



Instituto de Energia e Ambiente - IEE
Universidade de São Paulo - USP
Prof. Célio Bermann

PEN 5002 – Recursos e Oferta de Energia

8a. aula – 26/05: Energia Nuclear

- . etapas da produção do combustível nuclear**
- . características dos reatores para geração elétrica**
- . radiações ionizantes: aspectos sócio-ambientais**

- . Grupo de alunos: quantidades envolvidas: reservas estimadas (mundial, ALC e Brasil)**

Roteiro da Aula:

- Fundamentos:

- fissão nuclear**
- ciclo do combustível nuclear**
 - . características da fabricação do combustível nuclear no Brasil**

- Aspectos tecnológicos da geração termonuclear:

- tipos de reatores**
- usina nuclear PWR**

► Apresentação do Grupo

- Aspectos sócio-ambientais da geração termonuclear

- radiações ionizantes**
- mensuração da radiação**
- disposição final dos rejeitos radioativos**
- aspectos de segurança na região de Angra dos Reis**
- o acidente da Usina de Chernobyl (1986)**

A energia nuclear

Os “combustíveis” nucleares são materiais constituídos de certos átomos com núcleos pesados de alta probabilidade de fissionar-se sob certas condições, liberando grande quantidade de energia.

URÂNIO - U₂₃₅ (0,7%) → (3,0%) (enriquecimento)

Eles armazenam a energia existente no núcleo dos átomos através das forças de coesão dos prótons e nêutrons.

A energia é liberada pelo bombardeio dos núcleos por nêutrons provocando a fissão dos mesmos.

Fissão

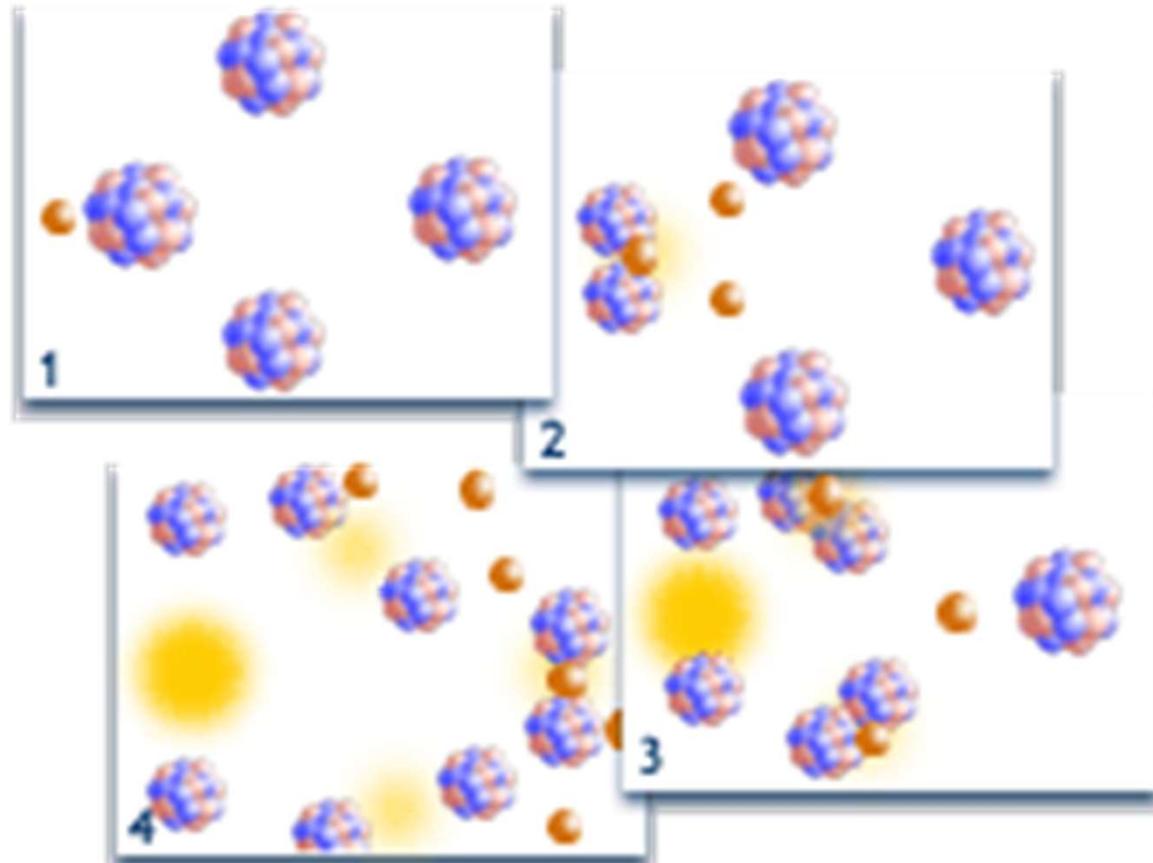


A energia que o núcleo do átomo possui, mantendo prótons e nêutrons juntos, denomina-se energia nuclear.

Quando um nêutron atinge o núcleo de um átomo de urânio-235, divide-o e ocorre a emissão de 2 a 3 nêutrons. Parte da energia que ligava os prótons e os nêutrons é liberada em forma de calor. Este processo é denominado fissão nuclear.

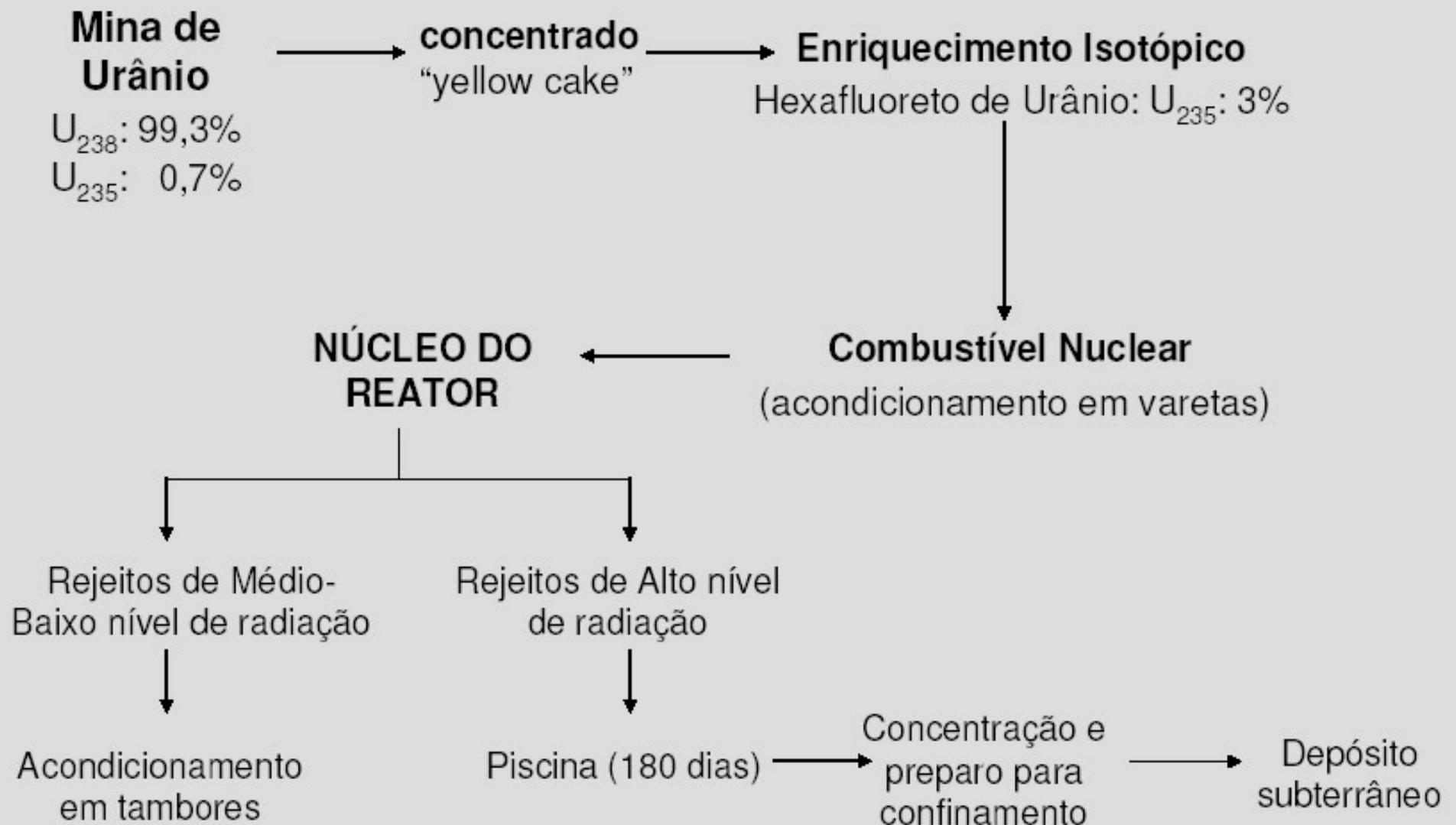
Fissão em Cadeia

Os nêutrons liberados na fissão atingem, sucessivamente, outros núcleos.



Na fissão nuclear em cadeia, há grande liberação de energia. Para suspender ou minimizar a reação, temos que "apreender" os nêutrons liberados, impedindo os choques sucessivos.

Ciclo do combustível nuclear



Ciclo do

Mineração: Atuais jazidas no Brasil: Lagoa Real (Caetité-BA) e Itataia (Santa Quitéria-CE) [Obs: Caldas (MG) - esgotada]. Na usina de beneficiamento, o urânio é extraído do minério, purificado e concentrado num sal de cor amarela ("yellowcake"). No Brasil, estas etapas são realizadas na Unidade de Lagoa Real (BA) das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), onde são produzidas cerca de 300 ton/ano de concentrado de urânio.

Mina de Urânio

 U_{238} : 99,3%

 U_{235} : 0,7%

concentrado
"yellow cake"

Enriquecimento Isotópico

Hexafluoreto de Urânio: U_{235} : 3%

NÚCLEO DO REATOR

Combustível Nuclear

(acondicionamento em varetas)

Rejeitos de Médio-Baixo nível de radiação

Rejeitos de Alto nível de radiação

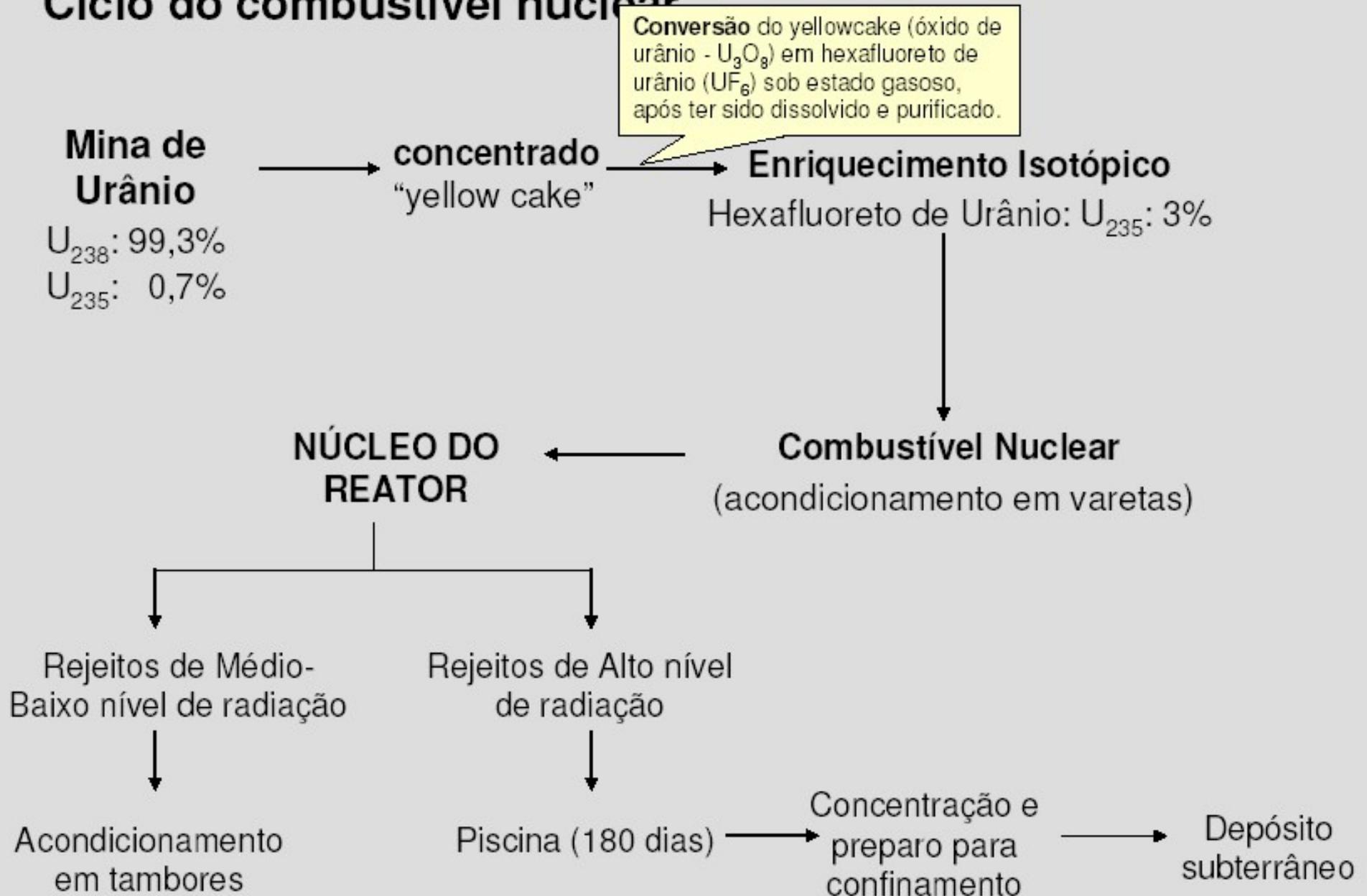
Acondicionamento em tambores

Piscina (180 dias)

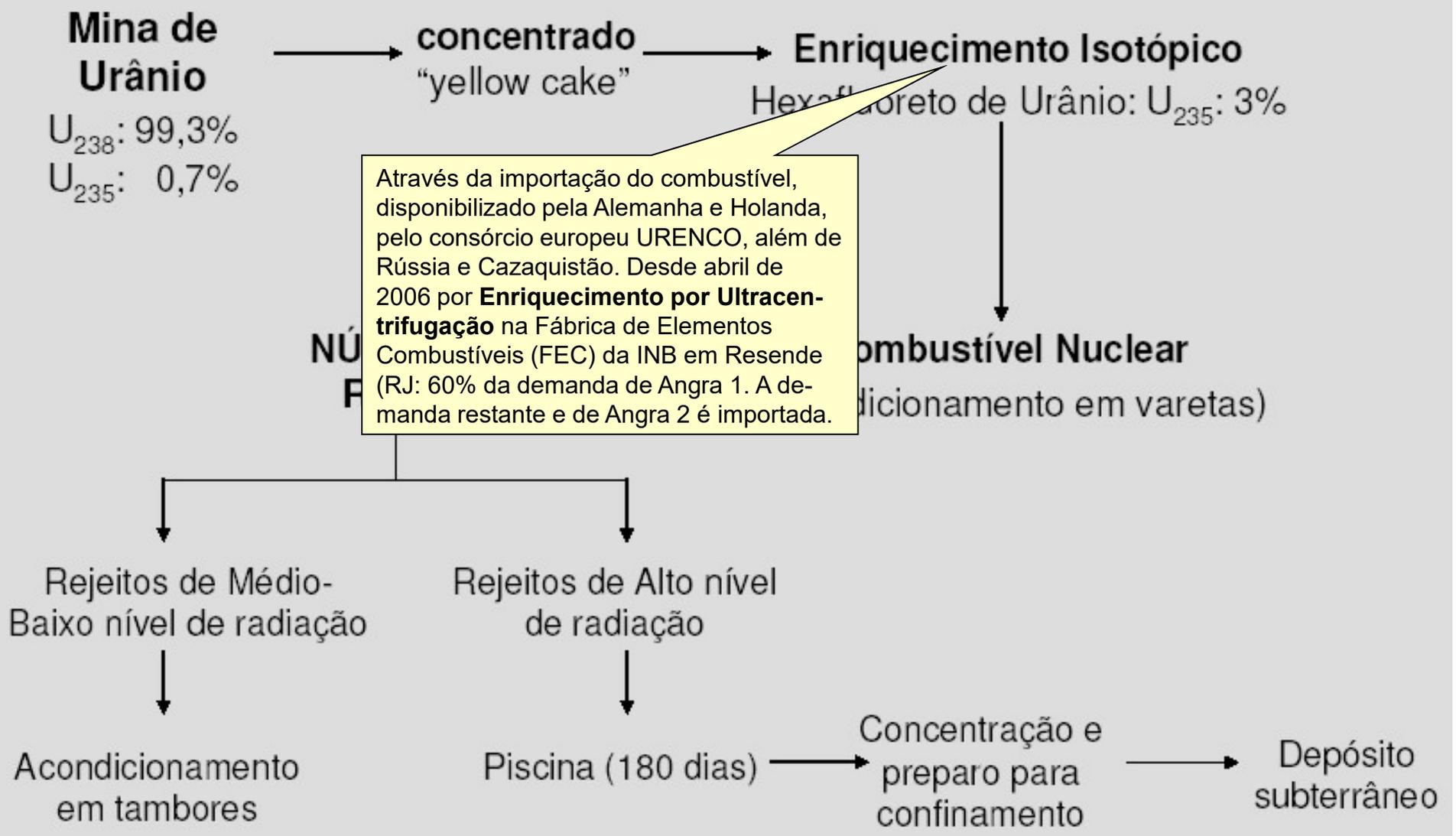
Concentração e preparo para confinamento

