

# A ENERGIA NUCLELÉTRICA

## 1 – HISTÓRICO

Até 1954, a energia elétrica que alimentava as residências e as indústrias, era de origem hídrica ou da queima de combustíveis fósseis (carvão e petróleo). Naquele ano, entrou em funcionamento a primeira central nuclear russa, Obninsk, com a potência de apenas 5 MWe (Megawatts elétricos).

Em 1956, foi inaugurada a primeira central nuclear inglesa, Calder Hall, com 50 MWe. E em 1957, surgiu a primeira usina nucleelétrica dos EUA, Shippingport com a potência de 60 MWe. Tais valores de potência são diminutos, quando comparados com a potência média gerada pelos reatores atuais. Existem 439 usinas nucleares em operação no mundo, cuja potência instalada é cerca de 375000 MWe, gerando aproximadamente 16% da energia elétrica produzida no planeta (Fig. 1). Trata-se da terceira fonte mais utilizada para geração de eletricidade no mundo. Somente a capacidade instalada mundial de origem nuclear é pelo menos 3 vezes a atual capacidade instalada (de todas as fontes) no Brasil.

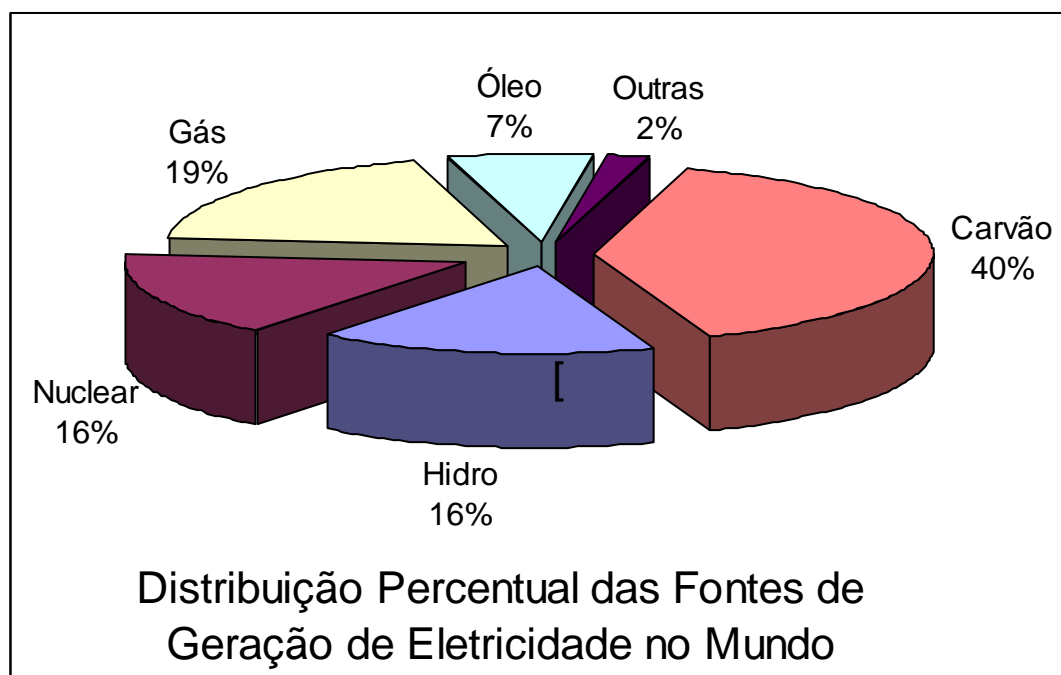


Figura 1

Em nosso país, a capacidade instalada nucleelétrica constituída pelas duas usinas de Angra 1 e 2 (1900 MWe), localizadas no estado do Rio de Janeiro, corresponde a 2,5% da capacidade instalada total.

Em todo mundo além das 444 usinas nucleelétricas em operação, existem 109 em construção. (Tabela 1).

