

# Plano Nacional de Energia 2030



## Geração Termonuclear

# Plano Nacional de Energia 2030

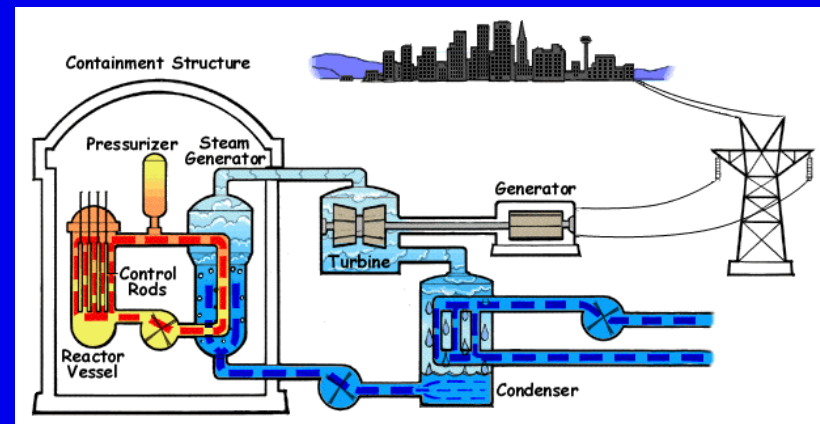
## *Geração Termonuclear*

### Roteiro

<b>Observações iniciais</b>	<b>1</b>
<b>Energia nuclear no mundo</b>	<b>2</b>
<b>Energia nuclear no Brasil</b>	<b>3</b>
<b>Expansão da energia nuclear no Brasil</b>	<b>4</b>

# Observações iniciais

---



## Observações iniciais

### Metodologia de trabalho: reuniões temáticas

- Durante os meses de fevereiro e março de 2006, a EPE promoveu uma série de **reuniões temáticas**, direcionadas para os **estudos da oferta**.
- No dia **23 de fevereiro**, no Escritório Central da empresa, teve lugar a que se ocupou do tema **Energia Nuclear**.
- Os depoimentos e os esclarecimentos colhidos nessas reuniões fazem parte do material de referência utilizado nos estudos da oferta.
- No caso da Energia Nuclear foram especialmente importantes, seja por sua relevância intrínseca, dada a qualificação dos profissionais convidados, seja por sua atualidade.

## Observações iniciais

### Convidados para o tema Geração Termonuclear

**Anselmo Salles Paschoa**, professor titular do Departamento de Física da PUC-Rio e ex-Diretor de Rádio-proteção, Segurança Nuclear e Salvaguarda da CNEN;

**Aquilino Senra Martinez**, professor do Programa de Engenharia Nuclear da Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia – COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

**Isaac José Obadia**, Coordenador-geral de Ciência e Tecnologia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN

**José Carlos Castro**, Assessor de Planejamento e Comercialização da Indústrias Nucleares do Brasil – INB e 1º Secretário da Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN;

**Olga C. R. L. Simbalista**, Assessora da Presidência da Eletrobrás Termonuclear S.A. – Eletronuclear

**Sergio G. Mathias**, Assessor de Comercialização da Eletronuclear

Alfredo **Tranjan** Filho, Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento da CNEN

### Outras referências importantes no tema

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY

NEA/ODCD – NUCLEAR ENERGY AGENCY

UNIVERSITY OF CHICAGO. The Economic Future of Nuclear Power, 2004

## Observações iniciais: **Conceitos utilizados**

### **CLASSIFICAÇÃO DAS RESERVAS**

**(Agência Internacional de Energia Atômica)**

as reservas são classificadas conforme o nível de certeza e seu custo estimado de produção

**RESERVAS  
TOTAIS**

#### **RECURSOS CONVENCIONAIS CONHECIDOS**

*recursos disponíveis a um custo de extração conhecido*

- **recursos razoavelmente assegurados**
- **recursos adicionais estimados, categoria I**

#### **RECURSOS CONVENCIONAIS NÃO DESCOBERTOS**

*recursos exploráveis com técnicas conhecidas mas com existência e tamanho com elevada incerteza*

- **recursos adicionais estimados, categoria II**
- **recursos especulados**

## Observações iniciais: **Conceitos utilizados**

### **DEFINIÇÕES**

- **recursos razoavelmente assegurados – RRA**

depósitos com tamanho, teor e configuração delineados, de modo que os custos de produção com tecnologias de mineração e processamento conhecidas possam ser determinados

- **recursos adicionais estimados, categoria I – RAE-I**

recursos em extensões de depósitos já explorados ou com continuidade geológica definida, com grau de incerteza maior que os RRA

- **recursos adicionais estimados, categoria II – RAE-II**

recursos com evidências indiretas de existência ou esperados a partir de tendências geológicas

- **recursos especulados – RE**

recursos que se imagina existirem a partir de evidências indiretas ou extrapolações geológicas

- **razão R/C**

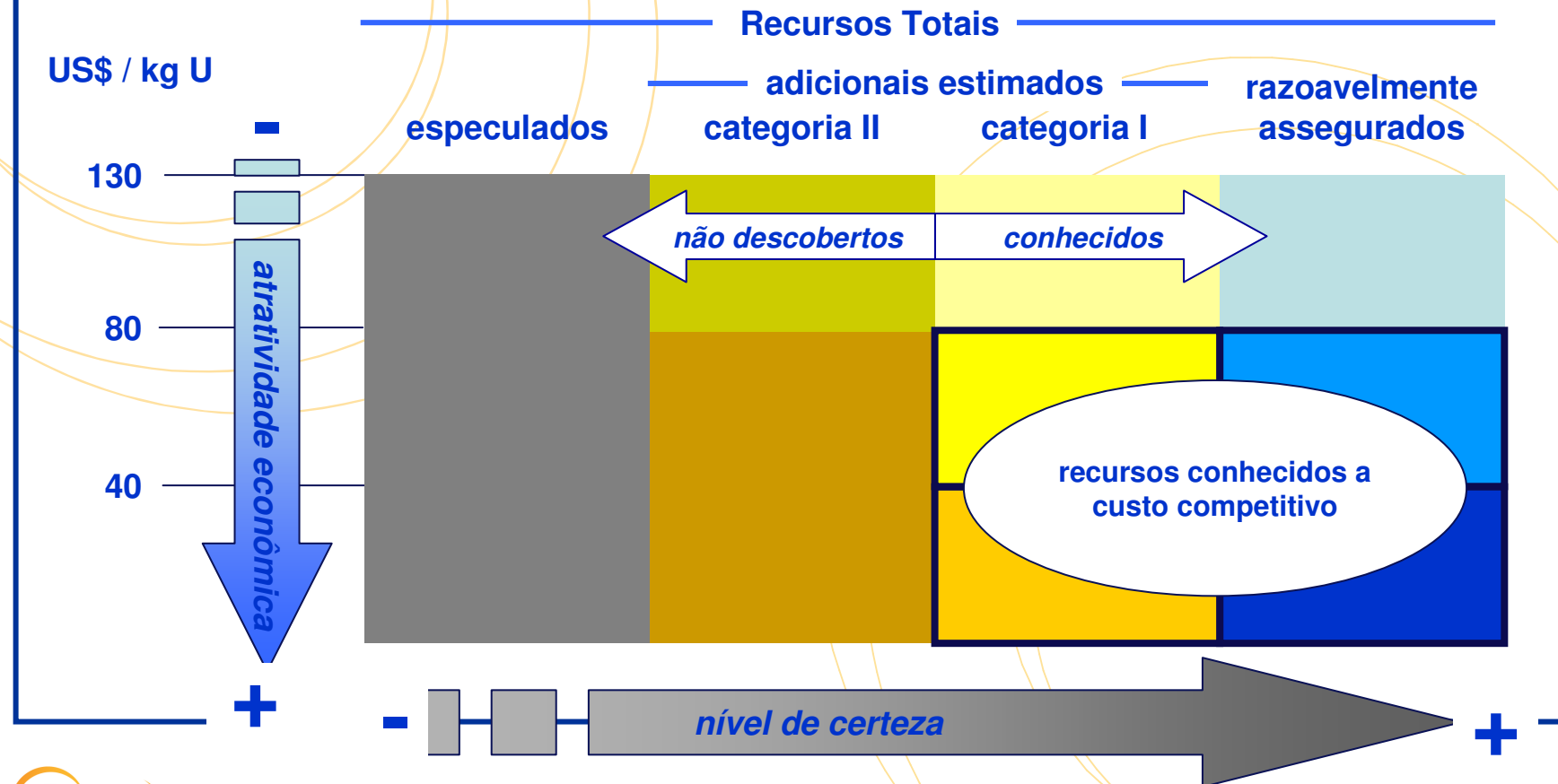
período de tempo (anos) que as reservas remanescentes poderiam atender ao consumo atual

*Obs. tem-se utilizado a razão R/C e não R/P (produção) tendo em vista o consumo ser bem maior que a produção por ainda existirem estoques secundários do metal*

## Observações iniciais: Conceitos utilizados

### Classificação dos recursos de urânio (AIEA)

As reservas de urânio são classificadas conforme o nível de certeza e custo.



Obs: limites de custo da Nuclear Energy Agency (OCDE); incluem mineração, transporte e processamento, custos ambientais, amortização, indiretos, etc



