

Átomo: todas as substâncias são feitas de matéria e a unidade fundamental da matéria é o átomo. O átomo é composto de um núcleo central contendo prótons (com carga positiva) e nêutrons (sem carga). Os elétrons (com carga negativa e massa insignificante) circulam em torno do núcleo em diferentes trajetórias imaginárias, chamadas órbitas (em 1911, Rutherford propôs a estrutura atômica com um núcleo massivo, ou seja, carga positiva concentrada no centro do átomo - raio do núcleo 10 mil vezes menor que o raio do átomo, mas contendo mais de 99,9 % da massa deste átomo).

Elemento: é uma substância feita de átomos de um tipo. Há cerca de 82 elementos que ocorrem naturalmente e cerca de 31 elementos que são criados artificialmente, como listados em diferentes Tabelas Periódicas - nestas tabelas cada elemento tem um símbolo químico, por exemplo: Ferro (Fe), Urânio (U), Hélio (He).

Isótopo: Um elemento pode ter mais de uma variante, denominada de isótopo. Exemplo: o carbono-12, carbono-13 e carbono-14 são três isótopos do elemento **carbono** com os números de massa 12, 13 e 14, respectivamente. O número atômico do carbono é 6 (= número de prótons no núcleo), o que significa que cada átomo de carbono tem 6 prótons, de modo que os números de nêutrons destes isótopos são 6, 7 e 8, respectivamente.

Na nomenclatura científica, os isótopos são designados pelo nome do elemento seguido por um hífen e pelo número de prótons e nêutrons no núcleo atômico (ex: ferro-57, urânio-238, hélio-3). Na forma simbólica, esse número é escrito como um prefixo subido do símbolo químico (ex: ^{57}Fe , ^{238}U , ^3He).

Substância: é formada por uma ou mais **moléculas**. Uma molécula é formada quando átomos do mesmo ou de diferentes elementos se combinam. A molécula é a menor partícula de uma substância que pode normalmente existir de maneira independente. Exemplos:

- Dois átomos de oxigênio se combinam formando uma molécula de oxigênio [O_2].
- Um átomo de carbono se combina com dois átomos de oxigênio para formar uma molécula de dióxido de carbono [CO_2].

Radiação alfa (ou partícula alfa, ou raio alfa): é uma partícula carregada por dois prótons e dois nêutrons, e por isso tem uma carga positiva +2 e **número de massa** 4. É produzida a partir de núcleos **grandes**, como os núcleos radioativos do urânio, tório e rádio, por exemplo. Quando um átomo emite uma partícula alfa, o número de massa do átomo diminui em quatro unidades, devido à perda dos prótons e nêutrons. Já o **número atômico** do átomo cai duas unidades, em razão da perda dos dois prótons - o átomo torna-se um novo elemento. Exemplo disso é o urânio que se torna tório, quando há perda de dois prótons. A radiação alfa é muito energética, mas é facilmente barrada por uma folha de papel.

Número de Massa: é a soma do número de prótons e nêutrons do núcleo de um átomo.

Número Atômico: é o número de prótons no núcleo de um átomo. Como átomos são eletricamente neutros, o número de prótons é igual ao número de elétrons. O número atômico do Urânio é 92 e o do Tório é 90.

Peso Atômico (ou massa atômica relativa): é o número de vezes que um átomo de um elemento é mais pesado que um átomo de hidrogênio. O peso atômico do hidrogênio é tomado como sendo a unidade [1].

Os menores núcleos encontrados, capazes de emissão alfa, são os do elemento telúrio-52 (Te), com números de massa entre 106 e 127.

Radiação beta (ou partícula beta, ou raio beta): a emissão beta ocorre em elementos com mais nêutrons do que prótons no núcleo, em que, natural ou artificialmente, um nêutron se divide em um próton e um elétron. O próton permanece no núcleo e o elétron é emitido em alta velocidade (carga negativa). A radiação beta é mais penetrante e menos energética que a radiação alfa, conseguindo atravessar lâminas de chumbo de até 2 mm ou de alumínio de até 5 mm, mas é facilmente barrada por placa de madeira de 2,5 cm de espessura.

