



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Japão: desastre nuclear

Prof. Paulo Q. Marques
pmarx@iq.usp.br



Antecedentes

Primeira fissão nuclear, Alemanha – dez. 1938, Otto Hahn e Fritz Strassmann;

Chicago Pile 1, Chicago , EUA – 2 dez. 1945, 1ª reação nuclear artificial auto-sustentada;

Projeto Manhattan, 1941-45, 250 mil pessoas, US\$ 2 bilhões.

- detonação experimental: 16/7/45, *Trinity Test*, 16 julho 1945, deserto Alamogordo (New Mexico- EUA, *Jornada del Muerto*), 16 jul. 1945:
- 06/8/45, Hiroshima, U enriquecido a 80%, 14 KT, com morte imediata de 70 a 250 mil pessoas; até 31/12/45 morreram mais 80 mil por radiação residual.
- 09/8/45, Nagasáqui, Pu, 20 KT, 20 mil mortos instantaneamente + 71 mil até dez. → *hibakusha* (vítima das bombas).

*Se a luz de mil sóis
Brilhasse de uma vez no céu
Seria equivalente ao esplendor do Todo Poderoso*

*Eu me tornei morte
Destruidor de mundos*

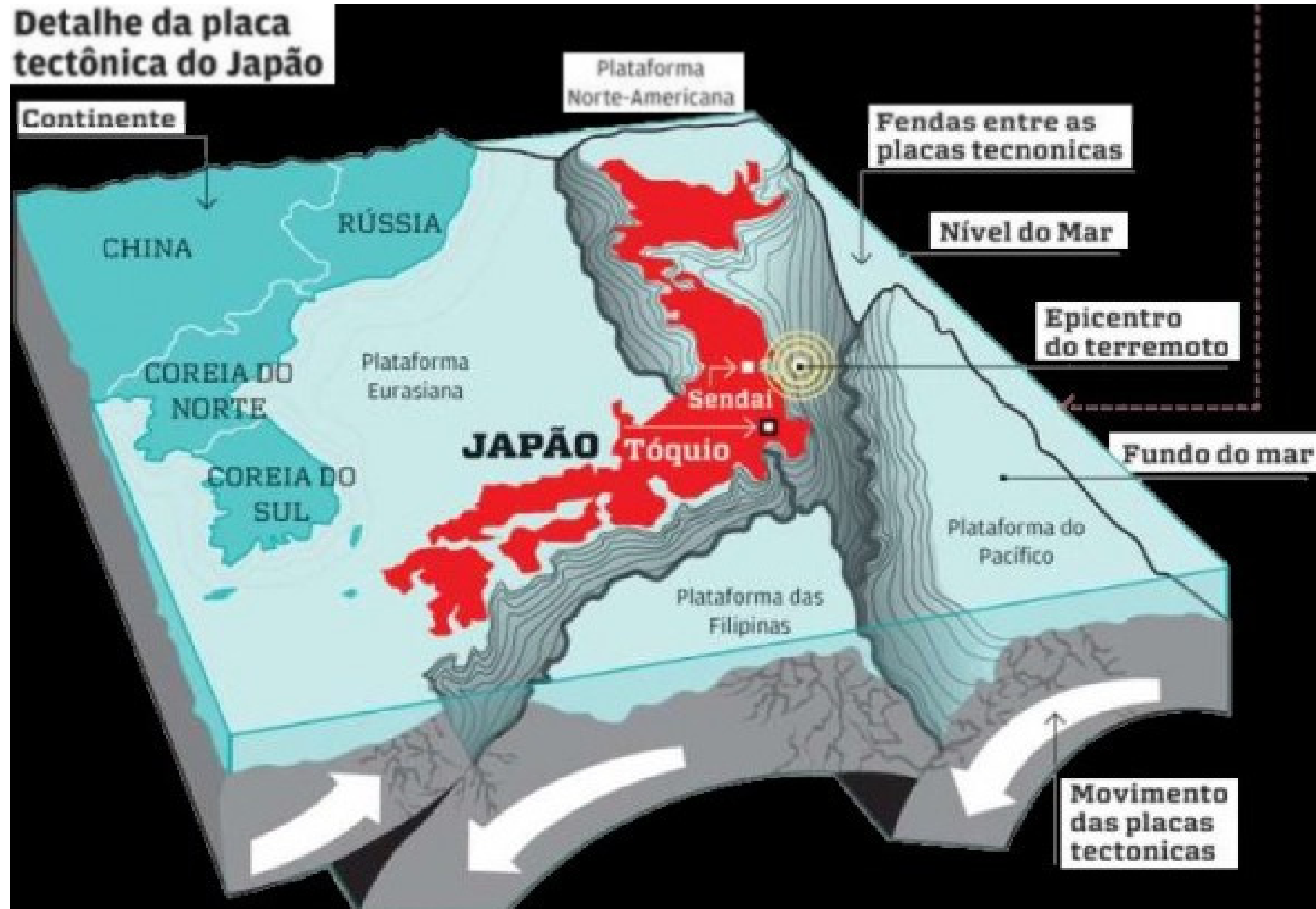
Bhagavat-Gita, livro sagrado hindu [canto 11, verso 12], lembrados pelo físico Robert Oppenheimer ao assistir a explosão da primeira bomba atômica em 16 de julho de 1945.

