

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

Proposta elaborada por

Gustavo Canal, IFUSP

Gerson Ludwig, CNEN

Ricardo Galvão, IFUSP

Madison Almeida, CNEN

Orlando Gonçalves, CNEN

José Helder Severo, IFUSP

Maria Célia Andrade, INPE

Júlio Ferreira, INPE



Vista aérea da maquete computacional do futuro
Laboratório de Fusão Nuclear

Apresentado durante o

I Seminário de Fusão Nuclear

Organizado por

Comissão Nacional de Energia Nuclear

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Instituto de Física da USP

São Paulo, 12 de agosto de 2021

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **Objetivo do Programa Nacional de Fusão Nuclear (PNFN)**
 - 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
- **Ações fundamentais para sua implementação**
 - 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

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

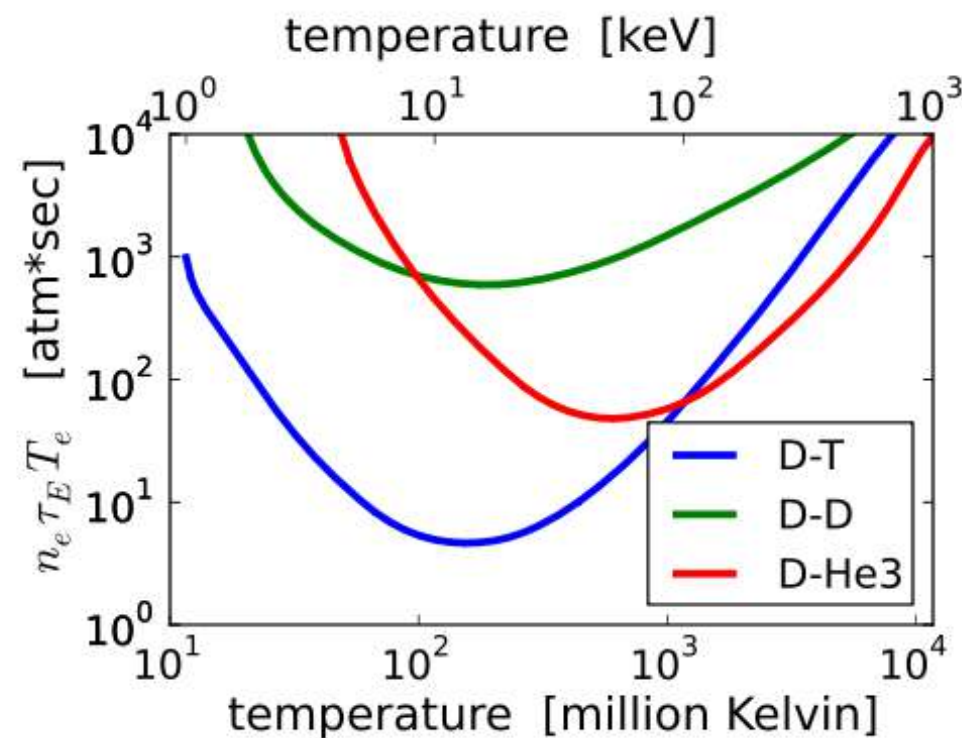
Três parâmetros definem a condição necessária para atingir a condição de equilíbrio: n , τ_E and T

- Para que a energia liberada pelas reações de fusão seja igual à energia injetada nele ($Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{heat}}$), três quantidades devem ser maximizadas:
 - Tempo de confinamento de energia (τ_E)
 - Temperature (T)
 - Densidade (n)
- O critério de Lawson (ou produto triplo de Lawson) estabelece a relação entre n , τ_E e T para atingir o ponto de equilíbrio ($Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{heat}} = 1$):

$$n \tau_E T > 3 \times 10^{21} \text{ (keV} \cdot \text{s / m}^3\text{)}$$

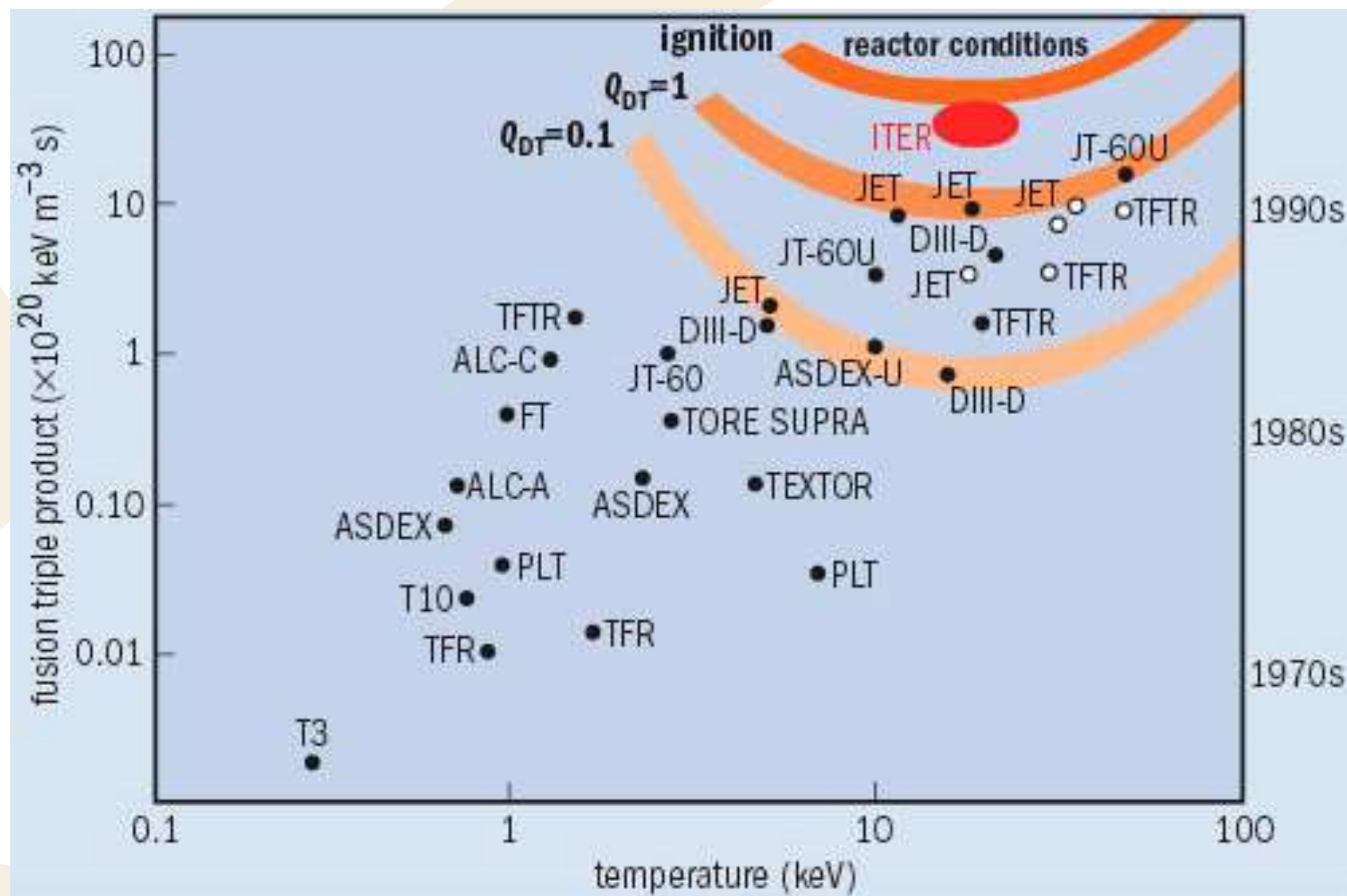
or

$$n \tau_E T > 5 \text{ (atm} \cdot \text{s)}$$



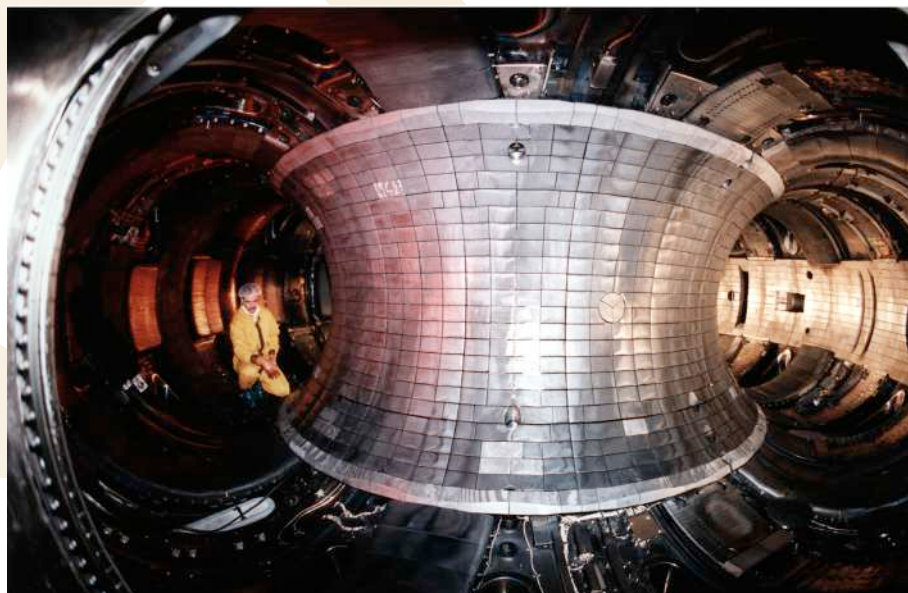
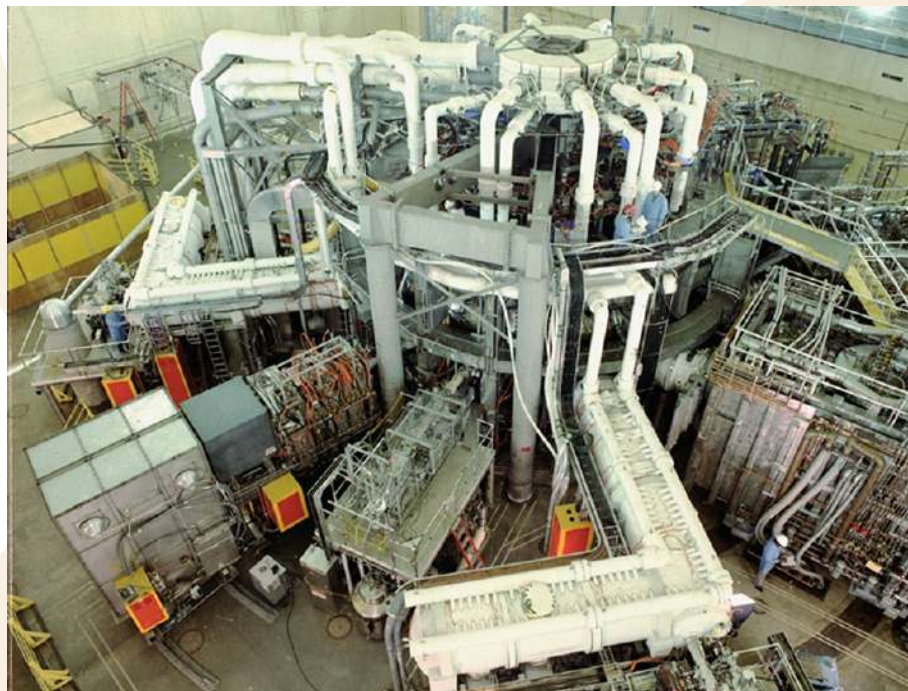
As máquinas (tokamaks) onde a fusão nuclear é estudada se aproximam cada vez mais do ponto de equilíbrio $Q = 1$

- Quando a energia proveniente das partículas α equilibra todas as perdas, uma condição denominada ignição é alcançada
 - No ponto de ignição, $P_{heat} = 0$ e, conseqüentemente, $Q = P_{fusion}/P_{heat} = \infty$



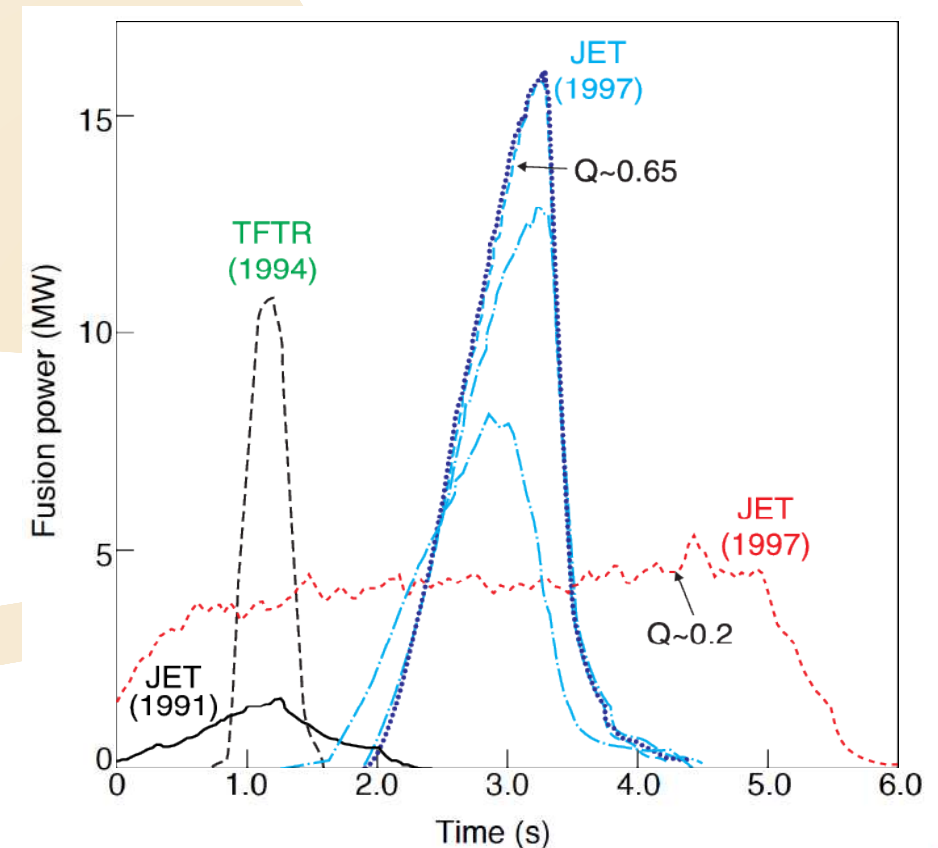
TFTR e JET já demonstraram que a fusão nuclear é uma fonte de energia cientificamente viável

