



PROGRAMA NUCLEAR BRASILEIRO

PROPOSTA DE PROGRAMA NACIONAL DE FUSÃO NUCLEAR

Maio de 2021

PROPOSTA



Este documento propõe um Programa Nacional de Fusão Nuclear e foi elaborado por iniciativa da Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento da CNEN, por meio de sua Coordenação-Geral de Ciência e Tecnologia Nucleares, em uma série de reuniões conduzidas em 2020 e 2021.

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

Paulo Roberto Pertusi, Presidente da CNEN

Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento - DPD/CNEN

Madison Coelho de Almeida, Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento

Coordenação-Geral de Ciência e Tecnologia Nucleares - CGTN/CNEN

Orlando João Agostinho Gonçalves Filho, Coordenador Geral

Autores

Gustavo Paganini Canal, IFUSP

Gerson Otto Ludwig, CNEN/INPE

Ricardo Magnus Osório Galvão, IFUSP

Co-autores

Madison Coelho de Almeida, DPD/CNEN

Orlando João Agostinho Gonçalves Filho, CGTN/CNEN

José Helder Facundo Severo, IFUSP

Maria Célia Ramos de Andrade, COPDT-INPE

Júlio Guimarães Ferreira, COPDT-INPE

PROPOSTA

Conteúdo

1	Introdução	1
2	A geração de energia através da fusão nuclear	2
2.1	A necessidade de encontrarmos novas fontes de energia	2
2.2	A produção de energia através da fusão de núcleos leves	3
2.3	Fusão nuclear por confinamento magnético	4
2.4	O conceito de uma usina de energia a fusão	6
3	O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo	9
3.1	O projeto ITER	9
3.2	Tokamaks esféricos e a rota acelerada	11
3.3	O stellarator Wendelstein 7-X	15
3.4	Configurações alternativas de confinamento magnético	16
4	O desenvolvimento da fusão nuclear no País	17
4.1	Apanhado histórico	18
4.2	Situação atual e perspectivas de melhorias dos tokamaks existentes . .	20
4.2.1	O tokamak TCABR	20
4.2.2	O tokamak esférico ETE	22
4.2.3	O tokamak NOVA-UFES	23
4.2.4	A primeira máquina do LFN	24
5	Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear	24
5.1	Implantação do LFN	25
5.2	Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes	26
5.3	Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão .	26
5.4	Colaborações internacionais	27
5.5	Plano de ações	28
5.5.1	Ações de curto prazo	29
5.5.2	Ações de médio prazo	30
5.5.3	Ações de longo prazo	31
5.6	Previsão orçamentária	32
5.7	Entregáveis	34

PROPOSTA

1 Introdução

Por muitas décadas, cientistas de todo o mundo vêm trabalhando para estabelecer as condições nas quais a fusão termonuclear controlada possa se tornar uma fonte de energia utilizável. Em países industrializados, o desenvolvimento da fusão nuclear vem sendo coordenado em nível nacional devido ao seu potencial de se tornar uma fração significativa de suas respectivas matrizes energéticas. Por este mesmo motivo, é estratégico para o País estabelecer diretrizes claras que possibilitem o desenvolvimento, e futuro domínio, das tecnologias envolvidas na geração de energia através da fusão nuclear.

Este documento apresenta uma proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear, cujo objetivo é definir diretrizes e ações de curto, médio e longo prazo que criem no País as condições necessárias para incluir a fusão nuclear em nossa matriz energética, caso esta venha a se mostrar atrativa no futuro. A implementação desse Programa, no entanto, só ocorrerá de forma efetiva com a concretização de algumas ações decisivas:

- Implantação de um laboratório de porte nacional que concentre e coordene esforços que levem ao desenvolvimento da fusão nuclear no País;
- Formação de recursos humanos através da participação de grupos de pesquisa nacionais atuantes na área de fusão nuclear;
- Envolvimento progressivo do setor privado nacional para que este absorva e domine as tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão nuclear.

Para uma melhor compreensão dos aspectos relacionados ao desenvolvimento da fusão nuclear como um recurso energético utilizável, este documento está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta as dificuldades em suprir a crescente demanda energética mundial e como a fusão nuclear pode vir a compor o aglomerado de recursos energéticos que supre tal demanda. A seção 3 traz um levantamento da situação atual do desenvolvimento da fusão nuclear no mundo passando por alguns tópicos chave, como o projeto ITER (seção 3.1) e a chamada “rota acelerada” (seção 3.2), que promete um caminho mais rápido para o desenvolvimento de reatores comerciais compactos. A seção 4 apresenta a situação atual da pesquisa nacional em fusão nuclear e, finalmente, a seção 5 descreve ações de curto, médio e longo prazo que visam a criar no País condições para que no futuro possamos avaliar a introdução da fusão nuclear em nossa matriz energética.

2 A geração de energia através da fusão nuclear

Esta seção descreve como a demanda energética mundial vem sendo suprida através da combinação de diferentes fontes de energia e como o aumento dessa demanda leva à necessidade de encontrarmos novas fontes de energia. Aqui é também discutido como a fusão nuclear pode vir a se tornar um recurso energético de grande relevância e como o País pode vir a se beneficiar de sua exploração.

2.1 A necessidade de encontrarmos novas fontes de energia

Energia é um insumo fundamental para a produção de alimentos, aquecimento, iluminação, transporte, etc. De forma geral, um alto consumo de energia, a custos relativamente baixos, é necessário para sustentar uma alta qualidade de vida. O aumento da qualidade de vida média da população mundial, em conjunto com um aumento significativo da população, tem levado a um crescimento do consumo de energia. Agências internacionais preveem um crescimento do consumo mundial de energia de aproximadamente 50% no período entre 2018 e 2050. A maior parte desse crescimento (mais de 85%) seria impulsionada pelo crescimento econômico e pela expansão populacional de países emergentes como China e Índia. A Figura 1(a) mostra a evolução do consumo de energia anual da China e do Brasil, comparados ao consumo mundial, e ilustra de maneira dramática o forte vínculo entre consumo de energia e desenvolvimento econômico. Tal vínculo torna-se ainda mais visível se for levada em conta a evolução do produto interno bruto desses países, Figura 1(b).

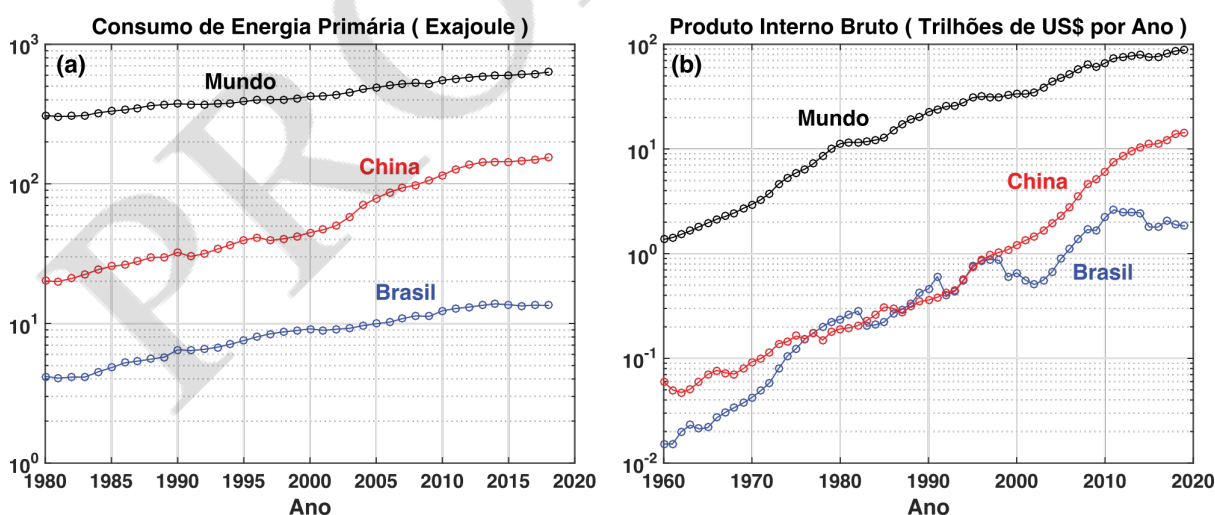


Figura 1: (a) Consumo de energia anual do Brasil, da China e mundial no período entre 1980 e 2017. (b) Evolução do produto interno bruto do Brasil, da China e do mundo no período entre 1960 e 2019.

Um dos maiores desafios em suprir essa crescente demanda energética é encontrar novas fontes de energia que sejam seguras, sustentáveis, economicamente viáveis e compatíveis com o meio ambiente. A atual demanda energética é suprida por uma combinação de vários recursos, como energia solar, eólica, hidroelétrica, fissão nuclear, geotérmica, biomassa e combustíveis fósseis. Cada uma dessas opções possui vantagens e desvantagens e, portanto, não há uma solução única e óbvia para o problema.

A maioria dos países apoia-se na queima de combustíveis fósseis para seu suprimento energético. Petróleo e gás natural, por exemplo, vêm sendo usados, em sua maior parte, para o aquecimento de casas e transporte. Já o carvão mineral, por sua vez, é o principal combustível fóssil usado para gerar energia elétrica. Um problema relacionado ao petróleo e ao gás natural é que suas reservas estão concentradas em poucos países no mundo e outro problema é que as reservas de petróleo devem se esgotar nas próximas décadas, seguindo aproximadamente uma curva de Hubbert generalizada.

Em princípio, o crescimento da demanda energética poderia ser suprido pelo aumento da queima de carvão, cujas reservas são substanciais, e poderia suprir a atual demanda ainda por vários séculos. Todavia, o CO₂ liberado durante a queima de combustíveis fósseis está começando a causar efeitos negativos observáveis no meio ambiente. A necessidade de redução da emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂, significa que a quantidade de energia obtida pela queima de combustíveis fósseis deve ser limitada. Existem, no entanto, poucos cenários realistas nos quais combustíveis fósseis sejam totalmente substituídos por outras opções menos danosas ao meio ambiente. Logo, na falta de uma solução, novas fontes de energia devem ser investigadas e desenvolvidas.

2.2 A produção de energia através da fusão de núcleos leves

A fusão de núcleos leves é a fonte de energia das estrelas, como o Sol. Em geral, energia pode ser obtida pela união de núcleos leves (fusão) ou pelo rompimento de núcleos pesados (fissão) com a formação de elementos intermediários, como ilustra a Figura 2(a). Aqui, a fração de empacotamento corresponde à diferença de massa por núcleon, em relação ao ${}^6\text{C}^{12}$. Em ambos os processos, a diminuição de massa dos núcleons, Δm , leva à liberação de energia, ΔE , de acordo com a equação de Einstein $\Delta E = \Delta m c^2$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. O processo de fusão, no entanto, resulta numa liberação de energia por unidade de massa aproximadamente 5 vezes maior do que num processo de fissão convencional de urânio.

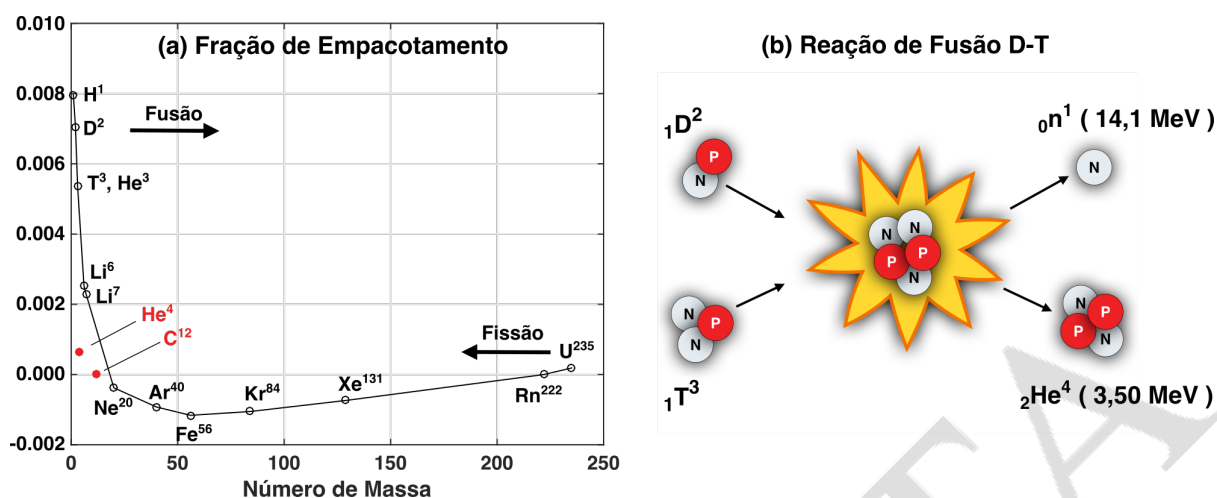
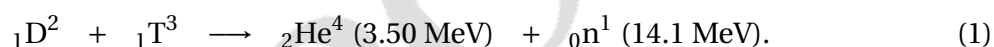


Figura 2: (a) Fração de empacotamento em função do número de massa do núcleo. (b) Desenho esquemático mostrando a reação de um núcleo de D e um núcleo de T formando um núcleo de hélio e um nêutron. Esta reação é acompanhada pela liberação de 17,6 MeV de energia.

