

# O Futuro da Energia Nuclear no Mundo e no Brasil

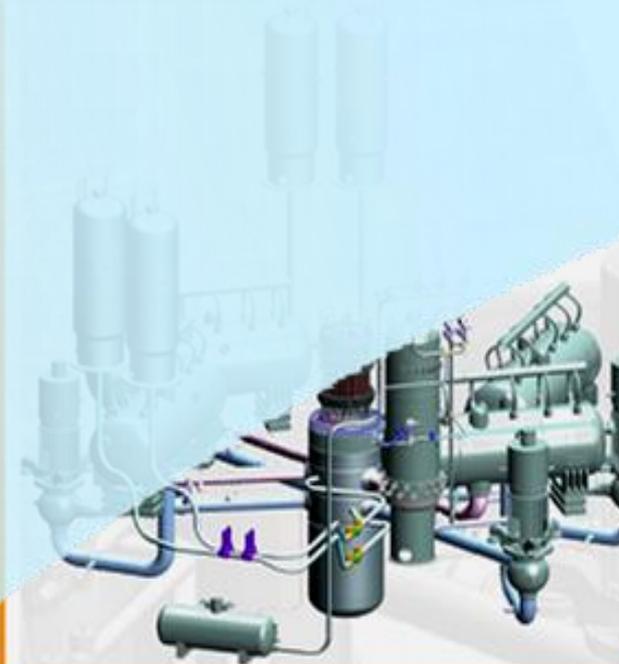


**Roberto C. A. Travassos**  
ELETROBRAS ELETRONUCLEAR  
Assessor Técnico da Diretoria de  
Planejamento, Gestão e Meio Ambiente



**Energia em Foco: Estratégias  
e Desafios para o Futuro**

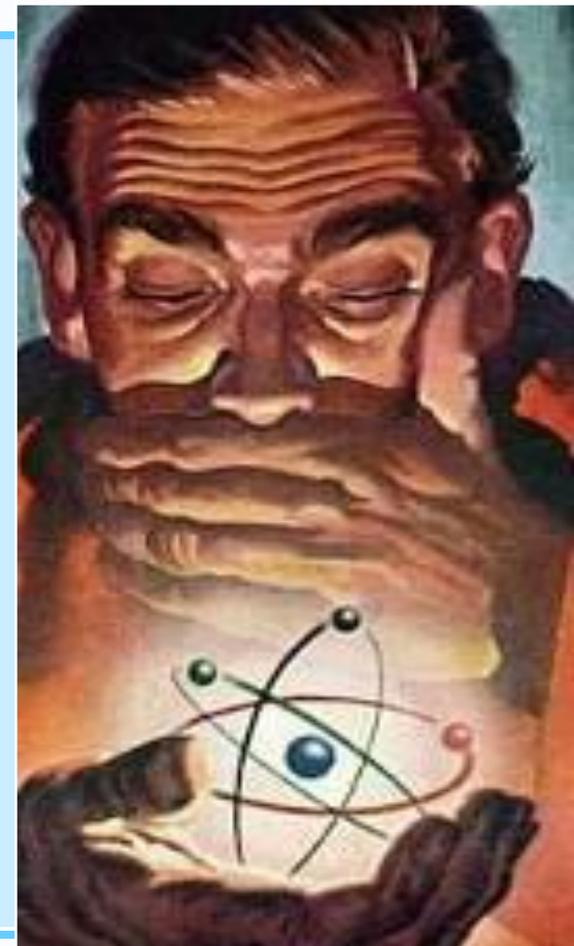
Rio de Janeiro - RJ, 29 de Abril de 2015



# O Desenvolvimento da Energia Nuclear

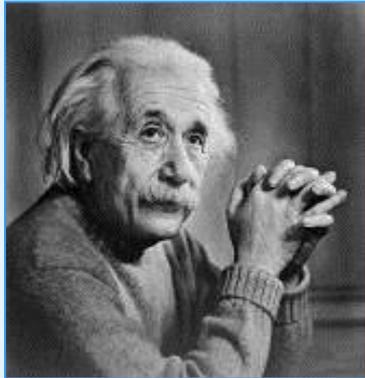
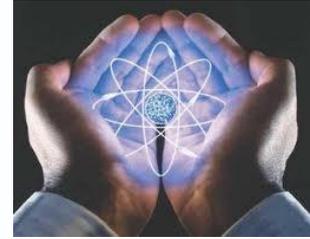
## As Fases do Desenvolvimento Nuclear

- **1ª Fase:** Fins do Século 19 até 1935-1940  
**Pesquisas do átomo**
- **2ª Fase:** 1940 a 1950-1955  
**Implantação de Projetos**
- **3ª Fase:** 1955 a 2005  
**Construção de UTN's: Ascensão e Queda**
- **4ª Fase:** a partir de 2005  
**Renascimento Nuclear**



## Fase de Pesquisas do Átomo: 1880 a 1935-1940

Acompanhamento dos Pesquisadores Brasileiros  
Visitas de Ilustres Cientistas ao Brasil



### Albert Einstein: 1925

1915: Teoria da Relatividade  
 $E = m c^2$

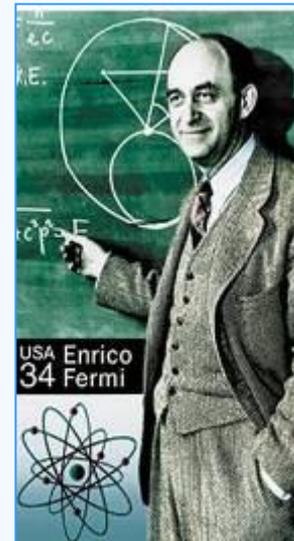
Prêmio Nobel 1921: Efeitos fotoelétricos por meio da teoria quântica



### Marie Curie: 1926

Prêmio Nobel 1903: Estudos sobre a radioatividade

Prêmio Nobel 1911: Descobertas do rádio e polônio



### Enrico Fermi: 1934

Prêmio Nobel 1938: Existência de novos elementos radioativos

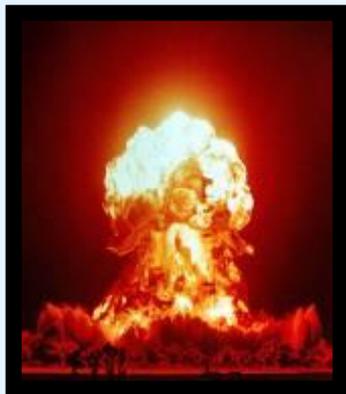
1942: 1º reator nuclear na Universidade de Chicago

## Fase de Implantação de Projetos: 1940 a 1950-1955

### Objetivos Antagônicos

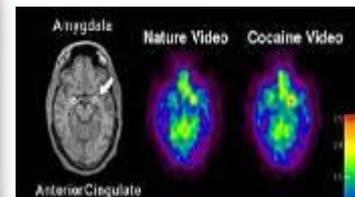
#### Usos Bélicos

- **Projeto Manhattan**  
**Trinity**
- **Hiroshima e Nagasaki**  
**Little Boy / Fat Man**
- **Corrida Armamentista**  
**EUA / URSS / França / GB / China**  
**Índia / Paquistão / Israel / Outros**
- **Surgimento da Guerra Fria**  
**EUA x URSS**



#### Usos Pacíficos

- **Átomos para a Paz**  
**Governo Eisenhower**
- **Reatores de Pesquisa e Potência**
- **Usos Médicos**  
**Fármacos / Tomografia Pet / etc**
- **Agricultura / Irradiação Alimentos**
- **Propulsão Naval / Outros**

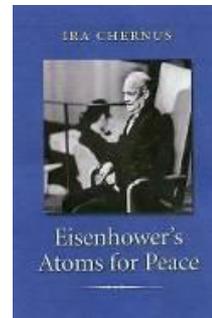


## Os Primeiros Reatores de Pesquisas no Brasil

Programa Átomos para a Paz / EUA - Eisenhower: Década de 1950

Compartilhamento de Informações com outras Nações

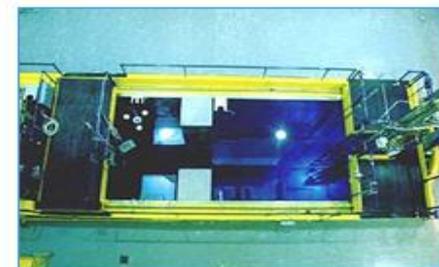
Usos Pacíficos da Energia Nuclear



IEA - R 1

### Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

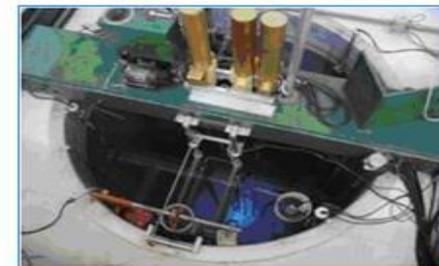
- **Fundação:** 1956 (IEA) / USP
- **Início de Operação:** 1957
- **Potência Inicial:** 2 MW
- **Aumento Potência:** 5 MW