- O Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) e o Joint European Torus (JET) são as únicas duas máquinas até hoje que operaram com D e T
 - Em 1994, o TFTR produziu 12 MW de energia por fusão



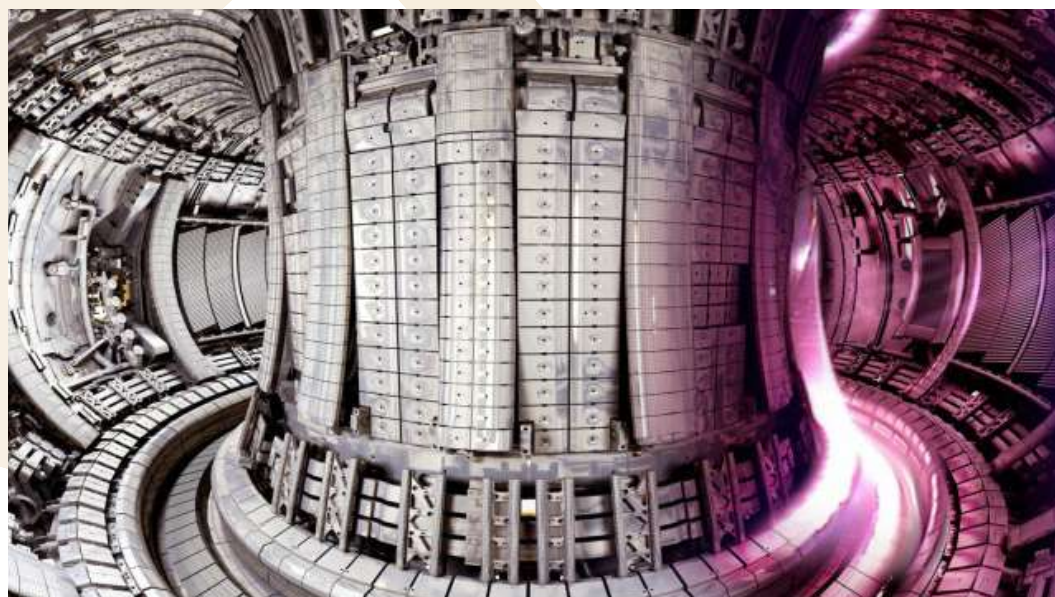
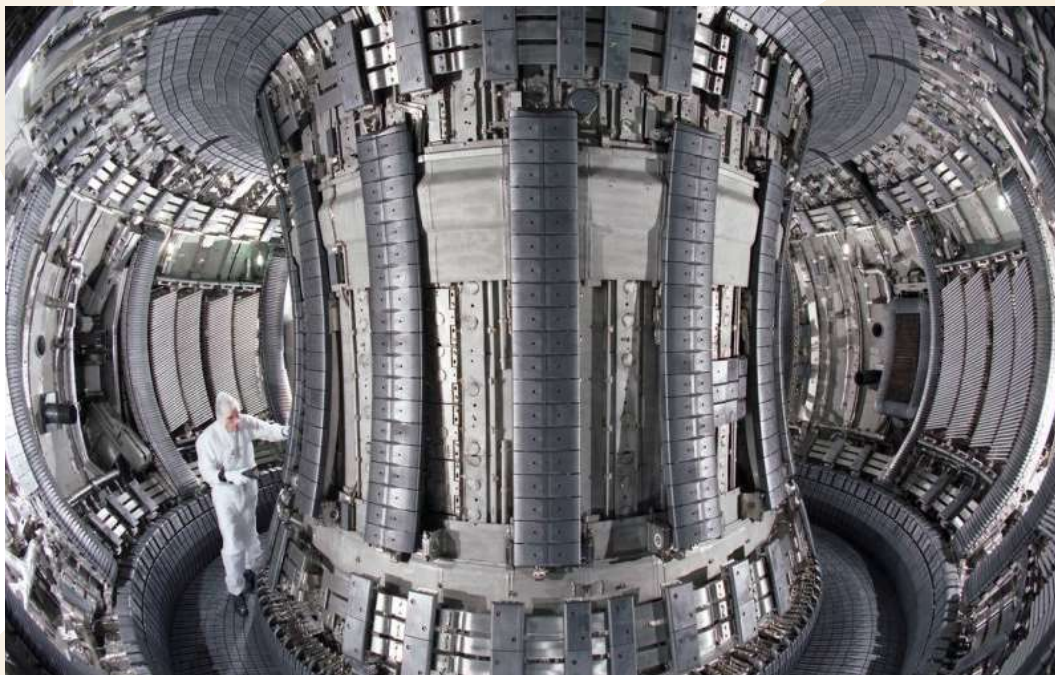
O TFTR tem seção transversal circular

- Raio maior / menor: 2.52 m / 0.87 m
- Corrente de plasma: 3 MA
- Campo toroidal: 6 T



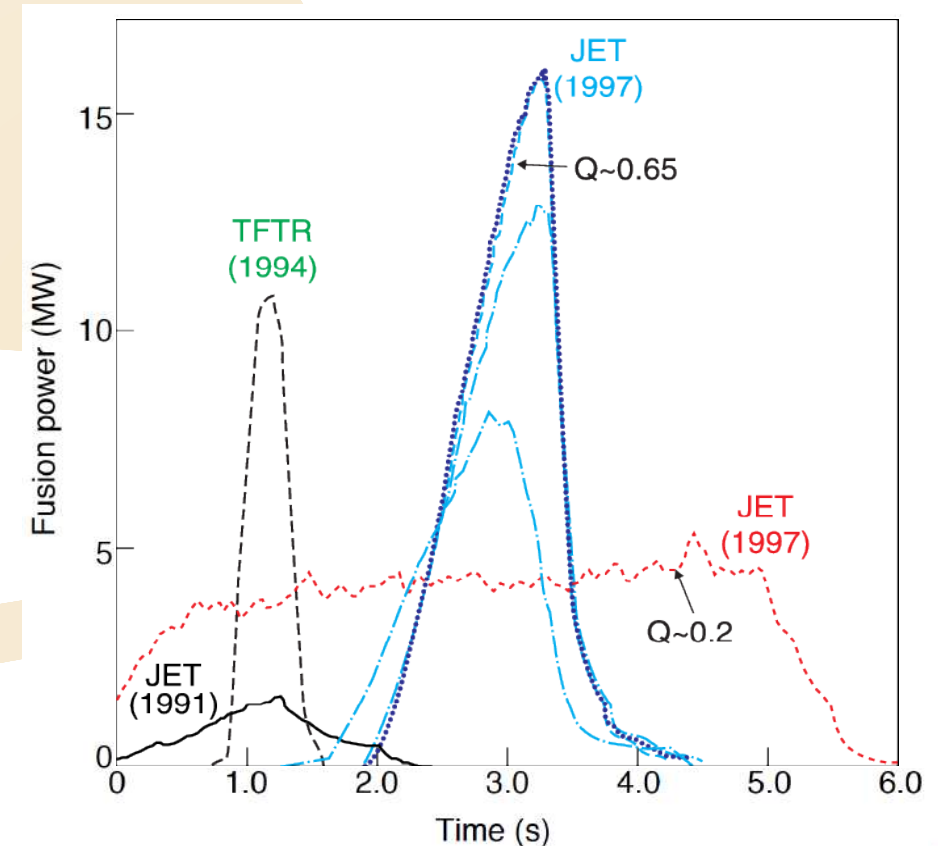
TFTR e JET já demonstraram que a fusão nuclear é uma fonte de energia cientificamente viável

- O Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) e o Joint European Torus (JET) são as únicas duas máquinas até hoje que operaram com D e T
 - Em 1997, o JET produziu 16 MW de potência por fusão com $Q = 0.65$



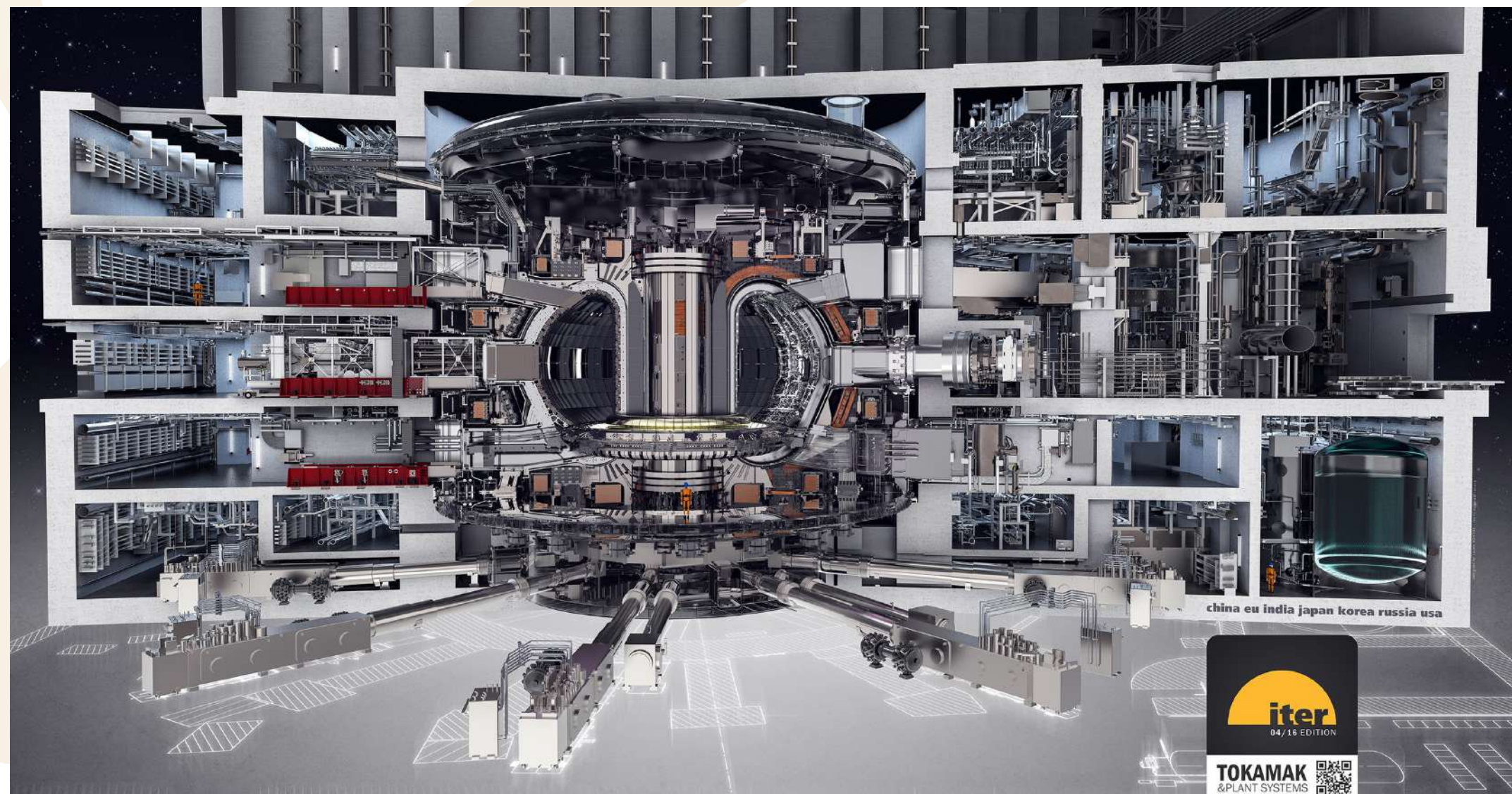
O JET tem seção transversal em D

- Raio maior / menor: 2.96 m / 1.25 m
- Corrente de plasma: 4.8 MA
- Campo toroidal: 3.45 T



O *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER) será o maior e mais complexo experimento já construído

- O ITER está sendo construído na França por um consórcio de países: União Européia, Índia, Japão, China, Rússia, Coreia do Sul e EUA
 - O ITER foi projetado para atingir $Q = 10$ e possui $R_0 = 6.2$ m, $a = 2.0$ m, $I_p = 15$ MA, $B_0 = 12$ T e duração de pulso de aproximadamente 1000 s



O projeto ITER entrou em sua fase de montagem

- A instalação de US\$ 23 bilhões terá como objetivo demonstrar a viabilidade técnica e econômica da fusão nuclear como fonte de energia
 - Em 28 de julho de 2020, uma cerimônia no local do ITER marcou o início da fase de montagem
 - O ITER está cerca de 70% completo e seu primeiro plasma está planejado para ocorrer em dezembro de 2025



Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

Pesquisadores do MIT propuseram uma rota alternativa (e mais rápida) para o desenvolvimento de reatores a fusão comerciais

- Com participação corporativa de mais de US\$ 150 milhões, pesquisadores do MIT buscam construir uma planta piloto de energia a fusão em 15 anos
 - A Commonwealth Fusion Systems (CFS) é uma empresa privada criada por ex-pesquisadores do MIT

Fusion Engineering and Design 100 (2015) 378–405



Contents lists available at ScienceDirect

Fusion Engineering and Design

journal homepage: www.elsevier.com/locate/fusengdes



ARC: A compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets

B.N. Sorbom*, J. Ball, T.R. Palmer, F.J. Mangiarotti, J.M. Sierchio, P. Bonoli, C. Kasten, D.A. Sutherland, H.S. Barnard, C.B. Haakonsen, J. Goh, C. Sung, D.G. Whyte

Plasma Science and Fusion Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

HIGHLIGHTS

- ARC reactor designed to have 500 MW fusion power at 3.3 m major radius.
- Compact, simplified design allowed by high magnetic fields and jointed magnets.
- ARC has innovative plasma physics solutions such as inboardside RF launch.
- High temperature superconductors allow high magnetic fields and jointed magnets.
- Liquid immersion blanket and jointed magnets greatly simplify tokamak reactor design.

