

---

# SEL0363 - Geração de Energia Elétrica

*Prof. Tit. Denis Vinicius Coury  
Leonardo da Silva Lessa  
Monitor: Luke Rasga Jardim Maia*

*Emails: [coury@sc.usp.br](mailto:coury@sc.usp.br);  
[leonardolessa@usp.br](mailto:leonardolessa@usp.br)  
[lukejardim95@usp.br](mailto:lukejardim95@usp.br)*

---

# Geração Termelétrica: Biomassa, Fósseis e Nuclear



# Termelétrica ou Termoelétrica?

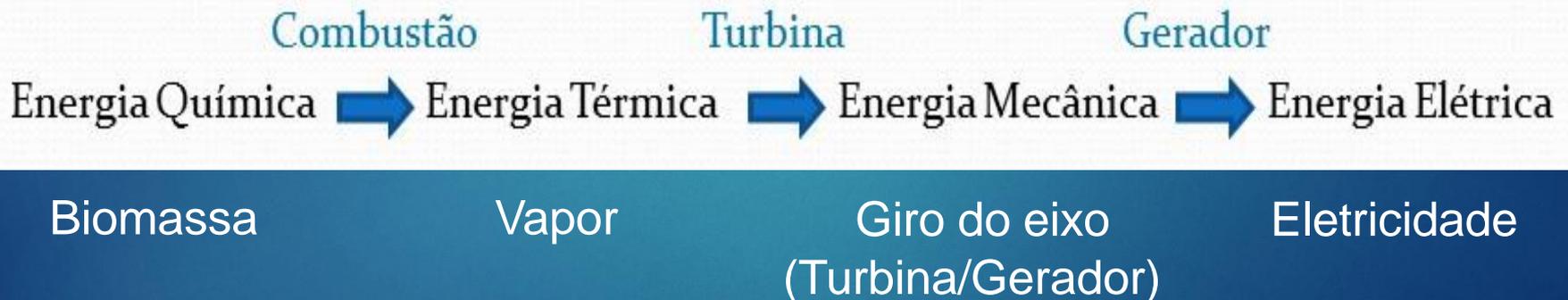
- "Energia termoelétrica é a eletricidade gerada por meio da obtenção de calor de uma determinada fonte. Esse calor em geral é proveniente da queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural ou derivados do petróleo.
- As unidades geradoras desse tipo específico de energia recebem o nome de usinas termoelétricas ou usinas térmicas. É importante ressaltar que outros materiais podem ser utilizados para obtenção do calor e geração de eletricidade, como é o caso da biomassa, uma das principais fontes alternativas de energia que auxiliam na redução dos impactos ambientais em comparação com a geração de energia termoelétrica advinda dos combustíveis fósseis

# O que é uma Termelétrica?

4

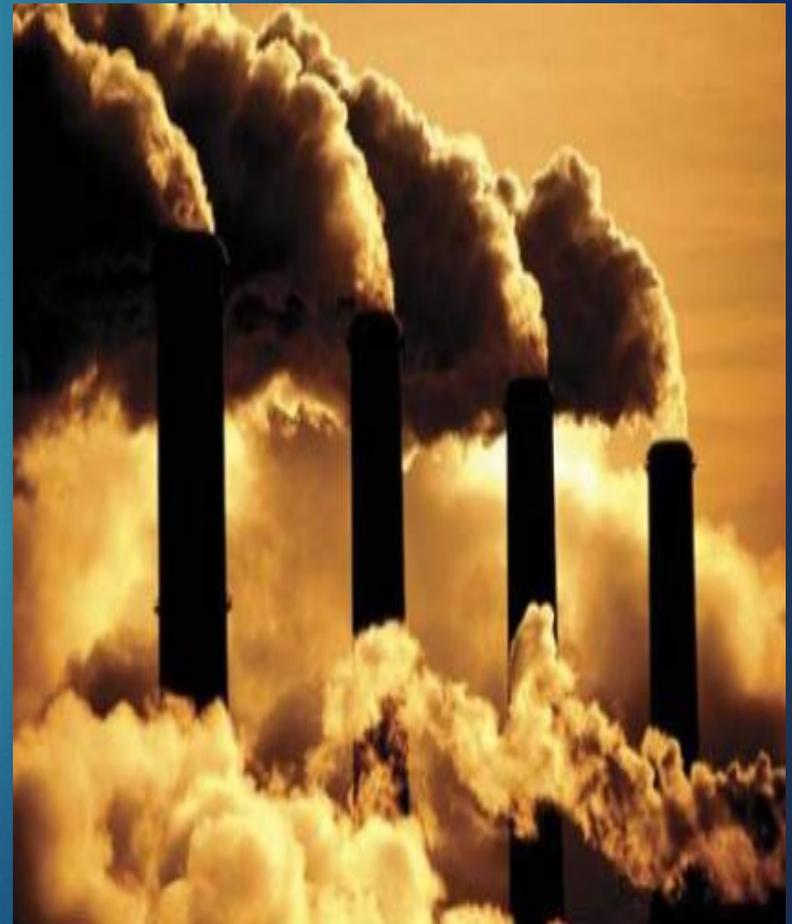
- Basicamente é uma instalação industrial onde ocorre um processo onde transforma-se a energia térmica em energia elétrica.