TRIGA

### Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

- **Fundação:** 1956 (IPR) / UFMG
- **Início de Operação:** 1960
- **Potência Nominal:** 250 kW



ARGONAUTA

### Instituto de Engenharia Nuclear

- **Fundação:** 1962 / UFRJ
- **Início de Operação:** 1965
- **Potência Máxima:** 5 kW



## Usinas Geração I: As Primeiras Instalações para Geração Nucleoelétrica



**1951:** Argone - EUA / EBR-1 / 4 Lâmpadas

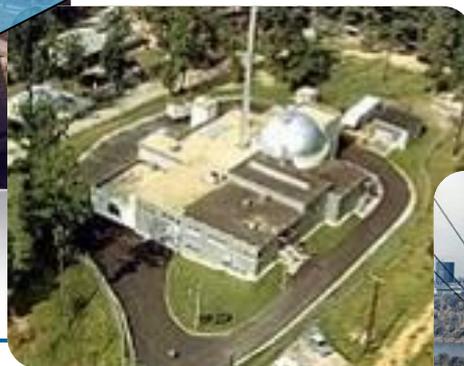


**1954:** Obninsk AM1- URSS / 6 MW / RBMK /  $U_{ENR-5\%}$  / LW /  $G_{RF}$

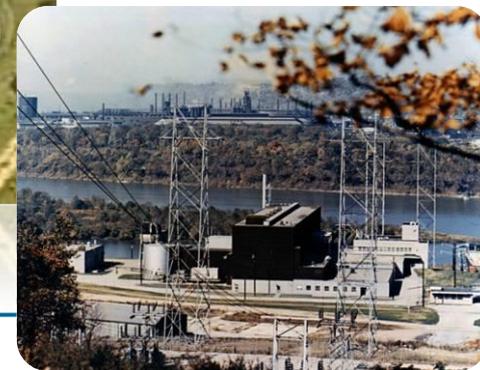
**Todos Reactores Geração I  
Descomissionados**

**1955:** Calder Hall-UK / 40 MW / MAGNOX /  $U_{NAT}$  / Gás /  $G_{RF}$

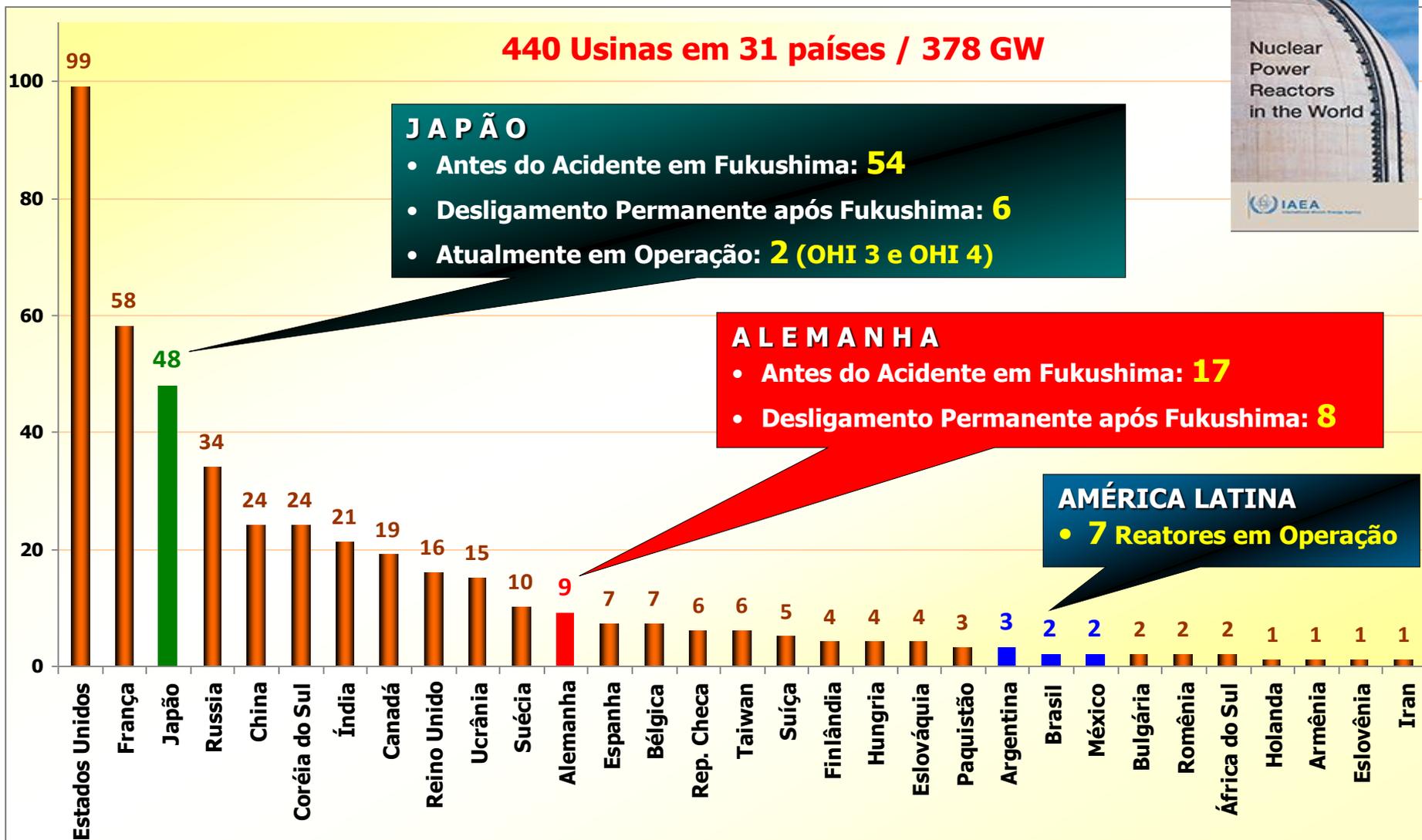
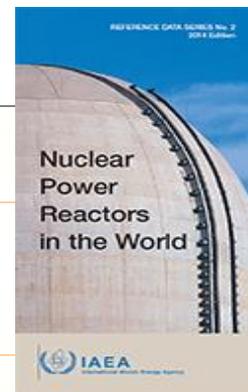
**1957:** Forte Belvior - EUA / 2 MW / PWR /  $U_{ENR-93\%}$  / LW / LW