GRAPHICAL ABSTRACT

ARC Reactor

Inboard-side RF launch

Fusion power: 525 MW

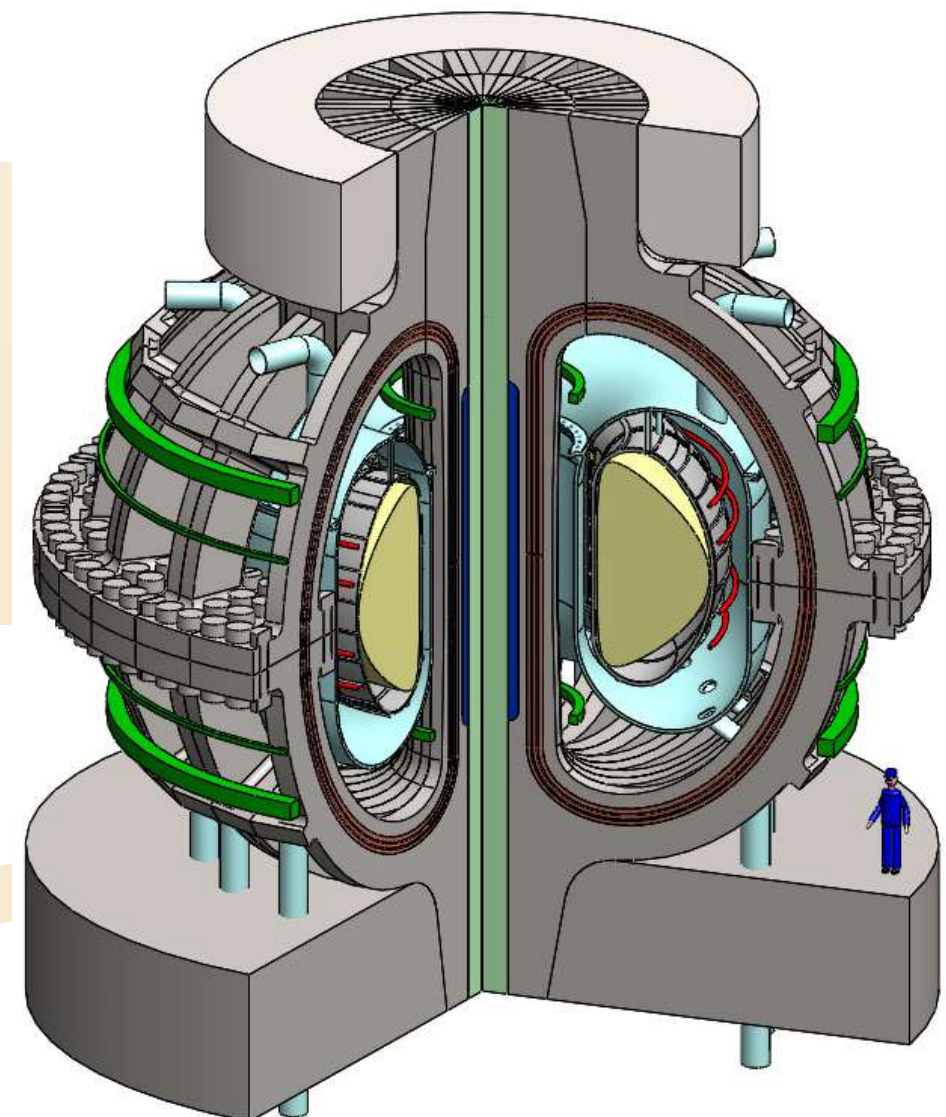
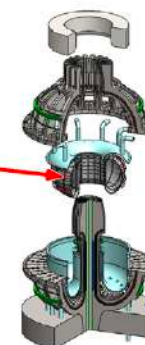
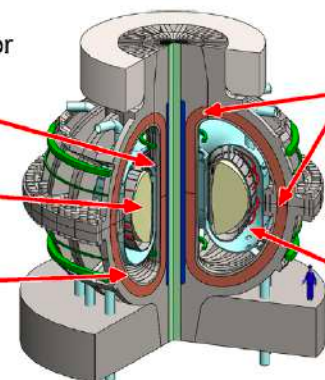
TF coils: $B_0 = 9.2\text{T}$

Magnet joints allow vertical maintenance

Vacuum vessel: single, replaceable component

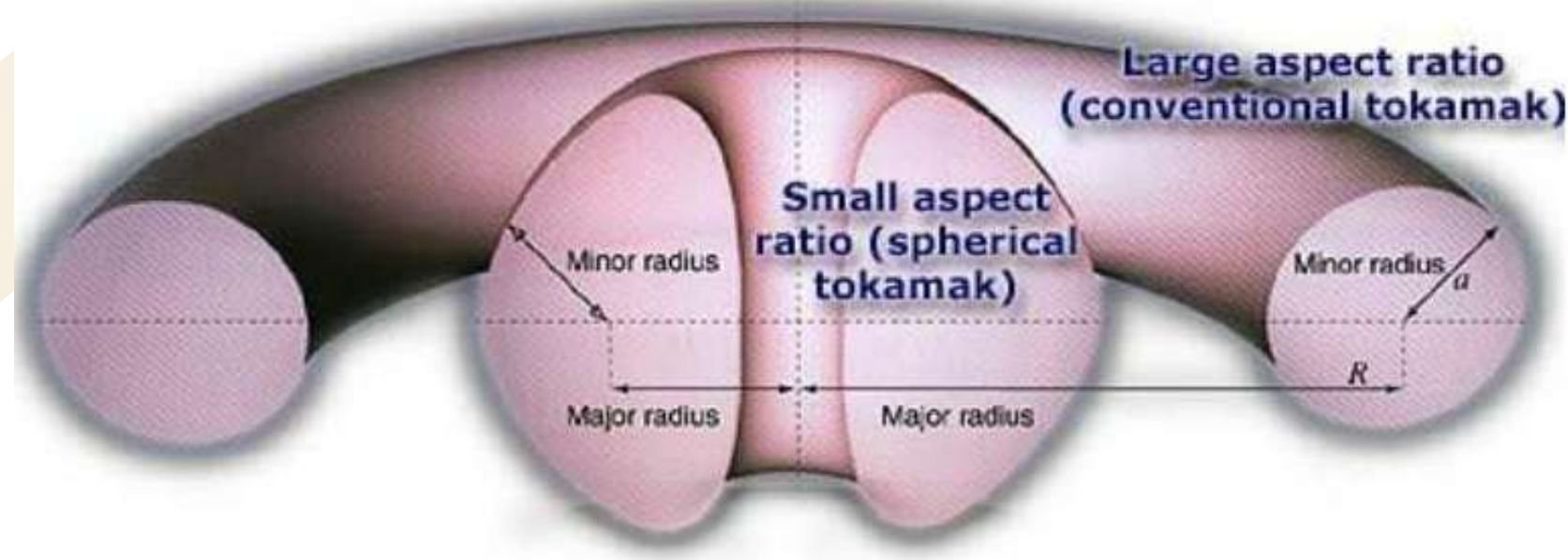
FLiBe liquid immersion blanket

Major radius: 3.3 m



Tokamaks de baixa razão de aspecto têm uma série de vantagens em relação à tokamaks de razão de aspecto convencional

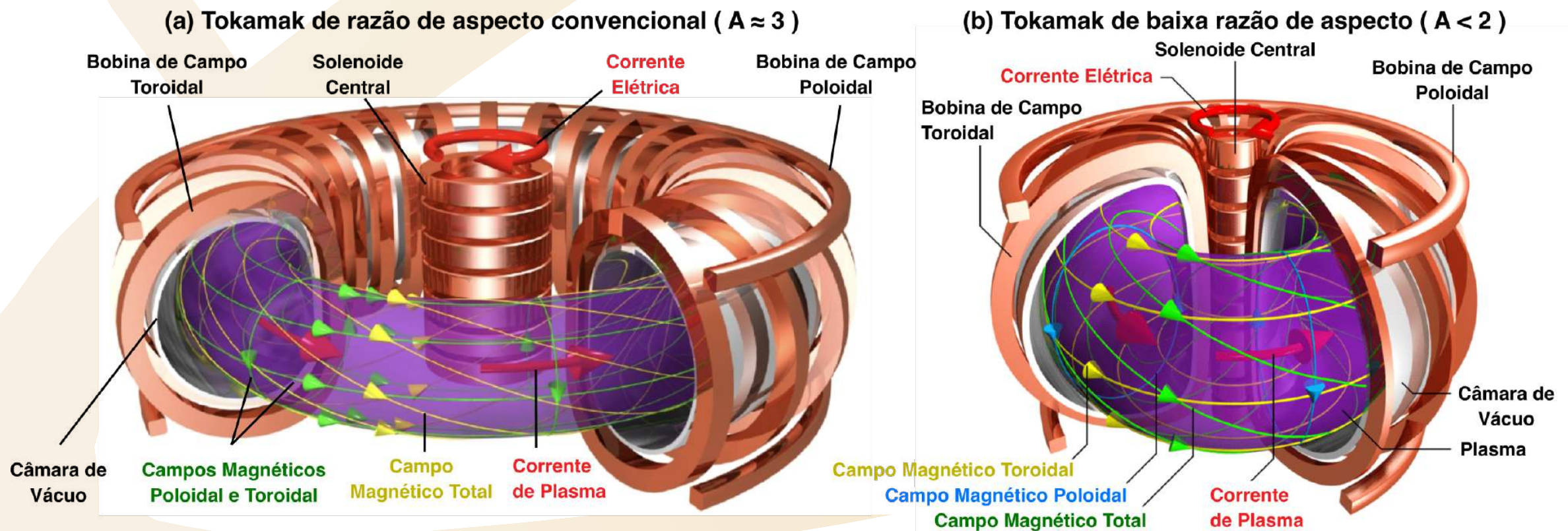
- Tokamaks esféricos (STs) têm $A = R/a < 2$ enquanto a maior parte dos tokamaks (de razão de aspecto convencional) possuem $A = R/a \sim 3$
 - STs são naturalmente alongados (correntes de plasma mais altas)
 - STs permitem operar plasma com pressões mais elevadas
 - STs permitem operar plasmas com campos toroidais mais baixos



Aspect ratio, $A=R/a$

Tokamaks de baixa razão de aspecto têm uma série de vantagens em relação à tokamaks de razão de aspecto convencional

- Tokamaks esféricos (STs) têm $A = R/a < 2$ enquanto a maior parte dos tokamaks (de razão de aspecto convencional) possuem $A = R/a \sim 3$
 - STs são naturalmente alongados (correntes de plasma mais altas)
 - STs permitem operar plasma com pressões mais elevadas
 - STs permitem operar plasmas com campos toroidais mais baixos



Tokamaks de baixa razão de aspecto têm uma série de vantagens em relação à tokamaks de razão de aspecto convencional