Dentre as possíveis reações nucleares exotérmicas, a mais proeminente envolve os isótopos pesados do hidrogênio, Deutério (D) e Trítio (T),



Essa reação, ilustrada na Figura 2(b), é a que possui a maior seção de choque e a mais baixa energia de ativação. Porém, o maior valor para a seção de choque dessa reação é ainda muito menor do que o de uma colisão Coulombiana de espalhamento. Como consequência, ainda que os núcleos possuam energia cinética suficiente para se fundirem, estes colidem muitas vezes antes que uma reação D-T ocorra. Isto implica que os núcleos têm que ficar confinados por um tempo suficientemente longo para que reações de fusão nuclear possam ocorrer. A solução mais promissora que contorna esse obstáculo natural é o aquecimento de uma mistura de D e T até que a velocidade térmica dos núcleos seja alta o suficiente para que reações de fusão nuclear aconteçam. Em tais altas temperaturas, os átomos de D e T encontram-se totalmente ionizados, ou seja, estão no estado de plasma.

2.3 Fusão nuclear por confinamento magnético

Para manter a alta temperatura do plasma de D e T, o contato entre os núcleos e as paredes materiais ao redor deve ser minimizado. Uma vez que partículas eletricamente carregadas são influenciadas por campos eletromagnéticos, uma possível forma de confinamento de plasmas é por meio de campos magnéticos. Ao longo das últimas décadas, diferentes configu-

rações magnéticas foram propostas para se obter fusão nuclear por confinamento magnético. Durante a década de 1950, um dispositivo de confinamento magnético chamado tokamak foi desenvolvido para estudar as condições de produção de energia por meio da fusão nuclear. A palavra tokamak é um acrônimo em russo para *toroidalnaja kamera s magnitnymi katushkami*, que pode ser traduzido como câmara toroidal com bobinas magnéticas.

Em um tokamak, campos magnéticos especialmente configurados são utilizados para confinar plasmas de baixa densidade por tempos bastante longos. O recorde de duração de uma descarga tokamak pertence ao tokamak japonês TRIAM-1M, no qual a corrente de plasma foi mantida por mais de 5 horas utilizando ondas eletromagnéticas. O campo magnético num tokamak possui um componente principal na direção toroidal e um componente menor na direção poloidal, Figura 3. Enquanto o campo magnético toroidal é criado por bobinas ao redor do plasma, denominadas bobinas de campo toroidal, e decai com o inverso da coordenada radial R ($B_{\text{tor}} \propto 1/R$), o campo magnético poloidal é criado por uma corrente elétrica que circula no plasma, denominada corrente de plasma, I_p , e depende linearmente desta ($B_{\text{pol}} \propto I_p$). Tal corrente é induzida por meio de uma corrente variável circulando num solenoide central e esta é necessária para o confinamento do plasma. A combinação dos campos magnéticos B_{pol} e B_{tor} resulta numa configuração de campo magnético helicoidal.

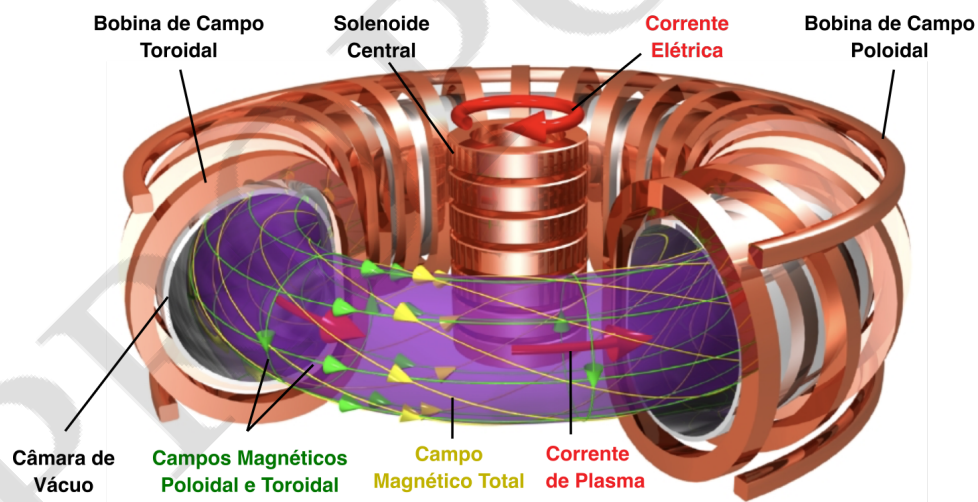


Figura 3: Desenho esquemático mostrando os componentes básicos de um tokamak.

Devido à resistividade elétrica do plasma, a corrente de plasma aquece-o por meio do efeito Joule. No entanto, como sua resistividade diminui com a temperatura dos elétrons ($\eta \propto T_e^{-3/2}$), menos aquecimento é obtido à medida que essa aumenta. Portanto, aquecimento auxiliar é necessário para atingir temperaturas compatíveis com condições term nucleares. As temperaturas de plasma obtidas no primeiro tokamak (o tokamak T-1) foram

significativamente maiores que aquelas obtidas em outras configurações magnéticas e, por essa razão, a pesquisa em tokamaks cresceu rapidamente. Atualmente, o tokamak ainda é o conceito mais desenvolvido para geração de plasmas termonucleares e, portanto, é o candidato mais promissor para uma futura usina de energia a fusão nuclear.

2.4 O conceito de uma usina de energia a fusão

Apesar de o desenvolvimento de reatores a fusão representar um formidável desafio tecnológico, a viabilidade científica do processo já foi demonstrada, notadamente nos tokamaks Joint European Torus (JET), na Inglaterra, e Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR), nos Estados Unidos. A potência gerada por fusão em laboratório apresentou um crescimento promissor, principalmente no final da década de 1990, como mostra a Figura 4. Atualmente, o JET é o maior tokamak em operação e onde foram obtidos os maiores valores de potência produzida por fusão ($P_{\text{fus}} = 16 \text{ MW}$).

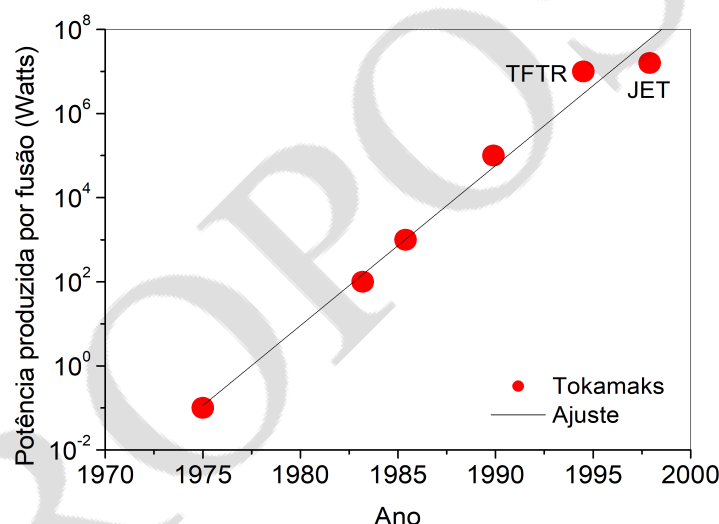


Figura 4: Avanço na potência produzida por fusão em laboratório.

Em futuras usinas nucleares a fusão, baseadas no conceito tokamak, a potência produzida virá predominantemente dos nêutrons gerados pelas reações D-T, que escapam do plasma e são absorvidos no manto que envolve a câmara de vácuo. Em um trocador de calor dentro do manto, a energia cinética dos nêutrons é absorvida e transferida para um gerador de vapor que, por sua vez, usa essa energia para girar uma turbina a vapor e gerar eletricidade, como em qualquer usina térmica convencional. Essas diferentes partes de uma futura usina nuclear a fusão podem ser vistas na Figura 5. Em tais usinas, a maior parte da energia necessária para manter a temperatura do plasma deve ser fornecida pelas partículas α

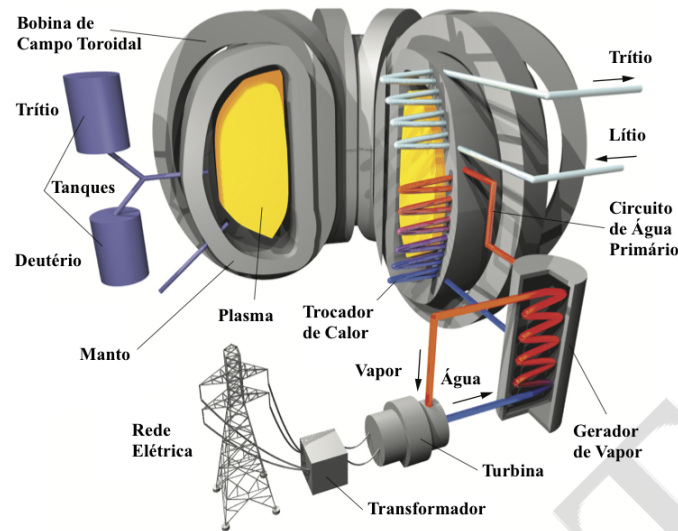


Figura 5: Desenho esquemático de uma futura usina nuclear a fusão.

(núcleos de hélio) oriundas da fusão, as quais possuem uma energia em torno de 20% da energia total liberada na reação D-T. A transferência desta energia para os núcleos de D e T ocorre através de colisões Coulombianas e, portanto, é importante que as partículas α permaneçam confinadas por um tempo suficientemente longo para que estas possam transferir uma fração significativa de sua energia para o plasma. Na prática, no entanto, o confinamento das partículas α advindas da fusão não é perfeito, e parte de sua energia acaba sendo perdida para as paredes do reator, causando uma diminuição da temperatura do plasma. Portanto, para manter sua temperatura, faz-se necessário o uso de aquecimento auxiliar.

O balanço energético num plasma termonuclear pode ser expresso em termos do tempo de confinamento da energia, τ_E , que é definido como a razão entre a energia térmica total do plasma e a potência perdida por ele levando em conta a soma de todas as perdas energéticas. Quando a energia produzida pelas reações de fusão se iguala à energia necessária para manter a temperatura do plasma, diz-se que o plasma atingiu a condição de equilíbrio. Matematicamente, esse equilíbrio é expresso pelo famoso critério de Lawson,

$$n_0 \tau_E \geq 1,5 \times 10^{20} \frac{s}{m^3}, \quad (2)$$

onde n_0 é a densidade do plasma. A Figura 6 ilustra o grande progresso alcançado por diferentes tokamaks no período entre 1960 e 1990. Os valores do parâmetro de fusão $n_0 \tau_E$ alcançados nos maiores tokamaks - o JET, o TFTR e o JT-60U no Japão - chegaram bem próximos do patamar necessário para viabilização de futuras usinas a fusão nuclear.

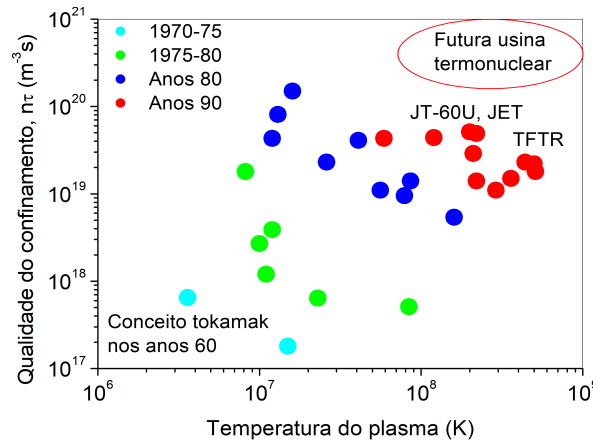


Figura 6: Progresso obtido, durante pouco mais que três décadas, em confinamento e temperatura de plasma de modo a atingir os valores requeridos para a operação de usinas a fusão.

Uma outra forma de expressar o critério de Lawson é através do fator de ganho, Q , o qual é definido como sendo a razão entre a potência produzida por fusão e a potência de aquecimento auxiliar necessária para manter a temperatura do plasma. Note que o caso em que o critério de Lawson é marginalmente satisfeito corresponde à condição em que $Q = 1$. Conforme Q aumenta a partir desse ponto, o crescimento da energia de autoaquecimento devido às partículas α reduz a necessidade de aquecimento auxiliar. Quando $Q = \infty$, não há mais a necessidade de aquecimento auxiliar e a reação se torna autossustentada. Essa é a chamada condição de ignição. Operação ligeiramente abaixo da condição de ignição é altamente desejável.