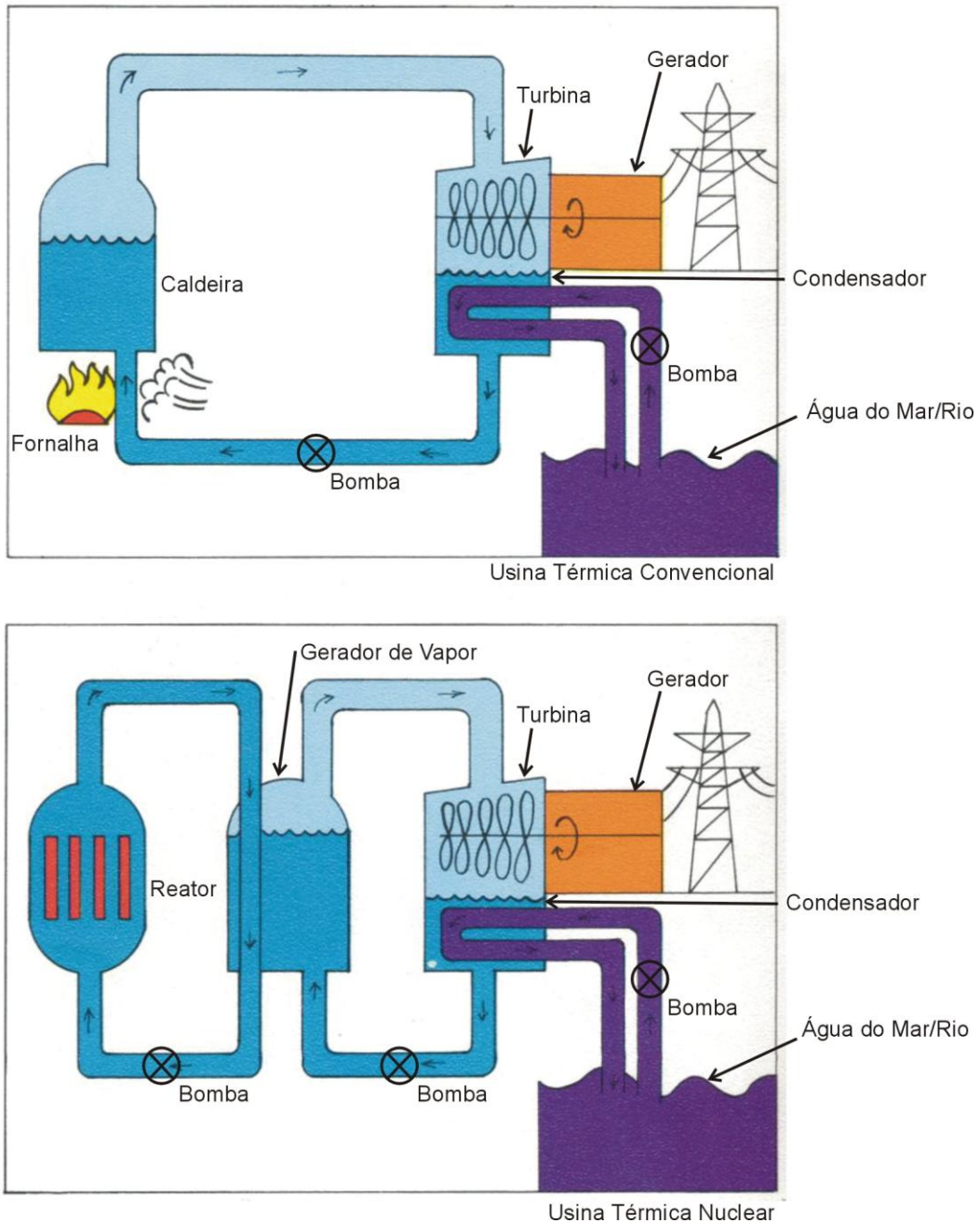
**TABELA 1****USINAS NUCLEARES EM OPERAÇÃO E CONSTRUÇÃO**

PAÍS	REATORES EM OPERAÇÃO	CAPACIDADE INSTALADA (MWe)	REATORES EM CONSTRUÇÃO	CAPACIDADE A SER INSTALADA (MWe)
1. ÁFRICA DO SUL	2	1.800	-	-
2. ALEMANHA	17	20.480	-	-
3. ARGENTINA	2	935	1	692
4. ARMÊNIA	1	375	-	-
5. BÉLGICA	7	5.885	-	-
6. BRASIL	2	1.901	1	1.275
7. BULGÁRIA	2	1.906	2	2.000
8. CANADÁ	22	15.137	-	-
9. CHINA	13	10.048	43	43.430
10. CORÉIA DO SUL	20	17.697	8	9.600
11. EMIRADOS ÁRABES UNIDOS	-	-	4	5600
12. ESLOVÊNIA	1	666	-	-
13. ESLOVÁQUIA	4	1.816	2	810
14. ESPANHA	8	7.514	-	-
15. EUA	104	102.854	9	10.477
16. FINLÂNDIA	4	2.716	1	1.600
17. FRANÇA	58	63.130	1	1.600
18. HOLANDA	1	487	-	-
19. HUNGRIA	4	1.889	-	-
20. ÍNDIA	19	4.189	8	5.096
21. INGLATERRA	19	10.137	-	-
22. IRÃ	-	-	1	915
23. JAPÃO	54	46.823	3	3.002
24. MÉXICO	2	1.300	-	-
25. PAQUISTÃO	2	425	1	300
26. REP.TCHECA	6	3.678	-	-
27. ROMÊNIA	2	1.300	3	1.860
28. RÚSSIA	32	22.693	12	10.560
29. SUÉCIA	10	9.303	-	-
30. SUIÇA	5	3.238	-	-
31. TAIWAN	6	4.884	2	2.600
32. UCRÂNIA	15	13.107	3	2.850
33. TURQUIA	-	-	4	4.600
<b>T O T A L</b>	<b>444</b>	<b>378.313</b>	<b>109</b>	<b>108.867</b>

Fonte: NUCLEAR News, Vol. 54,Nº 3, March 2011.