- A potência produzida por fusão em um tokamak escala com B^4 e R^3

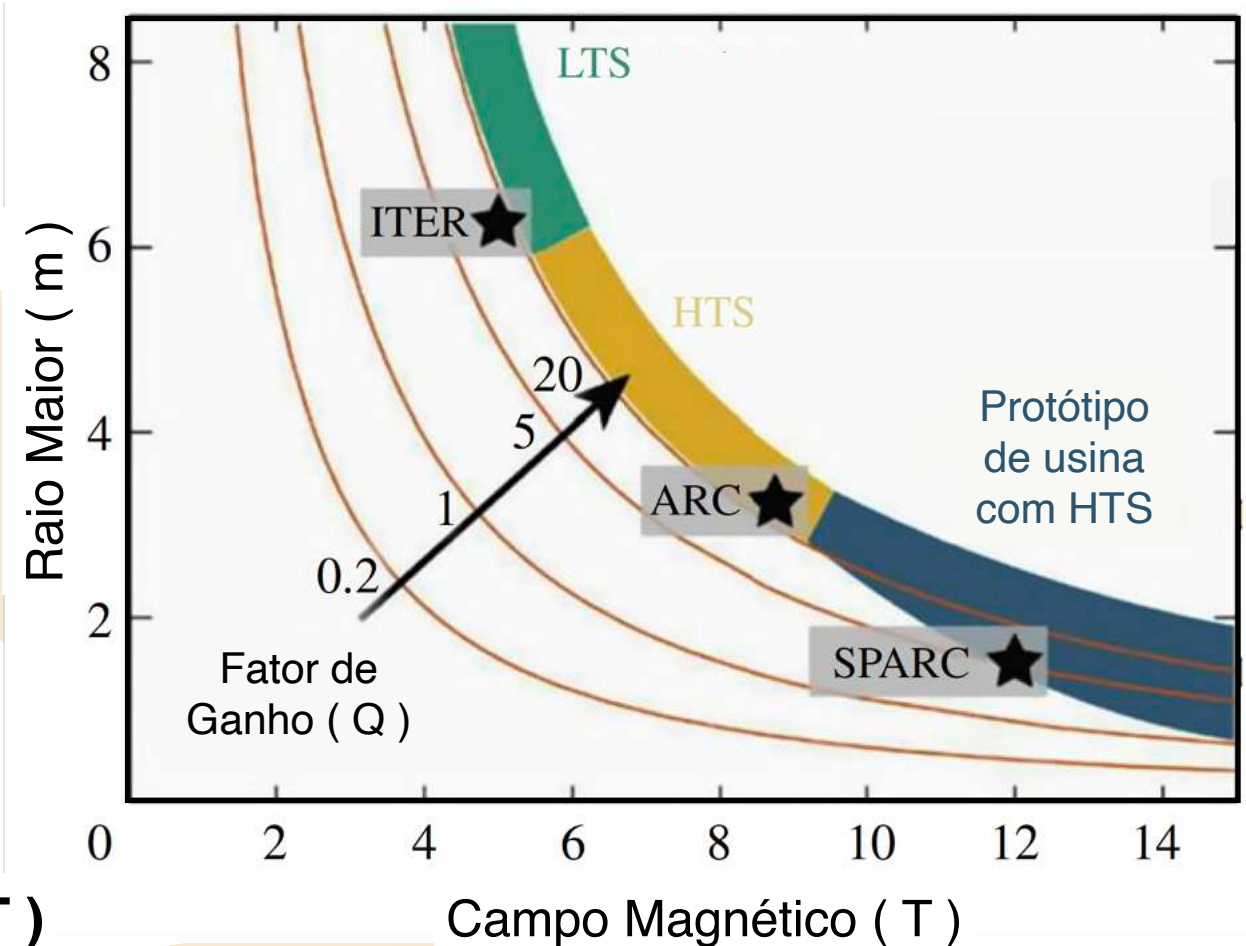
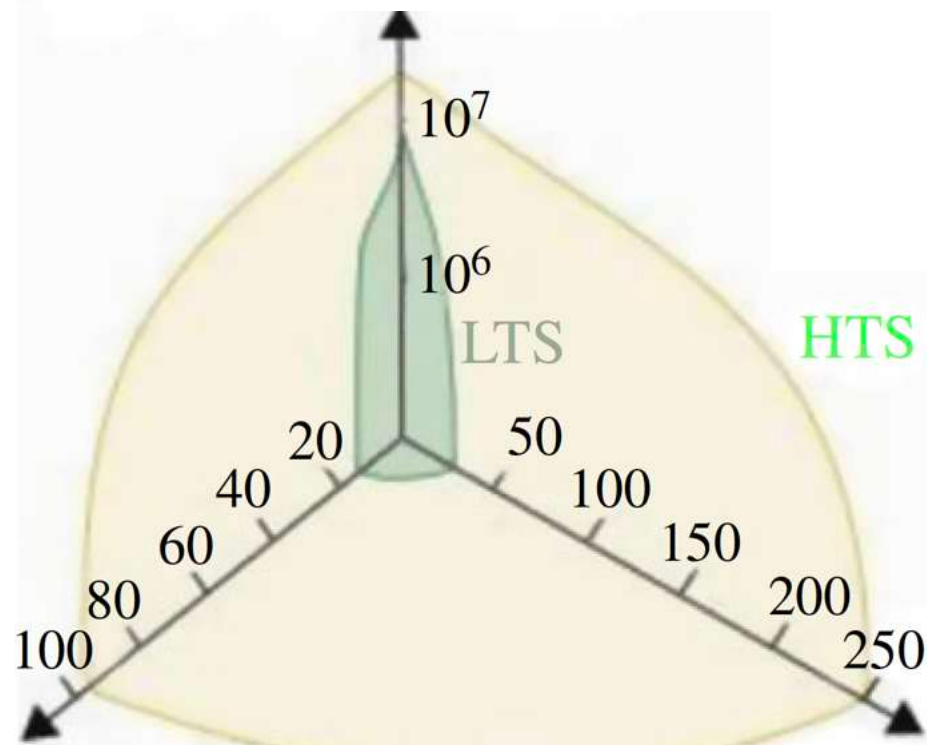
$$P_{\text{fus}} \propto \frac{\beta_N^2 B^4 R^3}{q^2 A^4} \quad \text{com} \quad A = R/a \quad \text{e} \quad q \propto \frac{1}{I_P}$$

	scenario	(i)	(ii)	(iii)
	ITER	$q \times 2$	$B \times 2 \ R/2$	$B \times 2 \ R/2 \ q \times 2$
B (T)	5.3	5.3	10.6	10.6
R (m)	6.2	6.2	3.1	3.1
V (m ³)	890	890	111.25	111.25
$q/3$ safety factor	1	2	1	2
n_{20} (m ⁻³)	1	0.5	4	2
T (keV)	9	5.3	12	10.6
P_{fus} (MW)	500	44	1800	714
Q	10	0.9	36	14
P_f/V (MW m ⁻³)	0.6	0.05	16	6.5

O desenvolvimento de supercondutores de alta temperatura é crucial para o desenvolvimento da fusão em escala comercial

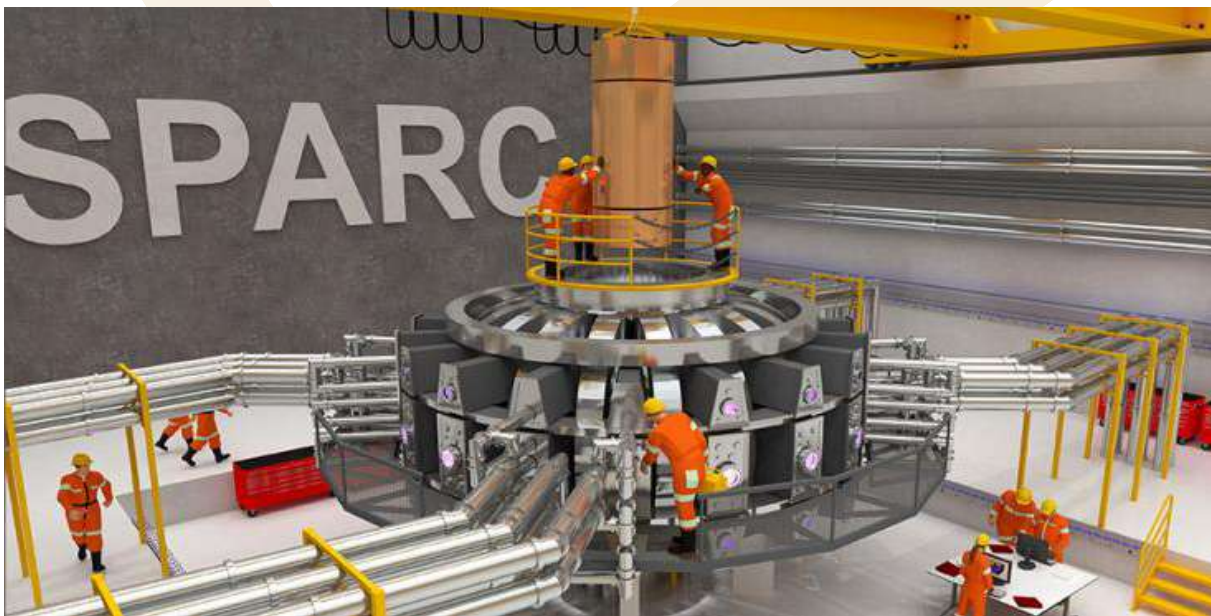
- Supercondutores de alta temperatura trouxeram a fusão nuclear ao alcance
 - A chamada "rota acelerada" permite uma diminuição do tamanho (e custo) de reatores a fusão

Densidade de Corrente (A / cm²)

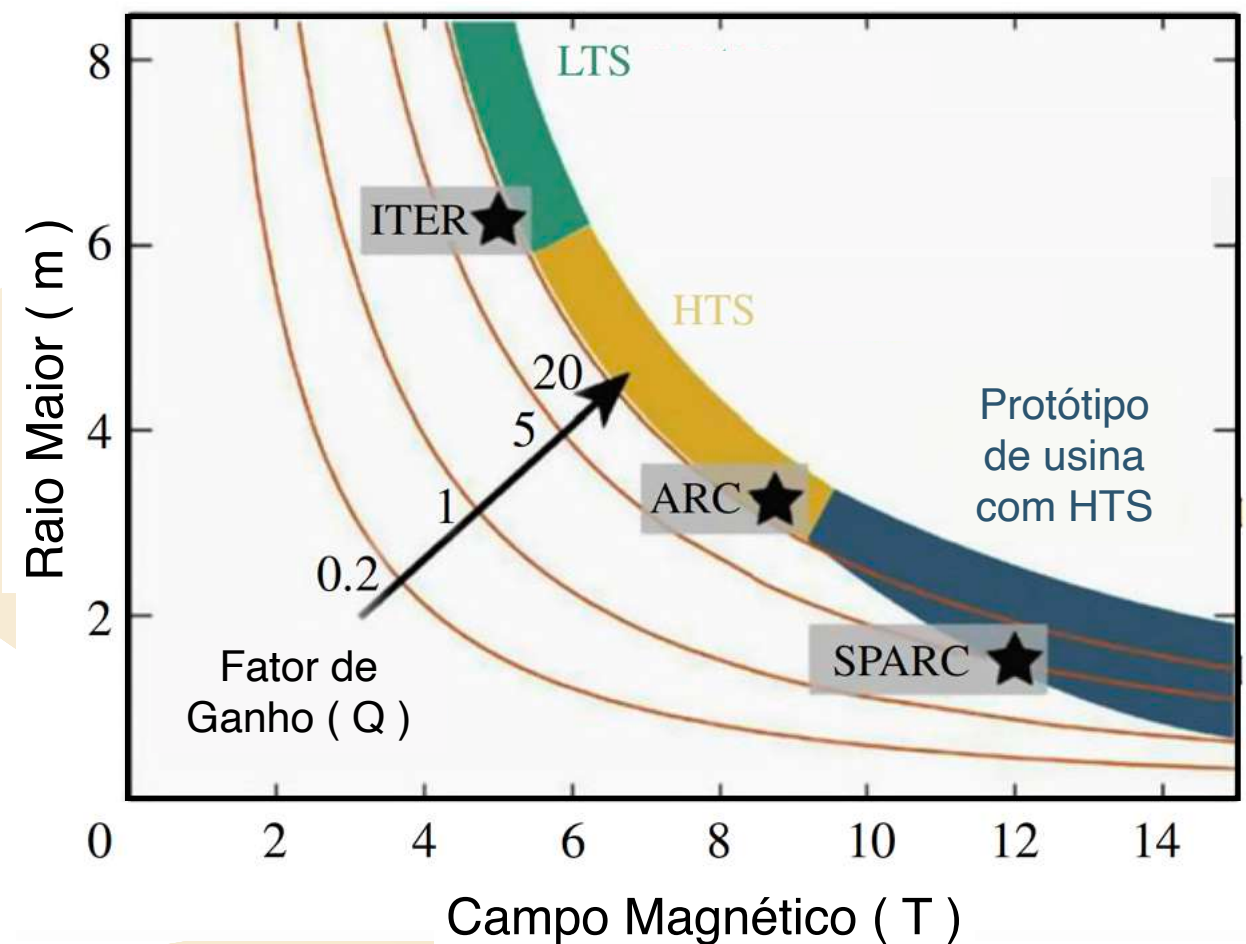


O desenvolvimento de supercondutores de alta temperatura é crucial para o desenvolvimento da fusão em escala comercial

- Supercondutores de alta temperatura trouxeram a fusão nuclear ao alcance
 - A chamada "rota acelerada" permite uma diminuição do tamanho (e custo) de reatores a fusão