Depósito subterrâneo

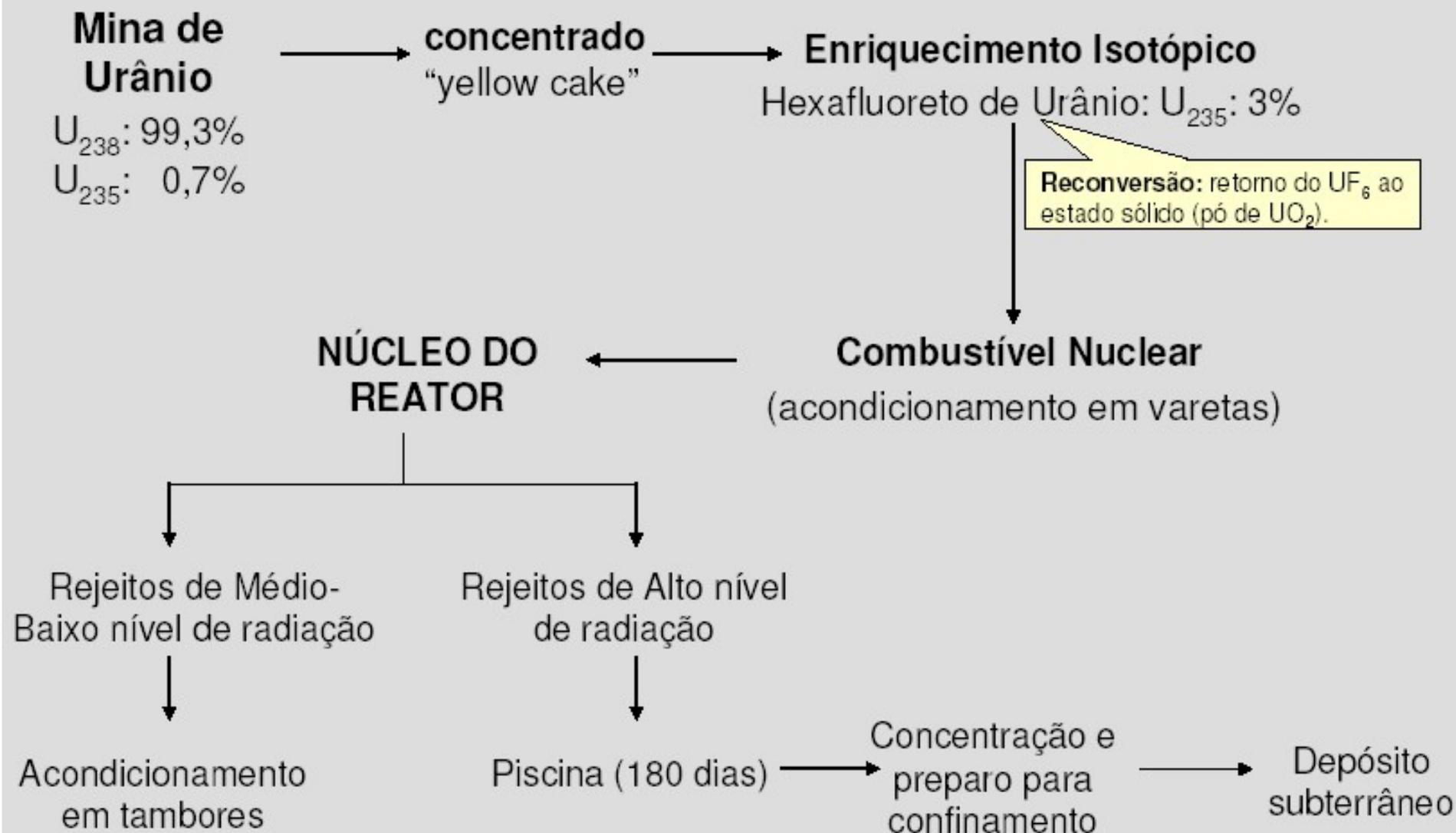
Ciclo do combustível nuclear



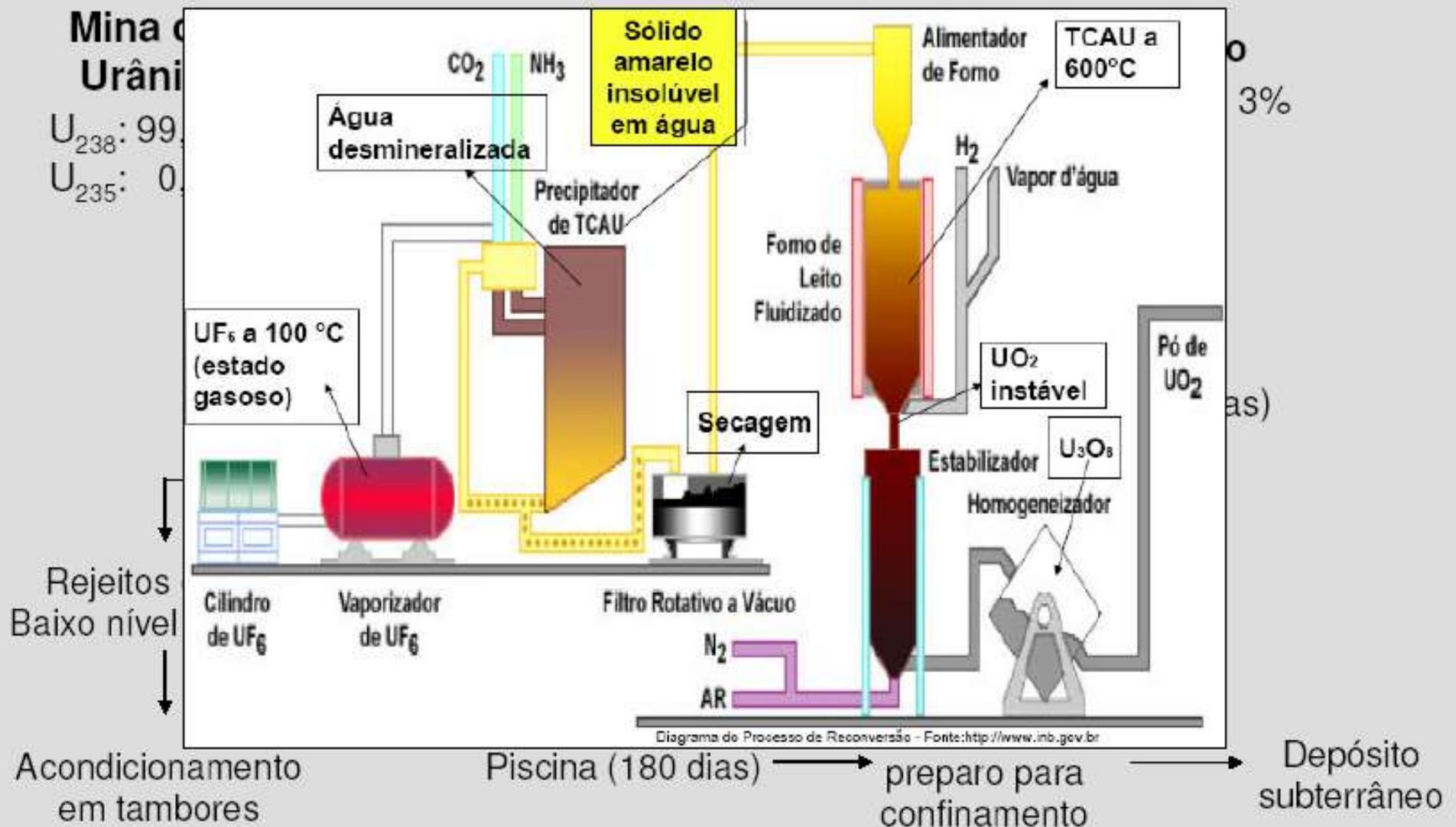
Ciclo do combustível nuclear



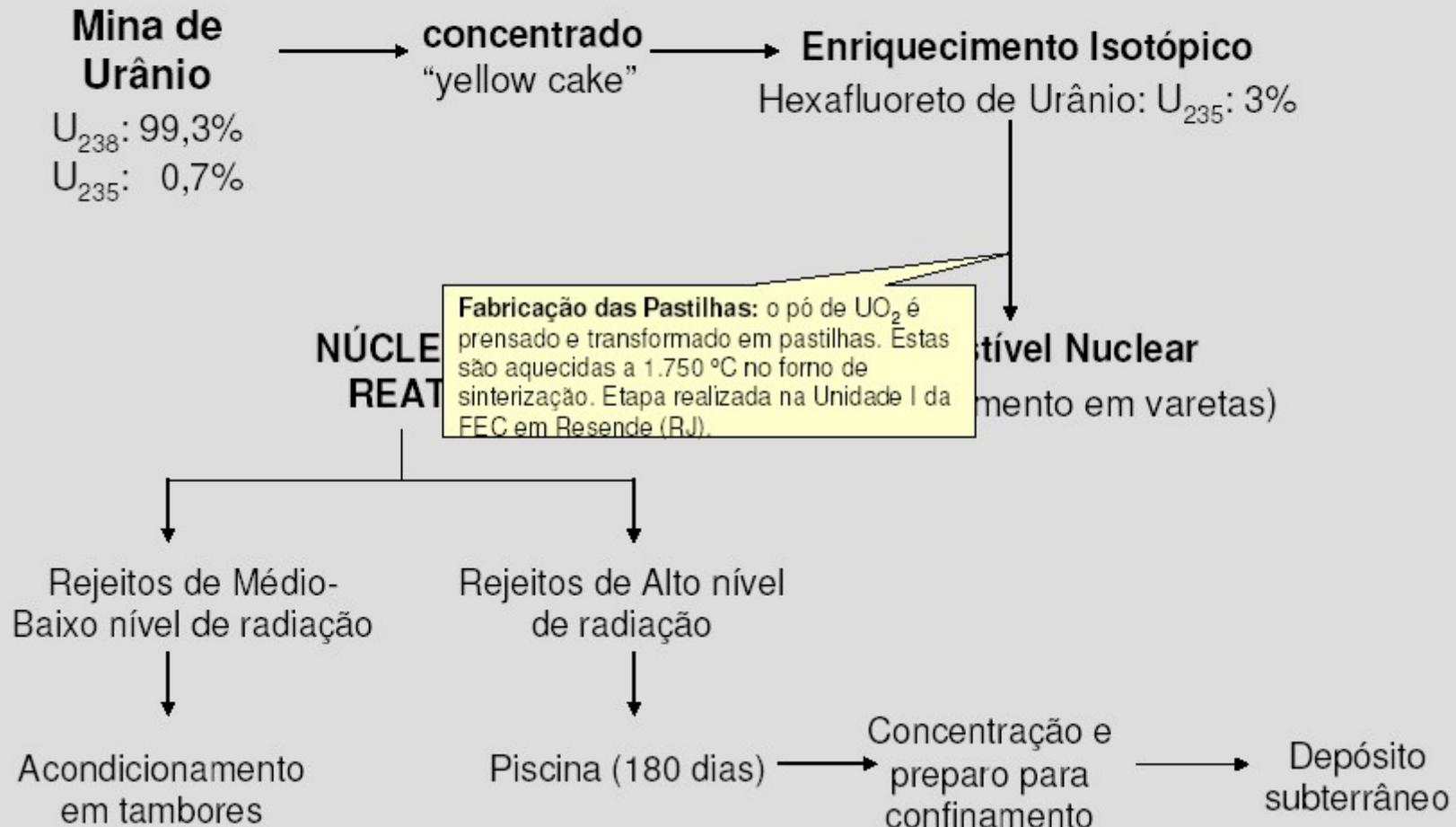
Ciclo do combustível nuclear



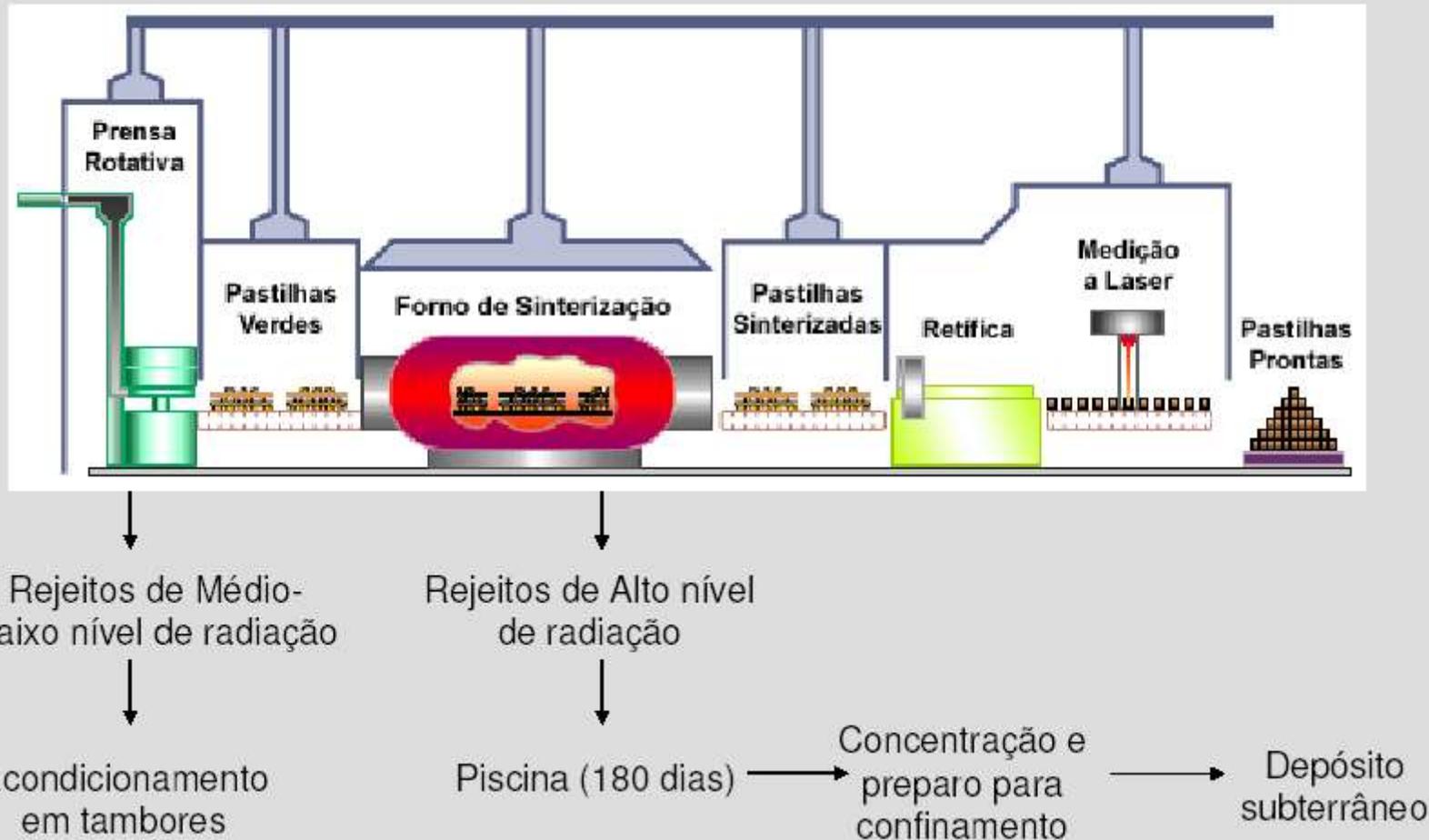
Ciclo do combustível nuclear



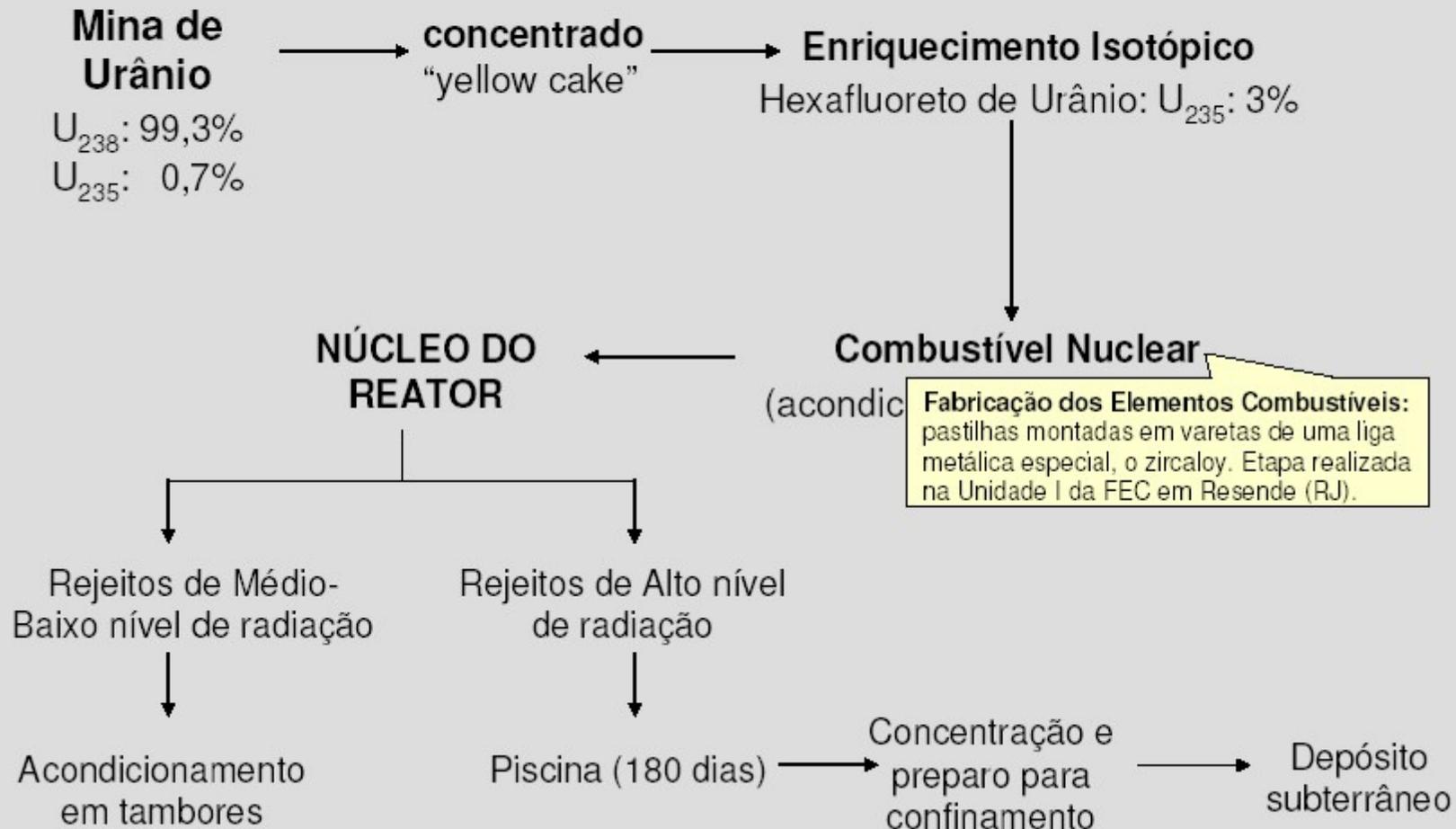
Ciclo do combustível nuclear



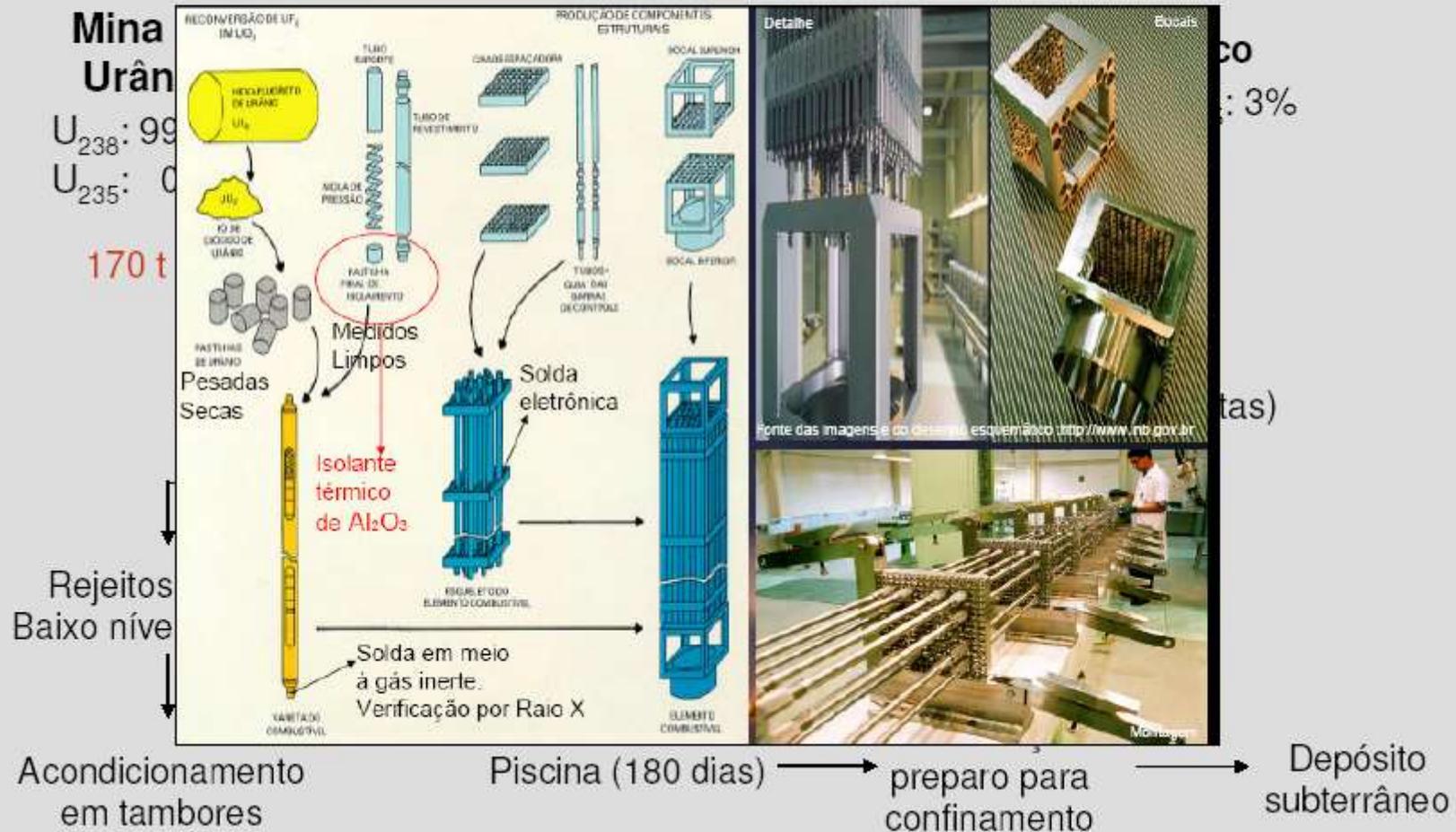
Ciclo do combustível nuclear



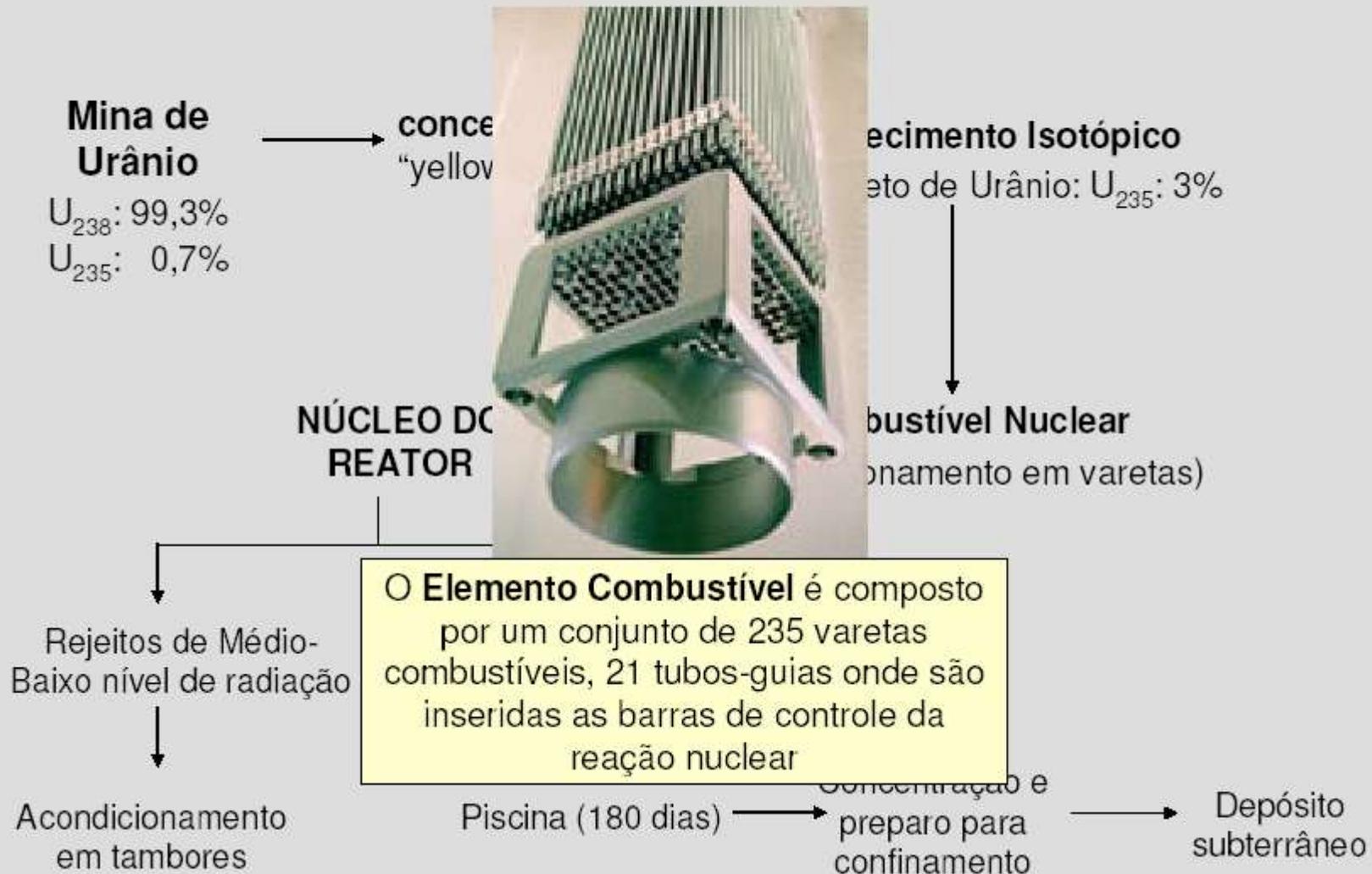
Ciclo do combustível nuclear



Ciclo do combustível nuclear

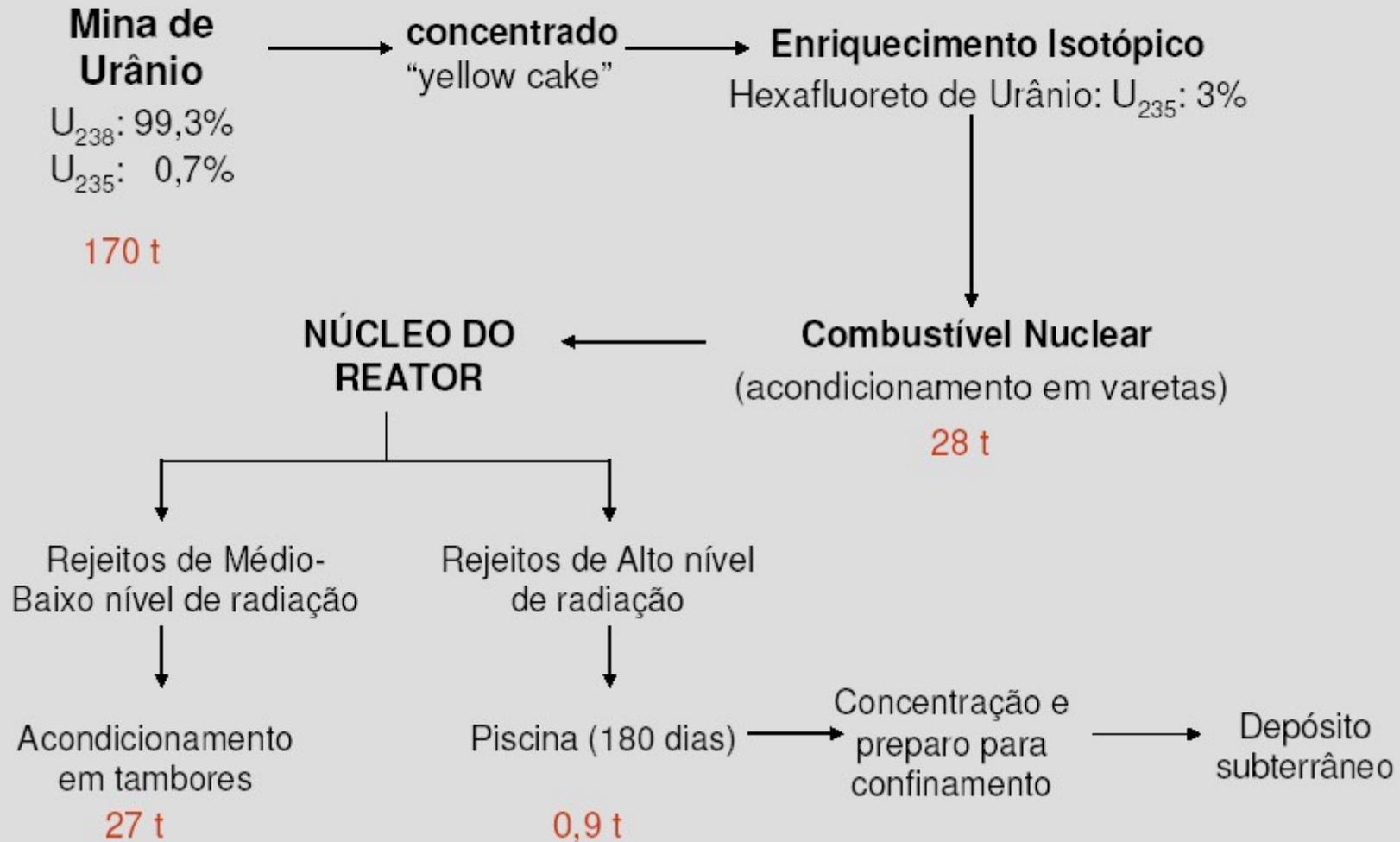


Ciclo do combustível nuclear

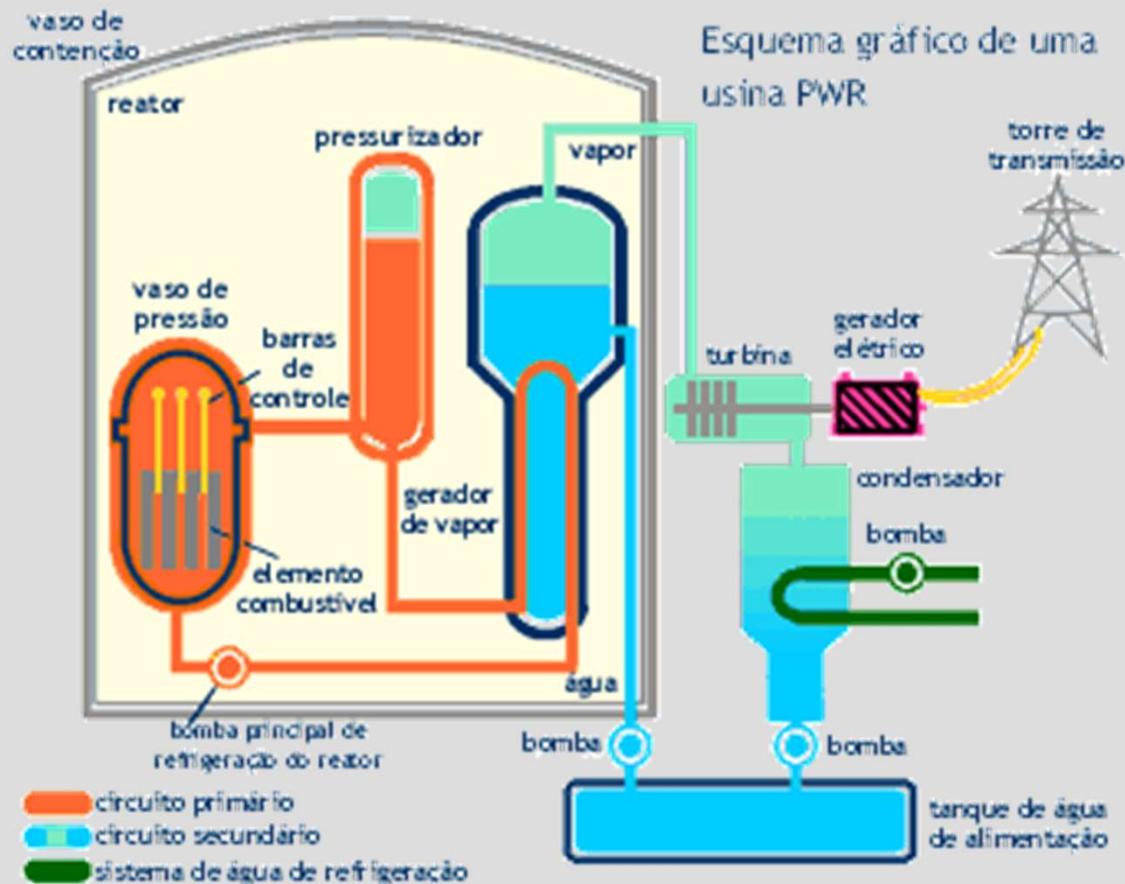


Ciclo do combustível nuclear

p/ Usina Nuclear de 1000 MWe
c/ fator de capacidade 80%



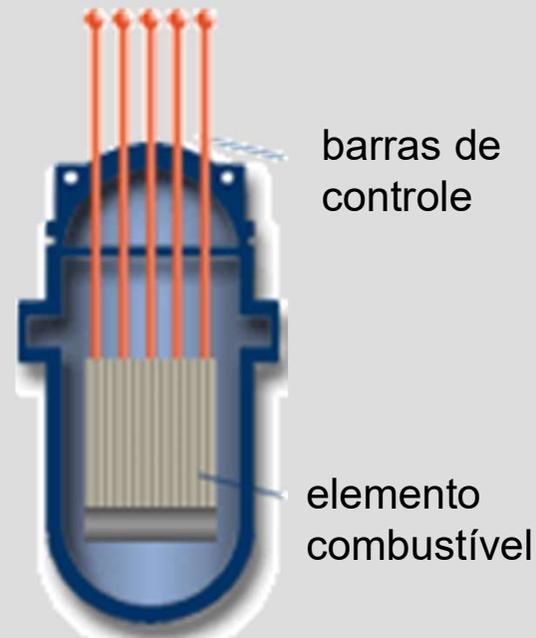
Usina Nuclear PWR



O vaso de pressão contém a água de refrigeração do núcleo do reator. Essa água circula quente por um gerador de vapor, em circuito fechado, chamado de circuito primário. A outra corrente de água que passa por esse gerador (circuito secundário) se transforma em vapor, acionando a turbina para a geração de eletricidade. Os dois circuitos não têm comunicação entre si.

Controle da Reação

Nos reatores nucleares, a reação acontece dentro de varetas que compõem uma estrutura chamada elemento combustível. Dentro do elemento combustível há também barras de controle, geralmente feitas de cádmio, material que absorve nêutrons. Estas barras controlam o processo



