

Instituto de Radioproteção e Dosimetria
Curso de Mestrado
Disciplina: Física das Radiações

Reatores Nucleares

Alunos:

Gabriel Fonseca da Silva Rezende

Luciano Santa Rita Oliveira

Marcela Tatiana Fernandes

Mauro Otto Cavalcanti Mello Filho

Sumário

- Introdução
- Fundamentação teórica
- Componentes e materiais principais de um reator nuclear
- Classificação dos reatores nucleares quanto ao refrigerante/moderador
 - Reatores a água leve: BWR e PWR
 - Reatores a água pesada: CANDU
 - Reatores refrigerados a gás: GCR (HTGR e PBGCR)
- Perspectivas tecnológicas

Introdução

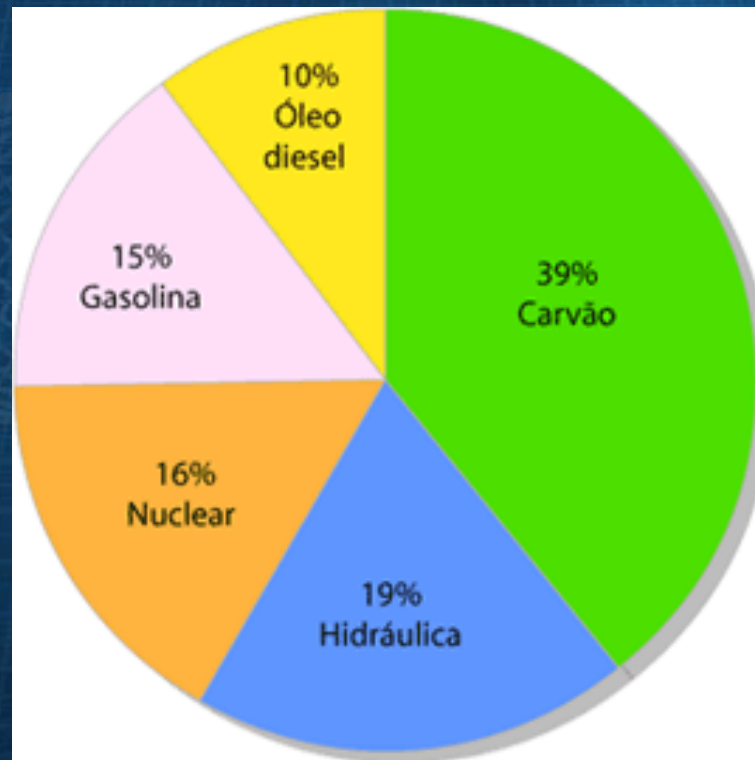
- Nos países industrializados, 24% da população mundial consome cerca de 72% da energia total primária produzida.
- A energia primária é obtida a partir de recursos naturais como madeira, carvão, petróleo, gás natural, urânio, vento, água e o sol.
- Até o século 19 a madeira era a principal fonte de energia primária e a partir da revolução industrial carvão petróleo e gás natural passaram a ser usados.
- Quando um combustível fóssil é queimado dá origem à água e dióxido de carbono e liberação de calor .

Introdução

- No século XX, a energia nuclear passou a integrar as fontes de energia primárias, inicialmente com propósitos militares e depois, na geração de eletricidade, propulsão naval e produção de radioisótopos e outras aplicações.
- Os reatores nucleares usam como princípio básico a fissão do núcleo de determinados isótopos do urânio e plutônio através de nêutrons com energias determinadas, gerando a cada fissão uma grande quantidade de energia (~ 200 MeV), produtos de fissão radioativos e nêutrons de altas energias.
- Como efeito da fissão de vários núcleos pode ser utilizada para várias finalidades - liberação de calor .

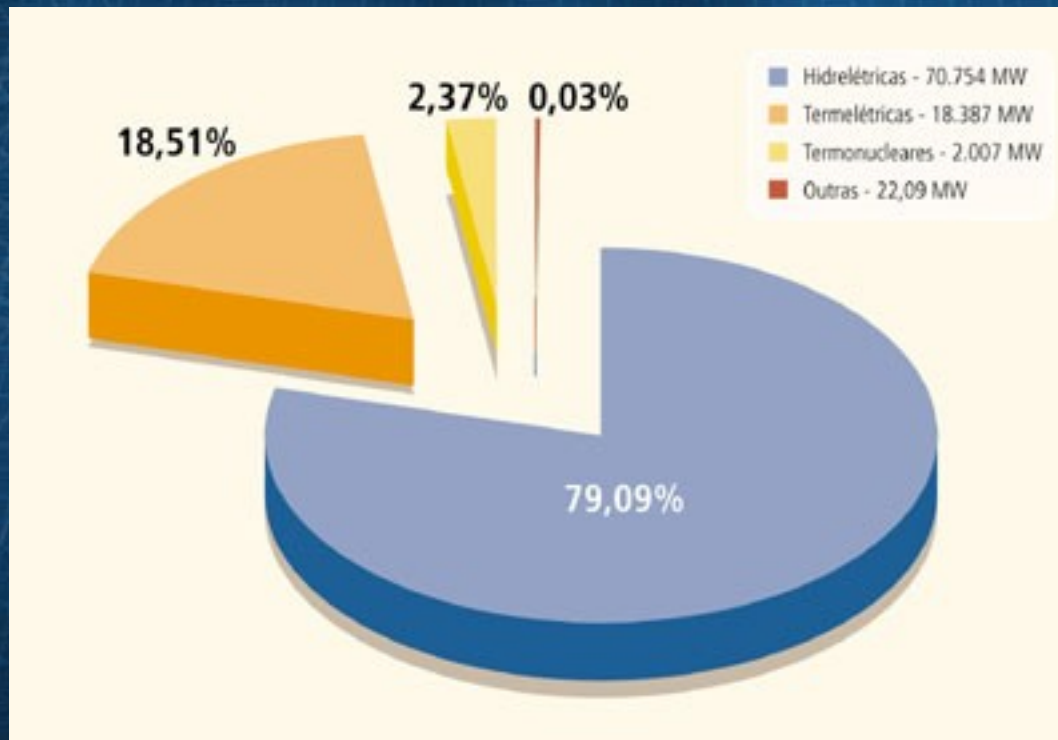
Introdução

- Produção de energia elétrica no mundo



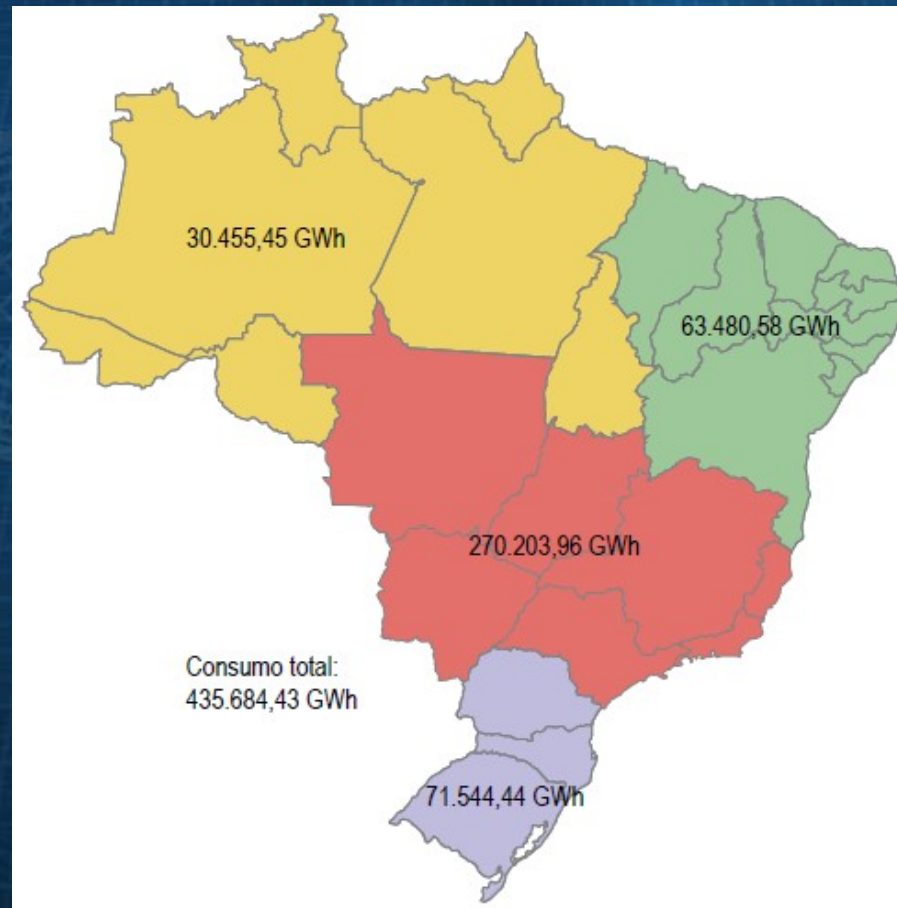
Introdução

- Geração de energia elétrica no Brasil (outubro 2003)



Introdução

- Consumo de energia elétrica no Brasil - 2007



Introdução

- O primeiro reator nuclear foi construído na Universidade de Chicago, sob a supervisão do físico italiano Enrico Fermi. O equipamento produziu uma reação em cadeia em 2 de dezembro de 1942.
- Existem 439 usinas nucleares ao redor do mundo, sendo 104 nos EUA. (*Reference data series n.2 – 2008 - IAEA*)
 - Na França 75% da eletricidade é gerada a partir da energia nuclear;
 - Nos EUA cerca de 23% da eletricidade total; e
 - No Brasil menos de 3% da energia gerada tem origem das usinas nucleares de Angra dos Reis.

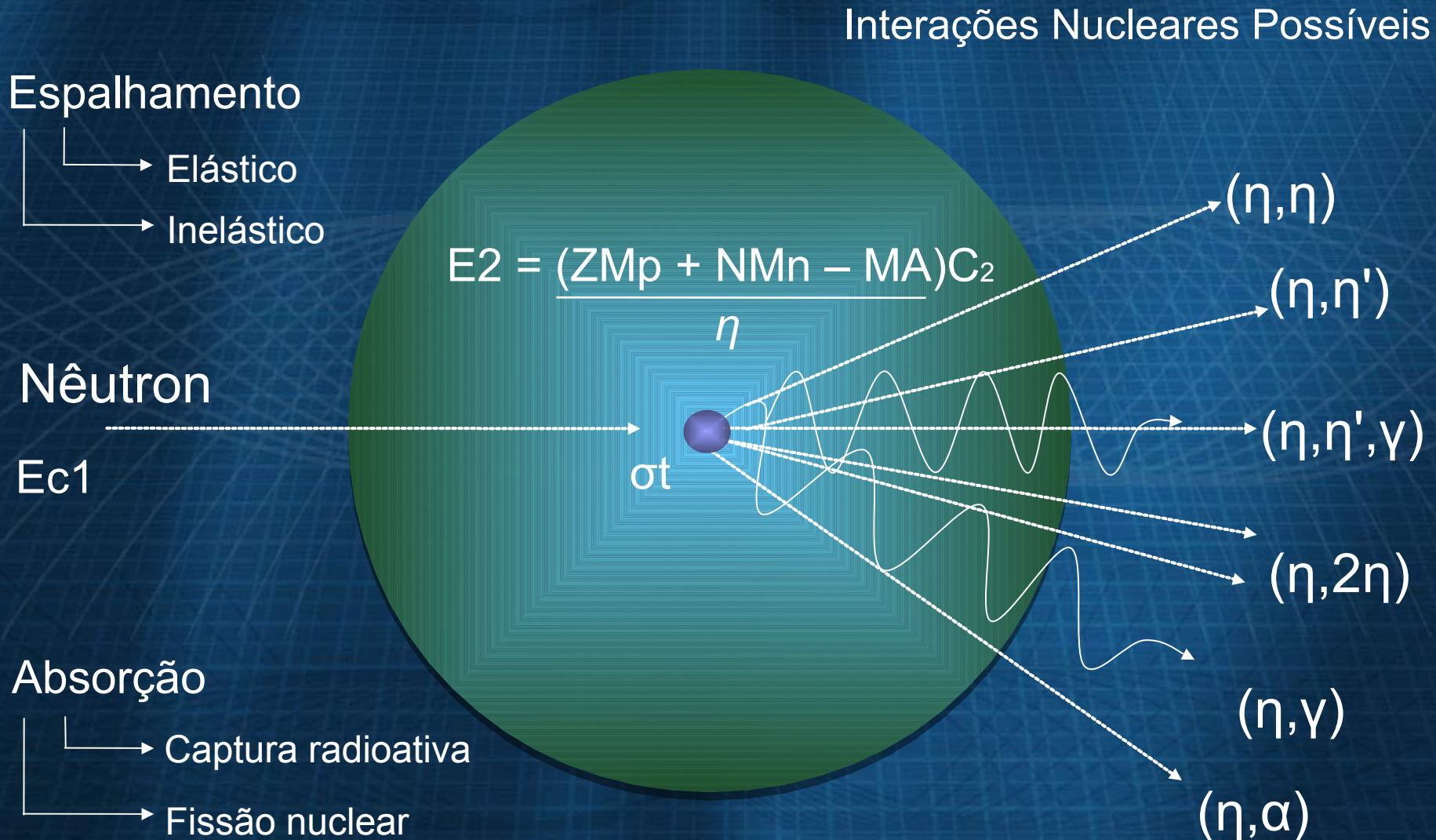
Introdução

- Dependência da energia nuclear

País	Produção por bilhões de KW	Fatia na produção energética dentro do país
Argentina	6,7	6,2 %
Armênia	2,35	43,5 %
Bélgica	46	54 %
Brasil	11,7	2,8 %
Bulgária	13,7	32 %
Canadá	88,2	14,7 %
China	59,3	1,9 %
República Tcheca	24,6	30,3%
Finlândia	22,5	29%
França	420,1	77%
Alemanha	133,2	26%
Hungria	13,9	37%
Índia	15,8	2,5%
Japão	267	27,5%
Coreia do Sul	136,6	35,3%
Lituânia	9,1	64,4%
México	9,95	4,6%
Holanda	4	4,1%
Paquistão	2,3	2,34%
Romênia	7,1	13%
Rússia	148	16%
Eslováquia	14,2	54%
Eslovênia	5,4	42%
África do Sul	12,6	5,5%
Espanha	52,7	17,4%
Suécia	64,3	46%
Suíça	26,5	43%
Ucrânia	87,2	48%
Reino Unido	57,5	15%
Estados Unidos	806,6	19,4%

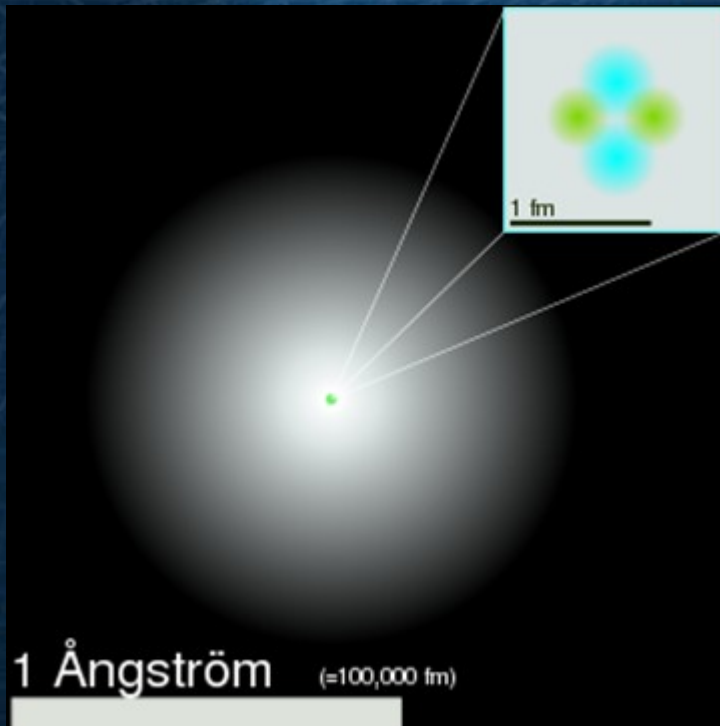
Fonte: World Nuclear Association

Interação dos Nêutrons com a Matéria



Seção de Choque para Nêutrons

A probabilidade de ocorrer uma reação nuclear é quantificada em termos das seções de choque, as quais representam a área alvo oferecida pelo núcleo para um nêutron incidente.