**1957:** Shippingport - EUA / 60 MW PWR /  $U_{ENR-5\%}$  / LW / LW

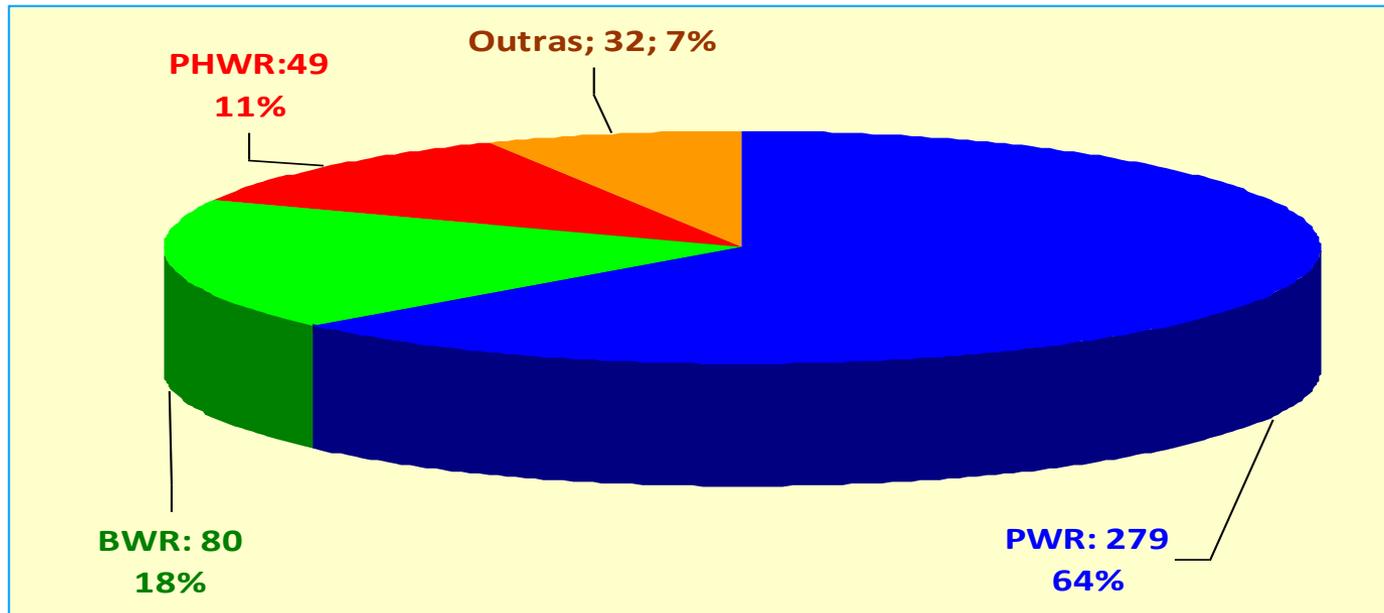


## Usinas Nucleares em Operação: Usinas Geração II



## Usinas Nucleares em Operação: 440 em 31 Países / 378 GW

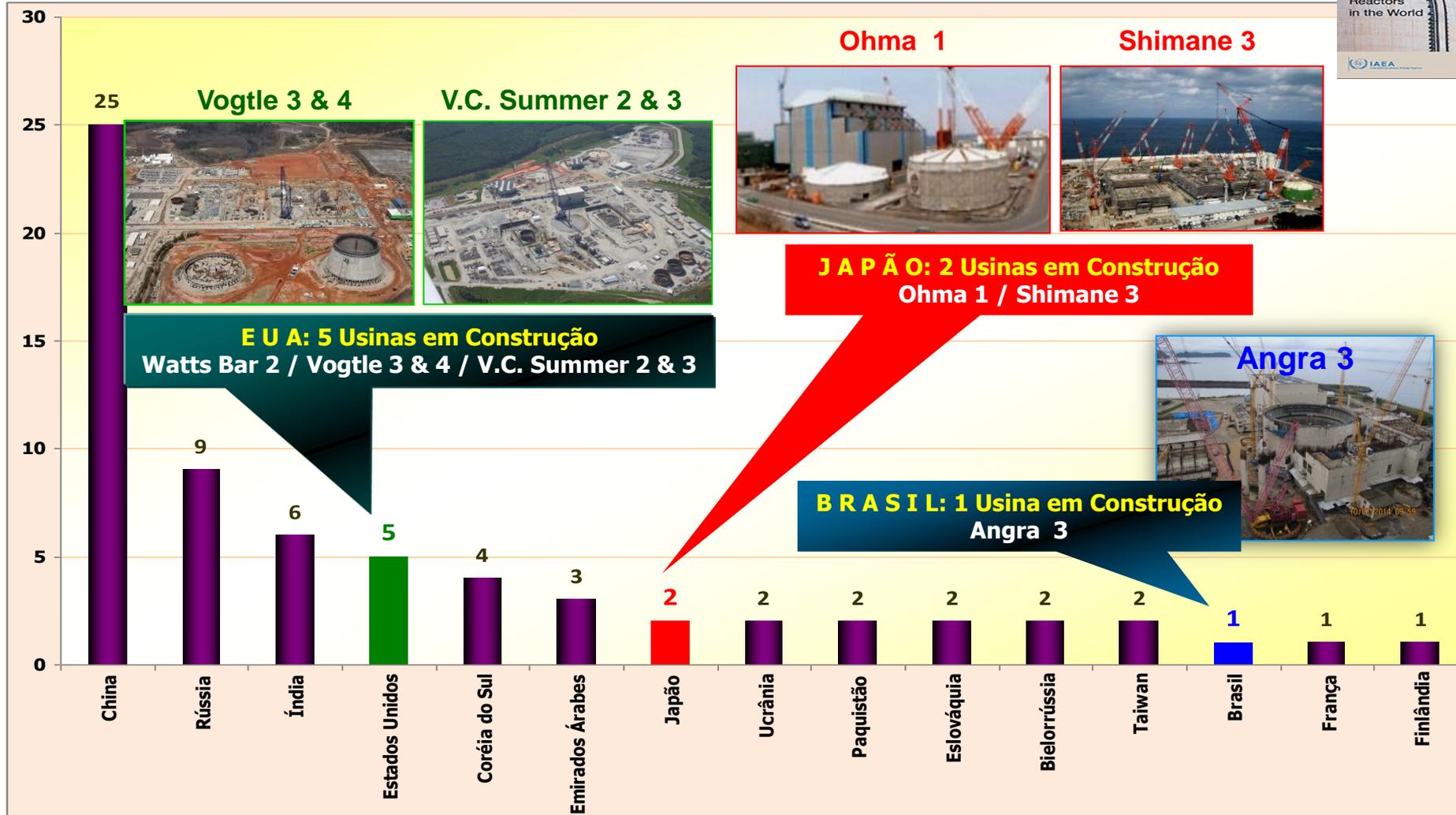
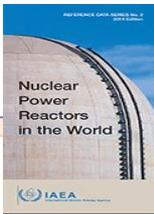
- **Estágio Tecnológico:** Reatores de Geração II
- **Fonte para Geração de Calor:** Fissão do Urânio



- **PWR:** Reator a Água Leve Pressurizada (*Pressurized Water Reactor*)
- **BWR:** Reator a Água Fervente (*Boiling Water Reactor*)
- **PHWR:** Reator a Água Pesada (*Heavy Water Reactor*)
- **OUTRAS:** Refr. a Gás / Moderados a Grafite / Reatores Rápidos / Etc

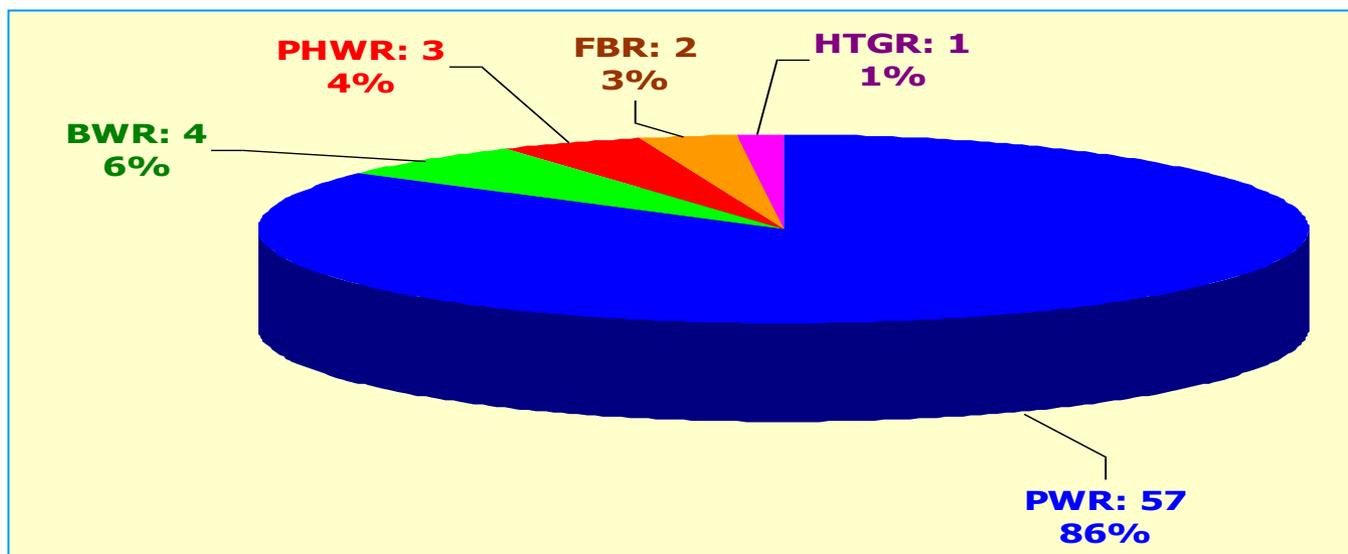
# 4ª Fase do Desenvolvimento da Energia Nuclear: A partir de 2005

## Usinas Nucleares em Construção: Usinas Geração III e III+ 67 Usinas em 15 países / 66,5 GW



## Usinas Nucleares em Construção: 67 em 15 Países / 66,5 GW

- **Estágio Tecnológico:** Reatores de Geração III e III+
- **Fonte para Geração de Calor:** Fissão do Urânio



- **PWR:** Reator a Água Leve Pressurizada (*Pressurized Water Reactor*)
- **BWR:** Reator a Água Fervente (*Boiling Water Reactor*)
- **PHWR:** Reator a Água Pesada (*Heavy Water Reactor*)
- **FBR:** Reatores Rápidos (*Fast Breeder Reactor*)
- **HTGR:** Reator a Alta Temperatura Refrigerado a Gás (*High Temperature Gas Reactor*)