artefatos nucleares

≠

centrais nucleares

Placas tectônicas do Japão



Acontecimentos Fukushima

(11/03/2011)

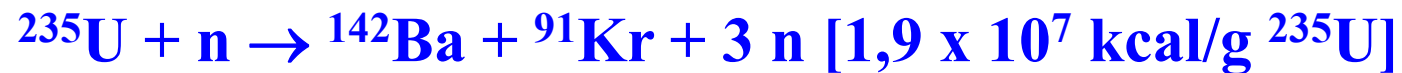
Após o terremoto de magnitude 9, os reatores 1, 2 e 3 pararam, como estava previsto. A planta ficou sem energia elétrica e passou a entrar em ação a refrigeração de emergência, produzida por geradores a diesel.

Minutos depois ocorreu o tsunami, inutilizando os geradores a diesel usados para refrigerar a central e com isto vapores radiativos começaram a se acumular. Foram iniciadas manobras para liberar gases. Procedimento adequado já que é melhor liberar gases radioativos de forma controlada a deixar que a pressão no núcleo aumente de forma descontrolada, o que poderia ocasionar explosão.

Entre os gases liberados à alta temperatura encontra-se o $H_2(g)$, que explode em contato com o oxigênio do ar. Os gases ficaram contidos no vaso de contenção do reator, causando as explosões que destroçaram as centrais. Faltaram recombinadores de hidrogênio, ou um sistema de injeção de nitrogênio. Além disso, acima do núcleo destas usinas nucleares (BWR) estão as piscinas com combustível usado (altamente radiativo).

BWR = Boiling Water Reactor

Ao ser bombardeado por nêutrons, o urânio 235 gera como subprodutos de fissão, dentre outros, o bário 142 e o criptônio 91, acrescidos da liberação de outros três nêutrons e geração de energia sob forma de calor. Então:



Os nêutrons liberados colidem com outros átomos de urânio 235, que acabam por sustentar a chamada reação em cadeia.

São produzidos cerca de 30 produtos primários de fissão, com meias-vidas que variam de 30 segundos (ródio 106) a 30 anos (césio 137).

Ao menos uma das unidades do complexo nuclear de Daiichi-Fukushima emprega a mistura de óxidos (*MOX*) como combustível. O *MOX* é o combustível no qual um dos constituintes é o plutônio, em proporção variável entre 3 e 10%.

O plutônio é um elemento químico pesado, artificial e que foi criado em 1940 como subproduto do processamento de urânio pelas usinas nucleares. Os mais perigosos são:

- Plutônio 238 (meia-vida de 88 anos)
- Plutônio 239 (meia-vida de 24.000 anos).

Inalação ou ingestão de um milionésimo de grama do plutônio 239 é simplesmente fatal.

Principais produtos primários de fissão

Isótopo	Meia-vida
Estrôncio 89	53 dias
Estrôncio 90	28 anos
Ítrio 90	64,2 h
Ítrio 91	57 dias
Zircônio 95	65 dias
Nióbio 95	35 dias
Molibdênio 99	68,3 h
Rutênio 103	39,8 dias
Rutênio 106	1 ano
Ródio 103	57 min
Ródio 106	30 s
Telúrio 132	77,7 h
Xenônio 133	5,27 dias

Isótopo	Meia-vida
Iodo 131	8,1 dias
Iodo 132	2,4 h
Césio 137	30 anos
Bário 137	2,6 min
Bário 140	12,8 dias
Lantânio 140	40 h
Cério 141	32,5 dias
Cério 144	290 dias
Praseodímio 143	13,7 dias
Praseodímio 144	17,5 min
Neodímio 147	11 dias
Promécio 147	2,6 anos
Promécio 149	54 h

Efeitos da radiação nuclear



Explosão do reator de Fukushima
(radiosim.sapo.pt)

- ⇒ Todos os seres vivos absorvem níveis baixos de radiação. Parte delas provêm do próprio ambiente, o restante de exames e procedimentos médicos.
- ⇒ Em doses controladas a radiação ajuda a tratar tumores (radioterapia).
- ⇒ Níveis altos de emissão descontrolada (sobretudo pela exposição à radiação gama e a elétrons ionizantes) podem levar à morte.

Os efeitos mais observados...

Em nível celular: mutações nas células, que podem levar ao câncer.

No corpo em geral: fadiga.

Na pele: queimaduras e perda de pelos e cabelo.

Nos olhos: catarata e cegueira.

Na tireóide e no sistema linfático em geral: cânceres decorrentes da absorção do iodo -131, que apresenta meia-vida de 8,1 dias.

Nos pulmões: fixação de plutônio nos tecidos, que pode levar a tumores e a fibroses.

...Os efeitos mais observados

No sistema digestivo: mal-estar, enjôo, diarreia, vômitos e sangramentos.

Na medula: queda de 50% nos glóbulos brancos. Cresce o risco do aparecimento de infecções - leucemia.

No sistema reprodutor:

Mulher - aumento do risco de abortos e de anomalias em bebês.

Homem - aumento na chance de infertilidade (mulher).

As células reprodutoras poderão sofrer alterações na base do DNA, fazendo com que informações erradas sejam transmitidas aos descendentes.

