

PMT3532

Termohidráulica de Sistemas de Geração de Potência I



Prof. Dr. Alfredo Alvim
CEN- Centro Engenharia Nuclear
IPEN/CNEN- MCTIC

ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

DADOS GERAIS:

- **Número de reatores no mundo = 443**
- **Potência nominal = 370 GW(e)**
- **Energia gerada em 1980 = 0,7 milhão de GWh/ano**
- **Energia gerada em 2007 = 2,6 milhão de GWh/ano**
- **No Brasil, duas usinas nucleares e uma em construção:**
 - **Angra 1 - 630 MW(e), em operação desde 1982**
 - **Angra 2 - 1400 MW(e), início da operação em 2000**
 - **Angra 3 - 1400 MW(e)**

RESERVAS MUNDIAIS DE MINÉRIO DE URÂNIO:

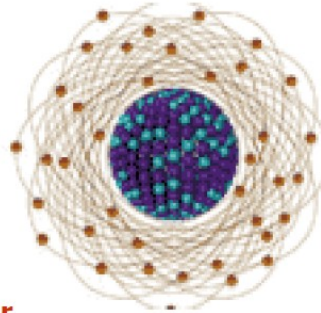
País	t U
Cazaquistão	957.000
Austrália	910.000
África do Sul	369.000
Estados Unidos	355.000
Canadá	332.000
Brasil	309.000
Namíbia	287.000
Total no Mundo	4.416.000

PRODUTORES MUNDIAIS DE MINÉRIO DE URÂNIO:

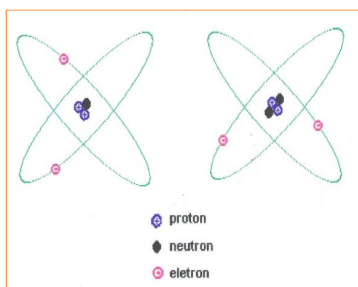
País Produção em 1998	t U
Canadá	10.922
Austrália	4.910
Nigéria	3.714
Namíbia	2780
Rússia	2.530
Total Mundial	34.986

CONCEITOS BÁSICOS

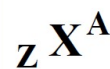
- Estrutura Atômica
- Origem da Energia Nuclear
- Fissão Nuclear
- Moderação de Neutrons
- Reação em Cadeia
- Enriquecimento e Conversão
- Elementos de um Reator Nuclear
- Tipos Clássicos de Reatores Nucleares
- Ciclo do Combustível Nuclear
- Comentários Finais



Estrutura Atômica



Representação:



Z = número atômico

N = número de neutrons

A = número de massa ($A=Z+N$)

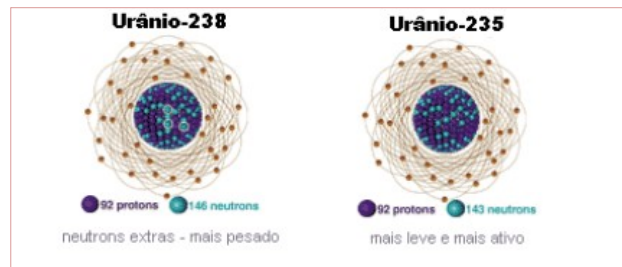
Núcleos pesados:



a = último dígito do número atômico

b = último dígito do número de massa

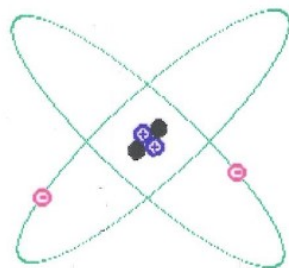
Estrutura Atômica do Urânio



COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DO URÂNIO NATURAL

Isótopo	Porcentagem em massa	Porcentagem em átomos
${}_{92}\text{U}^{234}$	0,006	0,0057
${}_{92}\text{U}^{235}$	0,712	0,72
${}_{92}\text{U}^{238}$	99,282	99,27

Origem da Energia Nuclear -1



Z protons (massa = p)

Z eletrons (massa = e)

N neutrons (massa = n)

$A = Z + N$ Número de Massa

A = Número de Nucleons

FORMAÇÃO DO NÚCLEO



Origem da Energia Nuclear - 2

MASSAS (*medidas*):

${}^4_2\text{He}$	$\rightarrow$	4,00277 uma
n	$\rightarrow$	1,00898 uma
p	$\rightarrow$	1,00759 uma

DEFEITO DE MASSA

$$\Delta m = m({}^4_2\text{He}) - m(2n + 2p) = - 0,03037 \text{ uma}$$

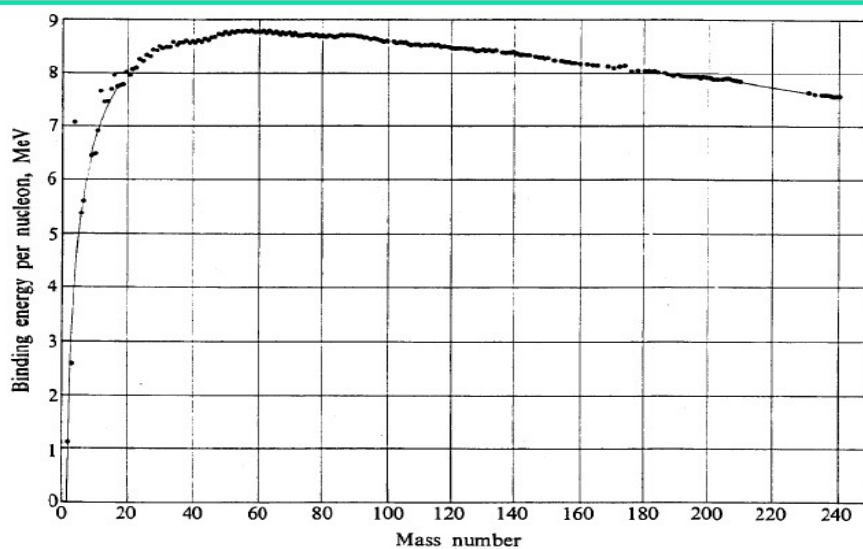
EQUAÇÃO DE EINSTEIN

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Energia liberada na formação
do núcleo

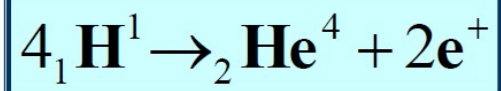
$$\Delta E = - 28,2 \text{ MeV} \quad \text{ou} \quad \Delta E/A = - 7,05 \text{ MeV/Nucleon}$$

Defeito de Massa e Energia de Ligação



Fusão Nuclear

Fusão nuclear, no Sol e nas Estrelas:

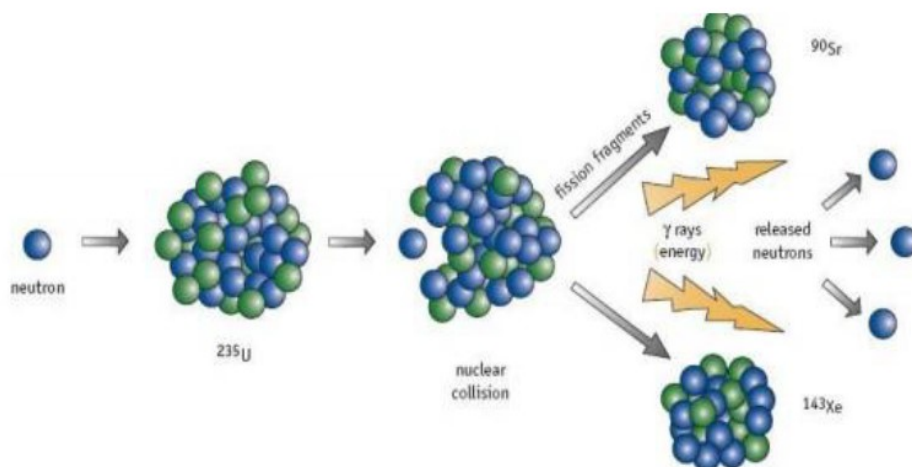


Fusões Nucleares:

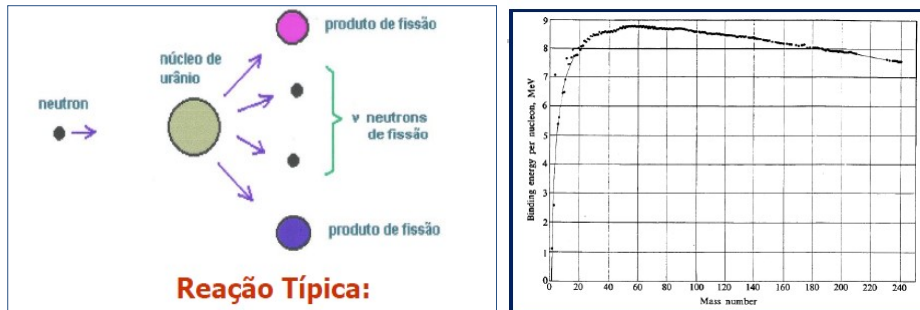
Reação		Energia por Reação
Reagentes	Produtos	(MeV)
D + D	T + p	4
T + D	He ⁴ + n	17,6
D + D	He ³ + n	3,2
He ³ + D	He ⁴ + p	18,3

Fissão Nuclear

Reação Típica:



Fissão Nuclear



Nesta reação: $\Delta E = 189.5 \text{ MeV}$

Em média:

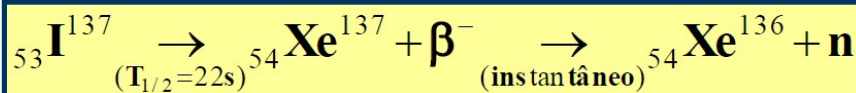
$$\Delta E = 200 \text{ MeV}$$

$$\nu = 2.5 \text{ neutrons}$$

Fissão Nuclear

Dois tipos de neutrons de fissão:

- ☐ Neutrons prontos → Surgem imediatamente após a fissão
- ☐ Neutrons atrasados → Surgem do decaimento de um produto de fissão



Energia de Fissão do U^{235}

FORMA	ENERGIA EMITIDA, MeV	ENERGIA RECUPERÁVEL, MeV
Fragmentos de Fissão	168	168
Dcaimento dos produtos de fissão: raios β raios γ neutrinos	8 7 12	8 7 -
Raios γ prontos	7	7
Neutrons de fissão	5	5
Captura de neutrons com emissão de raio γ	--	3 - 12
TOTAL	207	198 - 207

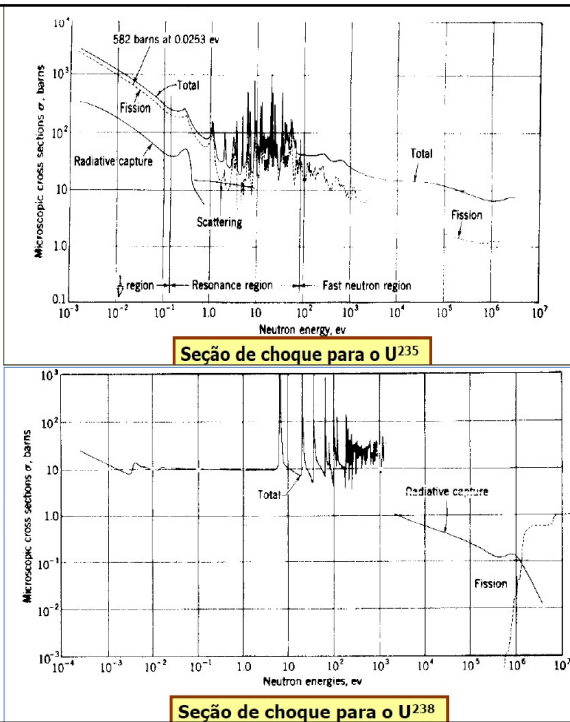
Energia dos Neutrons

CLASSIFICAÇÃO	ENERGIA DO NEUTRON
Rápidos	Acima de 100 KeV
Intermediários	1 eV --- 100 KeV
Térmicos ou Lentos	Abaixo de 1 eV

Classificação dos Isótopos

ISÓTOPOS	CLASSIFICAÇÃO	OBSERVAÇÃO
$^{92}_{92}U^{233}$, $^{92}_{92}U^{235}$, $^{94}_{94}Pu^{239}$, $^{94}_{94}Pu^{241}$	Fisíveis	Podem sofrer fissão qualquer que seja a energia do neutron incidente
$^{90}_{90}Th^{232}$, $^{92}_{92}U^{238}$	Fissionáveis	Podem se fissionar se atingidos por neutrons de alta energia (acima de 1,5 MeV)
$^{90}_{90}Th^{232}$, $^{92}_{92}U^{238}$	Férteis	Podem produzir núcleos fisíveis por absorção de neutrons, seguido de dois decaimentos β .

Seções de Choque Microscópicas



Moderação de Neutrons

neutron de fissão $\rightarrow$ 2 Mev (em média)

POR COLISÃO:

neutron

Alta Energia
(rápido)

$\rightarrow$

Baixa Energia
(térmico)

faixa intermediária $\rightarrow$

Picos de absorção por
ressonância no U^{238}

Auto Blindagem
Espacial

Auto Blindagem
Energética

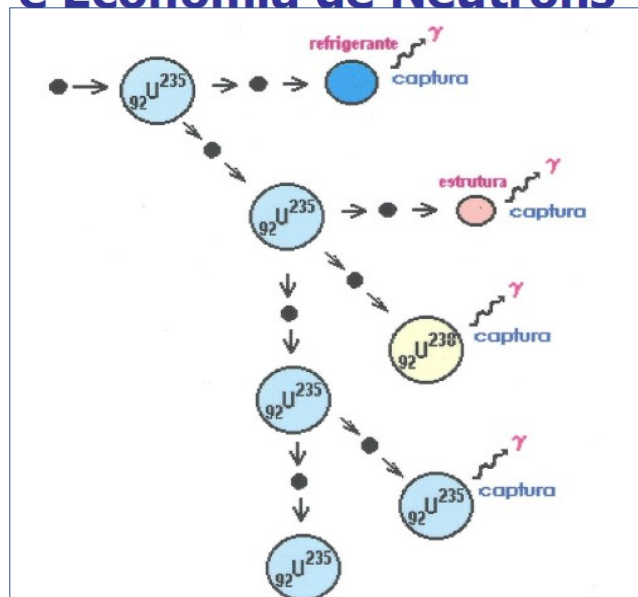
Moderadores

Propriedades desejadas:

- deve moderar um neutron com pequeno número de colisões
- baixa probabilidade de absorver um neutron
- barato e abundante

<u>Materiais</u>	<u># de colisões</u>
H ₂ O	15,8
D ₂ O	28,5
C	91,3
U	1730

Reação em Cadeia e Economia de Neutrons



Reação em Cadeia

Razões que impedem o neutron de causar fissão:

- Captura sem causar fissão ou absorção por isótopos não físeis
- Fugas pelas fronteiras

Para o ${}_{92}\text{U}^{235}$:

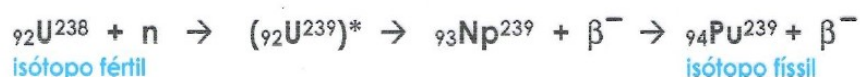
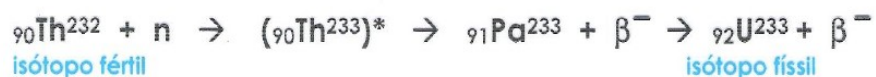
- Fissão produz, em média, 2,47 neutrons de fissão ($\nu=2,47$).
- De cada 100 neutrons de fissão, 100/2,47 (ou seja, 40,5) precisam causar nova fissão para o reator se manter crítico.
- Apenas 84% dos neutrons absorvidos causam fissão.
- 40,5/0,84 (ou seja, 48) neutrons precisam ser capturados pelo ${}_{92}\text{U}^{235}$.
- No máximo, 52 neutrons podem ser absorvidos por outros materiais ou escapar do reator.

Enriquecimento e Conversão

Enriquecimento:

Processo para aumentar a concentração isotópica do U^{235} (físsil)

Conversão:



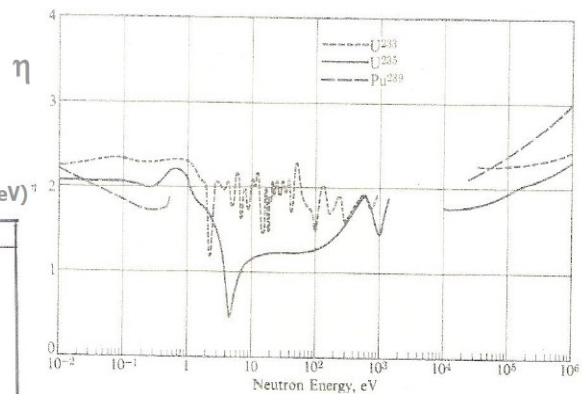
Breeding

Parâmetro $\eta \rightarrow$ Número de neutrons produzidos por
neutron absorvido no combustível

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$$

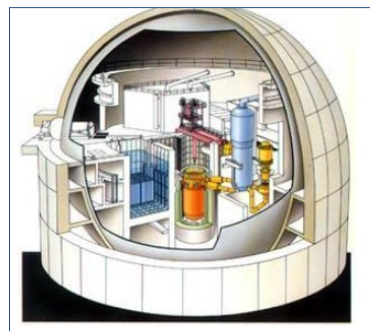
η para neutrons térmicos ($E=0,025$ eV) [†]

Elemento	η
U^{233}	2,287
U^{235}	2,068
Pu^{239}	2,108
Pu^{241}	2,145
U_{nat}	1,32