## 2 – FUNCIONAMENTO DO REATOR NUCLEAR

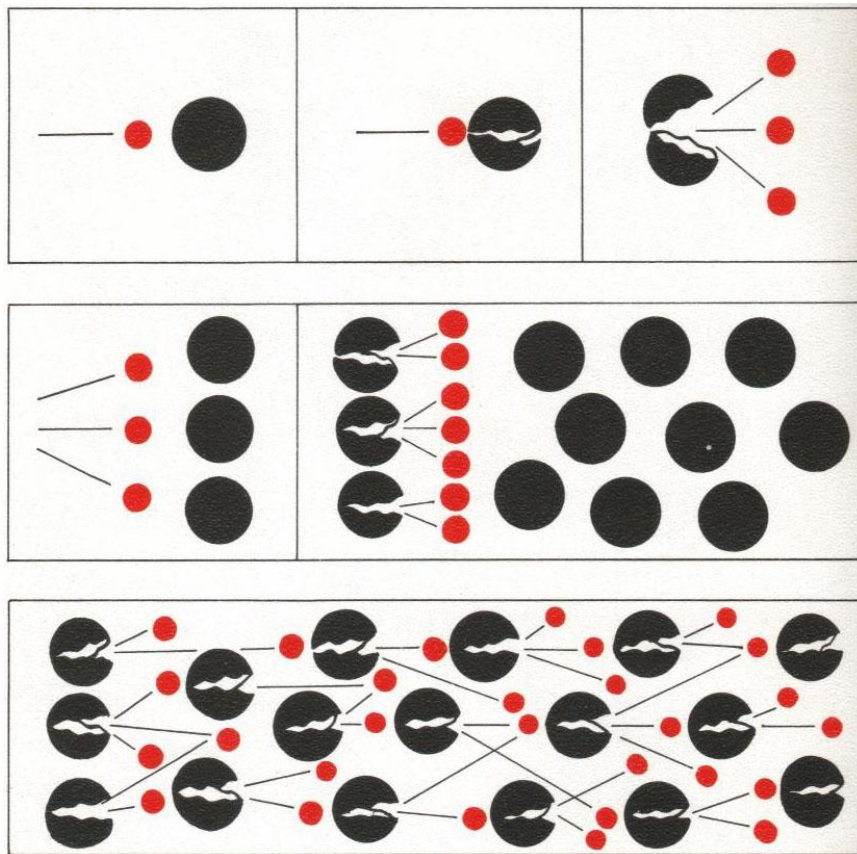
Uma usina nuclear gera energia elétrica, a partir da energia térmica. Como nas usinas térmicas convencionais, a turbina é acoplada ao gerador elétrico, constituindo o turbo-alternador, que se movimenta pela ação das forças resultantes da expansão do vapor nos estágios da turbina (Fig.2).



**Comparação de usina nuclear com térmica convencional**

**Figura 2**

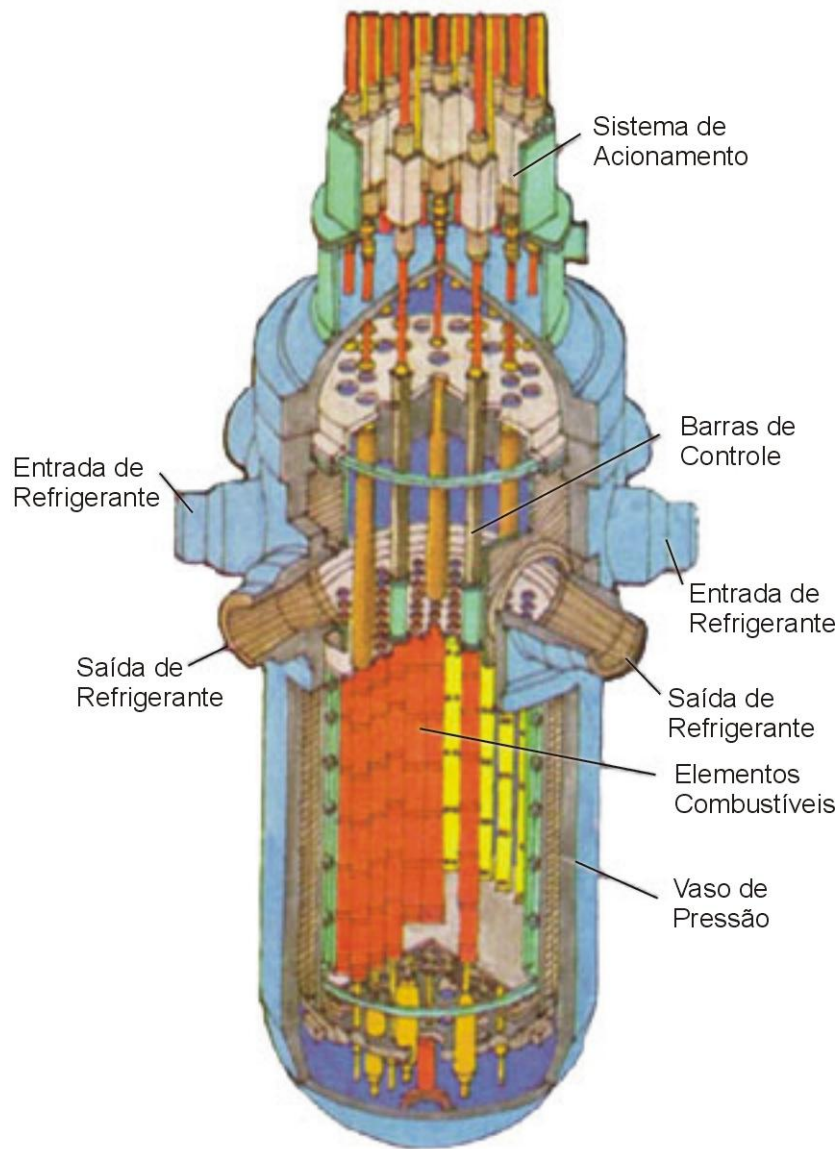
Nas usinas térmicas convencionais, o vapor é produzido pelo calor gerado na combustão do carvão, derivados do petróleo, gás ou biomassa. No caso das centrais nucleares, o calor é obtido pela fissão dos átomos de urânio no núcleo do reator (Fig 3) .