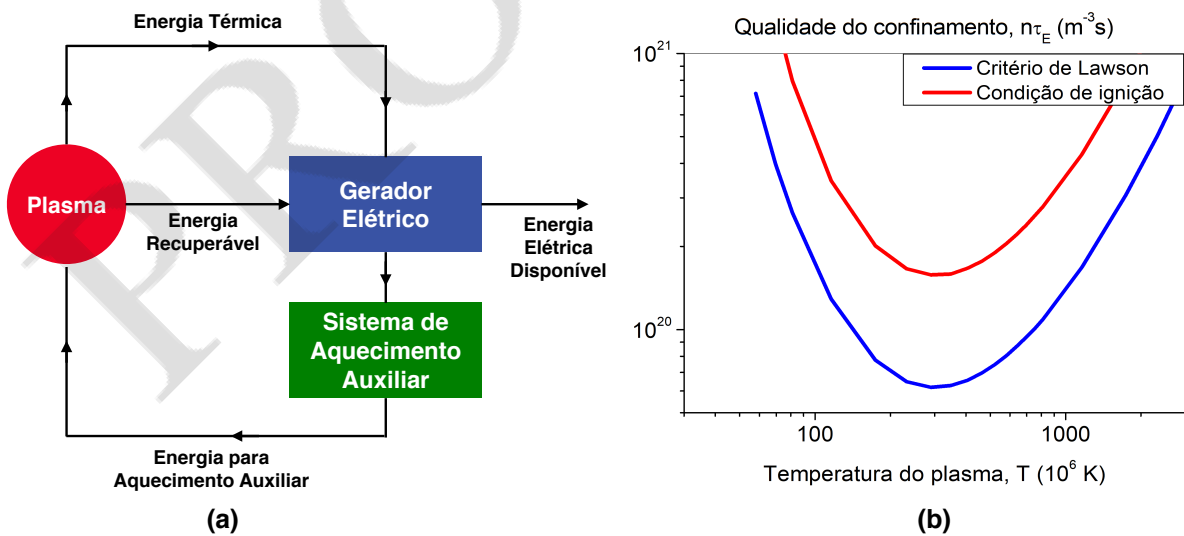


Figura 7: (a) Diagrama de blocos do balanço energético numa futura usina nuclear a fusão. (b) Critério de Lawson e condição de ignição graficadas em função da temperatura do plasma.

O balanço de potência utilizado no critério de Lawson é mostrado na forma de um diagrama de blocos na Figura 7(a). Esse diagrama mostra que, numa futura usina a fusão, uma parte da energia gerada no reator é reutilizada pelo sistema de aquecimento auxiliar para manter a temperatura do plasma. O critério de Lawson e a condição de ignição podem ser vistos de maneira gráfica na Figura 7(b).

3 O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo

Esta seção apresenta os avanços obtidos no desenvolvimento da fusão nuclear no mundo, passando pelo projeto ITER, pela chamada “rota acelerada”, pelo stellarator Wendelstein 7-X e também por configurações alternativas de confinamento magnético.

3.1 O projeto ITER

Os resultados obtidos no JET durante os experimentos com D e T, em que foram produzidos 16 MW de potência, se mostraram tão promissores que levaram à proposta de construção de um protótipo de reator a fusão baseado no conceito tokamak - o projeto ITER. O tokamak ITER está sendo construído através de um acordo de colaboração internacional, iniciado em 1985, no qual foi instituído um consórcio de países, do qual participam atualmente a União Europeia, a Rússia, o Japão, a China, a Coreia do Sul, a Índia, e os Estados Unidos. Recentemente, em outubro de 2020, o Canadá, um dos primeiros participantes do ITER, mas que havia se retirado do consórcio há cerca de dez anos, retornou ao projeto através de um Acordo de Cooperação, passando a atuar na área de fornecimento de trítio e tecnologias relacionadas. Após intensas negociações concluídas em 2005, foi decidido o local de construção do ITER perto de Aix-en-Provence, no sul da França, onde se situa também o tokamak francês WEST (antigo Tore-Supra).

O ITER tem o objetivo de fazer a transição entre as máquinas experimentais de fusão que já existem e a primeira usina com fins comerciais. O volume de plasma no ITER será dez vezes maior que no JET. Após a assinatura do acordo ITER, em 2006, a preparação do local de construção foi iniciada em 2007. A construção das estruturas de suporte e do prédio do tokamak tiveram início em 2010 e deverão estar concluídas em 2021. Presentemente, o ITER encontra-se na fase I de montagem, que consiste na montagem da parte central da máquina e dos sistemas essenciais para a produção do primeiro plasma, estimado para ocorrer no final de 2025. Durante a fase II, prevista para ocorrer entre 2026 e 2028, serão introduzidos componentes no interior da câmara de vácuo, tais como o desviador, o manto

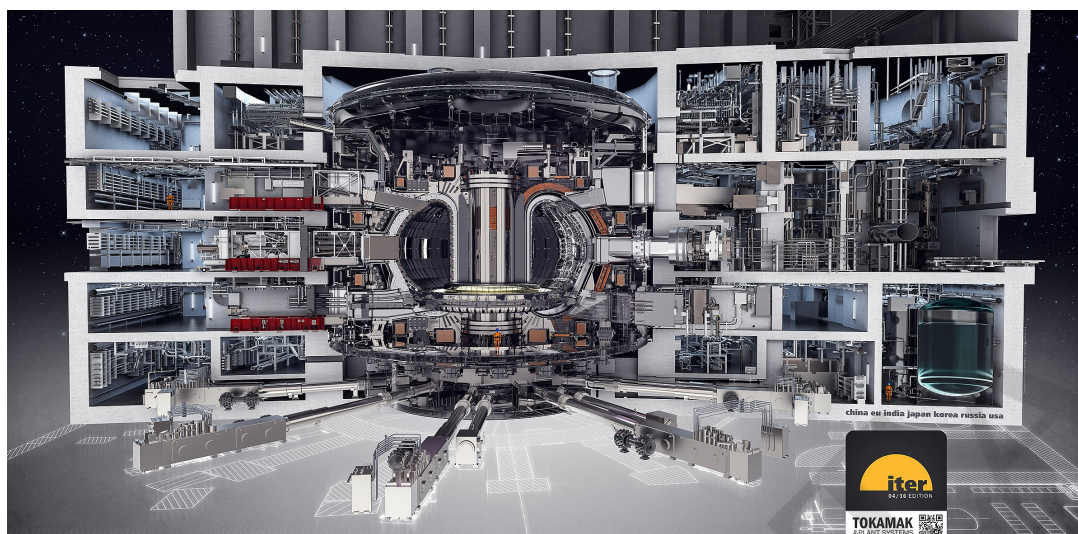


Figura 8: Desenho em corte da planta completa do reator experimental ITER.

de blindagem e as bobinas internas. Nessa fase também serão instalados sistemas adicionais de diagnóstico e aquecimento auxiliar para operação com plasmas de hidrogênio e hélio. A fase III de montagem está prevista para ocorrer entre 2030 e 2031, quando, durante uma parada da máquina, serão instalados os sistemas de aquecimento auxiliar e diagnóstico por feixes de partículas neutras, ampliados os sistemas de aquecimento por radiofrequência, e instalados os módulos para testes de produção de T. Logo após isso, estão previstos dois anos de operação a plena potência. Finalmente, a planta completa de produção e manipulação de T será implementada na fase IV, que está prevista para ocorrer entre 2034 e 2035, possibilitando a produção plena de energia por fusão a partir de 2035. Este cronograma mostra a complexidade da montagem e operação de uma máquina como o ITER, Figura 8.

Para elevar a temperatura do plasma ao nível necessário para a fusão (cerca de 15 keV), o ITER contará com três fontes de aquecimento externo: um sistema de injeção de feixe de partículas neutras de alta energia e duas fontes de ondas eletromagnéticas de alta frequência para aquecimento por ressonância ciclotrônica de elétrons e de íons. O sistema de feixe de partículas neutras será composto por dois injetores - cada um fornecendo um feixe de D de até 16,5 MW, com energias de partícula de 1 MeV. O sistema de antenas para aquecimento iônico será capaz de transferir até 20 MW de potência para o plasma na faixa de frequência de 40 a 55 MHz. O sistema de aquecimento eletrônico será composto por 24 poderosos girotrons de alta frequência, operando a 170 GHz, capazes de fornecer até 1 MW de potência de micro-ondas cada um. O ITER será o maior tokamak do mundo e foi projetado para operar com correntes de plasma $I_p \leq 15$ MA e campo magnético $B_0 \leq 5,3$ T, e para produzir até 500 MW de potência de fusão, que corresponde a um fator de ganho $Q = 10$.

3.2 Tokamaks esféricos e a rota acelerada

Embora o primeiro protótipo de reator termonuclear seja baseado no conceito de tokamak convencional, configurações alternativas têm sido investigadas desde as primeiras tentativas de controle da fusão. A Figura 9 mostra alguns esquemas de confinamento magnético com simetria azimutal. Os três parâmetros característicos mostrados na figura são: (i) a razão de aspecto, A , que mede a razão entre os raios maior e menor da espira de plasma, e está associada ao tamanho relativo da configuração toroidal, (ii) o fator de segurança da borda, q , que fornece uma medida do grau de cisalhamento das linhas de campo magnético helicoidal, e está associado à estabilidade do plasma, e (iii) a pressão normalizada, β , definida como sendo a razão entre as pressões do plasma e do campo magnético, e que mede a eficiência da configuração magnética em termos de confinamento.

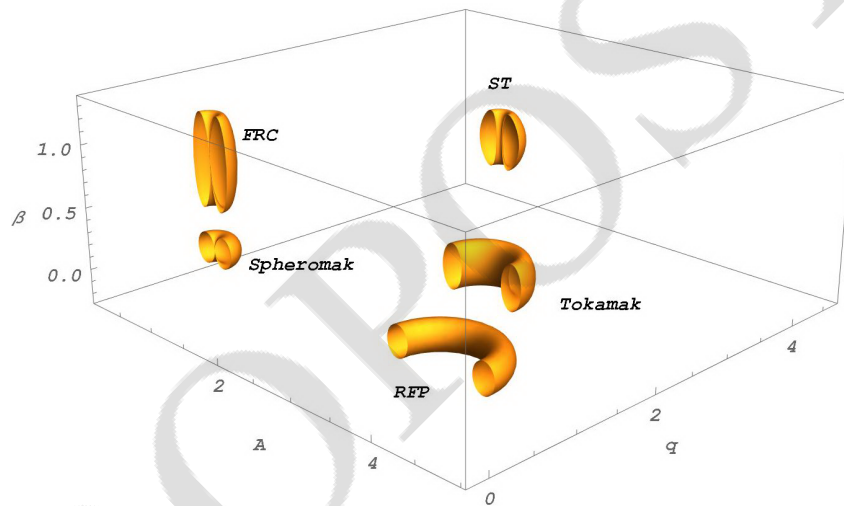


Figura 9: Comparação dos parâmetros característicos de diversas configurações de confinamento magnético com simetria azimutal. Os parâmetros medem: A = razão de aspecto (tamanho relativo); q = fator de segurança (estabilidade do plasma); β = razão entre pressões de plasma e magnética (eficiência energética).

Três das configurações mostradas na Figura 9 sofrem severamente de instabilidades e/ou turbulência, e possuem baixo tempo de confinamento de energia: o spheromak, a configuração a campo reverso (FRC) e a constrição de campo reverso (RFP). A relativamente alta estabilidade dos tokamaks convencionais, com razão de aspecto de valor típico $A \approx 3$, e dos tokamaks esféricos (STs), com razão de aspecto $A < 2$, deve-se à presença do elevado campo toroidal produzido pelas bobinas externas. A Figura 10 mostra a diferença entre um tokamak de razão de aspecto convencional e um tokamak esférico. Em particular, STs exploram a

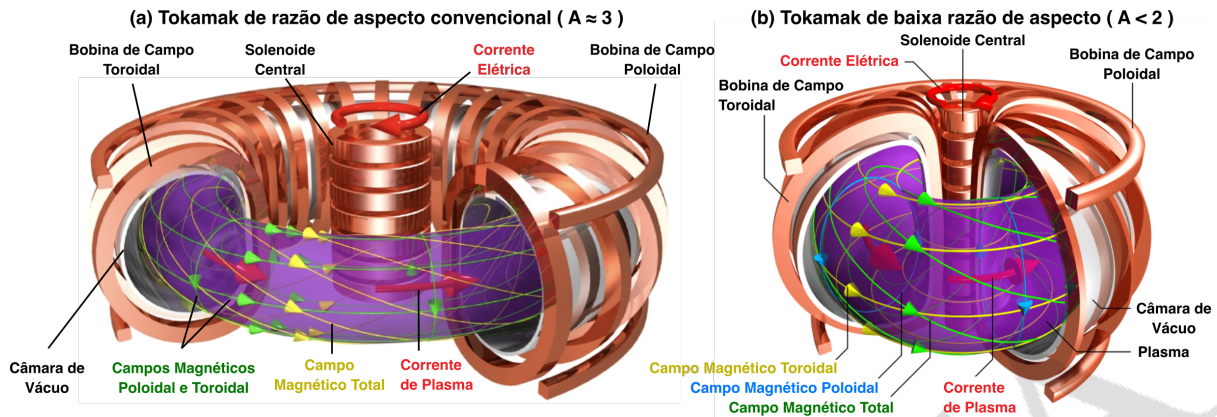


Figura 10: Desenhos esquemáticos mostrando (a) um tokamak de razão de aspecto convencional e (b) um tokamak (esférico) de baixa razão de aspecto.

dependência do campo toroidal com o inverso do raio maior do plasma ($B_0 \propto 1/R_0$) para reduzir custos e otimizar os valores de parâmetros físicos relevantes do plasma. De fato, o maior custo de um tokamak é o de produção do campo toroidal, sendo este proporcional ao quadrado da intensidade do campo B_0^2 . Em STs, é possível produzir plasmas estáveis com um campo toroidal cerca de dez vezes menor que em tokamaks convencionais, reduzindo portanto o custo da máquina de forma substancial. O forte cisalhamento magnético de configurações compactas confere aos STs boa estabilidade e tempos de confinamento de energia superiores ao previsto pela lei de escala utilizada no projeto ITER por pelo menos um fator dois.