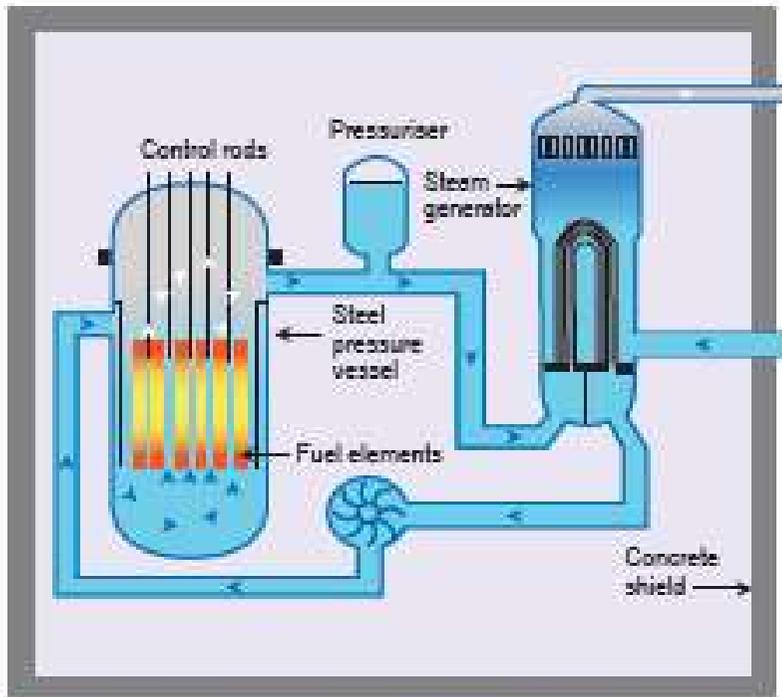
Quando as barras " entram totalmente " no elemento combustível, o reator pára; quando saem, ele é ativado.

Tipos de Reatores em Centrais Nucleares

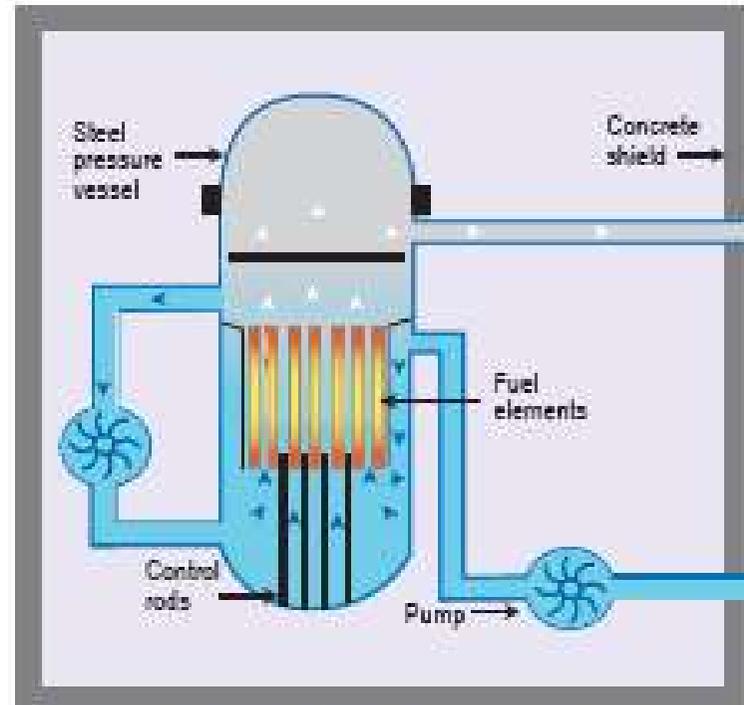
- Reatores a água pressurizada – PWR: (60% das usinas nucleares)
- Reatores a água fervente – BWR: (20% das usinas nucleares)
- Reatores a água pesada – PHWR: (10% das usinas nucleares)
- Reatores a gás - GCR
- Reatores refrigerados a metal líquido – LMRF: (Reatores Super Regeneradores Rápidos)

Tipos de Reatores em Centrais Nucleares

Tipo de Reator	Combust.	Refrigerante	Moderador	Nº oper.
Reator a Água Pressurizada – PWR	UO ₂	água	água	270
Reator a Água Fervente – BWR	UO ₂	água	água	92
Reator a água pesada pressurizada – PHWR CANDU (<i>Canadian Deuterium Uranium</i>)	UO ₂	água	água pesada (deutério - D ₂ O)	47
Reator refrigerado a Gás – GCR	UO ₂	CO ₂	grafite	18
Reator de Alta Temperatura refriger. a Gás - HTGR	Th + UO ₂	hélio - He	grafite	
Fast Breeder Reactors – FBR ou LMFR (<i>Super Regeneradores Rápidos</i>)	PuO ₂ + UO ₂	sódio líquido	–	1
(<i>Light Water Graphite Reactor</i>) - LWGR ou (<i>Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny</i>) – RBMK	PuO ₂ + UO ₂	água	grafite	15
TOTAL				443