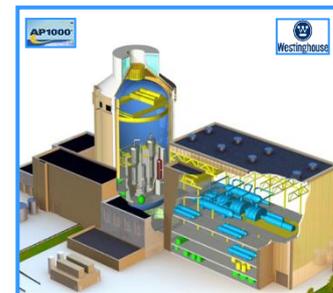
## Usinas Geração III & III+: Bases Técnicas

- **Utilização de Fenômenos Físicos Naturais:** Sistemas Passivos (EXEMPLOS)
  - Força da Gravidade
  - Troca Térmica por Convecção
  - Circulação Natural de Gases e Líquidos
  
- **Vantagem dos Sistemas Passivos de Segurança**
  - Entrada Automática em Operação
  - Independe da Ação Humana ou quaisquer Equipamentos
  
- **Maior Confiabilidade Operacional**
  - Sistemas de I&C Digitais
  
- **Algumas Vantagens Construtivas:** Construções mais Rápidas
  - Construção Modular
  - Padronização de Sistemas, Materiais e Equipamentos
  - Melhor Organização do Canteiro de Obras
  - Facilidades no Gerenciamento do Almojarifado de Obras

## Usinas Geração III+: Modelos de Reatores III+

### ➤ Tecnologia PWR: *Reator a Água Pressurizada*

- AP 1000 - *Advanced Power Reactor*: WESTINGHOUSE - EUA
- EPR 1700: - *European Pressurized Reactor*: AREVA - França
- CAP 1400 - *Chinese Advanced Power Reactor*: SNPTC - China
- APWR 1200 - *Advanced Pressurized Water Reactor*: MITSUBISHI - Japão
- APR 1400 - *Advanced Pressurized Reactor*: KEPCO-KHNP - Coreia do Sul
- VVER 1200 - *Vodo Vodyanoi Energetichesky Reaktor*: ROSATON - Rússia
- ATMEA 1100 - *Pressurized Water Reactor*: AREVA - França
- ACP 1000 - *Advanced Chinese Pressurized Reactor*: CNNC - China



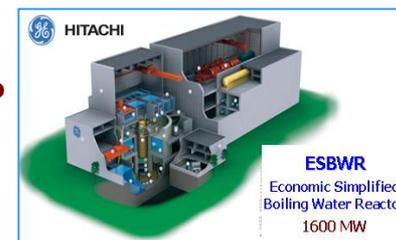
### ➤ Tecnologia PHWR: *Reator a Água Pesada Pressurizada*

- CANDU ACR - *Advanced Canadian Deuterium Reactor*: AECL - Canadá
- AHWR 300 LEU - *Advanced Heavy Water Reactor*: Índia



### ➤ Tecnologia BWR: *Reator a Água Fervente*

- ESBWR 1600 - *Economic Simplified Boiling Water Reactor*: HITASHI - Japão
- ABWR 1350 - *Advanced Boiling Water Reactor*: GE-HITASHI - EUA/Japão
- KERENA 1250 - *Boiling Water Reactor*: AREVA - França
- CANDU ACR 1200 - *Advanced Candu Reactor*: AECL - Canadá







# Os Reatores Nucleares do Futuro

## Usinas Geração IV: **Reatores do Futuro em Pesquisa e Desenvolvimento**

Sistemas Passivos / Construção Modular / Maior Eficiência / Menos Rejeitos / Não Proliferação

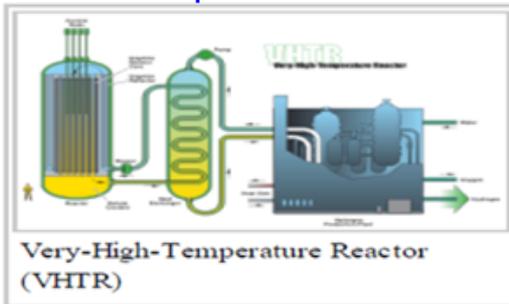
### Alguns Modelos Híbridos: Eletricidade + Hidrogênio + Água Potável

#### REATORES TÉRMICOS

Produção de H

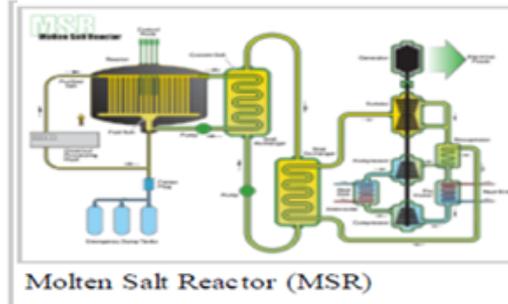
**VHTR**

Reator a Temperatura Muito Elevada



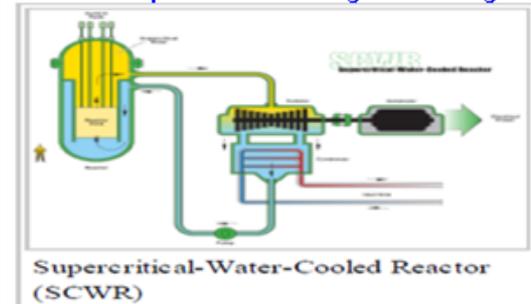
**MSR**

Reator a Sal Fundido



**CSWR**

Reator Supercrítico Refrigerado a Água

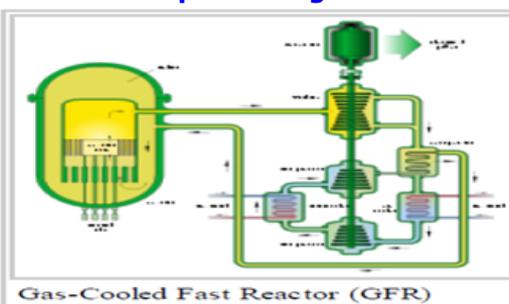


#### REATORES RÁPIDOS

Produção de H

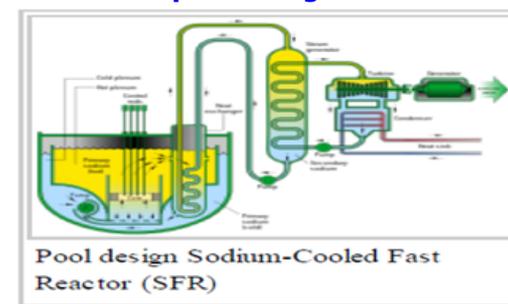
**GRF**

Reator Rápido Refrigerado a Gás



**SFR**

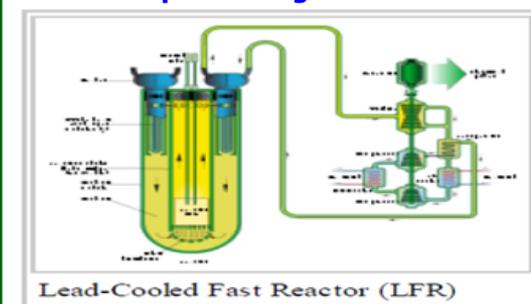
Reator Rápido Refrigerado a Sódio



Produção de H

**LFR**

Reator Rápido Refrigerado a Chumbo

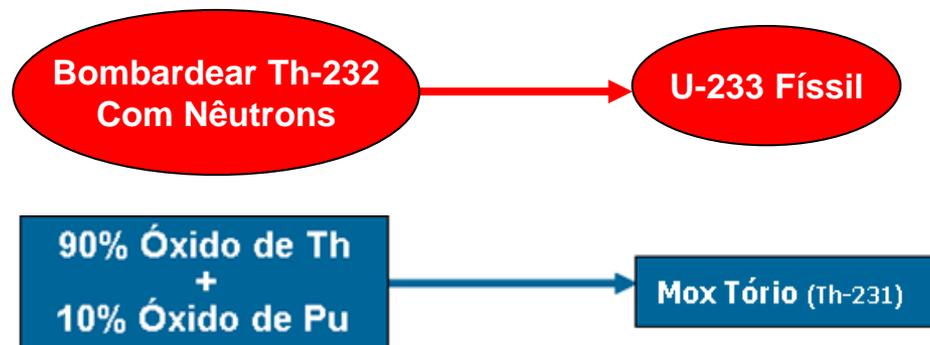


## Reatores a Tório:

### ➤ Características do Tório - Th

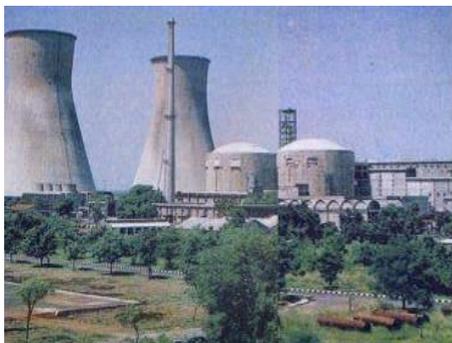
- Nome homenagem ao Deus Nórdico do Trovão, TOR: **Descoberto pelo sueco Berzelius.**
- Mais abundante na natureza que o Urânio: **Menor custo para insumo do combustível.**
- Maior reserva mundial: **Índia** / No Brasil: **Areias monazíticas do ES.**
- Gera rejeitos de vida mais curta que o Urânio: **Menor tempo para eliminar rejeitos.**
- Processo de fissão do Th não gera Plutônio: **Fissão do Th consome Plutônio.**
- Th-232 da crosta terrestre não é físsil: **Não é capaz de suportar reação em cadeia.**