Radiação gama (ou raios gama): é uma radiação eletromagnética, de carga e massa nulas e de emissão contínua de calor, resultante de um núcleo de átomo em estado instável (excitado). A emissão de raios gama não altera o número de prótons e nêutrons do núcleo, mas tem o efeito de estabilizá-lo. A emissão de raios gama está associada, frequentemente, ao processo natural de radiações alfa e beta. A Radiação gama é extremamente penetrante, podendo atravessar chapas de aço de até 15 cm de espessura e atravessar o corpo humano, mas pode ser barrada por grossas placas de chumbo ou paredes de concreto.



Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia / SPE/MME

www.mme.gov.br / n3e.spe@mme.gov.br

(55 61) 2032 5967 / 2032 5226

Energia Nuclear: Brasil e Mundo

Edição: 14/09/2016

O que é radioatividade?

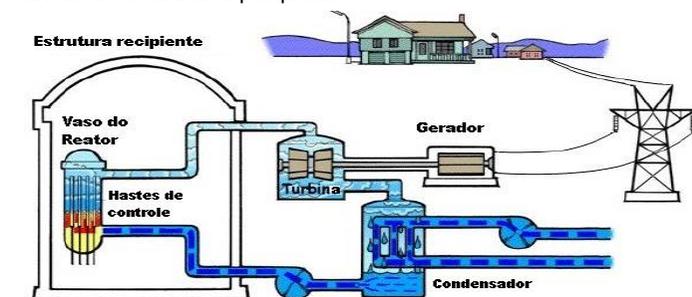
A radioatividade é um fenômeno natural ou artificial, pelo qual algumas **substâncias** ou **elementos** químicos, chamados radioativos, são capazes de emitir radiações, identificadas por partículas **alfa**, partículas **beta** e raios **gama** (raios-X), principalmente. A radioatividade é uma forma de energia nuclear, e consiste no fato de alguns **átomos** como os do urânio, rádio e tório, dentre outros elementos, serem "instáveis", emitindo constantemente radiações. O urânio, por exemplo, tem 92 **prótons**, porém através dos séculos vai perdendo-os na forma de radiações, até terminar em chumbo, com 82 prótons estáveis (fenômeno natural). A **fissão** nuclear para produção de energia elétrica é um fenômeno artificial.

A radioatividade foi observada pela primeira vez pelo francês Henri Becquerel em 1896 enquanto trabalhava em materiais fosforescentes.

Quais são as aplicações da energia nuclear?

As radiações dos **isótopos** radioativos têm a propriedade de produzir uma impressão em placas fotográficas, ionizar gases, produzir fluorescência, atravessar corpos opacos à luz, dentre outras, o que possibilita vários usos na medicina, na indústria - particularmente a farmacêutica- e na agricultura, por exemplo. As radiações podem atravessar a matéria ou serem absorvidas por ela, o que possibilita múltiplas aplicações - pela absorção da energia das radiações (em forma de calor) células ou pequenos organismos podem ser destruídos. Essa propriedade, que normalmente é altamente inconveniente para os seres vivos, pode ser usada em seu benefício, quando empregada para destruir células ou microorganismos nocivos. Por estas razões, a cada dia, novas técnicas nucleares são desenvolvidas nos diversos campos da atividade humana, possibilitando a execução de tarefas impossíveis de serem realizadas pelos meios convencionais.

A fissão é outra forma de aplicação da energia nuclear, para geração de energia elétrica, propulsão de submarinos e foguetes, armamento nuclear e pesquisas.