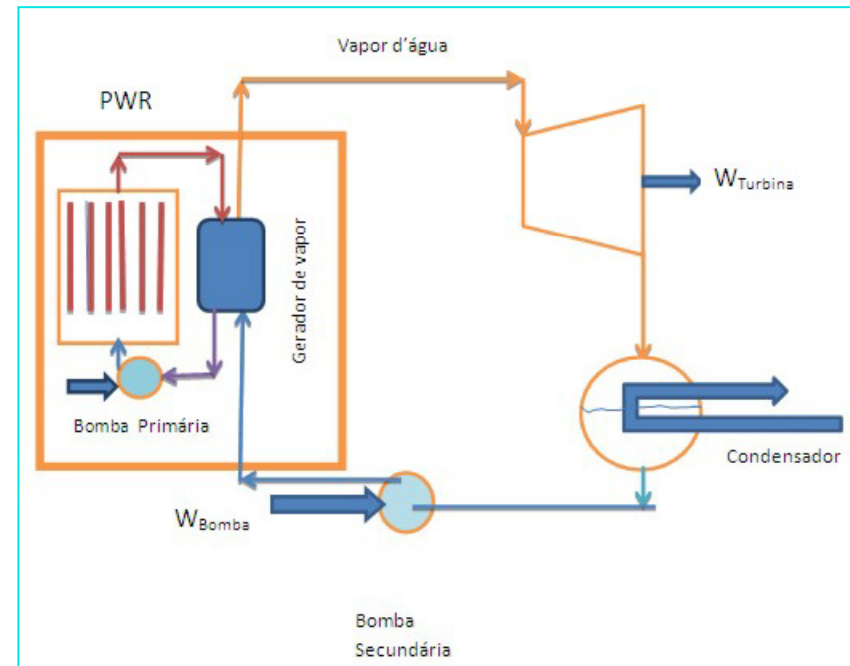
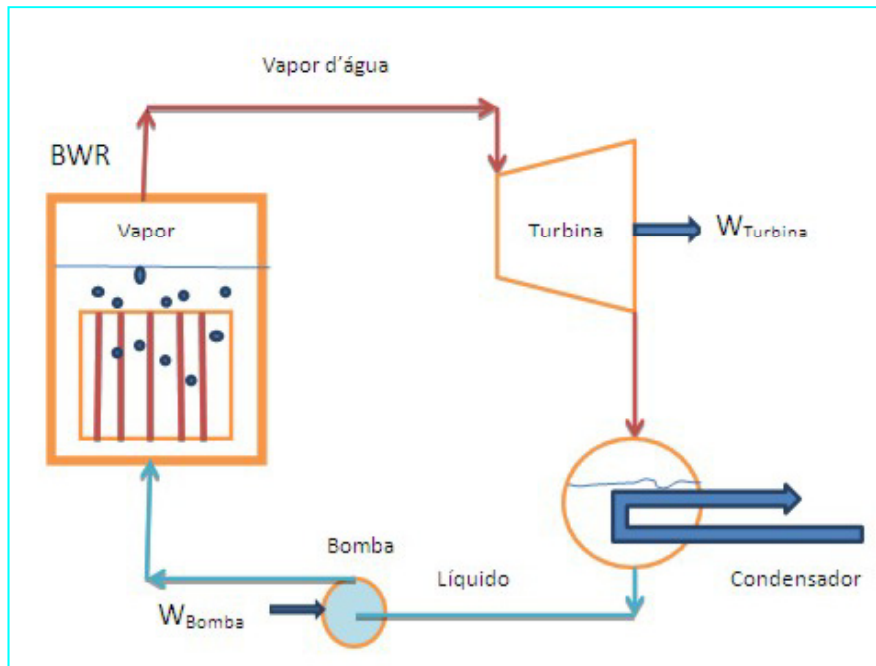
Descontaminação dos isótopos mais danosos aos seres vivos

Iodo 131 – ingestão de iodeto de potássio, pois saturado de iodo estável (o 127) o corpo humano excreta o iodo radiativo pelo suor, urina e fezes.