### ➤ Transmutação do Th-232 em Material Físsil: **2 Técnicas**



# Reatores a Tório: Alguns Exemplos de Pesquisas Avançadas

**Kakrapar 1 NNP**  
PHWR 220 a Urânio  
Testes com Tório



Kakrapar Atomic Power Station (KAPS)

## Í N D I A

País de maior avanço nas pesquisas do Tório

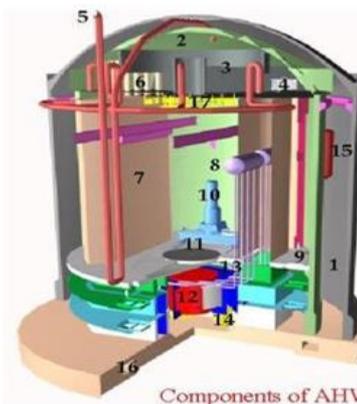
Utilizará suas imensas reservas de Tório

Utilizará o Plutônio produzido em seus PHWR

**Bhabha Atomic Center**

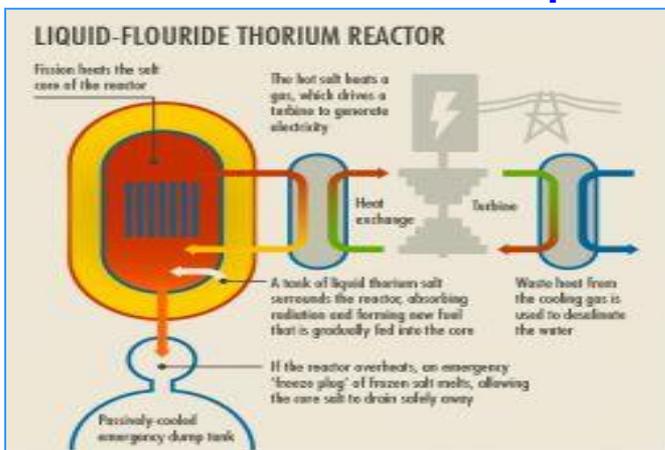
**AHWR 300 a Tório**

Início Operação: 2016



Components of AHWR

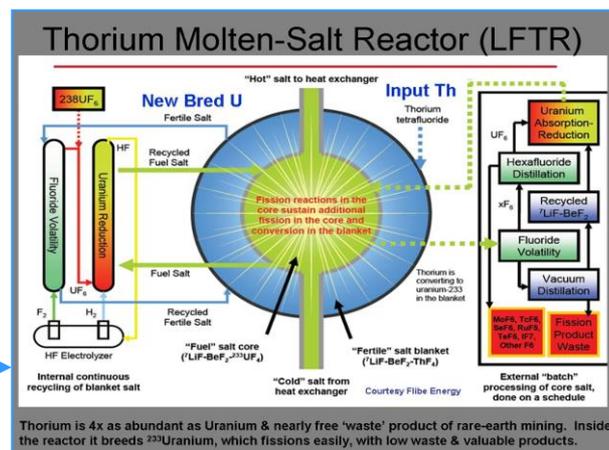
### Reator a Fluoreto de Tório Líquido



Pesquisas de várias países

2 tipos de Reatores a Tório

### Reator a Sal Fundido de Tório



## Reatores a Fusão Nuclear: "A Energia das Estrelas"

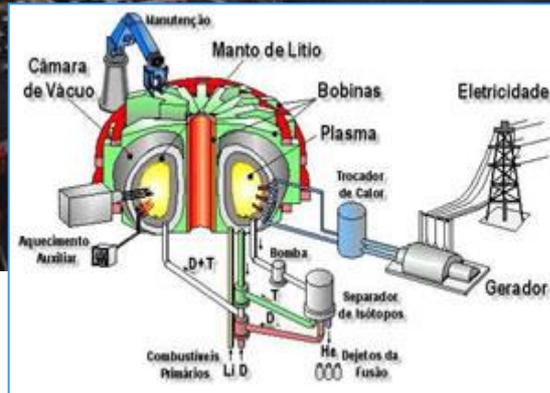
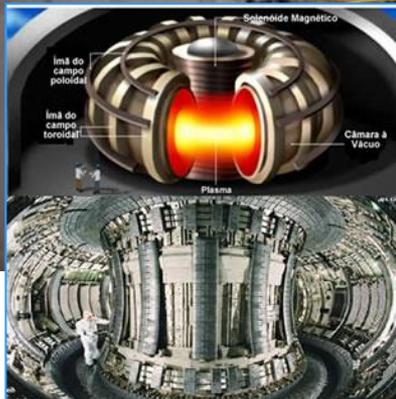


### ➤ **Fusão**

- **Energia das Estrelas: Átomos de H se juntam para formar o He.**
- **Libera muito mais Energia do que a consumida.**
- **Produção de Rejeito em baixíssima quantidade.**
- **Não gera subprodutos que possam ser usados pela indústria bélica.**
- **Geração de Energia, aliada à produção de Hidrogênio (substituto do petróleo).**
- **Principais Desafios para o Desenvolvimento: BASE = REATOR TOKAMAK**
  - **Controlar a reação em cadeia.**
  - **Trabalhar a altíssimas temperatura.**
  - **Obter plasma suficiente para os átomos se fundirem.**
  - **Não permitir que o plasma entre em contato com as paredes de reator.**

# Reatores a Fusão Nuclear: Projeto ITER - "O Caminho" *International Thermonuclear Experimental Reactor*

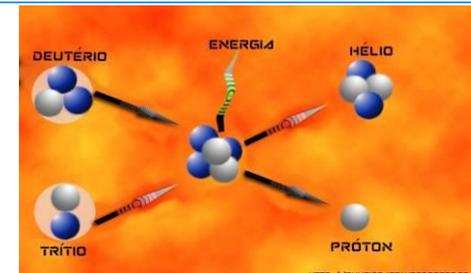
SmartPlanet: Global Observer  
Building the world's largest nuclear fusion reactor



- **Local:** Cadarache - Sul da França
- **Potência:** 500 MWe
- **Custo:** ~ EUR 16 bilhões
- **Participantes:** 7 Países Europeus, Rússia, EUA, Japão, China, Índia, Coreia do Sul

### Cronograma de Implantação

2008	Início de Preparação do Local
2009	Conclusão da Preparação do Local
2010	Início de Escavações para o Reator
2013	Início de Construção
2015	Previsão para Início de Montagem
2019	Previsão para Conclusão da Montagem
2020	Previsão para Produção do 1º Plasma
2027	Previsão para Início de Operação Deutério-Trítio