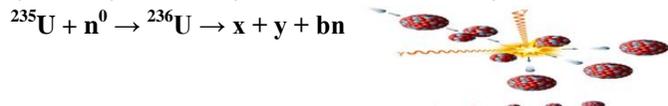


MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME
SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO
NÚCLEO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS DE ENERGIA

O que é fissão nuclear? ... E fusão?

Fissão nuclear é o processo em que se “bombardeia” o núcleo de um elemento radioativo, com um nêutron. Essa colisão resulta na criação de um isótopo do elemento, totalmente instável, que se quebra formando dois novos elementos e liberando grandes quantidades de energia e um nêutron livre.

O processo pode ser simplificado da forma abaixo, para o urânio-235:



Onde: n^0 é o nêutron bombardeado, ${}^{235}\text{U}$ é urânio instável, x e y são os dois novos elementos e bn a liberação de um ou mais nêutrons.

A quantidade de energia liberada durante os processos de fissão nuclear pode ser multiplicada milhares de vezes se o resultado de uma fissão nuclear acionar outra fissão e assim sucessivamente em milhares de fissões. A esse fato chamamos de reação em cadeia. Controlando-se o número de nêutrons produzidos e a quantidade de ${}^{235}\text{U}$, pode-se controlar a taxa de fissão ao longo do tempo. Cabe salientar que a fissão do núcleo raramente ocorre de forma espontânea na natureza.

Fusão nuclear é o processo no qual dois ou mais núcleos atômicos se juntam e formam um outro núcleo de maior **número atômico**.

O que é um reator nuclear?

Reator nuclear é uma câmara de resfriamento hermética, blindada contra a radiação, onde é controlada uma reação nuclear para a obtenção de energia elétrica, produção de materiais fissionáveis como o plutônio para armamentos nucleares, propulsão de submarinos e satélites artificiais ou para pesquisas.

Uma central nuclear pode conter vários reatores. Atualmente apenas os reatores nucleares de fissão são empregados para a produção de energia elétrica comercial, porém os reatores nucleares de fusão estão em fase experimental.

Principais componentes de um reator nuclear de fissão:

1. **Combustível:** isótopo fissil e/ou fértil (aquele que pode ser convertido em fissil por ativação neutrônica): Urânio-235, Urânio-238, Plutônio-239, Tório-232, ou misturas destes (o combustível típico atualmente é o MOX, mistura de óxidos de urânio e plutônio).

2. **Moderador:** água leve, água pesada, hélio, grafite, sódio metálico - que cumprem a função de reduzir a velocidade dos nêutrons produzidos na fissão, para que possam atingir outros átomos fissionáveis mantendo a reação.

3. **Refrigerador:** água leve, água pesada, dióxido de carbono, hélio, sódio metálico - que conduzem o calor produzido durante o processo até a turbina geradora de eletricidade ou o propulsor.

4. **Refletor:** água leve, água pesada, grafite, urânio - que reduzem o escapamento de nêutrons aumentando a eficiência do reator.

5. **Blindagem:** concreto, chumbo, aço, água leve - que evitam o escapamento de radiação gama e nêutrons rápidos.

6. **Material de Controle:** cádmio ou boro, que finalizam a reação em cadeia, pois ambos são ótimos absorventes de nêutrons. Geralmente

E sobre a expansão?

Há 67 reatores em construção, sendo 82% do tipo PWR e 5% do tipo BWR. A China, com 24 reatores e 26,7 GW de potência, é o país em maior expansão (37% do total).

Reatores em construção (MW), ao final de 2015

País	MW	Nº Reatores	País	MW	Nº Reatores
China	26.737	24	Ucrânia	2.000	2
Rússia	7.078	8	Finlândia	1.720	1
Estados Unidos	6.218	5	França	1.650	1
Coreia do Sul	5.600	4	Brasil	1.350	1
Emirados Árabes	5.600	4	Eslováquia	942	2
Índia	4.300	6	Paquistão	680	2
Japão	2.756	2	Argentina	29	1
Taiwan	2.700	2			
Belarus	2.388	2			
TOTAL		67	71.748		67

Segundo a International Atomic Energy Agency - IAEA, entidade fonte de dados deste boletim, estavam planejados, ao final de 2015, outros 88 reatores, equivalentes a 77 GW de potência nominal.