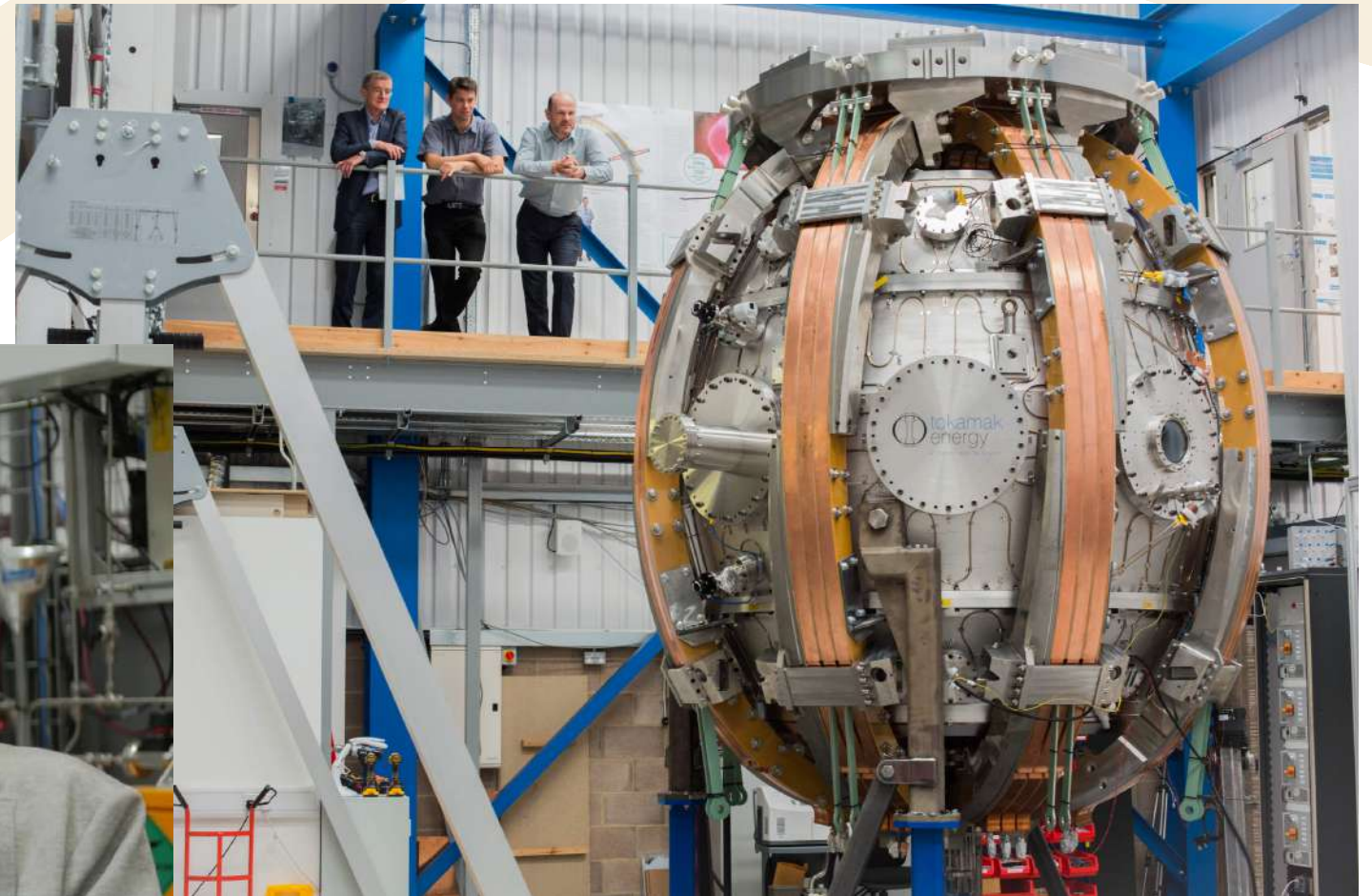
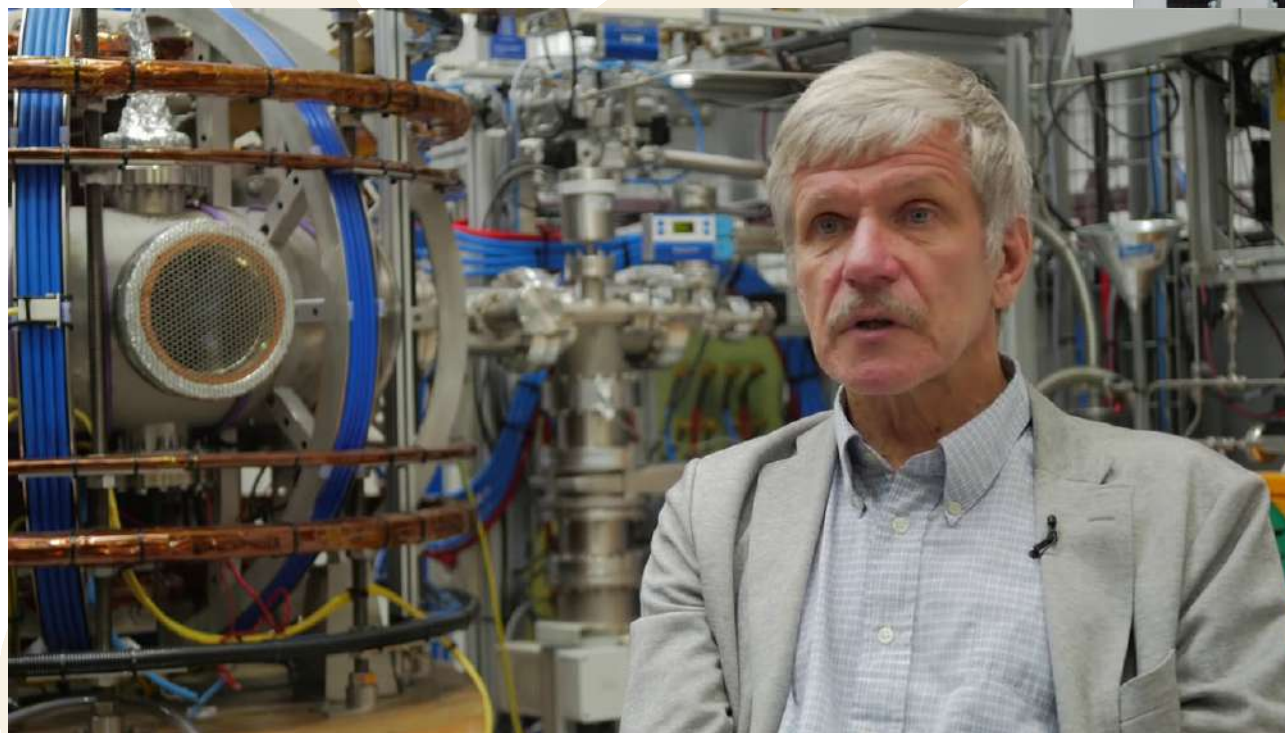
Financiado em parte pela Breakthrough Energy Ventures, um fundo liderado por Bill Gates, Jeff Bezos, Michael Bloomberg e outros bilionários



A Tokamak Energy é uma empresa derivada (spioff) do CCFE com o objetivo de alcançar energia de fusão comercial em STs

- A equipe da Tokamak Energy está certa de que os STs fornecem o caminho mais curto para o desenvolvimento de reatores a fusão comerciais

*Dr. Mikhail Gryaznevich
é co-fundador da Tokamak Energy e já
visitou o Brasil várias vezes no passado*



<https://www.tokamakenergy.co.uk>

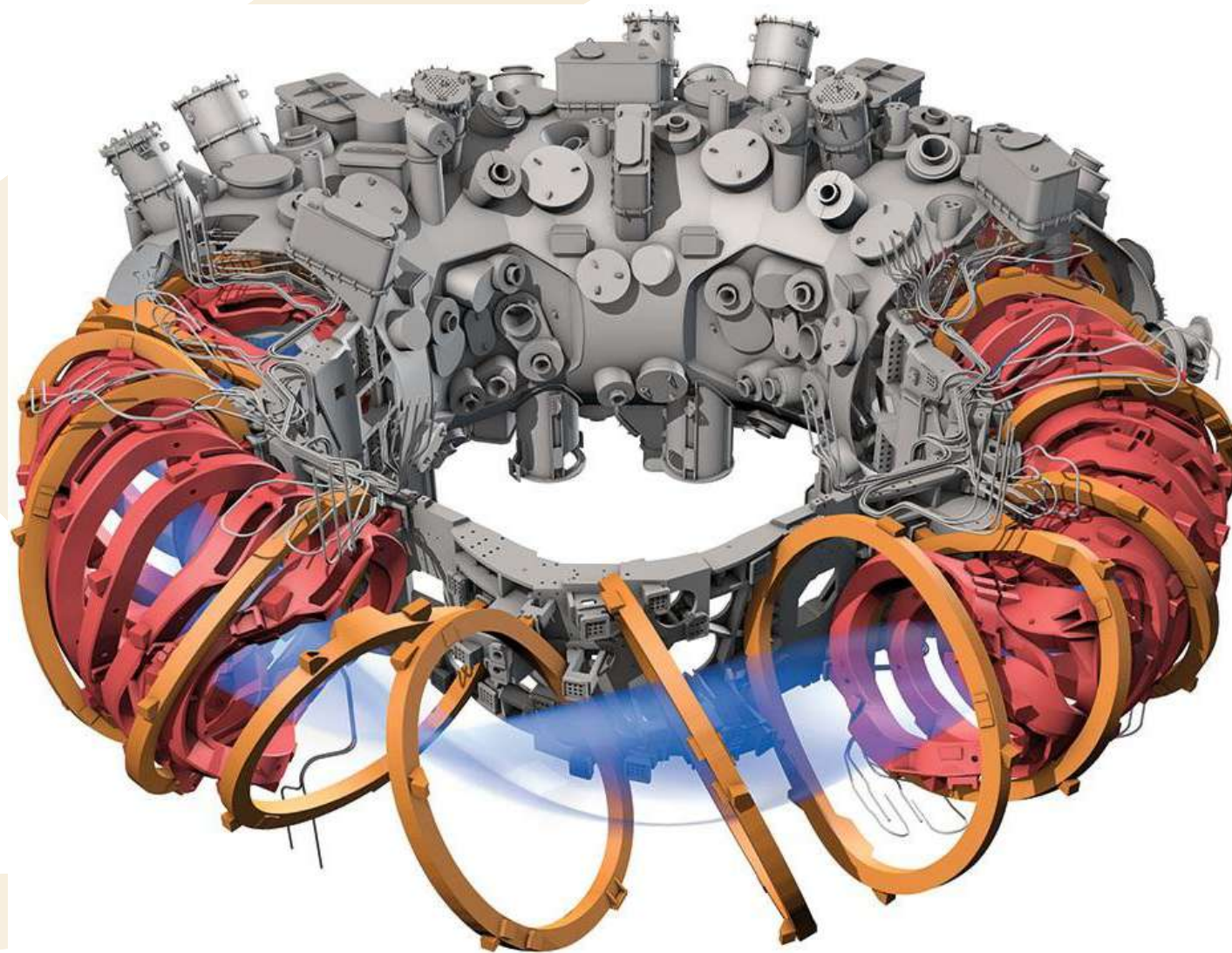
O governo do Reino Unido aprovou a liberação de £ 220 milhões para o projeto conceitual de um reator a fusão comercial - o *Spherical Tokamak for Energy Production (STEP)*

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

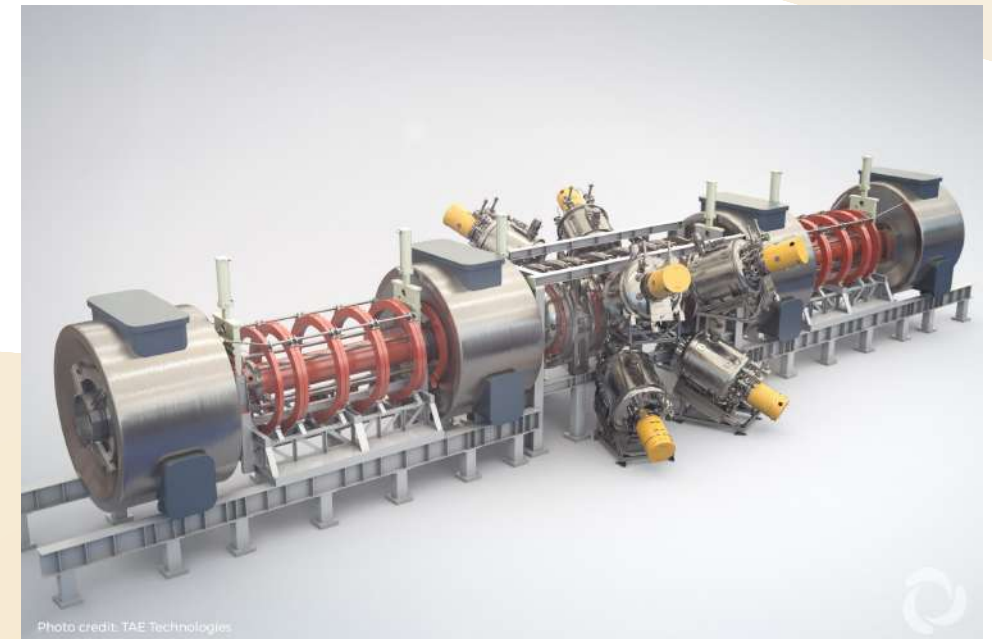
O Wendelstein 7-X está pavimentando uma rota alternativa para o desenvolvimento da fusão como fonte de energia