## Processo de Conversão da Energia Termoelétrica



# Fontes Combustíveis

- Há vários tipos de usinas termelétricas, sendo que os processos de produção de energia são praticamente iguais porém com combustíveis diferentes.
- Principais combustíveis:
  - Biomassa;
  - Óleo;
  - Gás Natural;
  - Carvão;
  - Nuclear.

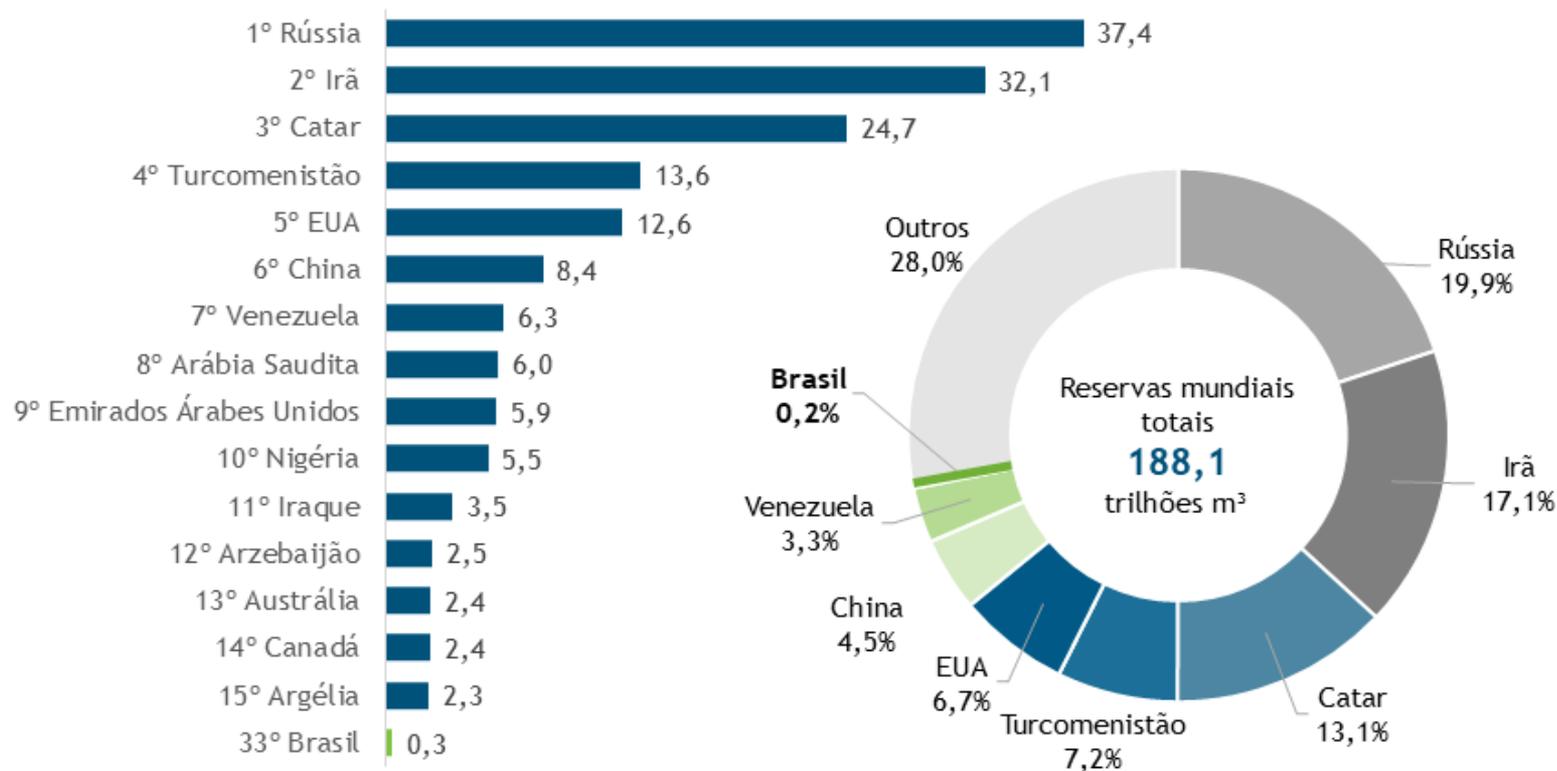


# Gás Natural

6

## Maiores reservas provadas de gás natural em 2020

Trilhão de m<sup>3</sup>

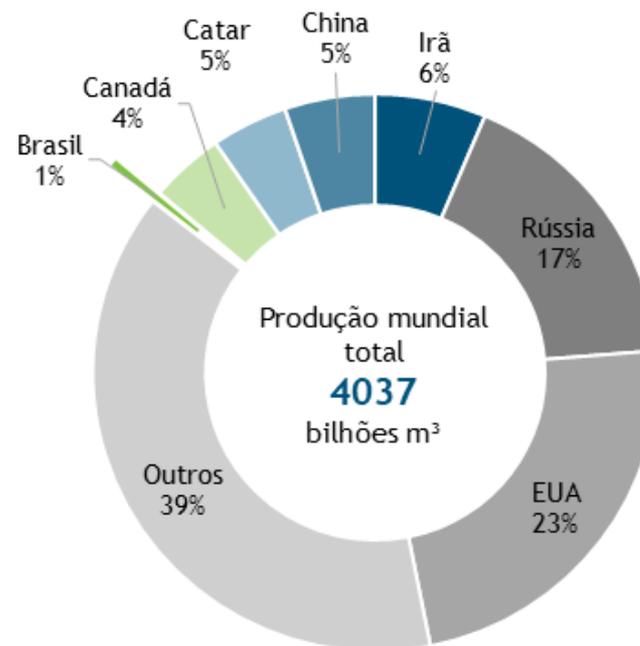
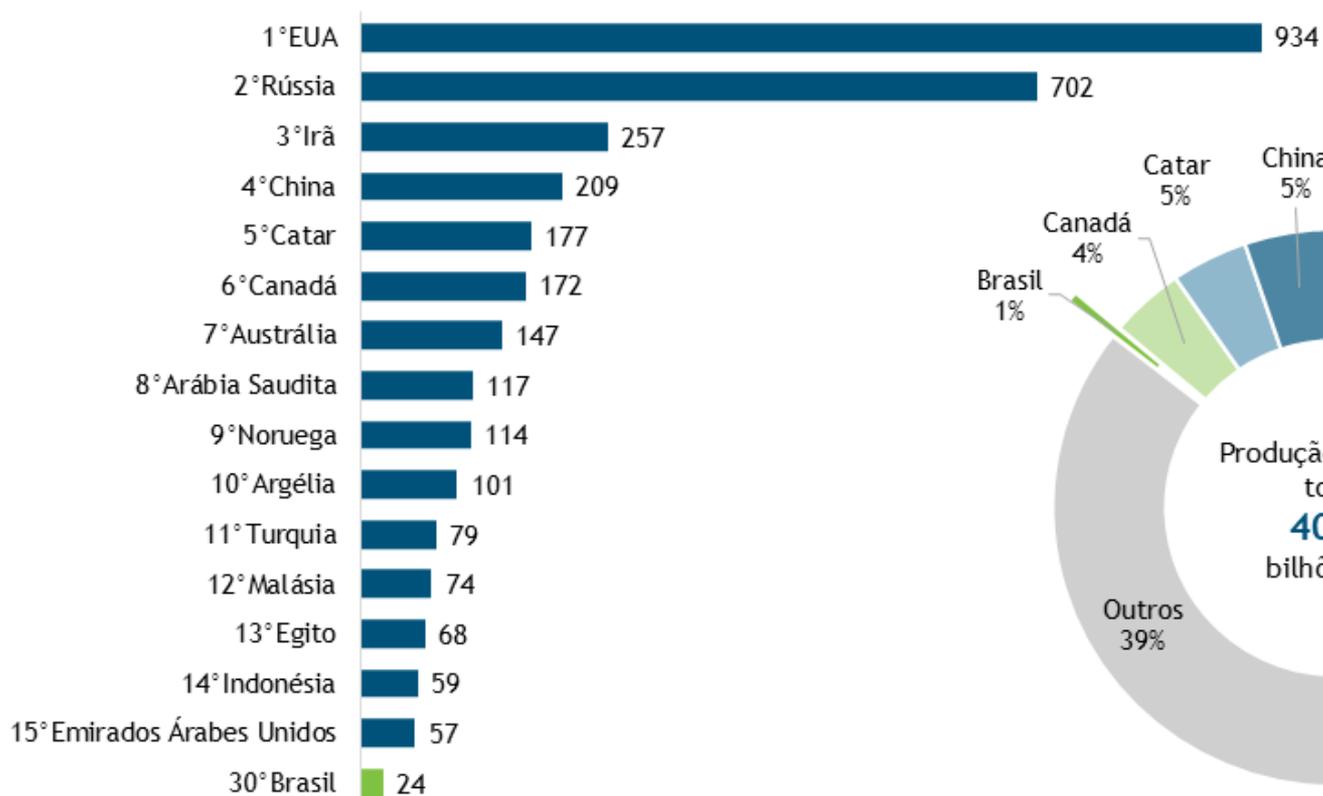