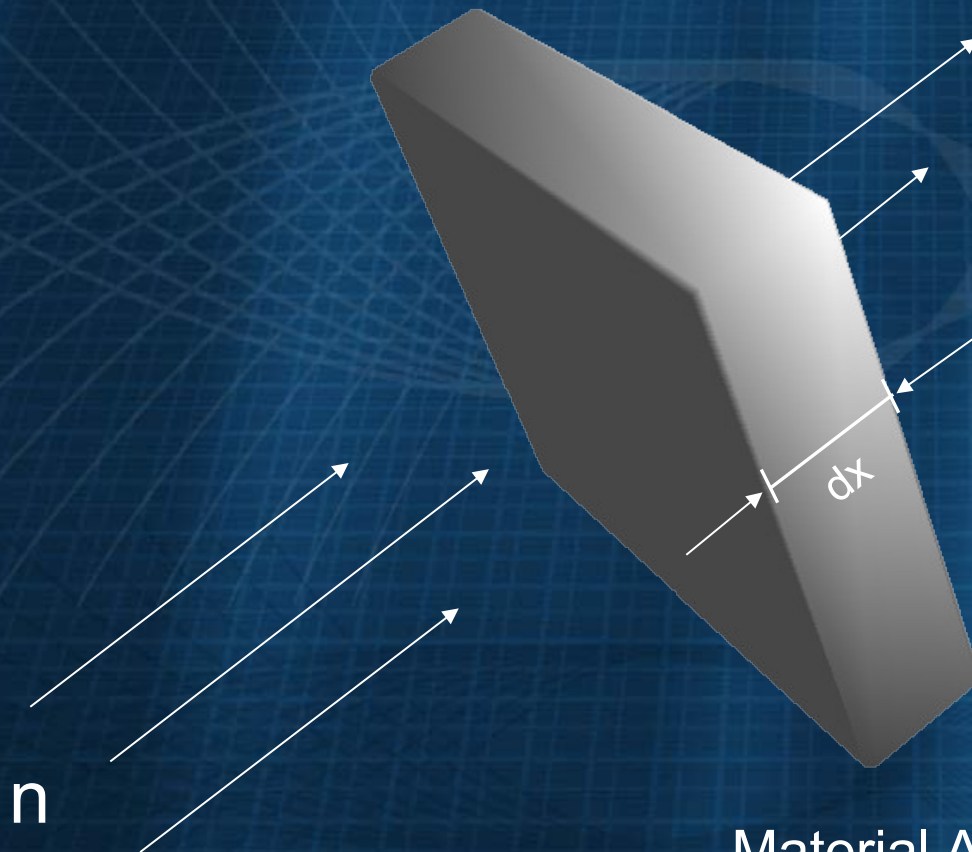
$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_e$$

Seção de Choque Macroscópica

$$\Sigma = N \cdot \sigma_t$$

Descrição Matemática da Interação

Supondo que um alvo de espessura dx seja colocado no trajeto de um feixe unidirecional de nêutrons com intensidade I_0 , temos:



$$- dI(x) = N \cdot \sigma \cdot I(x) \cdot dx$$

Integrando

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-N \cdot x \cdot \sigma}$$

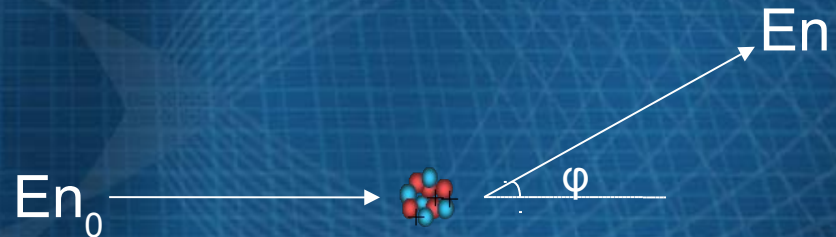
$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\Sigma \cdot x}$$

Termalização por Colisões Nucleares

A principal forma de interação dos nêutrons com a matéria é através do espalhamento, principalmente espalhamento elástico.

A quantidade de energia transferida pelo nêutron/colisão:

$$E_n = E_{n_0} \frac{A^2 + 2A \cdot \cos\varphi + 1}{(A + 1)^2}$$



Então, para determinar em média quantas colisões seriam necessárias para reduzir a energia de um nêutron de E_{n_0} para E_n

$$\bar{N} = (\ln E_{n_0} - \ln E_n) / \zeta$$

Classificação dos Nêutrons quanto à Energia

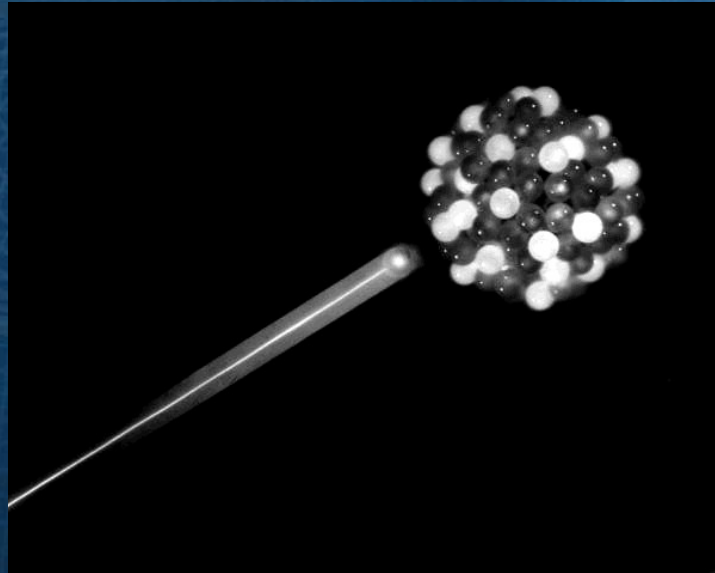
Os nêutrons podem ser produzidos numa ampla faixa de energias e com isso, podem ser separados por faixas energéticas:

- Térmicos $< 0,4 \text{ eV}$
- Epitérmicos $0,4 \text{ eV} - 100 \text{ keV}$
- Rápidos $> 100 \text{ keV}$

Vale ressaltar que a divisão dos nêutrons em grupos de energia é arbitrária.

Fissão Nuclear

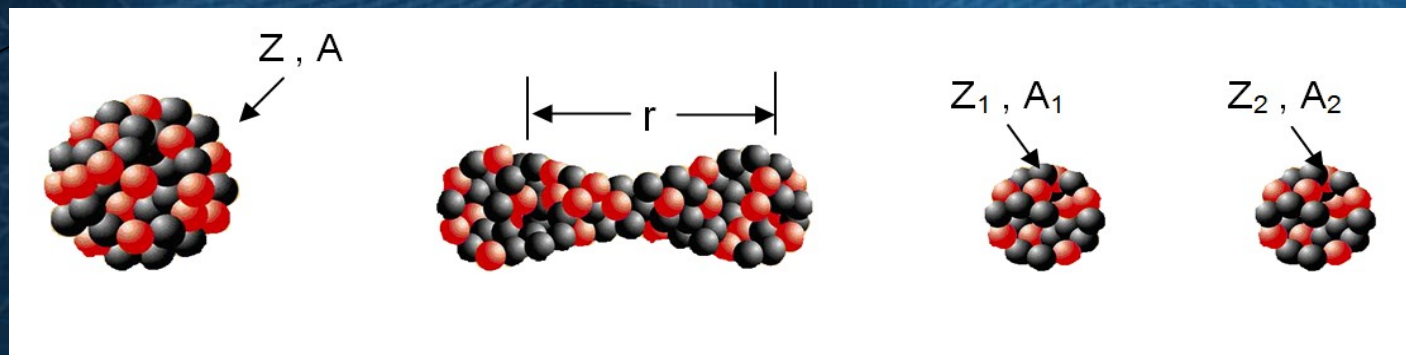
A fissão nuclear é o processo no qual um núcleo pesado se divide em dois (ou mais) fragmentos, durante esse processo há uma liberação considerável de energia e, também, ocorre a emissão de nêutrons e raios gama.



Um modelo adequado para explicar o mecanismo de fissão nuclear é o modelo da gota líquida.

Mecanismo de Fissão Nuclear

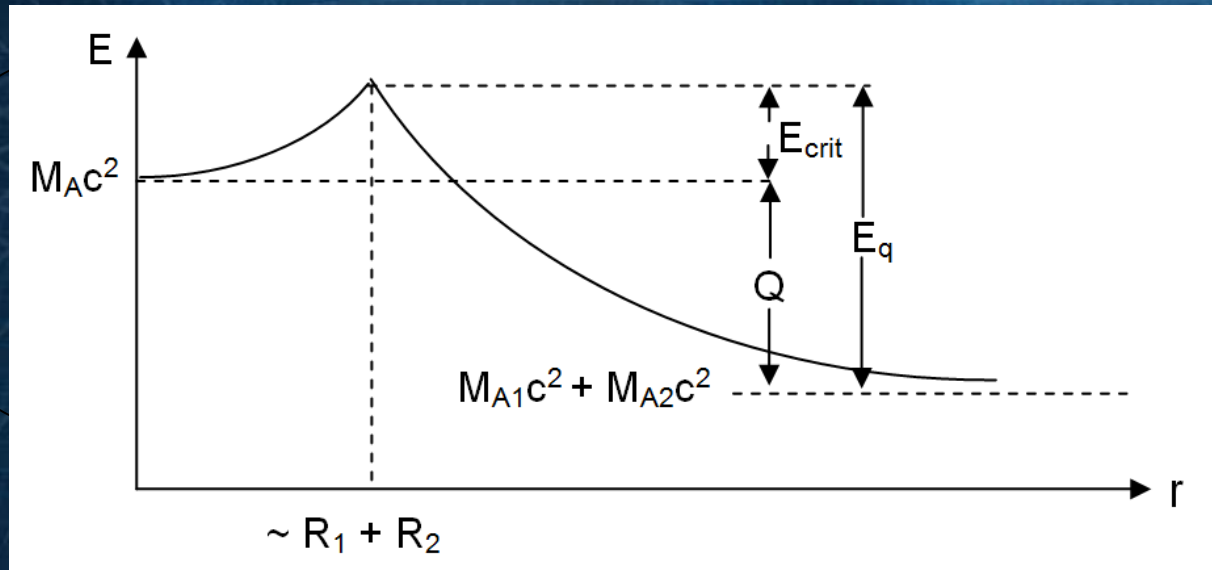
Para fins de simplificação, o estado inicial de um núcleo físsil Z_A será representado como uma esfera de raio R . No fim do processo de fissão, dois núcleos $Z_1 A_1$ e $Z_2 A_2$ são formados tendo raio R_1 e R_2



À esquerda podemos observar o estado inicial, à direita o estado final após a fissão e no meio o estado intermediário que representa uma série de deformações do núcleo que por fim resulta em um estrangulamento, culminando na fissão.

Mecanismo de Fissão Nuclear

Agora, será feita uma análise da energia potencial de um núcleo durante o processo de fissão em função da distância r entre os lobos do estrangulamento do núcleo.



$$E_{crit} = E_q - Q$$

Energia potencial de repulsão Coulombiana em função da separação r .

