

A QUESTÃO ENERGÉTICA E SUAS SOLUÇÕES FUTURAS

Ricardo M.O. Galvão
CBPF



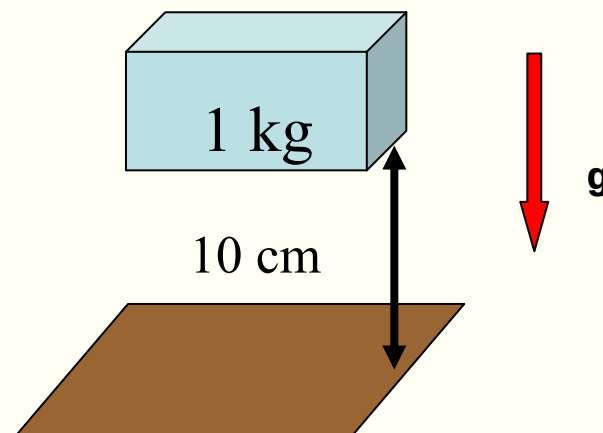


Energia: consumo, disponibilidade e vetores energéticos:

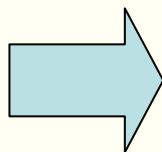
Questões quase sempre mal compreendidas pela população leiga

e muitas vezes por responsáveis por responsáveis oficiais pelo estabelecimento de políticas energéticas (pelo menos no Brasil!)

1 joule é aproximadamente a energia gasta para levantar uma massa de 1 kg a uma altura de 10 cm



Uma torrada com manteiga equivale a 315 Kj
($\approx$ 75 calorias alimentares)



Caminhar lentamente durante 15 minutos

Andar depressa durante 6 minutos

Manter uma lâmpada de 60 W acesa durante 1,5 h

Andar de bicicleta durante 10 minutos

DORMIR DURANTE 1,5 h !!!



NECESSIDADE ENERGÉTICA MUNDIAL

Mínimo para sobrevivência vegetativa: ≈ 150 W/habitante

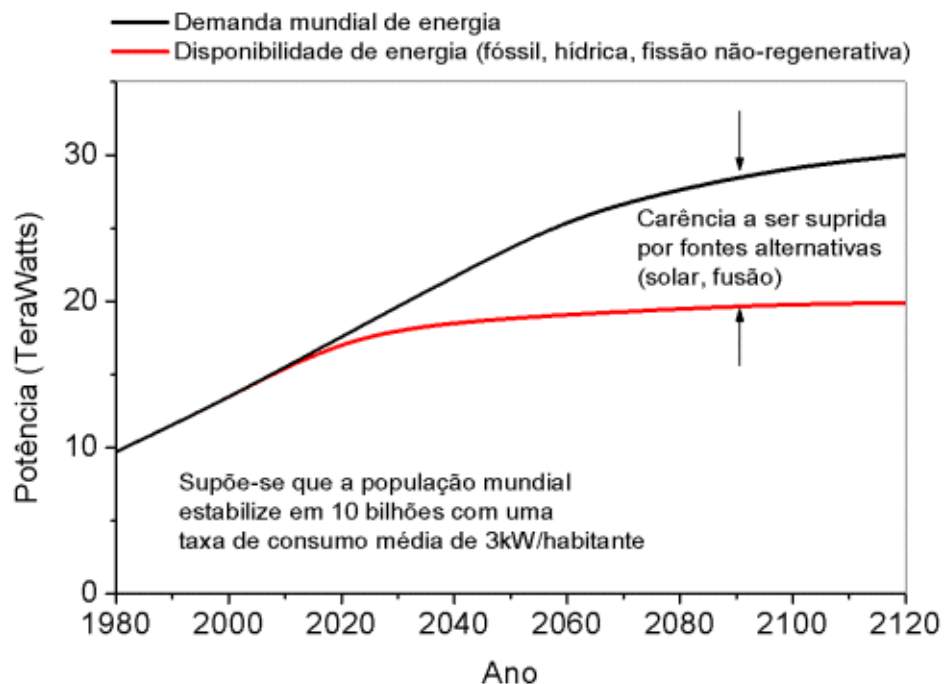
Potência média consumida no mundo : ≈ 2100 W/capita

Sociedade pouco industrializada (India): ≈ 420 W/capita

Estados Unidos: ≈ 13000 W/capita

Sociedade de pais emergente (Brasil): ≈ 1700 W/capita

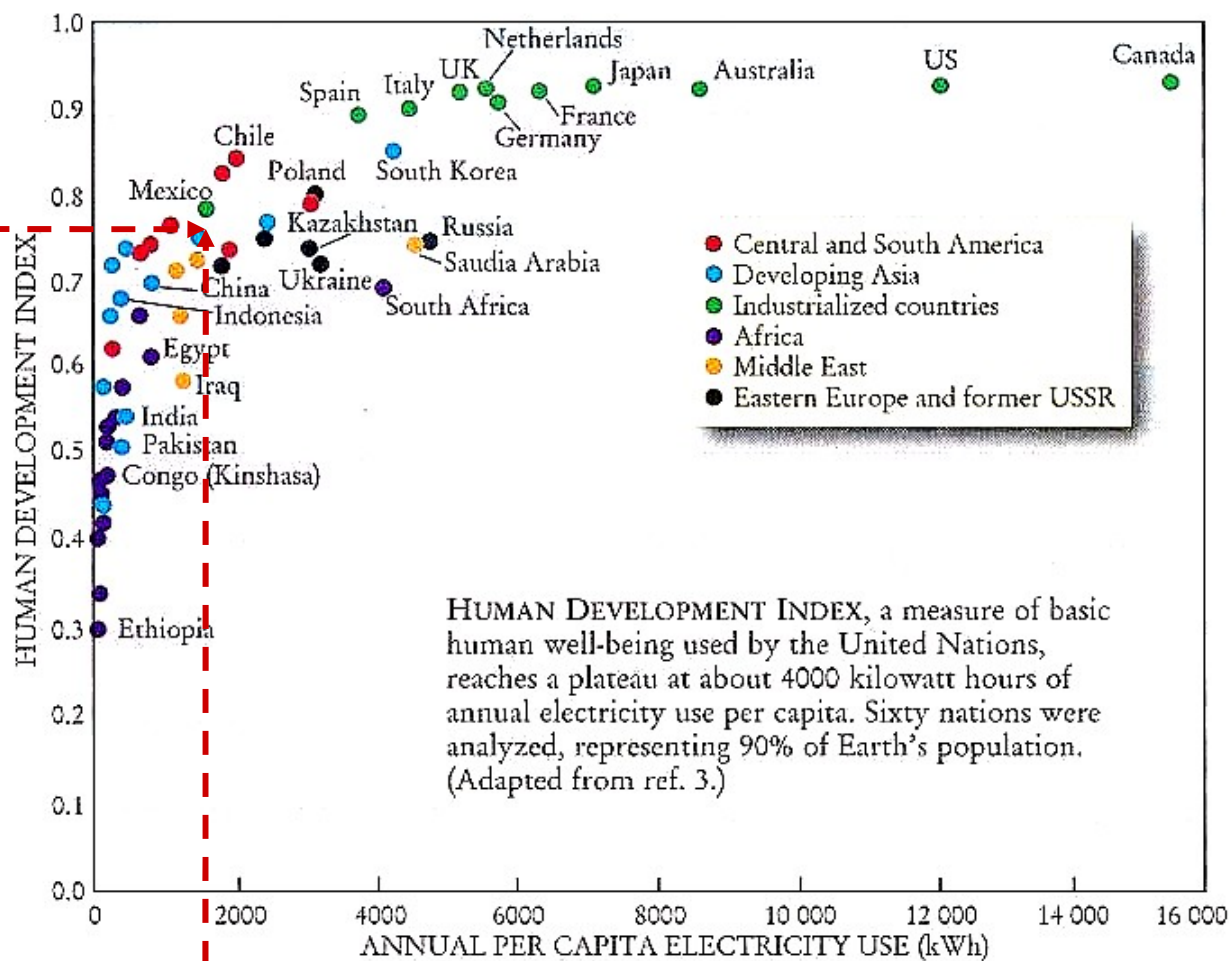
Portugal: ≈ 4000 W/capita





ENERGIA E QUALIDADE DE VIDA

BRASIL



HDI: Expectativa de vida (mínimo 15 e máximo 85 anos)

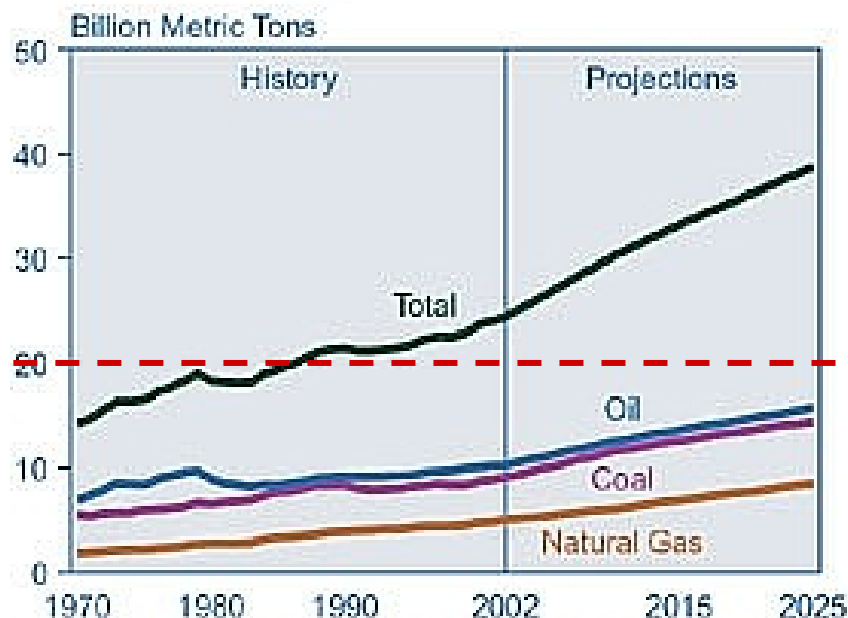
Realização educacional [escolaridade adulta (2/3) + escolaridade média (1/3)]

Produto doméstico bruto per capita (em PPP US\$ - Purchasing Power Parity)



ENERGIA E QUESTÃO AMBIENTAL

World Carbon Dioxide Emissions
by Fuel Type, 1970-2025



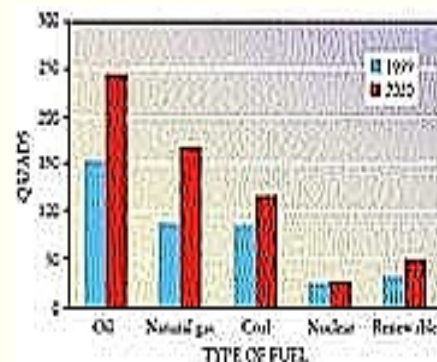
Sources: History: Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2002*, DOE/EIA-0219(2002) (Washington, DC, March 2004), web site www.eia.doe.gov/leaf. Projections: EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2005).

MODELAMENTO DO EFEITO ESTUFA:

Se a emissão de carbono continuar nos níveis atuais, a concentração de CO_2 dobraria em cem anos, podendo causar séria disruptura em nosso sistema climático.

PROTOCOLO DE KYOTO

No período de 2008 a 2012 reduzir a taxa de emissão de gases do efeito estufa em 5% com respeito aos níveis de 1990.



1 quad
 $1,06 \times 10^{18} \text{ J}$

Tempos característicos para investimento:

Automóveis	15 anos
Usinas energéticas	40 anos
Persistência CO_2	séculos !



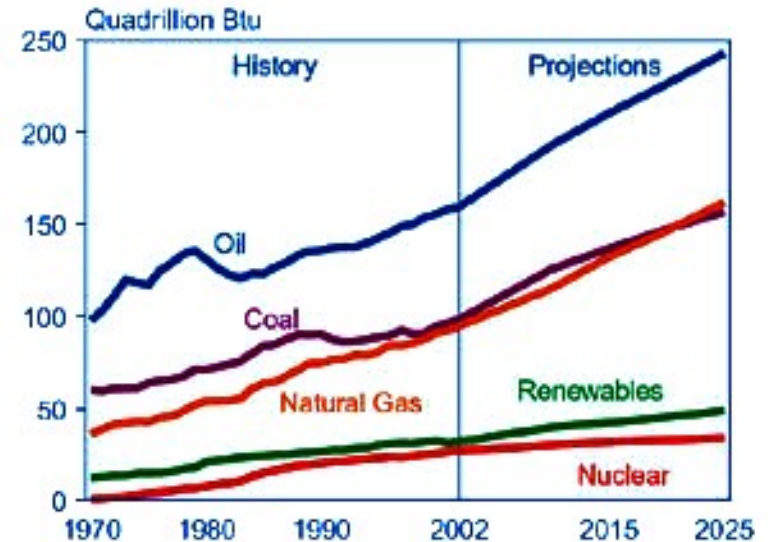
SITUAÇÃO MUNDIAL - 1

World Marketed Energy Consumption by Region, 1970-2025



Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2002*, DOE/EIA-0219(2002) (Washington, DC, March 2004), web site www.eia.doe.gov/iea/. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2005).

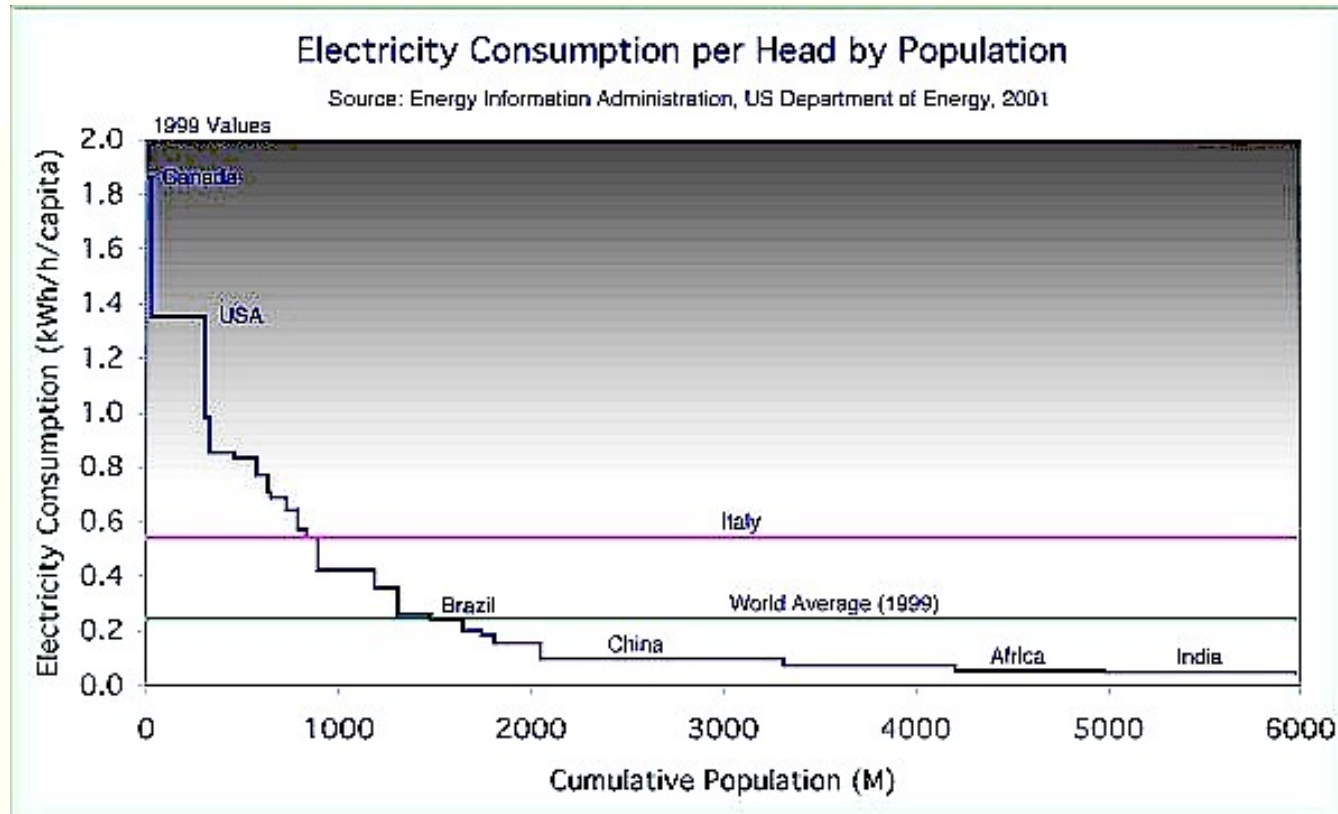
World Marketed Energy Use by Energy Type, 1970-2025



Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2002*, DOE/EIA-0219(2002) (Washington, DC, March 2004), web site www.eia.doe.gov/iea/. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2005).