Atualmente a configuração mais promissora na consecução de reatores compactos são os STs, que estão em desenvolvimento em vários laboratórios, destacando-se o Mega Ampere Spherical Tokamak Upgrade (MAST-U) do Culham Centre for Fusion Energy, na Inglaterra. O MAST-U entrou em operação no final de 2020, com a principal finalidade de testar configurações avançadas de desviadores, que são essenciais para qualquer tokamak, e irá operar com campo toroidal $B_0 \leq 0,8$ T, corrente de plasma $I_p \leq 2$ MA e potência de aquecimento auxiliar $P_{aux} \leq 5$ MW. Entre os experimentos desenvolvidos pelos grandes laboratórios deve-se também mencionar o National Spherical Torus Experiment Upgrade (NSTX-U), do Princeton Plasma Physics Laboratory, nos Estados Unidos, que deve entrar em operação em meados de 2021. O NSTX-U irá operar com campo toroidal $B_0 \leq 1$ T, corrente de plasma $I_p \leq 2$ MA e potência de aquecimento auxiliar $P_{aux} \leq 14$ MW.

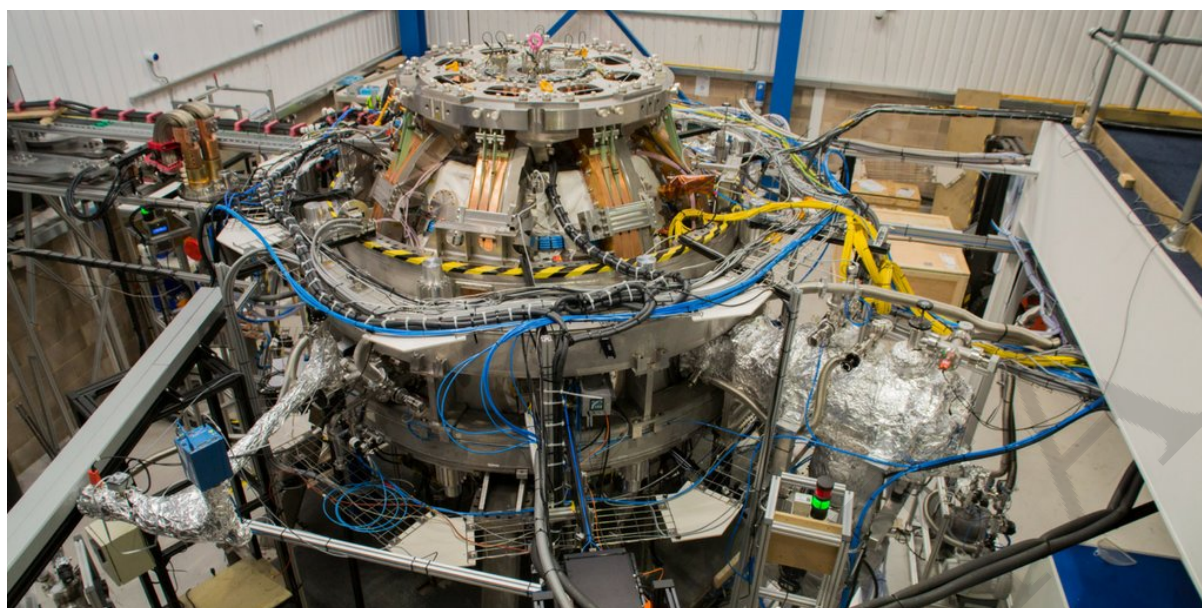


Figura 11: O tokamak esférico ST-40 desenvolvido e operado pela empresa inglesa Tokamak Energy.

Na iniciativa privada, a Tokamak Energy, que é uma empresa derivada do Culham Centre for Fusion Energy, propõe a utilização de bobinas supercondutoras de alta temperatura em STs. O experimento mais recente da Tokamak Energy, o tokamak ST-40, Figura 11, atingiu uma temperatura de plasma de $1,5 \times 10^7$ K durante a primeira fase de testes em 2018, propondo-se a atingir a temperatura de 10^8 K, requerida para fusão, quando a máquina estiver completamente implementada. Nos Estados Unidos, o tokamak SPARC está sendo proposto pelo MIT Plasma Science & Fusion Center, em colaboração com a empresa Commonwealth Fusion System, como um protótipo de reator compacto de alto campo magnético ($B_0 \approx 12$ T) utilizando bobinas supercondutoras de alta temperatura, Figura 12.

A proposta oferecida por essas empresas tem sido chamada de rota acelerada para o desenvolvimento de reatores comerciais compactos com $Q \geq 10$ e $P_{\text{fus}} \leq 200$ MW. Essa proposta baseia-se no desenvolvimento relativamente recente, e ainda em progresso, de supercondutores de alta temperatura, isto é, materiais que atingem a supercondutividade em temperaturas acima de 77 K, que é a temperatura de ebulição do nitrogênio líquido. As ligas supercondutoras metálicas usuais (utilizadas no ITER) requerem refrigeração abaixo de 18 K para Nb_3Sn , e abaixo de 9,2 K para NbTi , ou seja, refrigeração por meio de hélio líquido. A utilização de supercondutores de alta temperatura simplificaria a construção e a operação dessas máquinas, principalmente para os altos valores de campo magnético requeridos em reatores a fusão.

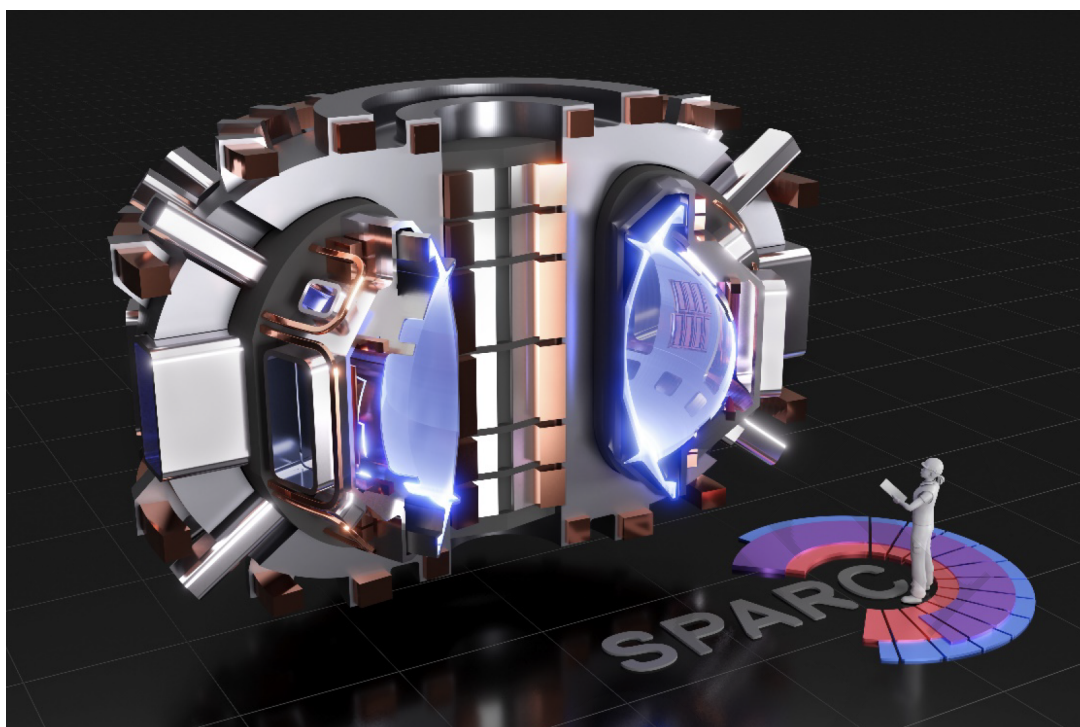


Figura 12: Concepção artística do tokamak SPARC com bobinas supercondutoras de alta temperatura.

Para melhor entender a importância do campo magnético, é preciso fazer algumas considerações listadas a seguir: (i) O parâmetro β pode ser estimado por análise dimensional como sendo $\beta \approx n T / B_0^2$, onde n e T são a densidade e temperatura médias do plasma, respectivamente, e B_0 é o campo magnético no centro do plasma; (ii) O parâmetro β estabelece um dos limites operacionais dos tokamaks, $\beta \approx \beta_N I_P / (a B_0)$, onde I_P é a corrente total de plasma (em MA), a corresponde ao raio menor do plasma (em m), e B_0 é o valor do campo magnético no centro do plasma (em T). O intervalo de valores do coeficiente adimensional β_N foi determinado numericamente ($2,8 < \beta_N < 5,7$) pela análise de instabilidades em tokamaks de razão de aspecto convencionais e foi confirmado experimentalmente. A forma do plasma e, principalmente, a razão de aspecto modificam esse limite substancialmente, sendo o recorde estabelecido em STs em 1994 onde $\beta_N \leq 40$; (iii) A potência de fusão é calculada aproximadamente por $P_{\text{fus}} \approx n^2 T^2 V$, onde V é o volume do plasma. Simplesmente combinando as estimativas acima, e supondo o mesmo regime de operação otimizada da máquina, verifica-se que a densidade de potência aumenta fortemente com o campo toroidal, isto é, $P_{\text{fus}} / V \approx \beta^2 B_0^4$. Os limites a B_0 são impostos por tensões mecânicas e refrigeração, e o limite prático para um reator compacto com bobinas de cobre refrigeradas por água é $B_0 \approx 3$ T. Os supercondutores de alta temperatura poderiam estender este limite facilmente para $B_0 \approx 9$ T, ou seja, um aumento de $3^4 = 81$ na densidade de potência produzida.

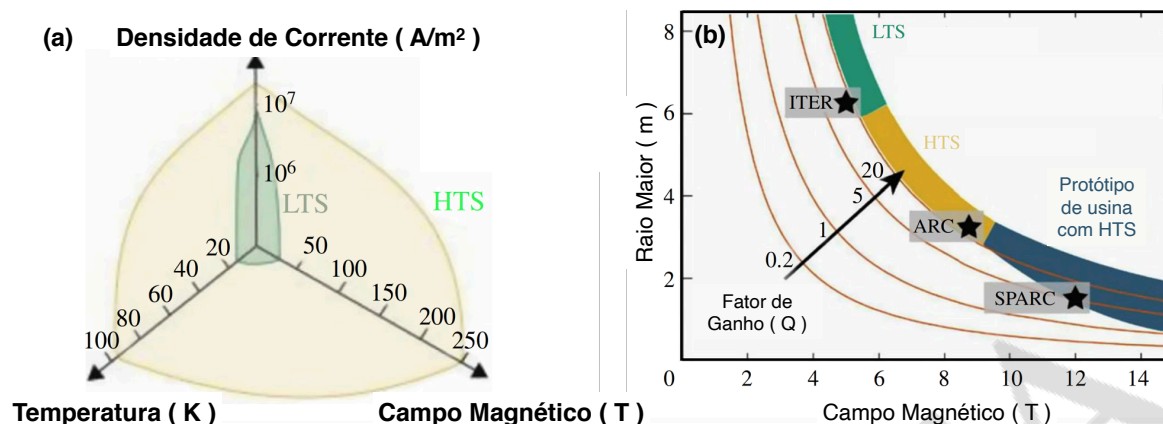


Figura 13: (a) Espaço operacional em temperatura, densidade de corrente e campo magnético para supercondutores de alta (HTS) e baixa (LTS) temperatura. (b) Curvas, com o valor de Q constante, do raio maior do tokamak em função do campo magnético para supercondutores de alta e baixa temperatura.