A energia nuclear é competitiva em custos e é isenta de emissões nos processos de geração – considerando o uso de combustíveis na cadeia energética da mineração à geração, as emissões em tCO₂/GWh variam de 10 a 50 na nuclear e de 450 a 1.200 nas fontes fósseis. Ainda assim, a cada acidente nuclear, seja por causa natural, falha técnica, ou falha humana, reacendem-se as incertezas sobre segurança, e reatores são desativados e/ou a expansão é repensada.

Há reservas suficientes de urânio?

O atual consumo mundial de urânio natural (U₃O₈), próximo de 70 mil t por ano, dá às reservas **medidas** vida útil acima de 80 anos (Brasil >500 anos). O indicador mundial passa de 200 anos se forem adicionadas as reservas **estimadas e inferidas**, de 10,5 milhões t.

Reservas medidas de urânio (mil t)

Países	mil t	%	Países	mil t	%
Austrália	1.673	28,7	China	171	2,9
Cazaquistão	652	11,2	Vietnã	141	2,4
Canadá	485	8,3	Uzbequistão	115	2,0
Rússia	480	8,3	Jordânia	112	1,9
Brasil	309	5,3	Ucrânia	105	1,8
África do Sul	296	5,1	Groenlândia	86	1,5
Namíbia	284	4,9	Outros	431	7,4
Níger	273	4,7			
Estados Unidos	207	3,6	Mundo	5.820	100

Caso o projeto abaixo (box) tenha sucesso, a energia nuclear poderá suprir a demanda mundial de eletricidade por milhares de anos, tendo nos oceanos a matéria-prima para a produção de hidrogênio.

ITER - International Thermonuclear Experimental Reactor é um projeto de cooperação internacional, que sob o patrocínio da IAEA, envolve 35 países. Trata-se de um reator experimental em construção na França, que vai usar o hidrogênio em ambiente de dezenas de milhões °C, gerando calor para operar 500 MW de potência, através do processo de fusão nuclear – previsto para 2020.

Assim, em condições laboratoriais, espera-se a reprodução das reações de fusão nuclear que ocorrem no interior das estrelas, como o Sol, em um processo denominado nucleossíntese estelar, o que o faz ser uma das tecnologias do futuro para geração de energia elétrica renovável, limpa e barata, por liberar apenas hélio, um gás inerte e inofensivo.

Montagem do Folder (etapa 1- pg 1, 2, 7 e 8)

- Dobrar o primeiro 1/3 da folha até a linha à esquerda
- Ir para a folha seguinte

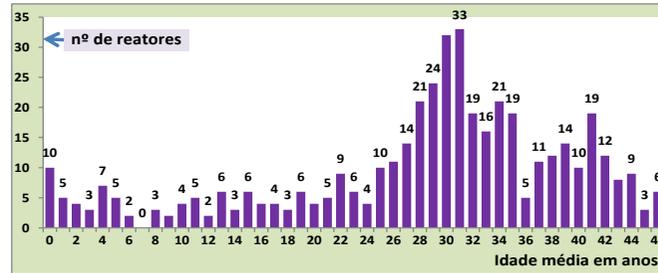
Usinas Desativadas – MW e nº de reatores (de 1970 a 2015)

País	Nº Reatores	MW	País	Nº Reatores	MW
Estados Unidos	33	1.468,6	Eslováquia	3	1.023
Reino Unido	30	5.335	Suécia	3	1.242
Alemanha	28	16.502	Espanha	3	1.116
França	12	4.240	Lituânia	2	2.600
Japão	17	8.886	Bélgica	1	12
Canadá	6	2.268	Armênia	1	408
Rússia	5	849	Suíça	1	7
Ucrânia	4	3.800	Holanda	1	60
Bulgária	4	1.760	Kazaquistão	1	90
Itália	4	1.472	TOTAL	159	66.356

Mesmo tendo havido conexão de novos reatores à rede, no período 1989/91 houve redução de 420 para 415 reatores, e de 1996/97 redução de 438 para 430 reatores. Em 2015 foram desmobilizados 7 reatores e adicionados 10. Em 2005, 2010 e 2015, ocorreu o máximo número de reatores em operação, de 441 unidades.