SITUAÇÃO MUNDIAL - 2



RESUMO:

População

Potência consumida

Potência/habitante

2003

$6,3 \times 10^6$

14 TW

2,2 kW/hab

2050-2100

10×10^6

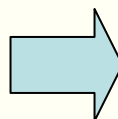
30 TW $\approx$ 880 quad/ano

3 kW/hab



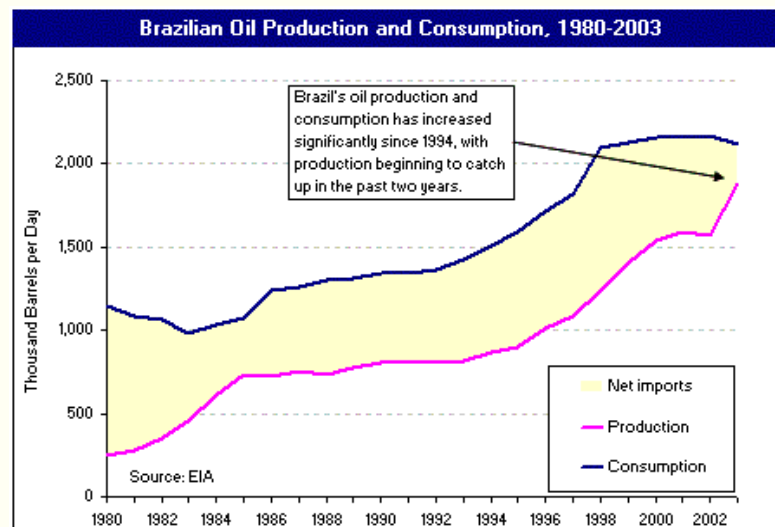
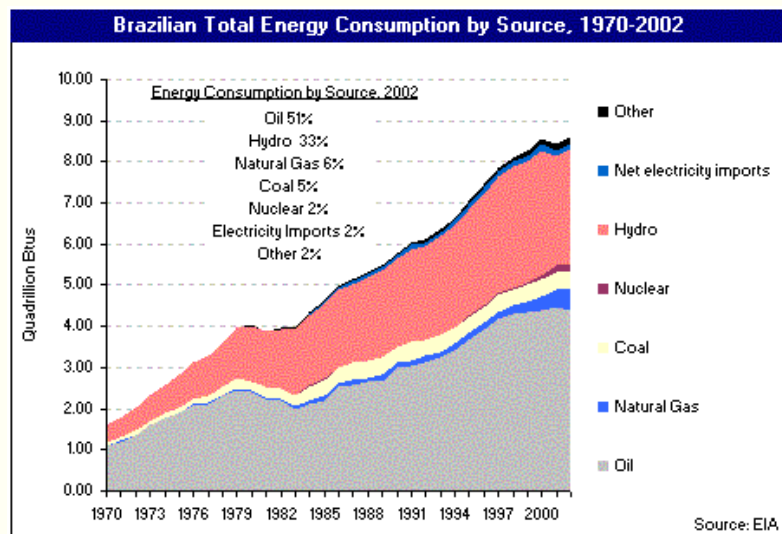
SITUAÇÃO BRASILEIRA

PAÍS IMPORTADOR DE ENERGIA !



10º Consumidor mundial (2,2%)

16º Produtor Mundial (1,5%)



Potência elétrica total instalada ≈ 76 GW $\approx 2,5$ quad/ano

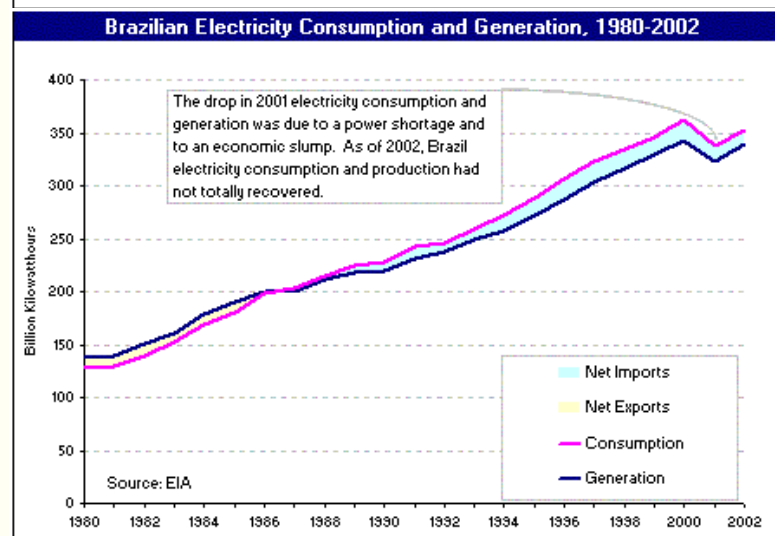
(64 Hidro; 2 nuclear; 3.2 solar, biomassa....,

7,6 térmica convencional)

Energia total produzida (2002) $\approx 6,72$ quad

Energia total consumida (2002) $\approx 8,59$ quad

1 quad $\approx 10^{18}$ J





FONTES DE ENERGIA

POSSIBILIDADES BÁSICAS BASTANTE LIMITADAS:

RESÍDUOS FÓSSEIS E ISÓTOPOS NUCLEARES ARMAZENADOS NA TERRA



MARLIM 1

LEI BÁSICA DA NATUREZA:

FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR



Energia, uma vez usada, não é mais recuperável; portanto, o termo

“FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA”

é um tanto enganador



FONTES RENOVÁVEIS -SOLAR

FLUXO MÉDIO DA ENERGIA SOLAR $\approx 200 \text{ W/m}^2$

Para fornecer toda energia (30 TW) :

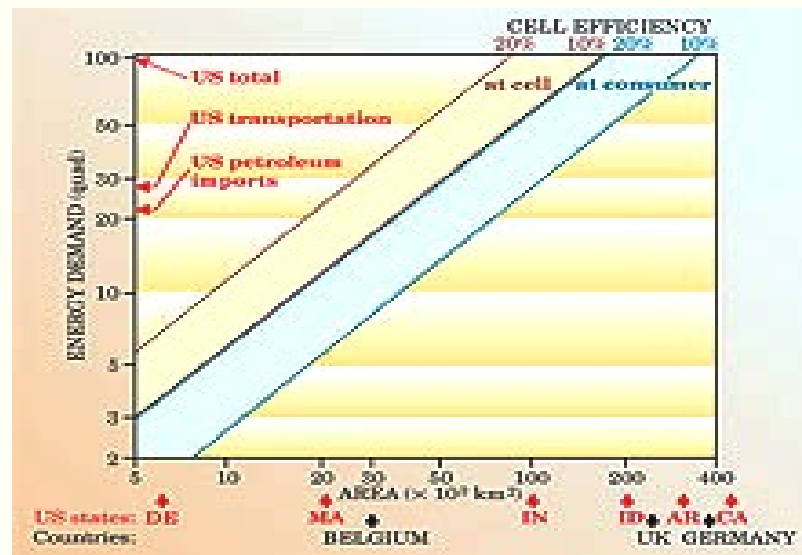
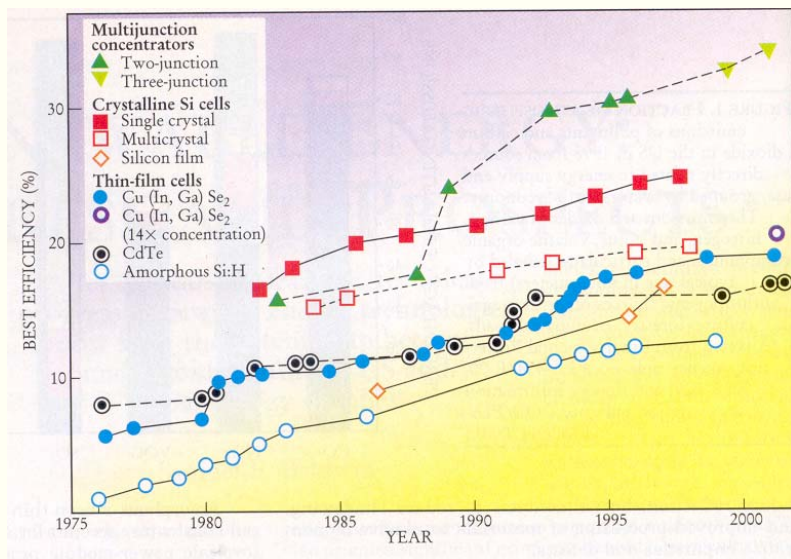
Superfície $\approx 4.5 \times 10^6 \text{ km}^2 \approx \text{Brasil}/2$

Problemas: Inconstância da radiação solar

Eficiência das células fotovoltaicas



Cacimba Ceará

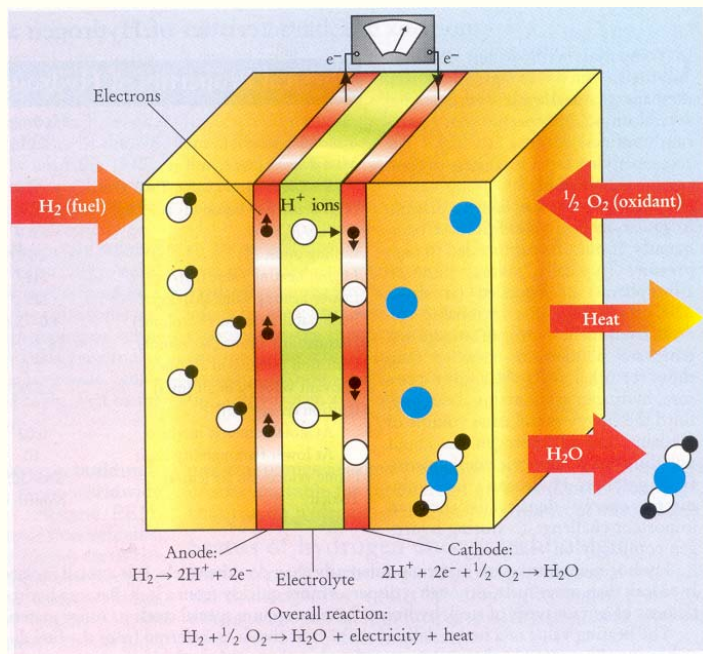




FONTES RENOVÁVEIS - HIDROGÊNIO

NÃO É FONTE PRIMÁRIA DE ENERGIA, MAS SIM VETOR ENERGÉTICO

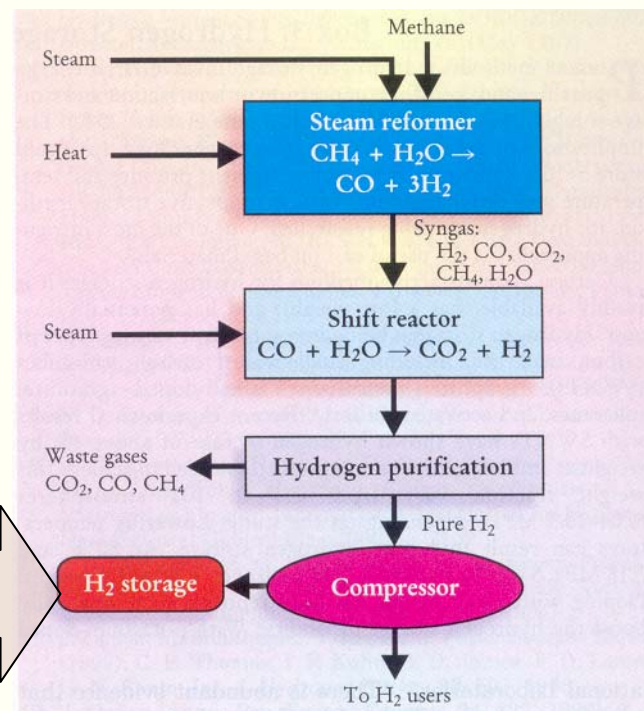
Importantíssimo para reduzir emissão de CO₂, mas somente se não for produzido utilizando combustível fóssil !!!