Como pode ser visto na Figura 13(a), o valor máximo de campo magnético permitido em supercondutores de alta temperatura (HTS) é aproximadamente uma ordem de grandeza maior do que aquele permitido em supercondutores de baixa temperatura (LTS). A possibilidade de aumentar o campo magnético no centro da máquina permite uma diminuição de suas dimensões. Isso pode ser visto na Figura 13(b), onde pode-se também ver que o tamanho do tokamak ITER foi, na época, determinado pela limitação em campo magnético ($B_0 = 5,3$ T) imposta pelos supercondutores de baixa temperatura. O desenvolvimento desses novos supercondutores de alta temperatura abre, portanto, uma nova rota para o desenvolvimento de reatores compactos.

3.3 O stellarator Wendelstein 7-X

As configurações mostradas na Figura 9 sofrem de uma limitação que é a operação pulsada, dado que o plasma é formado por efeito transformador. Tópico de intensa pesquisa, a operação em regime permanente consiste basicamente em manter as correntes de plasma em regime contínuo. Para isso são utilizadas várias técnicas de geração de corrente, tanto pela injeção de ondas de radiofrequência quanto pela injeção de feixes de partículas neutras energéticas. Deve-se mencionar que a operação contínua é possível dispensando-se a forte componente toroidal de corrente produzida pelo transformador. Porém, para isso é necessário abandonar a simetria azimutal dos tokamaks. Nesse caso a configuração helicoidal das linhas de campo magnético é obtida somente por meio de bobinas externas, resultando

numa complicada disposição tridimensional de bobinas. Tal configuração magnética é denominada stellarator e esta foi uma das primeiras configurações de confinamento magnético estudadas na década de 1950.

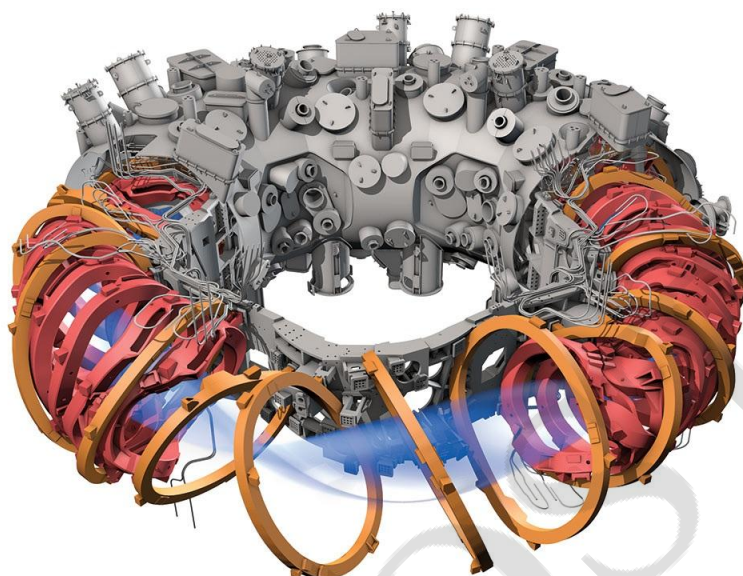


Figura 14: Concepção artística do stellarator Wendelstein 7-X, que possui raio maior igual a 5,5 m e bobinas supercondutoras que criam um campo magnético de 3 T no centro do plasma.

A Figura 14 mostra um desenho artístico do maior stellarator já construído - o Wendelstein 7-X. Este foi construído pelo Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, na Alemanha, e a expectativa é que ele atinja parâmetros de equilíbrio e confinamento semelhantes aos de tokamaks quando entrar em plena operação em 2022.

3.4 Configurações alternativas de confinamento magnético

É importante mencionar o aparecimento recente de várias outras empresas privadas, além da Tokamak Energy, explorando configurações alternativas aos tokamaks e aos stellarators. Muitas dessas empresas estudam variações das configurações a campo reverso (FRC) e spheromaks, conhecidos conjuntamente como toróides compactos. A palavra compacto aqui se refere a essas configurações que não possuem o solenoide central. Esse é o caso das empresas TAE Technologies (antiga Tri Alpha Energy), General Fusion, Helion Energy, entre outras.

A TAE Technologies, por exemplo, desenvolve um sistema linear, porém em FRC, visando à fusão de hidrogênio e boro, sem a produção de nêutrons (fusão aneutrônica). Além disso, o sistema conta com conversor ciclotron inverso para a conversão direta de energia térmica

em energia elétrica. Tal sistema converte o movimento linear dos núcleos ao longo das linhas de campo magnético em movimento circular por uma cúspide magnética. Nesse sistema, a energia é coletada à medida que as partículas carregadas passam por eletrodos quadrupolo. A Figura 15 mostra um desenho da máquina C-2W/Norman, da TAE Technologies, em operação desde 2017.

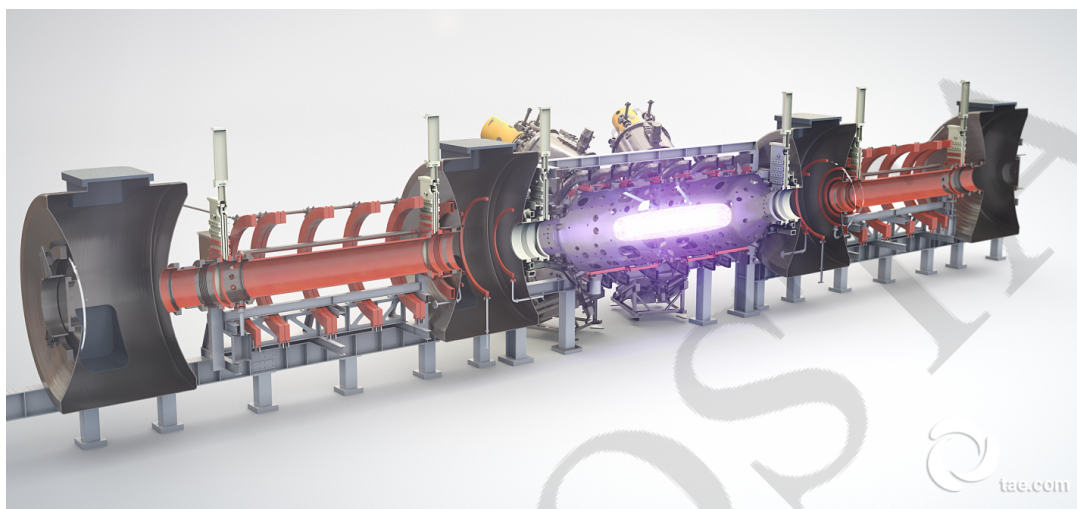


Figura 15: Concepção artística da configuração a campo reverso C-2W/Norman, com injeção de feixes de partículas neutras na borda do plasma para gerar corrente, aquecer, e estabilizar o plasma.

O conceito FRC é bastante atrativo em termos de simplicidade geométrica, pois a configuração é linear e não há a necessidade de um solenoide central nem de bobinas de campo toroidal para a sustentação do plasma. No entanto, há diversos obstáculos a serem superados na rota escolhida pela TAE. O primeiro é que, em plasmas contendo boro, a perda de energia por radiação de *bremsstrahlung* (radiação de frenagem) é muito alta, dificultando o equilíbrio de energia. O segundo é que, devido aos altos valores de β , causados pelo baixíssimo campo magnético no interior do plasma, o modelo magnetohidrodinâmico não descreve bem a dinâmica do sistema, o que exige uma modelagem cinética e, portanto, mais complexa.

4 O desenvolvimento da fusão nuclear no País

Esta seção inicia-se com uma descrição histórica dos esforços da comunidade científica brasileira atuante na área de fusão nuclear a fim de estabelecer um programa de desenvolvimento em fusão nuclear em nível nacional. Após essa descrição, a situação atual da pesquisa em fusão é apresentada, bem como as perspectivas dos planos de atualização dos tokamaks hoje em atuação no País.

4.1 Apanhado histórico

O Brasil ainda não possui um programa oficial de pesquisa e desenvolvimento em fusão nuclear, apesar da atuação de alguns grupos nesta área. No final da década de 1970 e início de 1980, esses 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 Programa Nacional que vinha sendo elaborado desde 1978 e envolvia todos os grupos de pesquisa em fusão do País. Infelizmente, o Programa não foi levado adiante por falta de recursos financeiros e mudanças nas prioridades da CNEN. A pesquisa em fusão teve um novo ímpeto a partir de 1985 com a criação do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e a aprovação do Programa Nacional de Plasma em setembro de 1987 pelo Ministro da Ciência e Tecnologia Renato Archer. Esse Programa reunia as atividades dos grupos atuantes no País e previa a criação de um Laboratório Nacional de Plasma. Em 1988, a implantação do laboratório foi colocada sob responsabilidade do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), que, infelizmente, não conseguiu executá-la nos anos seguintes. 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.

Em 2007, o MCT voltou a apoiar as iniciativas na área da fusão termonuclear através da criação da Rede Nacional de Fusão (RNF) pelo então Ministro da Ciência e Tecnologia Sérgio Machado Rezende. O nível das pesquisas realizadas por grupos brasileiros havia avançado bastante, a ponto de o Brasil ter atingido a liderança Latino-Americana na área da Física dos Plasmas em geral, e da Fusão em particular, e alcançado razoável prestígio internacional. Porém, não havia como avançar além do estágio das pesquisas em fusão, na época, sem apoio governamental oficial e sem participação em colaborações internacionais. Naturalmente, não havia recursos humanos e financeiros suficientes para realizar um programa ambicioso e autóctone de desenvolvimento de reatores termonucleares de fusão, mas abria-se uma oportunidade para o Brasil participar do projeto ITER ou de programas alternativos para o desenvolvimento de tais reatores em colaboração com outros países, como EUA e Inglaterra.

Em 2009 o Brasil foi convidado para entrar para o consórcio ITER, mas como “parceiro pleno”, ou seja, contribuindo com 10% de seu custo. Tal contribuição foi considerada demasiadamente alta pelo Governo Brasileiro. Houve sinalização do consórcio ITER de que seria criada uma categoria de parceria especial, com contribuições definidas caso-a-caso, para abrigar parcerias como a do Brasil e a do Cazaquistão. No entanto, esse esquema não foi implantado e o Brasil não entrou para o consórcio.

Ao invés de participar do ITER, naquele mesmo ano foi firmado o Acordo de Cooperação entre o Governo da República Federativa do Brasil e a Comunidade Europeia de Energia Atômica (EURATOM) na Área de Pesquisa sobre Energia de Fusão. Tal acordo foi ratificado pelo Congresso Nacional através do Decreto Legislativo N° 587 de 2012. Esse acordo prevê várias formas de colaboração, como intercâmbio de pesquisadores e equipamento, e a instituição do Comitê de Coordenação, encarregado de coordenar e supervisionar a execução das atividades realizadas em seu âmbito.

Algumas reuniões para definir as atividades de colaboração foram realizadas no Culham Centre for Fusion Energy, na Inglaterra, e duas das propostas iniciais de colaboração foram aprovadas: (i) o desenvolvimento de um sistema de inteligência artificial para reconhecimento de imagens de câmeras de infravermelho e (ii) o aprimoramento do sistema de diagnóstico ativo de automodos toroidais de Alfvén. O primeiro projeto foi executado pelo CBPF e o segundo pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Embora esses projetos tenham sido concluídos com grande êxito, não houve apoio financeiro do então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), ou de outros órgãos do Governo Federal, para sua execução. Eles foram executados com recursos obtidos pelos próprios pesquisadores através de projetos submetidos a agências nacionais de fomento.

Esta falta de recursos diretamente alocados para a execução do Acordo de Cooperação Brasil-EURATOM praticamente inviabilizou a realização de reuniões do Comitê de Coordenação e a proposta de novos projetos de pesquisa conjunta. No entanto, o Acordo continua em vigor e os projetos de pesquisa em conjunto que dele decorram devem integrar o Programa Nacional, com previsão orçamentária adequada.

Infelizmente, nos últimos anos ocorreu uma estagnação e um recuo das atividades na área de fusão nuclear, até mesmo a extinção de alguns grupos de pesquisa. Boa parte dos grupos de plasma já existentes, e quase todos os novos grupos que surgiram, voltaram seu foco principal para aplicações tecnológicas, tais como uso de plasmas de baixa temperatura em processos para tratamento de superfícies, produção de tochas de plasma, etc.