- O W7-X é um stellarator operado pelo *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* que possui $R_0 = 5.5$ m, $a = 0.53$ m, $B_0 = 3$ T (bobinas supercondutoras)
 - **Vantagens:** operação contínua e maior estabilidade em relação à tokamaks
 - **Desvantagem:** stellarators possuem geometria complexa de difícil construção



A TAE Technologies (Tri Alpha Energy) é uma empresa sediada na Califórnia que desenvolve fusão aneutrônica

- Com o apoio da Google (US\$ 500 milhões) e outros investidores de alta tecnologia, a empresa aposta na reação próton-boro para desenvolver reatores menores e mais baratos



<https://generalfusion.com>

*Aparentemente, a nova corrida mundial começou!
(analogia com a corrida espacial)*

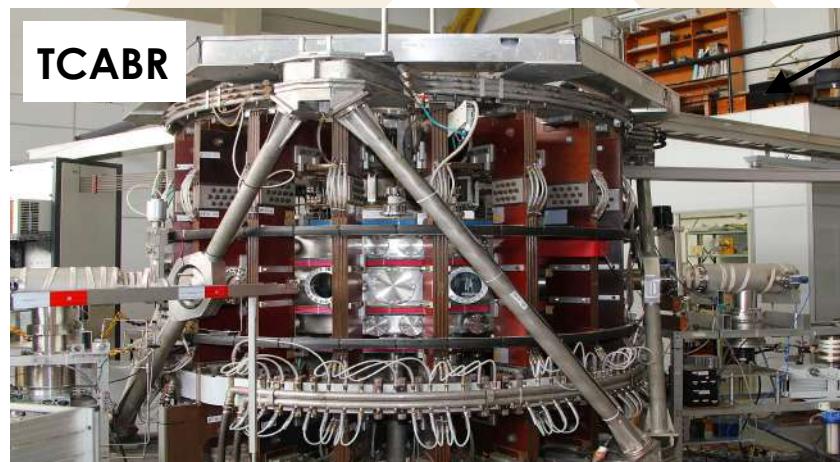
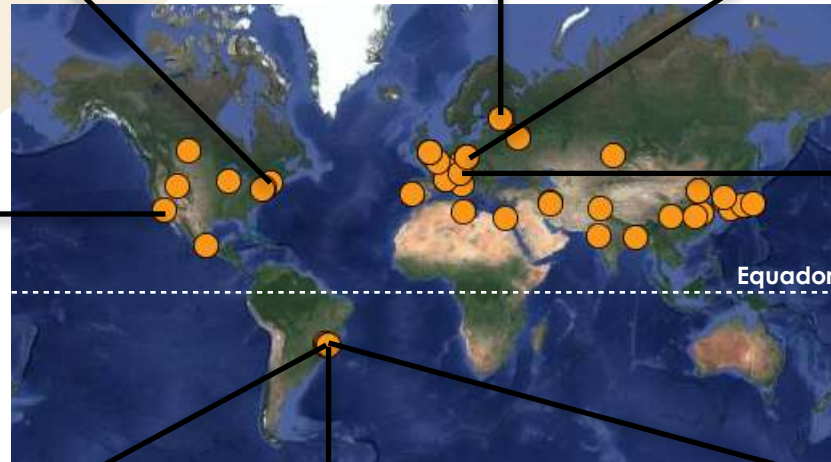
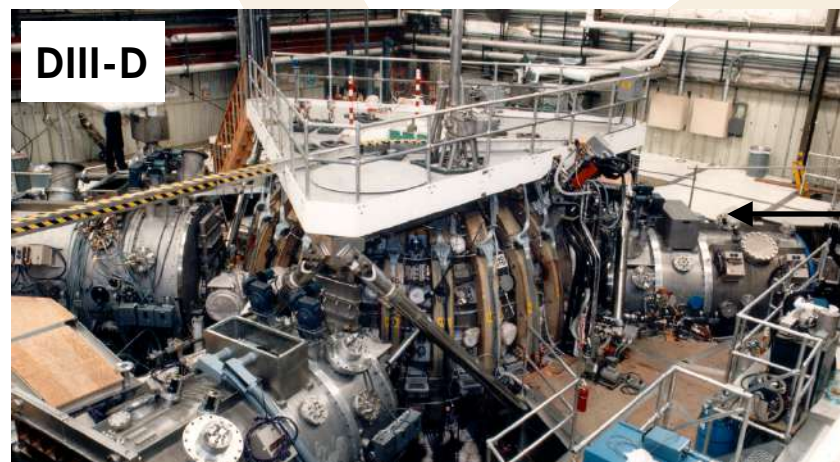
Reatores híbridos fusão-fissão podem ser usados para converter materiais férteis (Th^{232} ou U^{238}) em isótopos físséis (U^{233} ou Pu^{239})

- Em reatores a fissão nuclear, materiais físséis são misturados com U^{238} , formando uma mistura não explosiva
- Ao absorver um nêutron, Th^{232} (abundante no Brasil) gera U^{233} , que não pode ser separado quimicamente do Pu^{239}
 - U^{233} tem grande seção de choque para nêutrons térmicos, utilizados com eficiência na fissão
- Um reator a fusão poderia produzir combustível para vários reatores de fissão
 - Uma fração dos nêutrons seria usada para produzir T (necessário à fusão)
 - Os parâmetros de plasma para tal aplicação já são atingidos em tokamaks atuais
 - Mesmo sem produzir energia elétrica, o balanço energético e de nêutrons em um tokamak é favorável
 - A operação de reatores híbridos fusão-fissão poderia ser pulsada, utilizando bobinas de cobre refrigeradas por água

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

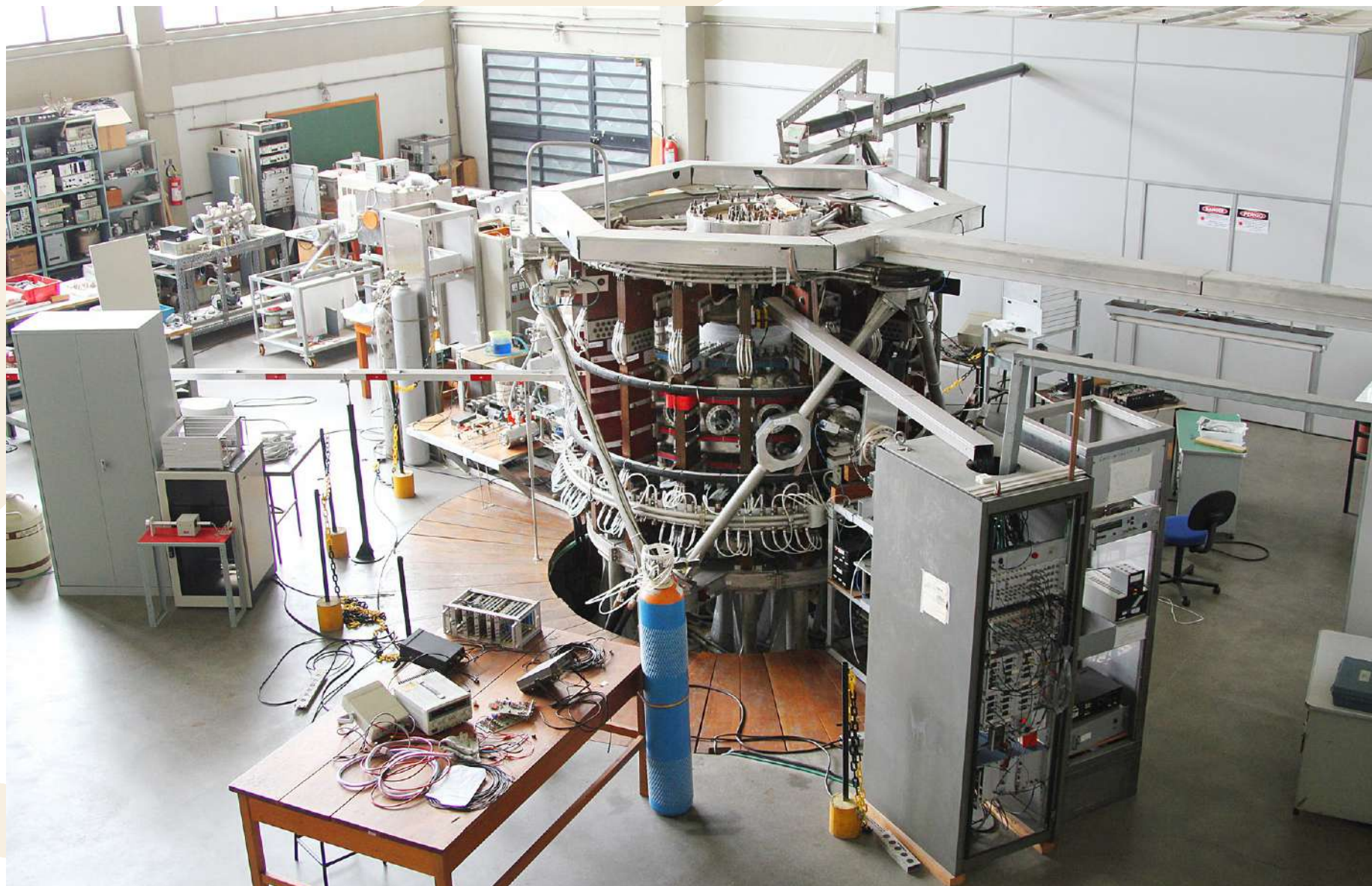
- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