**A fissão do Urânio-235**

**Figura 3**

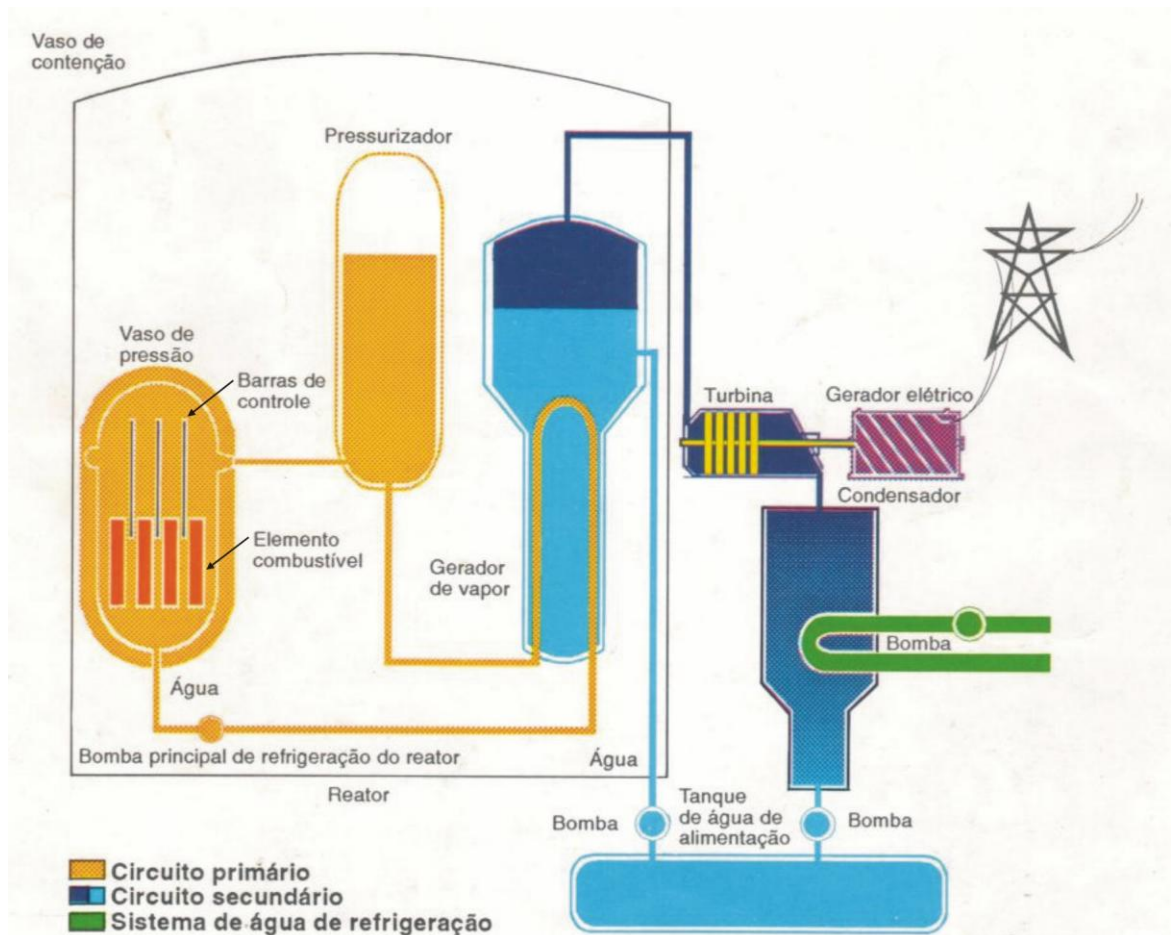
A fissão nuclear ocorre quando um núcleo pesado, como o de urânio, absorve um nêutron e se parte em dois outros menores, denominados fragmentos ou produtos de fissão, emitindo várias partículas, entre elas dois ou três novos nêutrons. Esses produtos e partículas possuem grande energia cinética que se transforma em calor e deve ser retirado por um fluido que circula através do núcleo do reator (Fig. 4) e do gerador de vapor.