Após uma série de reuniões e negociações, que envolveram a presidência da CNEN e a direção do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), transferiu-se para a CNEN, a partir de 2010, a responsabilidade e o controle de duas Ações Orçamentárias até então geridas pelo INPE. Essas Ações contemplavam a “Pesquisa e Desenvolvimento em Fusão Termonuclear Controlada” e a “Implantação do Laboratório de Fusão Nuclear”, e tal transferência culminou com a formalização de um Termo de Cooperação CNEN-INPE em 2016 para a transferência das atividades em fusão nuclear de uma instituição para a outra. Um passo importante foi dado ainda em 2016, com a estratégia adotada pela CNEN de transferir o

LFN para uma sede definitiva em Iperó-SP, junto ao empreendimento Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Essa decisão foi amplamente endossada pelos integrantes da RNF. Um projeto também denominado “Implantação do Laboratório de Fusão Nuclear - LFN” foi submetido à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), conjuntamente pela CNEN e pelo INPE, visando (i) a elaboração do projeto executivo do laboratório a ser construído em Iperó, (ii) a atualização do Experimento Tokamak Esférico (ETE) do INPE, a ser transferido para a sede definitiva do LFN, e (iii) a prospecção de um novo experimento, mais compatível com um laboratório de porte nacional, a ser construído no LFN em substituição ao ETE.

A perspectiva de finalmente ver realizado o projeto de um laboratório de caráter nacional dedicado à fusão dá novo ânimo aos pesquisadores brasileiros. Tendo em vista o planejamento estratégico de busca por fontes alternativas de energia, em escala mundial, para a segunda metade deste século, seria desastroso para o País ficar ausente do esforço internacional de pesquisa em fusão. A participação no esforço internacional, embora certamente modesto, 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.

4.2 Situação atual e perspectivas de melhorias dos tokamaks existentes

Há hoje no Brasil três tokamaks em atuação: o *Tokamak à Chauffage Alfvén Brésilien* (TCABR), operado pelo Laboratório de Física de Plasmas (LFP) do IFUSP, o ETE, operado pelo antigo Laboratório Associado de Plasma (LAP) do INPE, e o NOVA-UFES, operado pelo Laboratório de Plasma Térmico (LPT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

4.2.1 O tokamak TCABR

O TCABR foi construído pelo Centre de Recherches en Physique des Plasmas da École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, e posteriormente transferido para o LFP, onde entrou em operação em 1999, Figura 16. Seus parâmetros principais são: raio maior $R_0 = 0,61$ m, raio menor $a \leq 0,18$ m, razão de aspecto $A = 3,4$, campo magnético no centro do plasma $B_0 \leq 1,4$ T, corrente de plasma $I_p \leq 120$ kA, densidade de elétrons $n_e \leq 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ e temperatura de elétrons $T_e \leq 800$ eV. O objetivo principal do TCABR era dar prosseguimento aos estudos de aquecimento de plasma por ondas de Alfvén, porém, estes objetivos estão sendo atualmente revistos.

Uma atualização significativa do TCABR está sendo projetada, tendo como base quatro iniciativas: (i) a instalação de ladrilhos de grafite para recobrimento da parede interna

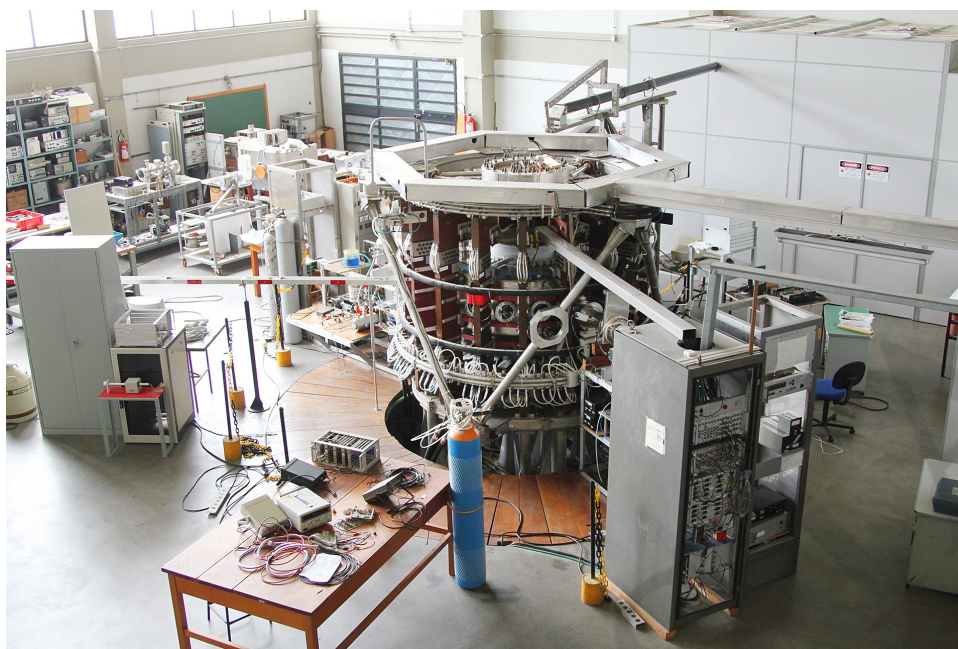


Figura 16: O tokamak TCABR do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

da câmara de vácuo, (ii) a instalação de um conjunto inovador de bobinas de perturbação magnética ressonante (RMP), (iii) a instalação de bobinas adicionais para controle da posição e forma do plasma, e (iv) o desenvolvimento de um sistema de injeção de helicidade. Os ladrilhos de grafite absorvem a energia térmica depositada pelo plasma em diferentes regiões no interior da câmara de vácuo, reduzindo a concentração de impurezas pesadas ejetadas pela parede. Em alta concentração, estas impurezas são responsáveis pela perda de energia do plasma por radiação. As bobinas RMP induzem correntes na borda resistiva do plasma, possibilitando um grau de controle sobre instabilidades localizadas na borda do plasma (ELMs) que causam fluxos de calor inaceitáveis nas paredes da máquina. A colocação de tais bobinas no lado interno da câmara permitirá, pela primeira vez, estudos de efeitos ressonantes em toda a borda do plasma. Além disso, a introdução de bobinas adicionais para controle de posição e forma do plasma possibilitará o estudo de configurações avançadas de confinamento. Em particular, possibilitará testar várias configurações de desviadores para remoção de impurezas do plasma. O novo sistema de bobinas RMP pode ser visto na Figura 17. Por fim, o injetor de helicidade consiste em um dos conceitos mencionados anteriormente para geração de corrente contínua no interior do plasma, em substituição ao efeito transformador intrinsecamente pulsado. No esquema proposto, correntes filamentosas são criadas no plasma por meio de canhões de plasma situados na borda. Devido a efeitos resistivos, essas correntes coalescem e suprem a corrente de plasma.

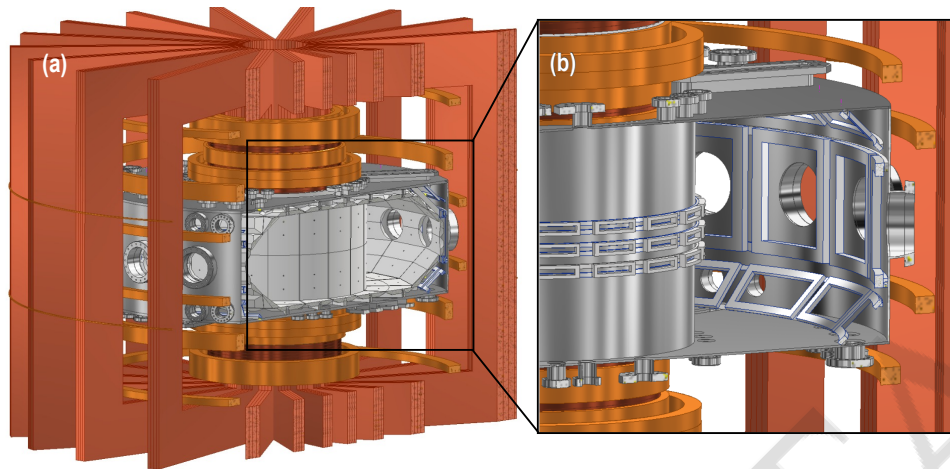


Figura 17: (a) Vista em corte e (b) vista aproximada dos ladrilhos de grafite e das bobinas RMP que serão instaladas no interior do TCABR.

4.2.2 O tokamak esférico ETE

O tokamak esférico ETE entrou em operação em 2000 e foi inteiramente projetado e construído no então LAP/INPE para estudos de plasma em tokamaks de baixa razão de aspecto, Figura 18. Atualmente, o LAP do INPE faz parte da Coordenação de Pesquisa Aplicada e Desenvolvimento Tecnológico (COPDT). O ETE tem as seguintes características: raio maior $R_0 = 0,30$ m, raio menor $a \leq 0,20$ m, razão de aspecto $A = 1,5$, campo magnético no centro do plasma $B_0 \leq 0,5$ T, corrente de plasma $I_p \leq 200$ kA, densidade de elétrons $n_e \leq 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ e temperatura de elétrons $T_e \leq 200$ eV.

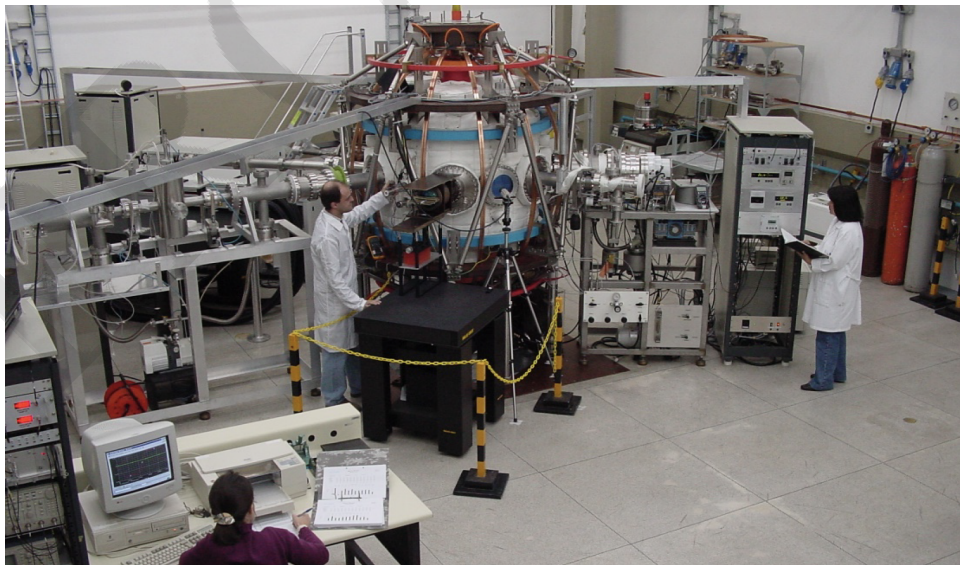


Figura 18: O tokamak ETE do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Assim como no caso do TCABR, há também um projeto de atualização do tokamak ETE. Esta atualização visa (i) a instalação de um novo sistema de geração e controle da corrente de plasma, (ii) a melhoria do sistema de produção do campo toroidal, (iii) o desenvolvimento de um novo sistema de controle das configurações de equilíbrio, (iv) a modernização do sistema de aquisição de dados, (v) a instalação do sistema de pré-ionização e iniciação da descarga, (vi) a melhoria do sistema de condicionamento da câmara de vácuo, e (vii) a melhoria dos sistemas de diagnóstico do plasma já existentes, além da implantação de novos sistemas. O projeto detalhado desta atualização encontra-se no Termo de Cooperação CNEN-INPE de 2016.

4.2.3 O tokamak NOVA-UFES

O NOVA-UFES foi construído pela Kyoto University, Japão, e posteriormente transferido para o Brasil. No País, esse tokamak já foi operado pela Universidade de Campinas (UNICAMP), pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e, atualmente, se encontra na UFES, Figura 19. Seus parâmetros principais são: raio maior $R_0 = 0,30$ m, raio menor $a \leq 0,06$ m, razão de aspecto $A = 5,0$, campo magnético no centro do plasma $B_0 \leq 1,0$ T, corrente de plasma $I_p \leq 10$ kA, densidade de elétrons $n_e \leq 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ e temperatura de elétrons $T_e \leq 50$ eV. Hoje, o NOVA-UFES está sendo utilizado para testar o sistema de injeção de helicidade mencionado na atualização do TCABR.



Figura 19: O tokamak NOVA-UFES da Universidade Federal do Espírito Santo.

4.2.4 A primeira máquina do LFN

Quando foi proposta a construção do LFN, considerava-se apenas a instalação do tokamak ETE como seu primeiro experimento. No entanto, recentemente, foi feita uma proposta bastante atrativa de aprimoramento do tokamak TCABR, como mencionado no item 4.2.1, para estudos de estabilização dos modos de superfície por campos magnéticos ressonantes. Como esta proposta vai ao encontro das pesquisas atuais em física de tokamaks, foi considerada a possibilidade de instalar o TCABR definitivamente no LFN, em lugar do ETE. A decisão sobre qual máquina será instalada dependerá do avanço das atualizações do ETE e do TCABR. Essa decisão será tomada ao final do terceiro ano de execução do presente Programa Nacional de Fusão Nuclear, conforme o cronograma mostrado na seção 5.5. Caso seja decidido instalar o TCABR no LFN, como sua primeira máquina, o tokamak ETE atualizado seria instalado no Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP.