# Gás Natural

7

## Maiores produtores de gás natural em 2021

Bilhão m<sup>3</sup>

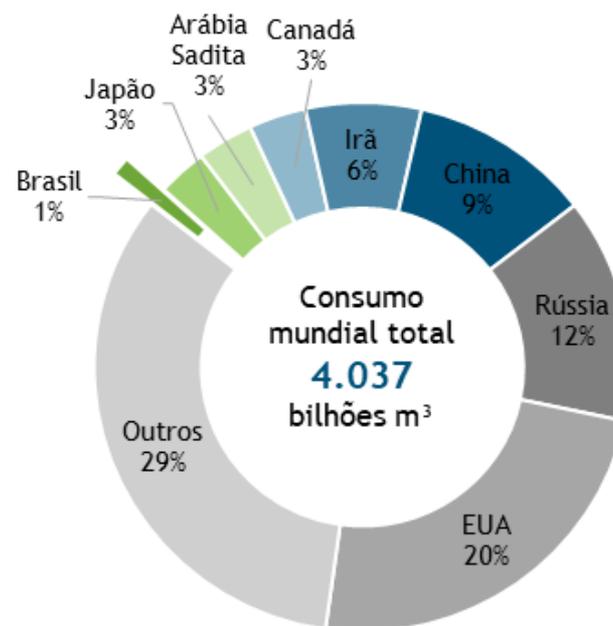
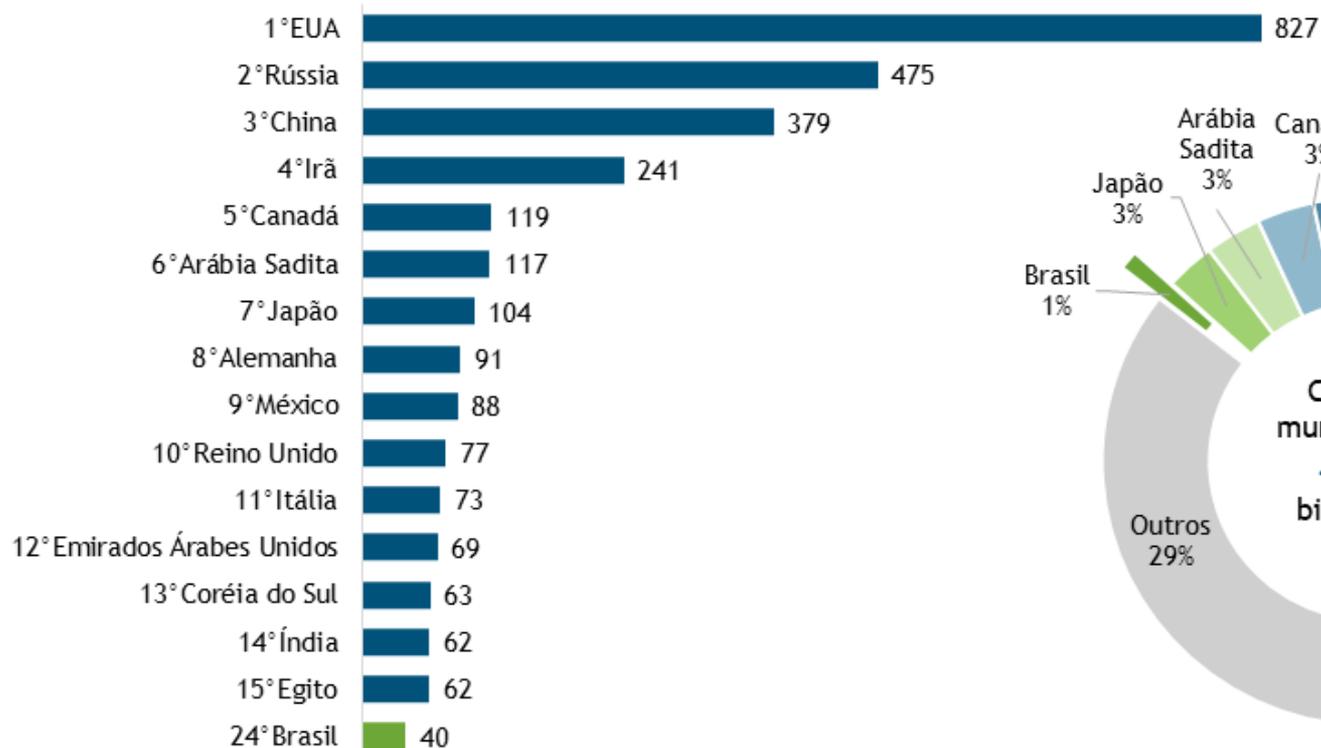