## Observações iniciais: **Conceitos utilizados**

### **CICLOS DO COMBUSTÍVEL**

#### **CICLO ABERTO**

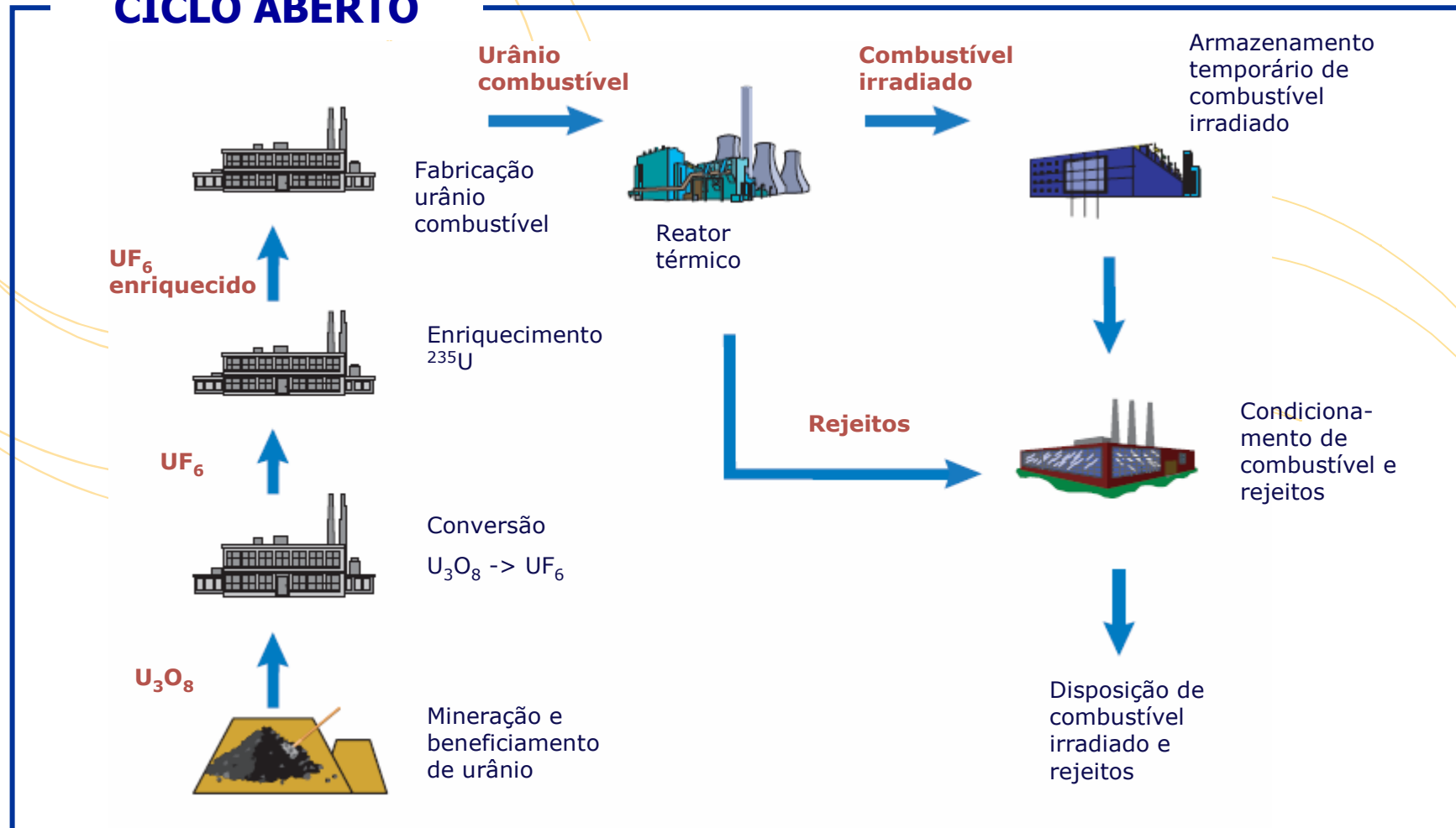
*Prevê disposição do combustível*

#### **CICLO FECHADO**

*Admite reprocessamento do urânio*

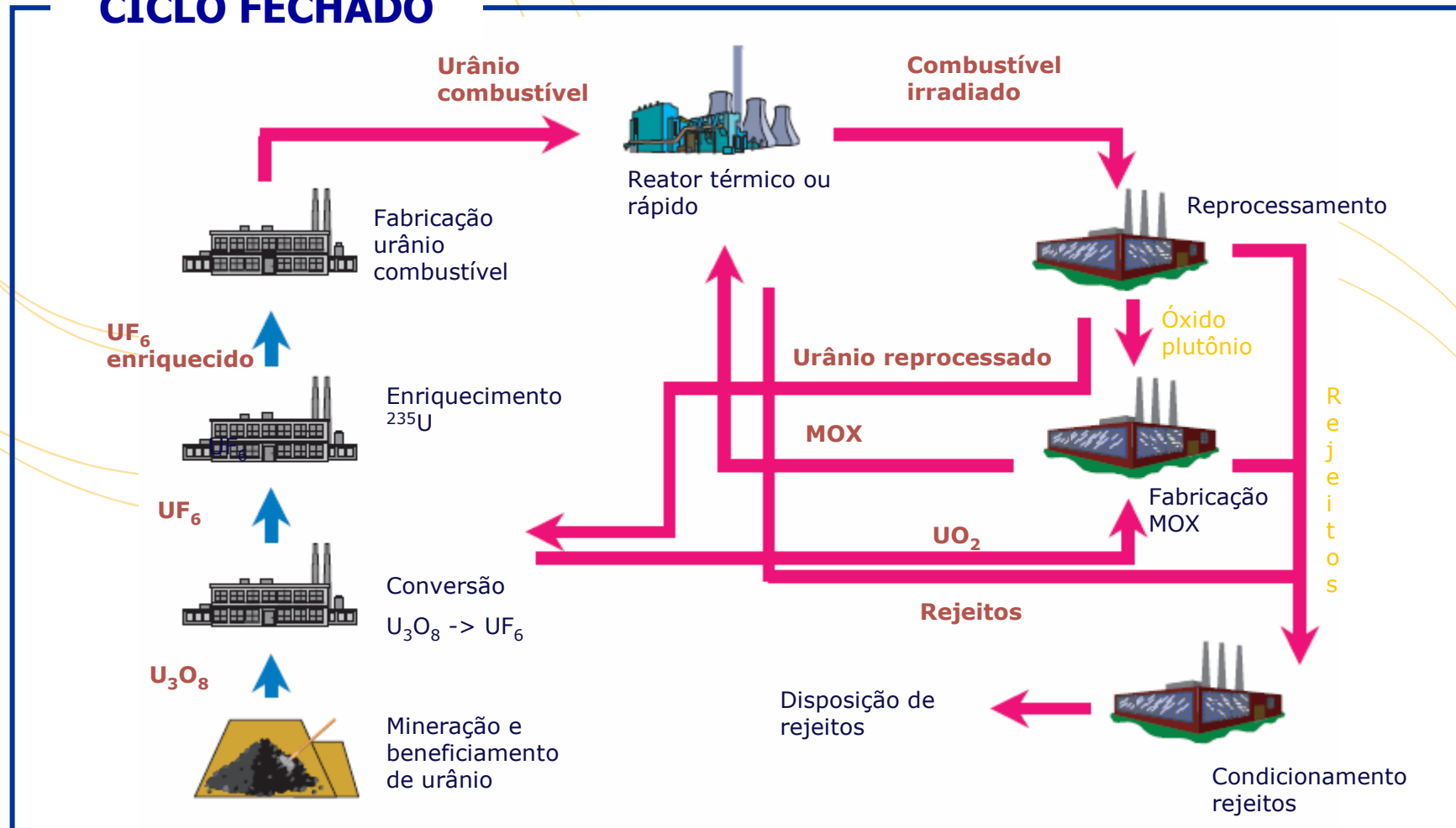
## Observações iniciais: Ciclo do combustível

### CICLO ABERTO



## Observações iniciais: Ciclo do combustível

### CICLO FECHADO



MOX: combustível misto de óxidos de urânio e plutônio

# Energia Nuclear no Mundo

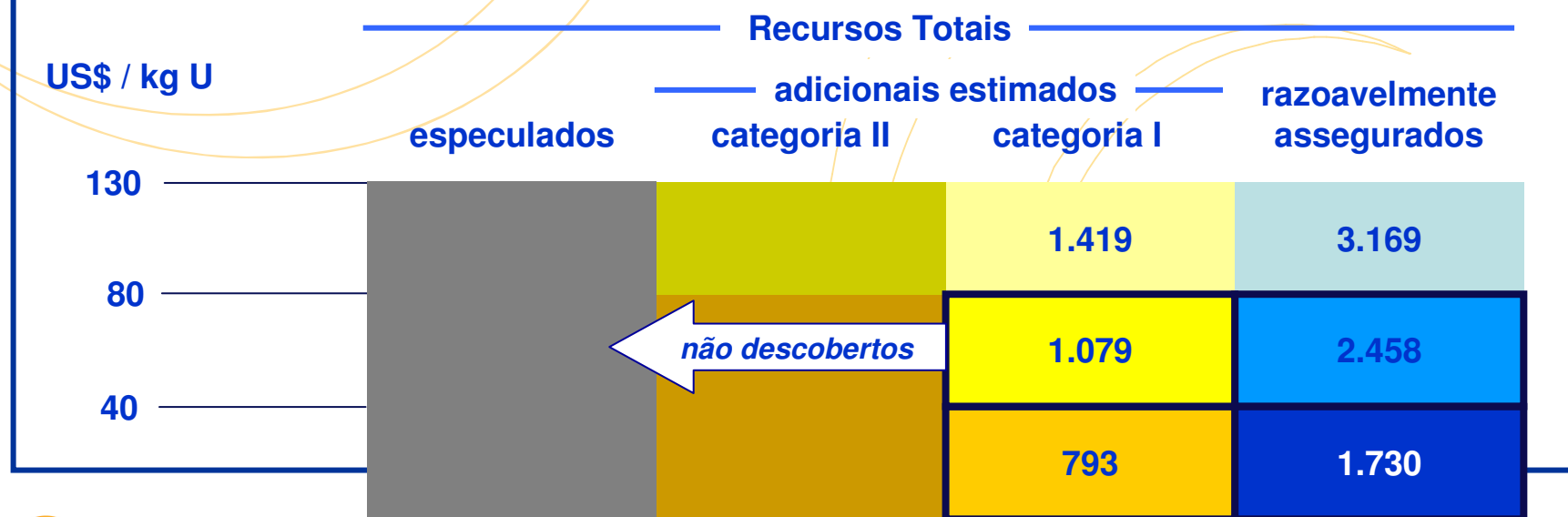
---



## Energia Nuclear no Mundo: Recursos conhecidos de urânio - 2003

### Reservas mundiais

- O urânio se distribui sobre toda a crosta terrestre aparecendo como constituinte da maioria das rochas. As reservas deste elemento, para que se tornem economicamente atrativas, dependem do teor de urânio presente assim como da alternativa tecnológica usada para o seu aproveitamento.
- As reservas convencionais conhecidas mundiais de urânio totalizam  $4,6 \times 10^6$  t, sendo 55% abaixo de US\$ 40/kg U e 77% abaixo de US\$ 80/kg U
- Considerando as reservas de urânio de até US\$ 80/kg, a razão R/C é de 53 anos