**Núcleo do Reator PWR**

**Figura 4**

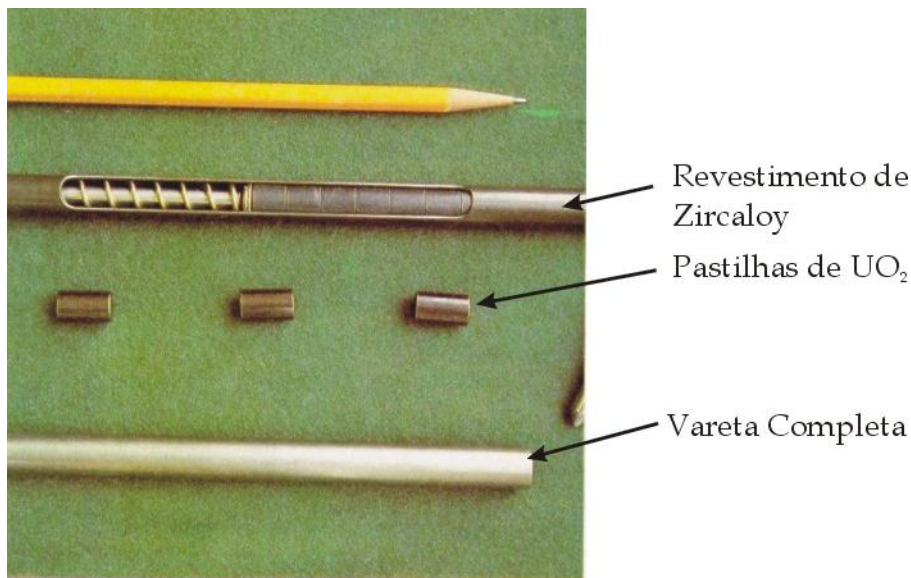
O rendimento de uma usina nuclear depende da temperatura do vapor e da pressão utilizadas nas turbinas. A água que passa pelo reator é aquecida a uma temperatura de  $320^{\circ}\text{C}$  e para que não entre em ebulição ao atingir os  $100^{\circ}\text{C}$ , ela é mantida sob forte pressão (157 atmosferas). Por isso é que o sistema denomina-se reator de água leve pressurizada, PWR – Pressurized Water Reactor (Fig. 5). No denominado gerador de vapor, há uma troca de calor entre o líquido que circula pelo reator (circuito primário) e a água que é vaporizada para alimentar as turbinas (circuito secundário). O vapor de água movimenta por pressão as palhetas da turbina, cuja velocidade pode atingir a 1800 rotações por minuto. Depois de passar pela turbina, o vapor do circuito secundário volta ao estado líquido através de um condensador, que é resfriado com água do mar, rios, lagos, etc. Não há contato direto entre a água do circuito secundário e a água do mar, que vem em um circuito independente dos outros dois circuitos. A montagem dos três circuitos é feita de maneira a impedir o contato da água, que passa pelo núcleo do reator, com a água que circula pelo circuito secundário, a fim de evitar o risco de contaminação, que somente poderia ocorrer se houvesse ruptura na tubulação do circuito primário e do secundário, de modo que as águas viessem a se misturar e ainda contaminar a água do mar.



**Diagrama esquemático de uma usina nuclear PWR**  
**Figura 5**

### 3 – COMBUSTÍVEL

Cerca de 95% das substâncias radioativas de uma usina nuclear são produzidas durante o funcionamento do reator, quando ocorre a fissão nuclear no interior das varetas de combustível. Embora no reator nuclear não ocorra nenhuma combustão (no sentido químico da palavra), por analogia denominou-se combustível nuclear ao conjunto, contendo pastilhas de material físsil ( $UO_2$ ), montadas em varetas cilíndricas de Zircaloy (liga metálica de Zircônio e Estanho), que as protegem contra a corrosão pela água, que é o líquido refrigerante e moderador do reator (Fig. 6).



**Vareta de combustível desmontada**

**Figura 6**

#### **4 – REAÇÃO EM CADEIA CONTROLADA**

Os nêutrons, que são gerados na reação de fissão dos núcleos dos átomos de urânio, possuem uma velocidade muito grande (da ordem de 20000 km/s), o que dificulta a sua absorção por outros núcleos de urânio existentes no elemento combustível (Fig. 7b). Para que se mantenha uma “reação em cadeia controlada”, que consiste na fissão de pelo menos um núcleo de urânio para cada nêutron produzido por átomo fissionado anteriormente, torna-se necessário diminuir a velocidade dos nêutrons até 2 km/s, processo conhecido como “termalização”. Isto se consegue intercalando uma substância cujos átomos fazem com que os nêutrons percam velocidade por colisões sucessivas com os átomos da substância denominada moderador. Dentre os moderadores mais comuns, destacam-se a água natural, a grafite e a água pesada. As substâncias usadas como moderador também absorvem nêutrons. Por exemplo, a água pesada ( $D_2O$ ) absorve menos nêutrons que a água natural ( $H_2O$ ) e para compensar a perda de nêutrons, aumenta-se a relação entre o número de átomos de Urânio-235 (isótopo físsil) e o número de átomos de Urânio-238 (isótopo não físsil), que no Urânio Natural é de 0,7%, para um valor maior compreendido no intervalo 2-4%, por meio do processo de enriquecimento isotópico.

A grande quantidade de calor que se gera nas varetas do elemento combustível, em consequência da reação de fissão, deve ser retirada do interior do reator nuclear para produzir vapor de água necessário para geração de energia elétrica. O elemento combustível poderia fundir, caso o calor provocasse uma elevação excessiva da temperatura das varetas que o compõem (Fig. 7b). O fluido (substância líquida ou gasosa), usada para retirar calor do reator nuclear, denomina-se refrigerante. Podem ser citados os gases carbônico ( $CO_2$ ) e hélio (He), a água natural ( $H_2O$ ) e certos metais líquidos ou fundidos (na temperatura de operação), como o mercúrio (Hg), o sódio (Na) e a liga metálica (NaK). As diversas associações de combustíveis, moderadores e refrigerantes deram lugar a diferentes tipos de reatores (Tabela 2).

Os reatores nucleares se compõem essencialmente de combustível, sistema de controle, moderador, sistema de refrigeração e blindagem.