Célula combustível Hidrogênio – oxigênio

Eficiências: teórica ≈ 83%; prática ≈ 60%

Eficiência em motor de combustão ≈ 40%



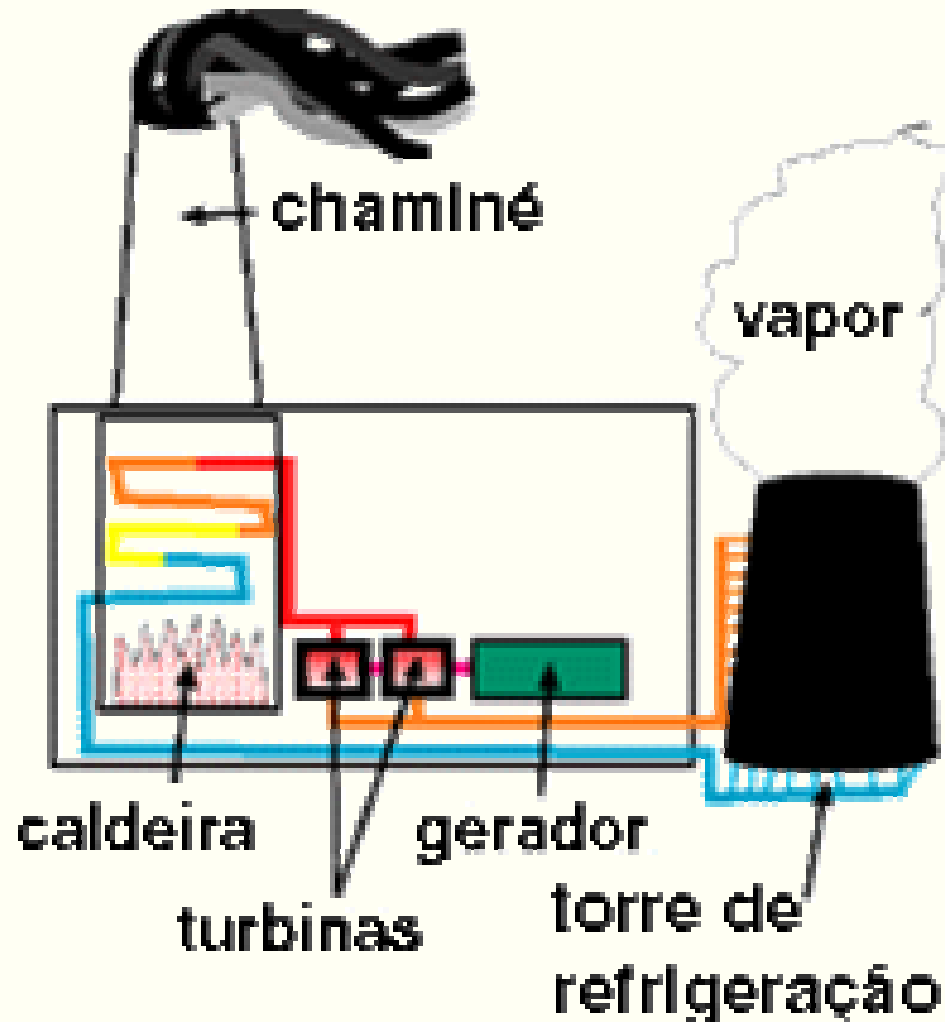
Produção termoquímica

Eficiência ≈ 70%

(eletrólise ≈ 80%; solar ≈ 66%)



GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

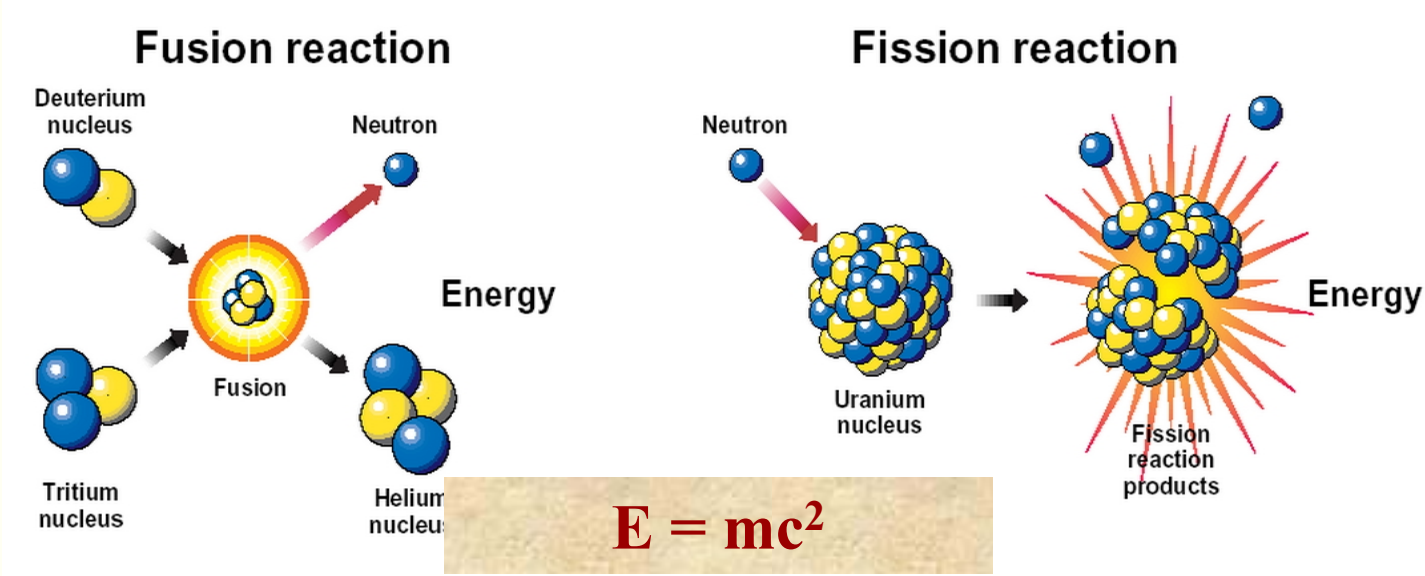
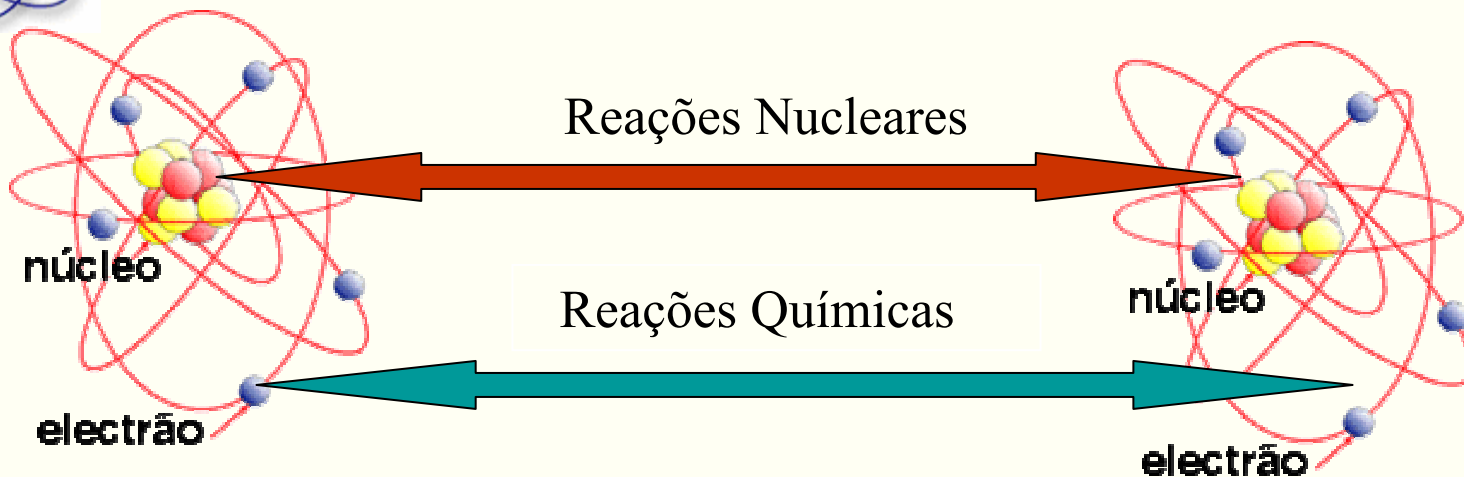


Reatores Nucleares: Caldeira



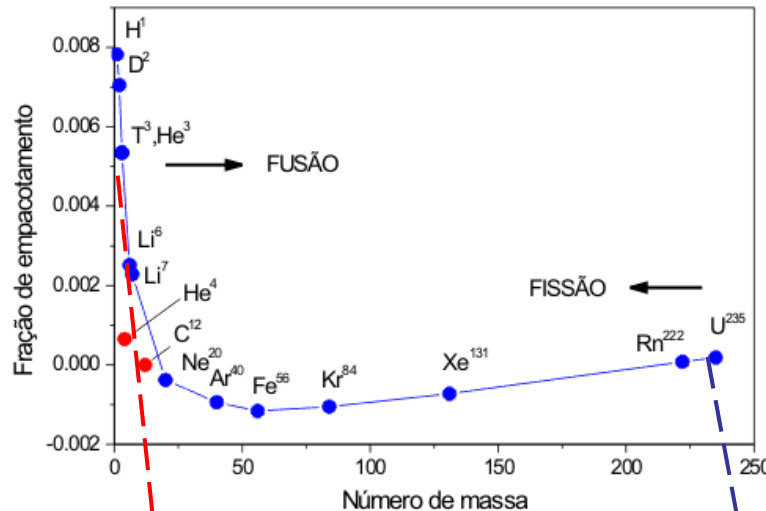
Reações Nucleares

GERAÇÃO NUCLEAR





Produção de Energia em Reações Nucleares



$$P = (M - A)/A$$

M: massa real (uma)

A: n^o de massa (uma)

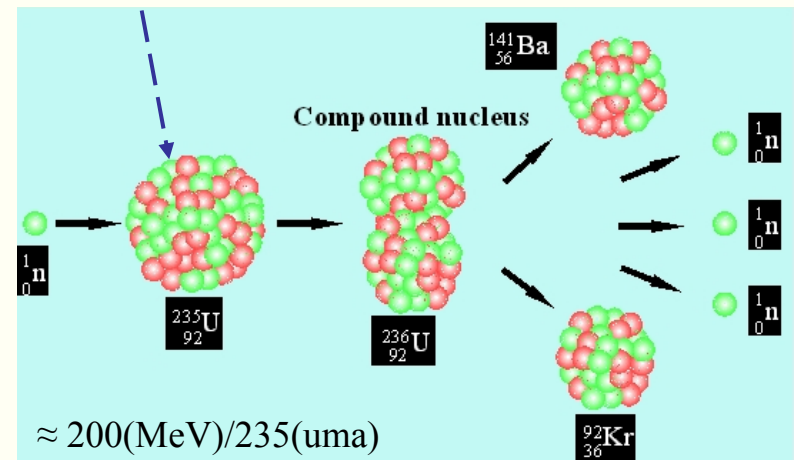
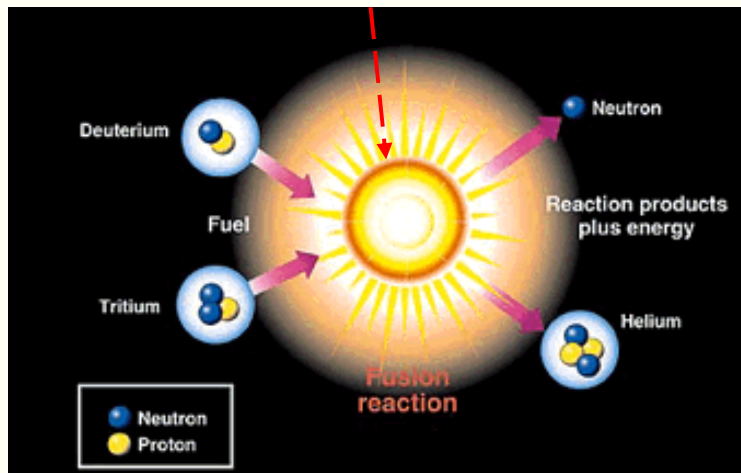
$$P(C^{12}) = 0$$

$$E = k \times (M_i - M_f) c^2$$

M_i: massa total inicial dos reagentes

M_f: massa total final dos produtos

k = 1 (SI); k = 931,466 MeV/c²

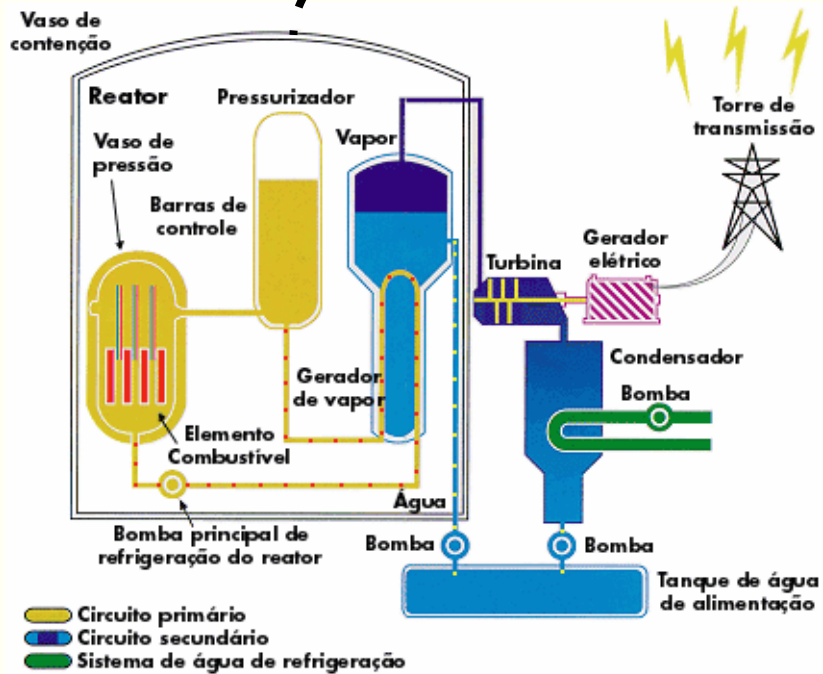


$$\approx 200(\text{MeV})/235(\text{uma})$$



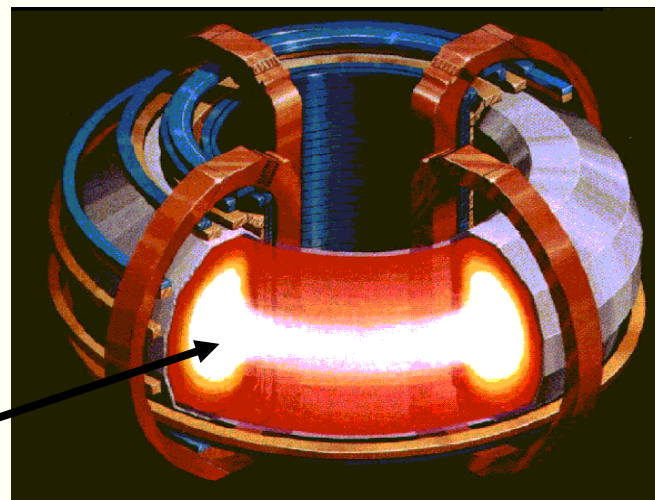
REATORES A FISSÃO E FUSÃO

ANGRA I



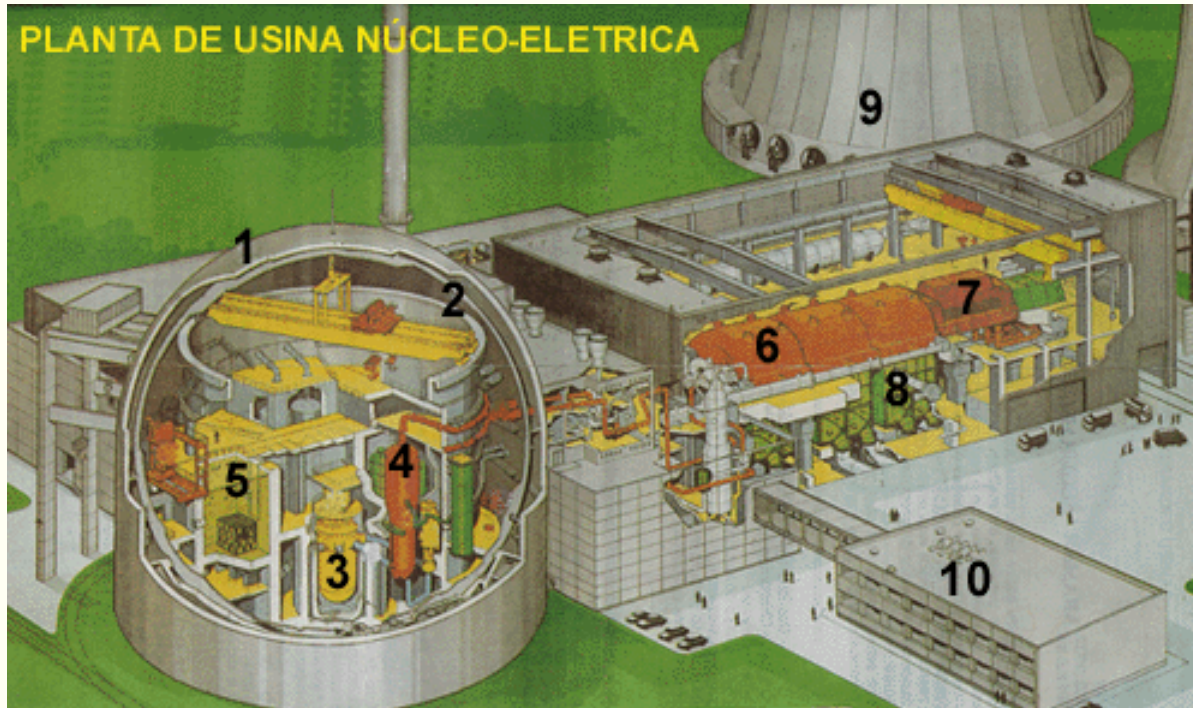
TOKAMAK

$T = 72.000.000^{\circ}\text{C} !!!!$





REATORES A FISSÃO - 1



1 – Contenção de concreto armado

2 – Contenção de aço

3 – Reator nuclear

4 – Gerador de vapor

5 – Piscina de armanejamento de combustível

6 – Turbinas à vapor

7 – Gerador de eletricidade

8 – Condensadores

9 – Torre de refrigeração

10 - Administração



REATORES A FISSÃO - 2

Com os problemas de segurança e de disposição de rejeitos radioativos, a centrais nucleares deixaram de ser utilizadas?