## Energia Nuclear no Mundo: Recursos conhecidos de urânio - 2003

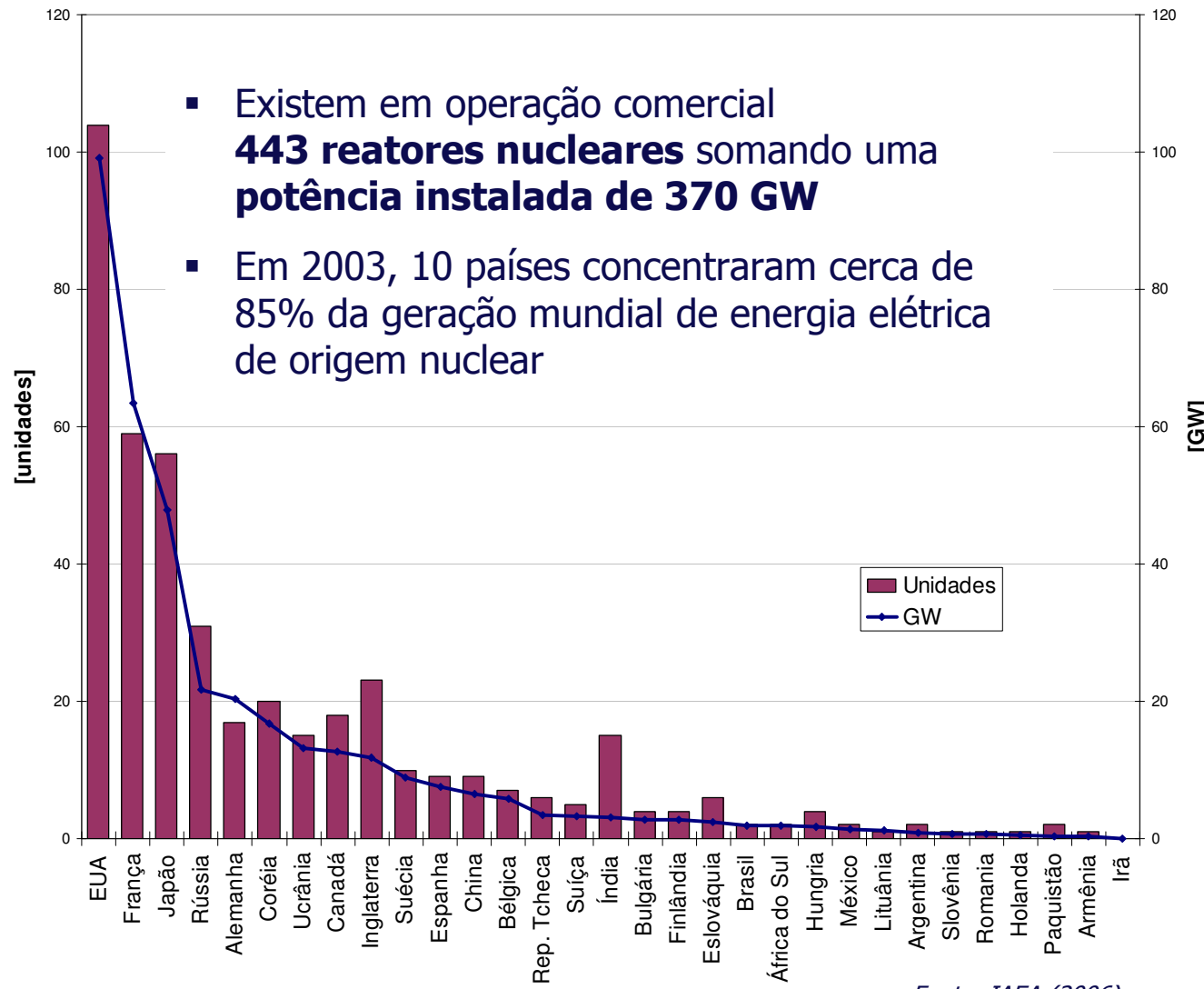
- Em 2003, 7 países (Brasil é o 6º) detinham 77% dos recursos convencionais conhecidos de urânio com **custo abaixo de US\$ 130/kg U**



País	10 <sup>3</sup> t	Part.
Cazaquistão	957	21,0%
Austrália	910	19,8%
África do Sul	369	8,0%
Estados Unidos	355	7,7%
Canadá	332	7,2%
Brasil	309	6,7%
Namíbia	287	6,3%
<b>Subtotal</b>	<b>3.519</b>	<b>77,0%</b>
Demais países	1.069	23,0%
<b>MUNDO</b>	<b>4.588</b>	<b>100%</b>

Fonte: INB, AIEA

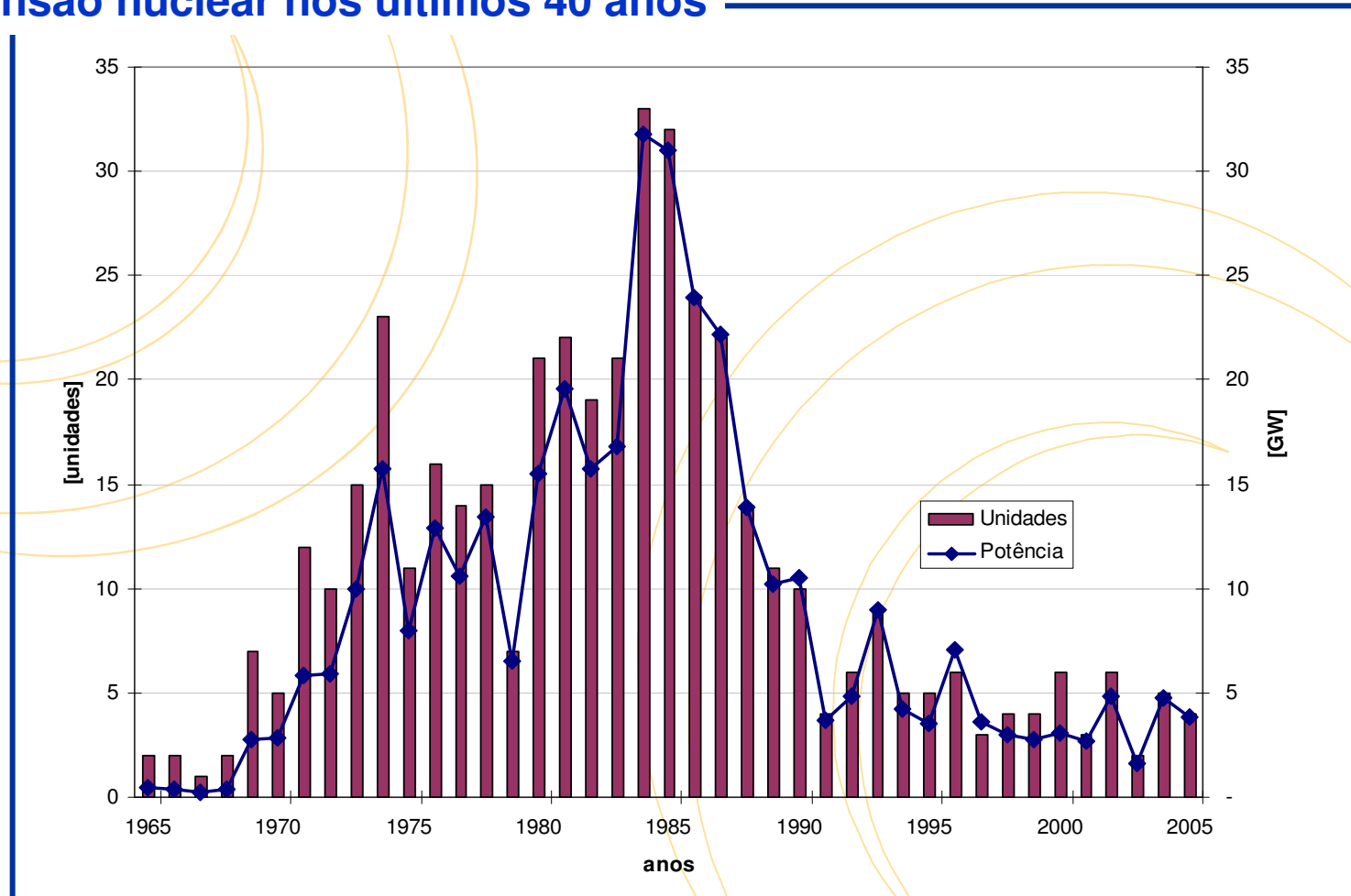
## Energia Nuclear no Mundo: Parque instalado de geração nuclear



- Existem em operação comercial **443 reatores nucleares** somando uma **potência instalada de 370 GW**
- Em 2003, 10 países concentraram cerca de 85% da geração mundial de energia elétrica de origem nuclear

## Energia Nuclear no Mundo: Parque instalado de geração nuclear

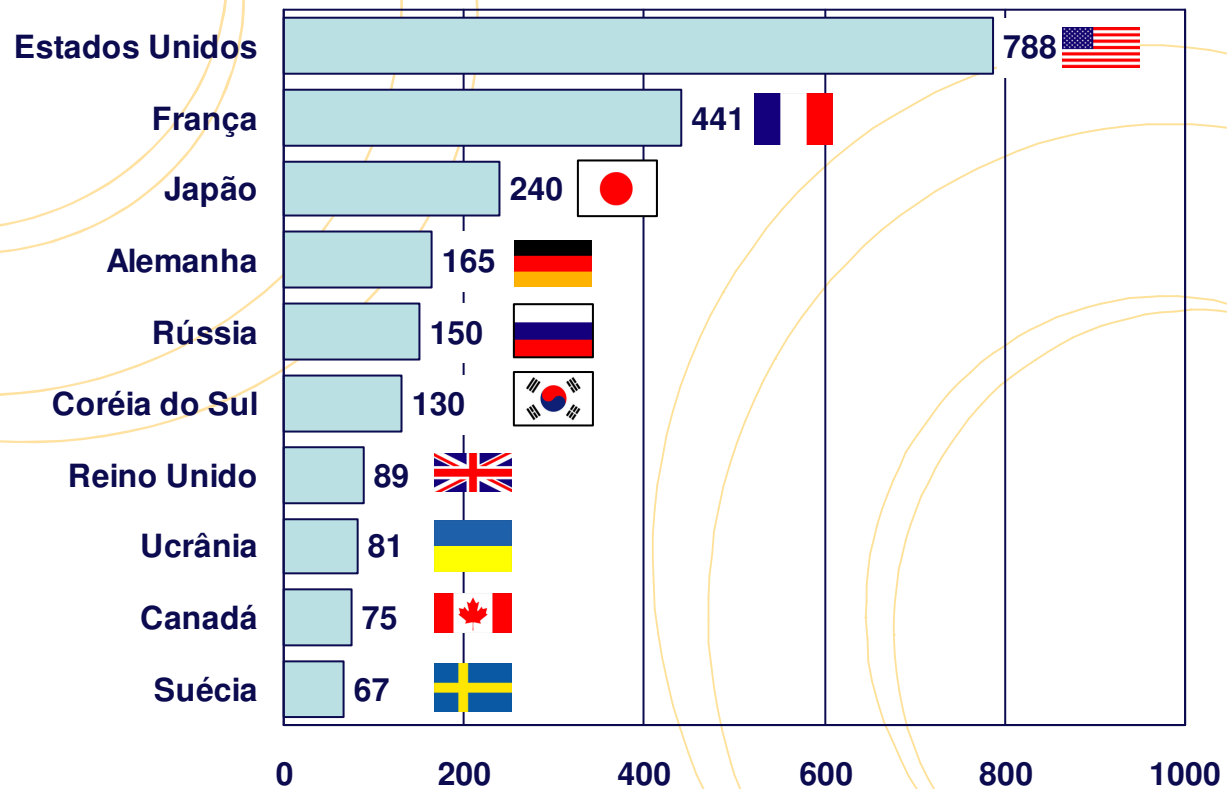
### Expansão nuclear nos últimos 40 anos





## Energia Nuclear no Mundo: Energia elétrica de origem nuclear - 2003

- Em 2003, **10 países** concentraram cerca de **85% da geração mundial** de energia elétrica de origem **nuclear (2.635 TWh)**