ENERGIA NUCLEAR

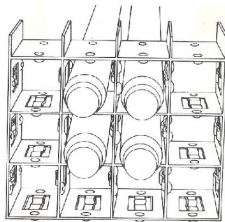
ELEMENTOS BÁSICOS DE UM REATOR NUCLEAR



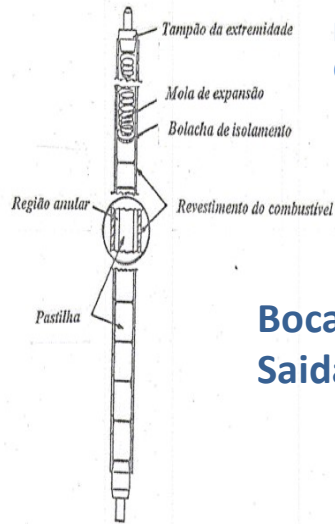
Pastilha de Combustível



Grades

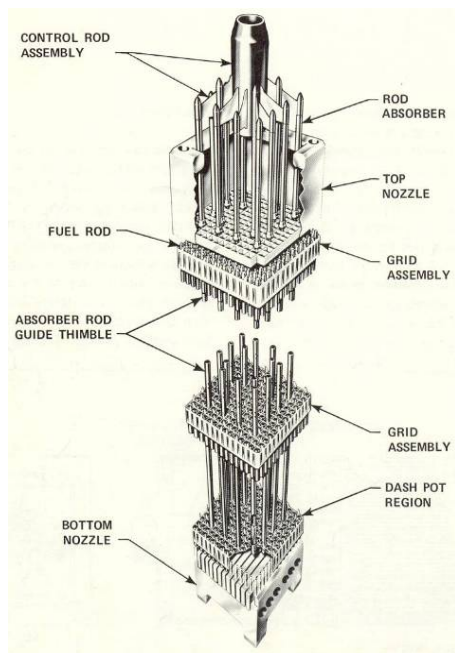
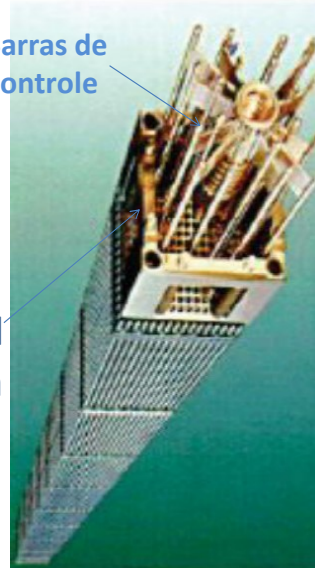


Vareta e Elemento Combustível

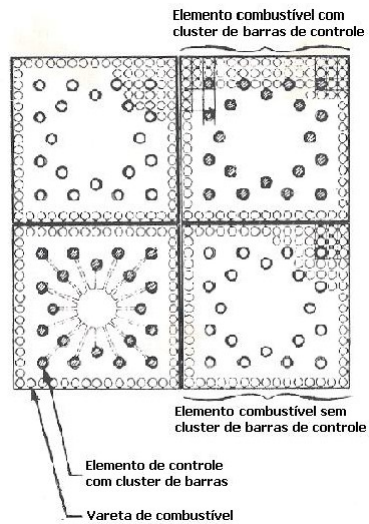


Barras de Controle

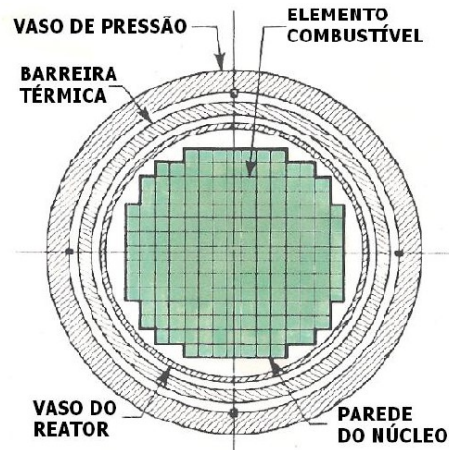
Bocal Saída



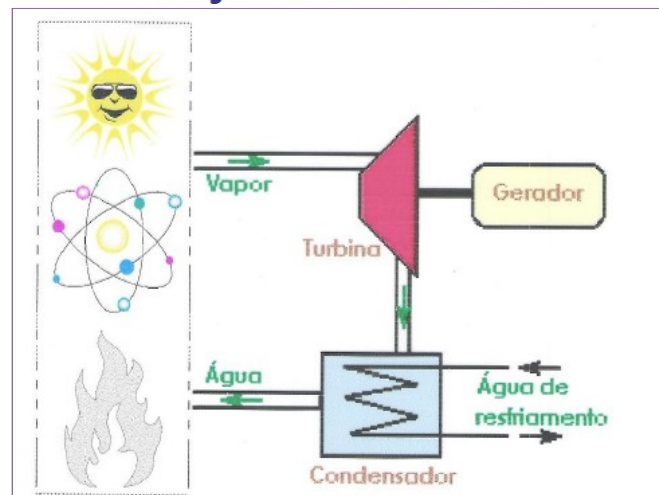
Arranjo de Elementos Combustíveis



Vaso e Reator



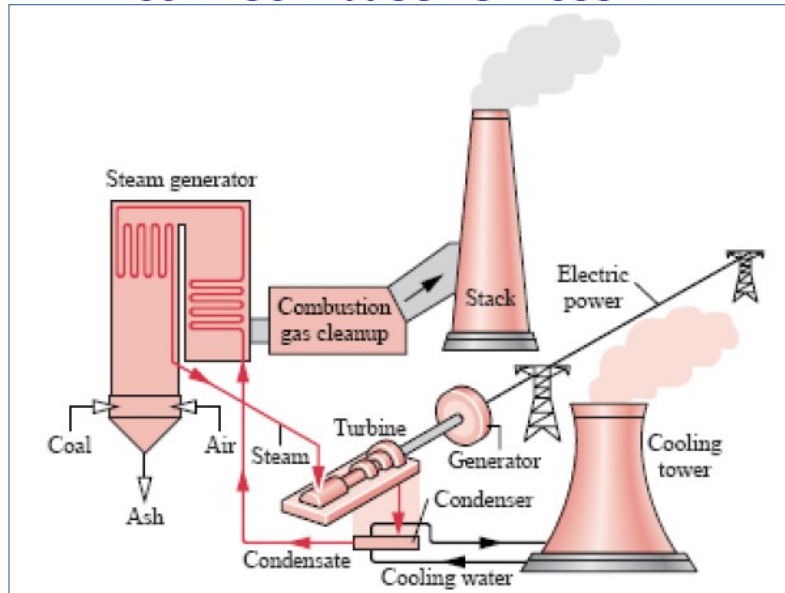
Geração de Potência



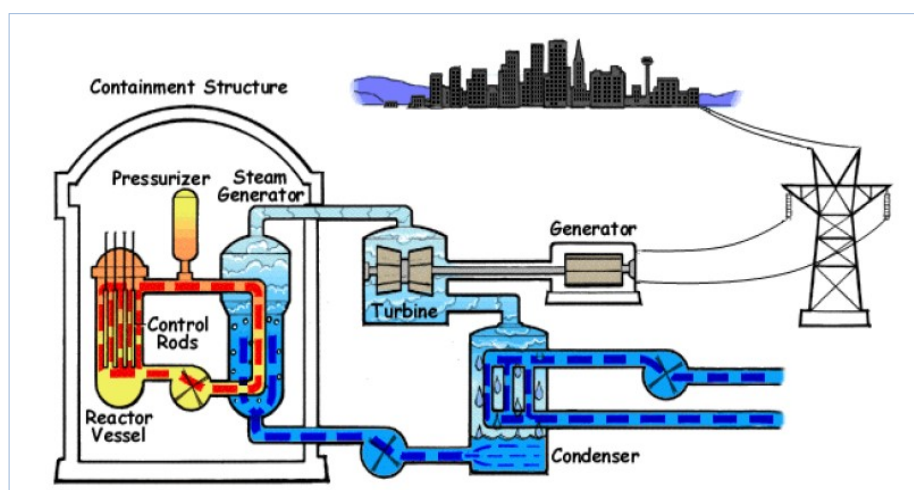
Comparação de energia liberada:

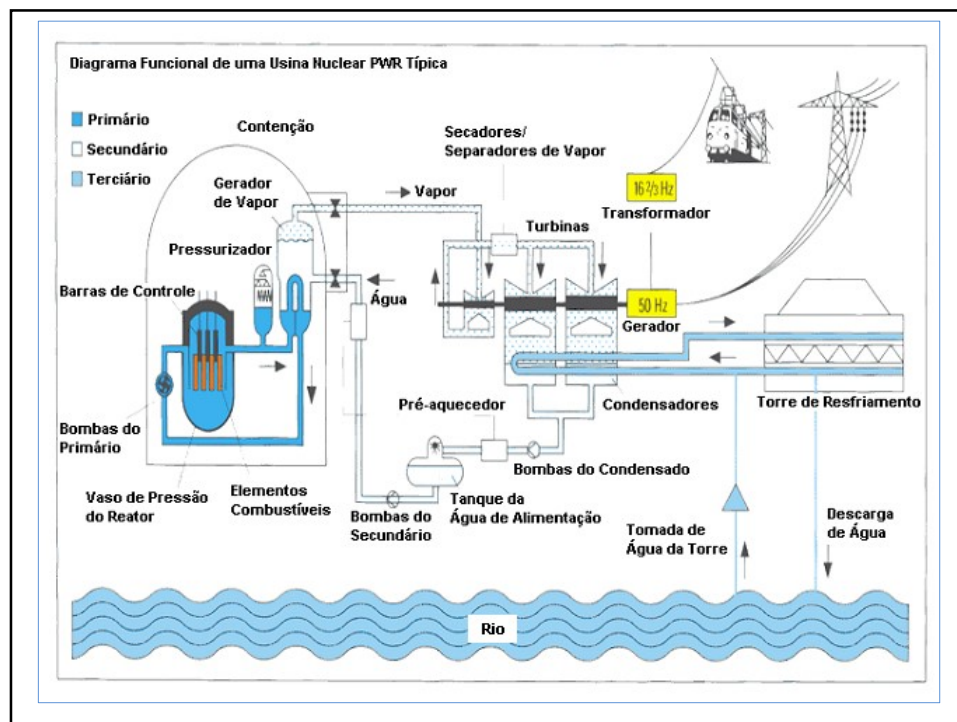
Fissão completa de 1 Kg de U = 12000 barris de petróleo
= 2000 toneladas de carvão