Alguns tokamaks em operação no mundo e no Brasil



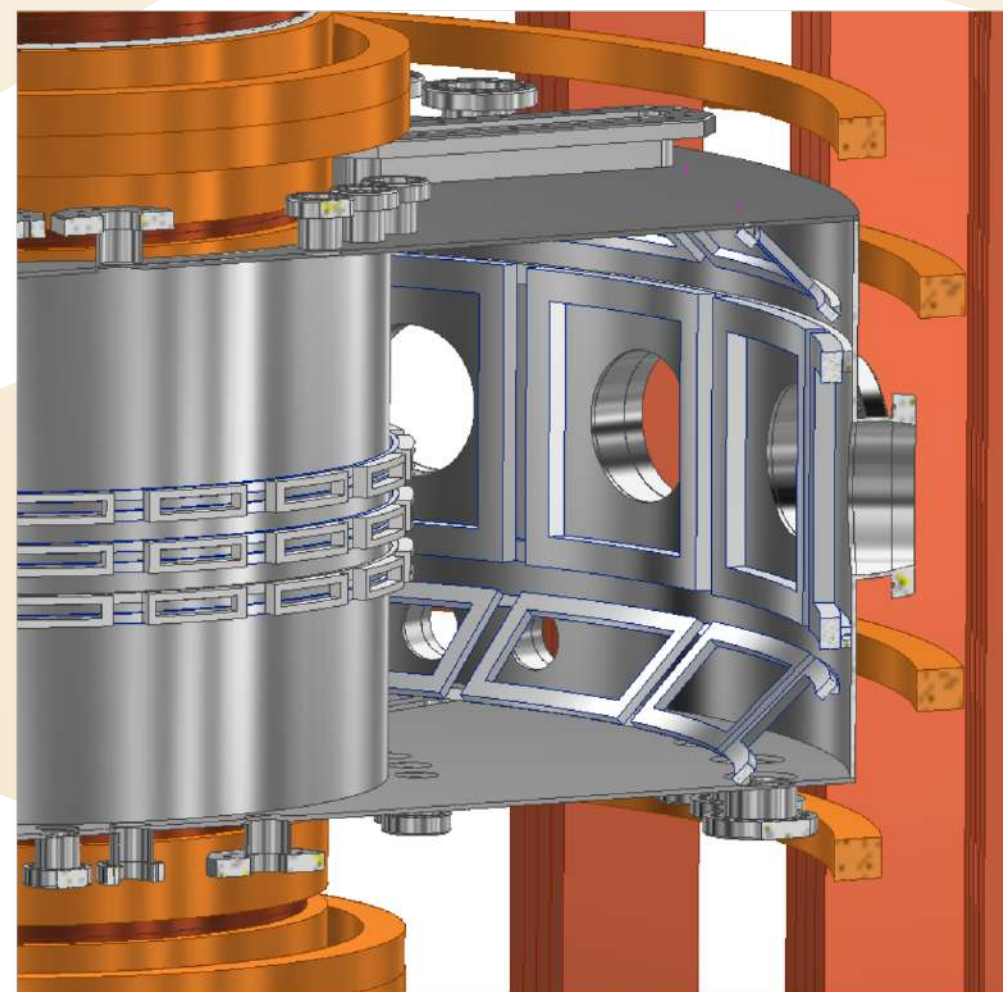
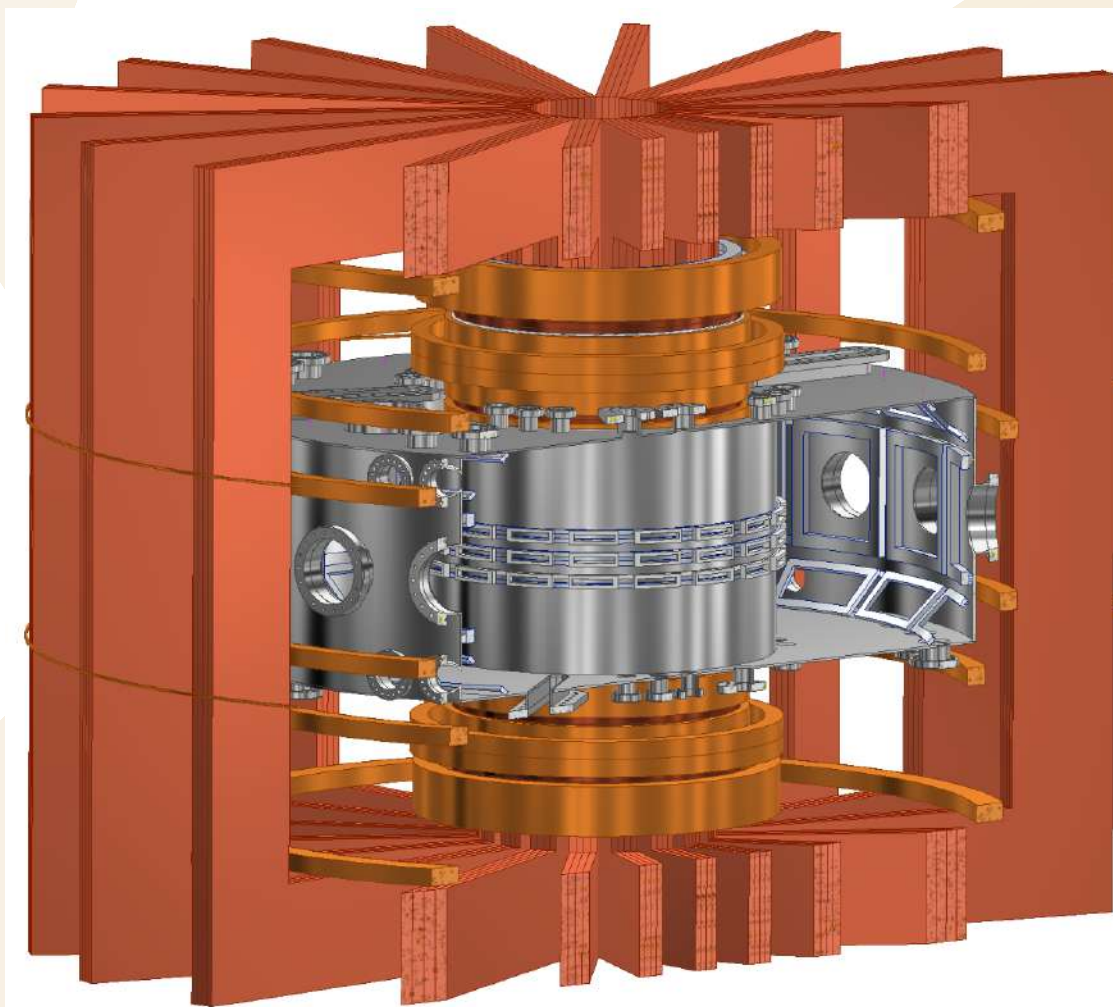
No Instituto de Física da USP, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Física de Plasmas

- O *Tokamak à Chauffage Alfvén Brésilien (TCABR)* é a maior máquina do País
 - O TCABR está sendo aprimorado com um sistema inovador, e único no mundo, de bobinas magnéticas para controle de instabilidades de plasma



No Instituto de Física da USP, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Física de Plasmas

- O sistema inovador de bobinas do TCABR possibilitará a realização de estudos únicos no mundo sobre a supressão de *Edge Localized Modes* (ELMs)



- O tokamak com maior número de bobinas no mundo possui 18 bobinas ao todo
 - O TCABR terá 6 grupos de bobinas, sendo que cada grupo terá 18 bobinas, isto é, o TCABR terá 108 bobinas ao todo

No Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório Associado de Plasmas

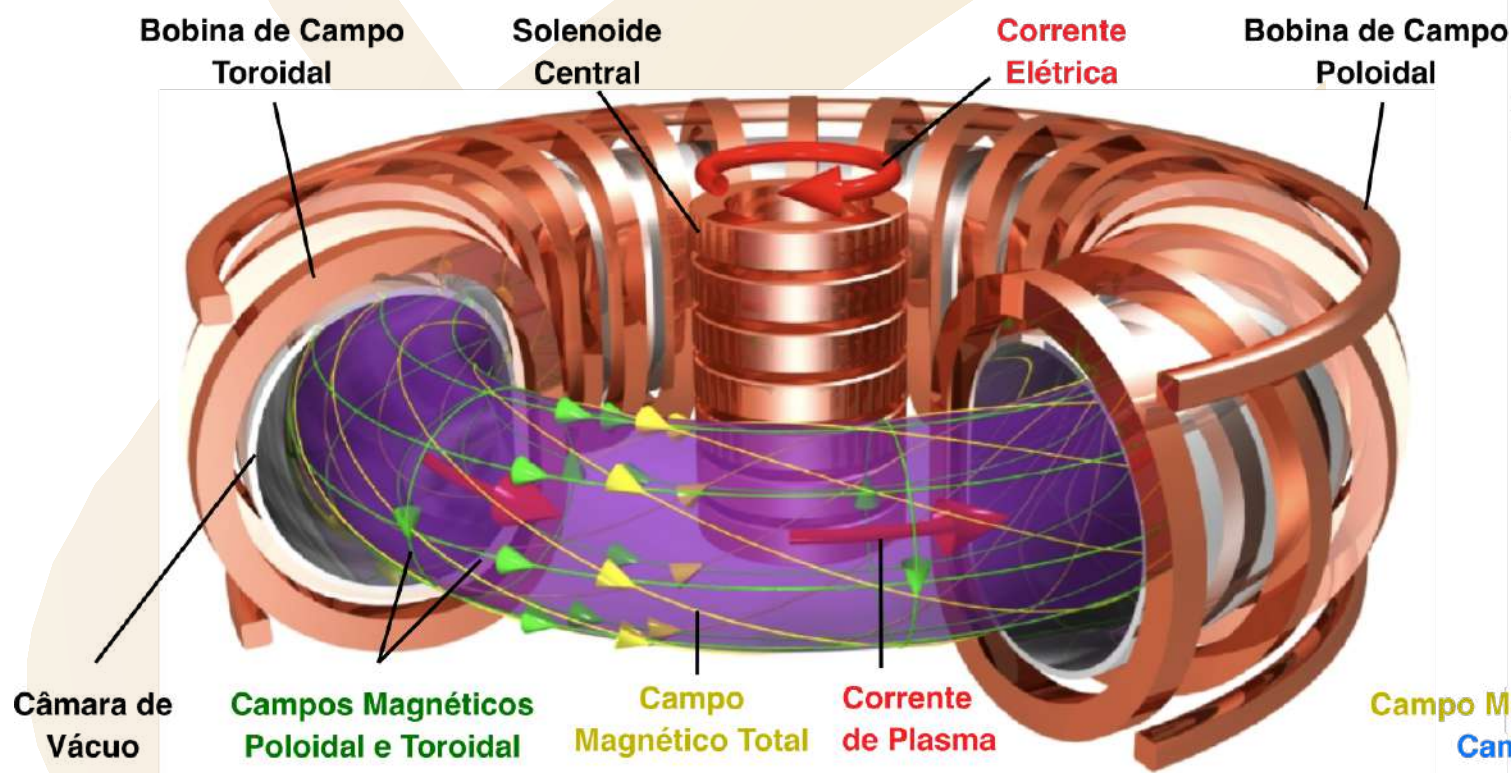
- O *Experimento Tokamak Esférico (ETE)* é uma máquina que explora as vantagens de plasmas de baixa razão de aspecto



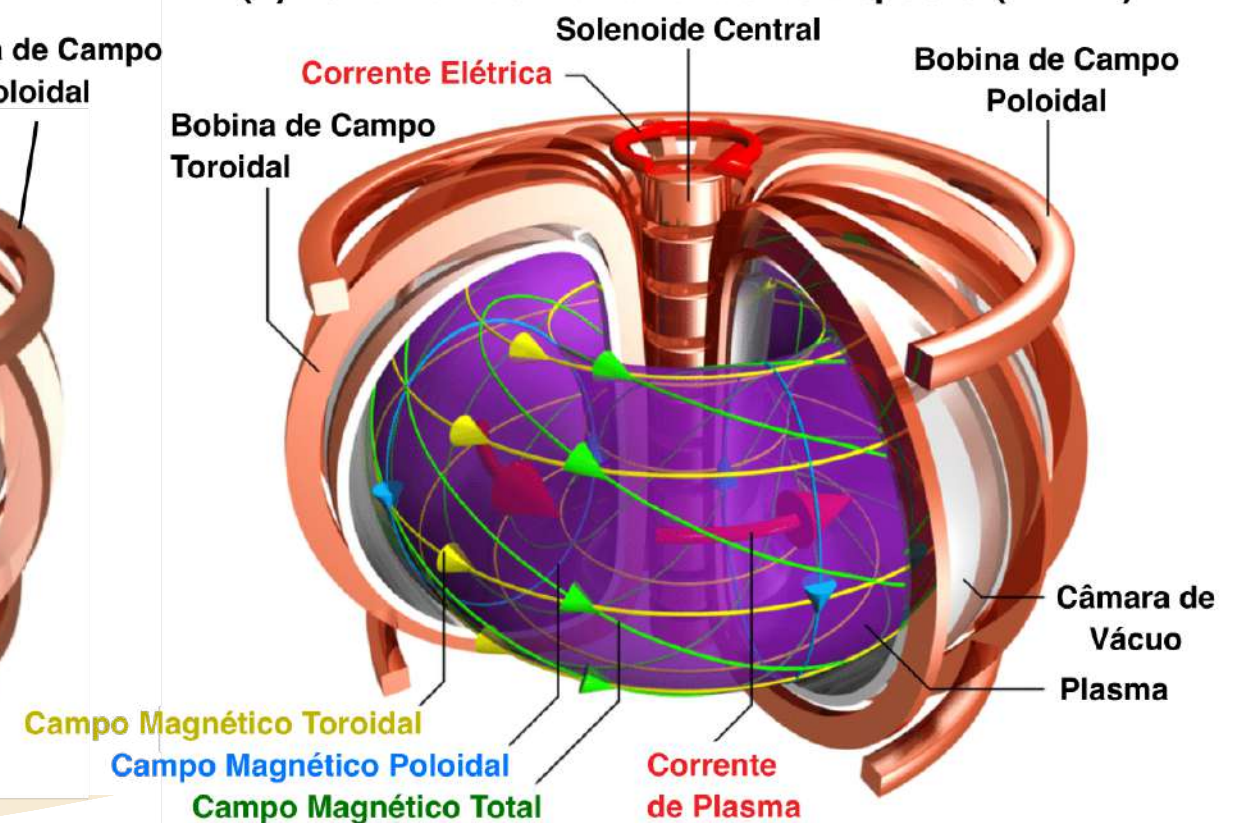
No Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório Associado de Plasmas

- O *Experimento Tokamak Esférico (ETE)* é uma máquina que explora as vantagens de plasmas de baixa razão de aspecto
 - Tokamaks esféricos são considerados os mais promissores com relação ao desenvolvimento de reatores a fusão comerciais

(a) Tokamak de razão de aspecto convencional ($A \approx 3$)



(b) Tokamak de baixa razão de aspecto ($A < 2$)