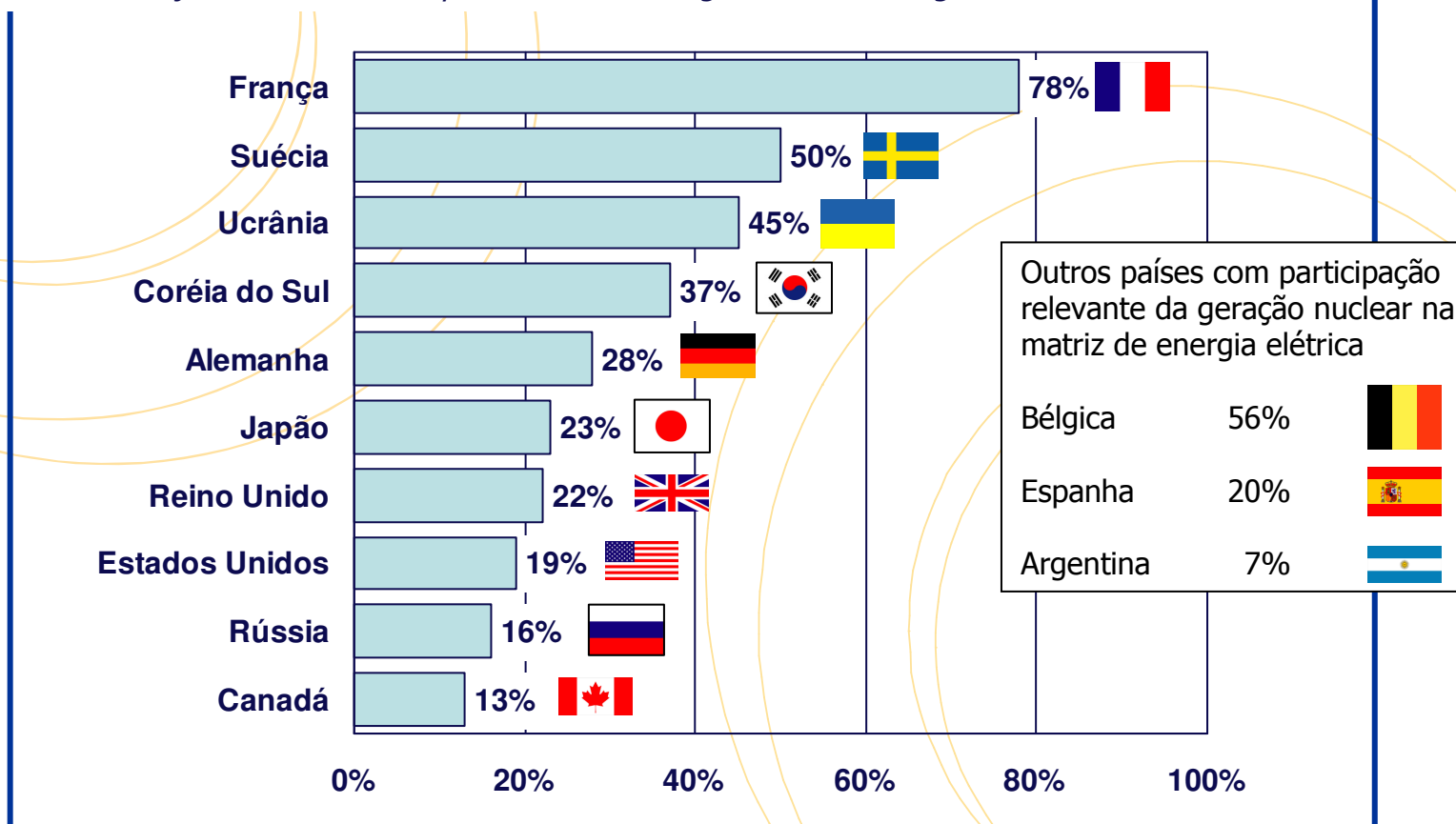


Unidade: TWh  
 Fonte: IEA (2005)

## Energia Nuclear no Mundo: Energia elétrica de origem nuclear - 2003

### Participação da geração nuclear na geração total de energia elétrica

Com base na relação dos 10 maiores produtores de energia elétrica de origem nuclear

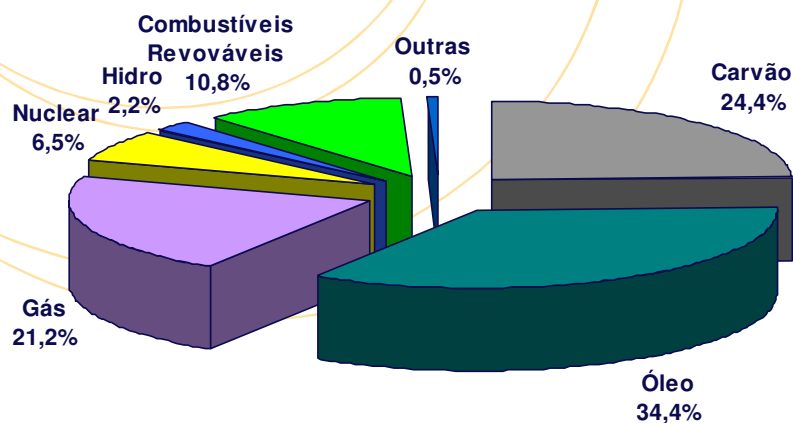


Fonte: IEA (2005)

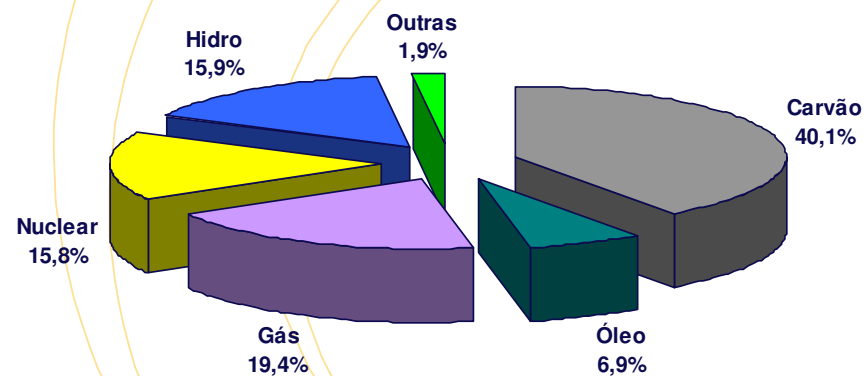
## Energia Nuclear no Mundo: Participação da energia nuclear como fonte de energia

- Em 2003, a energia nuclear respondeu por 6,5% da oferta mundial de energia primária e por 15,8% da geração mundial de energia elétrica (mesmo nível de participação da geração hidrelétrica)

Oferta de Energia Primária no Mundo - 2003



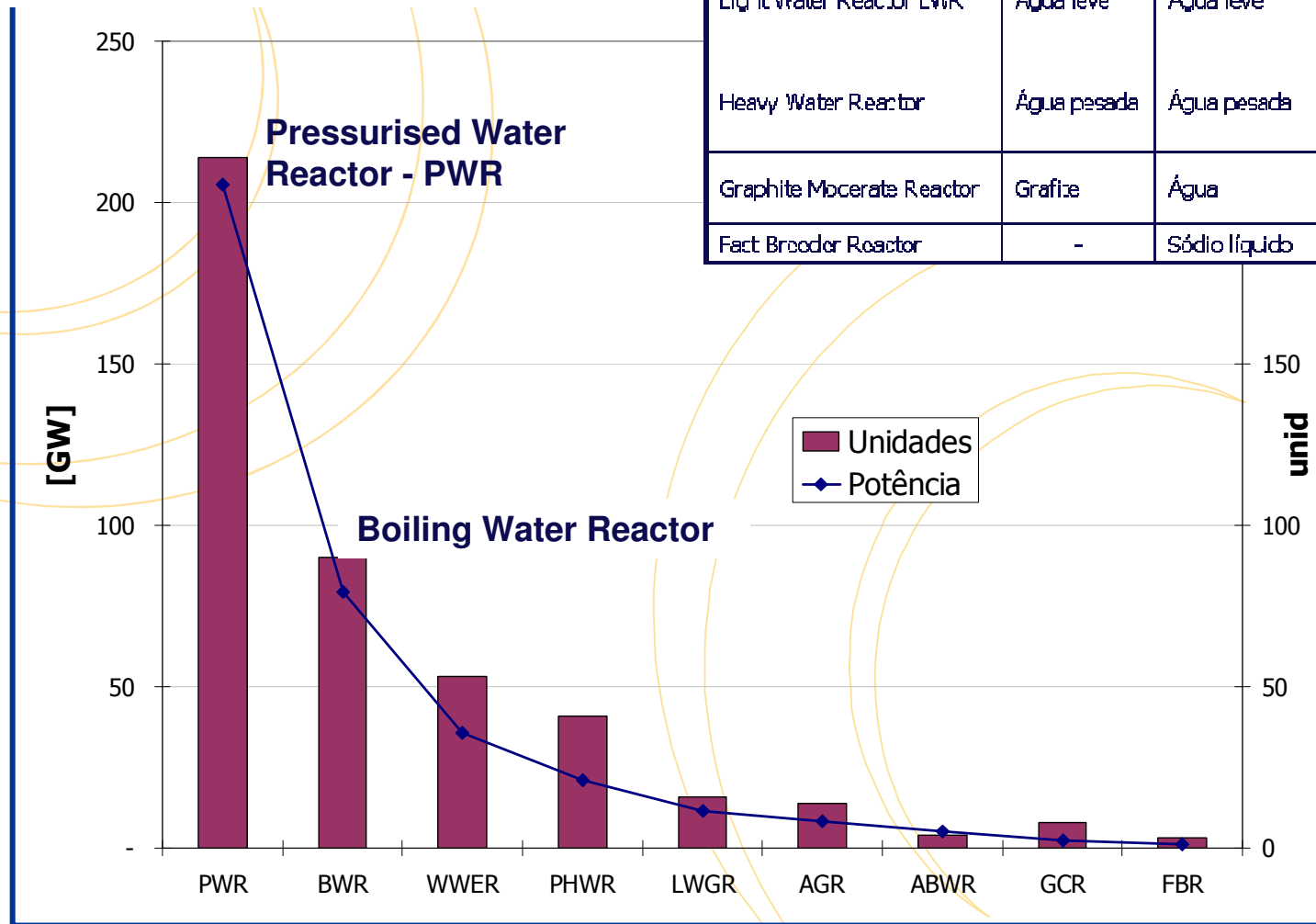
Geração de Energia Elétrica no Mundo - 2003



## Energia Nuclear no Mundo: Difusão tecnológica

### Reatores em operação no mundo

Tecnologia	Moderador	Refrigerante	Modelos
Light Water Reactor LWR	Água leve	Água leve	PWR, BWR, WWER
Heavy Water Reactor	Água pesada	Água pesada	PHWR, CANDU, MAGNOX
Graphite Moderator Reactor	Grafite	Água	AGR, RBMK
Fast Breeder Reactor	-	Sódio líquido	BN



# Energia Nuclear no Brasil

---



## Energia Nuclear no Brasil: Reservas

- Estudos de prospecção e pesquisas geológicas foram realizadas em apenas 25% do território nacional.
- Mesmo assim, as ocorrências conhecidas de urânio no Brasil como detentor da 6ª reserva mundial, o que permite atender as necessidades domésticas a longo prazo.
- Há, ainda, ocorrências uraníferas associadas a outros minerais, como aqueles encontrados nos depósitos de Pitinga no Estado do Amazonas e área de Carajás, no Estado do Pará, com um potencial adicional estimado de 150.000 t.