# Gás Natural



## Maiores consumidores de gás natural em 2021

Bilhão m<sup>3</sup>



# Gás Natural - Mundo

9



# Gás Natural - Brasil

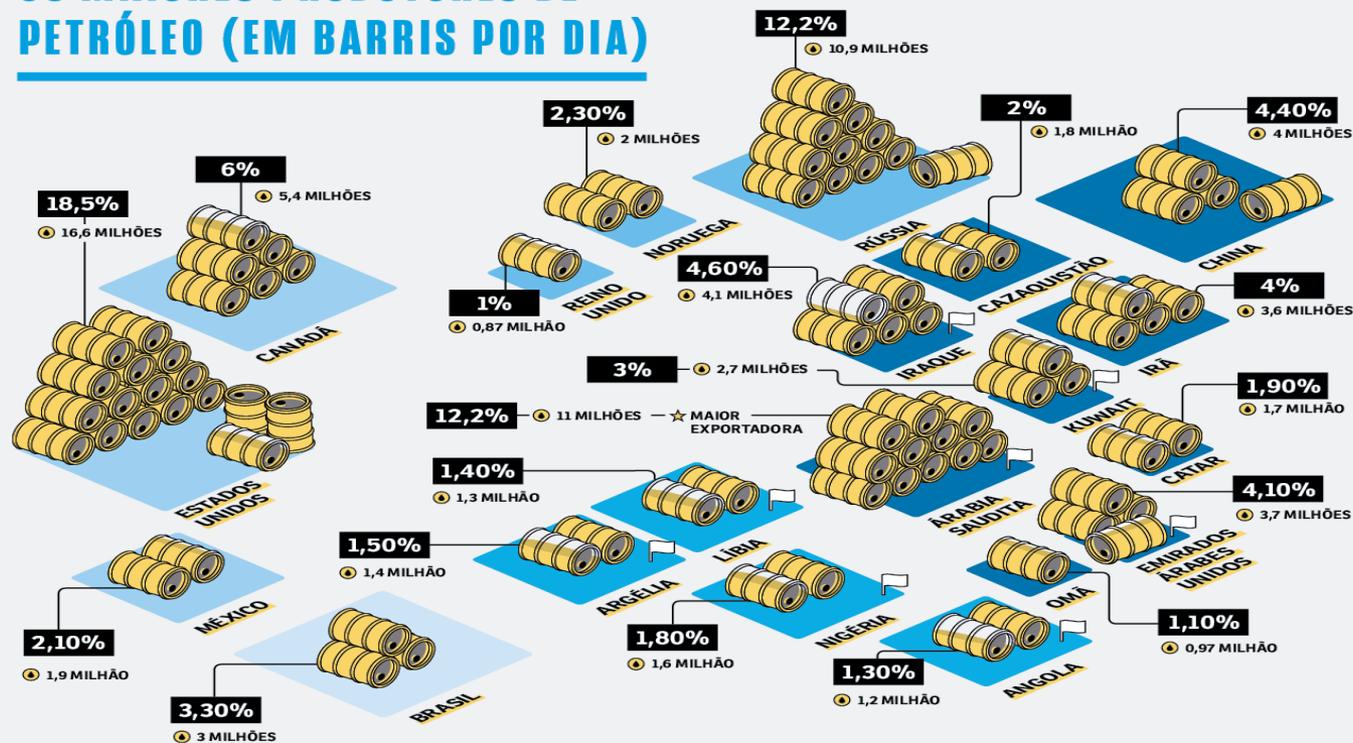
10



# Petróleo no Brasil e no Mundo

11

## OS MAIORES PRODUTORES DE PETRÓLEO (EM BARRIS POR DIA)



**COMO LER O GRÁFICO:**

- América do Sul
- América do Norte
- Europa
- África
- Ásia

**% da produção mundial**

Quantidade em mbl/d (barris diários)