Mecanismo de Fissão Nuclear

A energia potencial de repulsão Coulombiana pode ser dada como:

$$E_q = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e_2}{R_1 + R_2}$$

onde

$$R = (r_e/2) \cdot A^{1/3}$$

$$r_e = e_2/mec^2$$


$$E_q = \frac{Z_1 Z_2 e_2}{(r_e/2) \cdot (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$$

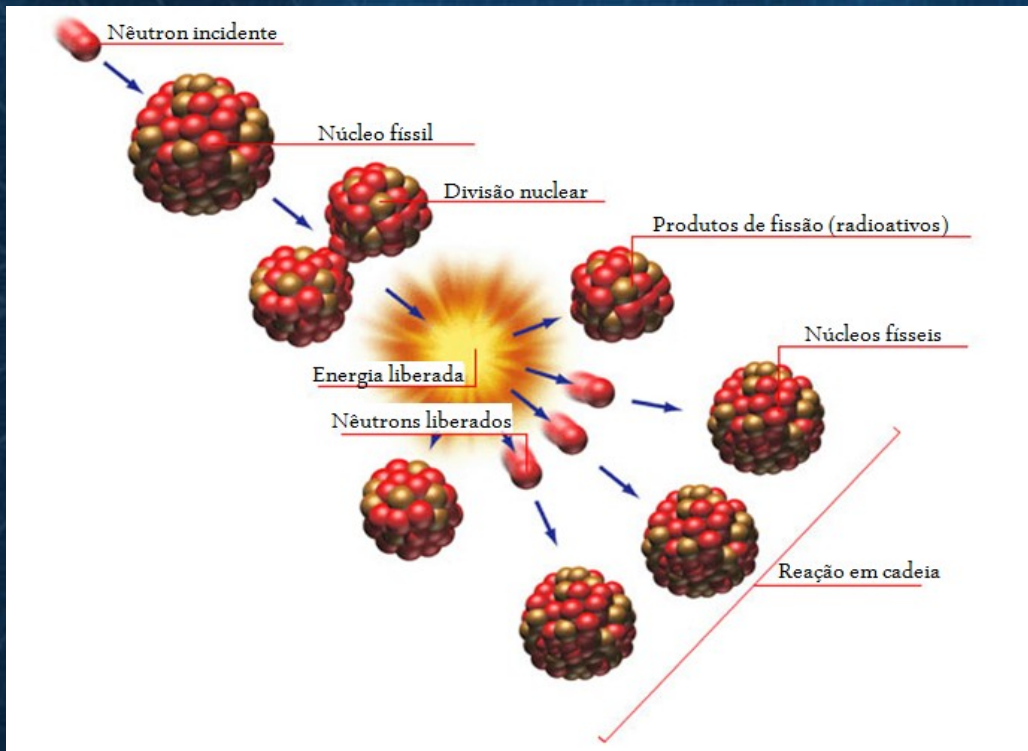
$$E_{crit} = E_q - Q$$


Experimental

Para fins práticos, a energia crítica representa um limiar real para a fissão, e qualquer método que fornecer essa energia é dito como indutor de fissão.

Reações Nucleares em Cadeia

A característica básica de um reator nuclear é a liberação de uma grande quantidade de energia para cada fissão que ocorre no núcleo do reator.

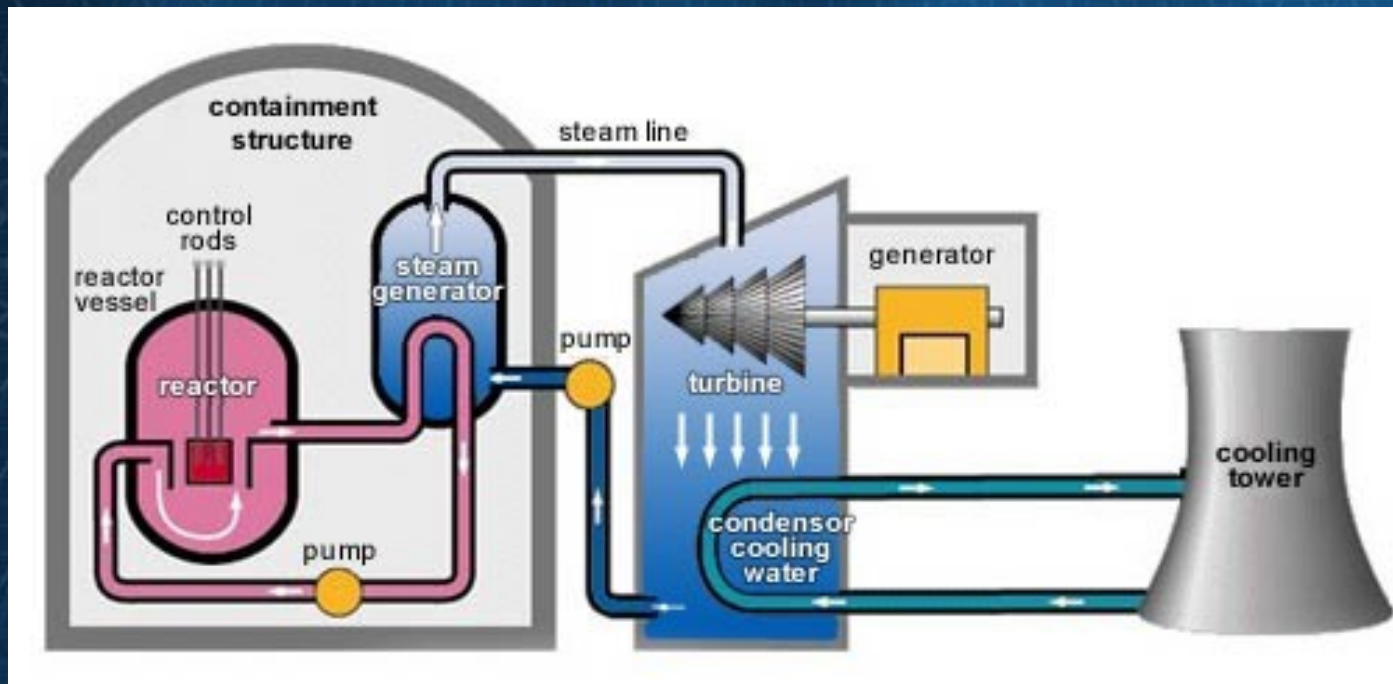


Eventos Possíveis

- (1) Escapar do material fissil;
- (2) Ser capturado e não causar fissão do material fissil;
- (3) Ser capturado e não causar fissão de impurezas não-físseis;
- (4) Ser capturado e causar fissão.

Em média, mais de 80% da energia liberada pela fissão é carregada pelos fragmentos de fissão sob a forma de energia cinética.

Componentes e materiais principais de um reator nuclear



Componentes e materiais principais de um reator nuclear

- Os reatores nucleares possuem uma estrutura básica comum que nos permite realizar uma classificação funcional e dos principais materiais utilizados. Esta estrutura básica é composta por:
 - Combustível nuclear
 - Moderadores
 - Refrigerantes
 - Absorvedores
 - Blindagem
 - Estruturas

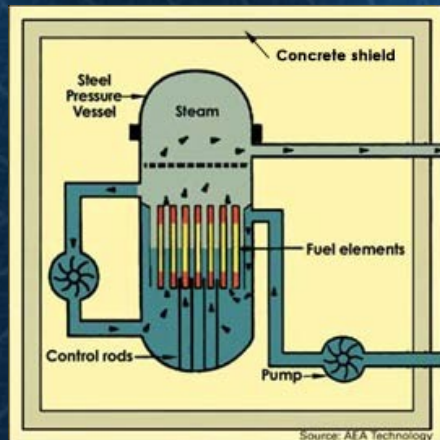
Componentes e materiais principais de um reator nuclear

- Combustível nuclear
 - tem a função de conter os elementos físséis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia. Ex: urânio, plutônio e tório;
- Moderadores
 - tem a função de moderar a energia dos nêutrons produzidos na fissão e também servem como refletores na periferia do núcleo do reator de forma a minimizar a fuga de nêutrons do núcleo. Ex: grafite, água leve, água pesada e berílio
- Refrigerantes
 - tem a função de retirar o calor gerado no núcleo do reator devido às fissões nucleares. Ex: hélio, CO₂, água leve, água pesada, metais líquidos (NaK, Na)

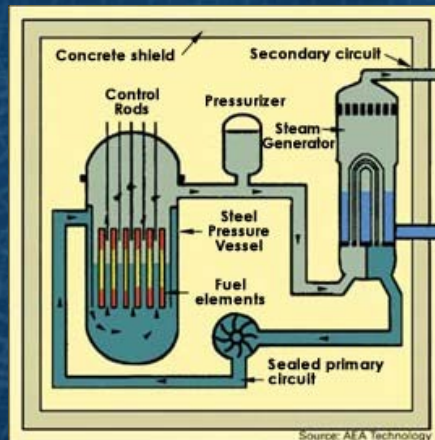
Componentes e materiais principais de um reator nuclear

- Absorvedores
 - tem a função de manter de forma controlada a reação em cadeia dentro do núcleo. Ex: boro, cádmio, hafnio, índio, prata, gadolínio;
- Blindagem
 - tem a função de servir de barreira para a radiação de forma a atenuar os efeitos desta sobre componentes estruturais ou o meio exterior ao reator. Ex: água leve, elementos de médio e alto número atômico (Pb, Fe, etc.)
- Estruturas
 - são todos os materiais utilizados como estrutura e revestimento dos diversos componentes do reator. Ex: zircaloy, aço, inox, ligas de níquel.

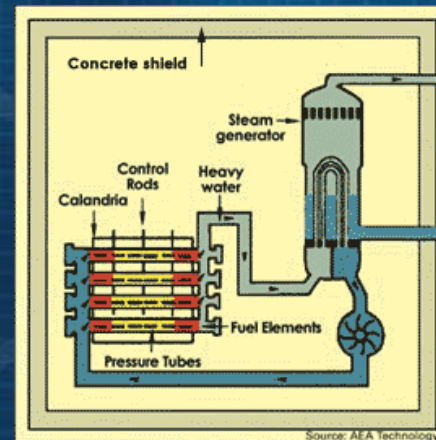
Classificação dos reatores nucleares quanto ao refrigerante/moderador



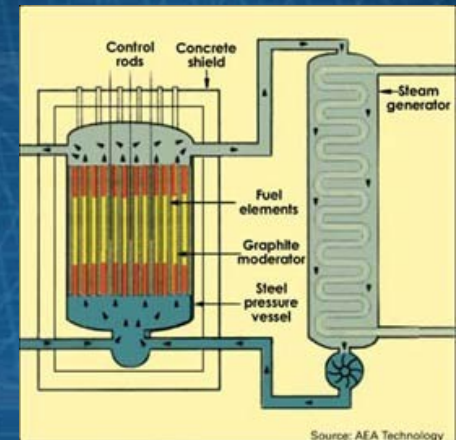
BWR



PWR



HWR - CANDU



GCR

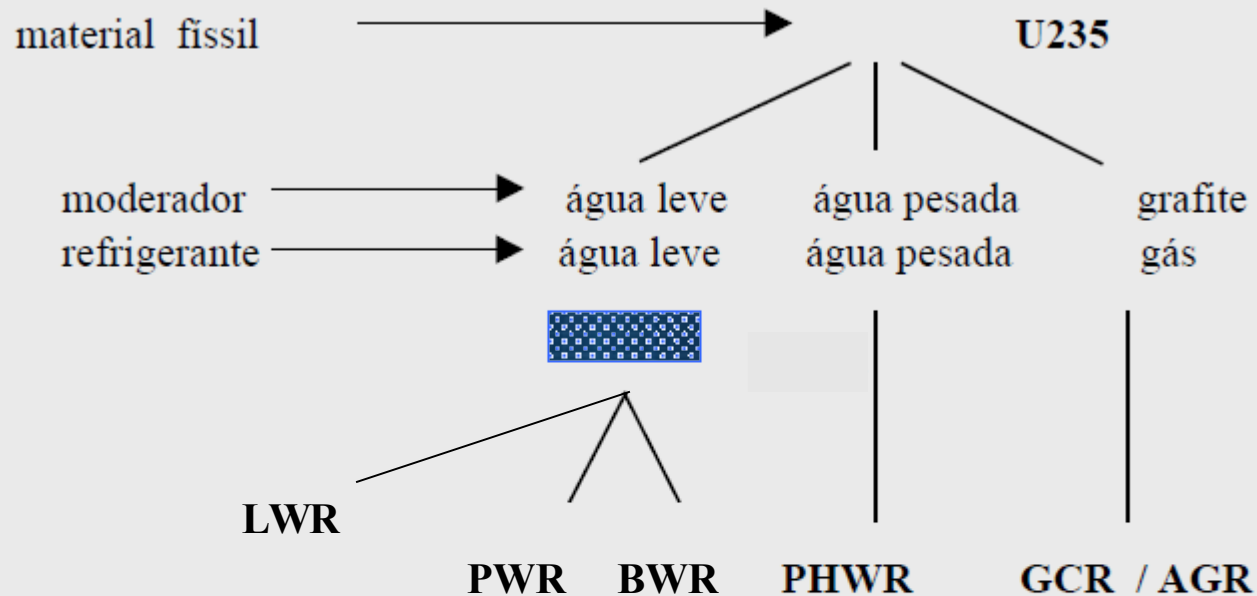
BWR

Reator de Água Fervente

1. Introdução
2. Descrição dos Principais Sistemas do BWR
3. Considerações Gerais



BWR – Reator de Água Fervente



LWR = Light-Water Reactor- Reatores refrigerados e moderados a Água Leve

PWR- Pressurized-Water Reactor- Reator a Água Pressurizada

BWR = Boiling-Water Reactor- Reator a Água Fervente

PHWR=Pressurized Heavy-Water Reactor- Reator a Água Pesada Pressurizada

GCR =Gas Cooled Reactor / AGR= Advanced Gas Cooled Reactor – Reatores Refrigerados a Gás