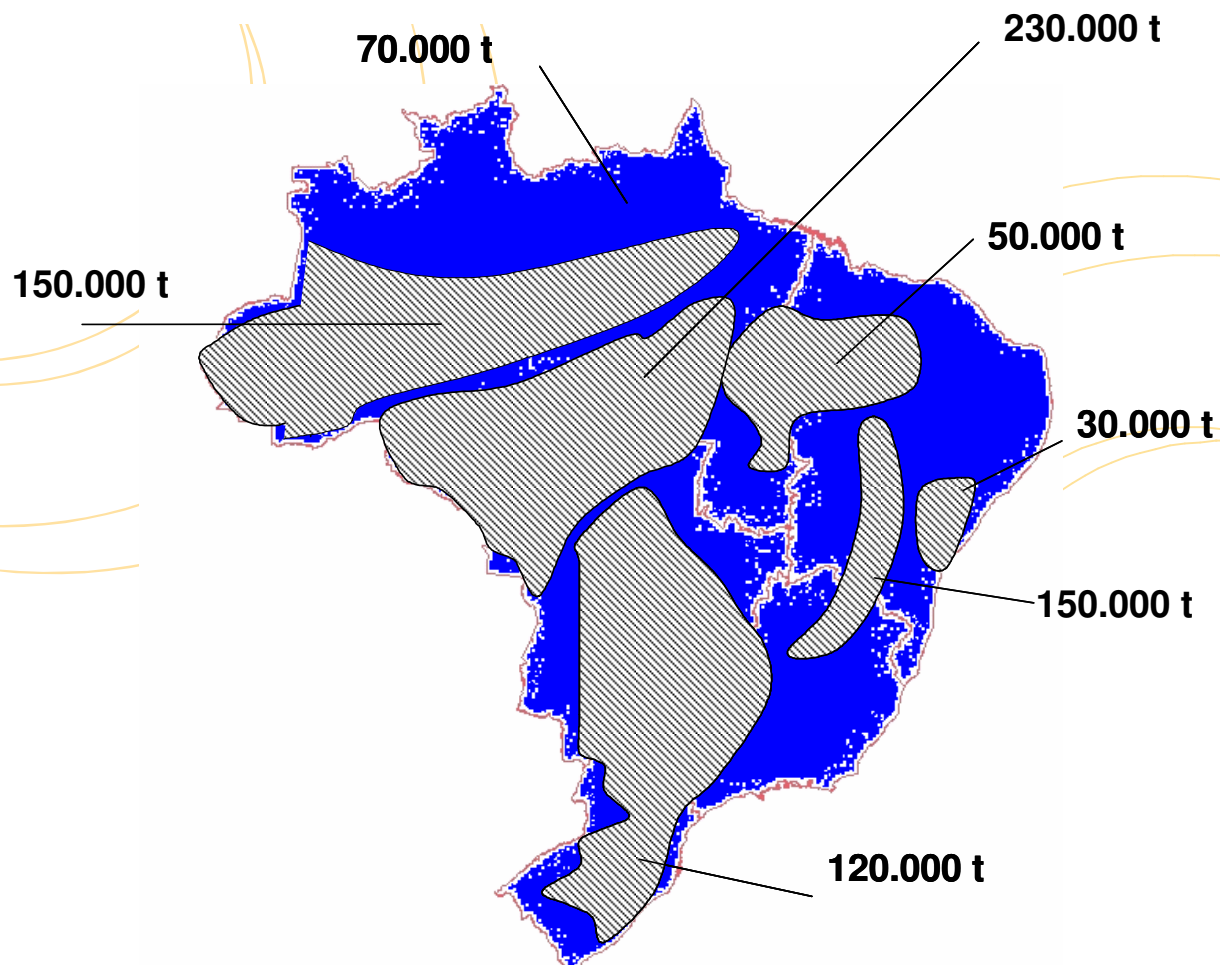


Depósito-Jazida	Medidas e Indicadas			Inferidas	TOTAL
	< 40 US\$/kg U	< 80US\$/kg U	Sub-Total	< 80US\$/kg U	< 80US\$/kg U
Caldas (MG)		500	500	4.000	4.500
Lagoa Real/Caetité (BA)	24.200	69.800	94.000	6.770	100.770
Itataia/Santa Quitéria (CE)	42.000	41.000	83.000	59.500	142.500
Outras				61.600	61.600
<b>TOTAL</b>	<b>66.200</b>	<b>111.300</b>	<b>177.500</b>	<b>131.870</b>	<b>309.370</b>

Fonte: INB (2006)

## Energia Nuclear no Brasil: Reservas

### Recursos adicionais estimados (não conhecidos)

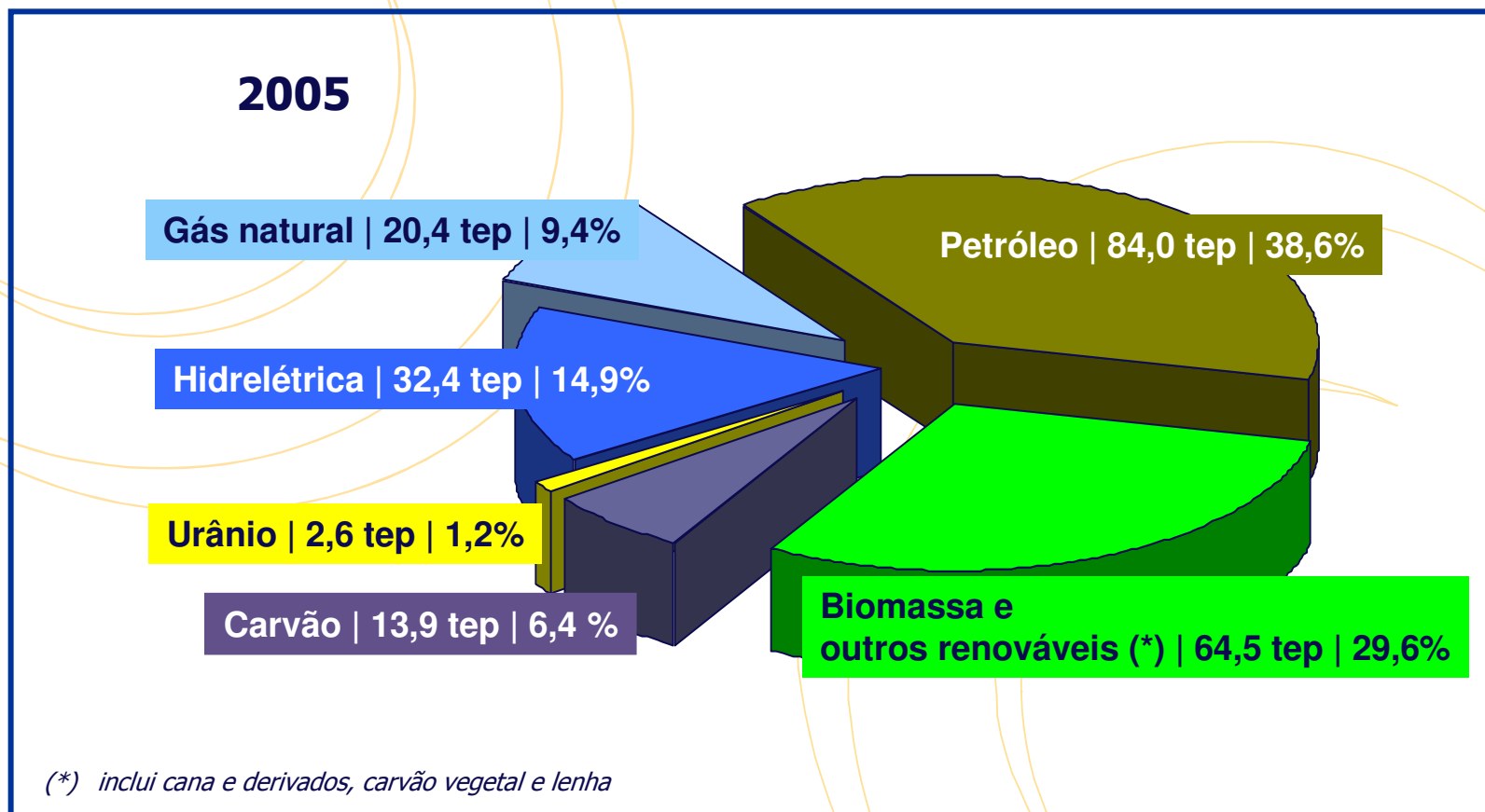


**Recursos Adicionais Estimados: 800.000 t  $U_3O_8$**

Fonte: INB (2006)