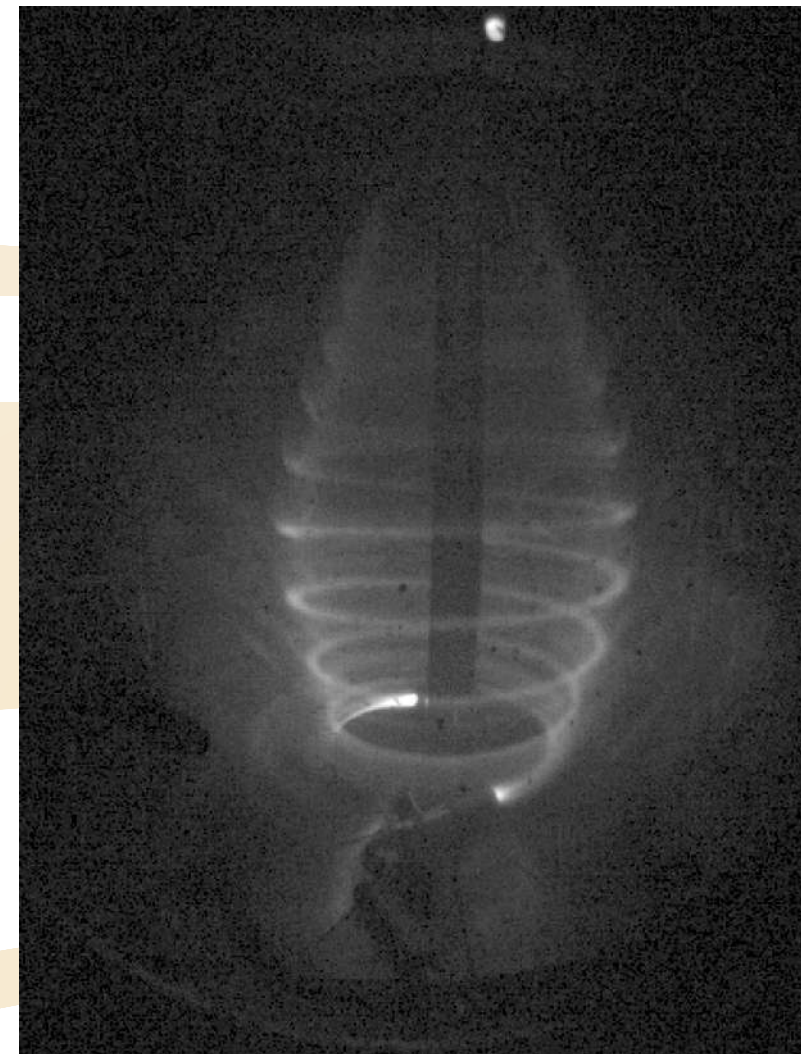
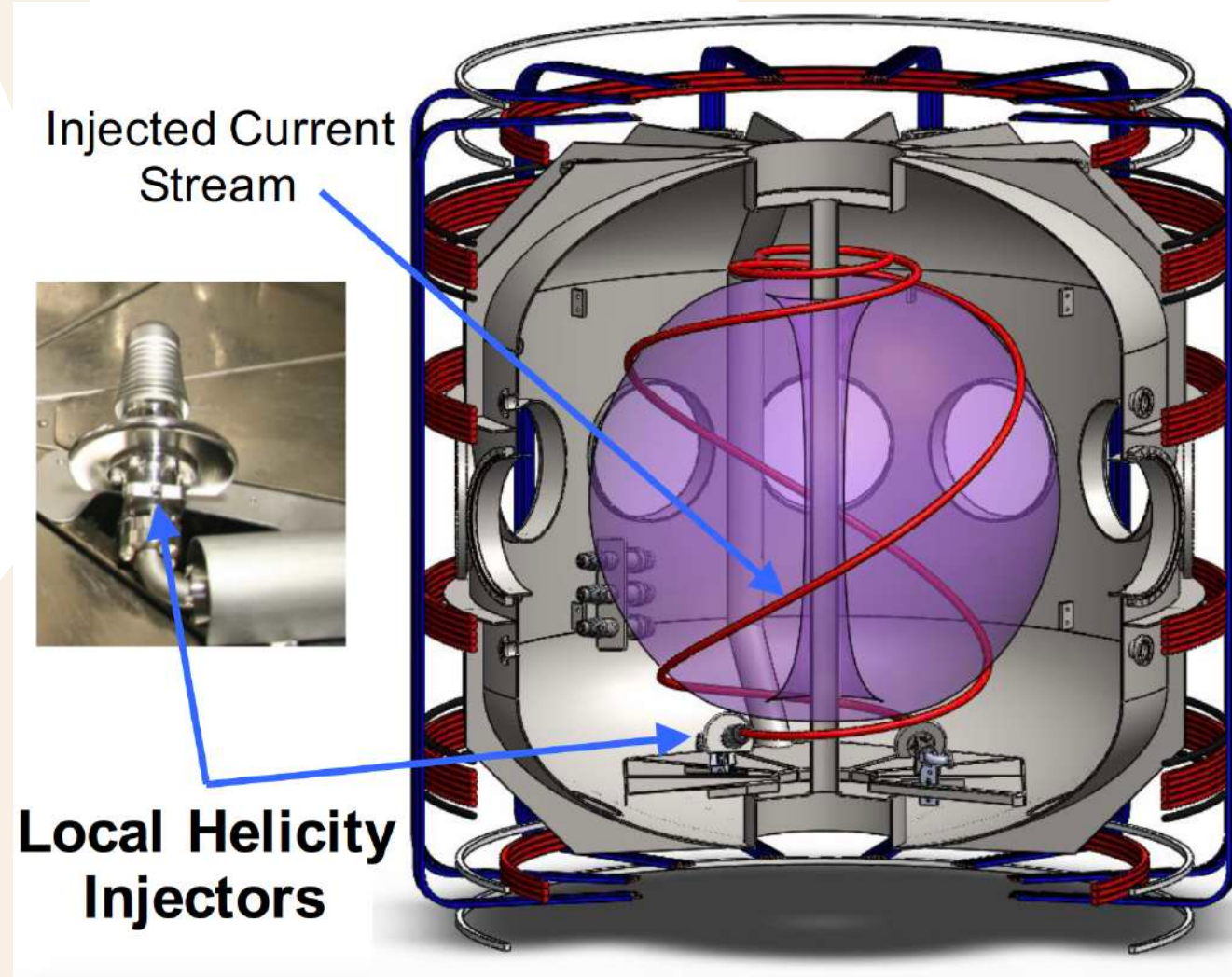
Na Universidade Federal do Espírito Santo, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Plasma Térmico

- O NOVA-UFES é um tokamak de pequeno porte que está sendo modernizado com um sistemas de injeção de helicidade utilizando tochas de plasma



Na Universidade Federal do Espírito Santo, a pesquisa em fusão nuclear é realizada no Laboratório de Plasma Térmico

- O NOVA-UFES é um tokamak de pequeno porte que está sendo modernizado com um sistemas de injeção de helicidade utilizando tochas de plasma



Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

No Brasil, o avanço da fusão nuclear como uma área estratégica depende fortemente da implementação de um Programa Nacional

- **A operação de um laboratório de fusão nuclear requer equipes e instalações bem maiores que as usuais em outras áreas de física**
 - A operação de um laboratório de fusão nuclear de grande porte requer apoio governamental
- **O Programa Nacional de Fusão Nuclear (PNFN) proposto foi elaborado através de uma colaboração entre CNEN, INPE e IFUSP**
 - O PNFN já foi enviado para o MCTI
- **O PNFN proposto está baseado em 4 pilares**
 - Implantação do Laboratório de Fusão Nuclear
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração de tecnologias necessárias ao desenvolvimento da fusão
 - Colaborações internacionais (esse item será apresentado em separado)

O futuro Laboratório de Fusão Nuclear da CNEN irá concentrar e coordenar estudos em fusão termonuclear controlada no País

- O projeto executivo do Laboratório de Fusão Nuclear (LFN) já foi concluído e sua implantação depende apenas da liberação de recursos financeiros



O futuro Laboratório de Fusão Nuclear da CNEN irá concentrar e coordenar estudos em fusão termonuclear controlada no País

- O projeto executivo do Laboratório de Fusão Nuclear (LFN) já foi concluído e sua implantação depende apenas da liberação de recursos financeiros
- Inicialmente, considerava-se apenas a instalação do tokamak ETE modernizado como o primeiro experimento do LFN
- Recentemente, uma proposta de modernização do tokamak TCABR foi elaborada
- Dado esse novo cenário, foi considerada a possibilidade de instalar o TCABR no LFN, em lugar do ETE
 - A decisão sobre qual máquina será instalada no LFN dependerá do avanço das modernizações do ETE e do TCABR
 - Essa decisão será tomada ao final do terceiro ano de execução desse Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto
 - Caso o TCABR seja transferido para o LFN, será analisada a possibilidade de instalar o ETE modernizado no Laboratório de Física de Plasmas do IFUSP

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

A Rede Nacional de Fusão possibilitará estimular grupos brasileiros atuantes em fusão nuclear à contribuir para o PNFN

- **Em 2007, o MCT apoiou as iniciativas na área de fusão termonuclear através da criação da Rede Nacional de Fusão (RNF)**
 - A pesquisa no Brasil havia avançado a ponto de atingirmos a liderança Latino-Americana em fusão e alcançado prestígio internacional
 - Porém, sem um PNFN e sem estímulo governamental, não foi possível avançar mais nessa área
- **Grupos brasileiros com atuação em fusão, e áreas correlatas, participarão das atividades do PNFN por meio da nova RNF, que deverá ser reativada**
 - Uma nova portaria, reinstituindo a RNF como um dos elementos de apoio ao Programa Nuclear Brasileiro, já foi submetida ao MCTI
- **Pesquisadores serão convidados a integrar a RNF e a contribuir para a elaboração das atividades de pesquisa do PNFN**
 - Uma das atividades será contribuir para o projeto conceitual da nova máquina que deverá ser construída e instalada no LFN

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

O desenvolvimento da fusão nuclear está associado à avanços tecnológicos em várias áreas também de interesse nacional

- **O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é de grande interesse para várias áreas no País, tais como**
 - Fabricação de supercondutores
 - Usinas eólicas e sistemas de distribuição de energia elétrica
 - Motores navais
 - Equipamentos de ressonância magnética nuclear
 - O Brasil é o maior produtor de Nióbio, que é a matéria-prima utilizadas em alguns tipos de supercondutores
- **O desenvolvimento de fontes de potência de alto desempenho é de grande interesse nas áreas de transporte e geração de energia**
 - Motores para locomotivas elétricas
 - Excitatrizes de geradores elétricos
- **O desenvolvimento de materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação (nêutrons) é também de grande interesse**

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

Um plano de ações de curto, médio e longo prazo foi incluído no Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto

	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		

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **O desenvolvimento da fusão nuclear no mundo e no Brasil**
 - Produção de potência por fusão nuclear: TFTR, JET e ITER
 - Tokamaks esféricos e a rota acelerada
 - Configurações alternativas
 - Tokamaks em operação no Brasil
- **Diretrizes e ações do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto**
 - Implantação do LFN e sua primeira máquina
 - Estímulo à participação dos grupos brasileiros atuantes via RNF
 - Exploração das tecnologias associadas ao desenvolvimento da fusão
 - Plano de ações
 - Previsão orçamentária

Recursos financeiros necessários para a implementação do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto (curto prazo)

- Com base no projeto executivo realizado (2018) pela empresa Minerbo-Fuchs Engenharia, o custo estimado da construção do LFN era de R\$ 80 milhões
 - O custo corrigido para 2021, incluindo algumas instalações adicionais, é de aproximadamente R\$ 100 milhões
- O custo estimado para a modernização do TCABR é de R\$ 45 milhões

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

Recursos financeiros necessários para a implementação do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto (curto prazo)

- Com base no projeto executivo realizado (2018) pela empresa Minerbo-Fuchs Engenharia, o custo estimado da construção do LFN era de R\$ 80 milhões
 - O custo corrigido para 2021, incluindo algumas instalações adicionais, é de aproximadamente R\$ 100 milhões
- O custo estimado para a modernização do TCABR é de R\$ 45 milhões, enquanto o custo estimado para a modernização do ETE é de R\$ 5 milhões

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

Recursos financeiros necessários para a implementação do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto (médio prazo)

- Foram levantados os custos associados à construção de uma nova máquina
 - Tokamak de médio porte, de razão de aspecto intermediário ($2 < A < 3$) e com bobinas supercondutoras de alta temperatura
 - Essa máquina deverá operar apenas com D (sem trítio) e com parâmetros de plasma compatíveis com operação próxima à condição $Q = 1$

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

- Custos levantados via consulta à colegas de grandes laboratórios no exterior e à empresas nacionais e internacionais

Recursos financeiros necessários para a implementação do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto

- Com base nos orçamentos apresentados, o custo total (distribuído em 12 anos) da implementação do Programa Nacional de Fusão Nuclear proposto é

Item	Recurso financeiro	Cronograma orçamentário
Construção do LFN	R\$ 100 milhões	R\$ 150 milhões (Distribuídos em 3 anos)
Modernização do ETE	R\$ 5 milhões	
Modernização do TCABR e do NOVA-UFES	R\$ 45 milhões	
Construção da máquina intermediária	US\$ 100 milhões	US\$ 100 milhões (Distribuídos em 9 anos)

O desenvolvimento da fusão nuclear trará avanços tecnológicos em várias áreas de interesse nacional

- O desenvolvimento de bobinas supercondutoras é de grande interesse para várias áreas no País, tais como
 - Fabricação de supercondutores (**aplicações: indústria e comércio**)
 - Usinas eólicas (**aplicações: geração e distribuição de energia**)
 - Motores navais (**aplicações: indústria naval e defesa**)
 - Equipamentos de ressonância magnética nuclear (**aplicação: saúde**)
 - O Brasil é o maior produtor de Nióbio, que é a matéria-prima utilizadas em alguns tipos de supercondutores
- O desenvolvimento de fontes de potência de alto desempenho é de grande interesse para o País
 - Motores para locomotivas elétricas (**aplicação: transporte**)
 - Excitatrizes de geradores elétricos (**aplicações: geração de energia**)
- O desenvolvimento de materiais resistentes à altas temperaturas, altos fluxos de calor e radiação (nêutrons) é também de grande interesse (aplicações: aeroespacial, fissão nuclear, alto-fornos, etc.)

Proposta de Programa Nacional de Fusão Nuclear

- **Objetivo do Programa Nacional de Fusão Nuclear (PNFN)**
 - 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
- **Ações fundamentais para sua implementação**
 - 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