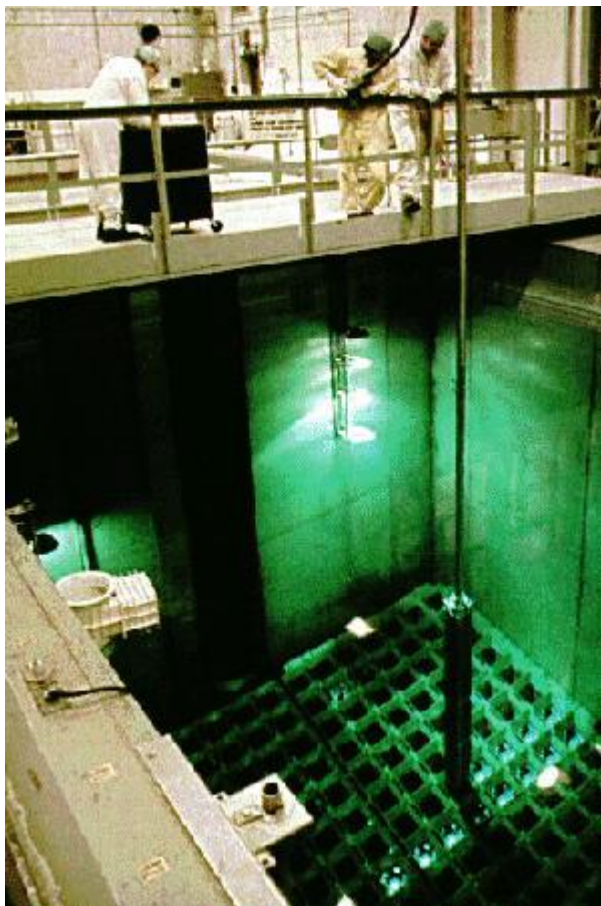
Se os nêutrons rápidos produzidos por fissão, forem transformados em lentos, ao passarem pelo moderador, a fim de produzirem novas fissões, os reatores denominam-se térmicos; se os nêutrons continuarem com a mesma velocidade com que são gerados, a quantidade de material físsil necessária

à manutenção da reação em cadeia deve aumentar consideravelmente e os reatores que não têm moderador denominam-se rápidos. Os reatores rápidos, devido a seu alto custo e difícil segurança, não passaram da fase experimental para a comercial, como aconteceu com os reatores térmicos. Existe cerca de uma dezena de protótipos de reatores rápidos em operação em alguns países como a França, Rússia, Japão e Índia, tendo os EUA e a Inglaterra abandonado seu desenvolvimento.

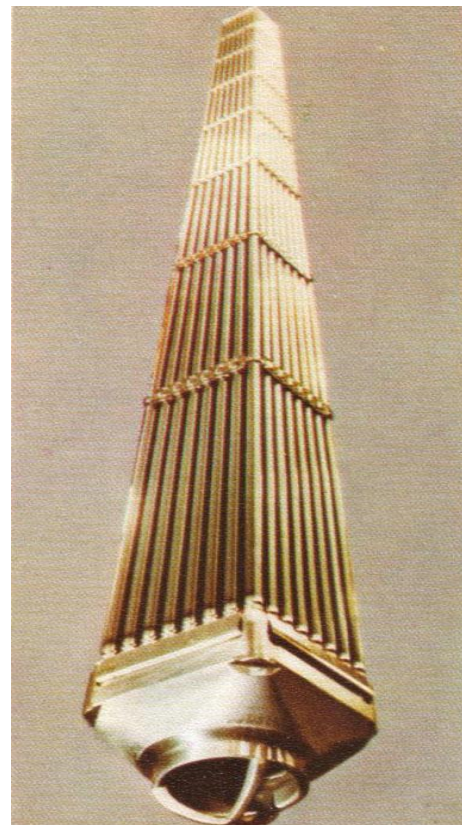
A exigência fundamental para se construir um reator é que haja uma massa “crítica” de combustível, isto é, material físsil em quantidade suficiente e distribuído de maneira tal que possibilite a manutenção da reação em cadeia.

Outro fator que deve ser tomado em consideração é a absorção dos nêutrons por parte dos materiais estruturais, pelo fluido refrigerante ou pelos elementos não físséis do combustível.

Um reator atinge o ponto crítico quando a reação fica auto-sustentada. Para iniciar uma reação em cadeia torna necessária uma fonte artificial de nêutrons, que é retirada após o mesmo atingir o ponto crítico.



**a. Piscina de armazenamento**



**b. Elemento combustível**

**Figura 7**



**TABELA 2****PARTICIPAÇÃO NA GERAÇÃO ELÉTRICA POR TIPO DE REATOR**

TIPO	SIGLA	COMBUSTÍVEL	MODERADOR	REFRIGERANTE	PARTICIPAÇÃO (%)	
					Número de Reactores	Capacidade Instalada
REACTORES A ÁGUA LEVE (LWR)	PWR BWR WWER	DIÓXIDO DE URÂNIO ENRIQUECIDO	ÁGUA NATURAL	ÁGUA NATURAL	81,08	88,07
REACTORES RESFRIADOS A GÁS	GCR AGR	URÂNIO NATURAL	GRAFITE	GÁS CARBÔNICO OU HÉLIO	4,05	2,37
REACTORES A ÁGUA PESADA	HWR PHWR	URÂNIO NATURAL	ÁGUA PESADA	ÁGUA PESADA	11,26	6,71
REACTORES A GRAFITE E ÁGUA LEVE	LWGR	DIÓXIDO DE URÂNIO ENRIQUECIDO	GRAFITE	ÁGUA NATURAL	3,38	2,70
REACTORES RÁPIDOS REGENERADORES	LMFBR	ÓXIDO MISTO DE PLUTÔNIO E URÂNIO	–	SÓDIO OU LIGA NaK	0,23	0,15