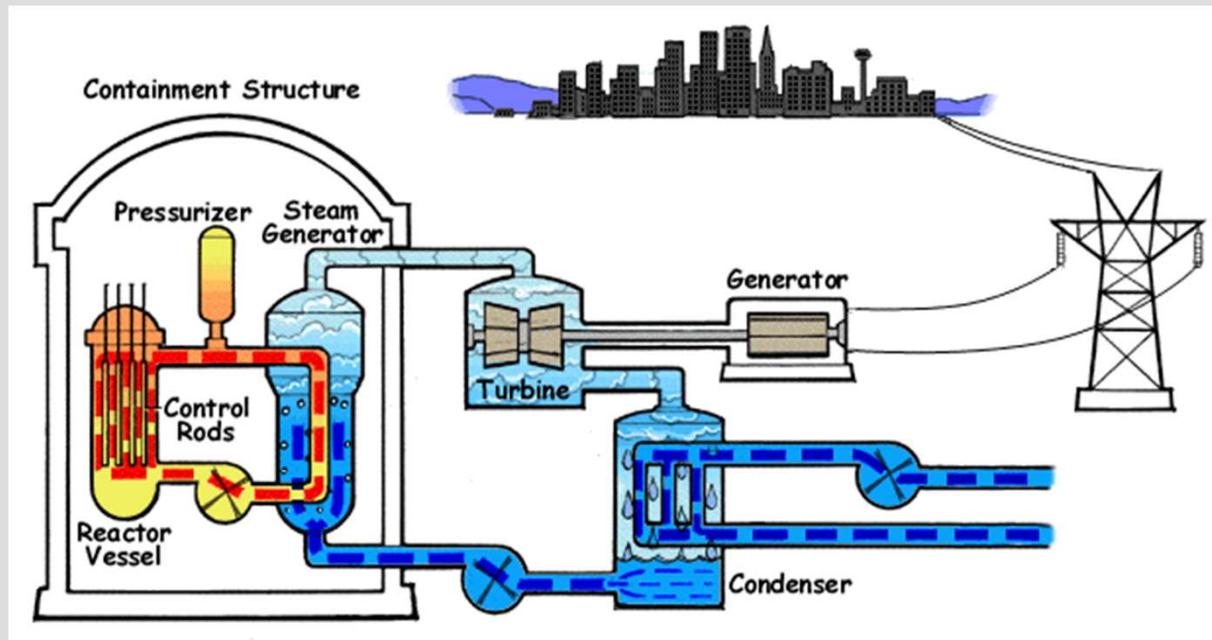


A typical Pressurised Water Reactor (PWR)

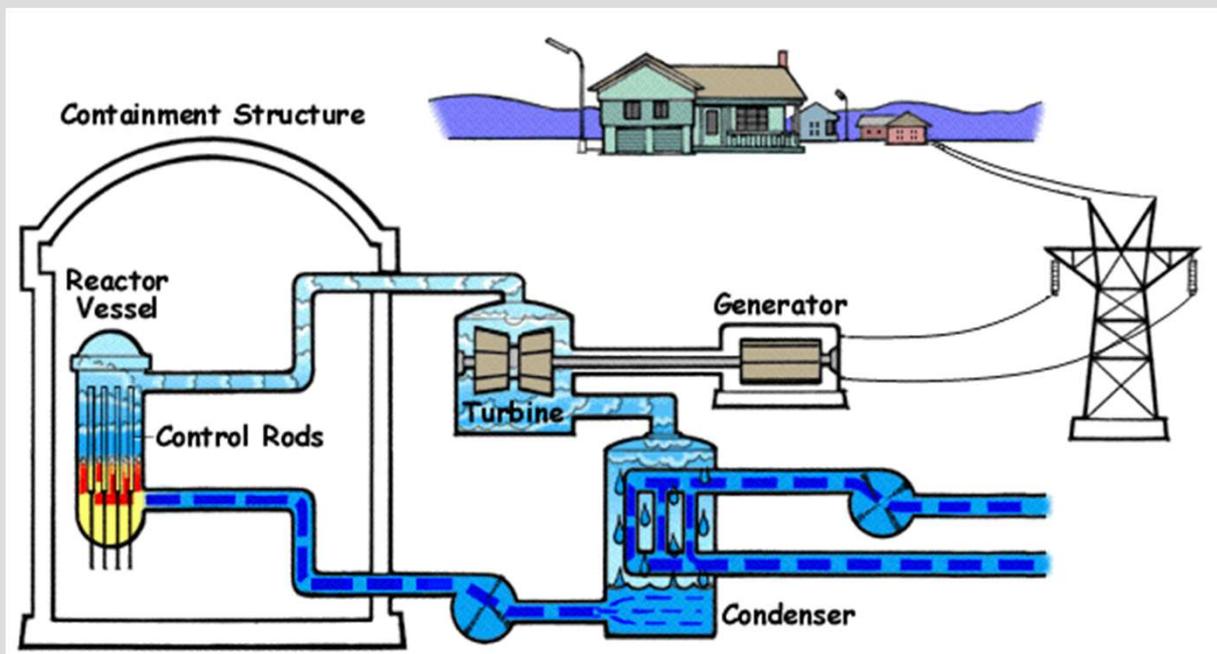


A typical Boiling Water Reactor (BWR)

Fonte: world-nuclear, 2011.

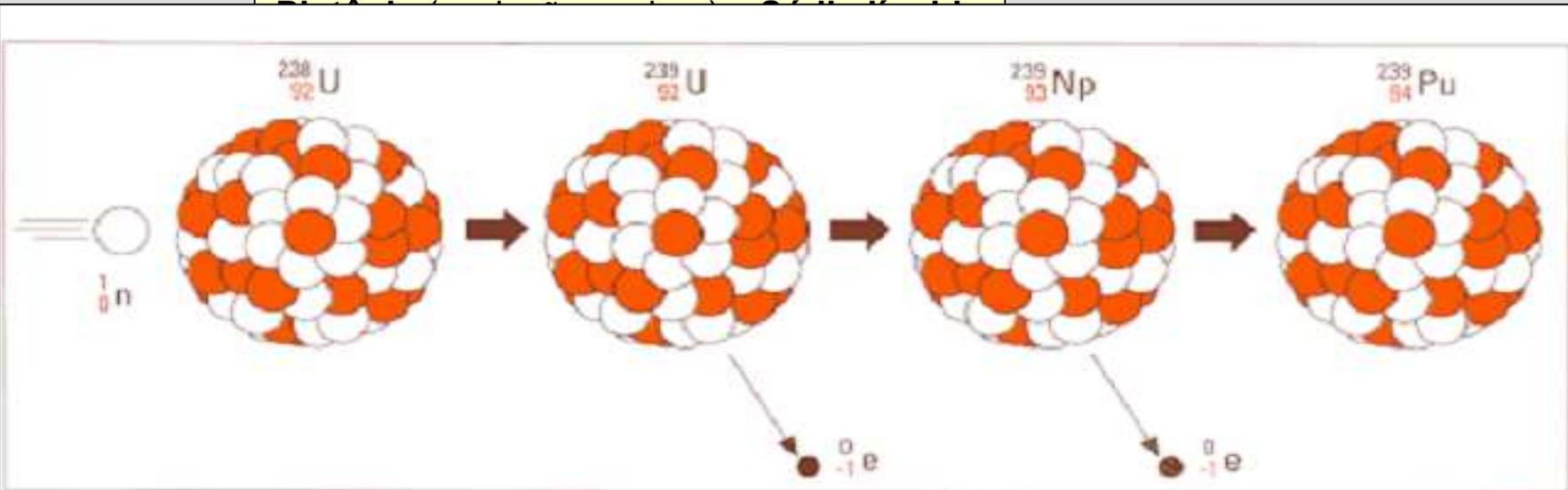


PWR



BWR

Combinação de Risco:



Reação de captura no U-238, produção de Pu-239

Dados energia nuclear: 2011

- **443 reatores nucleares em operação**
capacidade instalada 375,374 GWe
- **+ 2 usinas recentes:**
Kaiga 4 (202 MWe, PHWR, Índia) - 19 Janeiro/2011
Chasnupp 2 (300 MWe, PWR, Paquistão) - 14 Março/2011
- **5 reatores com desligamento no longo prazo: 2.776 MW**

Nome	Unidades	Tipo	Total MWe	País
BRUCE-1	1	PHWR	750	Canadá - 1977
BRUCE-2	1	PHWR	750	Canadá - 1976
PICKERING-2	1	PHWR	515	Canadá - 1971
PICKERING-3	1	PHWR	515	Canadá - 1972
MONJU	1	FBR	246	Japão - 1995

Fonte: AIEA, abril 2011.

Usinas em construção: 2011

País	Unidades	Tipo	Total MW(e)
Argentina	1	PHWR	692
Brasil	1	PWR	1.245
Bulgária	2	PWR	1.906
Coréia do Sul	5	PWR	5.560
China	29**	PWR	29.830
Eslováquia	2	PWR	782
Finlândia	1	PWR	1.600
França	1	PWR	1.600
Índia	5	2 PWR, 2 PHWR 1FBR.	3.564
Irã	1	PWR	915
Japão	2	BWR	2.650
Rússia	11	1 FBR, 1 LWGR, 9 PWR	9.153
Ucrânia	2	PWR	1.900
USA	1	PWR	1.165
Total:	64		62. 562

** Inclui dois (2) reatores em construção em Taiwan, 2600 W.

Fonte: AIEA, abril de 2011.

Perspectivas futuras:

- **EPR:** *European Pressurized Water Reactor*

▶ Olkiluoto (Finlândia)

unidade de contenção (“core catcher”) para evitar um derretimento do núcleo.

Fabricante: Framatome ANP (franco-alemã) – capacidade bruta projetada: 1.750 MW

Custo previsto: 3,2 bilhões de € – início da construção: 08/2005 (prev.: 57 meses).

▶ Flamanville 3 (Normandie, França)

previsão p/ 2014 ; custo previsto: 5 bilhões de €

- **ADS:** *Accelerator Driven System*

utiliza uma massa subcrítica de tório. A fissão é produzida pela introdução de nêutrons no reator de partículas através de um acelerador de partículas. Em fase de experimentação.

Prevê a eliminação de resíduos nucleares produzidos em outros reatores de fissão.

- **Extensão da licença dos reatores atuais**

solicitação de extensão do licenciamento de 30 anos para 50–60 anos (EUA e Europa).

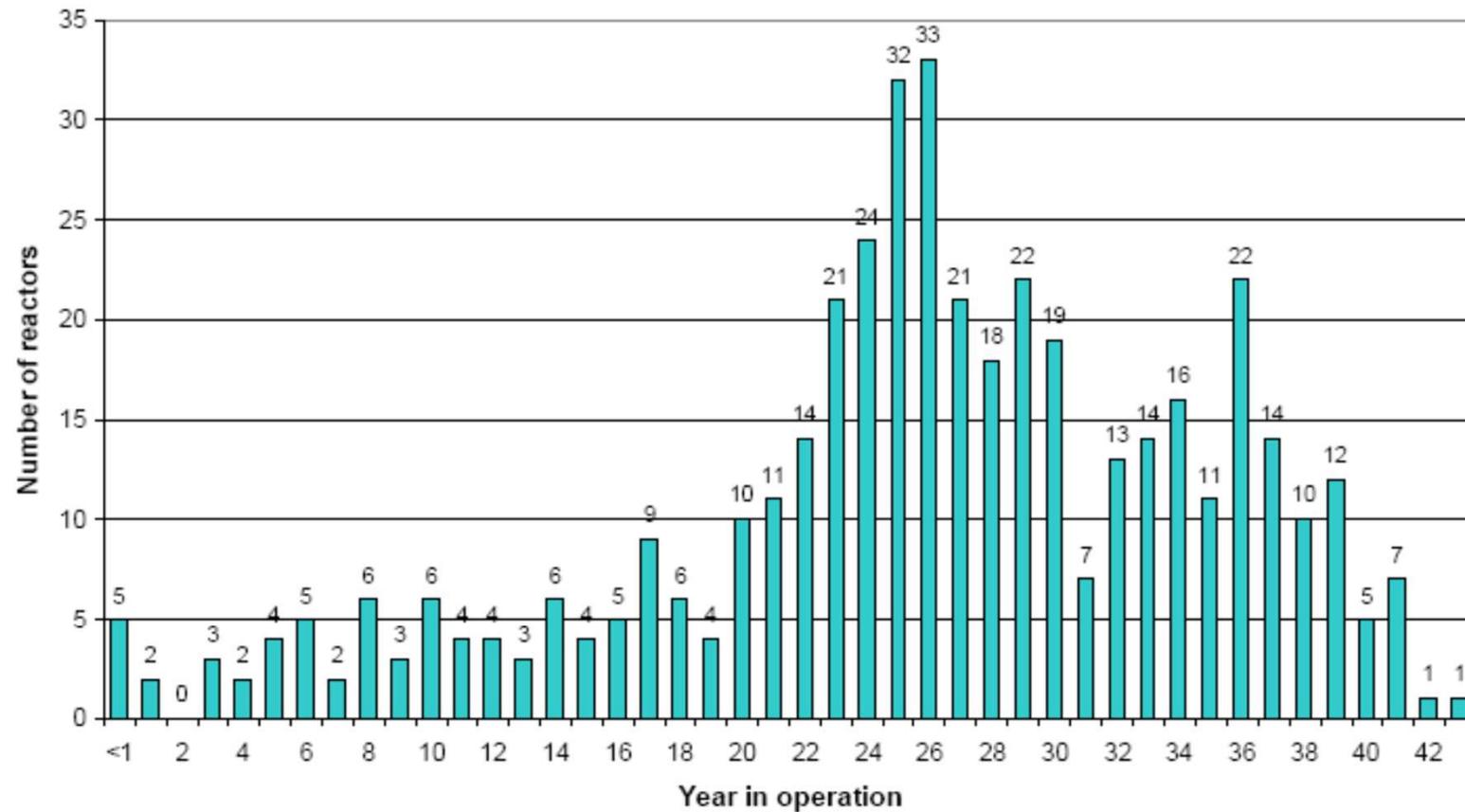


FIG. B-3. Number of operating nuclear power plants by age in the world as 26 August 2010 (note that a reactor's age is determined by the date when it was first connected to the grid)

Usinas Termonucleares no Brasil

Energia Nuclear no Brasil

Nome	Unidades	Tipo	Status	Total MW(e)
ANGRA 1	1	PWR	operação	626
ANGRA 2	1	PWR	operação	1229
ANGRA 3	1	PWR	em construção	1245



Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Angra 1 e Angra 2



Aspectos Tecnológicos



Vista interna da Usina Angra 2



Maquete eletrônica de Angra III

Fonte: Eletronuclear



Nuclear no Brasil – novos projetos

“Em julho de 2008, o Governo Federal criou o Comitê de Desenvolvimento do Programa Nuclear Brasileiro. A função do Comitê é fixar diretrizes e metas para o desenvolvimento do Programa e supervisionar sua execução [...] O Comitê, então, apresentou a necessidade da construção de mais quatro usinas nucleares com capacidade de 1.000 MW cada, sendo duas no Nordeste e outras duas no Sudeste. Conforme a evolução futura da necessidade de expansão da oferta de eletricidade existe a possibilidade de construção de mais usinas [...]”.

Fonte: <http://cnneletronuclear.gov.br/conteudos/visualizar/novas-centrais-nucleares>

Nuclear no Brasil – novos projetos

- **Expansão Nuclear no Nordeste**

“Por determinação da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia, foi iniciado o processo de escolha do sitio para a construção da central nuclear do Nordeste. A região pesquisada fica entre Salvador e Recife e deverá considerar inicialmente a implantação de duas usinas (de aproximadamente 1.000 MWe cada) e a possibilidade de futuras expansões”

Fonte: Eletronuclear, 2010.

Expansão nuclear no Nordeste



Fonte: Eletronuclear, 2011.

Cronograma da Central Nuclear do Nordeste:

- 2008: início da seleção de local para a Central Nuclear do Nordeste
- 2019: início da operação da primeira usina Central Nuclear do Nordeste
- 2021: início da operação da segunda usina da Central Nuclear do Nordeste
- O sítio da nova central será selecionado considerando sua possibilidade de expansão futura para abrigar até seis usinas com capacidade de 1000 MWe cada.

A localização planejada de usina nuclear em Pernambuco



Fonte: oeco, 2011.

Itacuruba, às margens do Rio São Francisco e do Lago da Hidrelétrica de Itaparica, ao lado das linhas de transmissão da Chesf, população de 4 mil habitantes.



Projeto: Central Nuclear com 6 reatores de 1.100 MW = 6.600 MW

Custo: 36 bilhões de dólares

cálculo com base no custo do projeto da central nuclear de **Vögtle** (unidades 3 e 4) no estado da Geórgia; sudeste dos Estados Unidos.

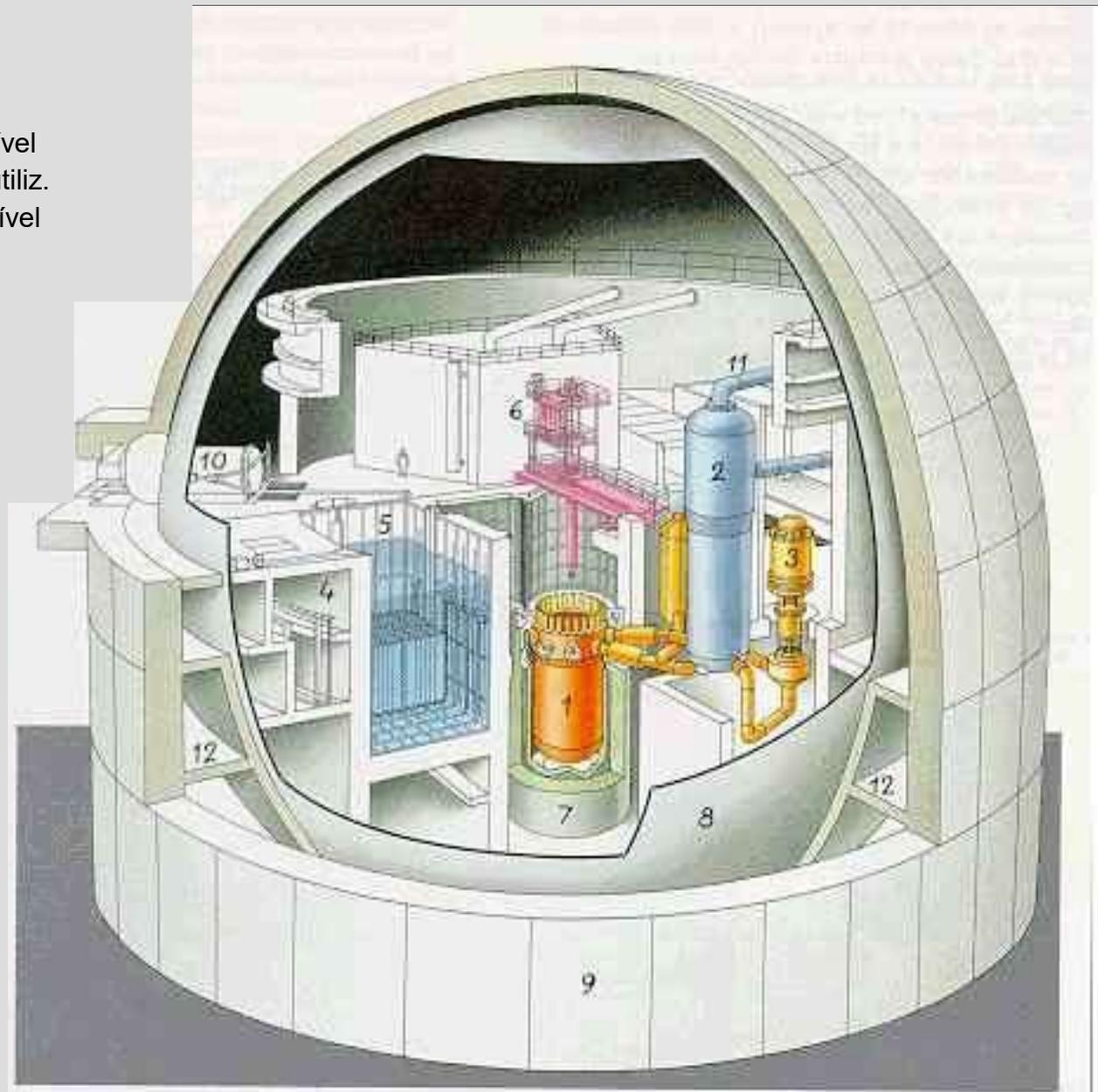
253 mil litros/seg
(253 m³/s)

cálculo com base em:
Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19
Disponível em:
<https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A500.html>