## Energia Nuclear no Brasil: Oferta Interna de Energia

- Em 2005, o urânio representou 1,2% da oferta nacional de energia primária

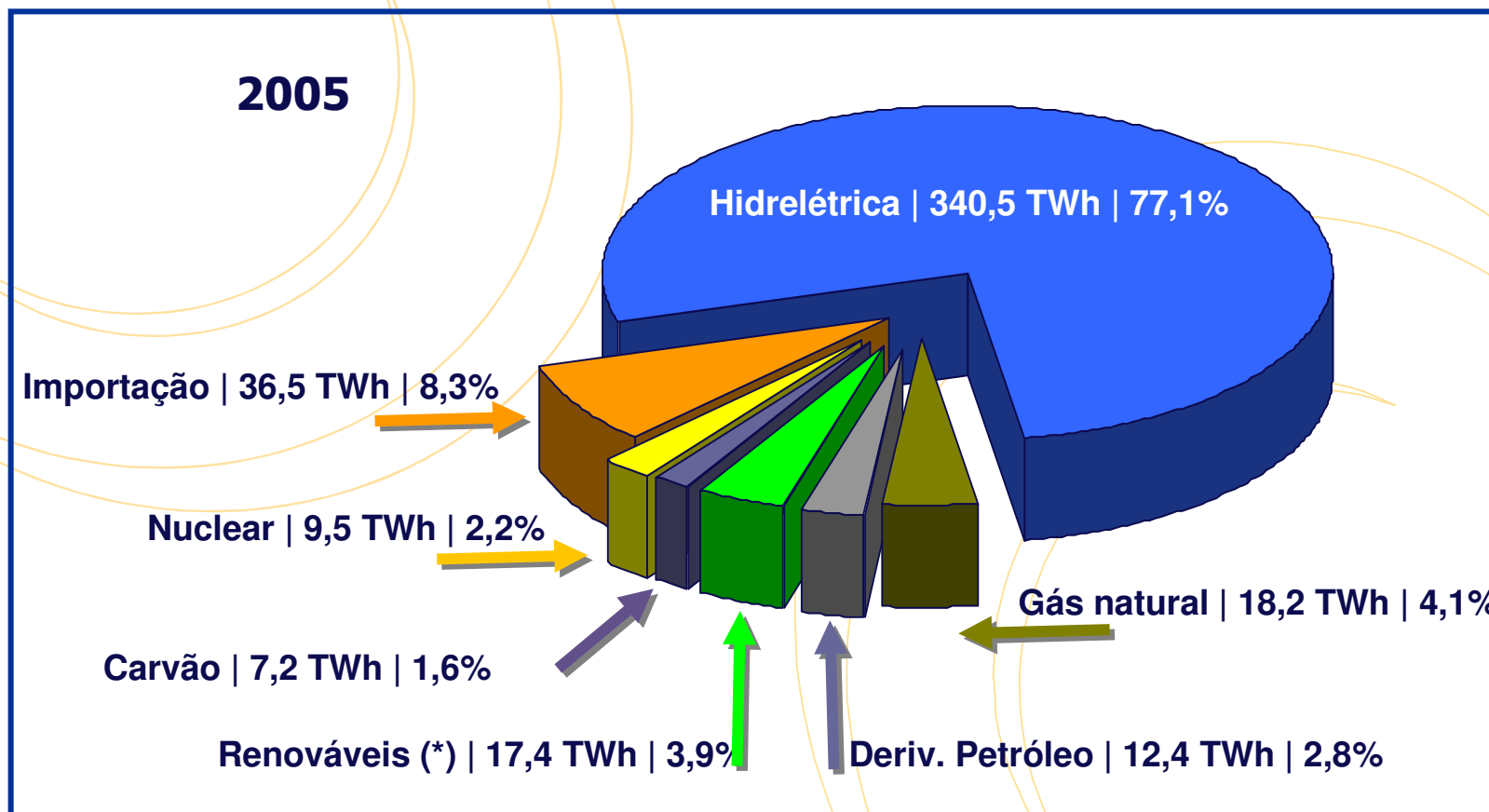


Fonte: Balanço Energético Nacional, 2005

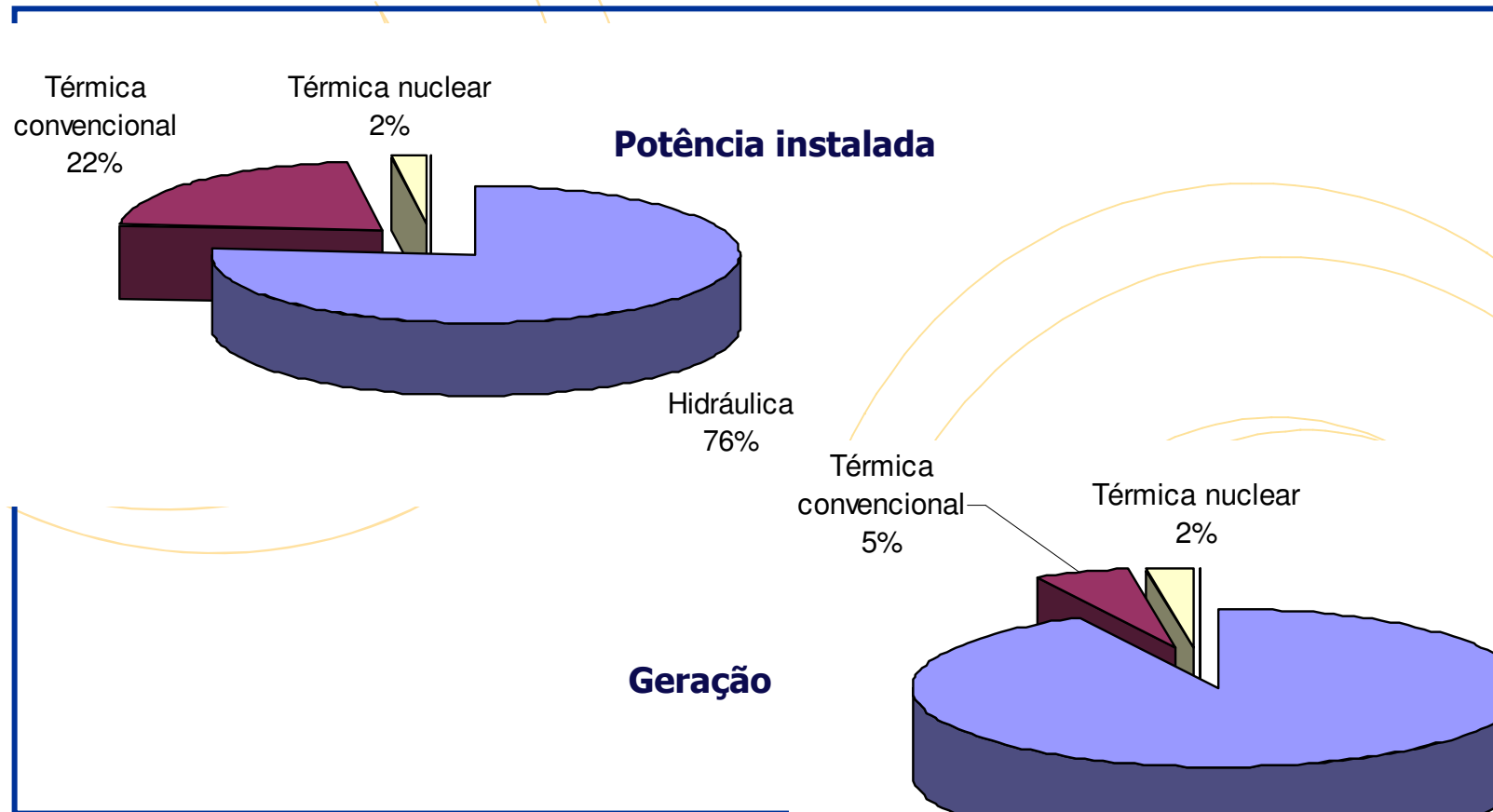


## Energia Nuclear no Brasil: Oferta Interna de Eletricidade

- Em 2005, a energia nuclear representou 2,2% da oferta nacional de energia elétrica



## Energia Nuclear no Brasil: Oferta Interna de Eletricidade



Fonte: BEN (EPE, 2006)

## Energia Nuclear no Brasil: Usinas brasileiras

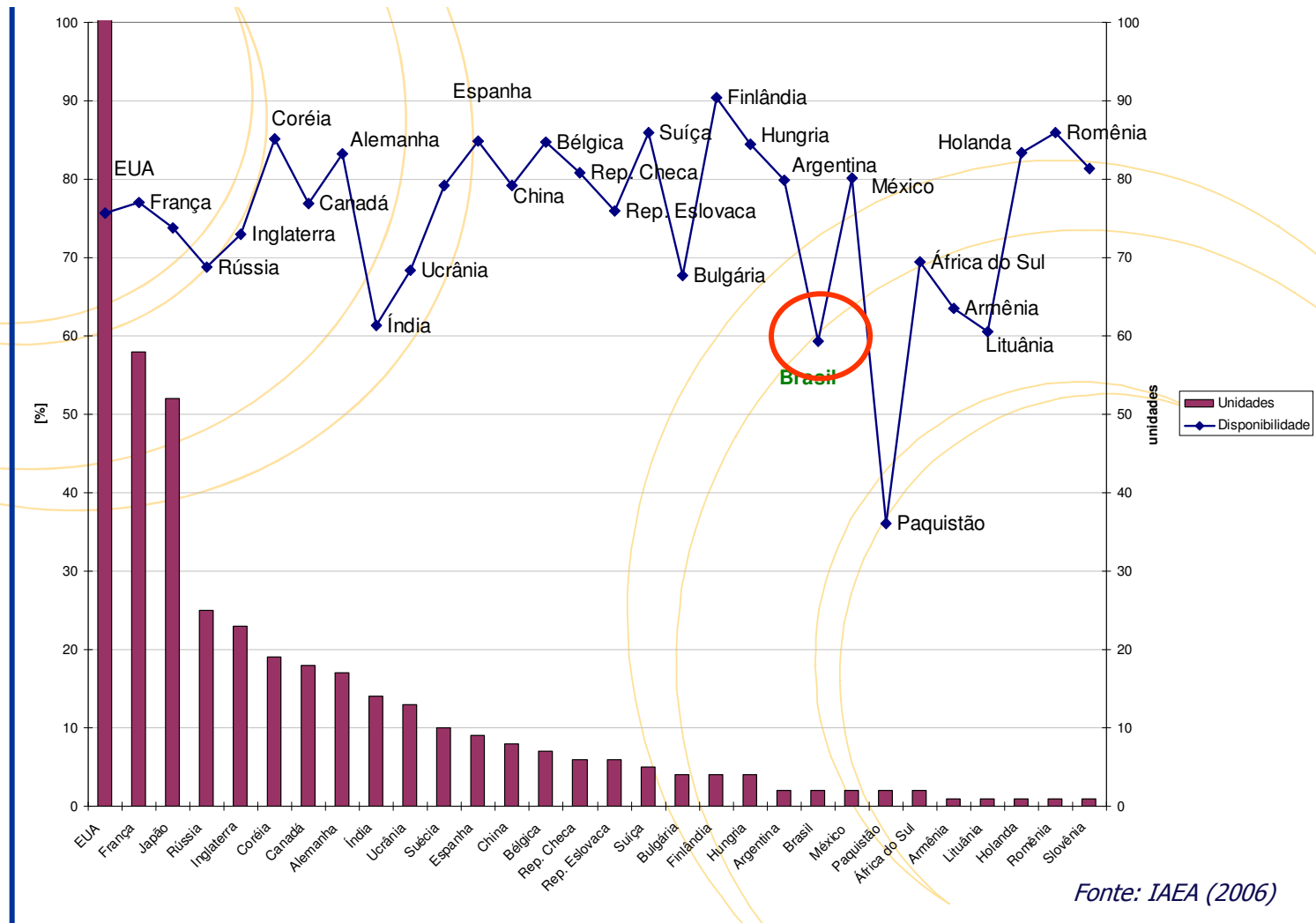
### Usinas Nucleares no Brasil

<b>Angra I</b>	<b>657 MW</b>
<b>Angra II</b>	<b>1.350 MW</b>
<b>Angra III (projeto)</b>	<b>1.350 MW</b>