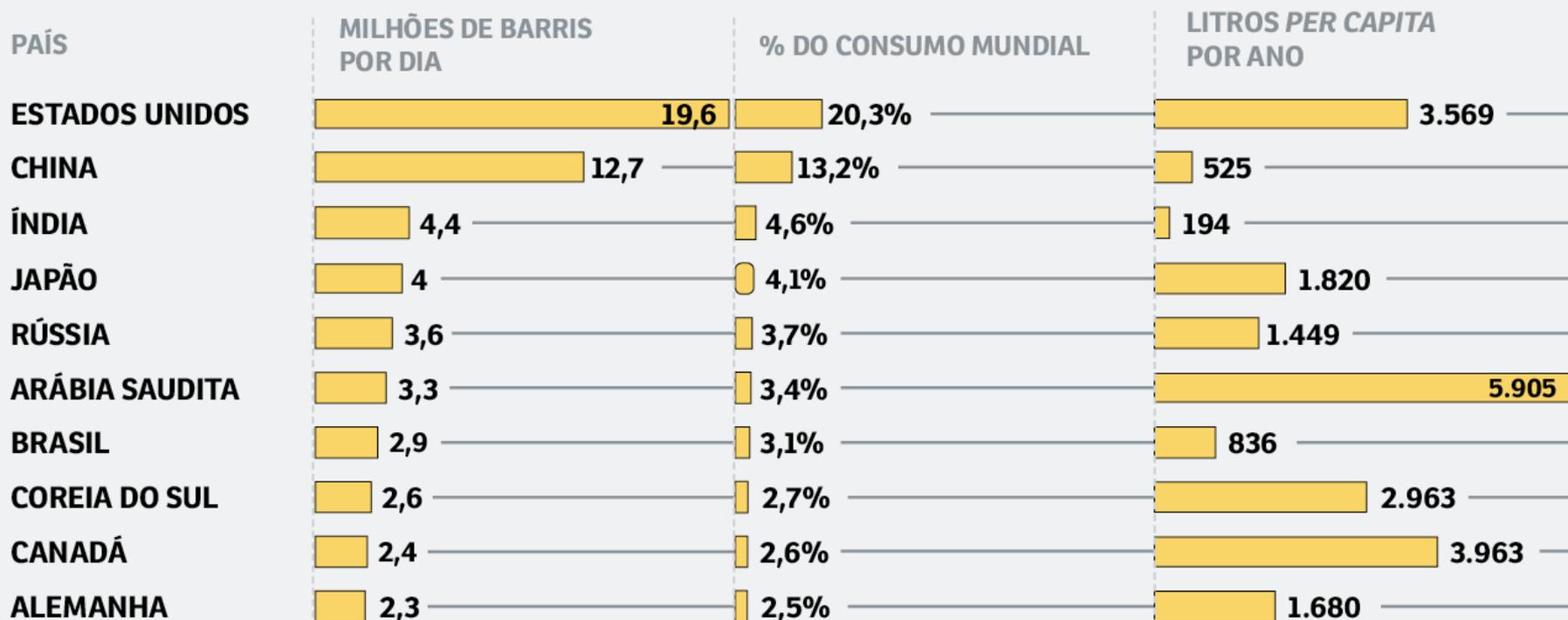
Membros da Opep+

PAÍS

# Petróleo no Brasil e no Mundo

12

## OS MAIORES CONSUMIDORES



# Carvão Mineral

13

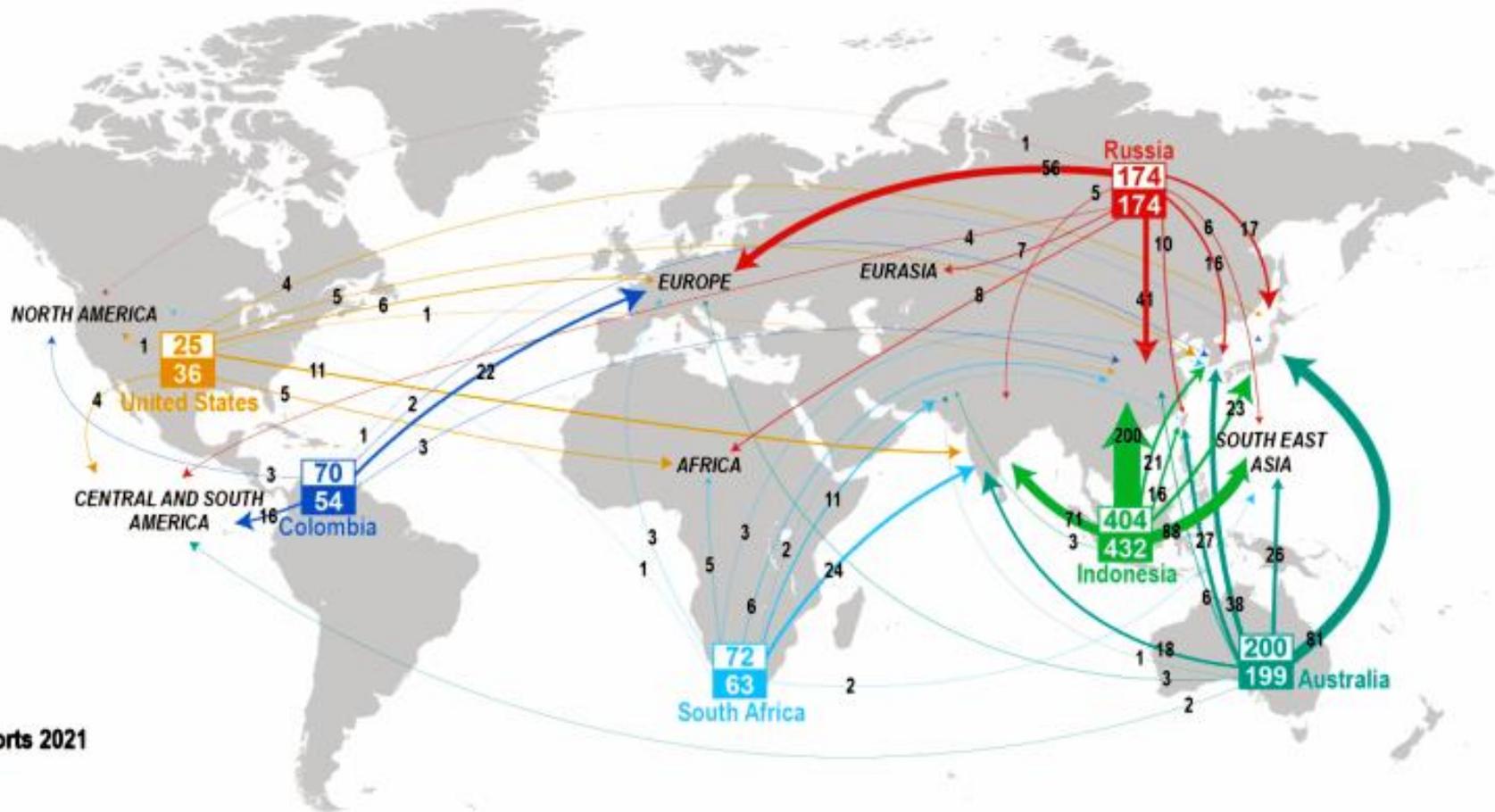
Total coal consumption (Mt), 2020-2025

Region/country	2020	2021	2022	2025	2020-2021	2021-2022
<b>Asia Pacific</b>	<b>5 830</b>	<b>6 153</b>	<b>6 251</b>	<b>6 492</b>	<b>5.5%</b>	<b>1.6%</b>
China	4 045	4 232	4 250	4 337	4.6%	0.4%
India	905	1 033	1 103	1 220	14.1%	6.8%
Japan	174	174	177	158	-0.1%	1.8%
Southeast Asia	356	361	375	422	1.5%	3.8%
<b>North America</b>	<b>462</b>	<b>529</b>	<b>502</b>	<b>410</b>	<b>14.4%</b>	<b>-5.1%</b>
United States	430	496	465	383	15.4%	-6.3%
<b>Central and South America</b>	<b>48</b>	<b>50</b>	<b>45</b>	<b>37</b>	<b>3.8%</b>	<b>-8.9%</b>
<b>Europe</b>	<b>585</b>	<b>649</b>	<b>685</b>	<b>552</b>	<b>10.9%</b>	<b>5.7%</b>
European Union	392	449	478	371	14.4%	6.5%
<b>Middle East</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>-7.0%</b>	<b>-14.5%</b>
<b>Eurasia</b>	<b>344</b>	<b>348</b>	<b>350</b>	<b>351</b>	<b>1.0%</b>	<b>0.6%</b>
Russia	217	225	236	227	3.9%	4.8%
<b>Africa</b>	<b>195</b>	<b>189</b>	<b>180</b>	<b>190</b>	<b>-3.1%</b>	<b>-4.5%</b>
<b>World</b>	<b>7 477</b>	<b>7 929</b>	<b>8 025</b>	<b>8 038</b>	<b>6.0%</b>	<b>1.2%</b>

# Carvão Mineral

14

Main trade flows in the thermal coal market, 2021 (Mt)