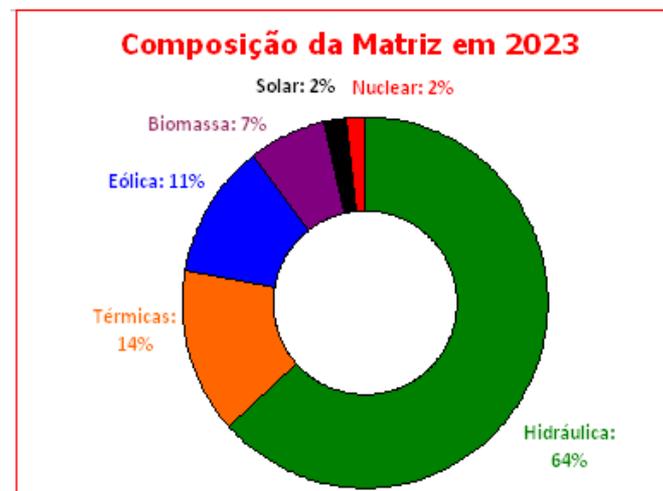
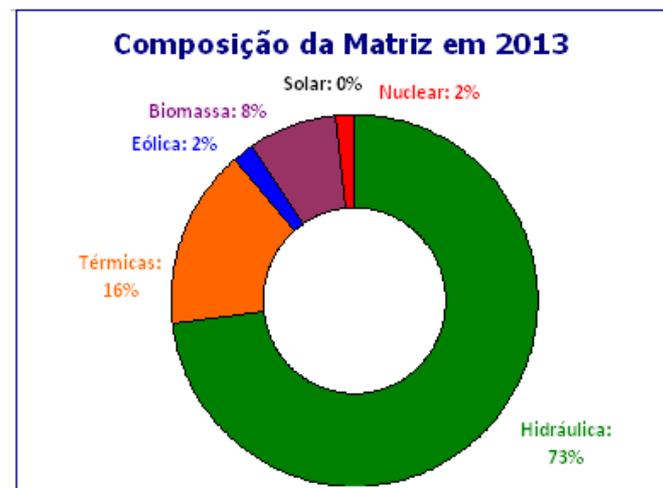
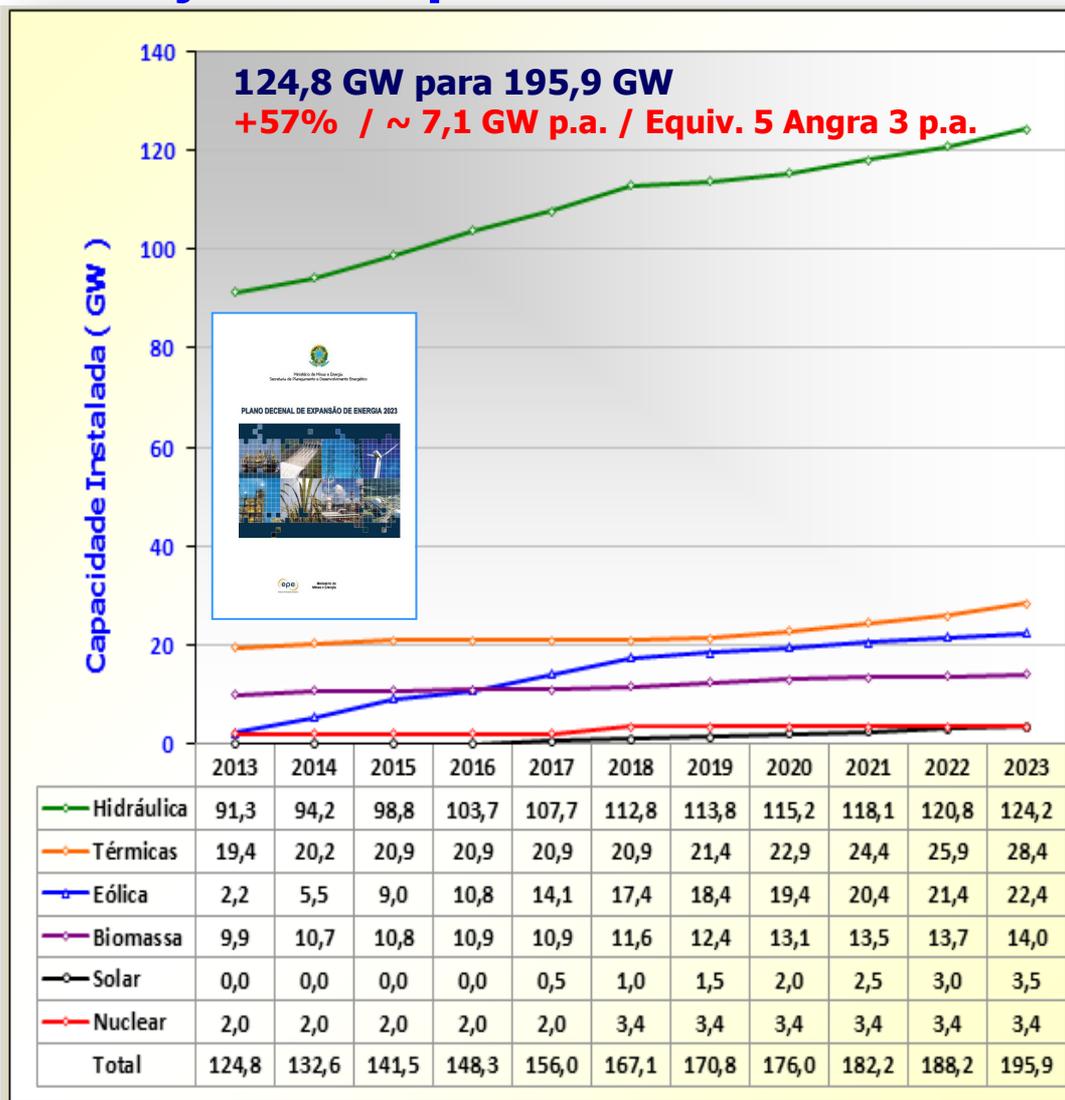
## Reator Tokamak

Um potente Eletroímã produz um campo magnético toroidal, gerando plasma.



# O Planejamento Energético & A Expansão da Energia Nuclear

## Evolução da Capacidade Instalada



# Atual Parque Gerador Nuclear no Brasil

## Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

### ANGRA 2

**Potência:** 1.350 MW  
**Tecnologia:** Siemens/KWU  
**Operação:** Janeiro/2001

### ANGRA 1

**Potência:** 657 MW  
**Tecnologia:** Westinghouse  
**Operação:** Janeiro/1985

Ranking Mundial de Fatores de Disponibilidade			
Fonte: AIEA-PRIS / Maio-2013			
Ano	Posição	País	FD (%)
2011	1º	Eslovênia	98,6%
	2º	Brasil	95,7%
	3º	Romênia	94,6%
2012	1º	Romênia	92,6%
	2º	Brasil	92,0%
	3º	Finlândia	91,0%

## Início de Operação: Dezembro-2018

Edifício da  
Turbina: U M A

Edifício do Reator  
U J B

Edifício de  
Controle: U B A

Edifício Auxiliar  
do Reator: U K A

26. 2. 2015 15:14

## Oferta Adicional de Energia 2015 a 2030

**PNE 2030 (emitido em 2007), NO MOMENTO ATUAL é incoerente com o PNE 2013 (emitido em 2014)**

### Expansão da Oferta no Período 2015-2030 (Valores em MW)

Fonte	CASO BASE					CASO 1	CASO 2
	N	NE	SE / CO	S	TOTAL		
Conservação <sup>1</sup>	?	?	?	?	12.000 <sup>1</sup>	12.000 <sup>1</sup>	12.000 <sup>1</sup>
Hidrelétrica	43.720	580	8.860	4.140	57.300	67.500	64.700
Gás Natural	0	3.500	4.000	500	8.000	15.500	13.500
Carvão	0	0	0	3.500	3.500	4.000	5.500
<b>Nuclear</b>	0	2.000	2.000	0	4.000	6.000	8.000
PCH	0	500	4.000	1.500	6.000	8.000	8.000
Eólica	0	2.200	0	1.100	3.300	3.300	3.300
Biomassa	0	950	3.300	500	4.750	4.750	4.750
Resíduos Urbanos	0	300	700	300	1.300	1.300	1.300
<b>T O T A L</b>	<b>45.520</b>	<b>10.630</b>	<b>31.260</b>	<b>12.740</b>	<b>100.150</b>	<b>122.350</b>	<b>121.050</b>

(1) 53 TWh (aprox. 15% do consumo atual) = Potência de cerca de 12.000 MW (hidrelétrica) ou 7.800 MW (nuclear)

Fonte: PNE 2030 / EPE-MME, Nov-2007 / Tabelas 8.27 (Pág.234) e 8.31 (Pág.239)



**Nordeste: 2 GW  
Prioridade**

**SE/CO: 2 GW**

**Inconsistências  
em relação ao  
PDE 2023**

**Eólica - PDE 2023: + 20,2 GW em 10 anos**

**Solar - PDE 2023: Novos 3,5 GW em 10 anos**

**Nuclear: Nordeste continuará Prioridade ???**

**Gás Natural: Reservas Efetivas do Pré-sal ?**

# PNE - Plano Nacional de Energia 2050 (Em Elaboração pela EPE)

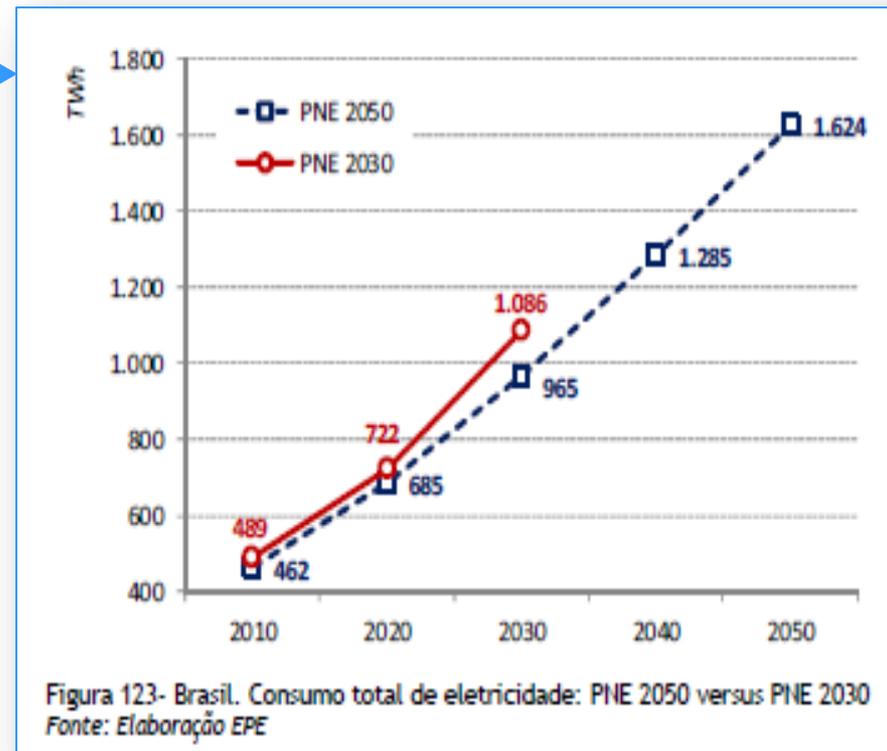


Figura 123- Brasil. Consumo total de eletricidade: PNE 2050 versus PNE 2030  
Fonte: Elaboração EPE