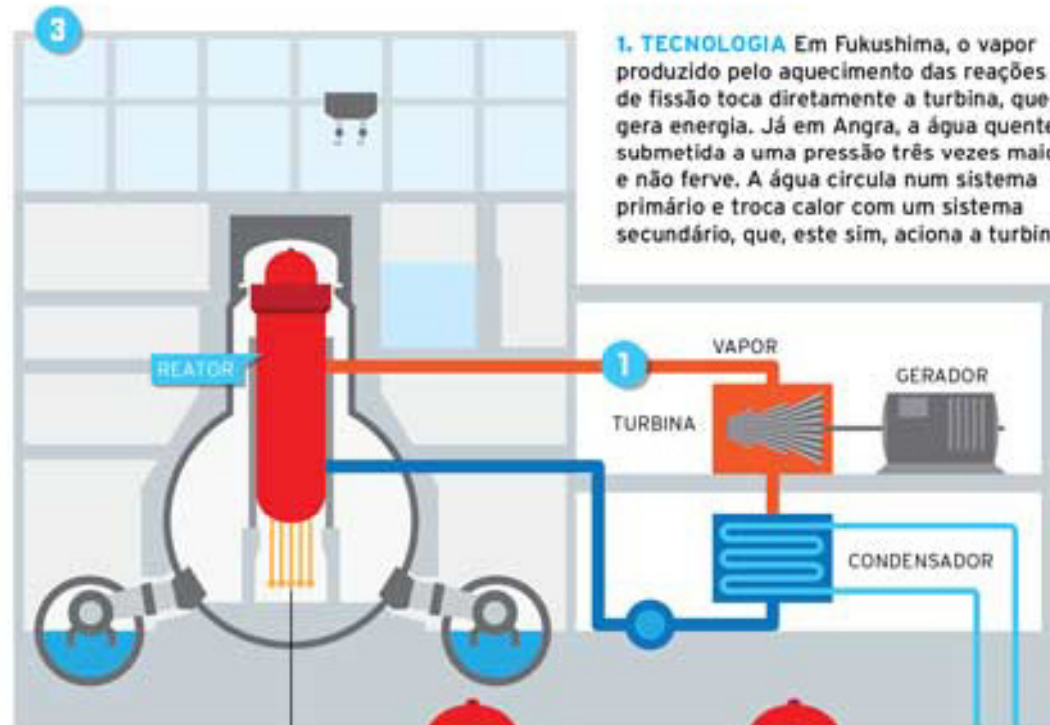
Césio 137 – emprego de um complexo ferrocianeto de ferro (azul da Prússia) como agente quelante para formar precipitado de cor castanha, o que comprova a eficiência do método.

Plutônios 238 e 239 – inexistente solução (não se pode acelerar o processo de decaimento radiativo, exceto respeitar o seu tempo de meia-vida).

Esquemas BWR/PWR

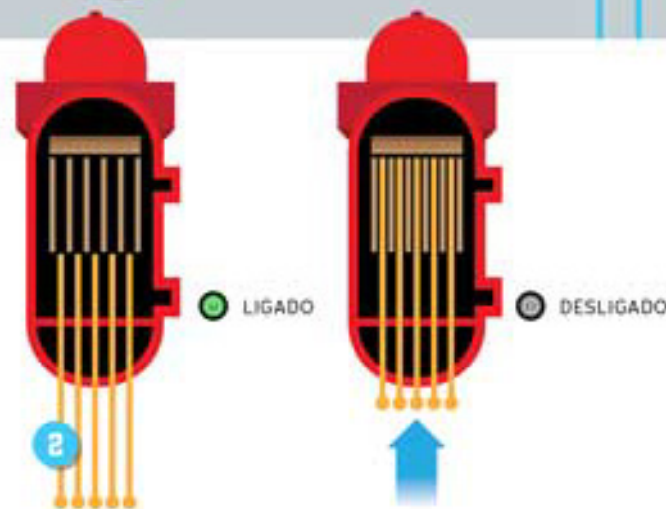


FUKUSHIMA - Reator de água leve fervente (BWR)