**Fonte: NUCLEAR News, Vol. 54,Nº 3, March 2011.**

**GLOSSÁRIO DE SIGLAS**

**LWR – LIGHT WATER REACTOR ( Reator a Água Leve)**

**PWR – PRESSURIZED WATER REACTOR (Reator a Água Leve Pressurizada)**

**BWR – BOILING WATER REACTOR (Reator a Água Leve Fervente)**

**WWER – WATER-WATER ELECTRICITY REACTOR (Reator Moderado e Refrigeração a Água Leve)**

**GCR – GAS COOLED REACTOR (Reator Refrigeração a Gás)**

**AGR – ADVANCED GAS COOLED REACTOR (Reator Avançado Refrigeração a Gás)**

**HWR – HEAVY WATER REACTOR (Reator a Água Pesada)**

**PHWR – PRESSURIZED HEAVY WATER REACTOR (Reator a Água Pesada Pressurizada)**

**LWGR – LIGHT WATER GRAPHITE MODERATED REACTOR (Reator a Água Leve Moderado a Grafite)**

**LMFBR – LIQUID METAL COOLED FAST BREEDER REACTOR (Reator Rápido Regenerador Refrigeração a Metal Líquido)**

## 5 – REATOR A ÁGUA PRESSURIZADA (PWR)

Nos reatores PWR, o líquido aquecido pelo calor gerado no núcleo é transferido para outro líquido que está submetido a uma pressão menor, o que acarreta a sua vaporização. O vapor gerado aciona as turbinas que estão acopladas ao gerador elétrico, produzindo eletricidade.

Neste tipo de reator, os elementos combustíveis encontram-se distribuídos numa grade estrutural, constituindo o núcleo do reator. Barras de controle de material absorvente de nêutrons (Cádmio, Háfnio ou Boro) são inseridas no arranjo geométrico do núcleo (Fig. 8). Todo o conjunto (combustível, barras de controle e grade estrutural) está contido em um vaso de pressão, com parede de aço inoxidável, cuja espessura é de 25cm, cheio de água, que serve como material moderador e refrigerante (Fig. 4). A água no circuito primário do reator não pode ferver, porque está sob alta pressão (157 atmosferas) para que possa atingir uma temperatura de 327°C e produzir vapor d'água, no circuito secundário que chega à turbina, à temperatura de 287°C, a água sai à pressão de 70 atmosferas, essencial à obtenção de um bom rendimento térmico (superior a 30%), para a geração de eletricidade.

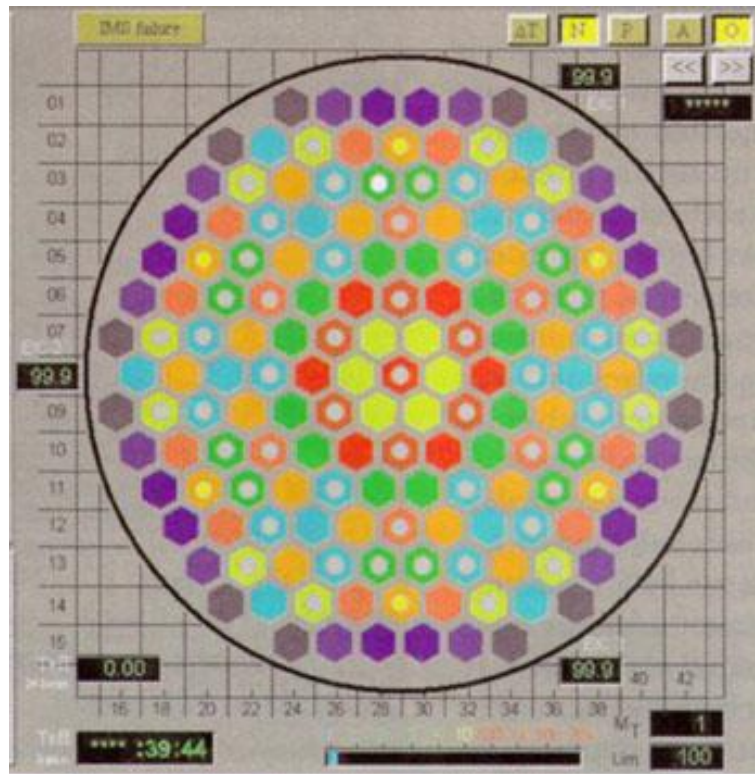


Diagrama esquemático do núcleo do Reator

Figura 8

## 6 – SEGURANÇA DAS USINAS NUCLEARES

As usinas nucleares possuem sistemas de segurança redundantes, que são independentes e fisicamente separados, capazes de resfriar o núcleo do reator e os geradores de vapor mesmo em situação de emergência.

O núcleo do Reator a água leve pressurizada possui auto-regulação. Na situação da perda do controle, o reator dispõe de sistemas de segurança automáticos que se destinam a evitar acidentes.