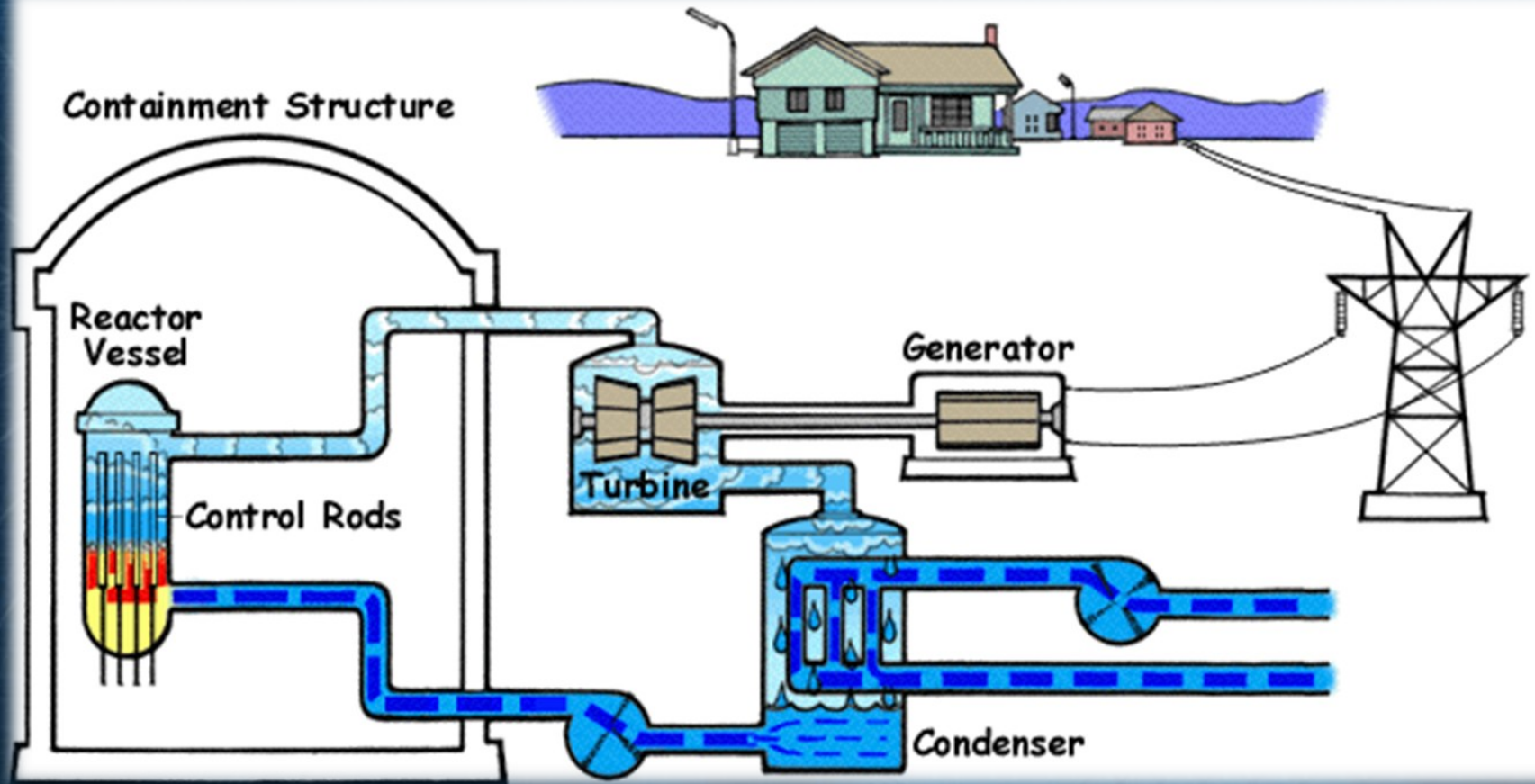
BWR – Reator de Água Fervente

Características Gerais

- 1) Projetado na década de 50 pelo Laboratório Nacional de Idaho nos EUA e pela General Eletric;
- 2) Atualmente a General Eletric é responsável pela sua concepção e construção;
- 3) Suas plantas em diferentes versões ocupam 2º lugar no ranking ;

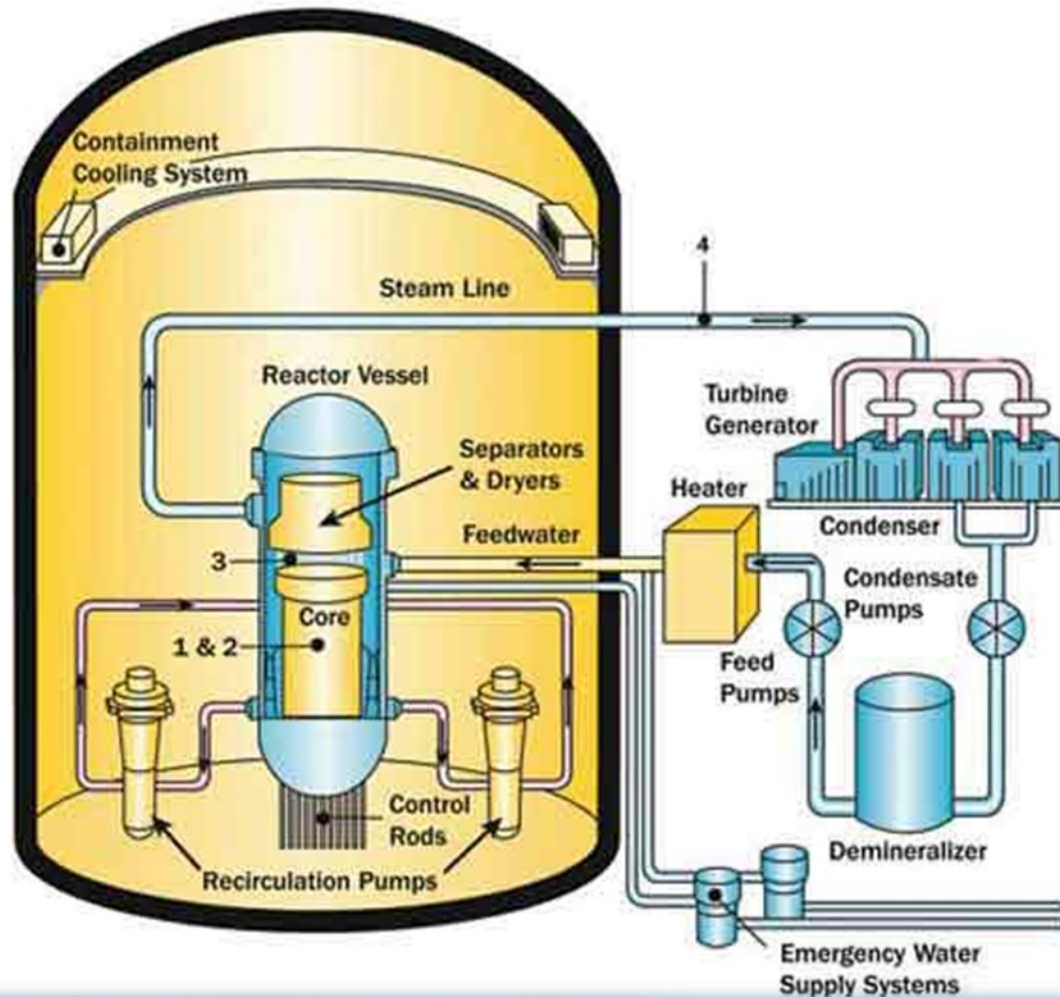
BWR – Reator de Água Fervente

Princípio de Funcionamento



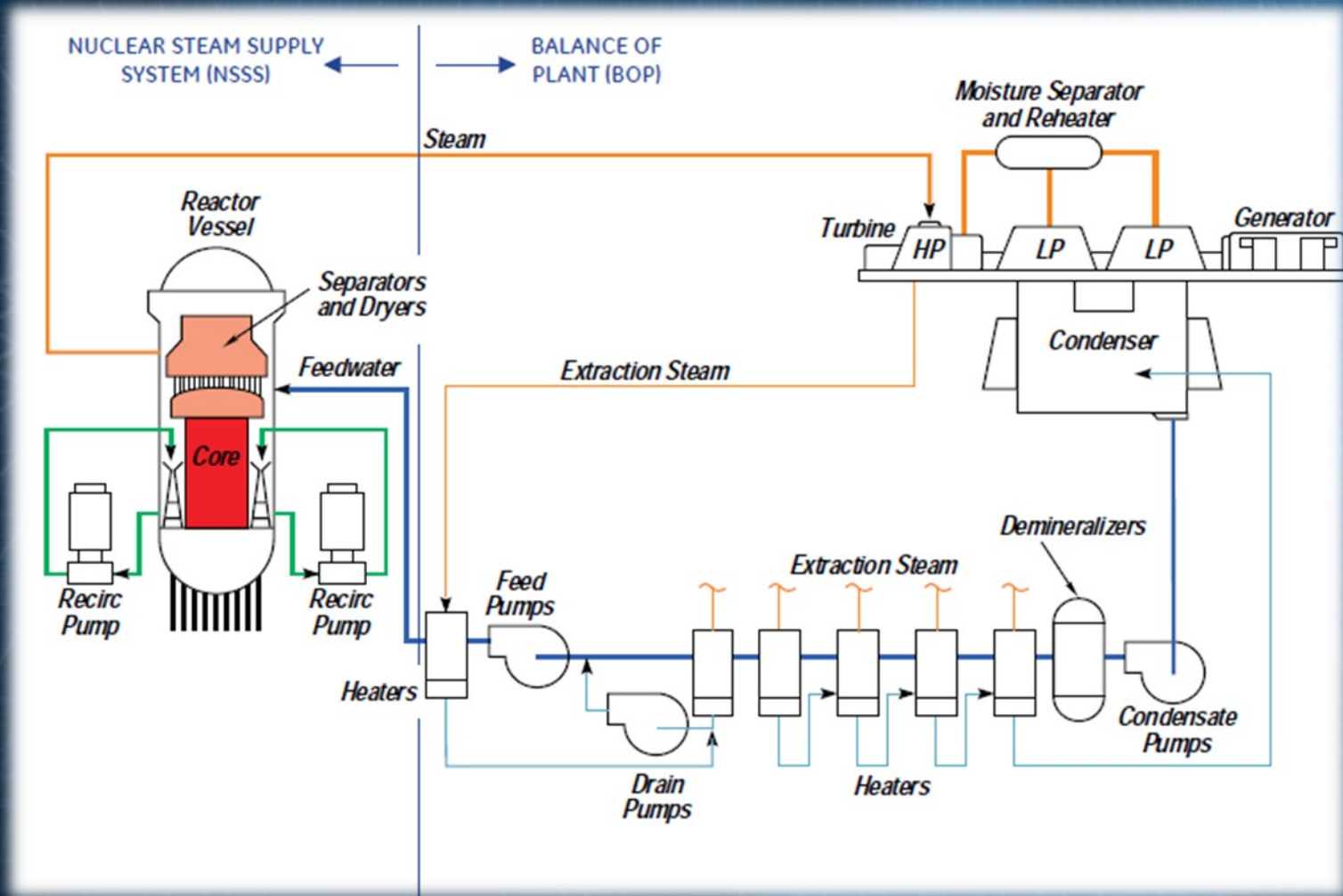
BWR – Reator de Água Fervente

Princípio de Funcionamento



BWR – Reator de Água Fervente

Ciclo de Energia do BWR



BWR – Reator de Água Fervente

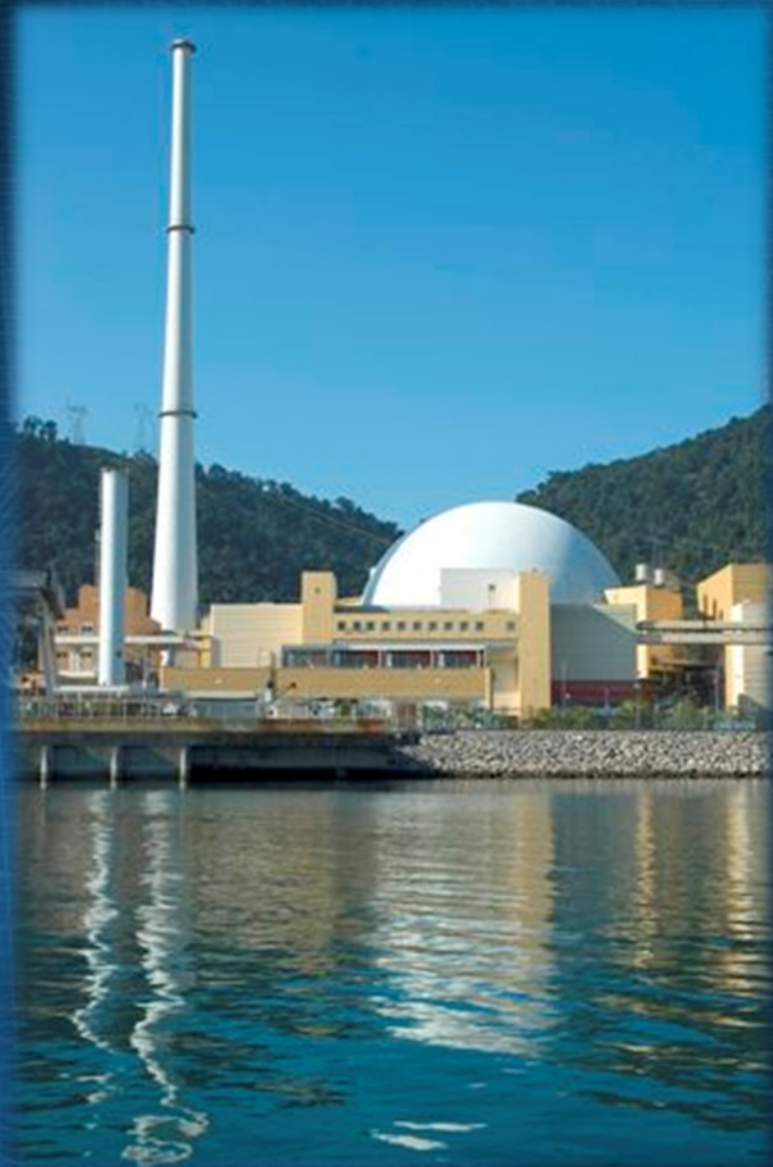
Considerações Gerais

1. **A água** é usada como refrigerante, moderador e fluido de trabalho, num único circuito;
2. **Vantagens:** eliminação do circuito secundário (mais barato), grande eficiência térmica, pressão de operação mais baixa que a do PWR (40 a 70 atm);
3. **Desvantagens:** As turbinas no processo ficam contaminadas, exigindo maior atenção quanto a proteção radiológica.



