zero).
- Compor o Conselho Técnico-Científico do LNP, formado por especialistas na área e representantes do MCT e de outros órgãos do governo, para atuar na formulação da estratégia do Programa Nacional de Energia por Fusão em longo prazo, e no detalhamento das metas em curto prazo (entende-se por curto prazo um período em torno de cinco anos). Este Conselho teria a incumbência precípua de acompanhar e avaliar as atividades definidas no Programa.
- Efetivar associações de grupos de pesquisa universitários com o LNP. A primeira associação seria com o Laboratório de Física de Plasma do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, permitindo a formulação de um trabalho de pesquisa conjunto que utilize a competência científica e a estrutura laboratorial das duas instituições (o projeto conjunto que poderia ser desenvolvido em curto prazo, envolvendo o aquecimento por ondas de Alfvén em toróides esféricos, foi mencionado na seção anterior). Outros grupos seriam imediatamente chamados a participar do programa e fazer propostas.
- Inserir o Programa de Energia por Fusão no plano plurianual (PPA) de governo como uma ação com orçamento próprio, de modo a garantir as atividades de manutenção do Laboratório Nacional de Plasma. Recursos adicionais destinados aos projetos conjuntos em curto prazo, envolvendo o LNP e laboratórios associados, poderiam ser possivelmente solicitados ao Fundo Setorial de Energia.
- Iniciar a participação do Brasil em projetos internacionais. Uma das primeiras participações seria dentro do *Acordo de Implementação de Cooperação em Toróides Esféricos*, sob os auspícios da Agência Internacional de Energia. O Brasil já foi convidado para participar deste acordo como membro fundador, devendo receber um convite oficial para se juntar ao mesmo ainda em 2002. O projeto de aquecimento por ondas de Alfvén em toróides esféricos seria submetido como primeira contribuição brasileira dentro do acordo.

Outras ações deverão ser iniciadas o mais cedo possível mas têm um caráter de longo prazo:

- Incentivar a formação e fixação de pessoal especializado. Qualquer plano nacional só poderá ser bem sucedido se houver a participação de novos talentos, formando uma massa mínima de especialistas. Uma cota de bolsas poderia ser destinada para utilização, pelos grupos universitários, na formação de pessoal na área de plasma de fusão. Entretanto, o maior

incentivo será a existência do programa em si, que tem forte apelo, e a possibilidade de contratação pelo LNP. Um certo número de contratações terá que ser feito paulatinamente para formar a equipe do Laboratório, inclusive reunindo pesquisadores e tecnólogos dispersos ou trabalhando no exterior.

- Definir a participação do Brasil em projetos internacionais de grande porte como o ITER-FEAT, ou num projeto alternativo dentro da comunidade americana. Esta definição dependerá da evolução dos acontecimentos mundiais e do programa nacional em curto prazo, bem como de questões de diplomacia internacional.
- Inserir profissionais da área de tecnologia nuclear nas pesquisas em fusão termonuclear controlada. O domínio da tecnologia de geração de energia por fusão não se restringe aos campos da física dos plasmas, da matemática aplicada e computacional, e das engenharias eletroeletrônica e mecânica. Materiais especiais, termo-hidráulica, nucleônica, ciclo de combustíveis, manuseio de trítio, termoeletricidade, entre outros, são tópicos que deverão ser tratados num programa de fusão em longo prazo.
- Envolver a iniciativa privada no Programa de Energia por Fusão. Na fase inicial, a participação da indústria estaria restrita ao desenvolvimento e fabricação de equipamentos especiais. Entretanto, em algumas áreas a participação das empresas nacionais poderia assumir um papel internacional como, por exemplo, na produção de materiais da parede do reator, já que o Brasil é um dos países que dominam a tecnologia de extração e processamento de lítio. Outro exemplo é a produção de nióbio para fios supercondutores.