Ministério de  
Minas e Energia



## WORKSHOP PERSPECTIVAS E DESAFIOS DA ENERGIA NUCLEAR NA MATRIZ ELÉTRICA DO BRASIL

GESEL / SINERGIA / EDF

A OPÇÃO NUCLEAR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Altino Ventura Filho  
Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético  
Rio de Janeiro, 12 de setembro de 2014



Ministério de  
Minas e Energia

## A ALTERNATIVA NUCLEAR DO BRASIL A PARTIR DA PRÓXIMA DÉCADA

Por que a Geração Nuclear, a partir da próxima década, no Brasil?

- **Esgotamento do Potencial Hidrelétrico Nacional, no Quinquênio 2025/2030**
- **Competitividade da Opção Nuclear - Custo Unitário da Energia Competitivo**
- **Operação Permanente (de base) Devido ao Baixo Custo do Combustível**
- **Aspectos Ambientais – Baixa Emissão de CO<sub>2</sub> (efeito estufa, mudanças climáticas)**
- **Desenvolvimento Tecnológico - Criação de Empregos “Nobres” e Qualidade da Indústria**



## POTENCIAL HIDROELÉTRICO BRASILEIRO APROVEITÁVEL (Competitivo e Ambientalmente Viável)

- Potencial Hidroelétrico Brasileiro: 260.000 MW (3º/4º do mundo)
- Plano 2030 (11/2007): cerca de 180.000 MW como aproveitável, semelhante ao Plano 2015 da ELETROBRAS (04/1994)
- Atualmente, conta-se com segurança com até 150.000 MW, montante necessário até o quinquênio 2025/2030 (função do cenário energético e ambiental futuro)

**A Expansão da Capacidade Instalada do Brasil, a partir deste quinquênio 2025/2030, sem parcelas significativas de novas hidroelétricas, será majoritariamente baseada em usinas térmicas a Gás Natural, Nuclear e Carvão Mineral.**



## Expansão da Capacidade Instalada de Energia Elétrica do Brasil A Partir do Quinquênio 2025/2030

(Após o Aproveitamento do Potencial Hidroelétrico Econômico e Ambientalmente Viável)

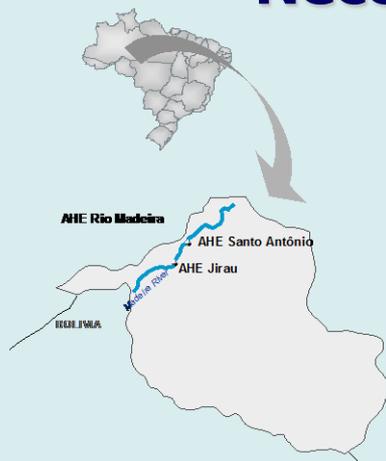
- Programa Térmico (operação de base)
  - Nuclear** (aceitação pública, resíduos, segurança e outros)
  - Gás Natural (outros usos, matéria prima na indústria, oferta e preços)
  - Carvão Mineral (queima limpa eficiente, emissões de gases de efeito estufa e evolução da tecnologia de captura do carbono).
- Complementado por Fontes Energéticas Renováveis
  - Eólica
  - Biomassa (bagaço de cana-de-açúcar)
  - Solar Fotovoltaica e Eventualmente Termo Solar
  - Lixo Urbano
- Eficiência Energética com Avanços Tecnológicos

## SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

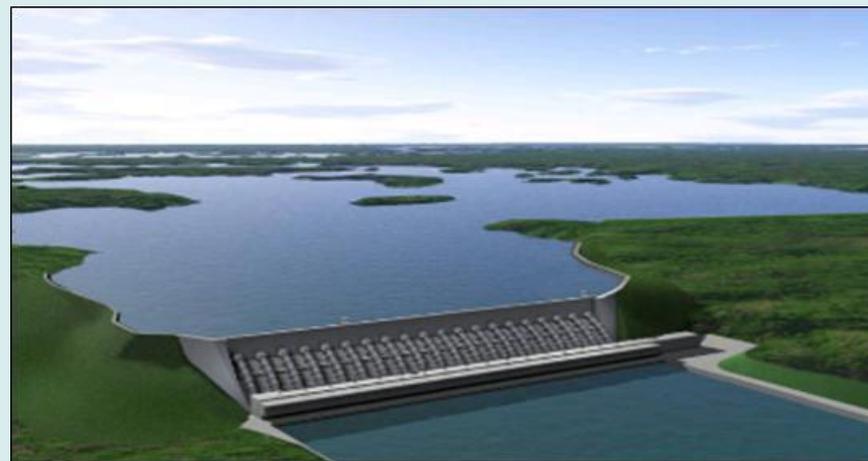
### Necessidade de Regulação por Fontes Térmicas

**Essa tendência será amplificada para novos projetos na Bacia Amazônica**

- **Atual Fator de Capacidade Médio para Hidrelétricas no Brasil: 55%**
- **Usinas "A Fio D'água":  
Tendência de menores Fatores de Capacidade**



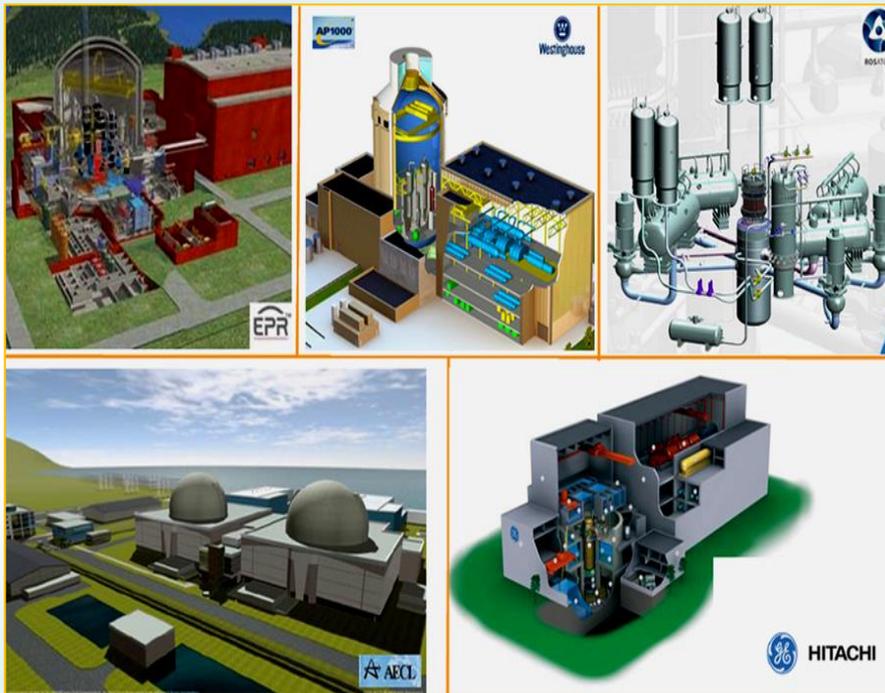
**Hidrelétrica no Rio Madeira: 6.500 MW**



**Hidrelétrica de Belo Monte: 11.000 MW**

## Oportunidades para a Energia Nuclear

### Características das Usinas Nucleares



- **Implantação em áreas reduzidas.**
- **Elevado Fator de Capacidade.**
- **Grande oferta de energia na **base**.**
- **Grandes Reservas de Urânio no País.**
- **Baixo Custo do Combustível**
- **Domínio Tecnológico do Ciclo e do Enriquecimento do urânio**
- **Reduzido impacto ambiental.**

# Futuras Centrais Nucleares: Seleção da Tecnologia

## RFI - Solicitação de Informações Técnicas: Reatores PWR Geração III+ Sistemas Segurança Passiva / Vida Útil: 60 anos / Construção Modular / Ciclos mais Longos