Geração de Potência com Combustível Fóssil

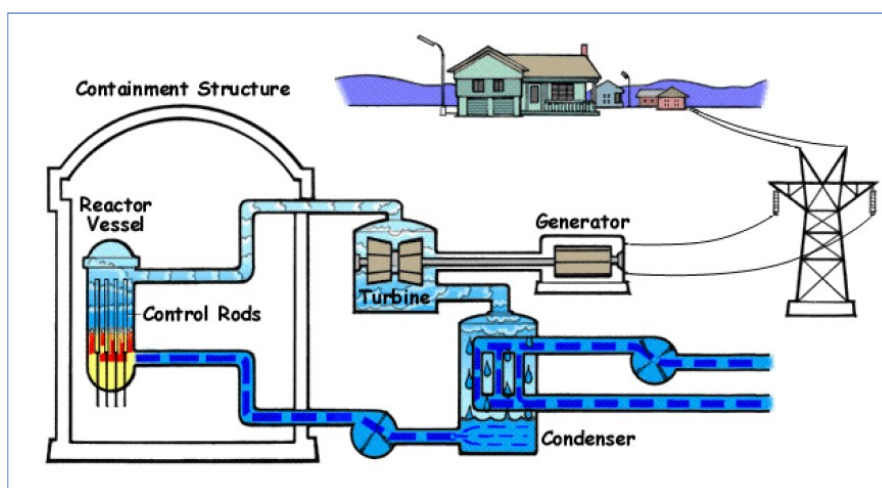


PWR Pressurized Water Reactor

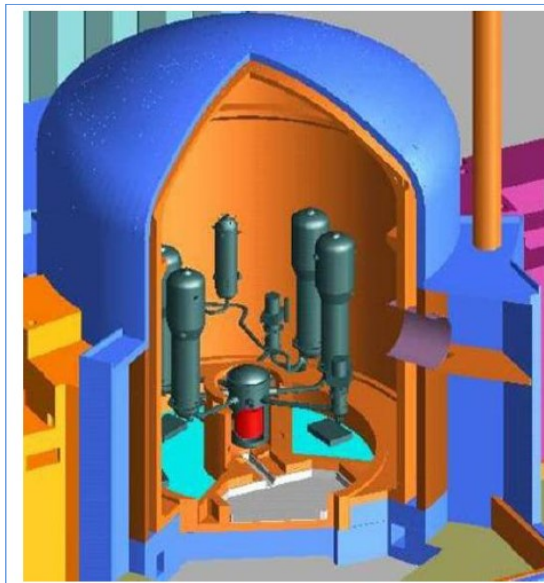




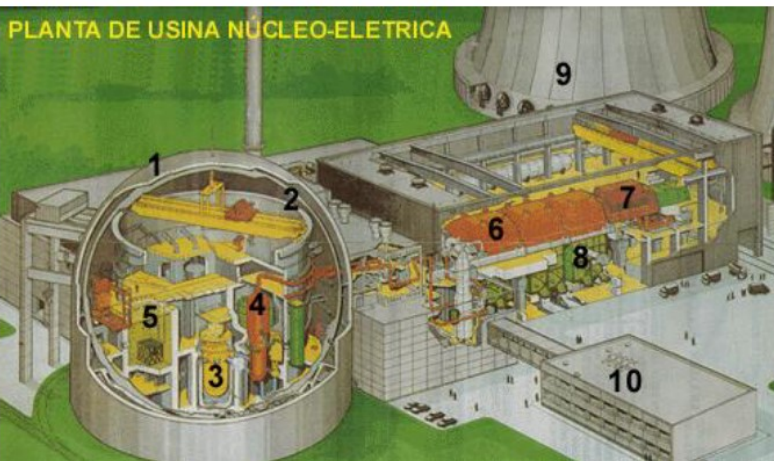
BWR Boiling Water Reactor



Circuito Primário de um PWR



CENTRAL NUCLEAR PWR



1. CONTENÇÃO DE CONCRETO ARMADO
2. CONTENÇÃO DE AÇO
3. REATOR NUCLEAR
4. GERADOR DE VAPOR
5. PISCINA DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEL

6. TURBINAS À VAPOR
7. GERADOR DE ELETRICIDADE
8. CONDENSADORES
9. TORRE DE REFRIGERAÇÃO
10. EDIFÍCIO DA ADMINISTRAÇÃO

REATORES REFRIGERADOS A H₂O **PRESSURIZADA (PWR)**

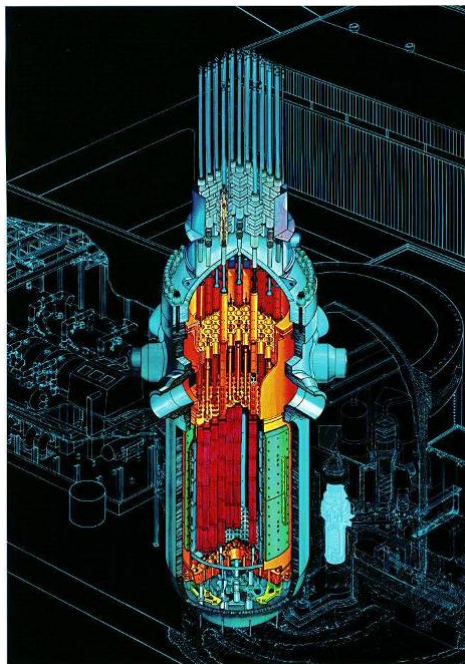
Vaso de pressão: 4,7 m de diâmetro
10 m de altura

Pressão: 153 atm

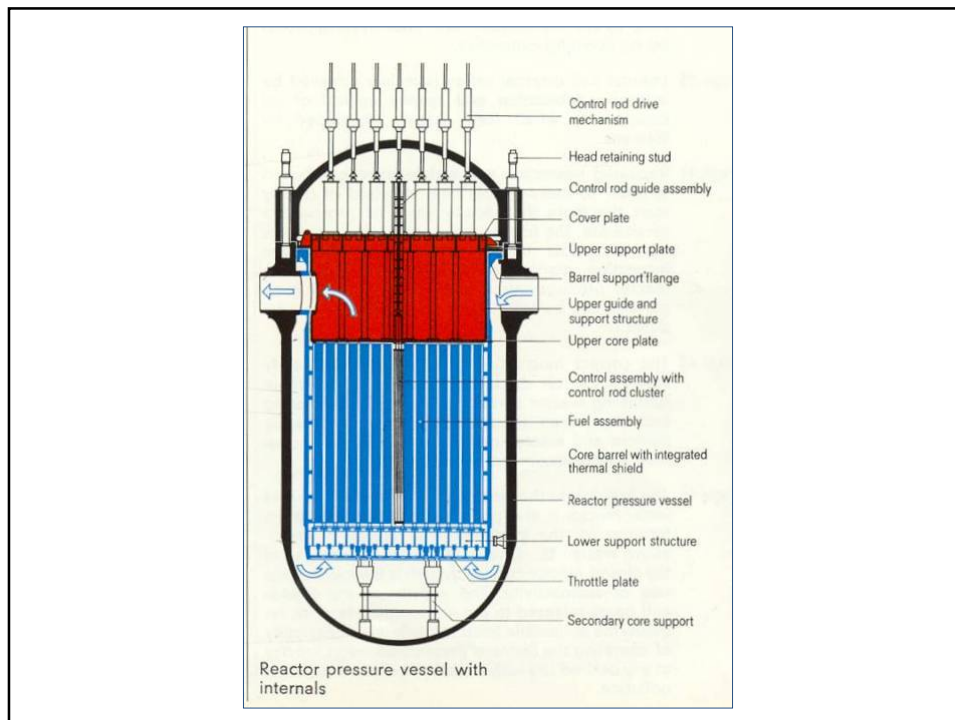
Temperaturas: entrada 295 °C
saída 330°C

Espessura da parede: ~20cm

Material: aço carbono revestido internamente com aço inoxidável



Westinghouse NUCLEAR REACTOR



REATORES REFRIGERADOS A H₂O PRESSURIZADA (PWR)