Rio São Francisco
[OPARÁ]
(Reservatório da UHE Itaparica)

Energia Termonuclear – Aspectos Sócio-Ambientais

- 1 Vaso do Reator
- 2 Gerador de Vapor
- 3 Bomba de refrigeração do reator
- 4 Armazenamento do elemento combustível
- 5 Piscina p/ acond. provisório do comb. utiliz.
- 6 Equipamento para recarga do combustível
- 7 Escudo de proteção biológica
- 8 Vaso de contenção
- 9 Prédio do Reator
- 10 Equipamento separador de pressão
($P_{int} < P_{atm}$)
- 11 Duto principal de vapor
- 12 Estrutura do Prédio



Corte do Edifício do Reator, Usina Tipo Angra II

Aspectos sócio-ambientais

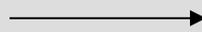
**Fissão do
núcleo do átomo**



**radiações
ionizantes**

- ▶ partículas α : núcleos de Hélio c/ 2 p+2 n
- ▶ partículas β : elétrons c/ alta velocidade
- ▶ raios-gama γ : ondas eletromagnéticas
- ▶ neutrons: não possuem carga mas transferem energia

Fissão do núcleo do átomo



radiações ionizantes

- ▶ partículas α : núcleos de Hélio c/ 2 p+2 n
- ▶ partículas β : elétrons c/ alta velocidade

As partículas alfa, por terem massa e carga elétrica maior, podem ser facilmente detidas. Elas não conseguem ultrapassar as camadas externas de células mortas da pele de uma pessoa, sendo praticamente inofensivas. Entretanto, podem penetrar no organismo através de um ferimento ou por aspiração, provocando lesões graves.

partículas γ : ondas eletromagnéticas

neutrons: não possuem carga mas transferem energia

Fissão do núcleo do átomo



radiações ionizantes

- ▶ partículas α : núcleos de Hélio c/ 2 p+2 n
- ▶ partículas β : elétrons c/ alta velocidade
- ▶ raios gama γ : ondas eletromagnéticas

Neutrons: não possuem carga mas transferem energia

As partículas beta são capazes de penetrar cerca de um centímetro nos tecidos, ocasionando danos à pele, mas não aos órgãos internos, a não ser que sejam engolidas ou aspiradas. São de 50 e 100 vezes mais penetrantes que as partículas alfa.

**Fissão do
núcleo do átomo**



**radiações
ionizantes**

- ▶ partículas α : núcleos de Hélio c/ 2 p+2 n
- ▶ partículas β : elétrons c/ alta velocidade
- ▶ raios-gama γ : ondas eletromagnéticas
- ▶ neutrons: não possuem carga mas transferem energia

Os raios gama podem atravessar completamente o corpo humano causando danos irreparáveis. São detidos por placas de chumbo com mais de 5cm de espessura ou por grossas paredes de concreto.

Aspectos sócio-ambientais

Fissão do núcleo do átomo



radiações ionizantes

- ▶ partículas α : núcleos de Hélio c/ 2 p+2 n
- ▶ partículas β : elétrons c/ alta velocidade
- ▶ raios-gama γ : ondas eletromagnéticas
- ▶ neutrons: não possuem carga mas transferem energia

consequências:

- ▶ destruição de alguma substância necessária à fisiologia celular e às trocas entre células e meio ambiente
- ▶ transformação de substâncias úteis contidas nas células em substâncias tóxicas
- ▶ alteração da bagagem genética

Mensuração da radiação:

- **atividade:** medida em Bq (becquerel)

número de núcleos que sofrem desintegração por unidade de tempo

1 Bq = 1 desintegração/s

unidade antiga: Ci (Curie)

Fator de conversão: 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq

- **exposição:** medida em Coulomb/kg (C/kg)

quantidade de carga elétrica gerada pela radiação através da ionização, por unidade de massa do ar

unidade antiga: roentgen (R)

fator de conversão: 1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg

- **dose absorvida:** medida em Gray (Gy)

quantidade de energia cedida pela radiação ionizante por unidade de massa da matéria

1 Gy = 1 J/kg

unidade antiga: rad (radiation absorbed dose)

fator de conversão: 1 Gy = 100 rad

- **dose equivalente:** medida em Sievert (Sv)

leva em conta o efeito biológico em tecidos vivos, produzido pela radiação absorvida. A Dose Equivalente é obtida da Dose Absorvida multiplicada por fatores ponderantes apropriados.

1 Sv = 1 Gy x fator de qualidade

unidade antiga: rem (roentgen equivalent man)

fator de conversão: 1 Sv = 100 rem

Mensuração da radiação:

- **atividade:** medida em Bq (becquerel)
número de núcleos que sofrem desintegração por unidade de tempo
1 Bq = 1 desintegração/s
unidade antiga: Ci (Curie)
Fator de conversão: 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq
- **exposição:** medida em Coulomb/kg (C/kg)
quantidade de carga elétrica gerada pela radiação através da ionização, por unidade de massa do ar
unidade antiga: roentgen (R)
fator de conversão: 1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg
- **dose absorvida:** medida em Gray (Gy)
quantidade de energia cedida pela radiação ionizante por unidade de massa da matéria
1 Gy = 1 J/kg
unidade antiga: rad (radiation absorbed dose)
fator de conversão: 1 Gy = 100 rad
- **dose equivalente:** medida em Sievert (Sv)
leva em conta o efeito biológico em tecidos vivos, produzido pela radiação absorvida. A Dose Equivalente é obtida da Dose Absorvida multiplicada por fatores ponderantes apropriados.
1 Sv = 1 Gy x fator de qualidade
unidade antiga: rem (roentgen equivalent man)
fator de conversão: 1 Sv = 100 rem

Atividade Superficial
As: em Bq.m⁻²

Mensuração da radiação:

- **atividade:** medida em Bq (becquerel)

número de núcleos que sofrem desintegração por unidade de tempo

1 Bq = 1 desintegração/s

unidade antiga: Ci (Curie)

Fator de conversão: 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq

Atividade Superficial
As: em Bq.m⁻²

- **exposição:** medida em Coulomb/kg (C/kg)

quantidade de carga elétrica gerada pela radiação através da ionização, por unidade de massa do ar

unidade antiga: roentgen (R)

fator de conversão: 1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg

- **dose absorvida:** medida em Gray (Gy)

quantidade de energia cedida pela radiação ionizante por unidade de massa da matéria

1 Gy = 1 J/kg

unidade antiga: rad (radiation absorbed dose)

fator de conversão: 1 Gy = 100 rad

Tipo de Radiação	Fator de Qualidade
raios X ou γ	1
partículas β	1 - 1,7
partículas α	20

- **dose equivalente:** medida em Sievert (Sv)

leva em conta o efeito biológico em tecidos humanos. A Dose Equivalente é obtida da Dose Absorvida multiplicada por fatores ponderantes apropriados.

A Dose Equivalente é obtida da Dose Absorvida multiplicada por fatores ponderantes apropriados.

1 Sv = 1 Gy x fator de qualidade

unidade antiga: rem (roentgen equivalent man)

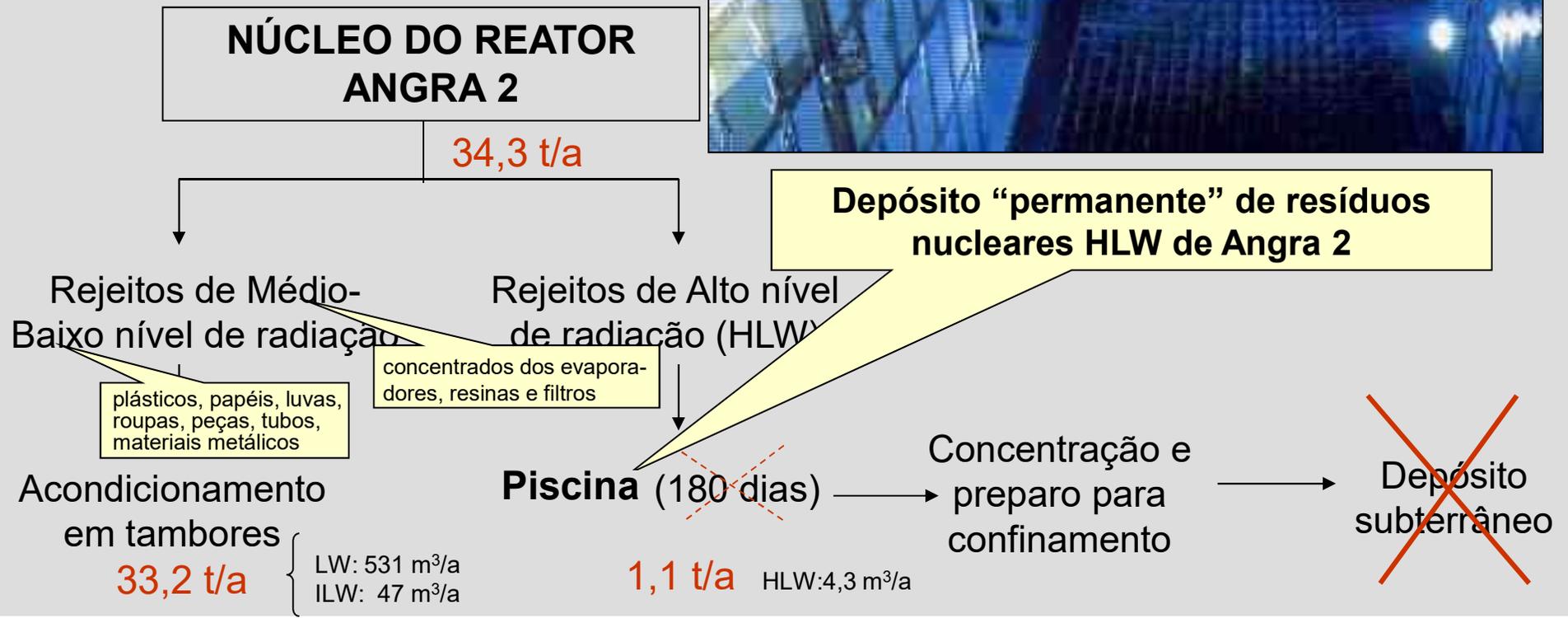
fator de conversão: 1 Sv = 100 rem

Sv		Efeitos da exposição
0,0001 – 0,005	—————→	radiografia
0,25 – 0,30	—————→	morte de células especialmente do tecido linfático
1	—————→	redução do nº de glóbulos brancos leucemia
2	—————→	doença da radiação começa a ser mortal
3 – 5	—————→	50% dos atingidos morrem em breve período (60 dias)
7 – 10	—————→	100% dos atingidos morrem em 2 dias

Fonte: TRONCONI, P. A. et al. Planeta in Prestito: energia-entropia-economia. Peggio: Macro Ed., 1992.

Dose limite: 0,05 Sv/ano (50 mSv/ano) p/ trabalhadores em usinas nucleares
0,005 Sv/ano p/ população na vizinhança de usina nuclear

Obs: 0,4 – 0,7 Sv: raio de 30 Km de Chernobyl





Usina Angra 1



piscina do combustível

Volume útil atualmente esgotado.

'solução': construção de um reservatório provisório de armazenamento subterrâneo, denominado UAS.



Figura 1 – Layout do processo operativo da UAS, onde os combustíveis irradiados são retirados das usinas nucleares de Angra 1 e 2, transportados por veículos transportadores, e acondicionados na UAS (Unidade de Armazenamento a Seco).

Fonte: Parecer Técnico/MPF, 2021.

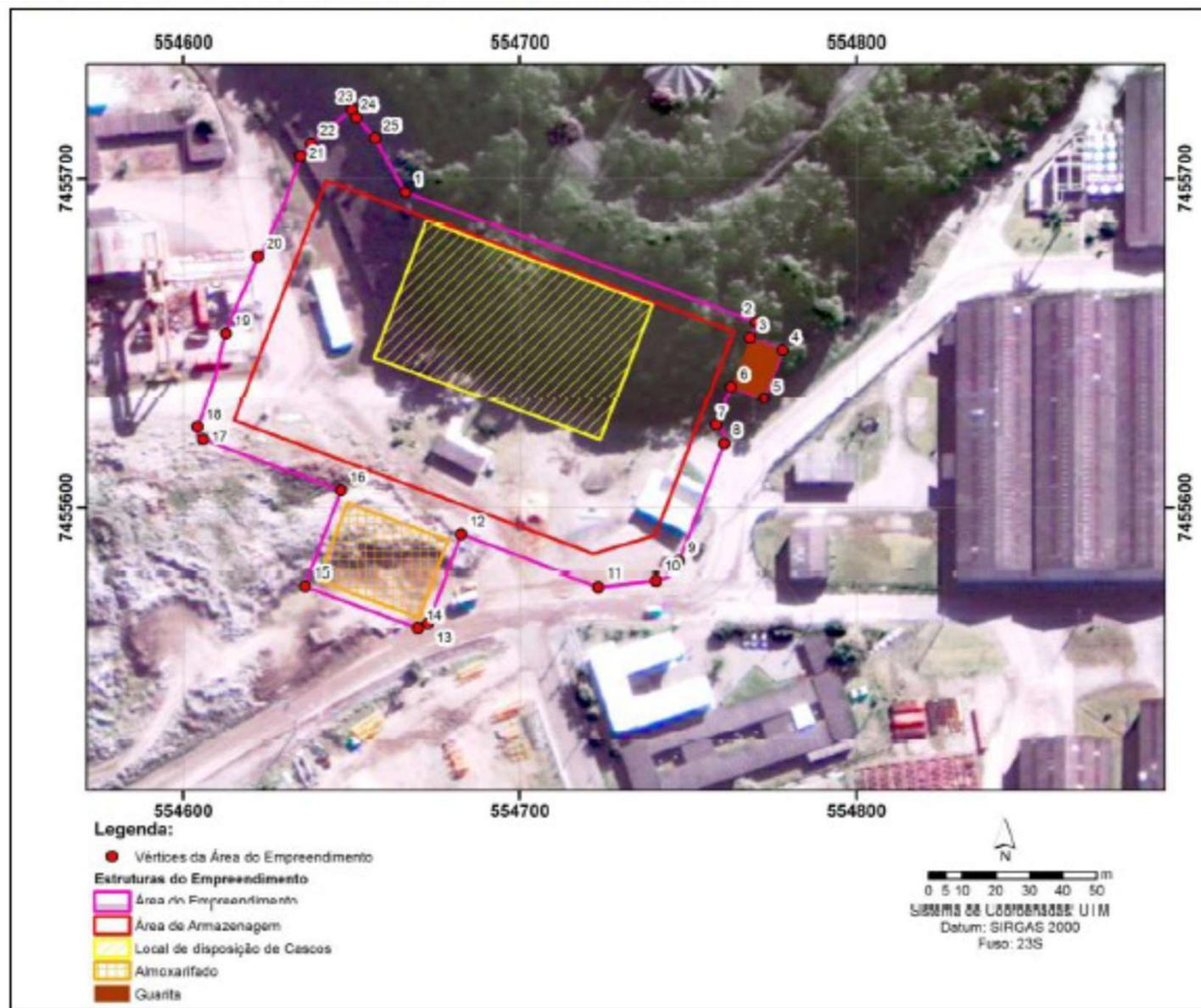


Figura 3 – Vista geral em planta da localização da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS) (imagem obtida do RAS*).

* RAS: Relatório Ambiental Simplificado.

Fonte: Parecer Técnico/MPF, 2021.

Figura 4-21 - Representação esquemática da Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS) de Elementos Combustíveis Irrradiados (ECIs)



Figura 4 – Layout do Empreendimento da UAS após o desmonte de rocha do talude (imagem obtida do RAS*).

* RAS: Relatório Ambiental Simplificado.

Fonte: Parecer Técnico/MPF, 2021.



“Depósito” de Rejeitos Radioativos - Angra dos Reis

Fonte: SAPÊ-Sociedade Angrense de Proteção Ecológica, 2003.

Métodos de gerenciamento mais utilizados

- Armazenagem via úmida



Fonte: (GRANJEIRO; EUSTÁQUIO, 2008).

IDEÍA ORIGINAL:

Esperar o decaimento do resíduo e reprocessá-lo.

CUSTO DO REPROCESSAMENTO:

U\$ 600/kg a U\$ 900/kg
(Bunn et. al, 2003)

FORMA MAIS PRATICADA NO MUNDO.

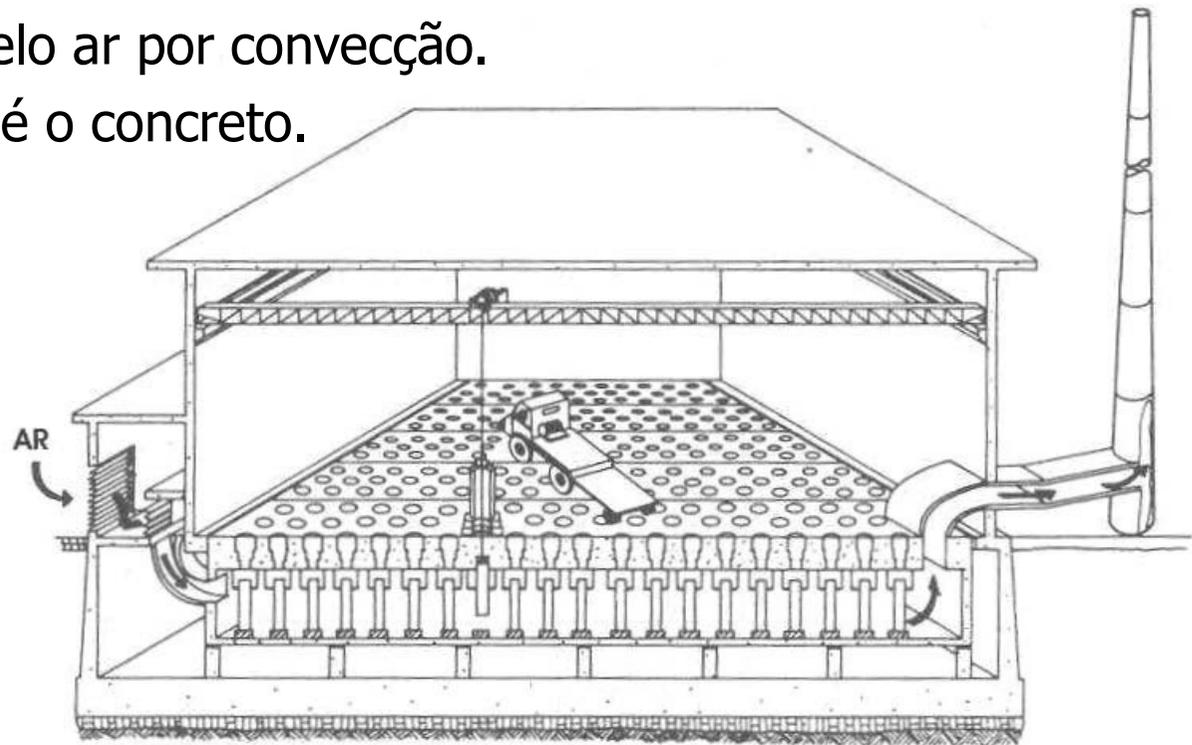
- Armazenagem via seca

Armazenagem em poços:

O resíduo é acondicionado em cilindros que ficam em cavidades.