PWR -Reator de Água Pressurizada

1. Introdução
2. Descrição dos Principais Sistemas do PWR
3. Acidente **Nuclear em THREE MILES ISLAND**
4. Considerações Gerais



PWR - Reator de Água Pressurizada

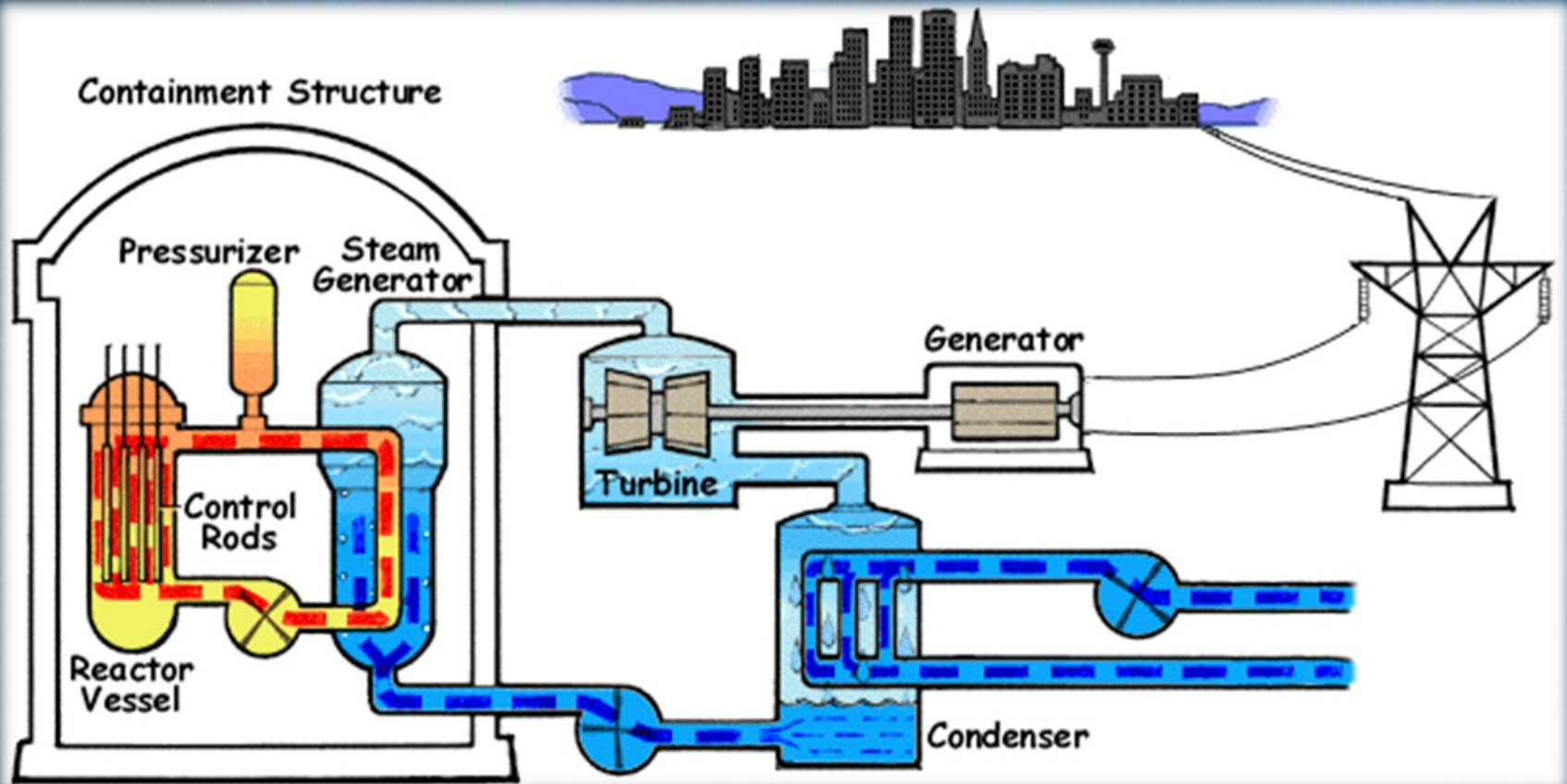
Características Gerais:

- Os PWRs foram desenvolvidos pela **Westinghouse**;
- Este é o tipo mais comum de reator nuclear de potência para a **produção de eletricidade** e propulsão naval;
- A água é utilizada como refrigerante, moderador e refletor **circuito primário** e como fluido de trabalho **circuito secundário**;
- As usinas brasileiras **Angra I** e **Angra II** e **Angra III**, são do tipo PWR.



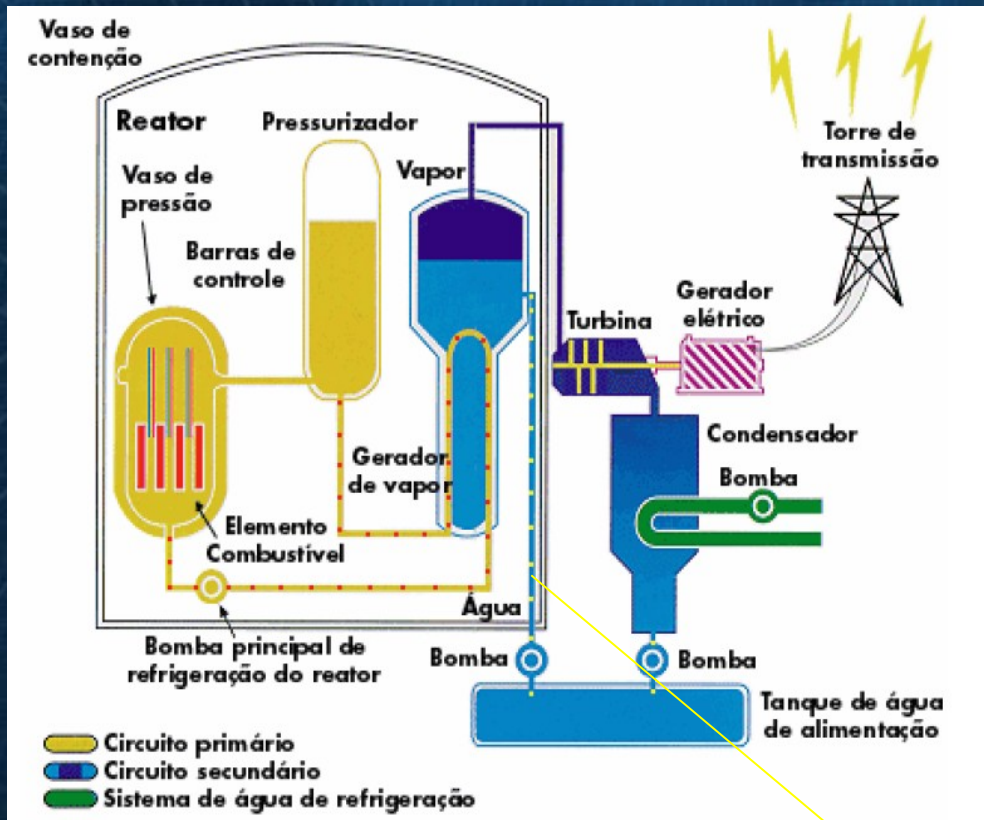
PWR - Reator de Água Pressurizada

Princípio de Funcionamento:



PWR - Reator de Água Pressurizada

Partes Principais do Sistema:



Circuito Primário:

1. Núcleo do Reator
2. Bomba de Refrigeração
3. Gerador de Vapor
4. Pressurizador
5. Vaso de Contenção

Circuito Secundário:

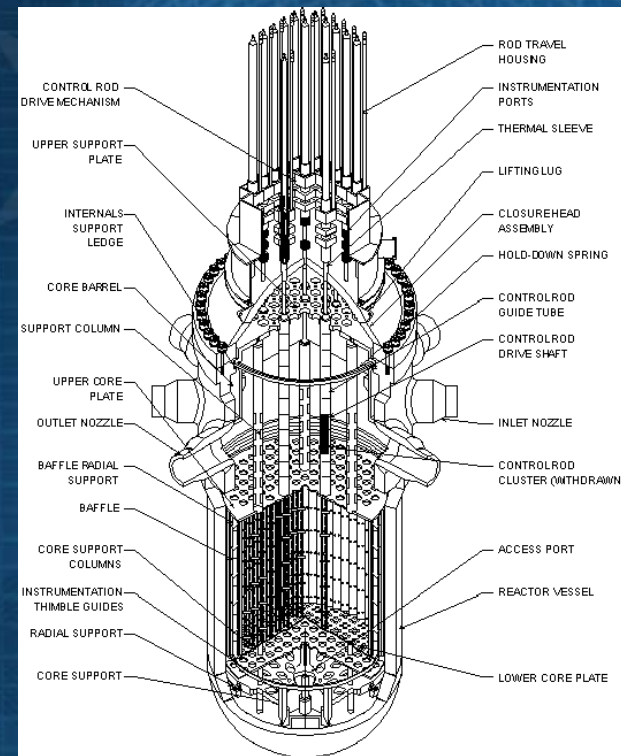
1. Bomba do Fluido de Trabalho
2. Turbina
3. Gerador Elétrico
4. Condensador

Água com Boro, Filtrada e Desmineralizada

PWR - Reator de Água Pressurizada

Sistema Básico PWR:

Vaso de Pressão

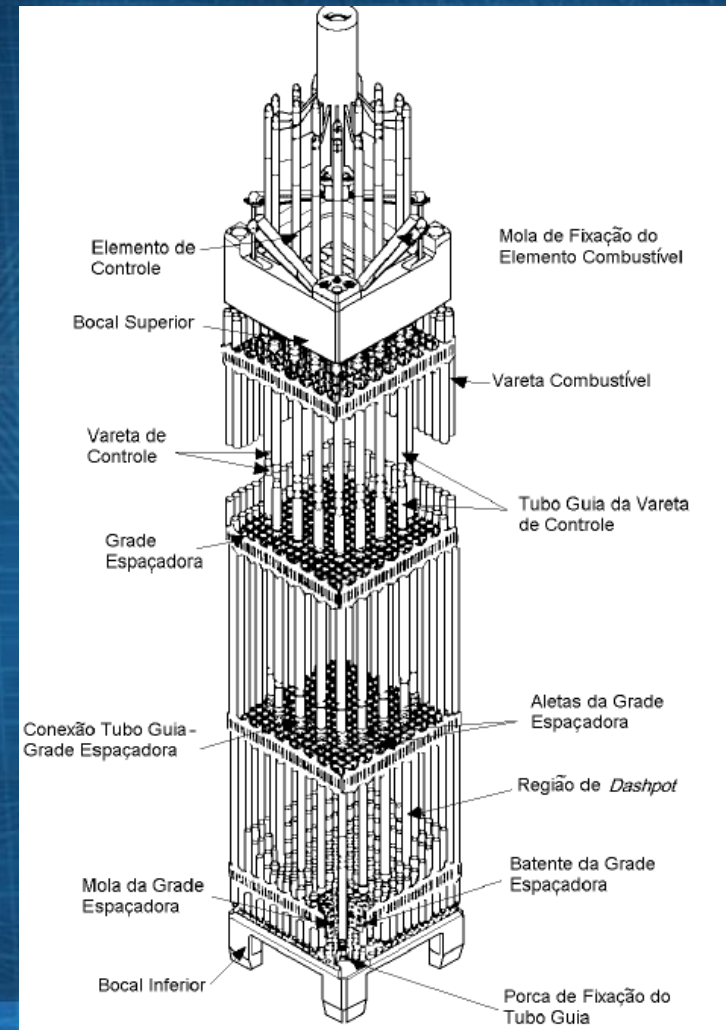


PWR - Reator de Água Pressurizada

Sistema Básico BWR:

Elemento Combustível

Os Elementos Combustíveis são formados pela combinação de 236 varetas combustíveis e 20 tubos guias para as varetas das barras de controle, dispostos todos em uma matriz 16x16. O Núcleo de um Reator PWR de 1300 MWe, como Angra 2, contém 193 Elementos Combustíveis (Angra 1 contém 121), arranjados da forma mais adequada para um vaso de pressão cilíndrico.



PWR - Reator de Água Pressurizada

Sistemas Auxiliares :

O Sistema de Controle Químico e Volumétrico para uma Usina Nuclear tipo Reator de Água Pressurizada – PWR, é o sistema auxiliar mais importante, sendo permanentemente necessário para a operação do reator.

Principais Funções:

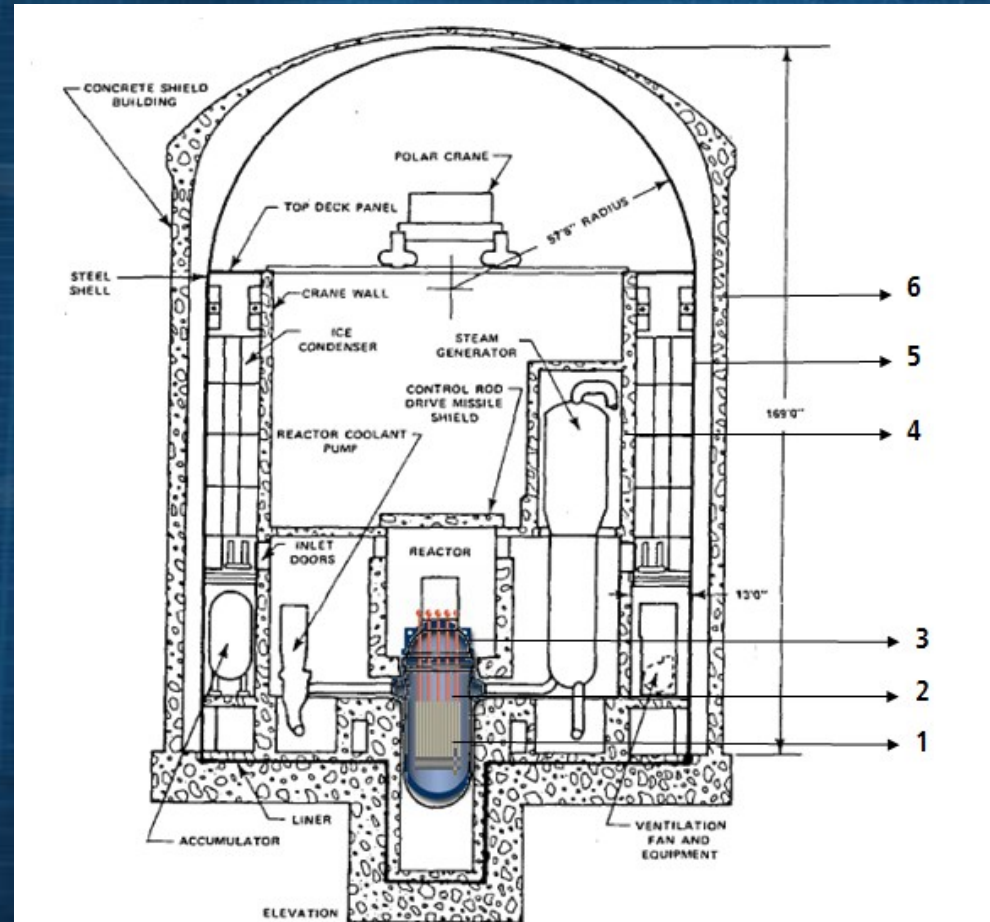
1. Enchimento do Sistema de Refrigeração do Reator;
2. Filtragem e purificação do refrigerante do reator através de um fluxo contínuo que é desviado para filtros e desmineralizadores;
3. Compensação de variações de volume do refrigerante do reator causadas por variações de densidade devida as variações de temperatura; Compensação de variações de volume devido a pequenos vazamentos no Sistema de Refrigeração do Reator;
4. Injeção de ácido bórico e água desmineralizada no Sistema de Refrigeração conforme a necessidade para o controle químico da reatividade e transferência do refrigerante substituído para os tanques de armazenamento;