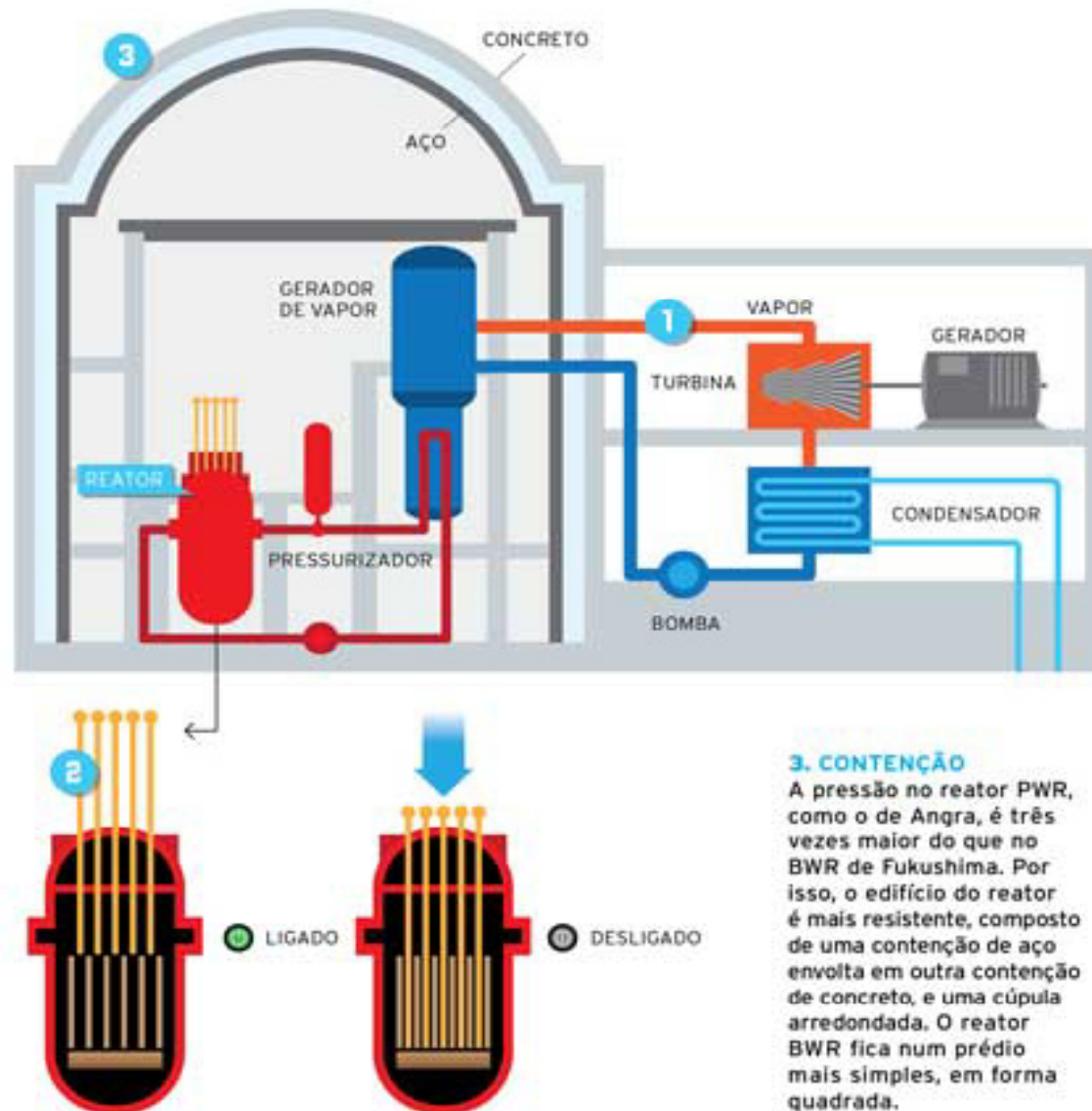


1. TECNOLOGIA Em Fukushima, o vapor produzido pelo aquecimento das reações de fissão toca diretamente a turbina, que gera energia. Já em Angra, a água quente é submetida a uma pressão três vezes maior e não ferve. A água circula num sistema primário e troca calor com um sistema secundário, que, este sim, aciona a turbina.

2. SEGURANÇA
As barras de controle para desligamento do reator de Fukushima precisam ser acionadas de baixo para cima, enquanto no modelo alemão de Angra as barras caem automaticamente com a força da gravidade sem precisar de energia.



ANGRA - Reator de água leve pressurizada (PWR)



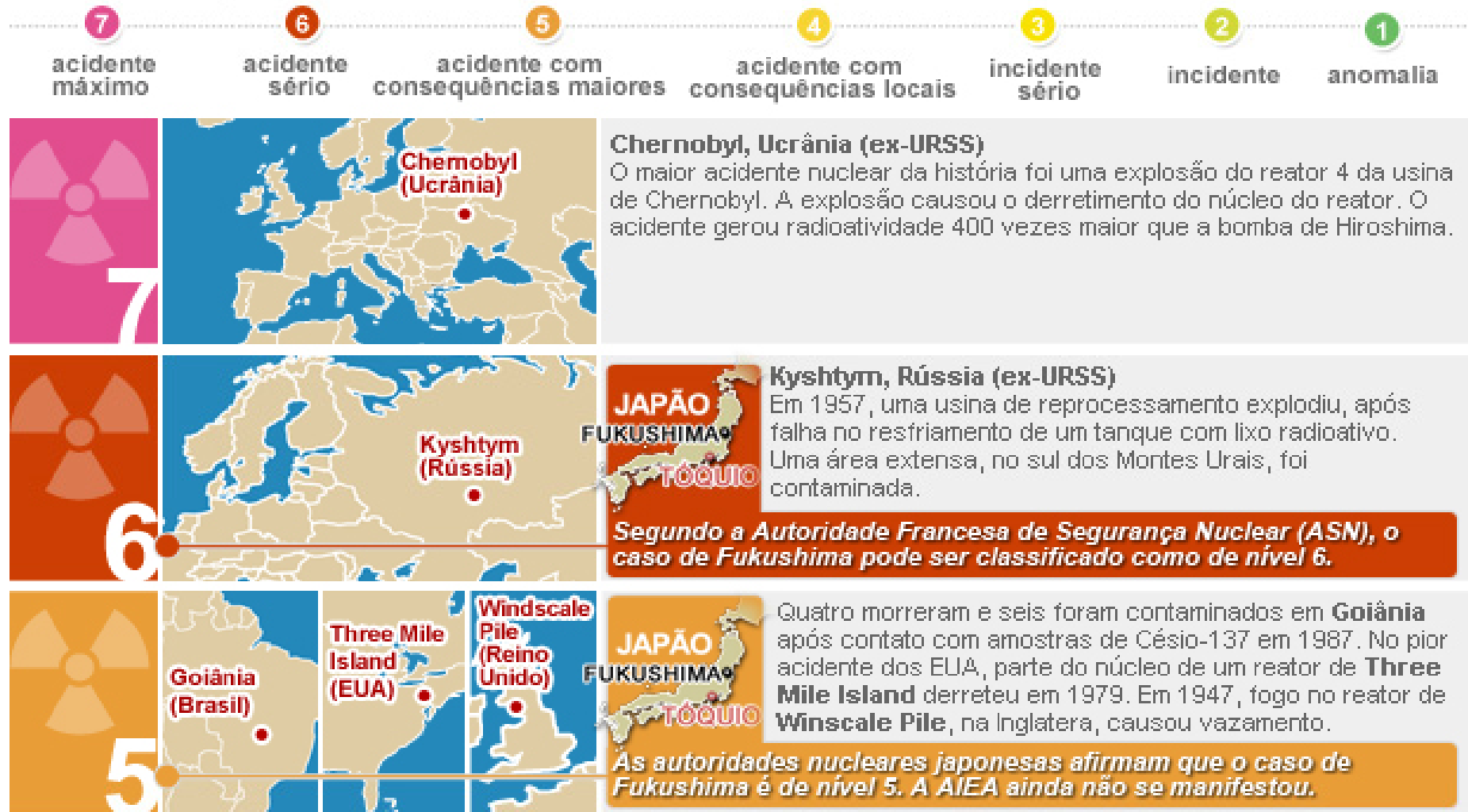
- No reator **BWR** o resfriamento das varetas de combustível é expandido na turbina acionadora do gerador elétrico, enquanto no reator **PWR** há um circuito primário de circulação de água refrigerante a alta pressão que não se vaporiza no núcleo do reator.