Atualmente, existem cerca de 440 centrais nucleares em operação no mundo, todas baseadas em reatores refrigerados a água

País	Em operação MWe (unidades)	Em construção MWe (unidades)	% geração elétrica
Alemanha	22017 (20)	-----	29,1
Argentina	935 (02)	-----	11,8
Bélgica	5728 (07)	-----	55
Brasil	1901 (02)	????????????????	3
Canadá	12080 (17)	515 (01)	15
EUA	97838 (103)	1065 (01)	20
França	63473 (59)	-----	78
Japão	47700 (55)	866 (01)	29
Reino Unido	11852 (23)	-----	19
Rússia	21743 (31)	3600 (04)	16



REATORES A FISSÃO - 3

Comparação com centrais termoeletricas convencionais

USINA	CARVÃO	NUCLEAR
Capacidade Instalada	2 x 650 Mwe	1300 Mwe
Combustível	Antracita	Urânio Enriquecido
Consumo Anual de Combustível	2,8 milhões ton	32t U Enriquecido ou (170t U Natural)
Utilização de terra para mineração e rejeitos	415 há	5 há
Espaço para estocagem de combustível	25 ha (reserva de 2 meses)	alguns m ² somente
Necessidade de transporte de combustível	33.000 vagões por ano	5 caminhões por ano
Emissão de CO ₂ , de SO ₂ e de NO _x	8.500.000t CO ₂ / a 12.000t SO ₂ / a 6.000t NO _x / a	0 0 0
Rejeitos anuais	220.000t cinzas / a 120.000t cinzas volantes 70.000t enxofre / a 130.000t gesso / a	rejeito de alta radioatividade contido em um cubo de 1,5m de lado

As termoeletricas também
liberam metais pesados

Arsênio 90 ton

Bário 300 ton

Cádmio 10 ton

Manganês 70 ton

Zinco 220 ton

Vanádio 140 ton

27/08/2005

(por ano, para usina de 1000 MWe)

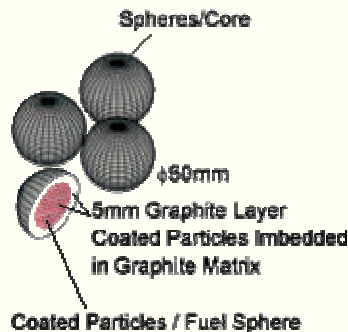


REATORES A FISSÃO - 4

PROBLEMAS : segurança e disposição de rejeitos radiativos

Problema de acidentes por perda de resfriamento pode ser muito minimizado nos reatores de quarta geração (intrinsecamente seguros)

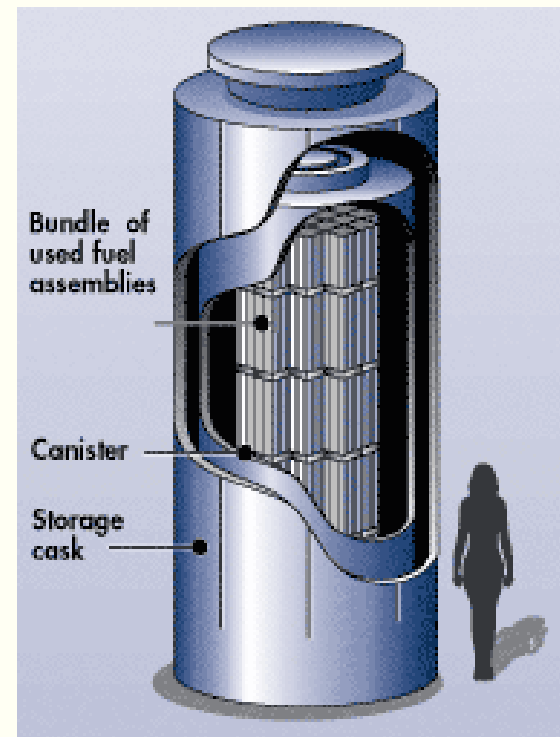
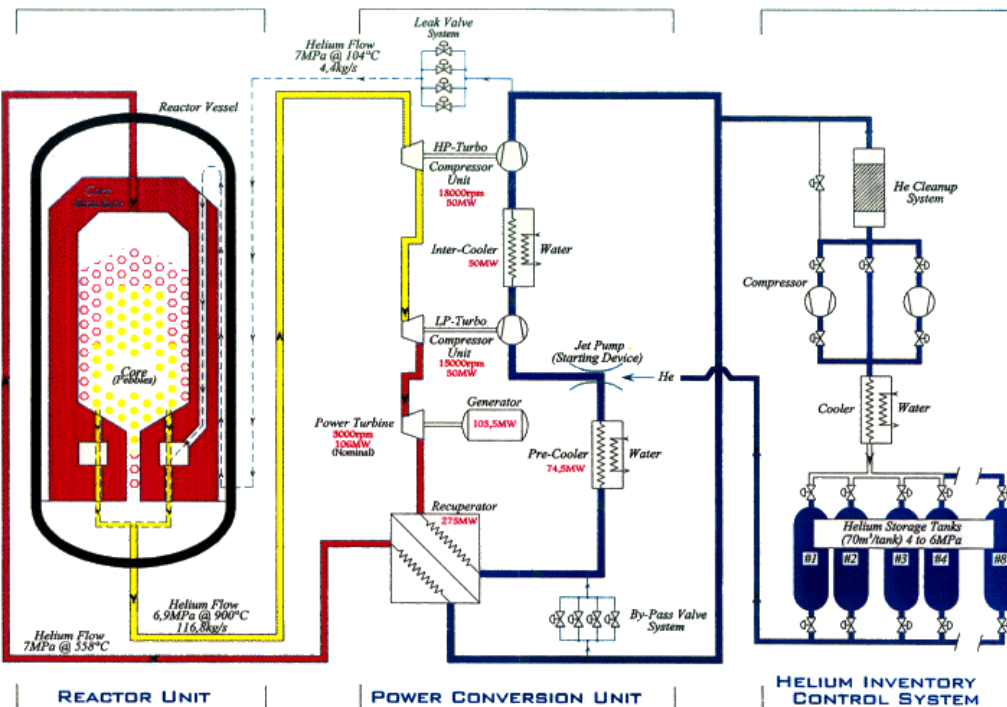
Ex: Pebble-Bed Reactor (AS)



Rejeitos de alta atividade têm que ser guardados por pelo menos um ano, em piscinas de rejeitos, e depois embaladas em tanques de contenção

Ainda não há uma tecnologia segura para garantir armazenagem por vários séculos!

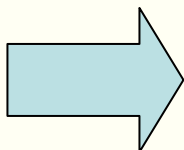
PBMR HELIUM FLOW PATH SCHEMATIC (BRAYTON CYCLE)





FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA

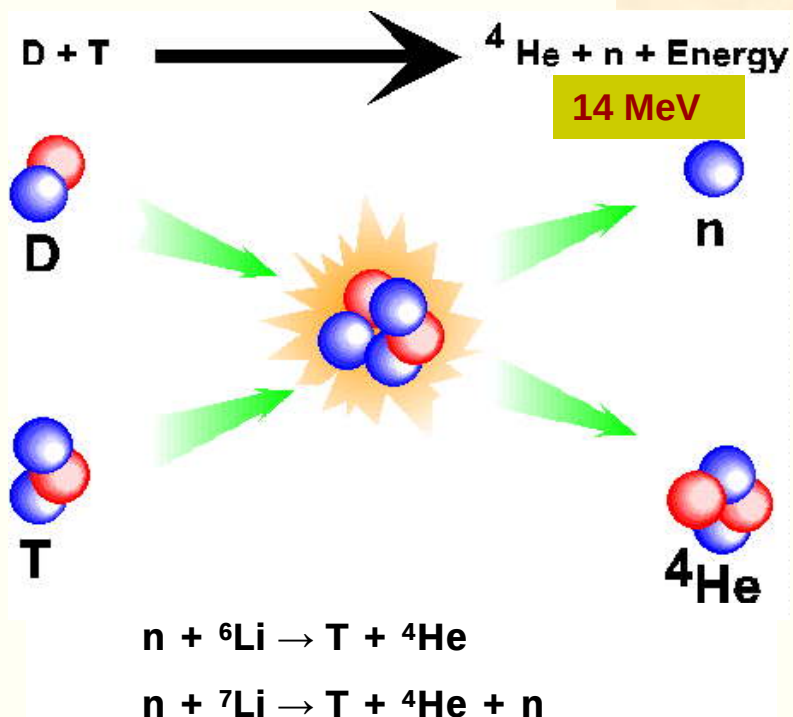
Vantagens da
Fusão Nuclear
sobre a Fissão



É uma fonte de energia razoavelmente “limpa”:
não produz lixo radiativo.

É praticamente nula a probabilidade de **acidentes.**

A água do mar praticamente corresponde a uma
fonte inesgotável de deutério!



D → Deutério existe na água do mar. O deutério disponível daria para satisfazer nossa demanda de energia por milhões de anos.

T → Trítio (meia-vida 12anos) não existe na natureza. Tem que ser produzido no manto do reator por reação com lítio.

L → Lítio abundante na crosta terrestre. Se toda a energia necessária fosse produzida por fusão, as reservas conhecidas dariam para 1000 anos.

10g D (500l de
água)
+
15g T (30g L)

**Energia necessária
para toda a vida útil de
um habitante de país
desenvolvido**



PRINCIPAIS REAÇÕES DE FUSÃO



Potência produzida/(volume)

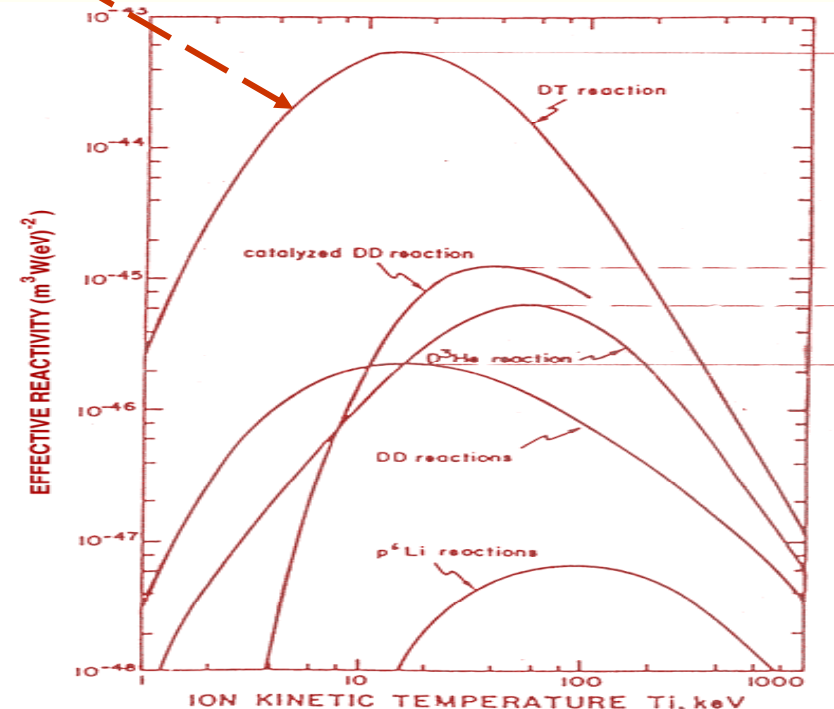
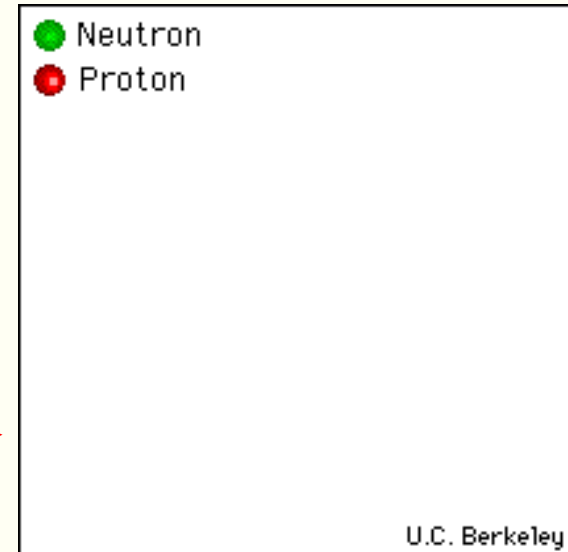
$$P = Q \times R;$$

Q: energia por reação

$R = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$: taxa de reação

σ : seção de choque para a reação entre 1&2

$\langle \sigma v \rangle$: média sobre uma distribuição Maxwelliana de velocidades