O calor é removido pelo ar por convecção.

A barreira à radiação é o concreto.



- Armazenagem em silos:



Fonte: (INVAP, 2008).

O resíduo é acondicionado em tambores metálicos dentro de cilindros de concreto.

O calor é removido pelo ar por convecção.

A barreira à radiação é o concreto.

Tambores proporcionam contenção.

• Armazenagem em cascos:

Os cascos normalmente são cilindros grossos de aço revestidos por concreto ou apenas de concreto armado.

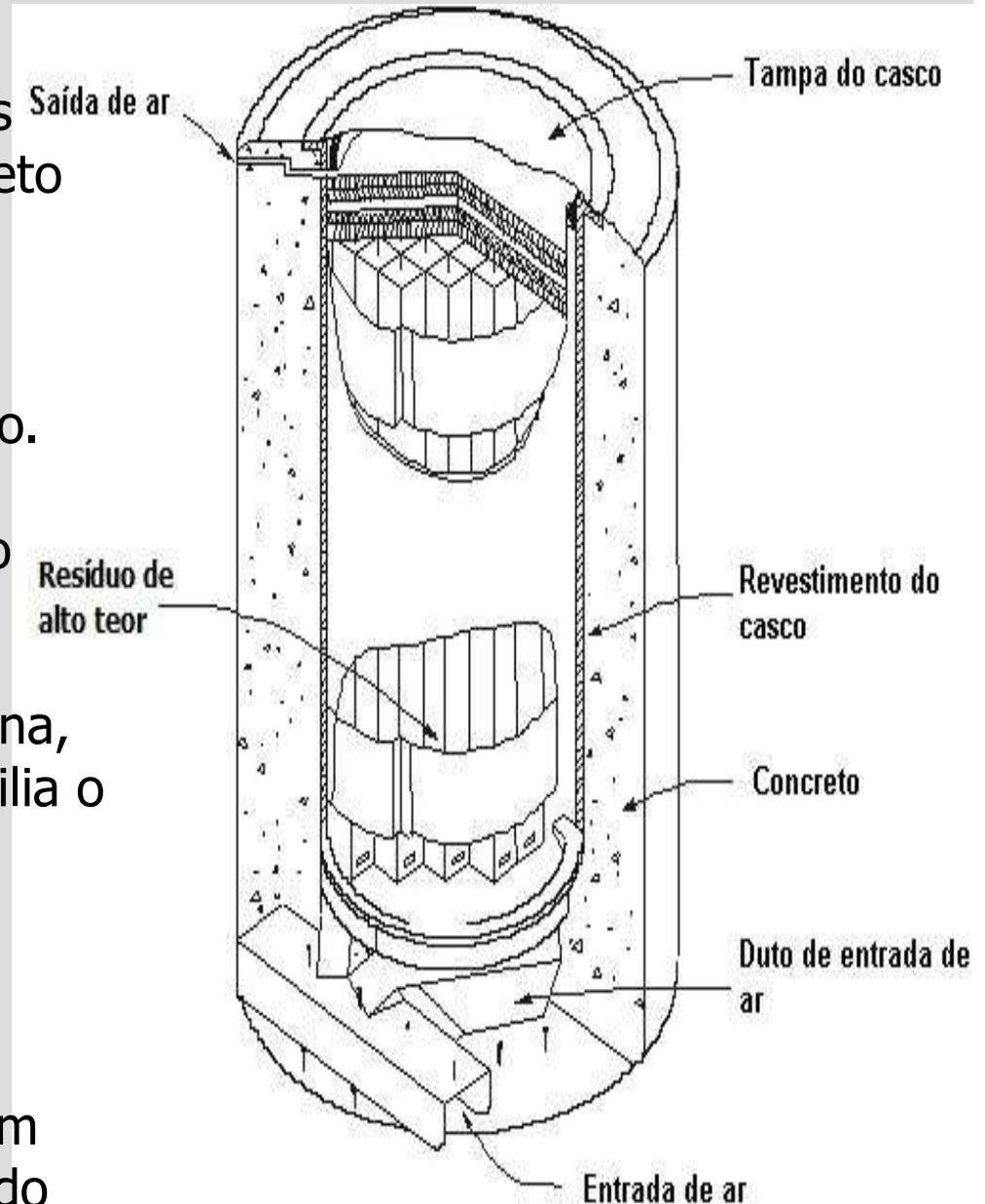
Cascos de aço tem o fundo soldado e as tampas parafusadas no concreto.

O resfriamento é obtido por inserção de gás inerte e circulação de ar.

Ao redor do cilindro usa-se uma resina, normalmente, o polietileno, que auxilia o concreto na blindagem à radiação.

O próprio casco funciona como contenção.

Diferentemente, da armazenagem em silos, os cascos não são fixos podendo ser transportados.



Cascos (cans)

Casco metálico



Fonte: Thomauske (2003)

Casco de aço



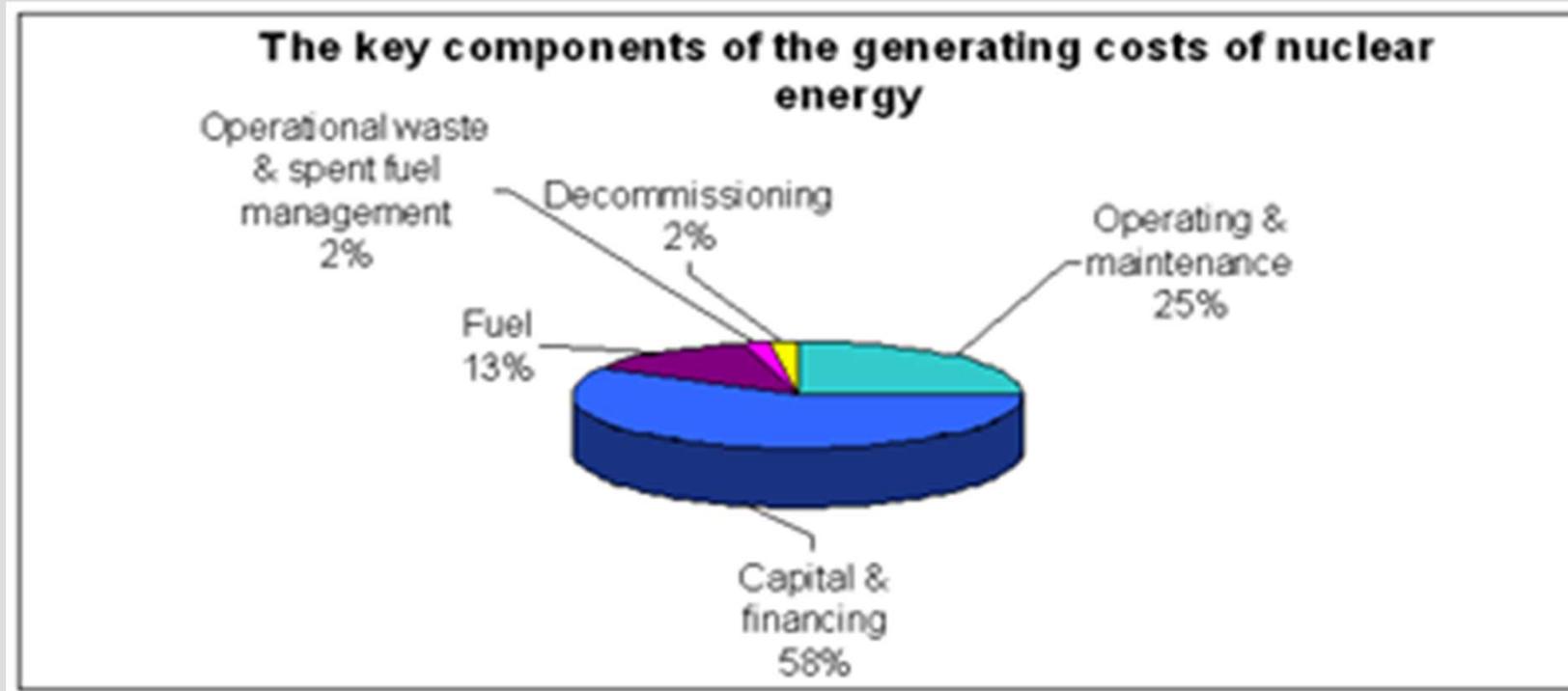
Fonte: <http://www.zwilag.ch> (2004)

Estados Unidos

- Até 1998, 38.400 ton. de CNQ estavam armazenados nos Estados Unidos.



- As piscinas estão com 50% da capacidade disponível.
- Fase de licenciamento de novos tipos de cascos para armazenagem.



Spent fuel management costs, plant decommissioning and waste disposal costs (particularly for HLW) are characterised by their long-term nature. According to the UK Nuclear Industry Association, charging consumers around 0.1p/kWh is enough to finance these costs.

The US Department of Energy has by statute ultimate responsibility for the disposal of spent nuclear fuels. Nuclear fuel disposal costs are funded by a surcharge on the cost of nuclear fuels. Presently this charge is 0.1 cents/kWh of power generated. Charges are intended to cover the costs of disposal of nuclear wastes.

Nota: Os EUA estão construindo um depósito geológico permanente em Yucca Mountain (sul do estado de Nevada), projetado para receber 70% dos rejeitos HLW das usinas nucleares americanas, ao custo estimado de US\$ 58 bilhões.

Dos 26 principais produtos primários de fissão liberados, em decorrência do eventual rompimento do vaso de contenção do núcleo dos reatores, dois conjuntos e dois elementos seriam de extrema gravidade para os seres vivos:

- **Iodo-131** (mv: 8,1 dias) e **Iodo-132** (mv: 2,4 horas): causadores de câncer na tiróide

- **Estrôncio-89** (mv: 53 dias) e **Estrôncio-90** (mv: 28 anos):
- **Bário-137** (mv: 2,6 min) e **Bário-140** (mv: 12,8 dias) :

depositados sobre os pastos, através da alimentação vegetal contaminam o leite e a carne. No corpo humano, esses elementos atacam o cálcio nos dentes e ossos, causando câncer nestes últimos

- **Césio-137** (mv: 30 anos) : causador de câncer nos tecidos nervosos e musculares

- **Plutônio-239** (mv: 24.110 anos):

promove a alteração nas proteínas constituintes das bases das moléculas de DNA, causando alterações genéticas e males congênitos de alta letalidade.

Nota - mv: meia-vida

Escala Internacional de Eventos Nucleares (IAEA)

N	Descrição	Critério	Exemplos
7	Acidente Grave	Liberação para o exterior de grande parte do inventário do núcleo do reator, contendo uma mistura de produtos de fissão de vida curta e longa (em quantidades radiologicamente equivalentes a mais que dezenas de milhares de terabecqueréis de iodo 131). Possibilidade de efeitos agudos a saúde. Efeitos retardados sobre uma grande área, envolvendo possivelmente mais que um país. Consequências ao meio ambiente a longo prazo.	Chernobyl, Ucrânia, 1986 Fukushima, Japão, 2011
6	Acidente Sério	Liberação para o exterior de produtos de fissão (em quantidades radiologicamente equivalentes da ordem de dezenas a centenas de milhares de terabecqueréis de iodo 131). Implementação total de planos de emergência para conter efeitos a saúde.	Kishtim, URSS, 1957
5	Acidente com Riscos Externos	Liberação para o exterior de produtos de fissão (em quantidades radiologicamente equivalentes da ordem de centenas a milhares de terabecqueréis de iodo 131). Implementação parcial de planos de emergência (i.e. abrigo local e/ou evacuação), necessário em alguns casos para treinamento da possibilidade de efeitos a saúde.	Windscale, RU, 1957
4	Acidente	Dano grave a uma grande parte do núcleo devido a efeitos mecânicos ou fusão.	TMI, EUA, 1979 Tokaimura, 1999
3	Incidente Sério	Liberação externa de radioatividade acima dos limites autorizados, resultando em dose aqueles mais afastados da área de risco da ordem de décimos de millisieverts. Medidas de proteção fora da área de risco não necessárias. Níveis alto de radiação e/ou contaminação na área de risco devido a falha de equipamentos ou incidentes operacionais. Exposição excessiva de trabalhadores (dose individual excedendo 50 millisieverts). Incidentes em que a maior falha dos sistemas de segurança possa levar a uma condição de acidente ou a uma situação em que estes sistemas sejam incapazes de impedir um acidente se determinados fatores ocorrerem.	Vandellós, Espanha, 1989 Windscale, 1973 Goiânia, 1986
2	Incidente	Incidentes técnicos ou anomalias que não afetam direta ou imediatamente a segurança da usina, possibilidade de levar a uma reavaliação das condições de segurança.	Saint-Laurent, França, 1980 Buenos Aires, Argentina, 1983
1	Anomalia	Anomalias funcionais ou operacionais que não expõem a risco, mas que indicam uma falta de condições de segurança. Pode ser causado por falha de equipamento, erro humano ou normas inadequadas. (Tais anomalias devem ser separadas das situações onde os limites operacionais e condições não são ultrapassados e estão sob controle de acordo com os procedimentos aplicáveis. Estes estão tipicamente "abaixo da escala".)	
0	Erro	Nenhuma importância do ponto de vista da segurança.	

Aspectos da (in)segurança na região de Angra dos Reis para a operação de usinas nucleares

Fonte: Bermann, C. **Expertengutachten über die Sicherheit des Nuklearprojektes Angra 3**, fevereiro de 2012.

Documento em inglês: Expert Opinion on Safety Aspects of the Angra 3 Nuclear Project

Documento em português: Avaliação dos aspectos de Segurança do Projeto da Usina Nuclear Angra 3.

Disponível em <www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/report/2012/Estudo%20Angra%203-garantia%20Hermes%20-%20CB.pdf>



Figura 5: Localização das usinas em proximidade das encostas.

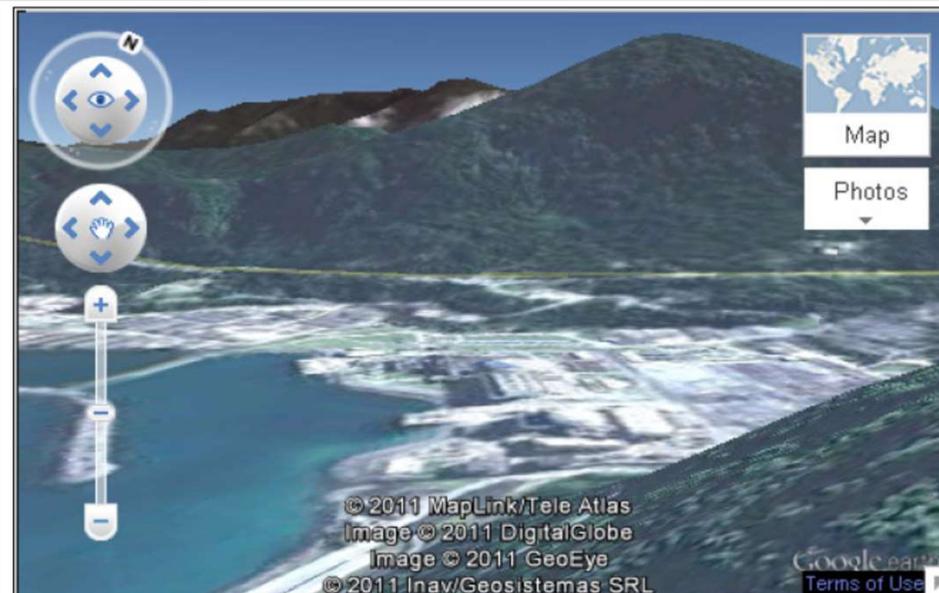


Figura 6: Localização das usinas em proximidade das encostas.



Figura 8: Deslizamento de terra no Morro da Carioca, no centro de Angra dos Reis
Fonte: Foto de Roosevelt Pinheiro/Agência Brasil; 02/01/2010.



Figura 9: Deslizamento de terra nas encostas da região de Angra dos Reis
Fonte: Foto da AP-Associated Press; 02/01/2010.



Figura 10: Equipes de resgate no Morro da Carioca em Angra dos Reis.
Fonte: Foto de Roosevelt Pinheiro/Agência Brasil; 02/01/2010.



Figura 11: Comprometimento das vias de acesso ao centro de Angra dos Reis.
Fonte: Foto de Danielle Viana/AE-Agência Estado; 01/01/2010.



Figura 12: Caos no acesso rodoviário em função dos deslizamentos na região de Angra dos Reis.

Fonte: Foto de Jadson Marques/AE-Agência Estado; 01/01/2010.



Figura 13: Deslizamento de terra arrasta pista da rodovia Rio-Santos na região de Angra dos Reis.

Fonte: Foto de Manoel Francisco de Oliveira/O GLOBO; 10/05/2011.



Figura 14: Deslizamento de pedras interdita a Rio-Santos, na altura de Conceição do Jacareí na região de Angra dos Reis.

Fonte: Foto de Roberto Bonfim, disponível em: <http://oglobo.globo.com/transito/deslizamento-de-pedras-interdita-trecho-da-rodovia-rio-santos-3024814>.

ZONAS DE PLANEJAMENTO DE EMERGÊNCIA

O mapa mostra as Zonas do Plano de Emergência (ZPE) da Usina Nuclear de Angra dos Reis, que vão de 3 a 15 quilômetros

 Comunidades nas ZPEs

Onde fica no Estado do Rio de Janeiro

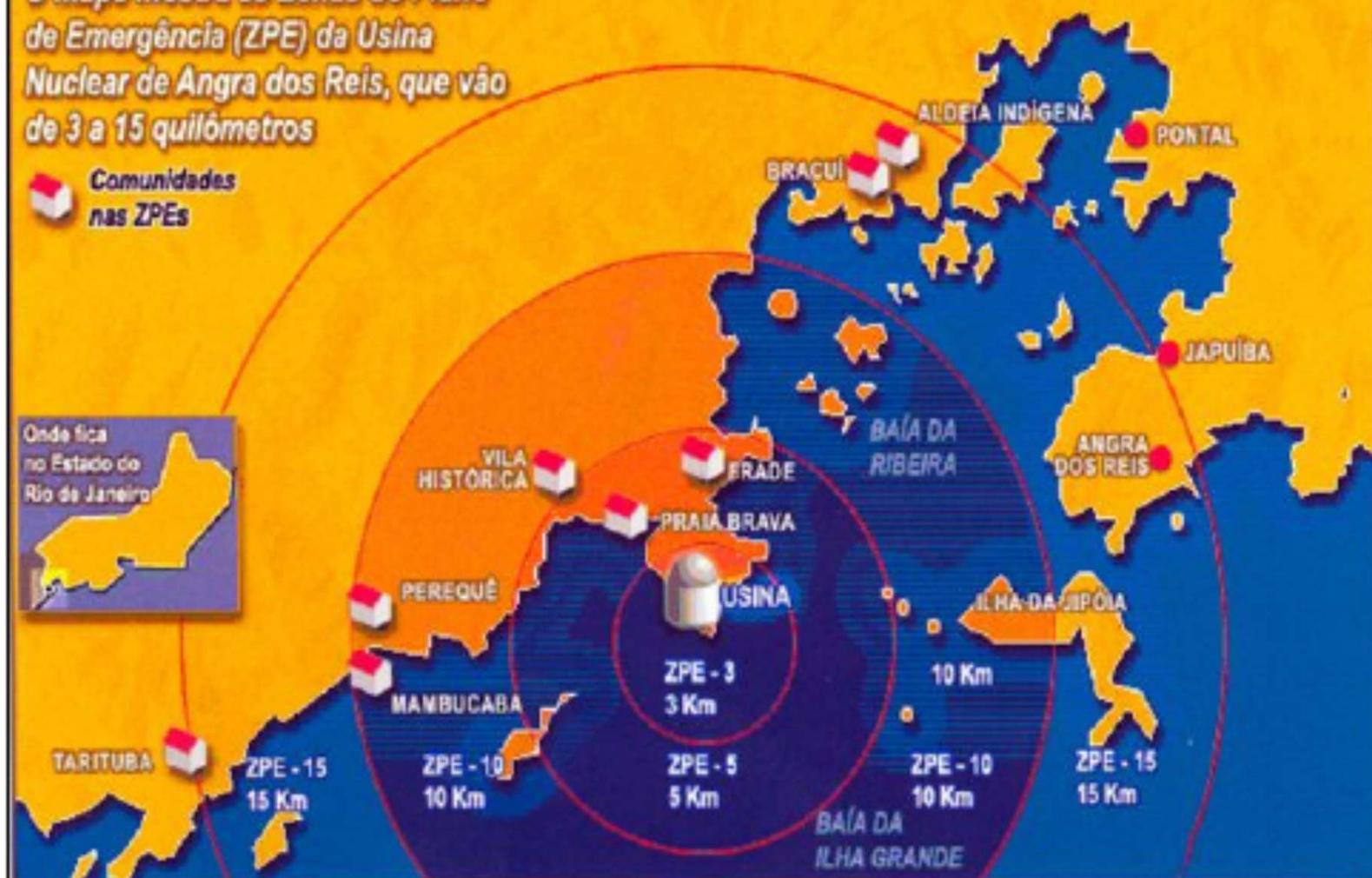


Figura 15: Zonas de Plano de Emergência das usinas nucleares em Angra.