Dos reatores em operação, 88 estão com idade média no intervalo 0-20 anos, outros 136 estão com idade média de 21 a 30 anos, e outros 217 com idade média de 31 a 45 anos.

Idade média dos reatores em operação até 2015 (anos)



O tempo médio de construção de reatores vem decrescendo no tempo, estando atualmente entre 50 e 70 meses. Tempo: do 1º grande volume de concreto, em geral na base do reator, até a ligação à rede básica de distribuição.

Tempo médio de construção de reatores (meses)

Período	Nº de Reatores à Rede	Ligados	Meses
1981 a 1985	131	84	84
1986 a 1990	85	93	93
1991 A 1995	29	82	82
1996 A 2000	23	121	121
2001 a 2005	20	59	59
2006 a 2010	12	77	77
2011 a 2014	19	67	67
2015	10	69	69

Custos de geração x taxas de retorno

Custos de Geração Nuclear (U\$/MWh)-construção entre 2015/2020

País	3%	5%	10%	País	3%	5%	10%
Inglaterra	64,4	100,8	135,7	Japão	62,6	87,6	112,5
Hungria	53,9	89,9	125,0	Finlândia	46,1	77,6	109,1
Bélgica	51,5	84,2	116,8	Estados Unidos	54,3	77,7	101,8
Eslováquia	53,9	84,0	116,5	China	27,0	43,0	56,0
França	50,0	82,6	115,2	Coreia do Sul	28,6	40,4	51,4

Fonte: OECD/IEA - Projected Costs of Generating Electricity, 2015 Edition. Fator de Capacidade = 85%

são usados na forma de barras (de aço borado, por exemplo) ou bem dissolvidos no refrigerador.

7. Elementos de Segurança: todas as centrais nucleares de fissão apresentam múltiplos sistemas de segurança ativos (que respondem a sinais elétricos) e passivos (que atuam de forma natural como a gravidade, por exemplo). A contenção de concreto que rodeia os reatores é o principal sistema de segurança, e destina-se a evitar que ocorra vazamento de radiação para o exterior.

O núcleo do reator é construído dentro de um forte recipiente de aço que contém varetas de combustível feitas de materiais fisséis, metidos dentro de tubos. Essas varetas produzem calor no processo de fissão. Percorrendo o núcleo corre um refrigerante, líquido ou gasoso, que, ao ser aquecido pelo calor liberado, gera vapor de água que será canalizado para turbinas.



Quais são os tipos de reatores nucleares?

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica – International Atomic Energy Agency (IAEA) -, os dois tipos de reatores a seguir especificados respondem por quase 90% da potência instalada de geração elétrica nuclear.

PWR - Pressure Water Reactor ou reator de água a pressão. Utiliza água pressurizada leve como refrigerante e moderador, e urânio enriquecido como combustível. O calor é transferido do refrigerante do reator primário, que é mantido líquido a alta pressão, para um circuito secundário em que há produção de vapor, que vai movimentar as turbinas e ser condensado e reciclado.

BWR - Boiling Water Reactor ou reator de água em ebulição. Utiliza água leve como refrigerante e moderador, e urânio enriquecido como combustível. Gera vapor diretamente através da fervera do refrigerante primário. O vapor de água é separado da água restante em separadores de vapor, posicionados acima do núcleo, e é passado para as turbinas, para em seguida ser condensado e reciclado.