CRITÉRIOS DE LAWSON E DE IGNIÇÃO

Lawson: em regime estacionário

Potência produzida pelas reações
de fusão



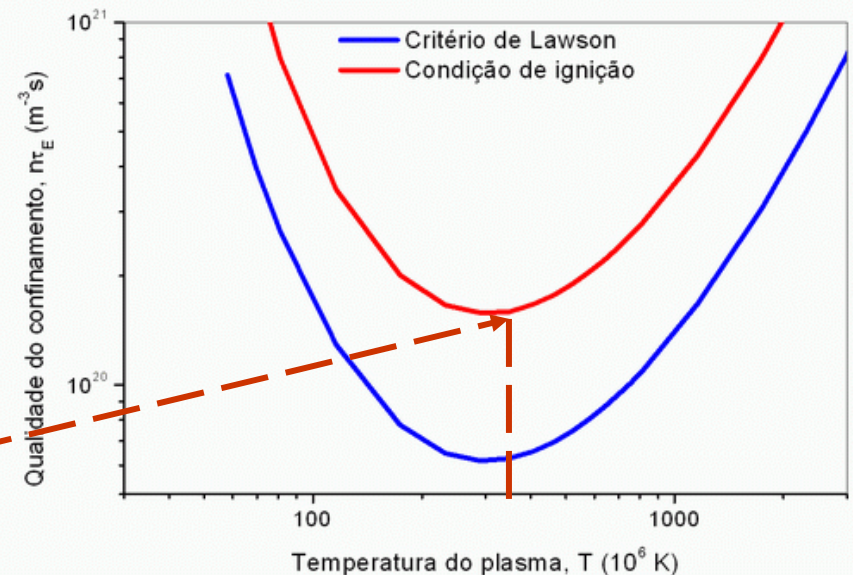
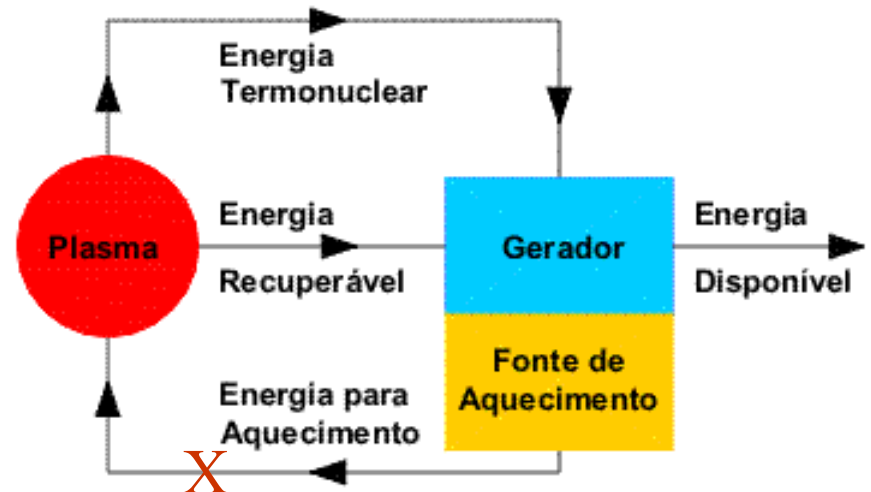
Taxa de energia perdida por radiação e
transporte + fração de potência
aproveitada

$$Q = 1$$

Ignição:

Potência transferida ao plasma pelas
partículas alfa (He^{4++}) é suficiente para
compensar as perdas, dispensando
energia de aquecimento (X)

Nestas temperaturas a matéria só existe na
forma de plasma: gás totalmente ionizado mas
macroscopicamente neutro

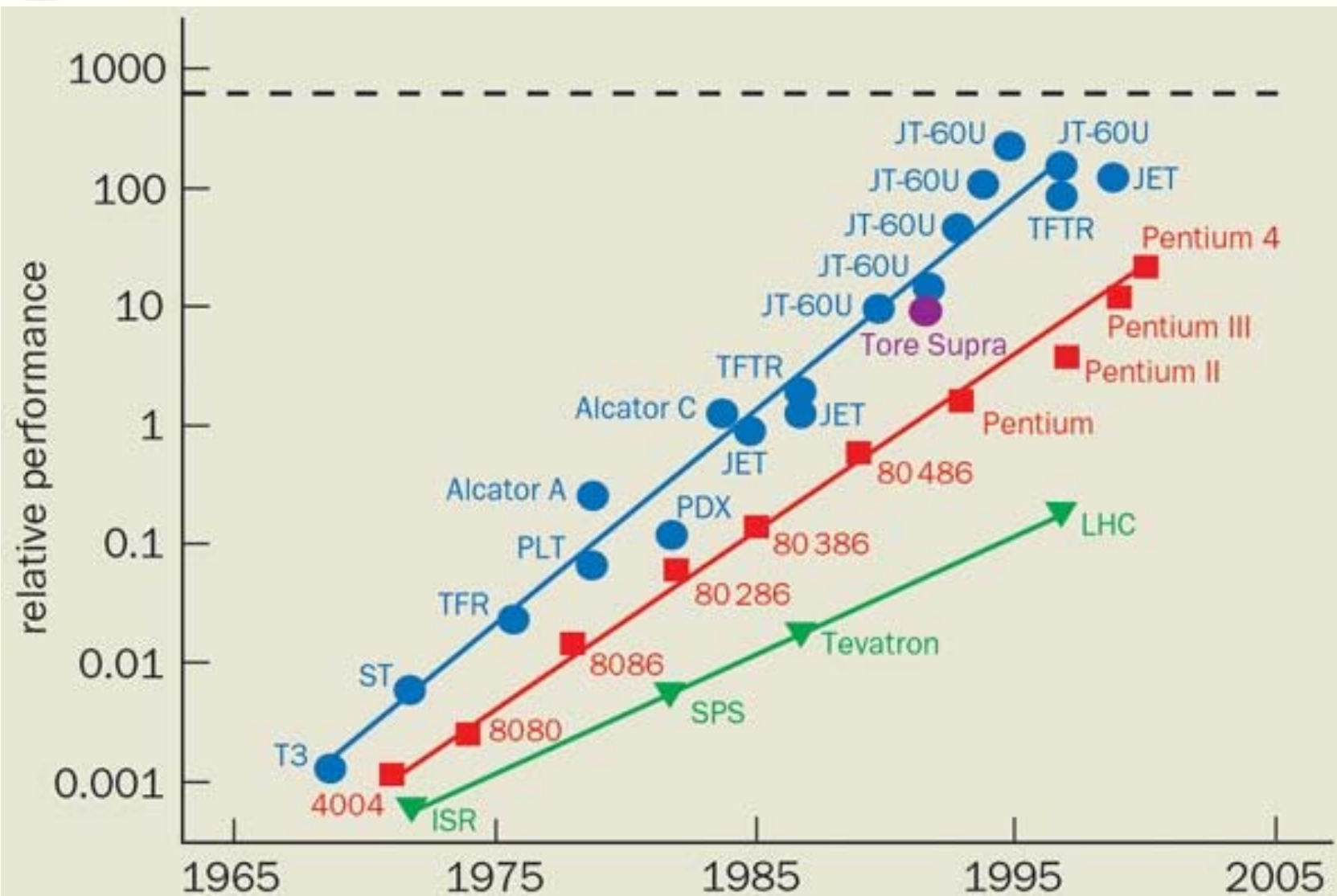


$$n\tau T \geq 1,0 \times 10^{21} (\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV})$$



Desenvolvimento e Estágio Atual

Progresso lento mas permanente





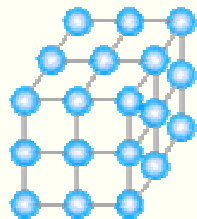
O QUE É PLASMA?

Gás a altíssimas temperaturas (átomos ionizados)

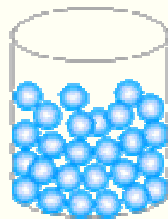
Número de cargas + e – aproximadamente o mesmo

É usualmente denominado o 4º Estado da Matéria

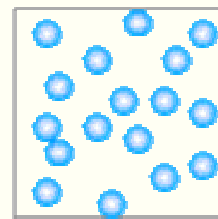
Estados da Matéria



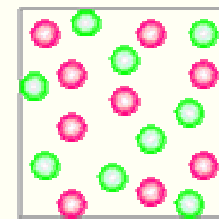
SÓLIDO



LÍQUIDO

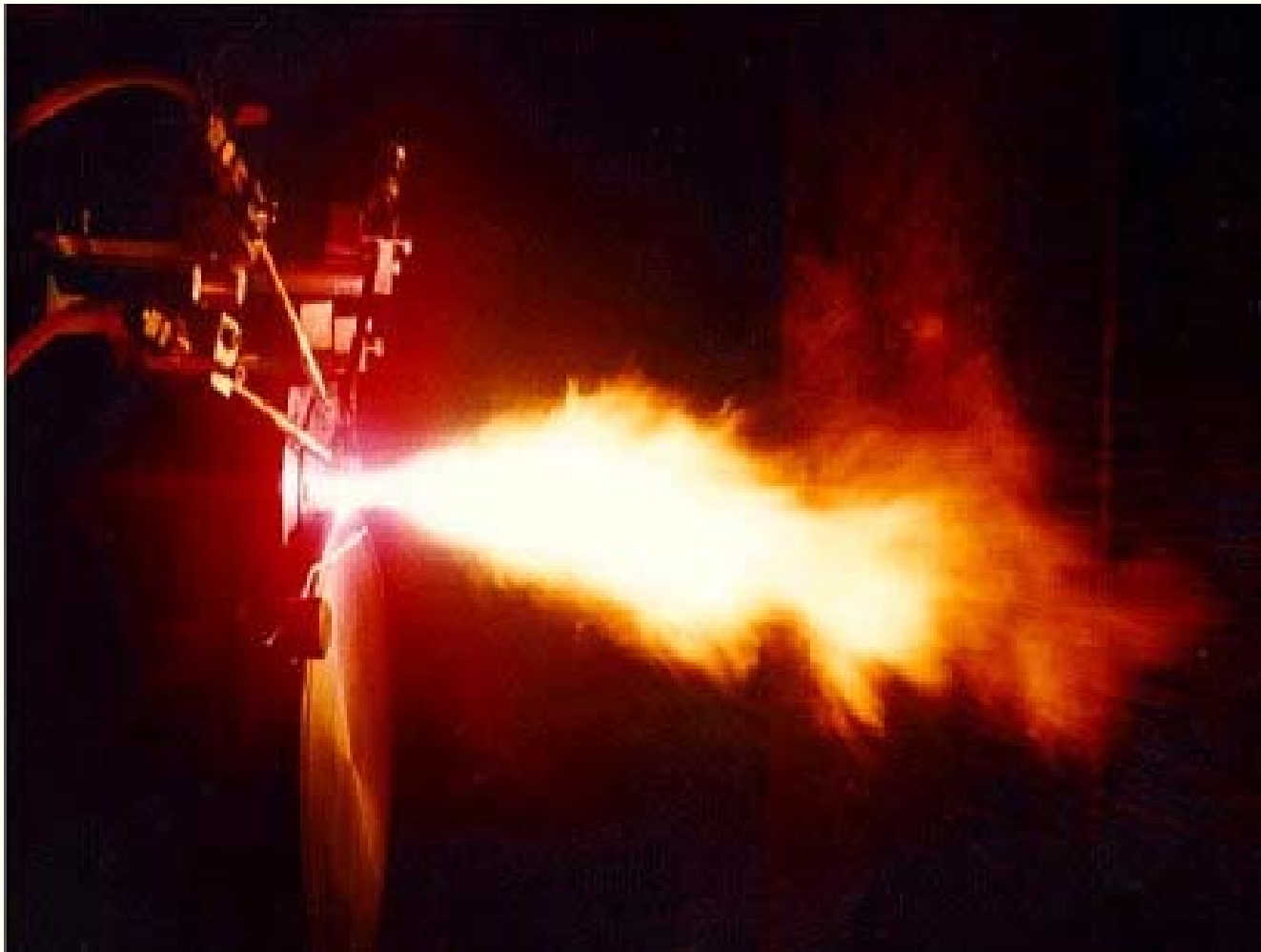


GÁS



PLASMA





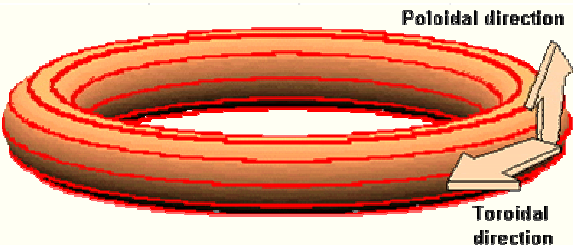
**Tocha utilizada para deposito de materiais (injetado em forma de pó)
para tratamento de superfícies (“plasma spray”)**

Relâmpagos – descargas de mais de 30.000 A e
temperaturas maiores que 30.000 °C!

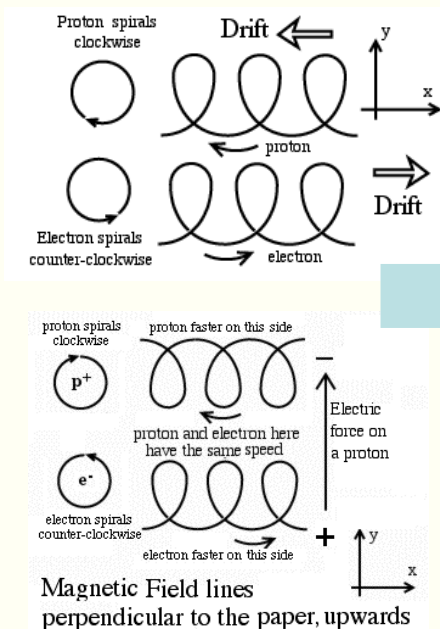




TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS

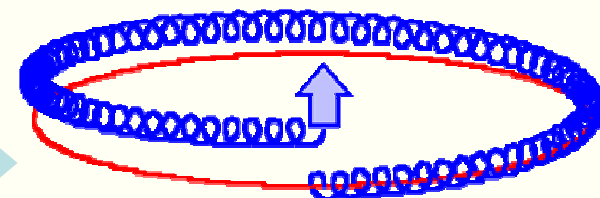


Campo magnético toroidal

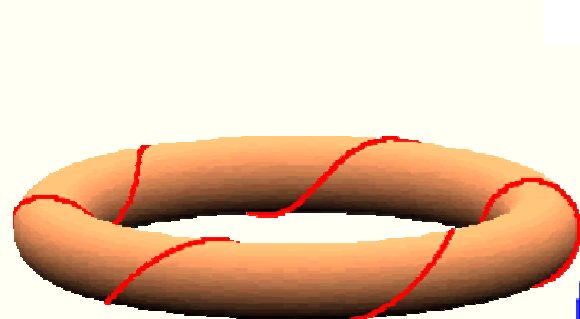


Magnetic drift

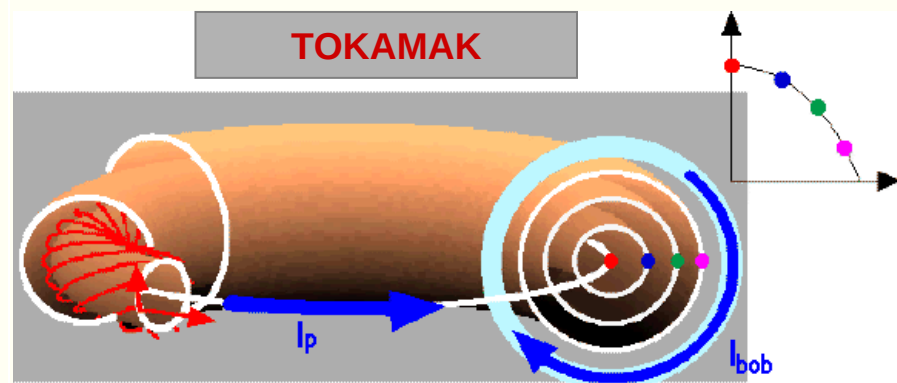
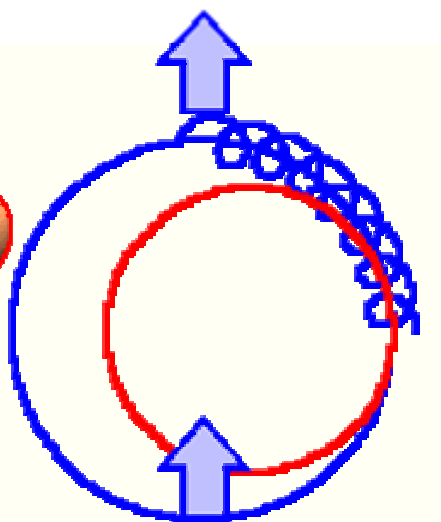
Electric drift