Gerador de vapor

Pressão: 73 atm

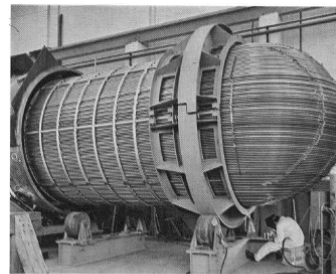
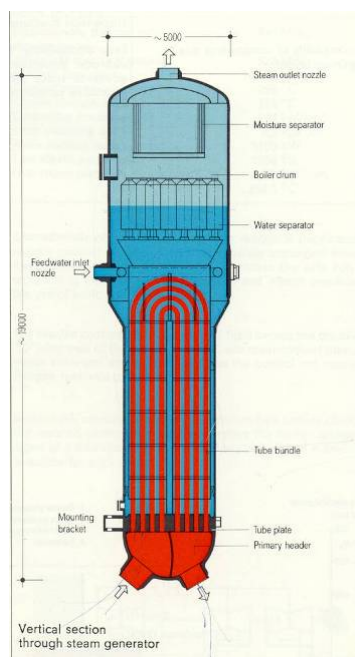
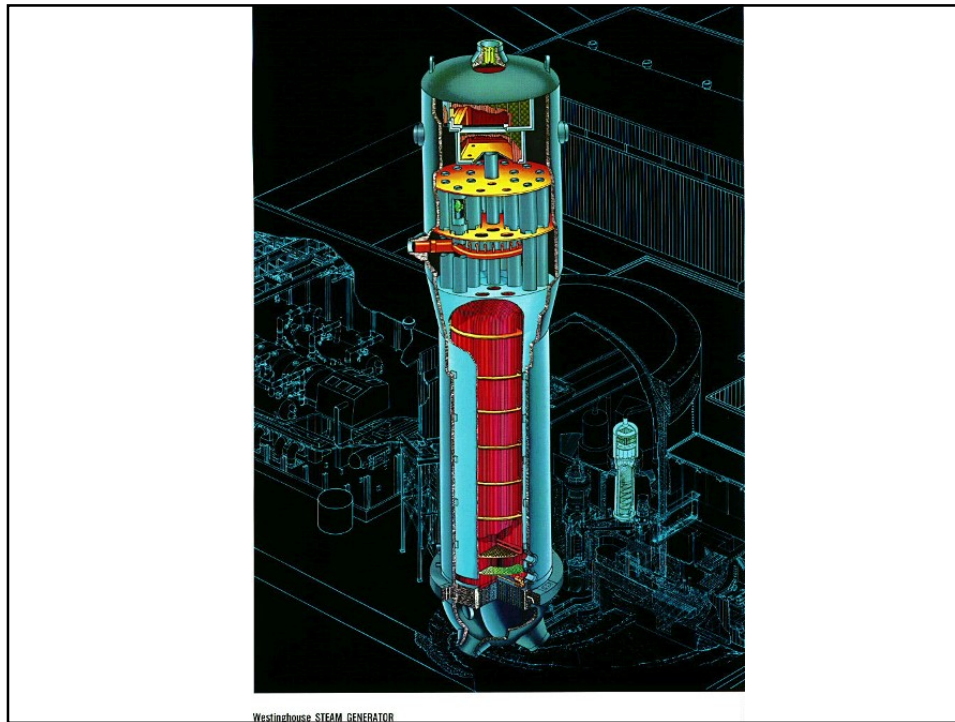
Temperatura: 287°C

Diâmetro externo: 4,5 m

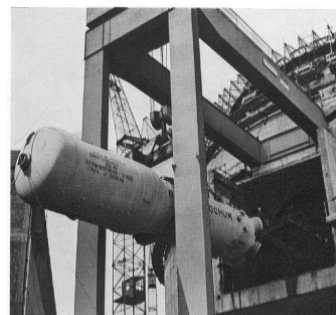
Altura: 20,6 m

Número de tubos em U: ~6000

Diâmetro dos tubos em U: ~2cm



Steam generator tube bundle
(By courtesy of: Balcke)



Installing a steam generator in the
containment structure

REATORES REFRIGERADOS A H₂O **PRESSURIZADA (PWR)**

Pressurizador

Diâmetro externo: 2,35 m

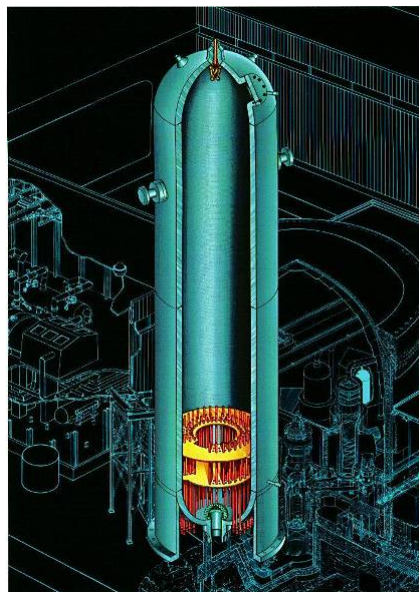
Altura: 16 m

Aquecedores elétricos

Sistema de spray

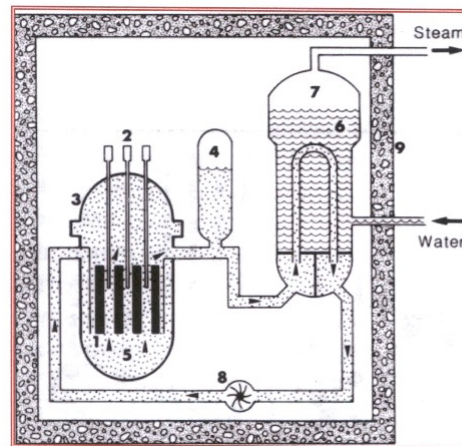
Válvula de alívio

Válvula de segurança



Westinghouse PRESSURIZER

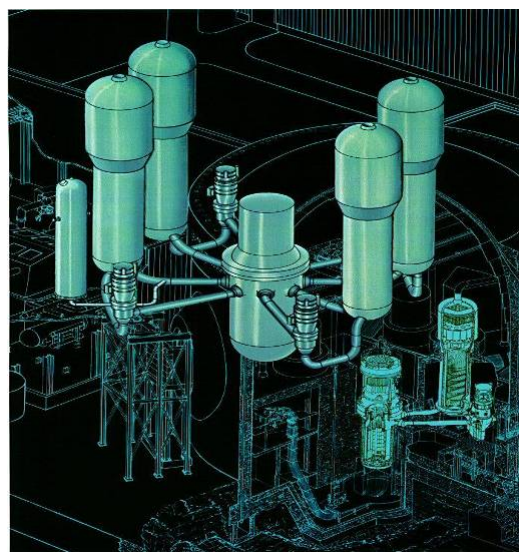
REATORES REFRIGERADOS A H₂O PRESSURIZADA (PWR)



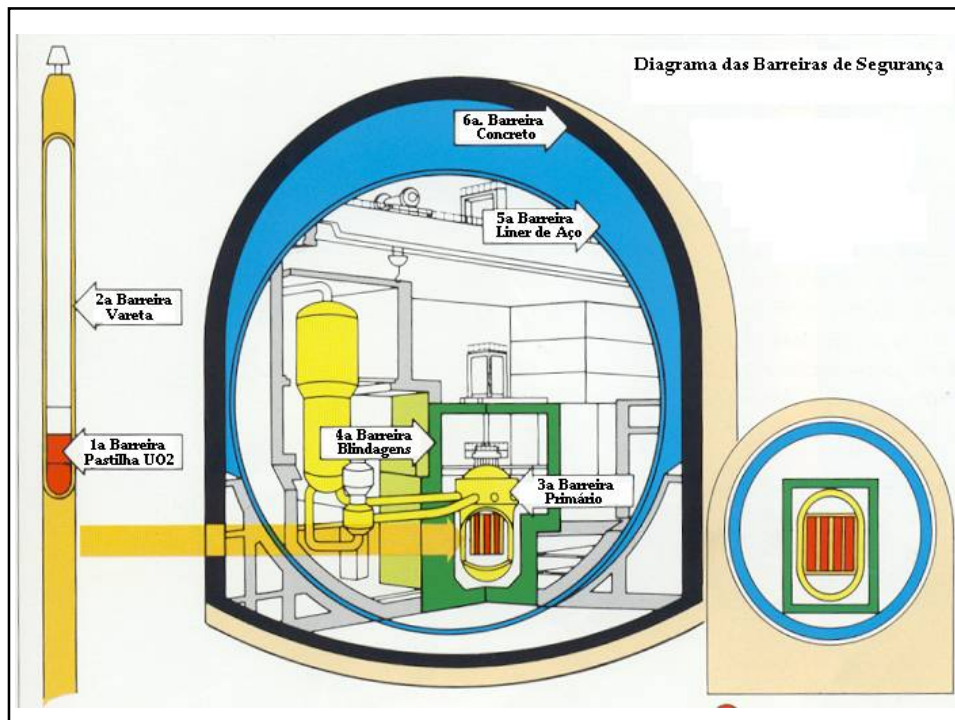
- 1- Elementos combustíveis
- 2- Barras de controle
- 3- Vaso de pressão
- 4- Pressurizador
- 5- Água pressurizada
- 6- Água
- 7- Gerador de vapor
- 8- Bomba
- 9- Escudo de concreto

Diagrama esquemático mostra de forma simplificada os componentes de um reator PWR

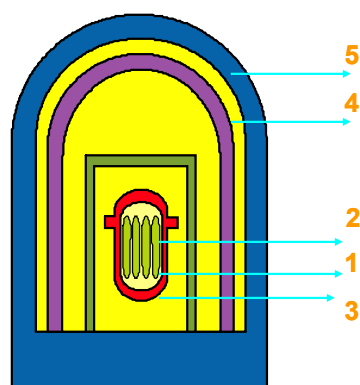
REATORES REFRIGERADOS A H₂O PRESSURIZADA (PWR)