5 Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear

As diretrizes e ações propostas neste Programa Nacional de Fusão Nuclear (PNFN) foram definidas de modo a preservar e dar continuidade aos avanços obtidos em cada etapa do Programa, prezando também pela absorção, por parte do setor privado nacional, das tecnologias derivadas de tais avanços, fazendo com que a proposta desse Programa traga avanços tecnológicos significativos para o País.

A presente proposta de Programa Nacional tem o objetivo estratégico de capacitar o País para o desenvolvimento, e futuro domínio, da tecnologia de geração de energia por fusão termonuclear controlada. A realização desse empreendimento, no entanto, só ocorrerá de forma efetiva com um Programa que (i) implante a sede definitiva do LFN, como mencionado na seção 4.1 e como será melhor detalhado na seção 5.1, (ii) incentive a participação de grupos brasileiros atuantes em fusão nuclear, contemplando a formação de recursos humanos, (iii) tenha uma visão estratégica das aplicações tecnológicas associadas ao desenvolvimento da fusão e do envolvimento de forma progressiva da iniciativa privada nesse desenvolvimento, e (iv) consolide a participação do País em colaborações internacionais relevantes. Na sequência, várias diretrizes são apresentadas e, ao final, ações para a implementação do PNFN são descritas em mais detalhes.

5.1 Implantação do LFN

Como já mencionado, a implantação do LFN é um dos passos decisivos para a efetivação dessa proposta de PNFN. O projeto executivo do LFN foi concluído em 2018 pela empresa Minerbo-Fuchs Engenharia com recursos obtidos da FINEP através de um pedido de financiamento submetido conjuntamente pelo INPE e pela CNEN. Os detalhes do projeto foram elaborados com a participação das equipes de engenharia do Laboratório de Integração e Testes (LIT/INPE) e do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN), com o acompanhamento de pesquisadores do antigo LAP/INPE. O projeto está pronto para a elaboração de um processo licitatório visando à construção do LFN. O laboratório será construído no local em que também será implantado o empreendimento RMB da CNEN, no Município de Iperó-SP. Essa estratégia de implantação, com compartilhamento da infraestrutura e instalações de suporte do RMB, possibilitou reduzir significativamente os custos de construção do LFN. O prédio do LFN prevê amplas áreas para construção, montagem e operação das máquinas iniciais do laboratório, bem como oficinas e salas de apoio técnico às funções do laboratório. Também estão previstas salas para abrigar a equipe de operação das máquinas, notadamente do ETE como primeiro experimento a ser instalado no laboratório. As salas de projeto e engenharia também irão abrigar, inicialmente, a equipe que deverá elaborar o projeto da futura máquina de fusão do LFN. A Figura 20 mostra uma maquete virtual do LFN.



Figura 20: Maquete virtual do Laboratório de Fusão Nuclear (LFN).

5.2 Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes

Os grupos brasileiros com atuação na área de fusão nuclear deverão participar das atividades do LFN por meio da Rede Nacional de Fusão (RNF), que deverá ser reativada. Uma nova portaria, reinstituindo a RNF como um dos elementos de apoio ao Programa Nuclear Brasileiro, já foi elaborada, com vistas à sua aprovação e publicação. Serão comunicadas aos membros da comunidade científica as atividades em andamento que visam à recriação da RNF, e à construção do LFN da CNEN. Os pesquisadores atuantes em fusão serão convidados a integrar a RNF e a contribuir para a elaboração das atividades de pesquisa referidas nessa proposta de Programa Nacional durante um seminário, onde será também apresentada a proposta de funcionamento da nova fase da RNF. Uma das atividades da RNF será contribuir para o projeto conceitual da máquina intermediária que será construída e instalada no LFN, conforme descrito nas ações de médio prazo (seção 5.5).

5.3 Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão

Uma das atribuições da futura equipe do LFN será realizar estudos voltados à definição das linhas de pesquisa a serem exploradas pelo País no futuro, incluindo (i) o desenvolvimento de grandes tokamaks, (ii) de tokamaks de pequeno porte utilizando bobinas supercondutoras de altas temperaturas e (iii) de máquina híbridas fusão-fissão, voltadas a queima de rejeitos radioativos e produção de combustível para reatores nucleares a fissão.

O desenvolvimento futuro de grandes tokamaks dependerá em grande parte dos resultados obtidos com o ITER. Várias nações prosseguem no desenvolvimento de tecnologias relevantes à fusão utilizando tokamaks que podem ser considerados de médio a grande porte. Destacam-se os tokamaks EAST na China (2006), KSTAR na Coreia do Sul (2008), JT-60SA no Japão (2010), e SST-1 na Índia (2012). Todos estes tokamaks utilizam a liga supercondutora metálica NbTi na fabricação das bobinas de campo toroidal, bem como em algumas bobinas de campo poloidal. Deve-se mencionar que o Brasil possui a maior parte das reservas mundiais de nióbio, tendo sido cogitado como um parceiro do ITER justamente por poder fornecer o material para as bobinas. Nas condições atuais, é evidente que o Brasil terá que se concentrar nas pesquisas usando tokamaks de pequeno porte, mas deve iniciar o desenvolvimento, a médio prazo, das bobinas supercondutoras, notadamente utilizando supercondutores de alta temperatura, já mencionados na Seção 3.2. Não está, porém, descartada a utilização de bobinas convencionais de cobre, refrigeradas a água, em particular na construção de reatores compactos para compor fontes de nêutrons, como descrito a seguir.

As máquinas híbridas fusão-fissão utilizariam os nêutrons rápidos (14 MeV), produzidos pelas reações de fusão D-T, para converter materiais férteis, Th^{232} ou U^{238} , em isótopos físeis, U^{233} ou Pu^{239} , respectivamente. Os materiais físeis seriam utilizados posteriormente em reatores de fissão convencionais. Nos dois casos, os materiais físeis seriam misturados com grandes quantidades de U^{238} , para formar uma mistura não explosiva, e seriam utilizados nos reatores. A seção de choque para fissão por nêutrons rápidos é maior no U^{238} do que no Th^{232} , de tal modo que mais nêutrons, passíveis de serem absorvidos no manto de regeneração, são produzidos no caso do U^{238} . Porém, a vantagem do Th^{232} , além de abundante no Brasil, é que o U^{233} não pode ser separado quimicamente do U^{238} , como é o caso do Pu^{239} , de modo que este não possa ser utilizado em armas nucleares após misturado. Além disso, a grande seção de choque do U^{233} para nêutrons térmicos praticamente assegura que todos os nêutrons absorvidos resultam em fissão. Desta forma, um reator de fusão, mesmo sem produzir energia elétrica, poderia ser utilizado para produzir combustível para vários reatores de fissão. Reatores compactos, do tipo tokamak esférico, seriam as fontes ideais para produzir nêutrons em grandes quantidades. Uma fração dos nêutrons produzidos ainda teria que ser utilizada para gerar o T utilizado na fusão, mas o balanço energético e o número de nêutrons disponíveis são favoráveis. Deve-se levar em conta que os parâmetros de operação de um reator a fusão utilizado como fonte de nêutrons são menos demandantes do que os de um reator para geração de energia por fusão. Por isso, tais máquinas já poderiam ser concebidas a partir do conhecimento técnico-científico atualmente disponível.

Por fim, será preciso envolver a indústria nacional no desenvolvimento e construção de componentes e sistemas das máquinas de pesquisa em fusão. Pode-se mencionar o fornecimento de volantes de inércia de alta energia para o LFN, desenvolvimento de fontes de potência de alto desempenho e sistemas de controle das bobinas magnéticas, fabricação de câmaras e componentes de vácuo, fabricação de bobinas e sistemas de refrigeração por água ou criogênicos, fontes especiais para sistemas de aquecimento do plasma, sistemas automatizados de controle e operação das máquinas, entre muitos outros.

5.4 Colaborações internacionais

O programa deverá ainda consolidar o Termo de Cooperação Brasil-EURATOM estabelecendo a estrutura administrativa e orçamentária necessária para a realização das reuniões do Comitê de Coordenação e para a execução dos projetos conjuntos por ele aprovados. Além disso, deverão ser estabelecidas outras colaborações que contribuam para o desenvolvimento da máquina intermediária a ser implantada no LFN a médio prazo.

5.5 Plano de ações

A seguir estão detalhadas ações de curto, médio e longo prazo que visam cumprir as diretrizes definidas. Essas ações podem ser vistas de forma simplificada na Tabela 1. Para uma melhor compreensão das ações abaixo discriminadas, um código de letras foi estabelecido para conectar cada ação com sua aparição na Tabela 1.

	Curto Prazo			Médio Prazo									Longo Prazo		
AÇÕES	1º Ano	2º Ano	3º Ano	4º Ano	5º Ano	6º Ano	7º Ano	8º Ano	9º Ano	10º Ano	11º Ano	12º Ano	13º- 20º Anos	21º- 24º Anos	25º Ano
CURTO PRAZO															
(a) Construção do LFN															
(b) Atualizações do ETE e do TCABR															
(c) Formação da equipe inicial do LFN															
(d) Estudo conceitual da máquina intermediária															
(e) Reunião de avaliação (ponto de decisão)															
MÉDIO PRAZO															
(f) Transferência e instalação da primeira máquina															
(g) Operação da primeira máquina															
(h) Desenvolvimento dos componentes da máquina intermediária															
(i) Estudo conceitual da máquina intermediária															
(j) Aprovação do projeto por parte da CNEN e alocação de recursos financeiros															
(k) Projeto detalhado de engenharia da máquina intermediária															
(l) Complementação da equipe do LFN															
(m) Construção da máquina intermediária															
LONGO PRAZO															
(n) Operação da máquina intermediária															
(o) Avaliação das opções potencialmente viáveis e elaboração do novo PNFN															
(p) Início da implementação do novo PNFN															
AÇÕES	1º Ano	2º Ano	3º Ano	4º Ano	5º Ano	6º Ano	7º Ano	8º Ano	9º Ano	10º Ano	11º Ano	12º Ano	13º- 20º Anos	21º- 24º Anos	25º Ano
	Curto Prazo			Médio Prazo									Longo Prazo		

Tabela 1: Cronograma de ações de curto, médio e longo prazo.

De uma forma geral, esse plano de ações tem como objetivo básico solidificar o *know-how* científico e tecnológico brasileiro na pesquisa em fusão e consolidar no LFN uma equipe capaz de desenvolver projetos avançados. A formação da equipe para desenvolver uma nova máquina para o LFN advirá dos planos de pesquisa associados às atualizações dos tokamak ETE e TCABR (ver seções 4.2.1 e 4.2.2), com participação fundamental da RNF. Com esse objetivo, deverá ser assegurada uma alocação de recursos financeiros de forma suficiente e continuada para a realização das atividades da RNF, notadamente se envolverem estudos e desenvolvimentos tecnológicos encomendados pelo LFN.

5.5.1 Ações de curto prazo

As ações de curto prazo ocorrerão em um período de aproximadamente 3 anos. Abaixo estão detalhadas cada uma delas.

- (a) Dentre as ações de curto prazo, a construção do LFN é a mais importante. O projeto executivo realizado pela empresa Minerbo-Fuchs Engenharia prevê que o período de construção desse empreendimento é de pouco menos de 2 anos (22 meses). No entanto, para acomodar possíveis dificuldades durante a construção, essa proposta de PNFN irá supor um período de 2,5 anos (30 meses) até a conclusão do empreendimento.
- (b) As atividades de pesquisa e desenvolvimento de curto prazo estarão concentradas nos esforços de atualização dos tokamaks ETE e TCABR, e espera-se que o tempo necessário para a atualização dessas máquinas seja de até 3 anos. Os detalhes das atualizações de cada uma das máquinas estão descritos nas seções 4.2.1 e 4.2.2.
- (c) Durante a fase de atualização dos tokamaks ETE e TCABR, será necessário estabelecer um programa especial de bolsas de estudo do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para treinamento de pessoal. Além disso, um mecanismo terá que ser estabelecido para contratar o pessoal qualificado que irá compor a equipe do LFN. Um dos desafios da implementação deste PNFN será possibilitar a fixação de pessoal qualificado no LFN para realizar o plano de pesquisa e desenvolvimento definido pelas diretrizes acima. O mecanismo de contratação deverá ser discutido e criado no primeiro ano da construção do LFN, de modo que as contratações comecem já no segundo ano da construção. A equipe inicial do LFN (primeiros 3 anos) deverá ser formada por 60 profissionais (20 doutores, 10 engenheiros, 20 técnicos e 10 de apoio administrativo) e esta crescerá à medida que a demanda por pessoal qualificado aumente.
- (d) Uma das primeiras atividades da equipe inicial do LFN, juntamente com pesquisadores associados à RNE, será o estudo conceitual da máquina intermediária que será construída e instalada no LFN a médio prazo.
- (e) Ao final da construção do LFN, será realizada uma reunião de avaliação para decidir qual máquina (ETE ou TCABR) será levada para o LFN, conforme mencionado na seção 4.2.4. Essa máquina será chamada aqui de primeira máquina. A decisão será baseada no andamento das atividades de atualização. A máquina que estiver com sua atualização mais adiantada será transferida para o LFN. Caso o TCABR seja transferido

para o LFN, o ETE será transferido para o IFUSP. Além de permitir a formação de uma equipe qualificada em projeto de reatores e também o treinamento de pessoal de operação, a primeira máquina será também utilizada para testar conceitos e componentes da segunda máquina.