PWR - Reator de Água Pressurizada

Sistemas de Segurança :

Filosofia dos Projetos Nucleares:

1. Zona de exclusão num raio de 1 Km
2. Zona Desabitada num Raio de até 10 Km da usina.
3. A partir de 10 Km podem existir moradias (baixa densidade)
4. A partir de 22 Km pode existir um centro populacional

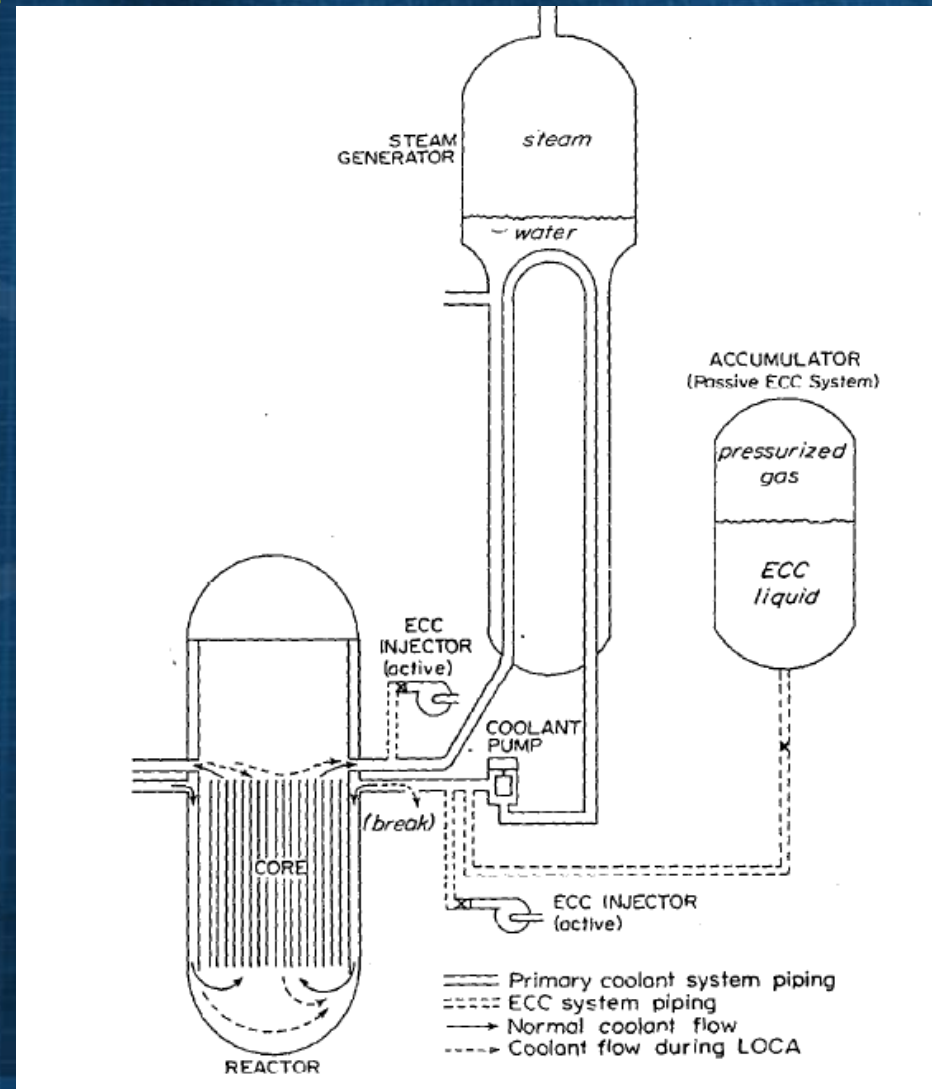


PWR - Reator de Água Pressurizada

Sistemas de Segurança :

Pontos Relevantes:

1. **LOCA** (Lost of Coolant Accident)
2. Sistema de Refrigeração
3. Sistema de Refrigeração de Emergência
 1. Injeção de Segurança
 2. Remoção do Calor Residual



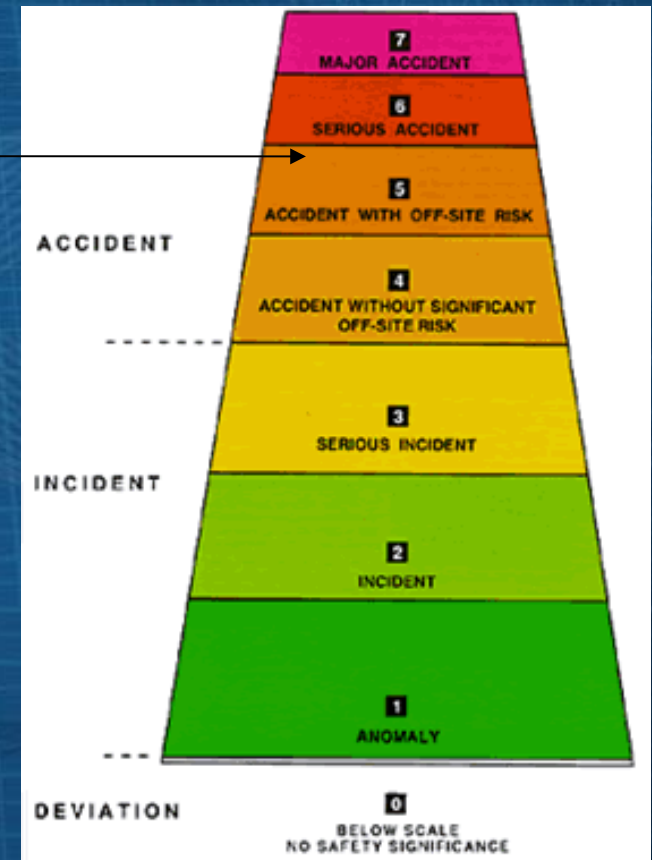
PWR - Reator de Água Pressurizada

ACIDENTE NUCLEAR EM THREE MILES ISLAND

O Acidente

Aconteceu em 28 de março de 1979. É considerado o segundo maior acidente nuclear mundial (em primeiro está Chernobyl). Segundo diversos relatórios oficiais, não foram detectados problemas de saúde como câncer ou questões relacionadas à genética, somente o estresse mental ao qual foi submetida a população. Nem em animais e plantas foram encontrados efeitos do acidente.

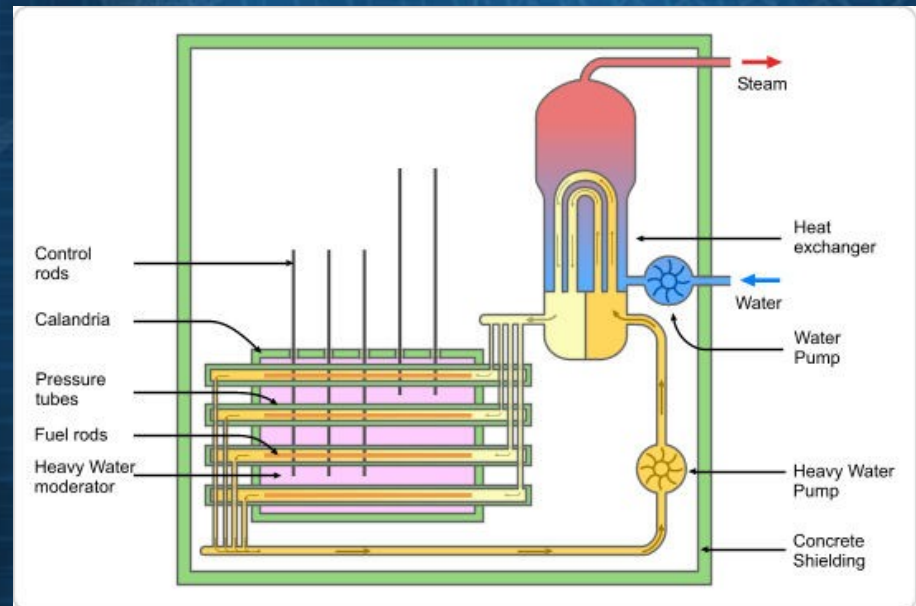
<http://pcs5006.blogspot.com/2005/11/acidente-em-three-miles-islands.html>



ESCALA DE AVALIAÇÃO DE
EVENTOS NUCLEARES - INES

HWR/CANDU - Reator de Água Pesada

1. Introdução
2. Descrição geral dos principais sistemas
3. Considerações gerais

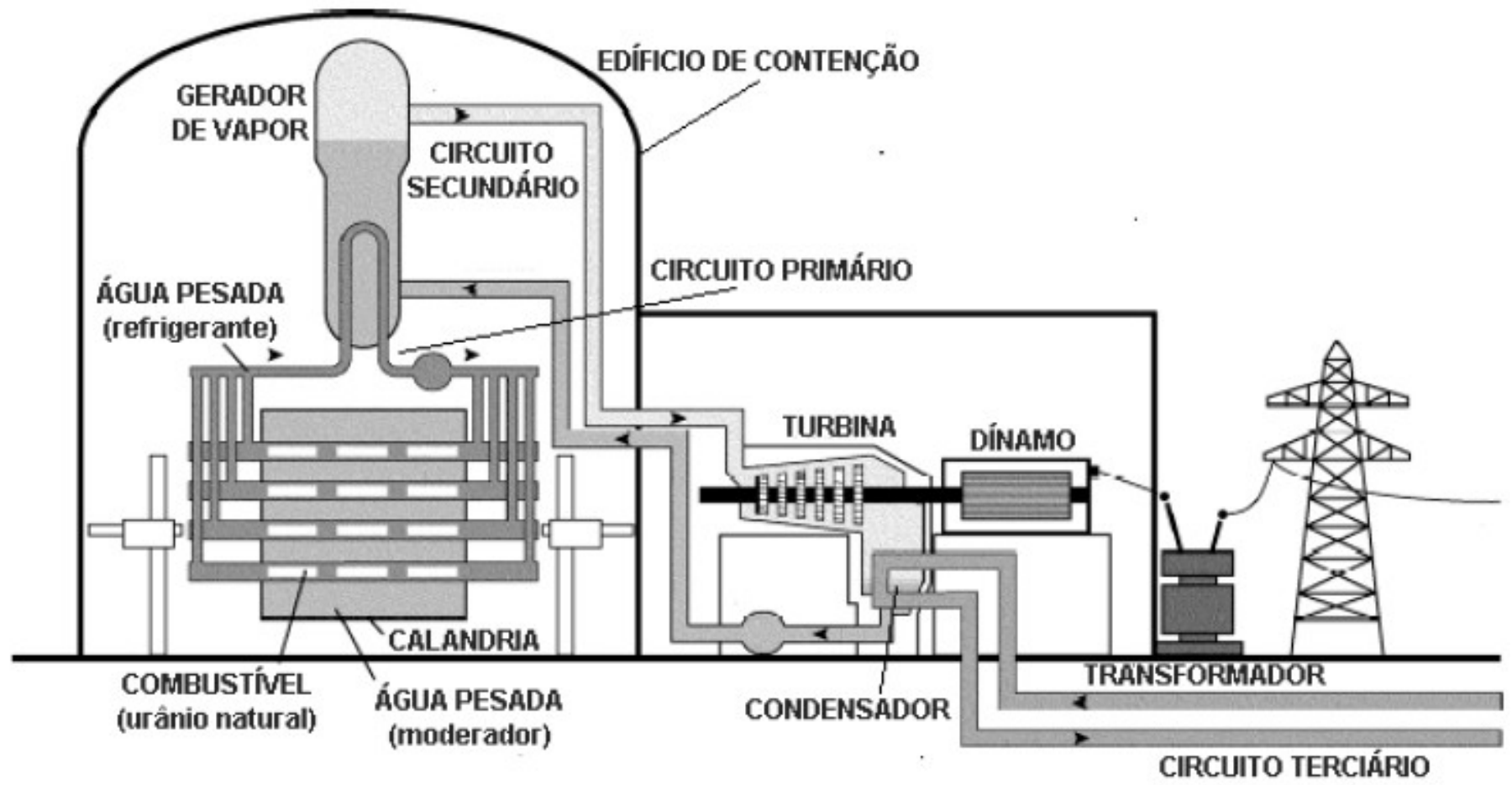


HWR/ CANDU – Reatores de água pesada

- **Características gerais**

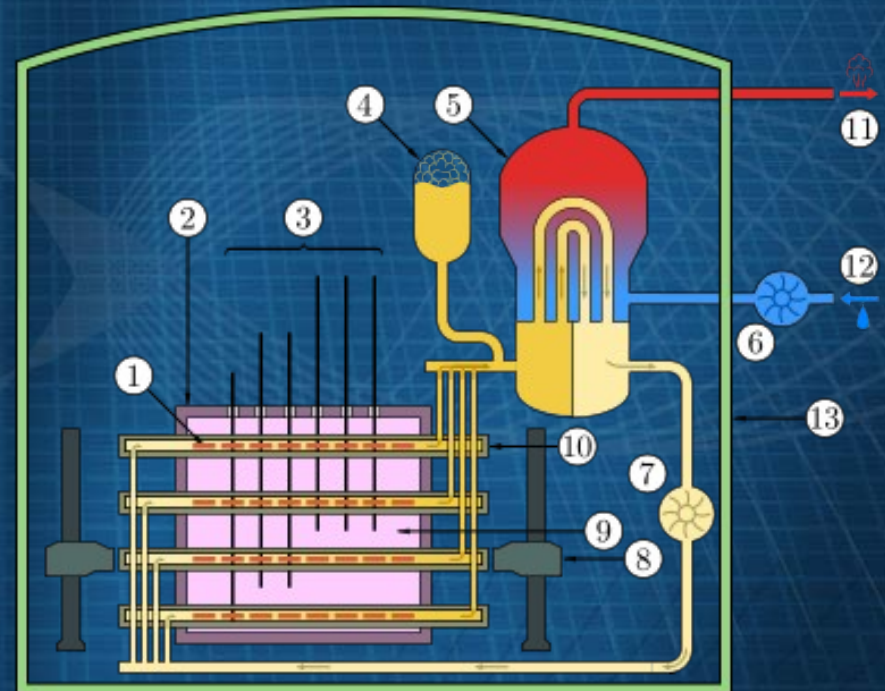
- CANDU – **C**anada **D**euterium **U**ranium
- Utiliza D₂O como refrigerante e moderador;
- Não possui vaso de pressão e sim uma Calandria;
- Possui o controle independente dos canais de elementos combustíveis;
- Utiliza urânio natural como elemento combustível;
- Permite a troca dos elementos combustíveis sem haver uma parada do reator.