Westinghouse NUCLEAR STEAM SUPPLY SYSTEM



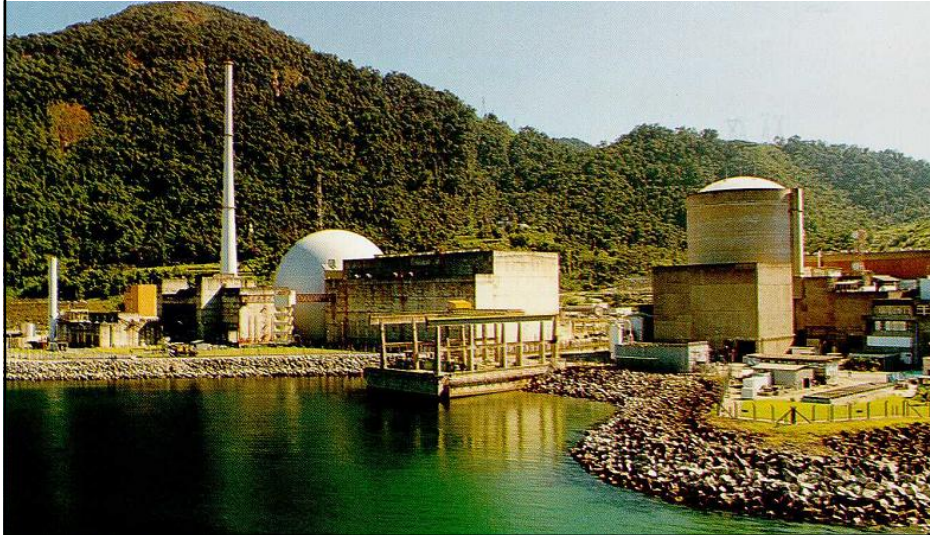
Barreiras contra a liberação de produtos radioativos



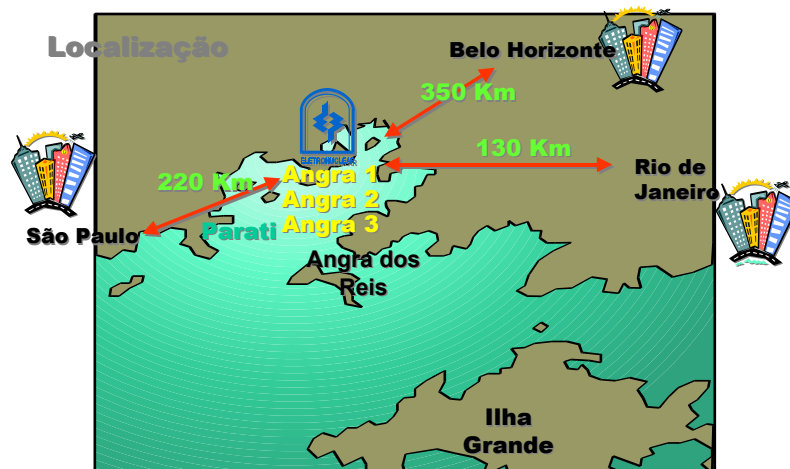
- 1- Absorção dos produtos de fissão pelo próprio combustível
- 2- Revestimento da vareta de combustível
- 3- Circuitos primário e secundário
- 4- Esfera de contenção de aço
- 5- Prédio do Reator

REATORES REFRIGERADOS A H₂O PRESSURIZADA (PWR)

Angra 1 e 2



Instituto de Pesquisas Energéticas e
Nucleares de São Paulo
IPEN-CNEN/SP





Vista Aérea da Praia de Itaorna - Usinas Nucleares Angra 1 e Angra 2

REATORES REFRIGERADOS A H_2O PRESSURIZADA (PWR)

As dimensões médias do núcleo são:

$$\varnothing \sim 3,8m$$

$$h \sim 3,7m$$



⇒ Vaso $\varnothing = 4,7m$ e $h = 10m$

Temperaturas: $T_{in} = 295^{\circ}C$, $T_{out} = 330^{\circ}C$, $p = 150 \text{ bar}$

Usinas Brasileiras ($\cong 1,2$ % de toda E elétrica produzida) – 45% E consumida no Rio de Janeiro.

Angra 1 – Operação 1982

^{235}U – 2,6 % enriquecimento (16 x 16)
 Zr 4 – encamisamento
 2 circuitos (324°C – 157 atm e 287°C – 65 atm)
 P = 1876 MWth - 628 MWe
 contenção cilíndrica (36 m diam. e 58 m altura)

Angra 2 – Operação 2000 (Angra 3)

^{235}U – 2,5 % enriquecimento (17 x 17)
 Zr 4 – encamisamento
 4 circuitos (329°C – 161 atm e 284°C – 70 atm)
 P = 3965 MWth - 1350 MWe
 contenção esférico (56 m diam.)

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo *IPEN-CNEN/SP*

CUSTOS

1 VARETA COMBUSTÍVEL ~ \$ 2000

1 ARRANJO 17X17 ~ \$ 500.000

NÚCLEO 121 ARRANJOS ~ \$ 60.500.000 (TIPO ANGRA 1)

TROCA DE COMBUSTÍVEL

- Mais enriquecidos na periferia

- 1/3 do núcleo é substituído na recarga (3 níveis de enriquecimento)

REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)

Vapor gerado é utilizado diretamente na turbina

VANTAGENS

- diminuição das perdas termodinâmicas
- não há necessidade de altas pressões

Basicamente o EC é semelhante ao do PWR com varetas e pastilhas de UO₂ enriquecidos entre 2 e 4% . Arranjos de 7x7 ou 8x8 varetas.

- dimensões do núcleo (média): $\phi \sim 4,7\text{m}$
 $h \sim 3,75\text{m}$

- temperatura $\cong 280^\circ\text{C}$ a 65 atm

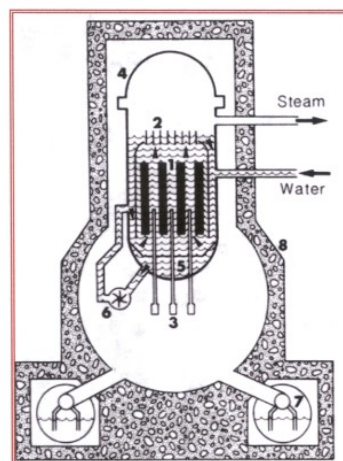
As barras de controle entram por baixo

- USA 40 usinas BWR ($P_{\text{th}} = 3580 \text{ MW}$ $P_e = 1200 \text{ MW}$)

- Vaso $\phi = 6,05\text{m}$
 $h = 21,6\text{m}$

- $\phi_{\text{máx.}} = 50\% \phi_{\text{crítico}}$

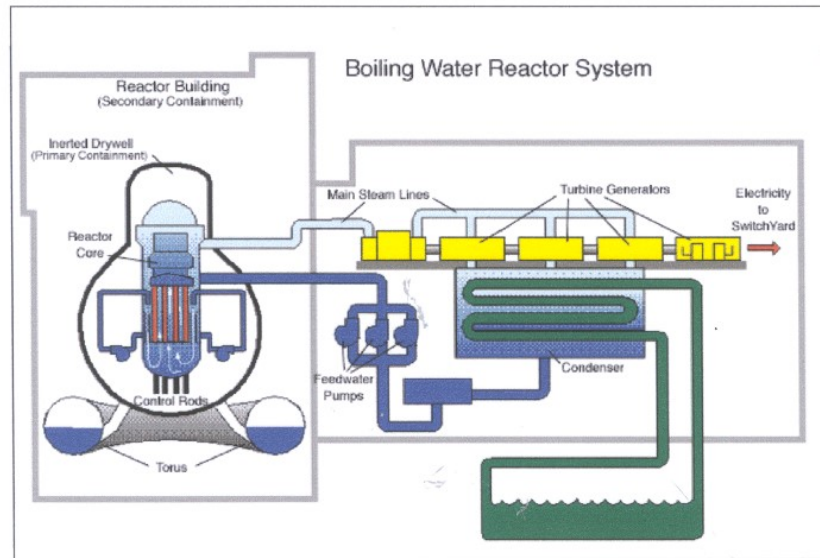
REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)



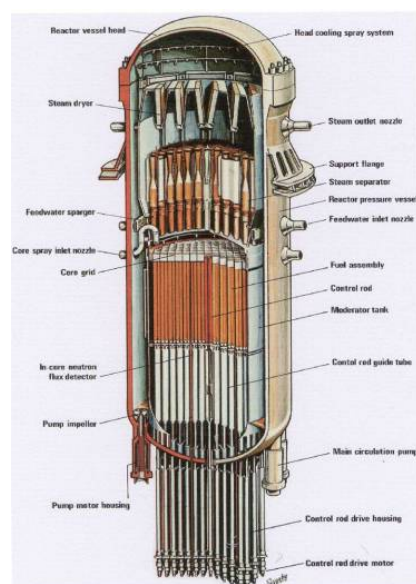
- 1- Elementos combustíveis
- 2- Separadores de vapor
- 3- Barras de controle
- 4- Vaso de pressão
- 5- Água
- 6- Bomba
- 7- Sistema de alívio de pressão
- 8- Escudo de concreto