Outras ações de curto prazo não incluídas nesse Programa já estão em andamento, como a reativação da RNE, o reforço das colaborações já existentes e o estabelecimento de novas colaborações em âmbito nacional e internacional, procurando identificar grupos de pesquisa e/ou empresas que atuem em áreas de interesse para o desenvolvimento de reatores a fusão, tais como materiais inovadores, supercondutores, robótica, eletrônica de potência etc.

5.5.2 Ações de médio prazo

As ações de médio prazo ocorrerão em um período de aproximadamente 9 anos. Abaixo estão detalhadas cada uma delas.

- (f) As ações de médio prazo se iniciam após a decisão de qual máquina será transferida para o LFN. Com a equipe inicial do LFN já formada, inicia-se a transferência da primeira máquina, sendo que sua transferência e instalação não deverá levar mais do que 1 ano.
- (g) Uma vez instalada, a primeira máquina do LFN será operada de modo a cumprir seu respectivo plano de pesquisa.
- (h) Em paralelo com a operação da primeira máquina, começarão os testes e o desenvolvimento das tecnologias necessárias para a confecção dos componentes da nova máquina, como bobinas supercondutoras, desviadores sólidos e/ou líquidos, leitos fluidizados, diagnósticos etc. Além disso, será necessário também criar um grupo de empresas associadas que atuem em áreas de interesse da fusão, tais como materiais inovadores, robótica, eletrônica de potência etc. Esse grupo de empresas incluirá, possivelmente, empresas estrangeiras, pois será necessária a contratação de serviços de consultoria e a fabricação de equipamentos por empresas e/ou institutos de pesquisa especializados. A contratação de tais serviços deverá incluir a transferência de tecnologias estratégicas.
- (i) Ainda em paralelo com a operação da primeira máquina, a equipe inicial do LFN deverá dar continuidade ao estudo conceitual da segunda máquina, supercondutora e de maior porte, a ser construída e instalada no LFN. Essa máquina será chamada aqui

de máquina intermediária. Ao todo, o estudo conceitual da máquina intermediária, levando em conta as fases de curto e médio prazo, não deverá levar mais do que 4 anos. Para acelerar o projeto conceitual da máquina intermediária, serviços de consultoria e equipamentos de empresas e institutos de pesquisa especializados serão contratados/comprados conforme mencionado no item anterior. A máquina intermediária deverá atingir os parâmetros de fusão, porém sem a introdução de trítio.

- (j) Após a conclusão do projeto conceitual da máquina intermediária, esse será submetido para aprovação formal pela direção da CNEN.
- (k) Com a aprovação do projeto conceitual, inicia-se o projeto detalhado de engenharia da máquina intermediária. Espera-se que a elaboração desse projeto não leve mais do que 2,5 anos, lembrando que, para acelerar esse processo, serviços de consultoria de empresas e institutos de pesquisa especializados serão contratados, como já mencionado.
- (l) A equipe do LFN deverá ser complementada a fim de se preparar para a construção da máquina intermediária.
- (m) Com o projeto detalhado de engenharia concluído e aprovado, inicia-se a construção da máquina intermediária e sua instalação no prédio do LFN. Baseando-se no tempo gasto para a construção e montagem de outras máquinas de tamanho intermediário, estima-se que essa fase não levará mais do que 4 anos.

5.5.3 Ações de longo prazo

As ações de longo prazo começam 12 anos após o início deste PNFN. Abaixo estão detalhadas cada uma delas.

- (n) Concluída a construção e instalação da máquina intermediária, inicia-se seu comissionamento e operação.
- (o) Após alguns anos de operação da máquina intermediária (cerca de 8 anos), será realizado um estudo de avaliação das opções potencialmente viáveis, entre elas: (i) construir uma máquina de grande porte, mas sem produção de energia de fusão, (ii) participar de uma colaboração internacional para o desenvolvimento de um reator protótipo (DEMO), caso esta possibilidade venha a existir, (iii) desenvolver um reator de baixa potência (≤ 100 MW) fusão-fissão baseado no ciclo de tório, (iv) desenvolver

um DEMO de fusão pura etc., conforme mencionado na seção 5.3. Ao fim desse estudo será elaborado um relatório técnico contendo as vantagens e desvantagens de cada opção analisada para seleção final por parte da CNEN. É importante ressaltar que essa seleção dependerá fortemente da experiência adquirida nas fases de curto e médio prazo e dos custos das tecnologias associadas à cada alternativa. A partir dessa seleção, será elaborado um novo PNFN com novas diretrizes e ações.

- (p) Início da implementação do novo Programa elaborado no item (o).

5.6 Previsão orçamentária

Esta seção apresenta uma estimativa dos custos associados às ações de curto prazo, relacionadas à construção do LFN e às atualizações do ETE e do TCABR, e às ações de médio prazo, relacionadas à construção da máquina intermediária.

Como mencionado anteriormente, dentre as ações de curto prazo, a principal ação corresponde à construção do LFN, que, com base no projeto executivo realizado pela empresa Minerbo-Fuchs Engenharia, foi estimado em R\$ 80 milhões, com um custo atualizado estimado em aproximadamente R\$ 100 milhões. Deve-se somar a esse valor, o custo da atualização do ETE e do TCABR. O custo estimado para a atualização do TCABR é de R\$ 45 milhões. Uma descrição detalhada do custo de cada componente pode ser vista na Tabela 2. Já o custo estimado para a atualização do ETE é de aproximadamente R\$ 5 milhões. Uma descrição detalhada desses custos pode ser vista na Tabela 3. Uma parte desses custos já está prevista no Termo de Cooperação CNEN-INPE mencionado anteriormente. Baseado no cronograma de atividades e nos custos descritos acima, espera-se que as ações de curto prazo tenham um custo médio anual de R\$ 50 milhões.

Enquanto a primeira máquina será operada bem abaixo da condição de equilíbrio, a máquina intermediária deverá ser capaz de operar próximo da condição de equilíbrio, ou seja, com altos valores do parâmetro de fusão ($n_0 \tau_E$), porém sem a introdução de trítio. Portanto, a máquina intermediária deverá possuir os componentes e equipamentos necessários para atingir tais condições. O principal componente na definição do desempenho, tamanho e custo dessa máquina corresponde às bobinas de campo toroidal. O campo toroidal em máquinas existentes geralmente é criado por bobinas de cobre ou bobinas supercondutoras. Bobinas de cobre com operação em regime permanente devem ser refrigeradas a água e produzem um campo $B_0 \leq 2$ T, sendo esse limitado termicamente e pela potência das fontes. Bobinas de cobre pulsadas, com acionamento por volantes de inércia ou por supercapacitores, poderiam atingir campos mais elevados. Nesse caso, a intensidade de campo

COMPONENTES	CUSTO (MILHÕES DE R\$)
Sistema de vácuo e aquecimento da câmara de vácuo	0,4
2 Bobinas poloidais adicionais	0,1
17 Fontes de potência para as bobinas poloidais	16,5
Bobinas de perturbação magnética ressonante	0,2
108 Fontes de potência para as bobinas ressonantes	20,0
Sistema de controle de plasma e aquisição de dados	0,5
Ladrilhos de grafite	0,4
Sistema de injeção de helicidade	0,3
Fonte de potência para injeção de helicidade	0,8
Sistema de boronização	0,8
Diagnósticos	5,0
CUSTO TOTAL (MILHÕES DE R\$)	45,0

Tabela 2: Tabela de custos da atualização do TCABR.

seria determinada por tensões mecânicas, energia armazenada no volante/capacitores e tempo de pulso. Bobinas supercondutoras de baixa temperatura poderiam atingir campos $B_0 \leq 6$ T em regime permanente, enquanto os campos gerados por bobinas de alta temperatura atingiriam $B_0 \leq 9$ T, situação ideal para reatores compactos. A utilização de bobinas supercondutoras de baixa/alta temperatura traz a necessidade de uma planta criogênica de hélio/nitrogênio para refrigeração das bobinas e também de um criostato. O tamanho e desempenho das máquinas futuras dependerá em grande parte do desenvolvimento de bobinas supercondutoras de alta temperatura.

A máquina intermediária também terá que incluir o protótipo dos desviadores que seriam

COMPONENTES	CUSTO (MILHÕES DE R\$)
Sistema de vácuo	0,5
Bobinas magnéticas e fontes de alimentação	1,3
Sistema de controle de plasma e aquisição de dados	0,3
Ladrilhos de grafite	0,2
Sistema de pré-ionização	0,7
Diagnósticos	0,8
Sistema de radiofrequência	1,2
CUSTO TOTAL (MILHÕES DE R\$)	5,0

Tabela 3: Tabela de custos da atualização do ETE.

utilizados num futuro reator de potência para remoção de cinzas e do excesso de energia, bem como todo o sistema de aquecimento auxiliar do plasma. O sistema de aquecimento auxiliar deverá possuir injetores de partículas neutras, que também servem para reposição de combustível, e girotrons para aquecimento dos elétrons e controle do perfil da corrente de plasma. Além disso, a máquina intermediária terá que incorporar um sistema de bobinas e fontes de potência para controle do equilíbrio do plasma, bem como um sistema completo de diagnósticos, aquisição de dados e de controle da máquina. Todos estes equipamentos e sistemas deverão ser desenvolvidos no período de operação da primeira máquina, estimado em 8 anos. O custo estimado da máquina intermediária, em dólares americanos, é de aproximadamente US\$ 100 milhões, como pode ser visto na Tabela 4. Portanto, estima-se que o custo anual médio dessa máquina seja de US\$ 12,5 milhões.

COMPONENTES DA MÁQUINA INTERMEDIÁRIA	CUSTO (MILHÕES DE US\$)
Câmara e sistemas de vácuo	5,0
Bobinas magnéticas supercondutoras (HTS)	45,0
Planta criogênica e criostato	8,0
Fontes de potência	5,0
Desviador	2,0
Diagnósticos	5,0
Girotrons	15,0
Injetores de partículas neutras	6,0
Sistema de aquisição de dados	8,0
Sistemas de controle e monitoramento	1,0
CUSTO TOTAL (MILHÕES DE US\$)	100,0

Tabela 4: Tabela de custos dos componentes da máquina intermediária.

5.7 Entregáveis

Do ponto de vista científico, espera-se que a operação das máquinas do LFN coloque o País com pleno domínio das competências técnicas e científicas necessárias para desenvolver o projeto conceitual de um reator a fusão, caso isso venha a ser de interesse do País. Em particular, espera-se produzir descargas estáveis, com longos tempos de duração, bem como valores de densidade, temperatura, e tempo de confinamento de energia próximos aos necessários em um reator a fusão. Além disso, ao esforço científico-tecnológico agregar-se-ão

os protocolos de licenciamento, tanto de regulação nuclear como ambientais.

Do ponto de vista tecnológico, o desenvolvimento e a operação dessas máquinas deverão trazer conhecimento para o projeto, construção e operação de grandes bobinas supercondutoras de alta temperatura. Este conhecimento é de grande interesse para várias áreas, tais como usinas eólicas e sistemas de distribuição de energia em geral (**aplicações: geração e distribuição de energia**), motores navais (**aplicações: indústria naval e defesa**), equipamentos de ressonância magnética nuclear (**aplicações: saúde**), fabricação de supercondutores em geral (**aplicações: indústria e comércio**), desenvolvimento de materiais resistentes a altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação (**aplicações: aeroespacial**). Além disso, outros avanços tecnológicos esperados serão o desenvolvimento de volantes de inércia de alta energia e fontes de potência de alto desempenho. Especificamente, essas fontes deverão operar nos quatro quadrantes ($\pm V/\pm I$), com correntes de até ± 20 kA, tensões de ± 2 kV e ciclos de controle da ordem de $500\ \mu\text{s}$. O conhecimento a ser adquirido durante o projeto de fabricação de tais fontes é diretamente transferível ao desenvolvimento, por exemplo, de motores para locomotivas elétricas (**aplicações: transporte**) e excitatrizes de geradores para usinas de energia elétrica (**aplicações: geração de energia**).

Com isso, o país insere-se efetivamente em um patamar de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica – em termos de um novo paradigma energético – extremamente promissor e nunca antes alcançado; seja em termos de tecnologias autóctones, seja no escopo de cooperações internacionais, como por exemplo a já citada com a EURATOM. Há que se ressaltar as várias possibilidades de *spinoffs*, como as mencionadas anteriormente, promotores de avanços em diversas outras áreas.