-O vapor que se expande na turbina no caso do **PWR** não é radioativo. Ao contrário do vapor produzido no **BWR**, já que o circuito primário fica totalmente isolado pelas paredes de contenção do reator. Há, portanto, grau de segurança mais elevado nas centrais do tipo **PWR**.

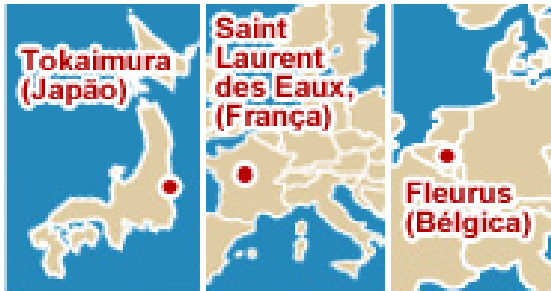
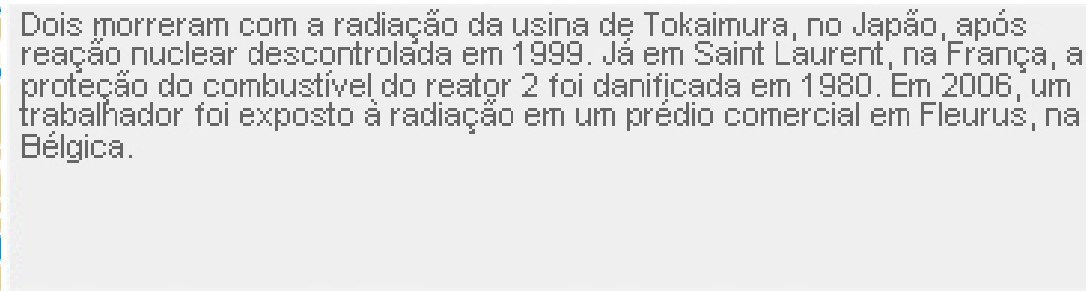
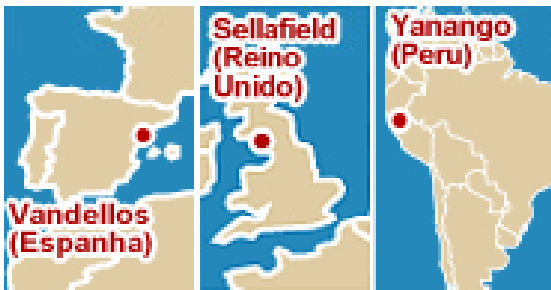
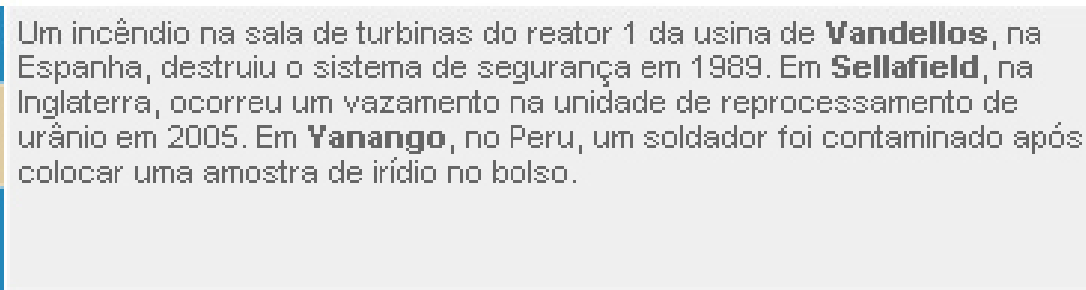
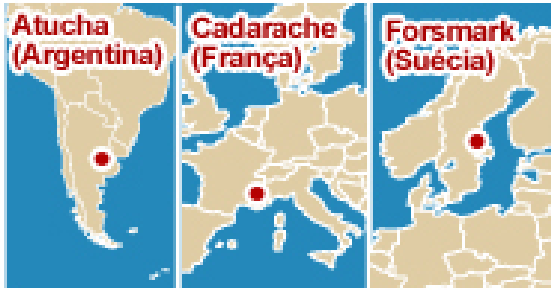
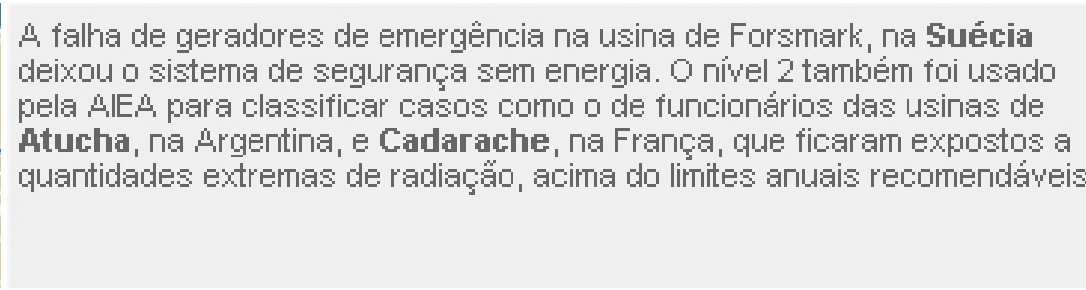