Diagrama esquemático mostra de forma simplificada os componentes de um reator BWR

REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)

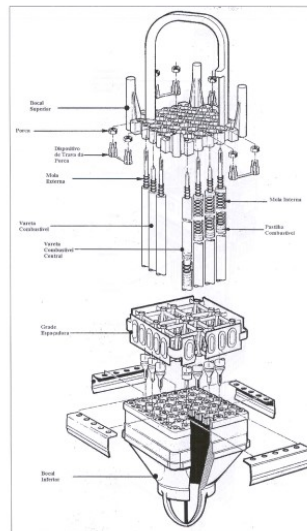


REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)

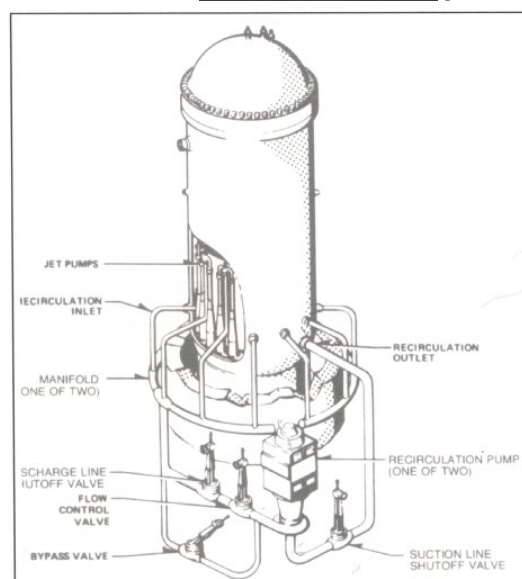


Conjunto do Reator

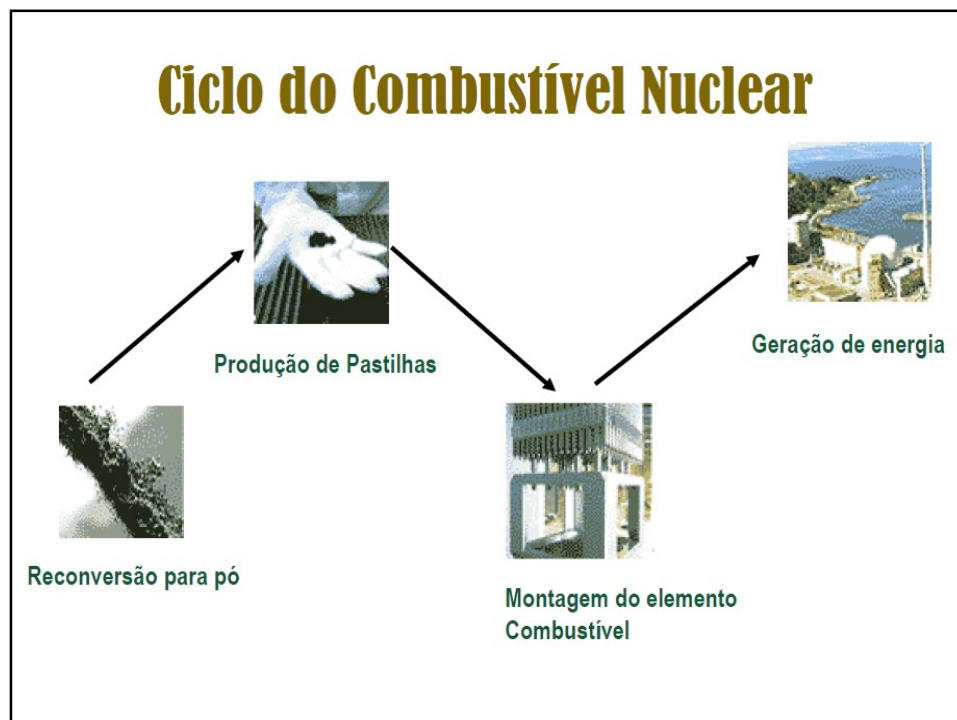
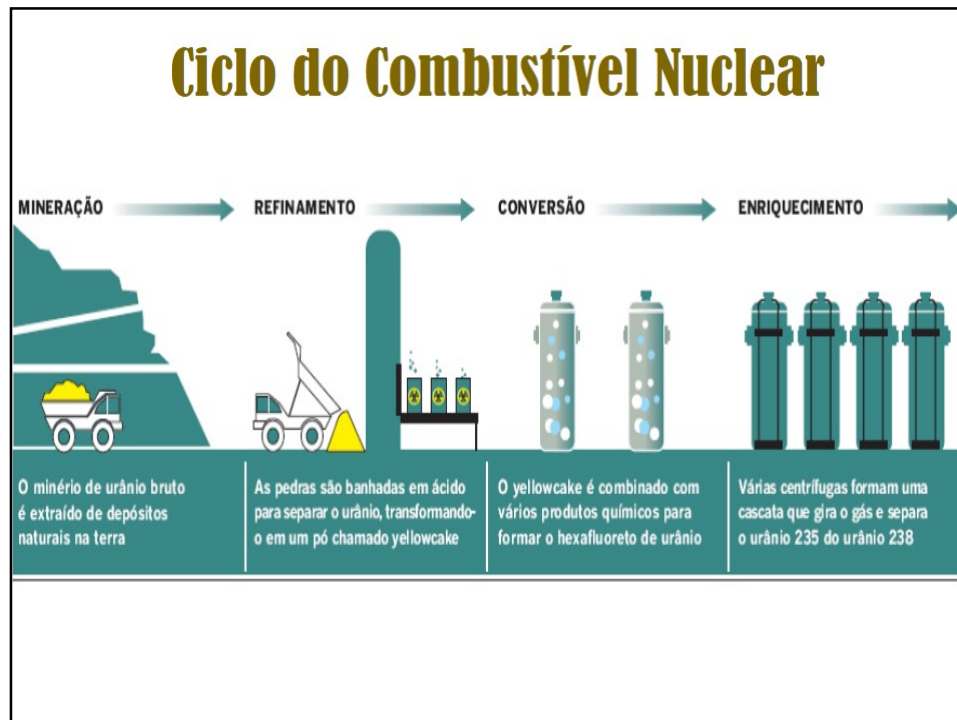
REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)

Elemento Combustível

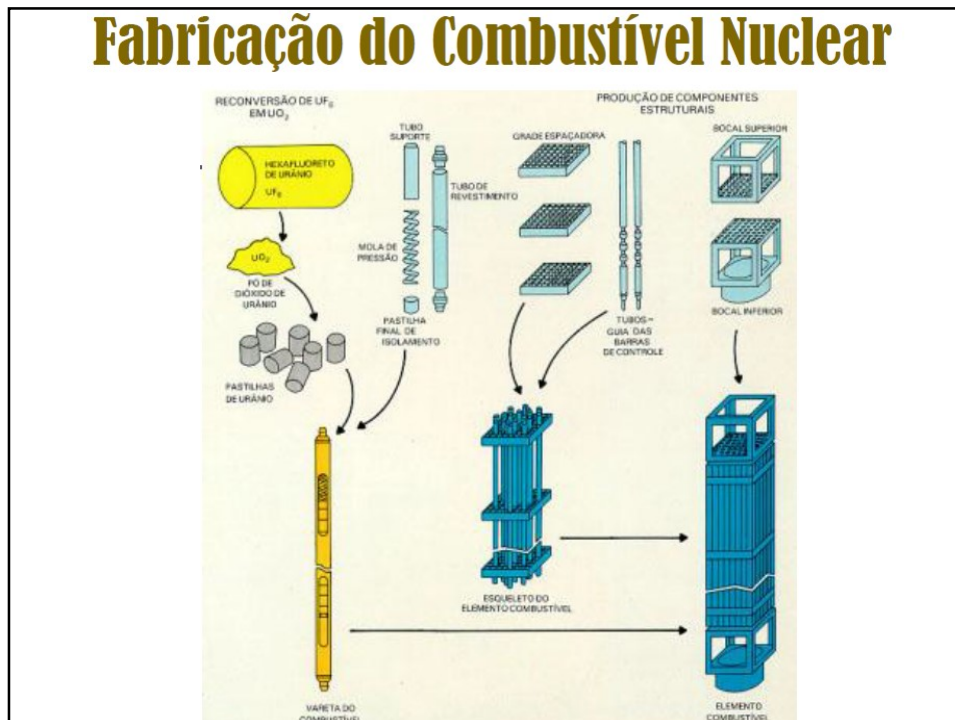
REATORES REFRIGERADO A H₂O FERVENTE (BWR)