Outros tipos de reatores utilizam diferentes “meios” de refrigeração, como água pesada, dióxido de carbono, ou sódio; ou utilizam outros “meios” de moderadores, como grafite ou água pesada. Alguns tipos não utilizam moderadores e podem utilizar urânio natural ou levemente enriquecido. São eles: **GCR** - Gas Cooled Reactor ou reator refrigerado por gás; **PHWR** – Pressurized Heavy-Water Reactor ou reator a água pesada; **LWGR** – Light Water Graphite Reactor, ou reator a água leve e grafite; **FBR** - Fast Breeder Reactor- o combustível é uma mistura de óxidos de plutônio e urânio e nenhum moderador é usado.

E sobre a potência instalada mundial?

O primeiro reator nuclear experimental surgiu em Idaho, Estados Unidos, em dezembro de 1951 e o primeiro em escala industrial entrou em operação na União Soviética em 1954. Em escala comercial, as usinas nucleares começaram a surgir alguns anos depois, na França, em 1959; nos Estados Unidos, em 1960; e na União Soviética, em 1964.

Ao final de 2015, havia 441 reatores nucleares em operação no mundo (438 em 2014 e 434 em 2013), com potência nominal de 402,9 GW (6,5% da potência mundial de geração elétrica).

Capacidade Instalada por tipo de reator (MW) - 2015

Tipo	Número de Reatores	Potência MW	% Número	% Potência	MW / reator
PWR	282	277.944	63,9	69,0	986
BWR	78	78.716	17,7	19,5	1.009
GCR	14	7.961	3,2	2,0	569
PHWR	49	25.970	11,1	6,4	530
LWGR	15	10.785	3,4	2,7	719
FBR	3	1.476	0,7	0,4	492
Total	441	402.852	100,0	100,0	913

Capacidade Instalada por país (MW) e nº de reatores – 2015

Nº	País	MW	Nº Reatores	MW/Reator	Expansão		Retiradas	
					MW	Nº Reat.	MW	Nº Reat.
1	Estados Unidos	103.908	99	1.050				
2	França	65.880	58	1.136				
3	Japão	41.982	43	976		2.216	5	
4	China	28.456	31	918	8.249			
5	Rússia	27.206	35	777	864		1	
6	Coreia do Sul	22.723	24	947	1.045		1	
7	Canadá	14.385	19	757				
8	Ucrânia	13.835	15	922				
9	Alemanha	11.351	8	1.419		1.345	1	
10	Reino Unido	10.372	15	691		530	1	
11	Suécia	9.859	10	986				
12	Espanha	7.416	7	1.059				
13	Bélgica	6.212	7	887				
14	Índia	5.780	21	275				
15	Taiwan	5.214	6	869				
16	Rep. Tcheca	4.112	6	685				
17	Suíça	3.460	5	692				
18	Finlândia	2.860	4	715				
19	Hungria	2.000	4	500				
20	Bulgária	2.000	2	1.000				
21	Brasil	1.990	2	995				
22	Eslováquia	1.950	4	488				
23	África do Sul	1.940	2	970				
24	Argentina	1.750	3	583				
25	Romênia	1.411	2	706				
26	México	1.400	2	700				
27	Irã	1.000	1	1.000				
28	Paquistão	750	3	250				
29	Eslovênia	727	1	727				
30	Holanda	515	1	515				
31	Armênia	408	1	408				
	Mundo	402.852	441	913	10.158	10	4.091	7

Os Estados Unidos detêm a maior proporção da capacidade instalada mundial de geração nuclear, de 25,8% (26,2% em 2014), seguido da França (16,4%), e do Japão (10,4%).

Na geração mundial de energia elétrica, a proporção nuclear passou de 2% a 15,2%, de 1971 para 1985, evoluindo mais lentamente até 1996, quando atingiu 17,2% (recorde). A partir deste ano a proporção diminuiu seguidamente, chegando a 10,6% em 2015.