Os sistemas de segurança passivos são as diversas barreiras de proteção contra agentes externos (terremotos, maremotos, mísseis, inundações, etc.) e agentes internos (explosão, contaminação, fusão do núcleo do reator, etc.). O Reator Nuclear a Água Pressurizada (PWR) possui um conjunto de barreiras que impedem a saída de material radioativo para o meio ambiente.



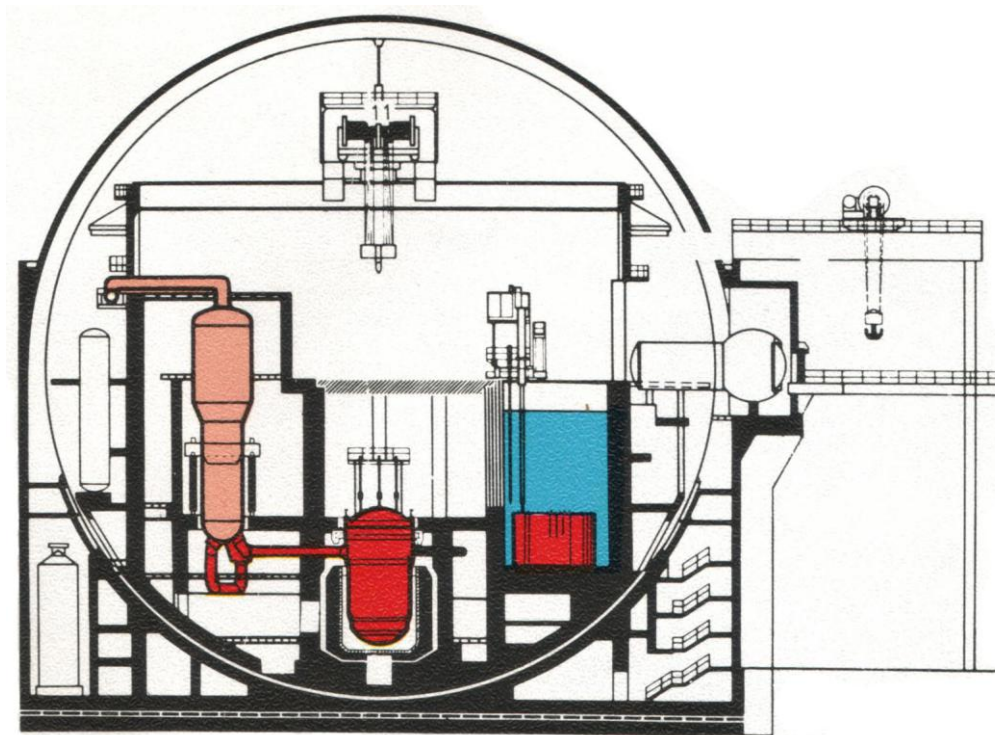
**Figura 9**

As substâncias radioativas resultantes da fissão do núcleo do átomo de Urânio – 235 ficam retidas nos espaços vazios da estrutura cristalina da matriz cerâmica do  $UO_2$  (barreira 1). Apenas uma pequena fração dos produtos de fissão voláteis ou gasosos consegue escapar da estrutura das pastilhas de combustível. Para reter essa fração, as pastilhas de dióxido de urânio são empilhadas no interior de tubos (barreira 2), fabricados com uma liga especial chamada Zircaloy 4, a qual se compõe de Zircônio e Estanho. Os tubos são selados e sua estanqueidade testada para assegurar que os produtos de fissão, mesmo gasosos, não saiam das varetas. Na eventualidade de microfissura em qualquer das varetas que compõem o elemento combustível, existem sistemas de purificação e degaseificação, que garantem a continuidade da operação do reator, com segurança.

O sistema de refrigeração do reator (circuito primário) funciona como a barreira 3, mostrada na Fig. 9. Mesmo que do sistema de refrigeração escape alguma substância radioativa, o reator envolvido

por uma esfera de aço, com 3 cm de espessura e 56 m de diâmetro (barreira 5 na Fig. 9), a qual é projetada para resistir ao mais sério acidente, admitindo-se a possibilidade de que todas as barreiras anteriores falhem e que todo o conteúdo do sistema de refrigeração do reator (circuito primário) e mais o conteúdo do circuito secundário venham a se vaporizar totalmente.

Por último, tanto a esfera de contenção, que é feita de aço especial, como as paredes de concreto armado (com cerca de 70 cm de espessura) do edifício de contenção (Fig.10), protegem o reator nuclear e áreas adjacentes contra eventuais impactos externos. Além disso, durante a operação normal da usina nucleolétrica, a pressão no interior do edifício de contenção é mantida abaixo da pressão atmosférica externa, de modo a impedir que produtos radioativos possam escapar da usina para o meio ambiente.



**Edifício do Reator PWR**

**Figura 10**

## **7 – REFERÊNCIAS**

- 1- IAEA REFERENCE DATA SERIES Nº2, VIENNA (2006)
- 2- CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, RIO DE JANEIRO (1996)
- 3- DEL FUEGO A LA ENERGIA NUCLEAR, COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, MÉXICO (1988)
- 4- ANGRA: UM COMPROMISSO AMBIENTAL, ELETRONUCLEAR, RIO DE JANEIRO (1999).
- 5- NUCLEAR NEWS, VOL. 54, Nº3,EUA (2011).