Deriva devido curvatura causa separação de cargas e fluxo do plasma para fora devido à deriva elétrica (Fermi)

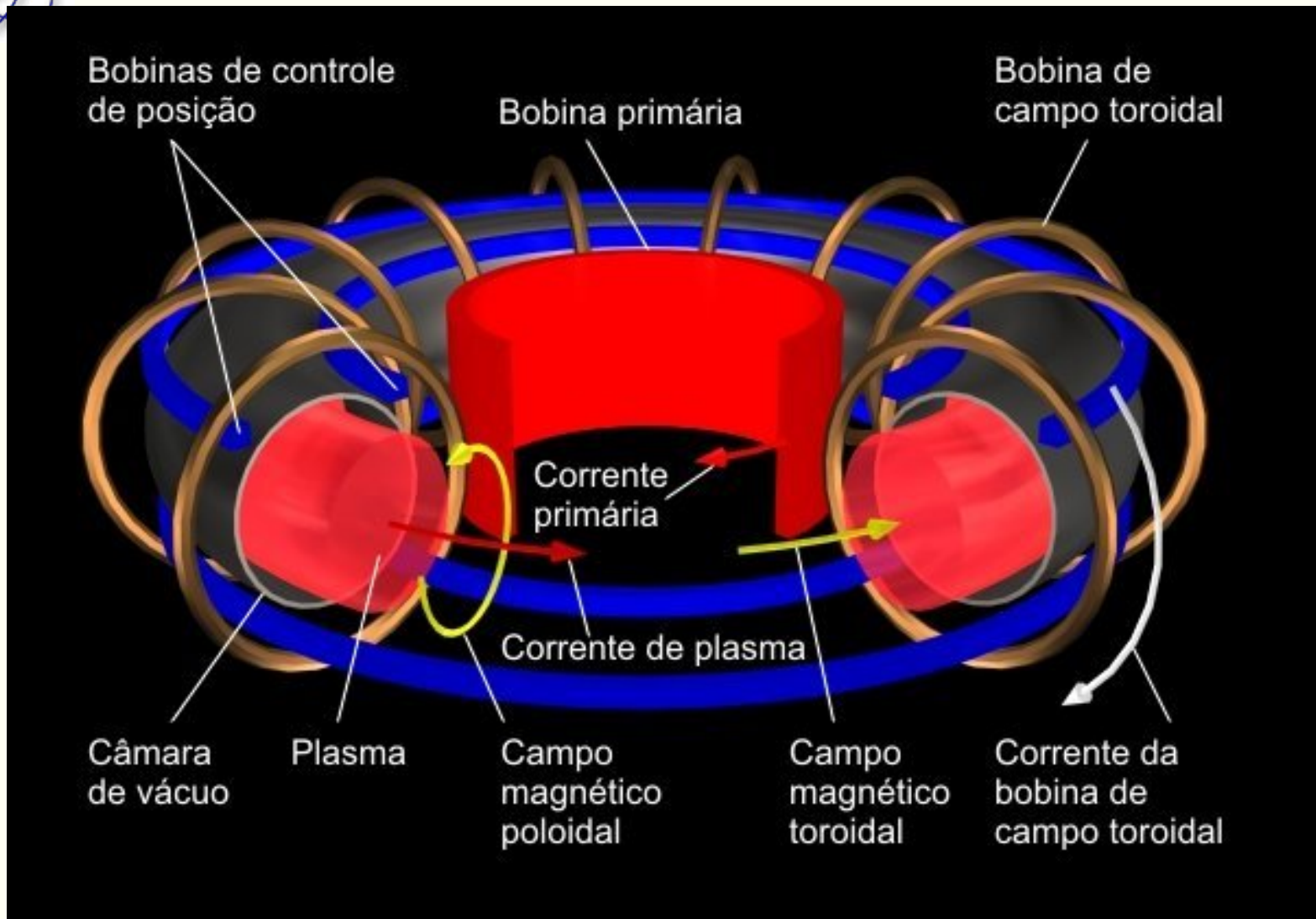


Campo toroidal + poloidal
(Sakharov & Tamm)





CONFINAMENTO MAGNÉTICO TOKAMAK



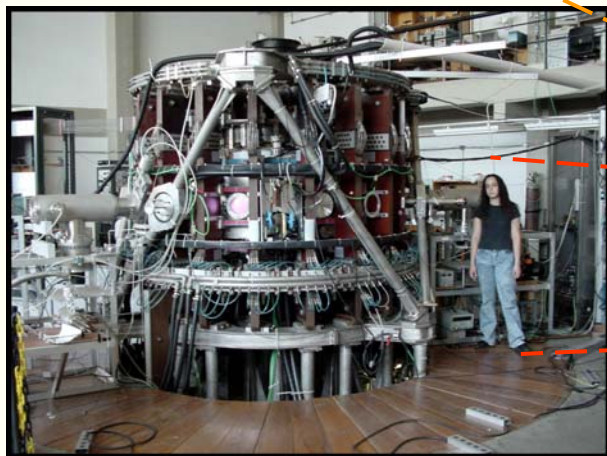
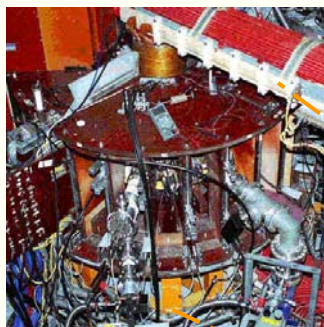
Igor Tamm and Andrei Sakharov ~ 60



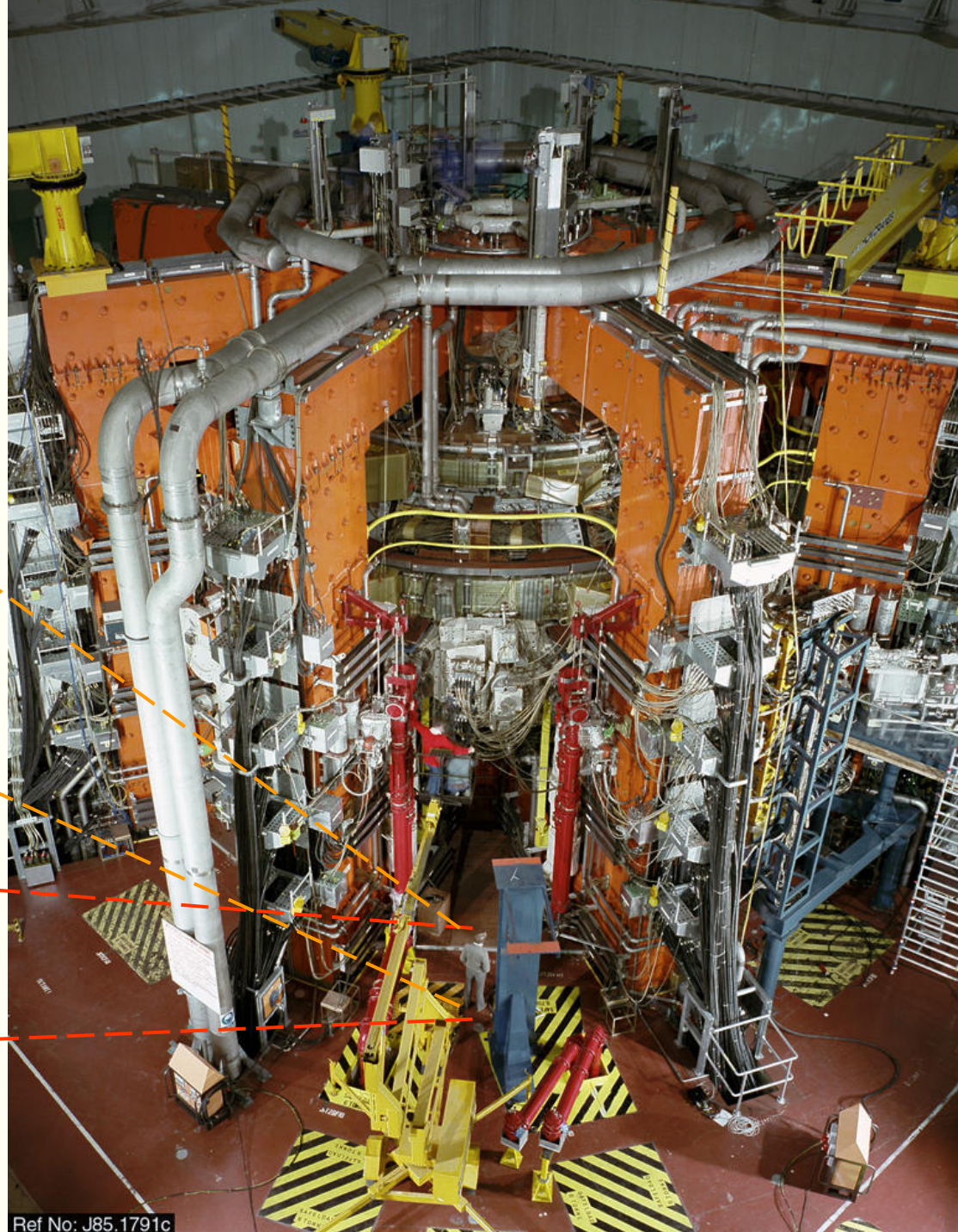
JET

**O maior
tokamak
atualmente em
operação**

ISSTOK



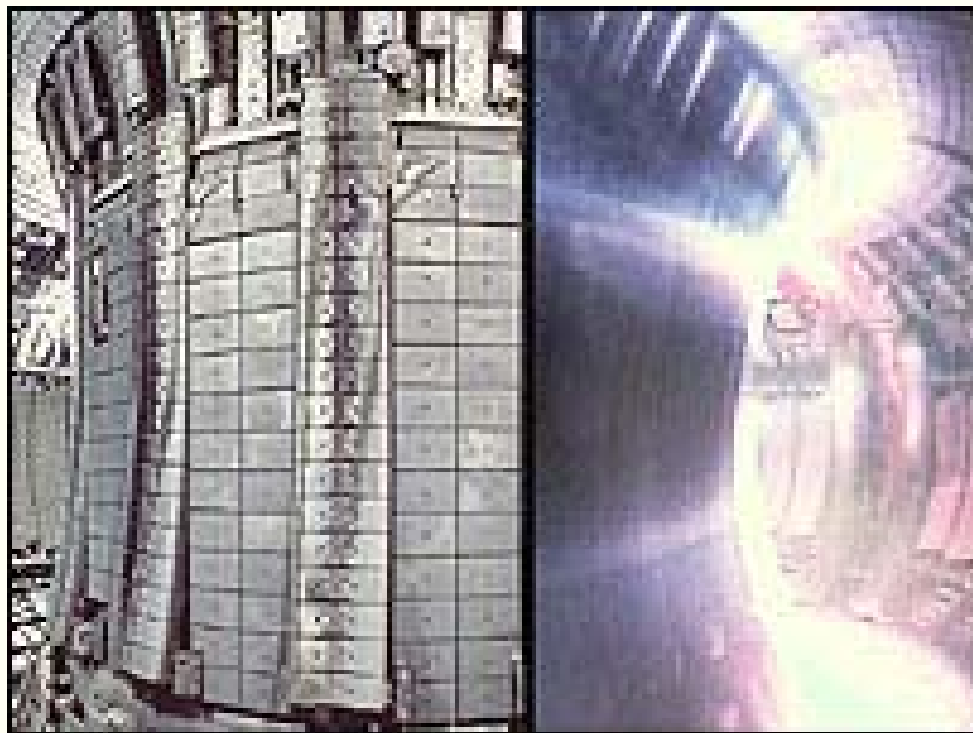
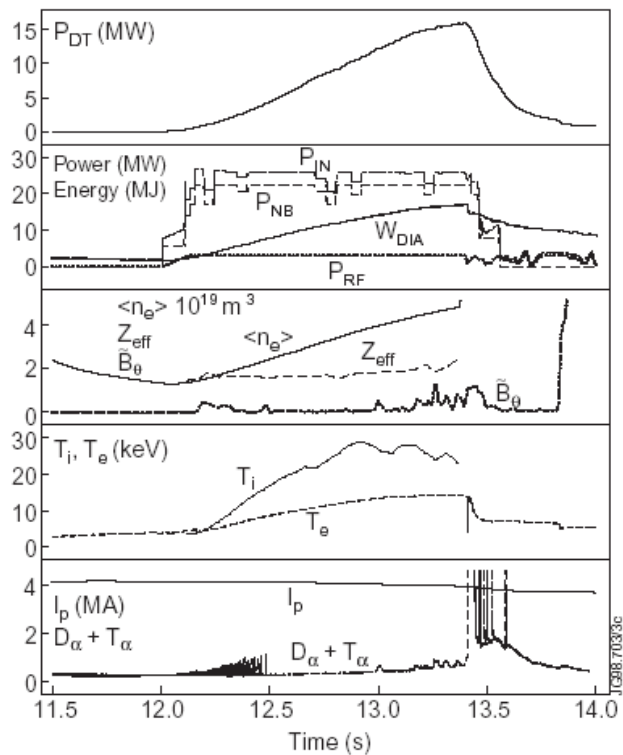
TCABR