HWR/ CANDU – Reatores de água pesada



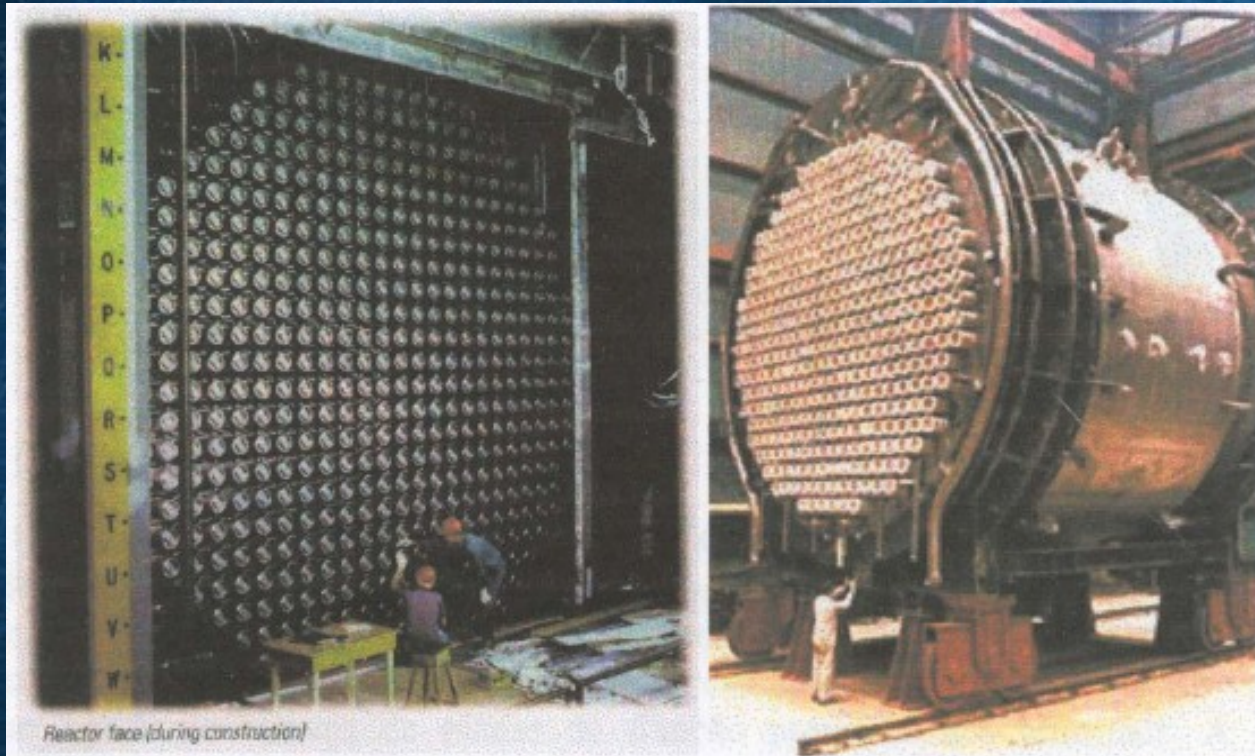
HWR/ CANDU – Reactores de água pesada

1. Elemento combustível
2. Calandria
3. Barras de controle
4. Pressurizador
5. Gerador de vapor
6. Bomba de água leve
7. Bomba de água pesada
8. Maquinas de movimentação do elemento combustível
9. Moderador a água pesada
10. Tubos de pressão
11. Sistema secundário - vapor
12. Sistema secundário – água
13. Prédio de contenção



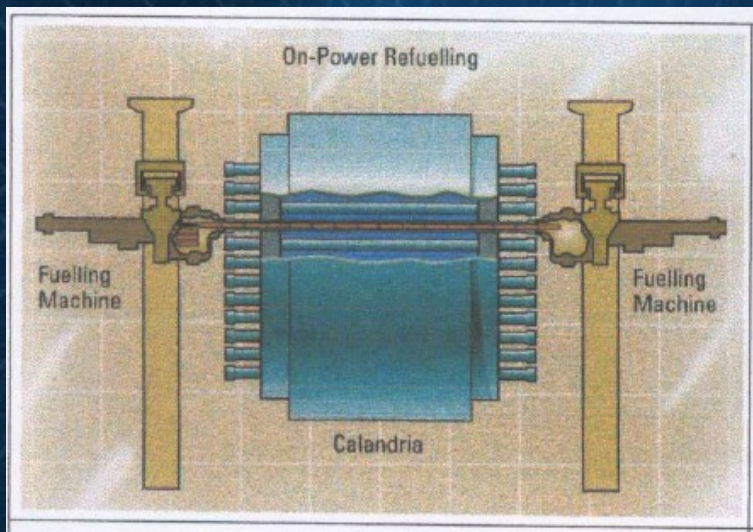
HWR/ CANDU – Reatores de água pesada

- Núcleo do reator - Calandria



HWR/ CANDU – Reactores de água pesada

- Núcleo do reator - Calandria



- Elemento combustível U natural, menores e mais simples que os PWR;
- Reabastecimento on-line, não há necessidade de parada do reator para troca EC;
- Sistema primário – D_2O ;
- Sistema secundário – H_2O ;
- Moderador – D_2O ;

HWR/ CANDU – Reatores de água pesada

- **Considerações gerais**

- Vantagens

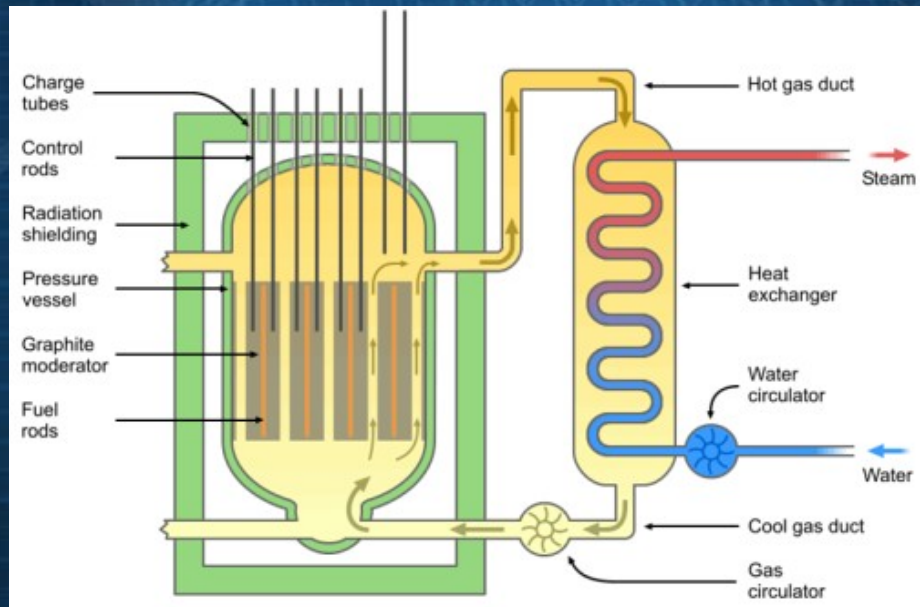
- Utilização de urânio natural;
 - Atende a salvaguardas contra a proliferação nuclear;
 - Não utiliza vaso de pressão;
 - Não necessita de enriquecimento de combustível.

- Desvantagens

- Domínio da tecnologia de produção de água pesada;
 - Alto custo da água pesada;
 - Eficiência térmica menor que a maioria dos PWR.

GCR - Reator refrigerado a gás

1. Introdução
2. Descrição geral dos principais sistemas
3. Considerações gerais



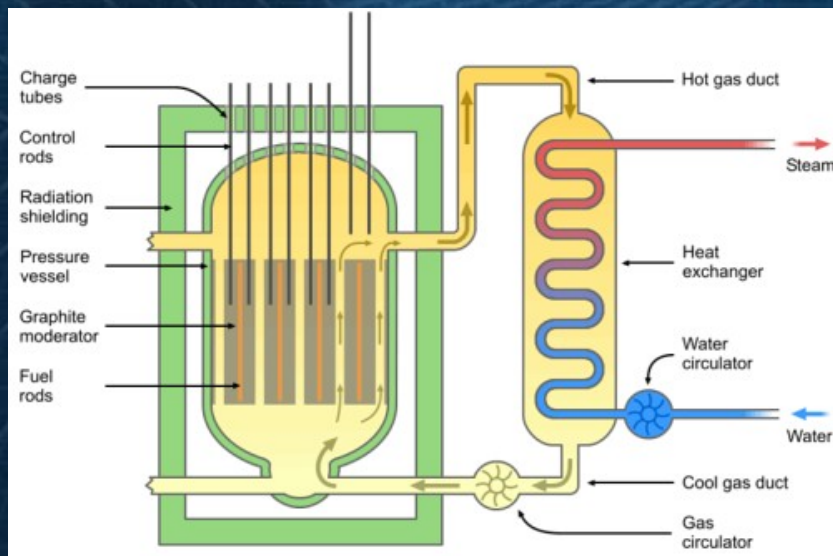
GCR – Reatores refrigerados a gás

- **Características gerais**

- Utiliza grafite como moderador;
- Utiliza CO_2 e He como refrigerante;
- Em sua concepção original (GCR) utilizava urânio natural como combustível;
- O HTGR e o PBGCR usam UO_2 enriquecido como elemento combustível;
- Elemento combustível em forma de micro esferas, com encapsulamento cerâmico.

GCR – Reatores refrigerados a gás

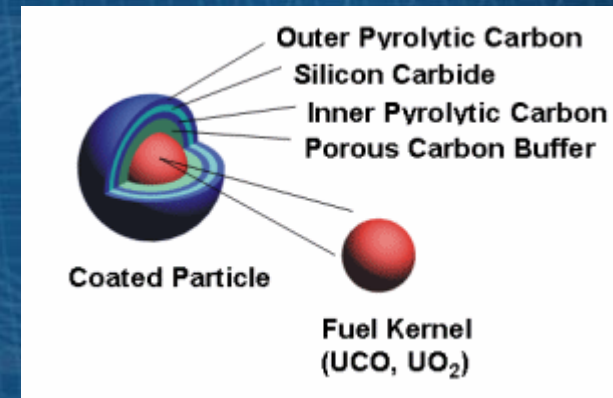
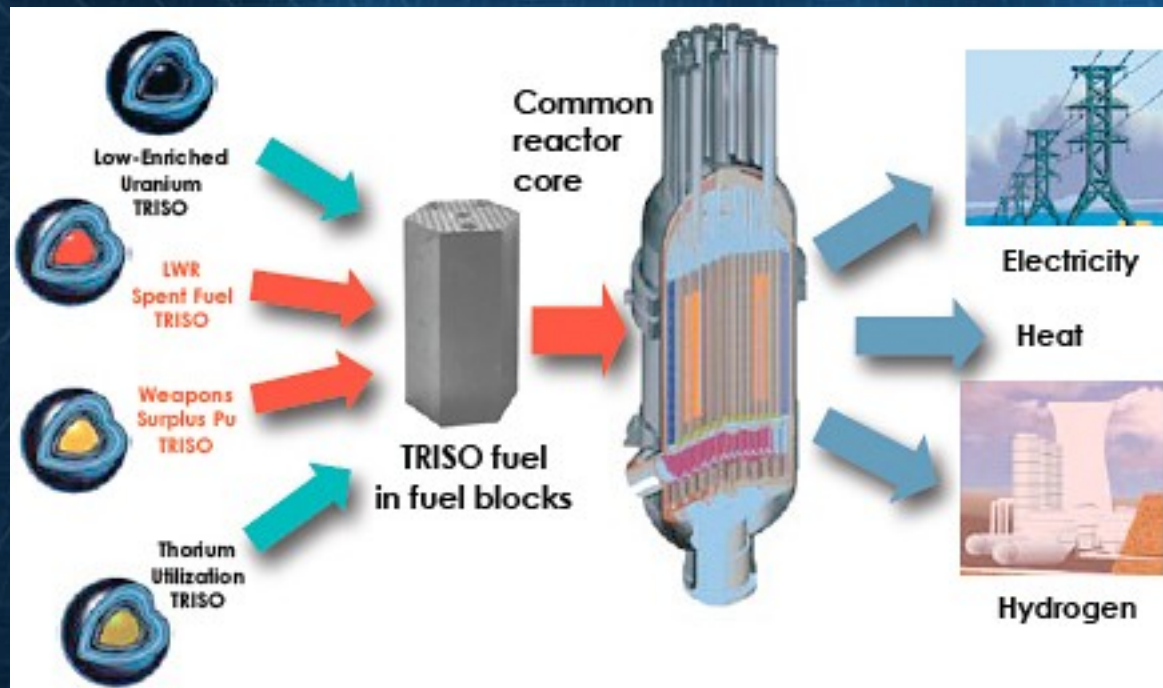
- HTGR – Reator de alta temperatura refrigerado a gás



- Elemento combustível na forma de dióxido ou carbeto altamente enriquecido na forma de micro esferas;
- As microesferas (cerca de 1mm) são agregadas a um cilindro de grafite que se torna o elemento combustível, sendo montadas numa matriz fixa de blocos de grafite;
- O núcleo do HTGR consiste em uma enorme pilha de blocos hexagonais de grafite, cada um contendo regiões de combustíveis, e também furos para a passagem do gás hélio pressurizado.