BWR = *Boiling Water Reactor*
PWR = *Pressurized Water Reactor*

Acidentes nucleares

Níveis de radiação:



Acidentes nucleares...

4	 <p>Tokaimura (Japão)</p> <p>Saint Laurent des Eaux, (França)</p>	 <p>Fleurus (Bélgica)</p> <p>Dois morreram com a radiação da usina de Tokaimura, no Japão, após reação nuclear descontrolada em 1999. Já em Saint Laurent, na França, a proteção do combustível do reator 2 foi danificada em 1980. Em 2006, um trabalhador foi exposto à radiação em um prédio comercial em Fleurus, na Bélgica.</p>
3	 <p>Vandellos (Espanha)</p> <p>Sellafield (Reino Unido)</p>	 <p>Yanango (Peru)</p> <p>Um incêndio na sala de turbinas do reator 1 da usina de Vandellos, na Espanha, destruiu o sistema de segurança em 1989. Em Sellafield, na Inglaterra, ocorreu um vazamento na unidade de reprocessamento de urânio em 2005. Em Yanango, no Peru, um soldador foi contaminado após colocar uma amostra de irídio no bolso.</p>
2	 <p>Atucha (Argentina)</p> <p>Cadarache (França)</p>	 <p>Forsmark (Suécia)</p> <p>A falha de geradores de emergência na usina de Forsmark, na Suécia deixou o sistema de segurança sem energia. O nível 2 também foi usado pela AIEA para classificar casos como o de funcionários das usinas de Atucha, na Argentina, e Cadarache, na França, que ficaram expostos a quantidades extremas de radiação, acima do limites anuais recomendáveis.</p>
1		<p>Acontecimentos dentro deste nível não afetam a população e o meio ambiente, além de não comprometerem os sistemas de segurança das instalações nucleares. Abaixo dele ainda existe um nível zero, usado quando um evento não causa nenhuma mudança na segurança e não traz nenhum risco à população local.</p>

1) **Tchernobil (1986)** — O reator da usina de Tchernobil, na Ucrânia, explodiu durante teste de segurança, causando a maior catástrofe nuclear civil da história e deixando mais de 25 mil mortos. O acidente recebeu a classificação de nível máxima, 7. O combustível nuclear queimou durante 10 dias, jogando na atmosfera radionuclídeos de intensidade equivalente a 200 bombas atômicas de Hiroshima. Três quartos da Europa foram contaminados.

2) **EUA (1979)** — Em Three Mile Island (Pensilvânia), falha humana impediu o resfriamento normal do reator. Os dejetos radioativos provocaram enorme contaminação no interior do recinto, destruindo 70% do núcleo do reator. Cerca de 140 mil pessoas foram evacuadas do local. O acidente foi classificado no nível 5.

3) **Japão (2011)** — Terremoto de 9 pontos da Escala Richter que atingiu o Japão, causou estragos na usina nuclear Daiichi, em Fukushima onde explosões em três dos seis reatores da usina deixaram escapar radiação classificado no nível 5.

4) **EUA (1979)** — Vazamento de urânio em instalação nuclear secreta perto de Erwin (Tennessee) contaminou cerca de mil pessoas.

5) **Japão (1981)** — Quatro vazamentos radioativos na usina nuclear de Tsuruga, uma cidade na província de Fukui, a 300 quilômetros de Tóquio, deixaram 278 pessoas contaminadas por radiação.

6) **Rússia (1993)** — Explosão na usina de reprocessamento de combustível em Tomsk-7, cidade secreta da Sibéria Ocidental, provocou projeção de matérias radioativas no ambiente. O número de vítimas é desconhecido.

7) **Japão (1997)** — Usina experimental de reprocessamento de Tokai (nordeste de Tóquio) foi paralisada depois de explosão que contaminou 37 pessoas.

8) **Japão (1999)** — Tokai voltou a ser palco de um novo acidente nuclear devido a erro humano, provocando a morte de dois técnicos. Mais de 600 pessoas foram contaminadas e 320 mil pessoas foram evacuadas.

9) **Japão (2004)** — Na usina nuclear de Mihama, vapores não-radioativos vazaram por um encanamento que se rompeu em seguida em virtude de uma grande corrosão, provocando a morte de cinco funcionários.

10) **França (2008)** — Na manutenção dos reatores da usina nuclear de Tricastin, substâncias radioativas vazaram, contaminando levemente uma centena de funcionários. As substâncias chegaram atingir dois rios próximos ao local. Foi proibido o consumo de água e a prática de pesca.