Ref No: J85.1791c



COMPROVAÇÃO DA FUSÃO NUCLEAR CONTROLADA NO JET



1991: Primeiro experimento com DT

1997: 16 MW potência de fusão - 4 s

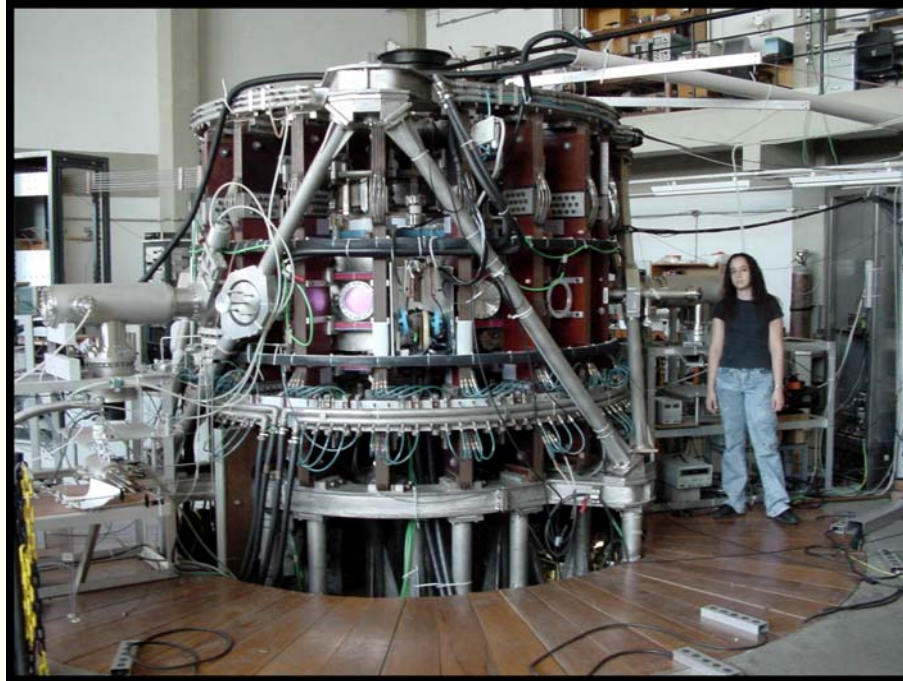


BRASIL: DOIS TOKAMAKS DE PEQUENO PORTE



TCABR - IFUSP

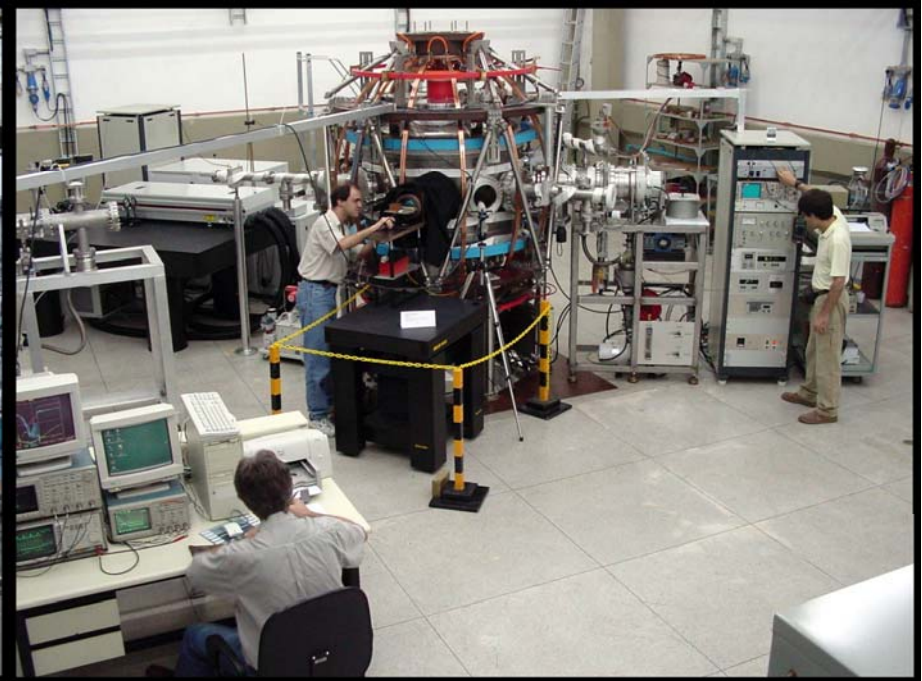
ETE - LAP/INPE



$B_T = 1,2 \text{ T}; I_p = 100 \text{ kA};$

$\langle n \rangle = 2,5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}; k_B T_{e0} = 600 \text{ eV}$

Entrou em operação em outubro 1999



$B_T = 0,4 \text{ T}; I_p = 50 \Rightarrow 200 \text{ kA};$

$\langle n \rangle = 2 \Rightarrow 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}; k_B T_{e0} = 120 \Rightarrow 500 \text{ eV}$

Entrou em operação em novembro 2000

without invoking avalanching [18]. Another experimental confirmation of avalanching comes from the Brazilian tokamak TCABR, where a new kind of runaway discharges has recently been discovered [19]. In these plasmas most of the current is provided by runaway electrons, which periodically excite a virulent beam-plasma instability. In the stationary phases between these events, the runaway electron production can only be explained by secondary generation.



PROJETO ITER



Consórcio Internacional:

China, Estados Unidos, EURATOM (União Européia e Suíça), Japão, Coréia, Rússia

Local: Cadarache, perto de Aix-en-Provence, França.

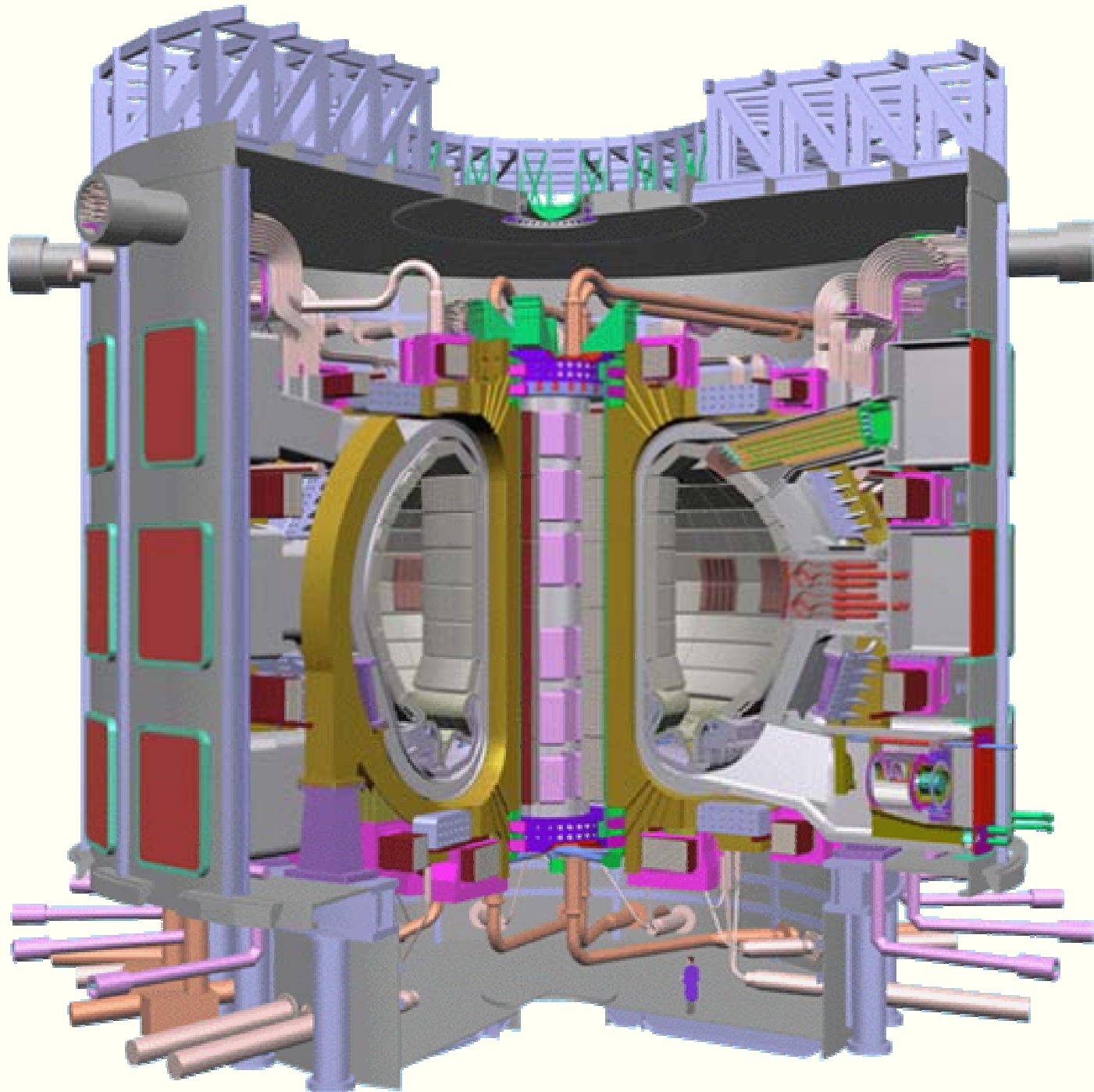
Entrada em operação prevista para 2016 (10 anos de construção)

Custo total: cerca de seis milhões de euros

Objetivo: confinar plasma a 100 milhões de graus Celsius, produzindo 500 MW de potência termonuclear



ITER





PROJETO ITER

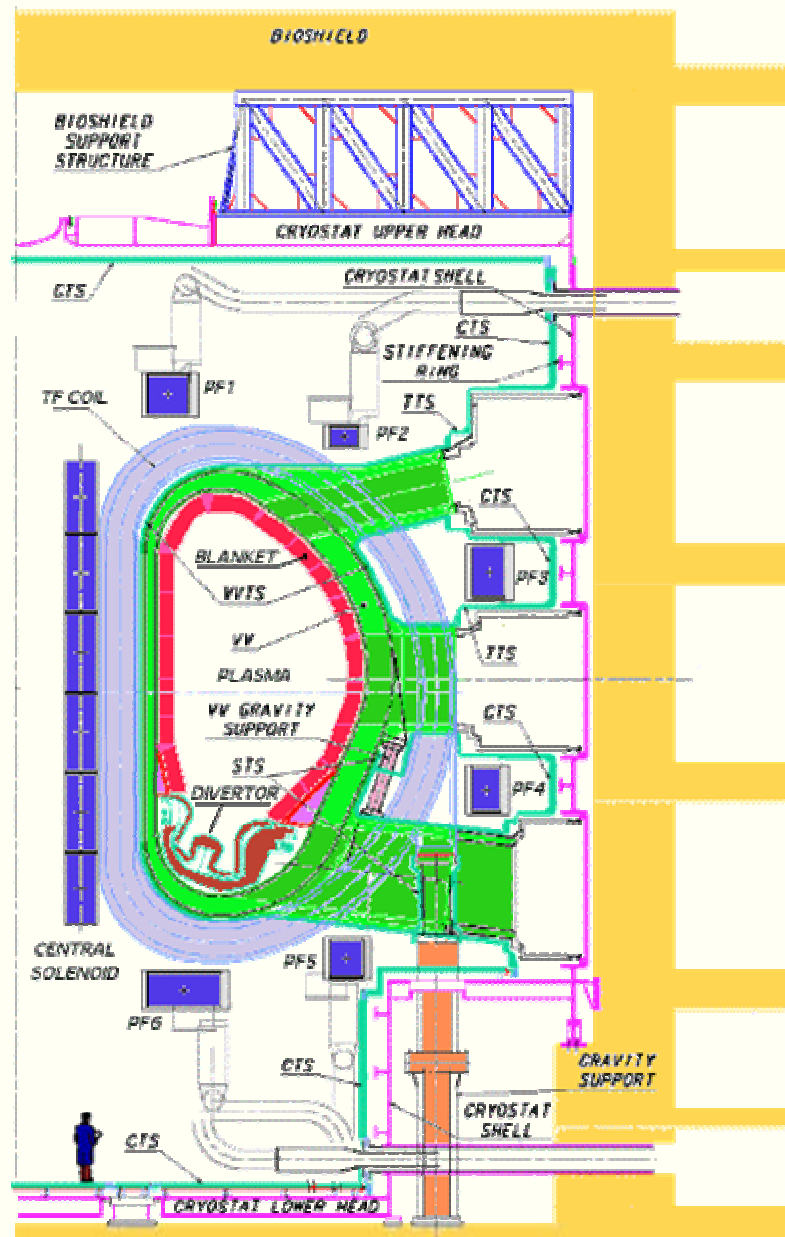
Participação de outros países.

- Índia fez proposta de participar pagando cerca de 10% do custo do projeto; proposta ainda não aceita.
- Brasil está sendo convidado para participar, através da EURATOM, mas forma ainda não definida.

Bobinas, que representam cerca de 17% do custo do projeto, serão feitas de ligas de Nióbio-Titânio e Niobio-Estanho.

Brasil produz cerca de 90% do Nióbio mundial, mas não fazemos os fios supercondutores aqui.

PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA, PRODUZINDO OS FIOS DE NÍÓBIO, PODERIA REPRESENTAR UMA BOA REDUÇÃO NO CUSTO DO PROJETO!

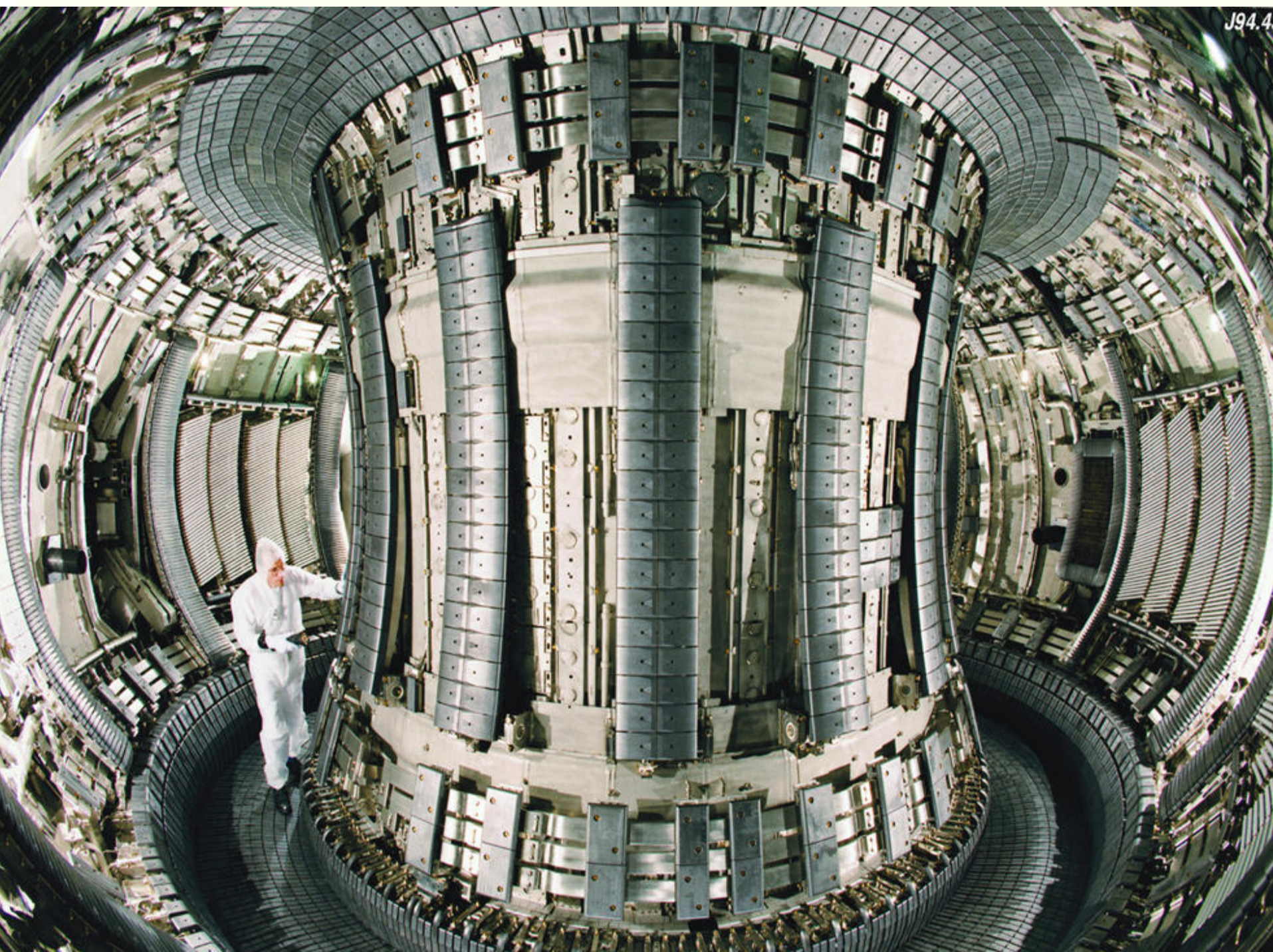


PERSPECTIVA PARA UM PROGRAMA NUCLEAR BRASILEIRO

1. CONCLUIR ANGRA III.
2. CONDUZIR UM PROGRAMA AGRESSIVO PARA GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS RADIOATIVOS.
3. CONSOLIDAR UM PROGRAMA DE PESQUISA EM SISTEMAS NUCLEARES AVANÇADOS, ATRAVÉS DA PARTICIPAÇÃO EM PROJETOS INTERNACIONAIS:

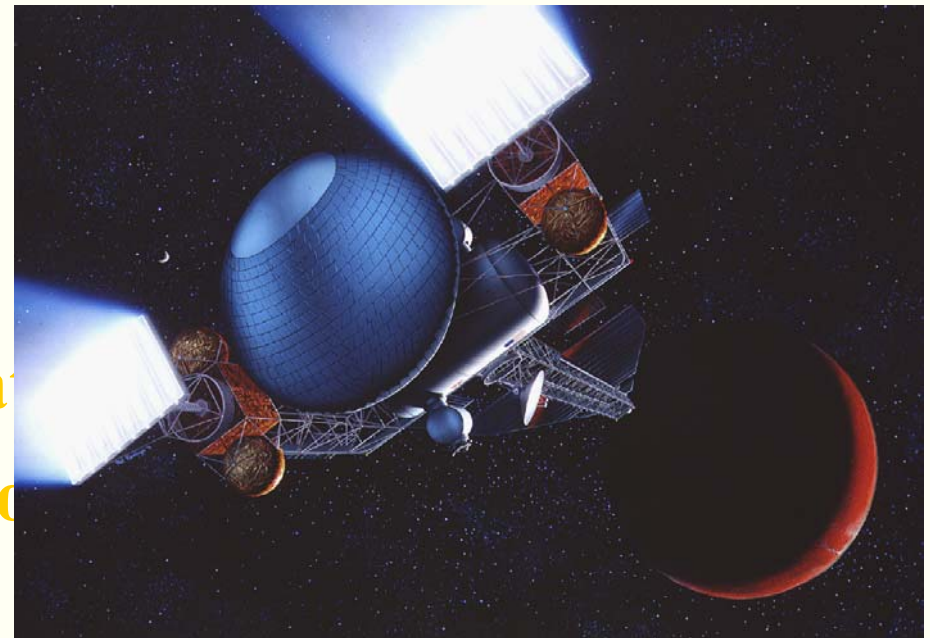
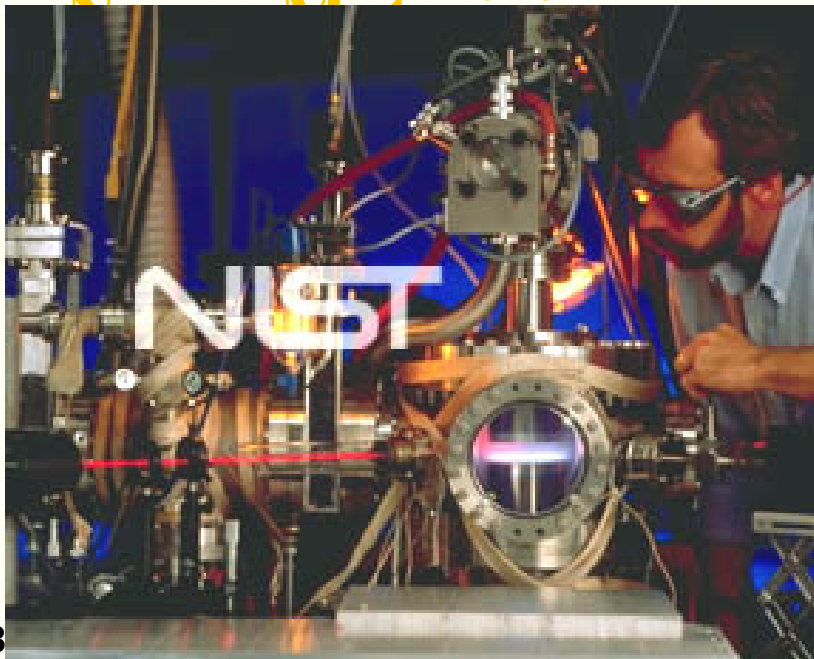
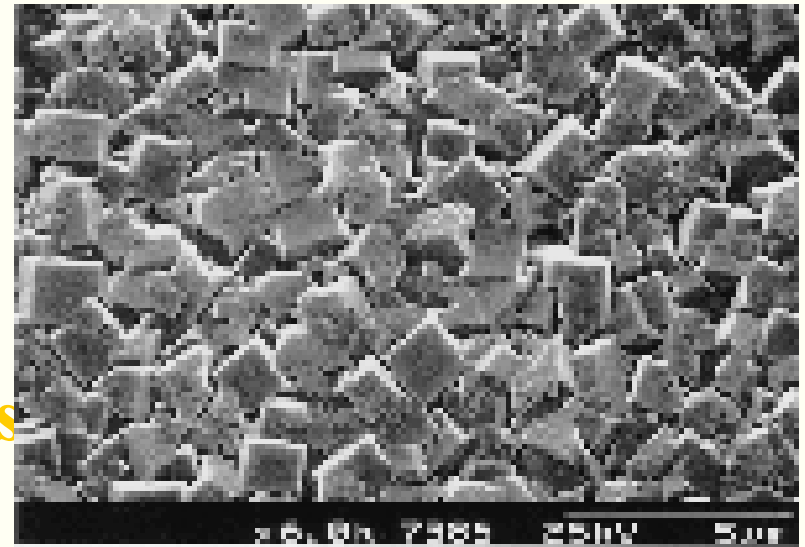
FISSÃO: REATORES ADS E DE QUARTA GERAÇÃO

FUSÃO: PARTICIPAÇÃO NO ITER





Plasmas “Frios” – Aplicações Tecnológicas

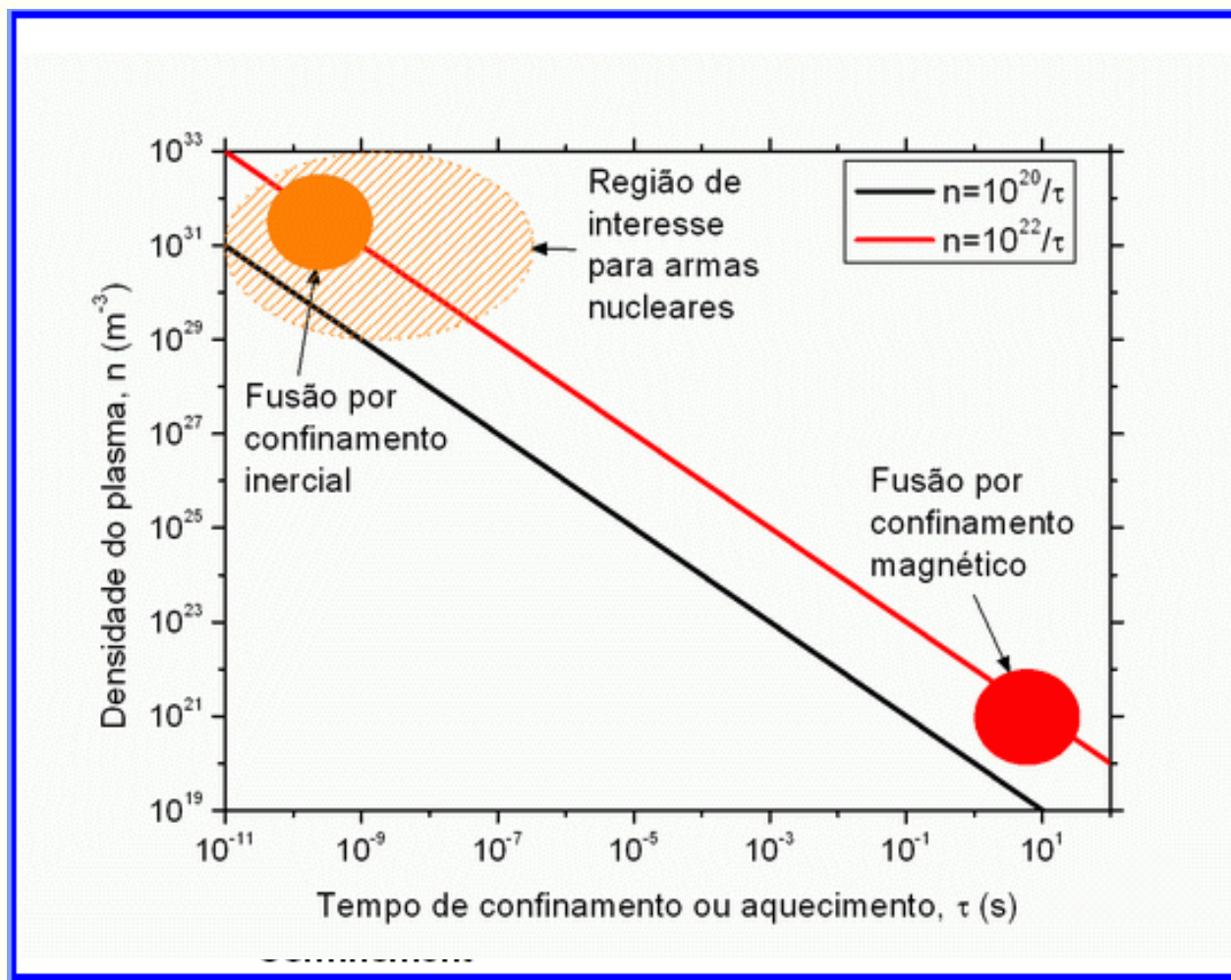




Plasmas Termonucleares – Confinamento em Laboratório

Confinamento Magnético

Confinamento Inercial



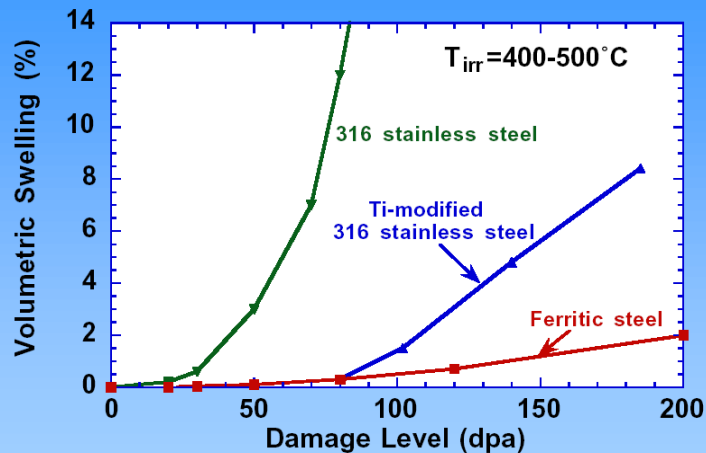


Problemas para Viabilização de Reatores

Principal: primeira parede

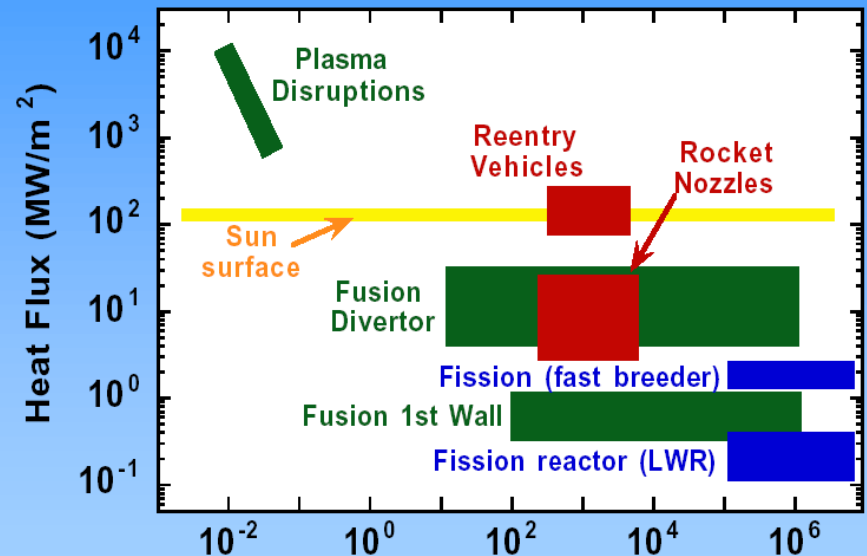
Dano por radiação

Swelling resistant alloys have been developed via international collaborations



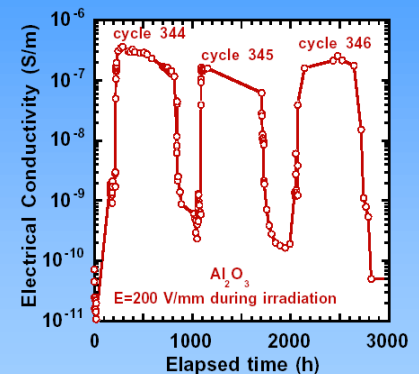
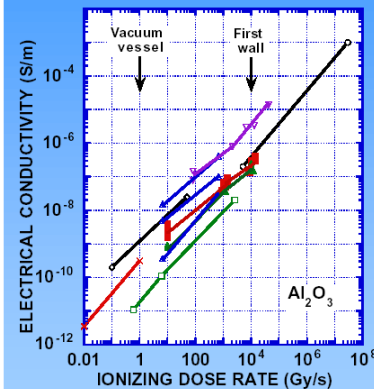
Lowest swelling is observed in body-centered cubic alloys (V alloys, ferritic steel)

Comparison of Heat Fluxes



Ionizing Radiation Causes Large Prompt Changes in Electrical Conductivity of Insulators

- The electrical conductivity is proportional to dose rate
- No permanent degradation occurs after neutron irradiation



- Suitable insulators are available for fusion reactor applications





- **Tela de televisão a plasma: são mais de 3 milhões de descargas de plasma em pequenas células.**
- **Radiação UV do plasma ativa o fósforo (verde-vermelho-azul) da tela, formando cada pixel.**



Plasmas na Natureza