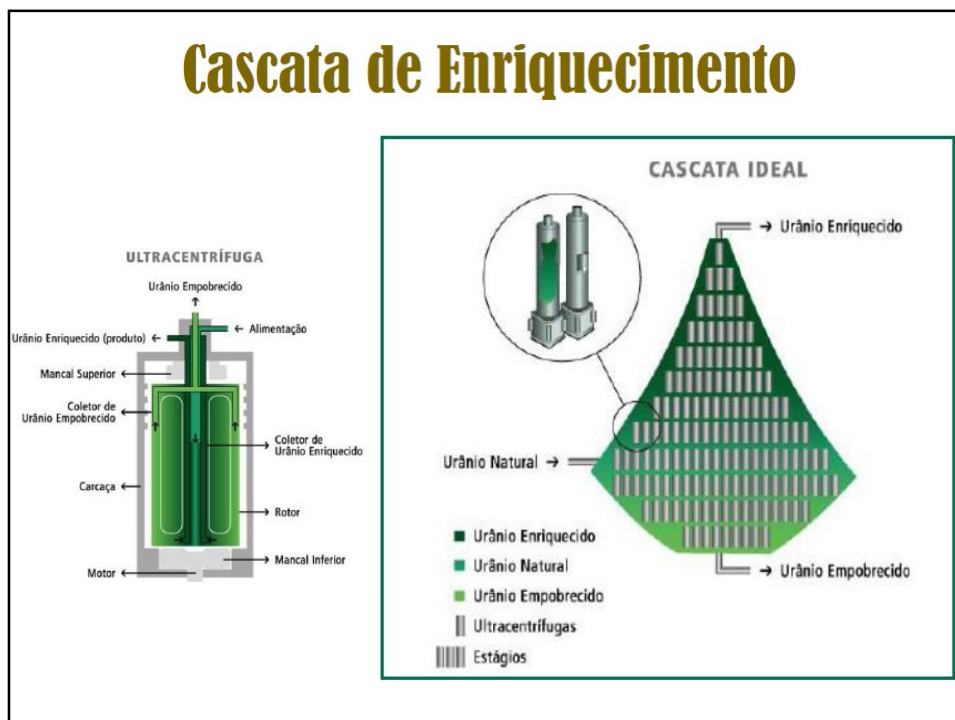
Esquema do Sistema de Recirculação do BWR

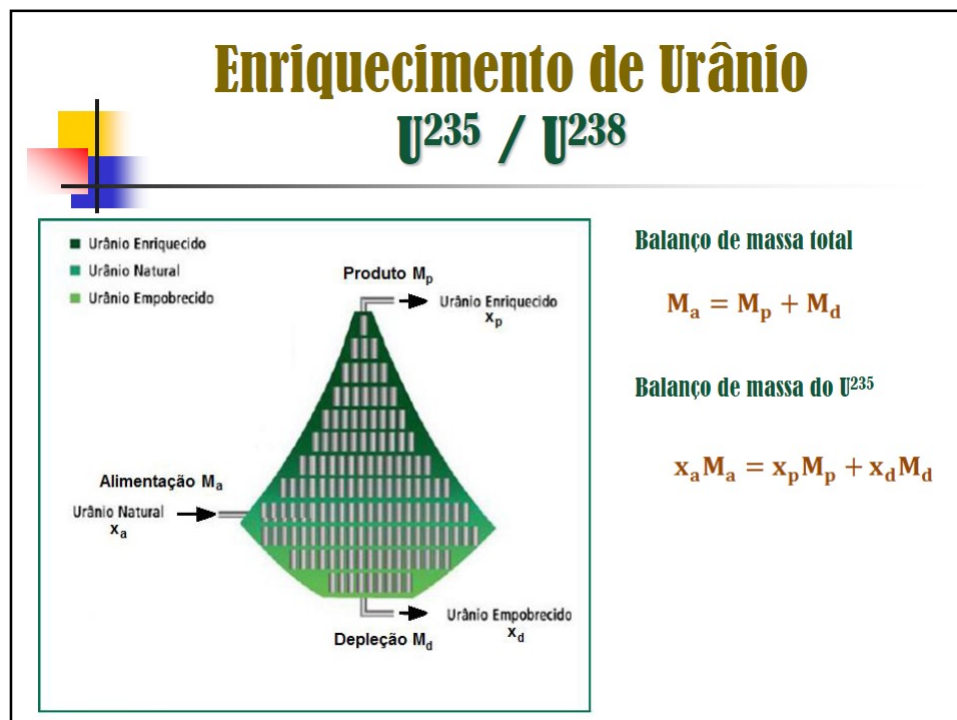
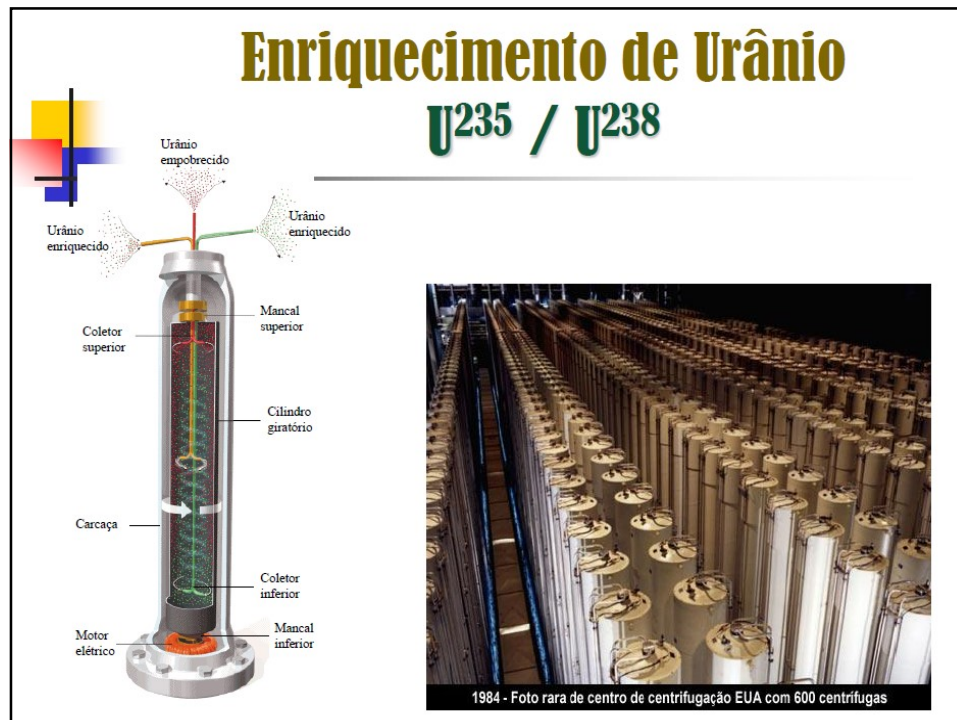


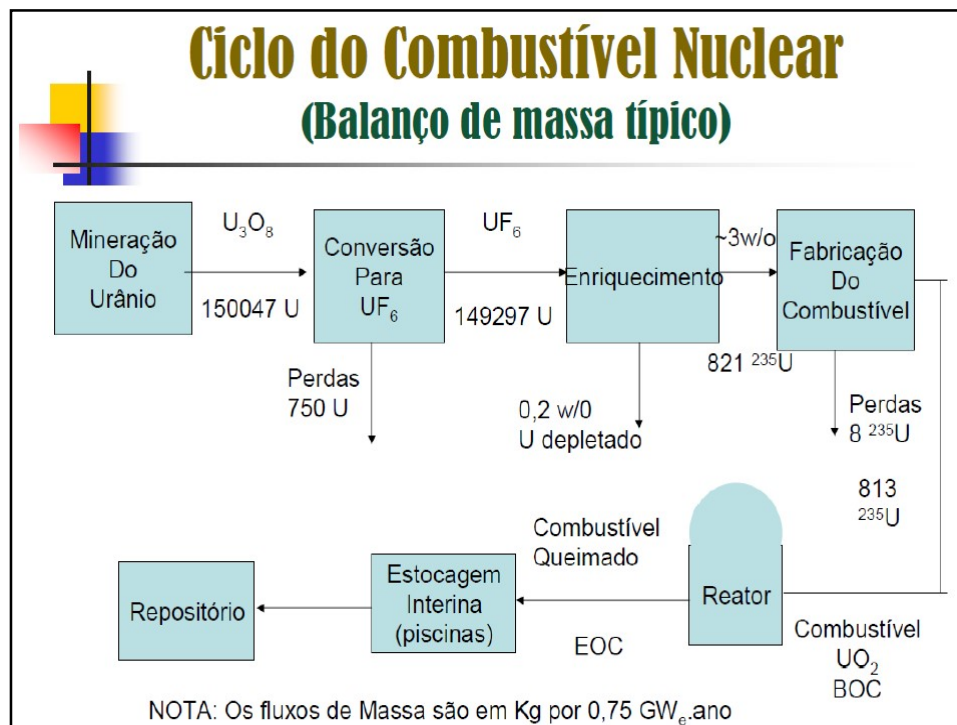
Fabricação do Combustível Nuclear



Cascata de Enriquecimento

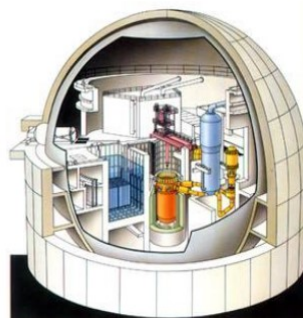






ENERGIA NUCLEAR

COMENTÁRIOS GERAIS



Equivalência Energética de Combustíveis



10 g de urânio 235



700 kg de óleo



1200 kg de carvão

Emissões de Centrais Térmicas

Emissão de CO₂ por kWh de energia elétrica gerada



Considerando emissão **TOTAL**, inclusive na fabricação do aço para construção dos equipamentos.