O indescartável descarte do lixo atômico

Os rejeitos nucleares são classificados em 3 tipos:

- 1) **HLW** (*High Level Waste*), que é o combustível irradiado pelo núcleo.
- 2) **ILW** (*Intermediate Level Waste*), representado pelo material metálico que entrou em contato com o combustível nuclear ou com o reator.
- 3) **LLW** (*Low Level Waste*), que engloba as roupas de proteção, equipamentos de laboratório ou algum outro material que tenha tido contato com o material radiativo.

Sepultamento do lixo de alta radiatividade (HL W)

- 1) Confinamento em local blindado e isolado por milhares de anos até o decaimento da meia-vida do Pu-239 (240 séculos).
- 2) Soluções temporárias: (a) deposição em estruturas geológicas antigas e estáveis (é o caso da Alemanha, que os confina em minas abandonadas de sal); (b) compactação e confinamento em túneis de concreto e aço, construídos em regiões desérticas e distantes de zonas habitadas (exemplo: *Yucca Mountain*, no Estado norte-americano de Nevada e que dista 100 quilômetros de área povoada).
- 3) Já existiram estudos para lançá-lo através de foguetes ao espaço sideral, onde a radiatividade é mais intensa ainda. Isto esbarra, contudo, na baixa confiabilidade do lançamento de espaçonaves (em 1985, 30 segundos após o lançamento de foguete da missão tripulada *Challenger* explodiu matando todos os seus tripulantes).

Situação em Angra

- Os resíduos de baixa radiatividade (na maior parte luvas e equipamentos contaminados), são guardados em contêineres alojados em galpões de concreto construídos em prédio anexo às usinas.
- Os de média atividade também ficam em galpões, mas recebem tratamento especial. "Garras" de metal empilham os recipientes que armazenam os líquidos do circuito fechado que passam pelos reatores, em galpões envoltos por concreto. O operador destas "garras" fica em uma antessala protegida por vidros reforçados por chumbo para evitar contato com a radiação.
- Os rejeitos de alta radiatividade, constituídos pelo combustível nuclear após sua utilização, são armazenados em uma "piscina" junto aos reatores. Embora alguns países reutilizem este tipo de rejeito, o Brasil diz ainda não ter planejado reciclá-lo. O certo é que esse tipo de material deve permanecer com a usina permanentemente e sob cuidado, mesmo depois de ela ter sido descomissionada (o que no jargão técnico significa ser desativada).

Governo alemão decide eliminar energia nuclear até 2022

A coalizão da chanceler alemã, Angela Merkel, decidiu no dia 30 de maio de 2011 que o país deverá desligar os seus reatores nucleares até 2022.



Ativistas do Greenpeace penduraram banner no Portão de Brandeburgo (Foto: Tobias Schwarz/Reuters)

Perspectivas

Salvo falhas humanas e desastres naturais, a produção termonuclear é segura e eficiente.

O nó górdio é a produção do lixo atômico, cuja deposição final não encontra no mundo todo uma solução técnica segura e definitiva.

Solução técnica para países que não dispõem de outras opções energéticas, o que não é o caso do nosso País. Aqui no Brasil, o custo da geração hidrelétrica é da ordem de 33 mills/kWh (média Cesp), contra 140 mills/kWh nucleares (sem computar o custo do descomissionamento das plantas atômicas).

O que se postula no caso brasileiro é que o governo federal central não vergue ao renitente *lobby* nuclear exercido pelos nucleopatas ou nuclealoopados encastelados no poder público.

Perspectivas...

Hoje a geração termonuclear participa com cerca de 2% da oferta de energia elétrica ao País. Além de aproveitamentos hídricos (com o *fuel* de custo zero - água das chuvas), contamos com abundância de fontes renováveis, representadas pela geração solar, biomassas, eólica e maremotriz.

Do ponto de vista estritamente energético é absolutamente desnecessário investirmos na fissão nuclear, que se mostrou problemática desde os anos 70 da última década. Como, aliás, demonstra sobejamente (e dentre outros) o atual infortúnio nuclear do Japão.

Bibliografia

- [1] Biasi, Renato de. *A energia nuclear no Brasil*. Rio de Janeiro, Atlântida, 1979.
- [2] Dias Jr., José A. & Roubicek, Rafael. *O brilho de mil sóis: história da bomba atômica*. 6 ed. São Paulo, Ática, 2005.
- [3] Goldemberg, José. *O que é energia nuclear*. São Paulo, Brasiliense, 1980.
- [4] Marques, Paulo Q. *Sofismas nucleares: o jogo das trapaças na política nuclear do País*. São Paulo, Hucitec, 1992.
- [5] Pringle, Peter & Spigelman, James. *The nuclear barons*. New York, Avon Books, 1983.
- [6] Rosa, Luís P. *A política nuclear e o caminho das armas atômicas*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 1985.

Agradecimentos

- Departamento de Engenharia de Produção da EPUSP, na pessoa da Profa. Uiara Montedo;

- Escola Politécnica que foi a minha própria casa ao longo de três anos (1987-89), quando aluno de pós-graduação e assessor do então diretor, Prof. Décio Leal de Zagottis.