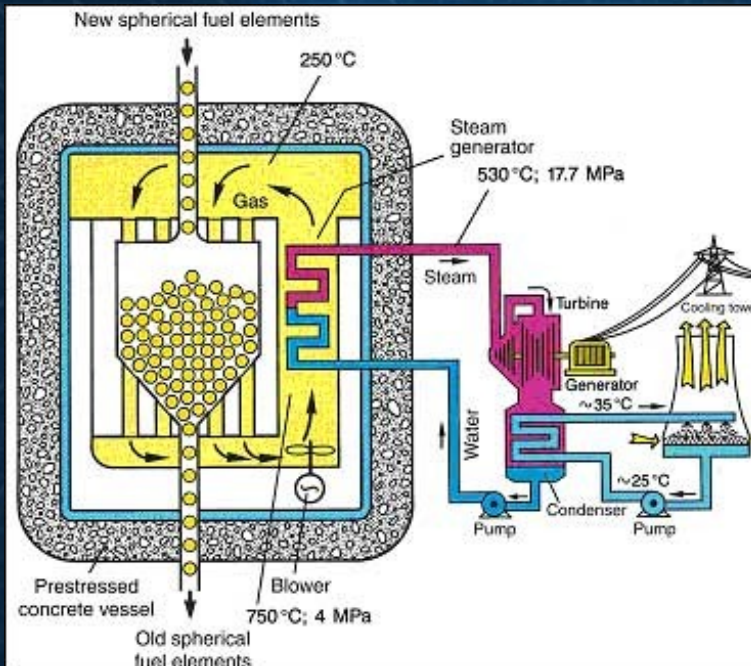
GCR – Reactores refrigerados a gás

- Micro esferas de combustível



GCR – Reatores refrigerados a gás

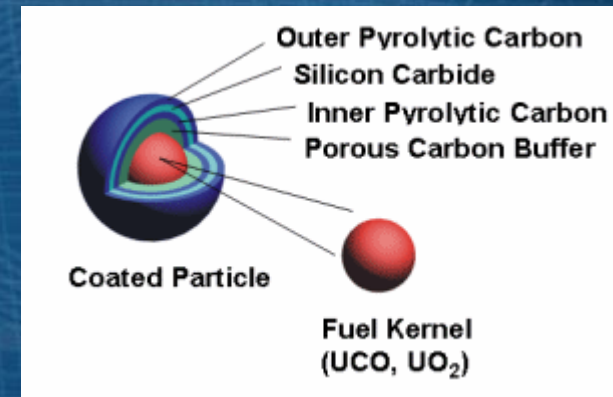
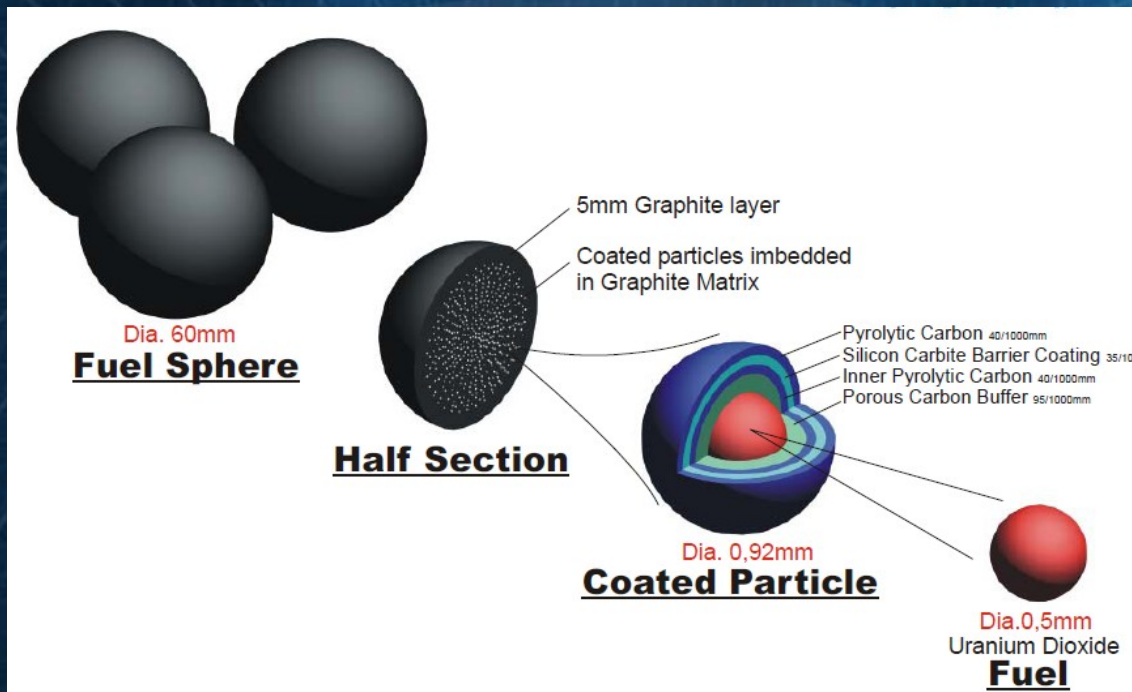
- PBGCR – Reator refrigerado a gás tipo *pebble bed*



- Elemento combustível na forma de dióxido ou carbeto altamente enriquecido na forma de micro esferas;
- As microesferas (cerca de 1mm) são agregadas a esferas de grafite de cerca de 10cm de diâmetro, sendo que o núcleo do reator é composto por milhares destes elementos dispostas num vaso de pressão;
- O núcleo do pebble bed consiste em blocos de grafite, que contém canais para barras de controle, e também furos para a passagem do gás hélio pressurizado.

GCR – Reactores refrigerados a gás

- Micro esferas de combustível



HTGR/ PBGCR – Reatores refrigerados a gás

- **Considerações gerais**

- Vantagens

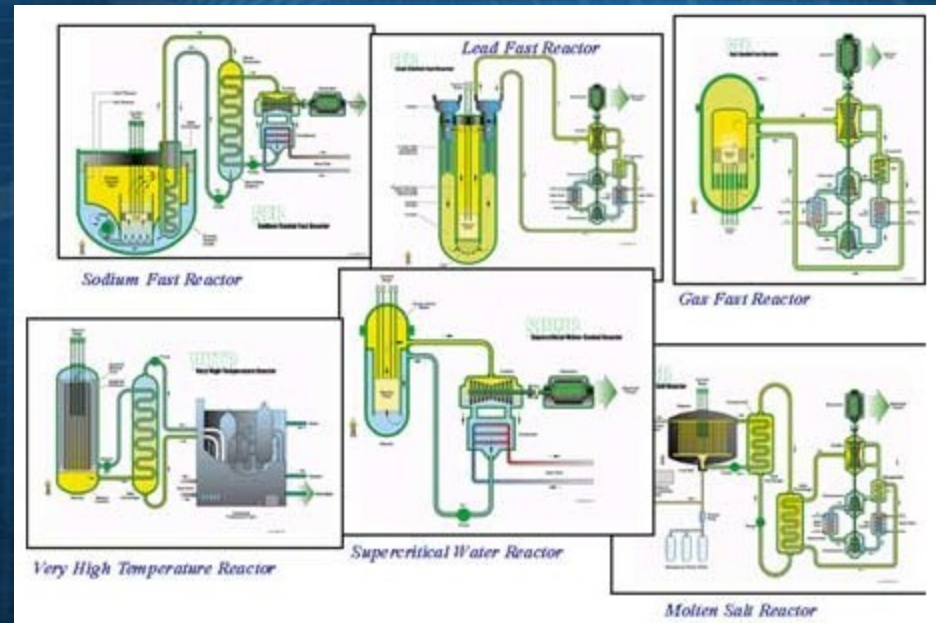
- O refrigerante pode ser aquecido a temperaturas mais elevadas do que água obtendo maior eficiência térmica;
 - Combustível com cobertura cerâmica (TRISO), que é capaz de reter melhor os produtos da fissão que os EC com revestimento metálico;
 - Alto nível de segurança.

- Desvantagens

- Alto custo do He;
 - Utilização de urânio altamente enriquecido;
 - Custo alto pelo benefício comparado com PWR.

Perspectivas tecnológicas

1. Introdução
2. Reatores de IV geração
3. Considerações finais



Perspectivas tecnológicas

- **Introdução**

- Em 2000 foi proposto pela ONU a busca por um novo padrão de reatores nucleares que passaram a serem designados de reatores nucleares de IV geração. Estes reatores, que espera-se sejam desenvolvidos até 2030, devem atender a padrões de segurança que impossibilitem a proliferação de armas nucleares, mantendo-se economicamente competitivos e atendendo aos novos conceitos ecológicos.

Perspectivas tecnológicas

- **Reatores de IV geração**

- Foram definidas as seguintes exigências para estes projetos (baseadas “Gen IV International Forum GIF”):

- Utilização eficiente dos recursos naturais;
 - Segurança baseada, principalmente, em processos inerentes e sistemas passivos;
 - Gerenciamento adequado dos rejeitos radioativos;
 - Resistência a proliferação;
 - Competitividade econômica com outras fontes;
 - Sustentabilidade; e
 - Aceitação publica.

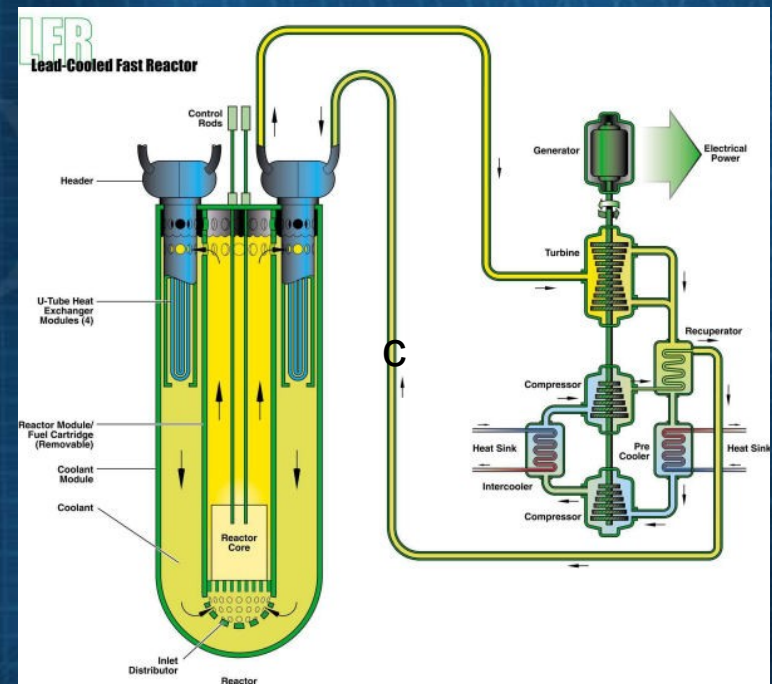
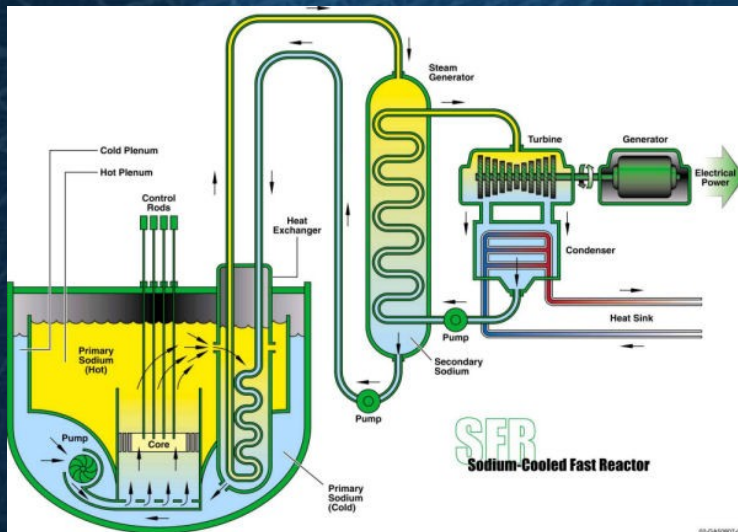
Perspectivas tecnológicas

- **Reatores de IV geração**

- Na classificação destas novas tecnologias de reatores nucleares, estão os reatores rápidos refrigerados a metal líquido (sódio, chumbo), os reatores avançados, de alta temperatura e refrigerados a gás entre outros;
- Reatores rápidos são assim chamados por terem no seu combustível a maior parte das fissões ocorrendo no espectro de nêutrons rápidos, ou de alta energia;
- A refrigeração destes reatores não é feita por um material moderador e sim por metais líquidos, como o sódio ou o chumbo.

Perspectivas tecnológicas

- Reatores de IV geração refrigerados a metal líquido



Perspectivas tecnológicas

- **Reatores de IV geração refrigerados a metal líquido**
 - Destacam-se dos reatores convencionais nos seguintes aspectos:
 - Grande eficiência térmica a alta temperatura;
 - Grande simplificação do núcleo;
 - Eliminação do remanejamento do combustível durante a operação;
 - Possibilidade de queima de alta concentração de produtos de fissão;
 - Segurança intrínseca, com drástica redução da probabilidade de indução de acidentes radioativos;
 - Eliminação de rejeitos radiativos de elementos pesados e de longo decaimento;
 - Opção de construção de reatores modulares ou compactos.

Perspectivas tecnológicas

- **Reatores de IV geração refrigerados a sódio**
 - Reatores rápidos experimentais refrigerados a sódio já foram construídos assim como 12 protótipos e reatores de grande porte;
 - Isso permite afirmar que o uso do sódio como refrigerante é hoje uma tecnologia conhecida, fazendo com que o risco de introdução de novas tecnologias a ele correlatas tenham grande chance de sucesso;
 - O grande desafio hoje é provar a competitividade econômica do mesmo.
 - Alguns benefícios:
 - Altíssima densidade de potência;
 - Alta eficiência do ciclo de vapor (~40%);
 - Não vulnerabilidade à LOCA.

Perspectivas tecnológicas

- **Reatores de IV geração refrigerados a chumbo**
 - As tecnologias para o uso do Pb ou do Pb-Bi eutético como refrigerante precisam ser sedimentadas, necessitando ainda:
 - testes de resistência à corrosão dos materiais empregados em temperaturas elevadas;
 - desenvolvimento de proteções térmicas;
 - novos materiais mais resistentes à corrosão em alta temperatura;
 - testes de degradação das propriedades mecânicas dos materiais de estrutura;
 - sistema de purificação do chumbo e sensores de reatividade nas condições exigidas;
 - confirmação de danos por radiação especialmente na presença de Pb -Bi, dentre muitos outros itens mais.

Perspectivas tecnológicas

- **Reatores de IV geração refrigerados a metal líquido**

- Considerações finais

- Os reatores rápidos tenderão a ocupar uma posição de destaque na geração de energia a partir de 2030. Nos reatores de potência refrigerados a metal líquido, provavelmente prevalecerá a utilização do sódio.
 - Se o futuro da energia nuclear está ligado ao mercado mundial de energia, os reatores de IV Geração terão de se tornar um produto competitivo nesse mercado.