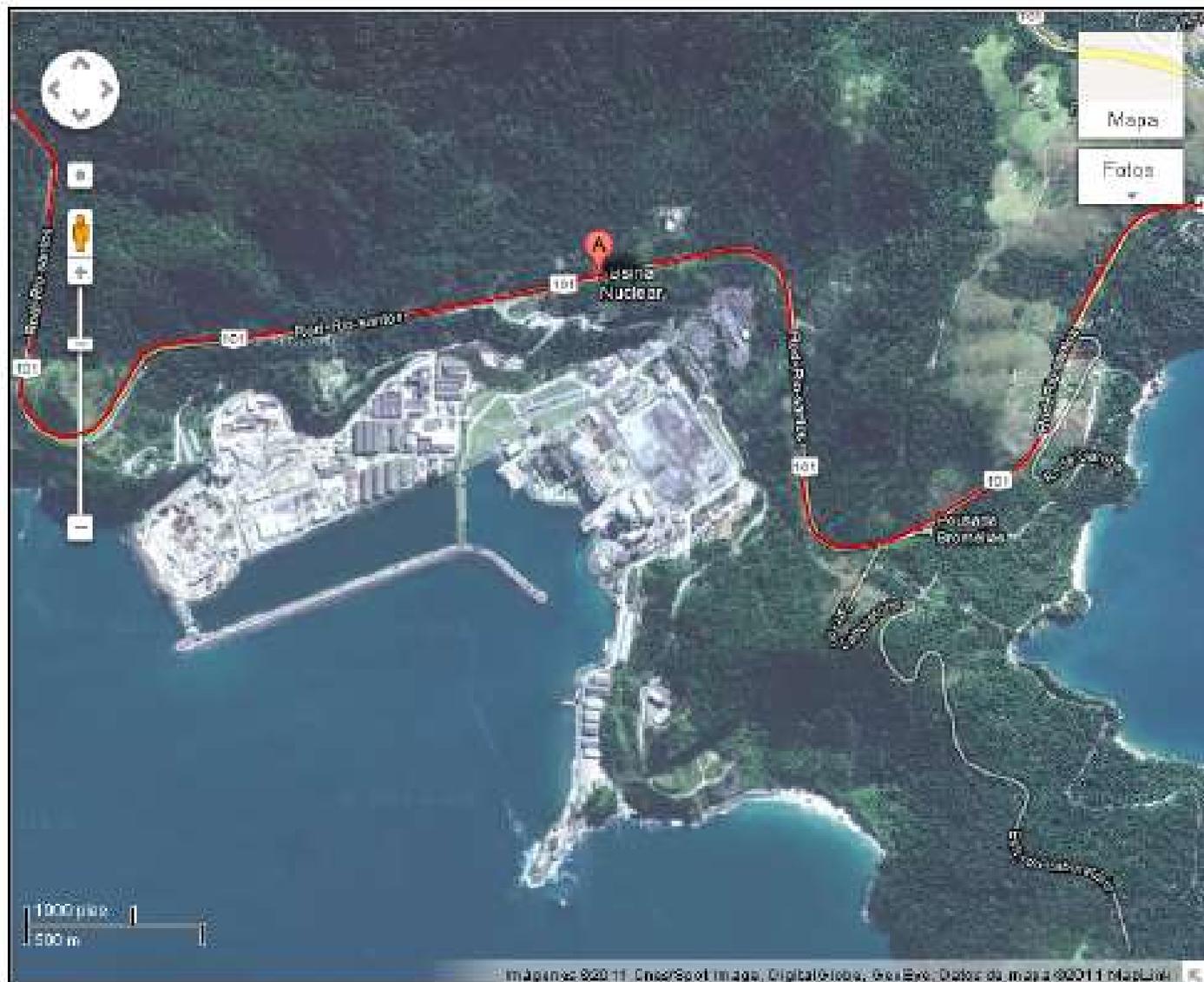


Figura 18: A rodovia Rio-Santos (BR-101) e a região das usinas de Angra dos Reis.

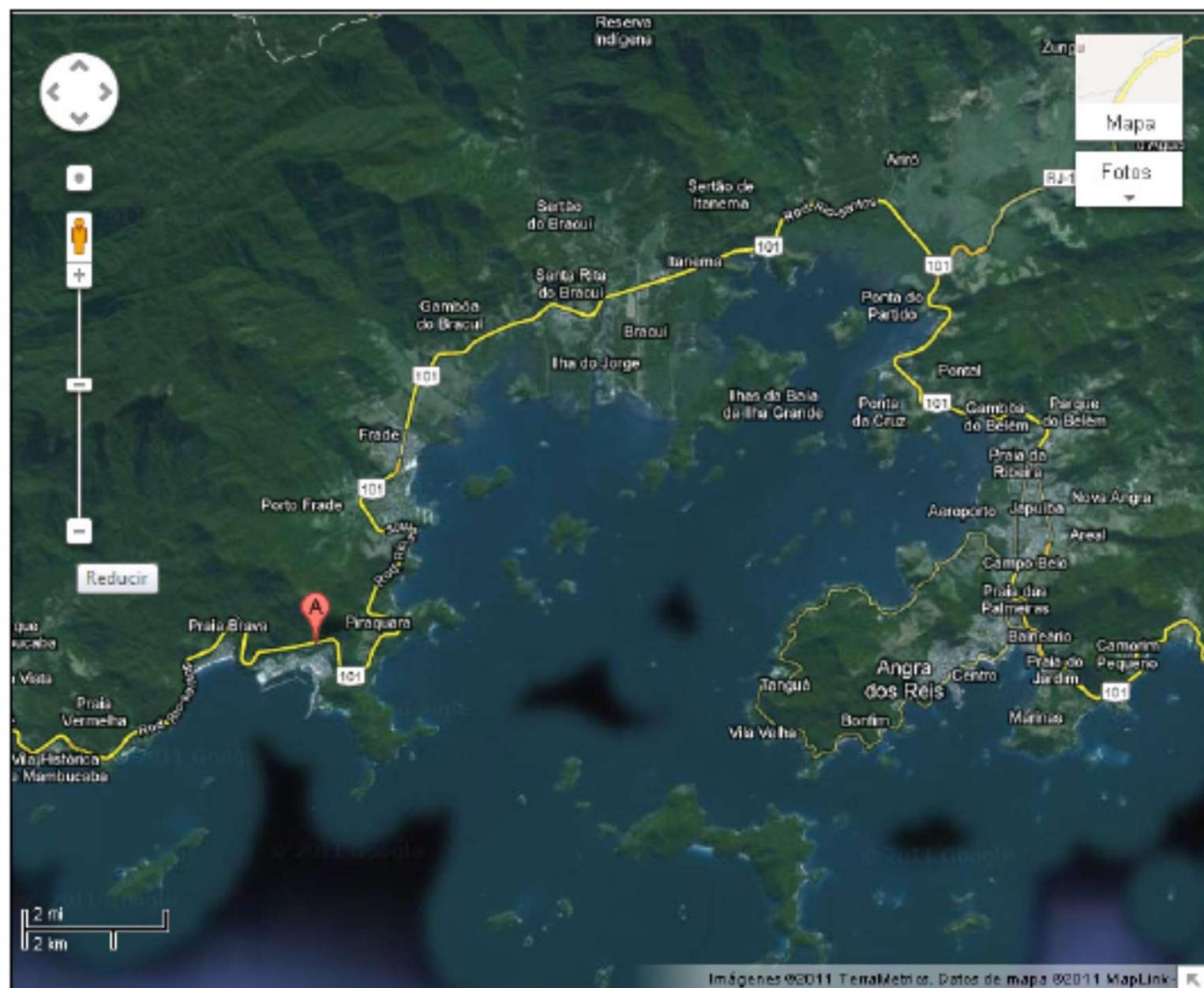


Figura 19: Localização das usinas nucleares (A) e a proximidade das áreas urbanas e ilhas na região de Angra dos Reis.

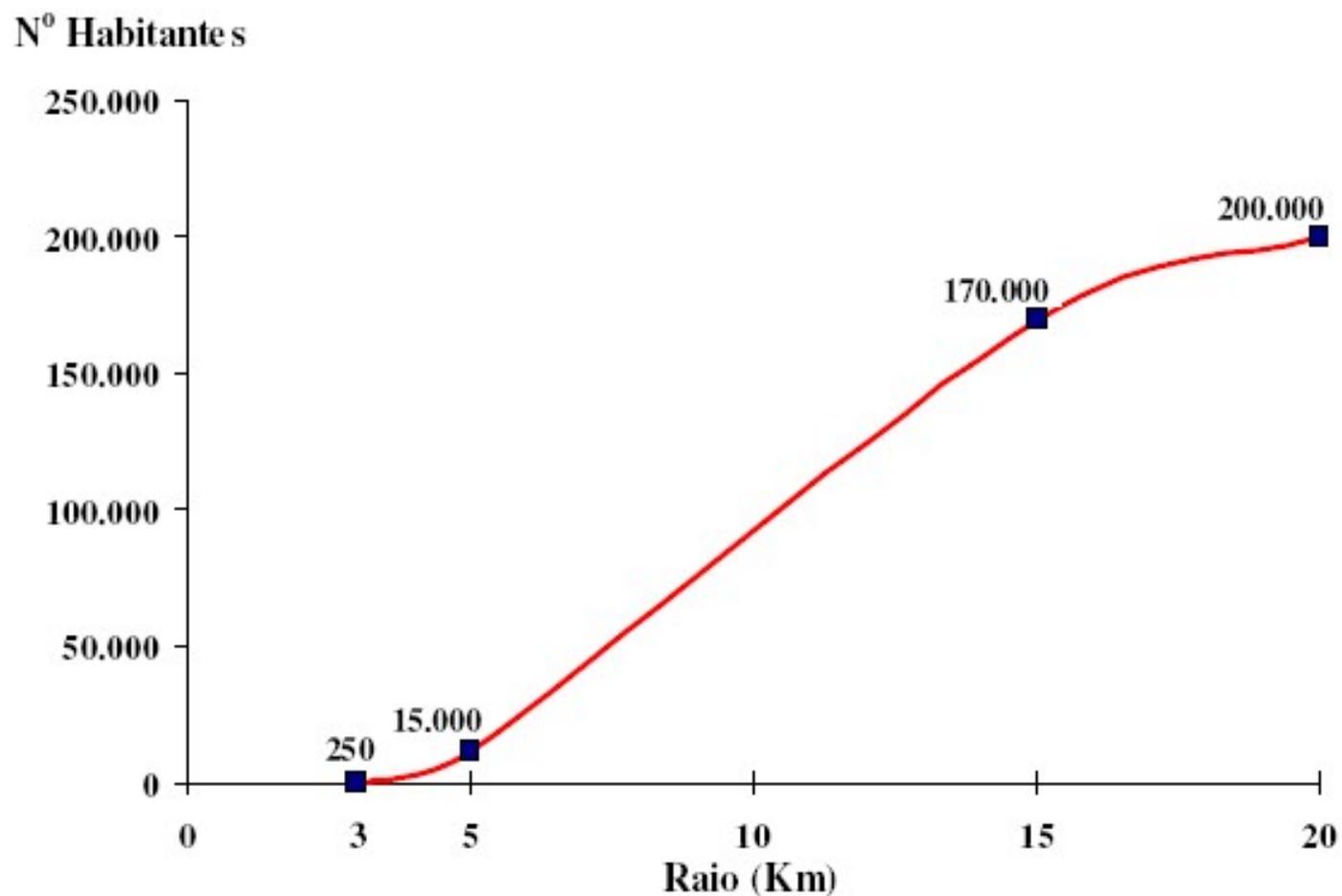


Gráfico 1: População da região de Angra dos Reis em função dos raios de Evacuação que deveriam ser considerados no Plano de Emergência

Fonte: Elaboração própria.

4. Conclusões

Este estudo mostrou que o problema mais grave em Angra dos Reis diz respeito à instabilidade do terreno onde as usinas estão assentadas, sujeito a deslizamentos após chuvas fortes, como sucedeu na região há um ano, bloqueando a única estrada por onde a população poderia ser evacuada em caso de acidente nuclear, que é a Rio-Santos (BR-101).

Este estudo também demonstrou que existem vigorosos problemas na implementação dos Planos de Emergência e de Evacuação para situações plausíveis de ocorrência de interrupção do suprimento de energia elétrica nas usinas nucleares de Angra 1 e 2, em função dos deslizamentos nas encostas da região. Apenas ações insuficientes e não efetivas está sendo tomadas pela empresa para reduzir ou afastar estes riscos.

Ainda, este estudo indicou que é limitado o raio que a empresa Eletronuclear considera para efeitos de evacuação, e que as rotas de fuga são precárias senão impeditivas, para o deslocamento em condições adequadas de uma quantidade significativa de pessoas, incluindo os próprios funcionários das usinas, e os moradores do entorno das usinas, cujo número pode chegar a 200 mil pessoas, se o raio de 20 km for considerado para o Plano de Evacuação.

O estudo também mostrou como o treinamento da população potencialmente incluída no atual Plano de Evacuação limitado aos 3 e 5 km, é precário e as condições de transporte desta população em situação emergencial são também precárias, como são inexistentes condições adequadas de abrigo para esta população no caso de ser removida por ocasião de um evento de exposição aos radioisótopos na eventualidade de um acidente nuclear similar ao verificado em março de 2011 na usina de Fukushima no Japão.

Nestas condições, a construção de uma terceira usina na região de Angra dos Reis vai multiplicar os problemas e ampliar os riscos aqui apontados.

Por seu turno, a empresa Eletronuclear apenas apresenta suas “boas intenções” em aumentar as condições de segurança nas usinas nucleares da região de Angra dos Reis.

Seus dirigentes, como o próprio governo brasileiro, acreditam que planos e projetos que estão sendo apresentados com a intenção de satisfazer as condicionantes de segurança solicitadas pelo Parlamento Alemão, serão suficientes para assegurar à agência Hermes e ao governo alemão a concessão do crédito para conclusão das obras de construção de uma terceira usina nuclear em Angra.

A iminente decisão do governo alemão de aprovar a garantia de crédito de **1,3 bilhões** de Euros com o aval da agência Hermes, através do fornecimento de equipamentos e serviços de engenharia nuclear da empresa AREVA para finalizar a construção da usina de Angra 3 no Brasil, pode ser considerada como uma atitude irresponsável, pois o governo alemão quer apoiar a construção de usinas nucleares nos outros países ao mesmo tempo em que o próprio governo alemão, num formidável exemplo para o mundo, decidiu fechar todas suas usinas nucleares até 2023.

Este estudo recomenda a não aprovação da concessão de crédito para a conclusão da construção da usina de Angra 3.

São Paulo, Brasil, Fevereiro de 2012.