PRW ~ 1.000 MW

<b>WESTINGHOUSE / TOSHIBA</b>  <b>AP 1000</b>  USA JAPÃO	
<b>AREVA / MITSUBISHI</b>  <b>ATMEA 1</b>  FRANÇA JAPÃO	
<b>ROSENERGOATOM</b> <b>VVER 1200</b>  RUSSIA	
<b>C N C</b> <b>ACP 1000</b>  China	

PRW > 1.000 MW

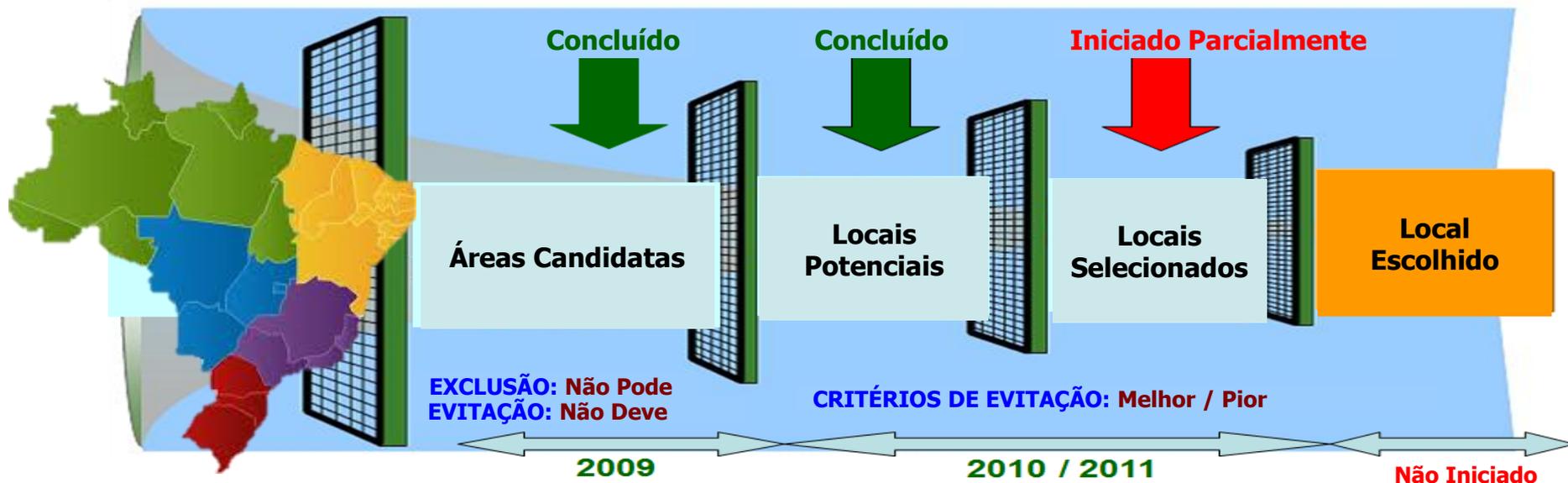
 <small>Click to download detailed version.</small>	 <b>MITSUBISHI</b> <b>US-APWR</b> 1.700 MW
	 <b>AREVA</b> <b>EPR</b> 1.700 MW
	 <b>KHNP</b> <b>APR</b> 1.400 MW
	 <b>SNPTC</b> <b>CAP</b> 1.400 MW

## Inventário Nacional das Áreas que atendem aos Critérios para Construção de uma Central Nuclear

- Eletronuclear
- EPE (Empresa de Planejamento Energético)
- COPPE-UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro)
- GARTA (Grupo de Análise de Risco Tecnológico e Ambiental)

- **Metodologia EPRI** (*Electric Power Research Institute – USA*)

### Critérios para Seleção de Locais para Solicitação de Licenças de Locais



## CrITÉrios de Exclusão e de Evitação: 24 CrITÉrios Iniciais

### Saúde e Segurança (15)

- gua para Refrigeração
- Vibrações do Solo
- Populações Vizinhas
- Falhas Capazes
- Perigos Geológicos
- Estabilidade do Solo
- Presença de Aquíferos
- Temperatura Ambiente
- Instalações já Existentes
- Incidência de Chuvas
- Incidência de Ventos
- Falhas de Superfície
- Deformações na Superfície
- Risco de Inundação
- Dispersão Atmosférica

### Meio Ambiente (5)

- rea de Proteção Ambiental
- Riscos Inundações
- Riscos a Espécies Importantes
- Riscos a Importantes Habitats
- Profundidade Lençol Freático

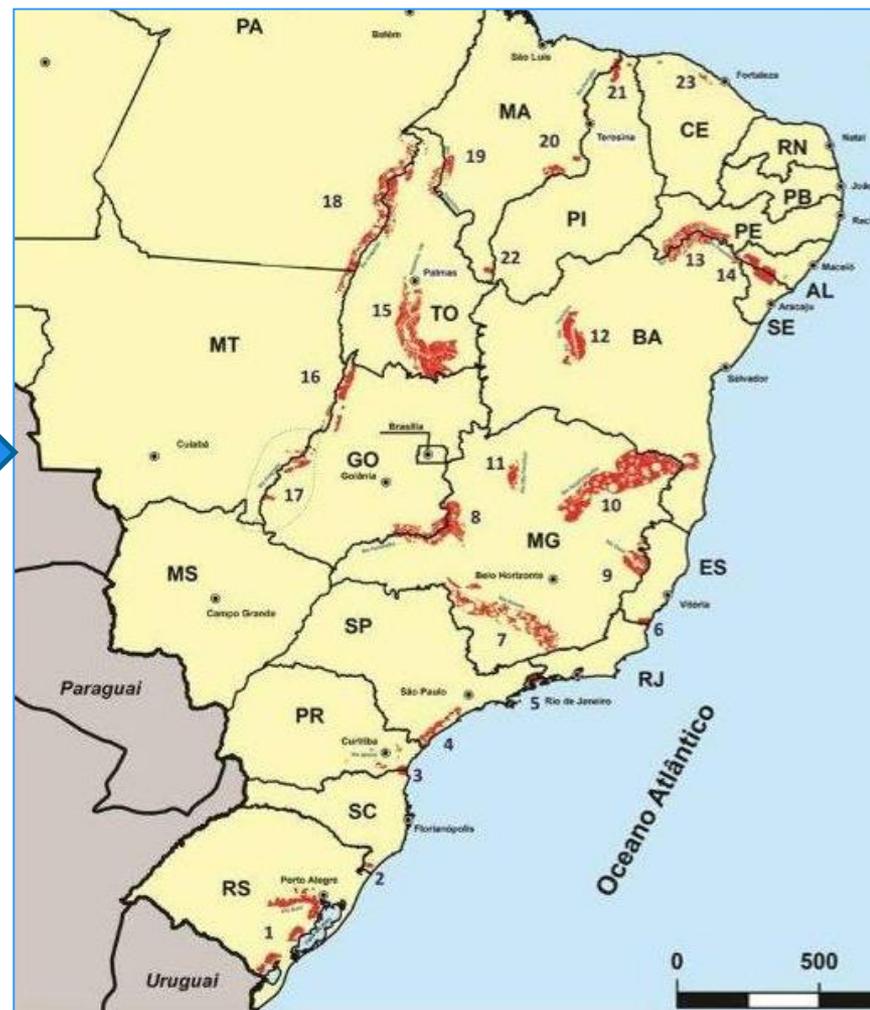
### Socioeconmicos (2)

- Efeitos de Construção
- Efeitos Operacionais

### Custos (2)

- Distância das Fontes de gua
- Topografia

## 40 reas Potenciais



## Estudos Preliminares e Antecipatórios

- **Estratégias para incrementar a Geração Nuclear no Brasil**
- **Avaliações de Custos de Implantação**
- **Avaliação da Competitividade com Outras Fontes**
- **Modelagens Econômicas e Financeiras**
- **Avaliações dos Modelos de Comercialização de Energia**
- **Desenvolvimento de um Modelo para Investigações dos Impactos Socioambientais nas regiões circunvizinhas às Novas Centrais Nucleares**
- **PPE (*Plant Parameter Envelope*): Determinação dos Parâmetros Admissíveis relativos às características técnicas dos reatores investigados, com vistas à futura submissão (à CNEN) da Requisição da Licença de Local.**
- **BUR (*Brazilian Utility Requirements*): Requisitos Técnicos que serão exigidos para os novos reatores a serem construídos no Brasil**

# O Futuro da Energia Nuclear no Mundo e no Brasil

**MUITO OBRIGADO**  
[travass@eletronuclear.gov.br](mailto:travass@eletronuclear.gov.br)