## Energia Nuclear no Brasil: Aspectos operacionais

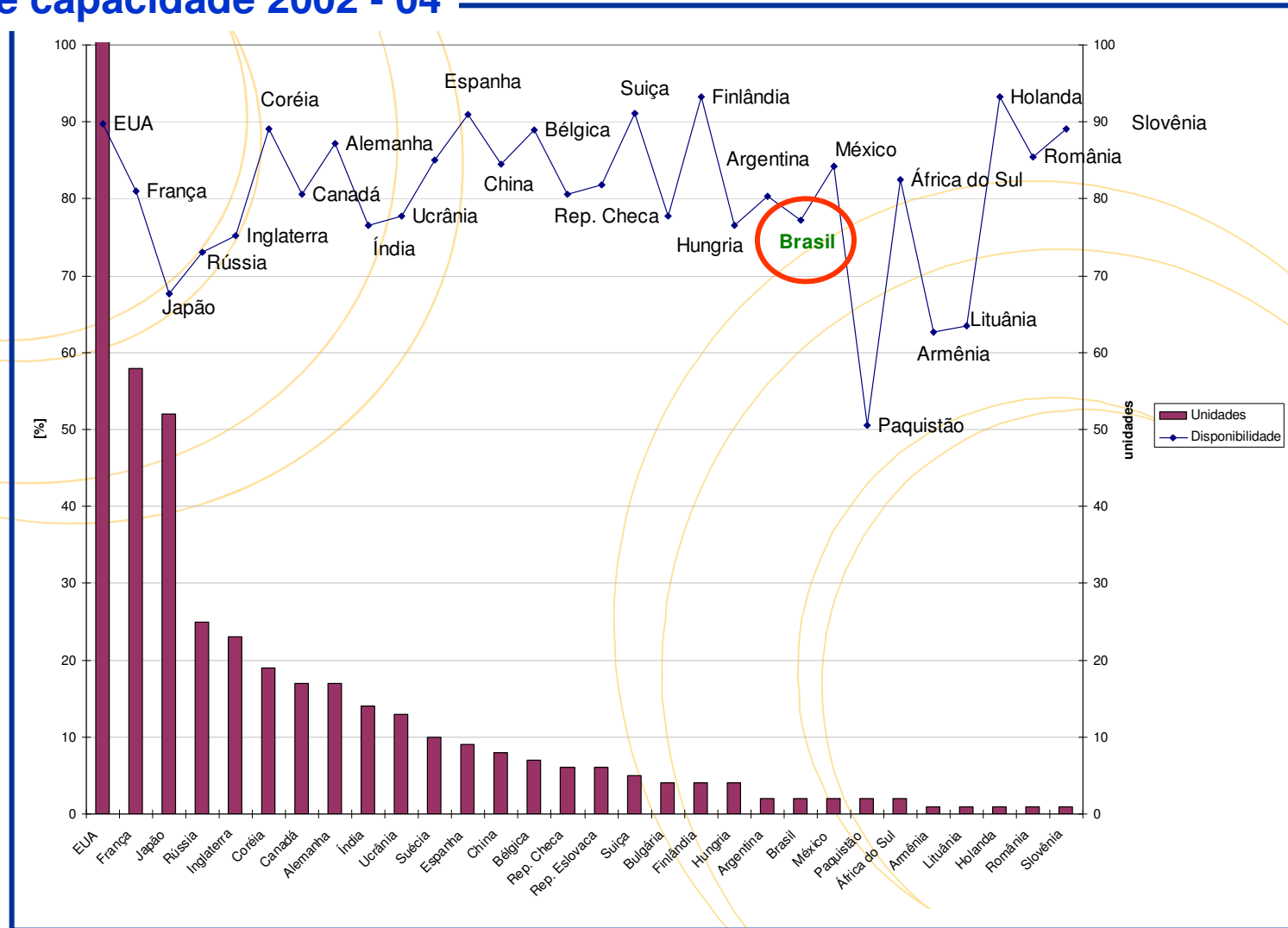
### Fator de capacidade médio durante a vida das usinas existentes



Fonte: IAEA (2006)

## Energia Nuclear no Brasil: Aspectos operacionais

### Fator de capacidade 2002 - 04



Fonte:  
IAEA  
(2006)



Empresa de Pesquisa Energética

# Expansão da Geração Nuclear no Brasil

---



## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Aspectos relevantes

### Elementos chave

- Reservas
- Tecnologia
- Descomissionamento
- Cenário mundial
- Combustível
- Competitividade

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Potencial

### Premissas

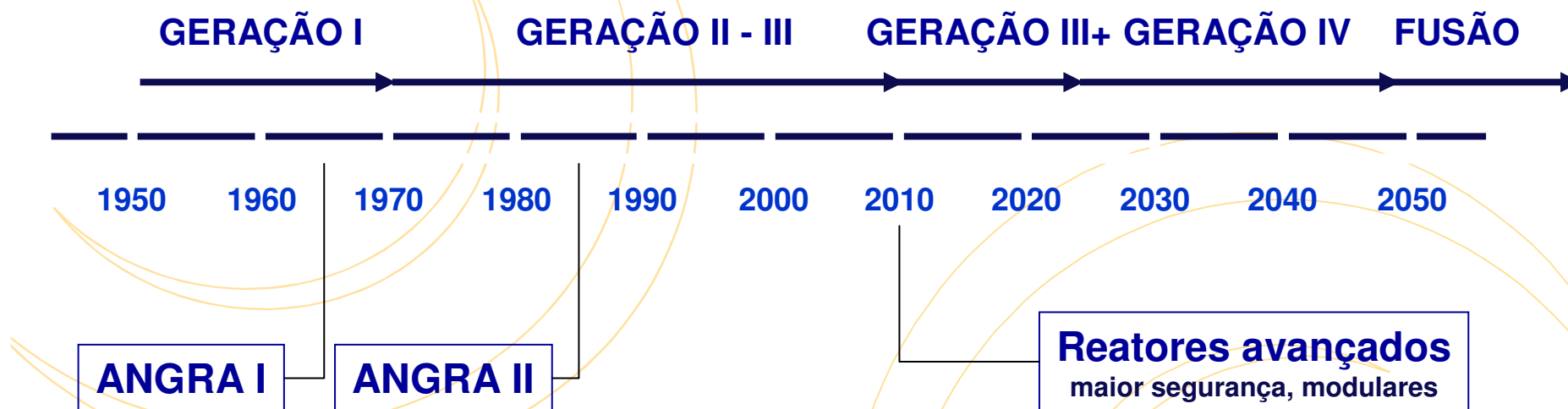
Vida útil das usinas: 40 anos

Fator de capacidade: 85%

Custos de exploração	Reservas	Potencial de Geração
< 40 US\$/kg U	66.200 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8.000 MW
< 80 US\$/kg U	177.500 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	21.000 MW
< 80 US\$/kg U <i>(inclusive inferidas)</i>	309.370 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	35.000 MW



## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Tecnologia de geração



### TENDÊNCIAS (Geração IV)

**Sustentabilidade ambiental:** disponibilidade estendida do combustível, impacto ambiental positivo

**Competitividade:** custos baixos e períodos de construção mais curtos

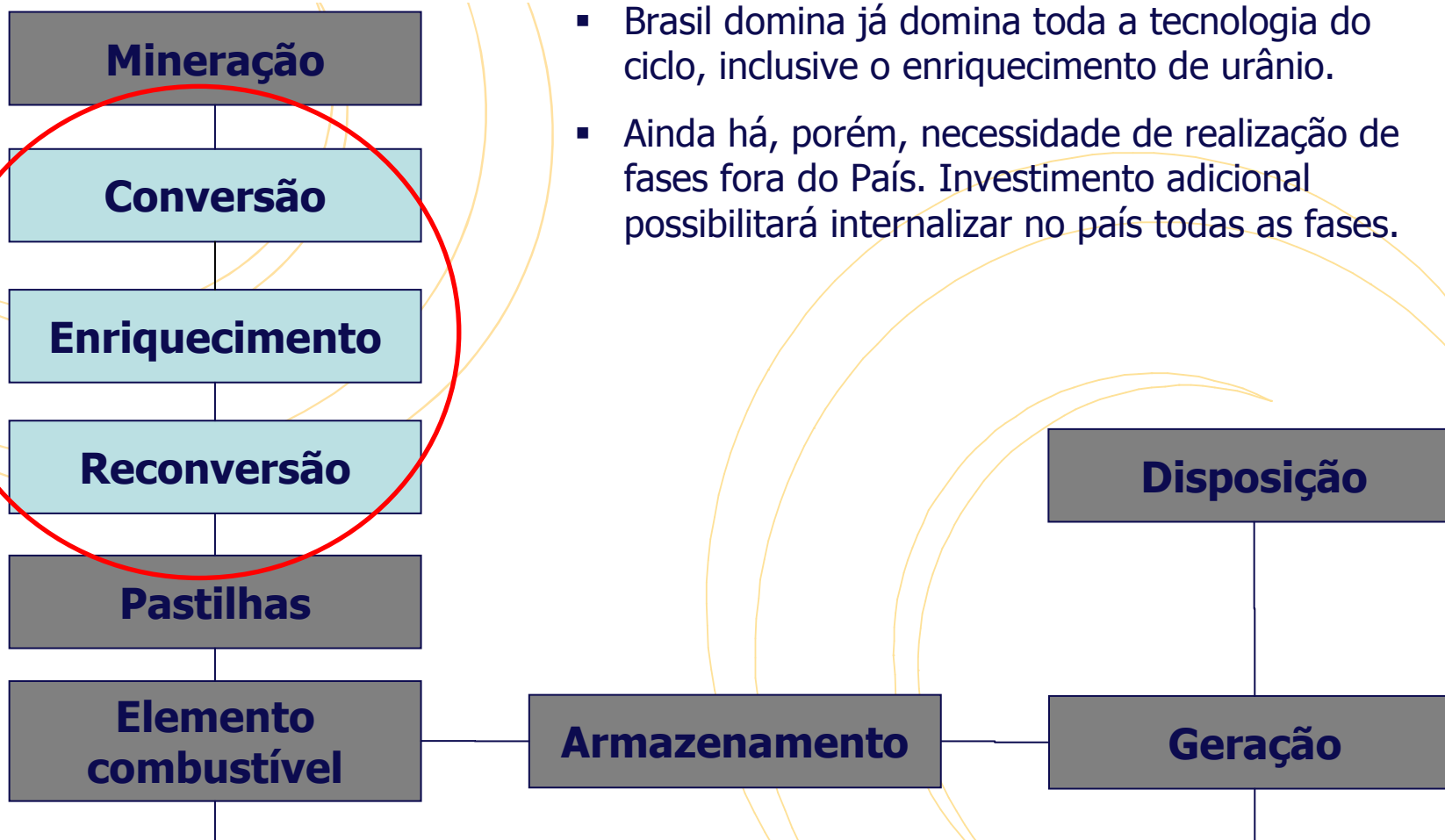
**Segurança:** características de segurança inerentes, visando conseguir confiança pública na segurança da energia nuclear

**Aceitabilidade:** não gera material nuclear “inseguro” e tem proteção física contra ataques terroristas

**Eficiência:** operação em ciclo supercrítico ou ultra supercrítico

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Tecnologia do combustível

### Domínio nacional do ciclo do combustível



- Brasil domina já toda a tecnologia do ciclo, inclusive o enriquecimento de urânio.
- Ainda há, porém, necessidade de realização de fases fora do País. Investimento adicional possibilitará internalizar no país todas as fases.