Prof. Dr. Célio Bermann
IEE-USP

O Acidente na Usina Nuclear de Chernobyl
em 26 de abril de 1986

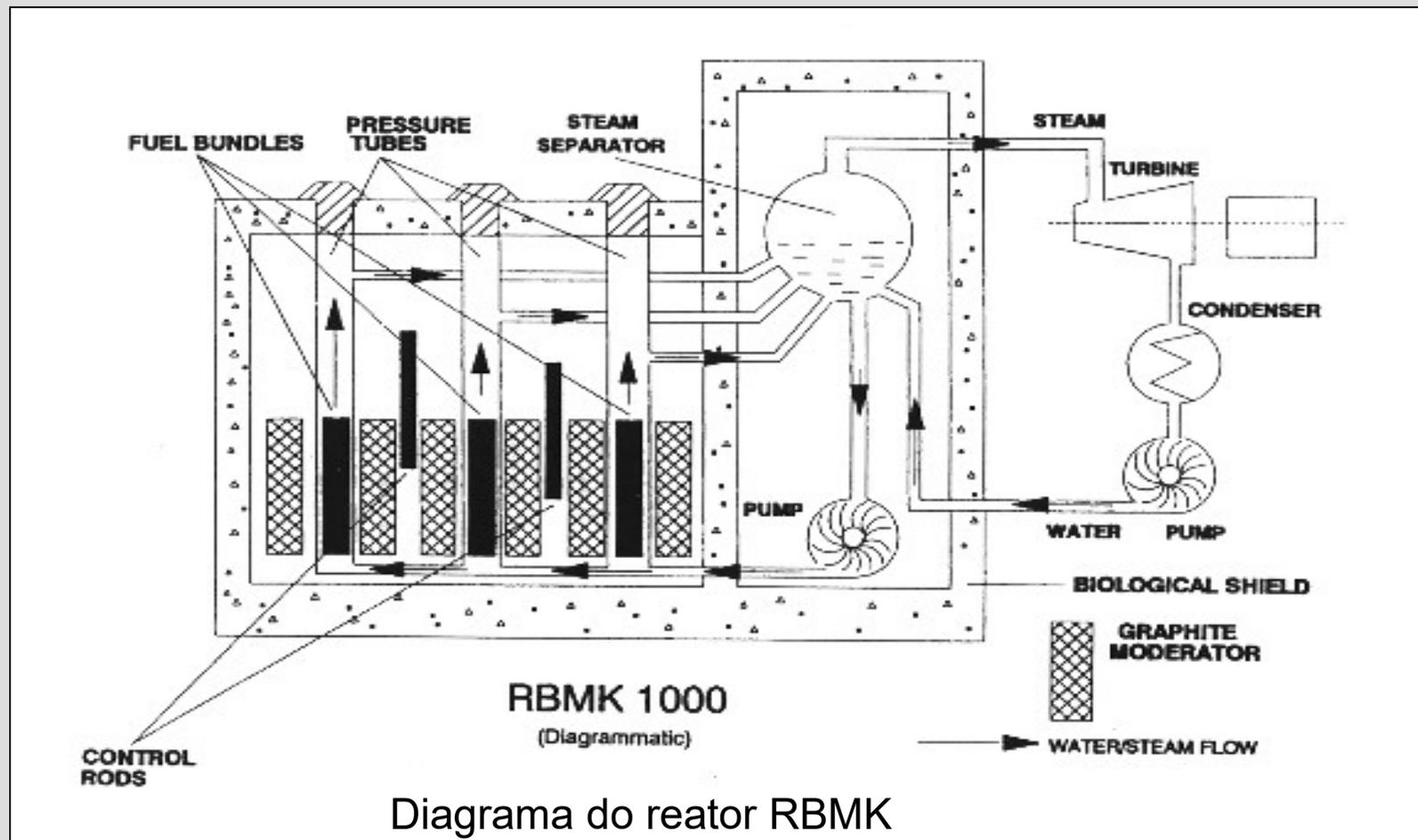
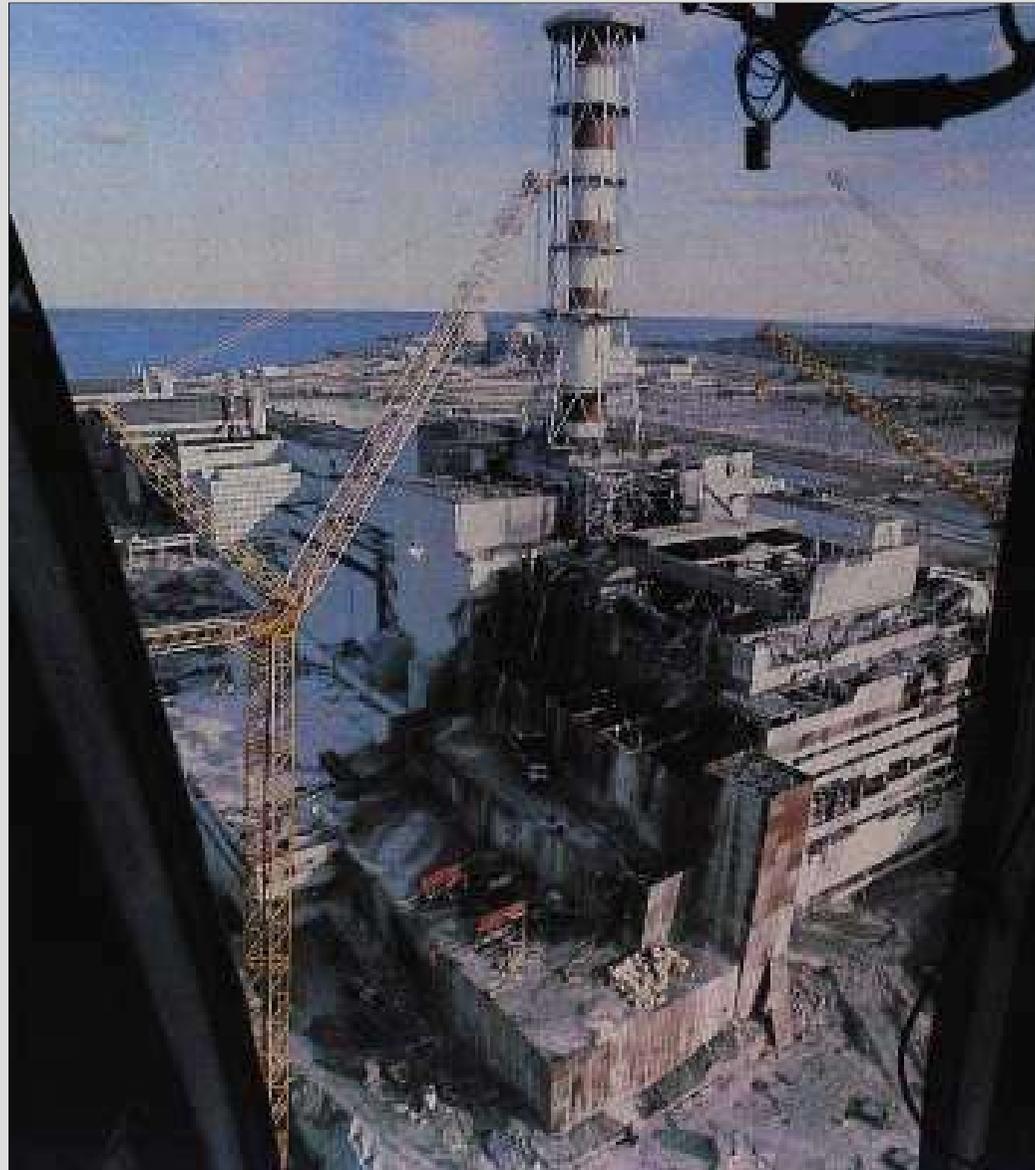


Diagrama do reator RBMK

Acidente em Chernobyl (26/abril/1986) – extensão: 4.300 km²

radioisótopos lançados na atmosfera:	iodo 131	–	0,06 kg	}	13,74 kg
	césio 134	–	0,40 kg		
	césio 137	–	11,70 kg		
	estrôncio 89	–	0,08 kg		
	estrôncio 90	–	1,50 kg		



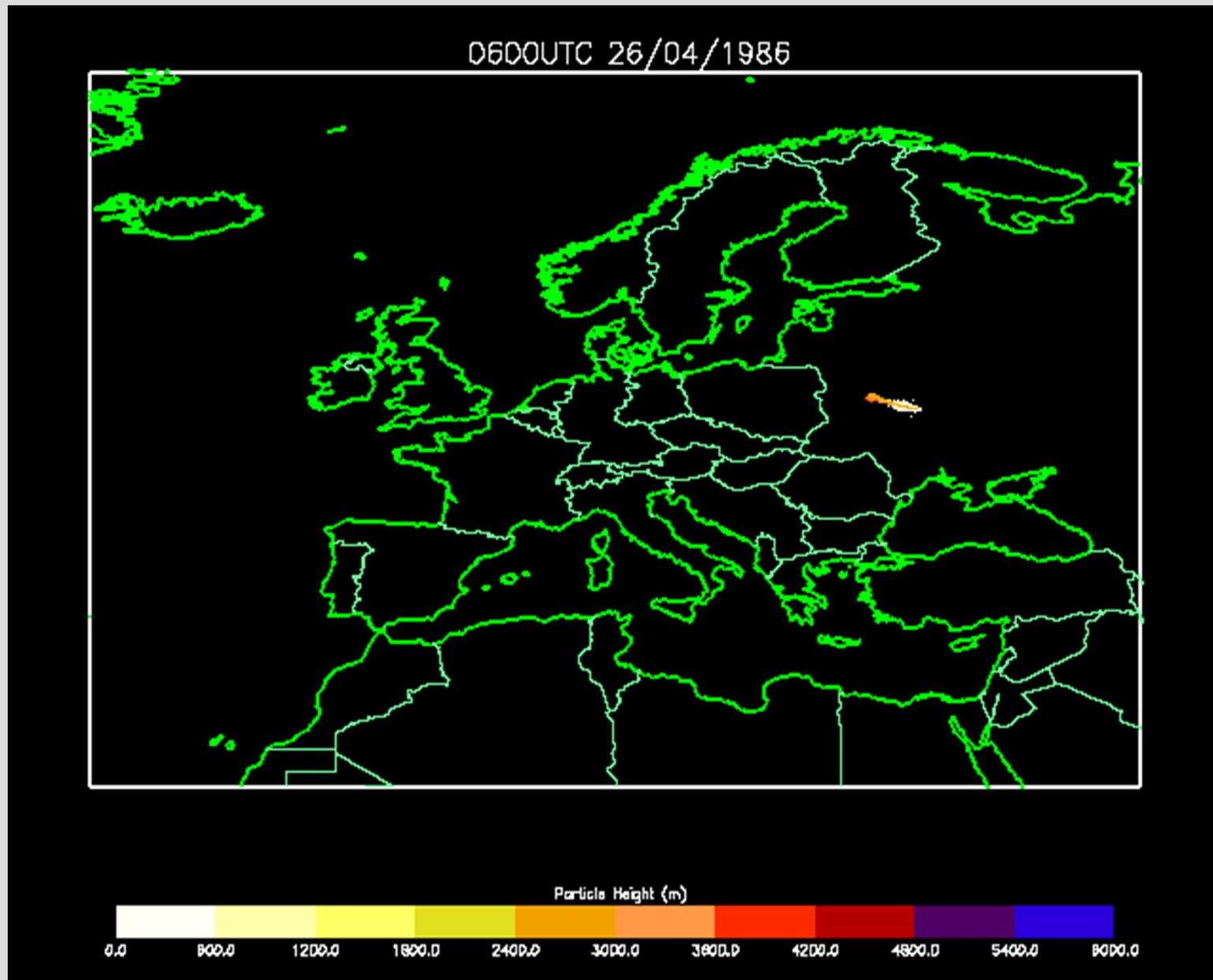
Chernobyl – vista do reator pós-acidente



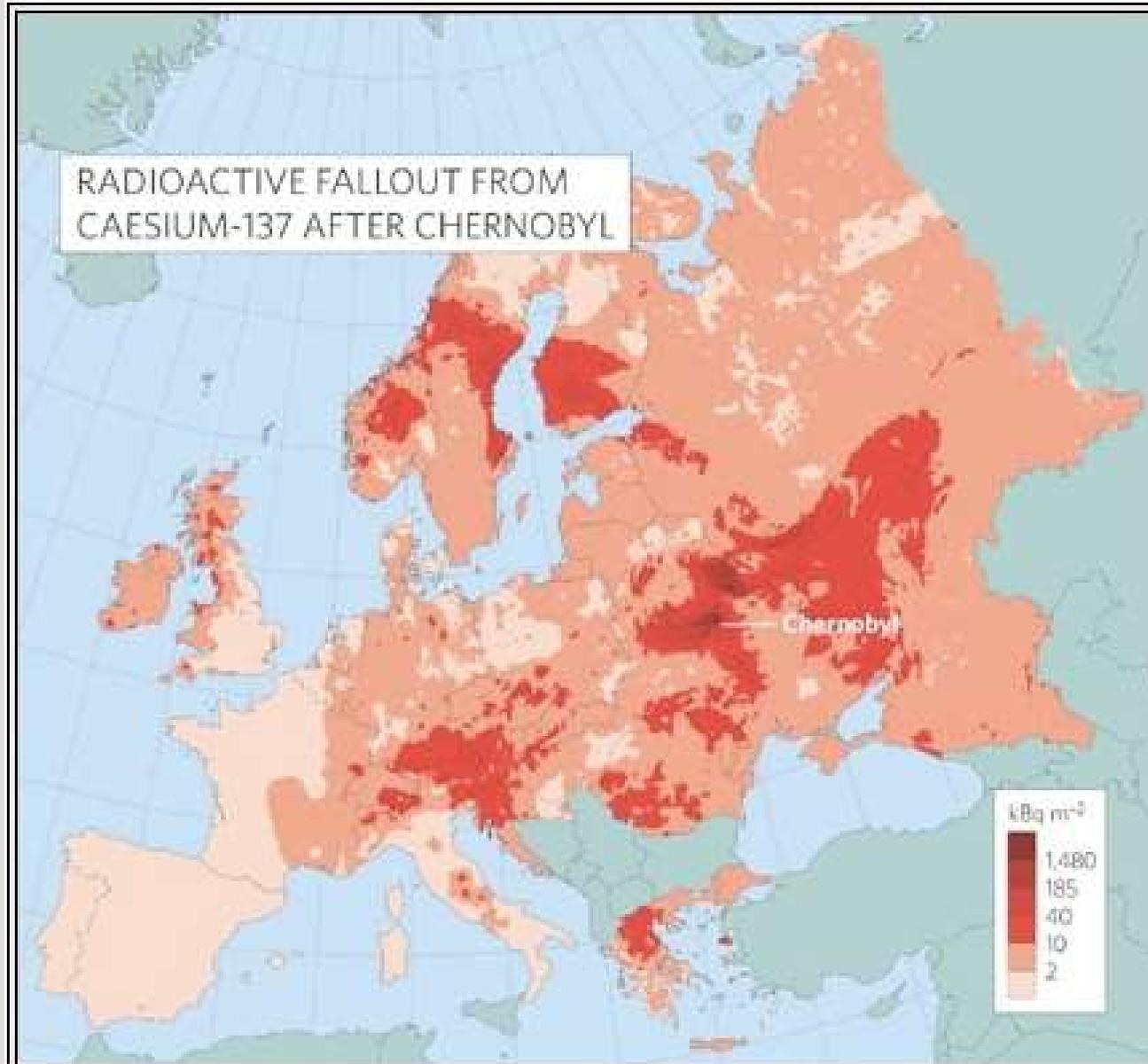
Chernobyl – vista do reator pós-acidente



Usina Chernobyl - Reator 4 – 26/abril/1986

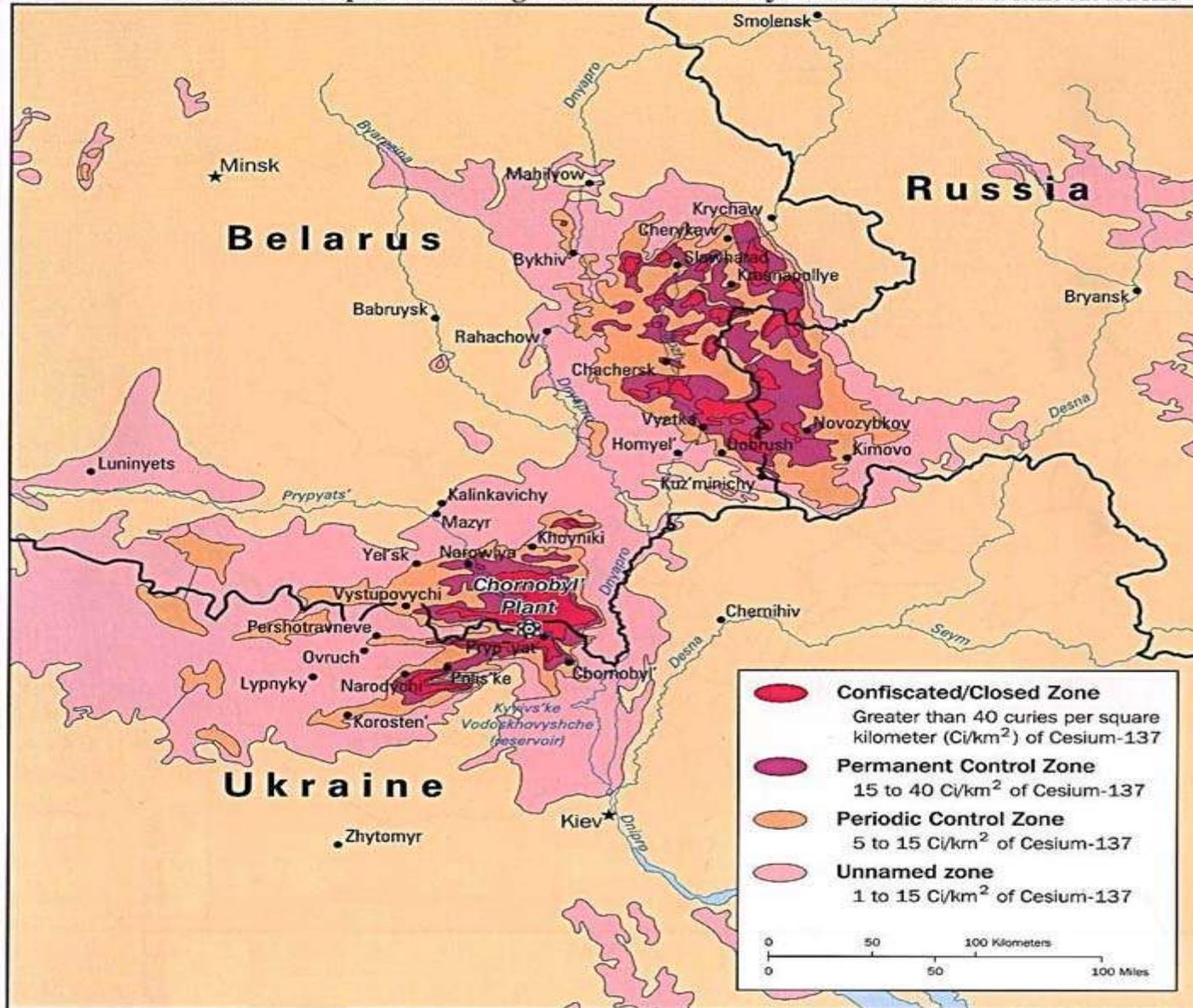


Simulação do movimento de partículas contendo radioisótopos lançados na atmosfera pelo acidente da Usina Chernobyl no período 26/04 - 07/05 de 1986 (Fonte: IRSN, 2006)



J. SMITH & N. A. BERESFORD CHERNOBYL: CATASTROPHE AND CONSEQUENCES (PRAXIS, CHICHESTER, 2005)

Radiation Hotspots Resulting From the Chornobyl' Nuclear Power Plant Accident



Consequências do acidente no Reator 4 da Usina de Chernobyl:

- 3 mortes imediatamente após a explosão do reator + 28 mortes nas horas que se seguiram
- 116.000 pessoas expostas à radiação de 50-100 mSv no raio de 30 km da usina foram evacuadas 36 horas após a explosão do reator
- das pessoas evacuadas cerca de 5.000 teriam morrido nos 6 meses seguintes ao acidente
- 2.000 - 4.000 casos de câncer na tireóide
- 5 milhões de pessoas foram expostas à radiação de até 37 kBq/m² de Cs-137
- 400 mil pessoas foram expostas à radiação de até 555 kBq/m² de Cs-137
- reconhecimento oficial de 56 mortes até 2005 (Chernobyl Forum Report, 2006)
- 600.000 “liquidadores” (*‘voluntários’* recrutados à força pelo governo para os trabalhos de limpeza durante os 8 meses após o acidente)
- 8.000-10.000 destes morreram vítimas da exposição à radiação sem equipamentos adequados de proteção
- as outras 3 unidades da usina só foram definitivamente desligadas em 15/dezembro/2000

Bibliografia complementar:

- MATTHES, F. C. ; ROSENKRANZ, G. ; BERMANN, C. (org.). A energia nuclear em debate: mitos, realidades e mudanças climáticas. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2006. 152 p.

Disponível em: http://www.boell-latinoamerica.org/download_pt/Energia_Nuclear_em_Debate.pdf

- NETZER, N. & JOCHEN STEINHILBER, J. (eds.). The End of Nuclear Power? International perspectives after Fukushima. Berlin: Friedrich Ebert Stiftung, 2011, 81p.

Disponível em: <http://library.fes.de/pdf-files/iez/08289.pdf>

Sobre o acidente na usina de Chernobyl:

- SUH, Kyung-Suk; HAN, Moon-Hee; JUNG, Sung-Hee; LEE, Chang-Woo. “Numerical simulation for a long-range dispersion of a pollutant using Chernobyl data”. In: Mathematical and Computer Modelling. Vol. 49, Issues 1–2, January 2009, pp. 337–343.

IRSN – Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucleaire. Accident de Tchernobyl : déplacement du nuage radioactif au dessus de l'Europe entre le 26 avril et le 10 mai 1986, 2006.

Disponível em: http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/tchernobyl_video_nuage.aspx

Ver também: <http://www.constantinealexander.net/2012/08/page/16/> (Filme americano sobre o acidente)

Série Chernobyl na HBO:

Acesso para download:

<https://viatorrents.com/chernobyl-1-temporada-download-via-torrent/>

Vídeo de 31:36 min - Chernobyl: A História Completa (criação: ‘Ciência Todo Dia’)

<https://www.youtube.com/watch?v=DiGqjYkRQ6o>