A soma do tempo em operação de cada reator dá aos Estados Unidos a maior experiência, com mais de 4.100 anos.

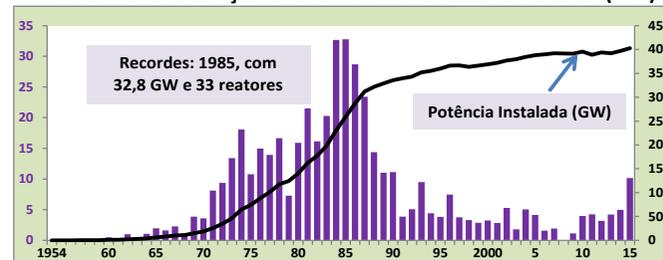
Proporção da nuclear na geração total (%) e geração (TWh) - 2015

Nº	País	% sobre geração total	TWh Nuclear	FC (%)	Anos Experiência
1	França	79	437	76	2.048
2	Eslováquia	56	15	89	156
3	Hungria	53	16	90	122
4	Ucrânia	45	87	72	458
5	Bélgica	39	26	48	275
6	Armênia	37	3	78	41
7	Suécia	36	56	64	432
8	Bulgária	34	15	87	159
9	Finlândia	34	23	93	147
10	Suíça	33	23	76	204
11	Eslovênia	32	6	89	34
12	Rep. Tcheca	31	27	74	146
13	Coreia do Sul	30	164	83	474
14	Reino Unido	24	74	82	1.559
15	Espanha	21	57	88	315
16	Romênia	20	12	94	27
17	Estados Unidos	19	836	92	4.111
18	Rússia	18	195	82	1.191
19	Canadá	16	102	81	693
20	Alemanha	15	91	92	816
21	Taiwan	14	36	79	206
22	Argentina	4,8	7	46	76
23	Paquistão	4,7	5	72	64
24	África do Sul	4,3	11	67	62
25	México	3,9	12	96	47
26	Holanda	2,9	4	91	71
27	China	2,8	171	69	209
28	Índia	2,8	38	74	439
29	Brasil	2,5	15	84	49
30	Irã	1,2	3	40	4
31	Japão	0,4	5	1	1.739
	Mundo	10,6	2.572	72,9	16.522

Nota: Não inclui anos de experiência da Itália (80), Kazajistão (25) e Lituânia (43), com geração nula. FC = fator de capacidade

Entre 1970 e 1990 houve a maior expansão e maior retração de reatores nucleares, tendo ocorrido o recorde de expansão em 1985, com 32,8 GW instalados, correspondendo a 33 reatores.

Potência mundial: adição anual e acumulada – 1954 a 2015 (GW)



Dentre os vários acidentes nucleares ocorridos, três são considerados de grande magnitude: o da **Three Mile Island** (Pensilvânia-USA), em 28/03/79, de nível 5 na Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES), que vai de 0 a 7; o de **Chernobyl** (Ucrânia), em 26/04/86, de nível 7; e o de **Fukushima** (Japão), em 12/03/2011, de nível 5.

Acidentes nucleares, tempo em operação e incertezas na segurança, têm resultado na desativação de reatores em alguns países, razão da existência de pontos de inflexão da curva de potência instalada, com concavidade para baixo.

A Alemanha apresenta o maior volume de potência desativada, de 16,5 GW (24,9% do total), seguida dos Estados Unidos (22,1%).

Montagem do Folder (etapa 2 pg 3, 4, 5 e 6)

- Dobrar o primeiro 1/3 da folha até a linha à esquerda
- Encaixar esta folha dobrada no interior da primeira
- Grampear na dobra da encadernação
- Cortar nas linhas pontilhadas, para eliminar partes em branco

Instruções para imprimir o folder:

- Impressora colorida
- Nenhum para dimensionamento de pgs
- Imprimir nos dois lados
- Dobrar na borda horizontal
- Clicar em Sim para mensagem de mar