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: **Tecnologia do combustível**

### **Domínio nacional do ciclo do combustível: enriquecimento**

#### **1ª Etapa:**

- ◆ **Atendimento de 60% das necessidades de Angra 1 e 2**
- ◆ **Economia de divisas: US\$ 16 milhões por ano**
- ◆ **Prazo: 2010**

#### **2ª Etapa (previsão):**

- ◆ **Atendimento de 100% das necessidades de Angra 1 e 2**
- ◆ **Economia de divisas: US\$ 25 milhões por ano**
- ◆ **Prazo: 3 a 4 anos**

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Descomissionamento

- Duas alternativas: desmontagem imediata e "safe enclosure".
- Para ambas, as estimativas de custo indicam valores na faixa de US\$ 200 a US\$ 400 por kW

### • "Safe enclosure"

	País	Nº de Unidades	Potência unit. (MW)	Potência total (MW)	Custo total (US\$ x 10 <sup>6</sup> )	Custo unitário (US\$/ kW)
"Safe Enclosure"	Brasil	1	657	657	198	301
	Brasil	1	1.350	1.350	240	178
	França	58	1.070	62.060	13.973	225
	Alemanha	1	1.200	1.200	331	276
	Japão	1	1.160	1.160	470	405
	Holanda	1	481	481	168	349
	Eslovênia	1	707	707	152	215

Fonte: NEA/OCDE (2003)

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Descomissionamento

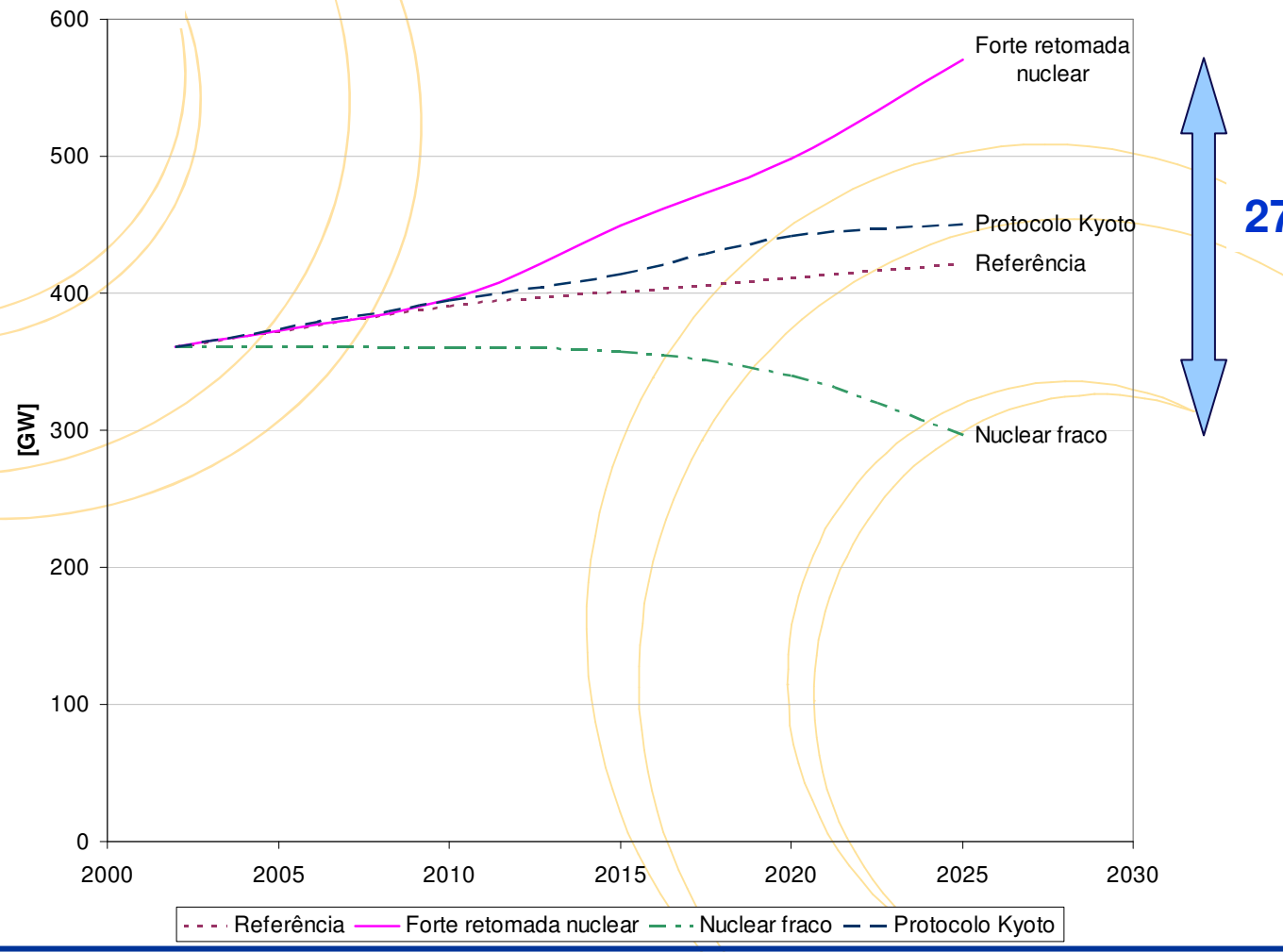
- **Desmontagem imediata**

	País	Nº de Unidades	Potência unit. (MW)	Potência total (MW)	Custo total (US\$ x 10 <sup>6</sup> )	Custo unitário (US\$/ kW)
Desmontagem Imediata	Bélgica	2	412	824	280	340
	Bélgica	1	1.009	1.009	213	211
	Alemanha	1	1.200	1.200	315	263
	Itália	1	270	270	245	907
	Eslovênia	1	707	707	332	470
	África do Sul	2	944	1.888	317	168
	Espanha	1	1.000	1.000	166	166
	Suécia	1	917	917	85	93
	Suíça	2	380	760	259	341
	Suíça	1	1.020	1.020	238	233
	EUA	1	587	587	452	770
	EUA	1	900	900	379	421
	EUA	1	1.155	1.155	296	256
	EUA	2	1.085	2.170	904	417

Fonte: NEA/OCDE (2003)

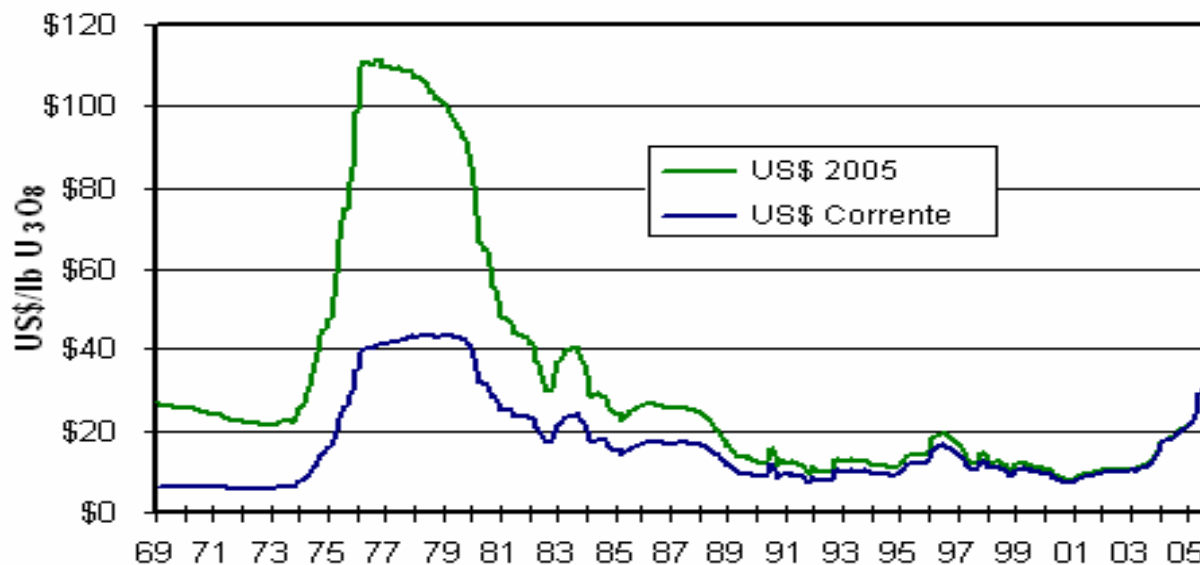
## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Cenários mundiais

### Projeções



**273 GW**

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Custo do combustível



Source: 1969-1986 Nuexco Exchange Value, 1987-Present Ux U3O8 Price.

ETAPA	PESO (kg)	CUSTO (US\$/kg)	CUSTO DA ETAPA
Óxido de Urânio	8,0	94,82	758,56
Conversão	7,0	11,50	80,50
Enriquecimento	4,8	127,00	609,60
Fabricação	1,0	240,00	240,00
<b>CUSTO TOTAL (1 KG)</b>			<b>1688,66</b>

Fonte: Uranium Information Centre LTD

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: Competitividade

### Hipóteses de cálculo do custo de geração - 1

#### Investimento:

- Referência internacional: US\$ 1.300 a 1.500/kW
- Angra III: US\$ 1.800/kW

#### Cronograma de desembolso:

- 6 anos

#### Descomissionamento

- *Sinking fund* ao longo da vida útil no valor de 0,4 US\$/MWh

#### Custos operacionais:

(referência internacional)

- O&M Fixo: 60 US\$/kW.ano
- O&M Variável: 8 US\$ /MWh

#### Vida Útil:

- 40 anos

#### Taxa de desconto:

- 8 a 12% ao ano



## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: **Competitividade**

### Hipóteses de cálculo do custo de geração - 2

#### **Combustível:**

- Preço internacional: US\$ 8/MWh

#### **Tecnologia:**

- PWR, eficiência 33%

#### **Características operacionais:**

- Despacho mínimo obrigatório 80%
- Fator de disponibilidade máxima 90% (saídas forçadas e manutenção programada)

#### **Encargos setoriais:**

- Custo de acesso e uso da rede (TUST): R\$ 2,2 kW.mês
- Taxa de fiscalização (ANEEL): 0,5% da receita
- Investimento em pesquisa e desenvolvimento: 1% da receita líquida

## Expansão da Geração Nuclear no Brasil: **Competitividade**

### Custo médio de geração (R\$/MWh)

Investimento US\$/kW	Taxa de desconto		
	8% a.a.	10% a.a.	12% a.a.
<b>1.300</b>	<b>114,5</b>	<b>127,2</b>	<b>141,7</b>
<b>1.500</b>	<b>122,9</b>	<b>138,1</b>	<b>155,3</b>
<b>1.800</b>	<b>131,3</b>	<b>149,0</b>	<b>168,9</b>
<b>2.300</b>	<b>148,1</b>	<b>171,1</b>	<b>196,2</b>

**Observações**

*Custo antes de impostos*

*Não considera alavancagem financeira*

# Muito obrigado!



**EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE**

<http://www.epe.gov.br>

Av. Rio Branco, 1 – 11º andar  
20090-003 Rio de Janeiro RJ  
Tel.: + 55 (21) 3512 - 3100  
Fax: + 55 (21) 3512 - 3199