O comércio de carvão continua concentrado na região Ásia-Pacífico. Fonte: AIE

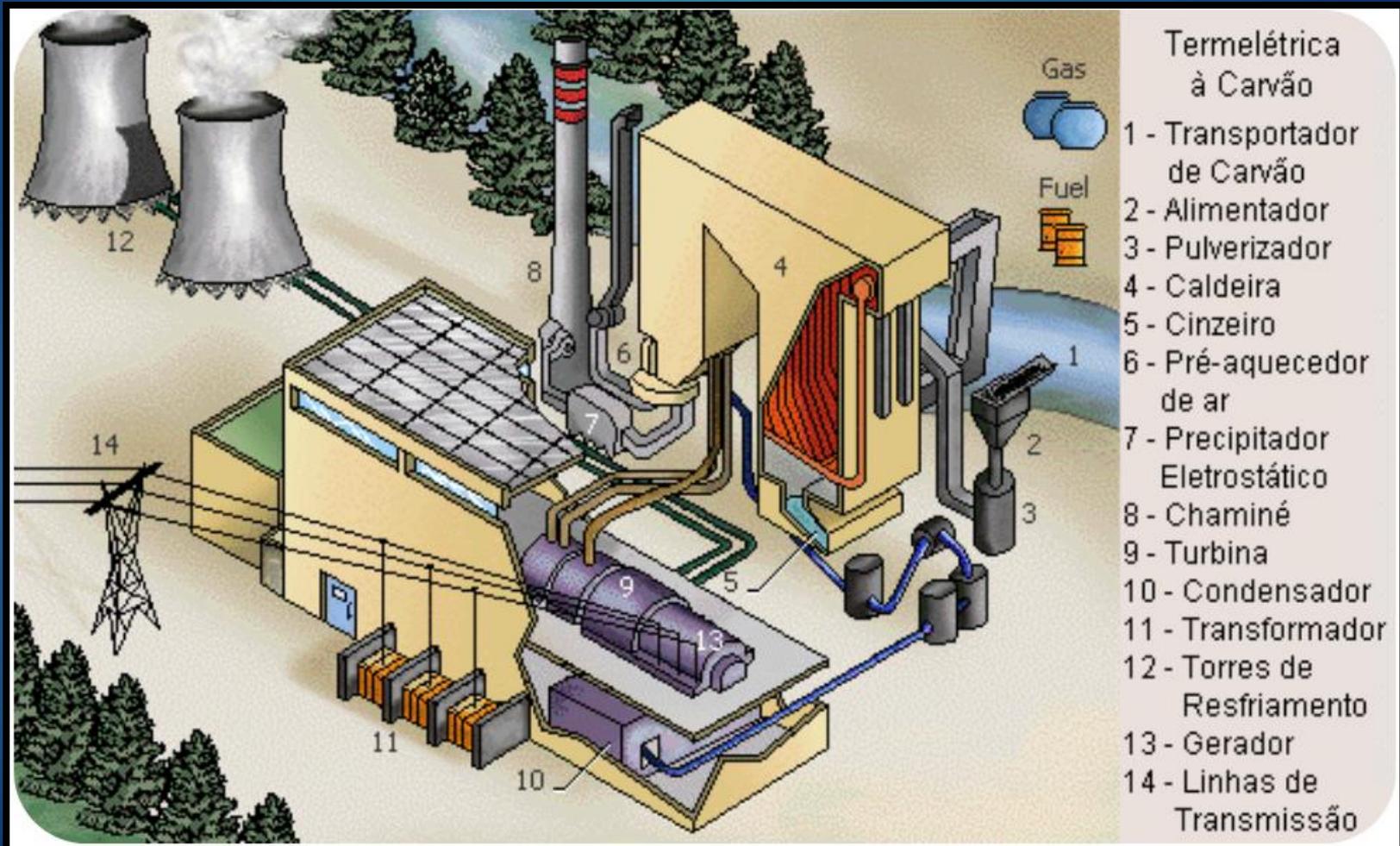
# Energia Nuclear

15



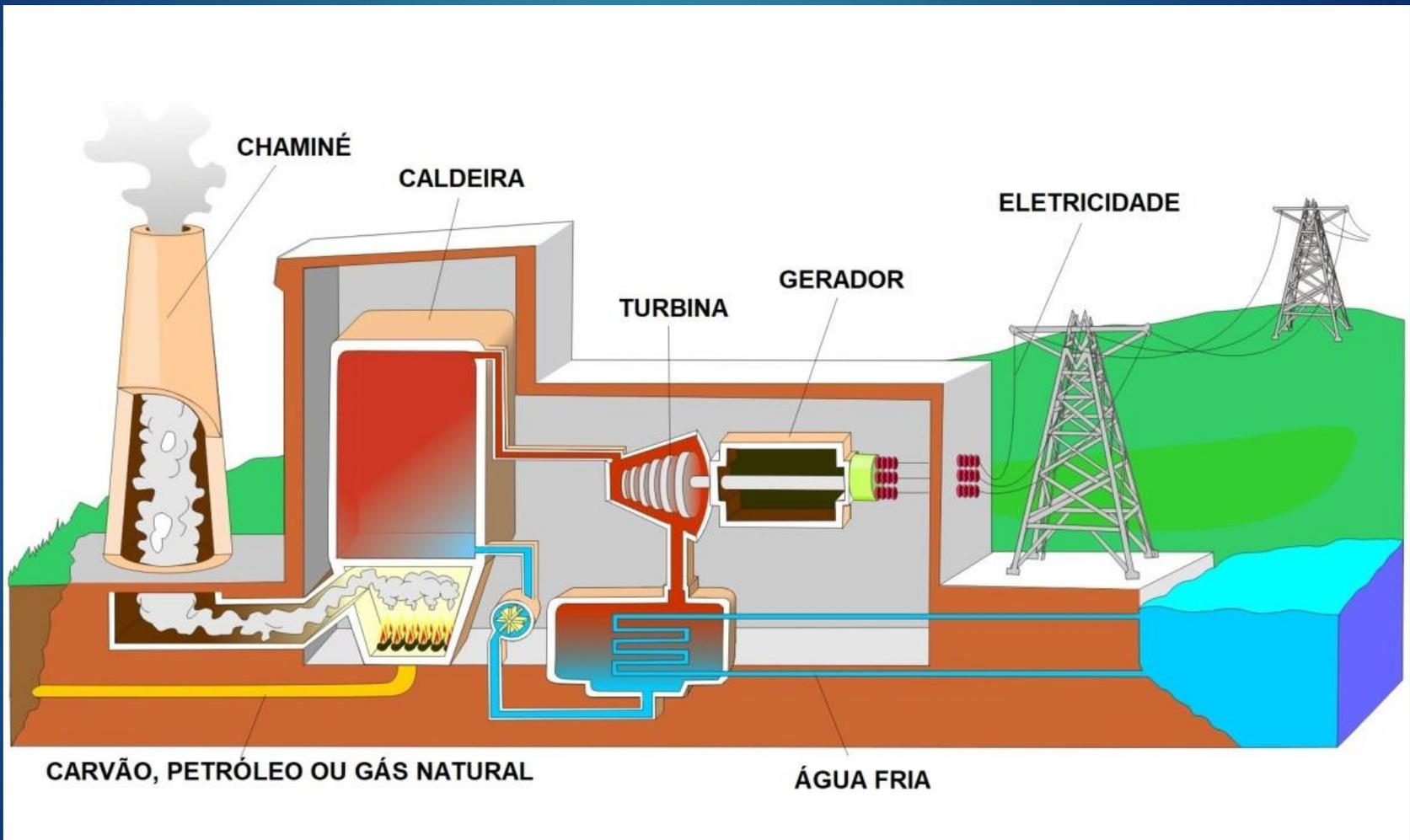
# Usinas Termelétricas

16



# Usinas Termelétricas

17



# Usina Termoelétrica

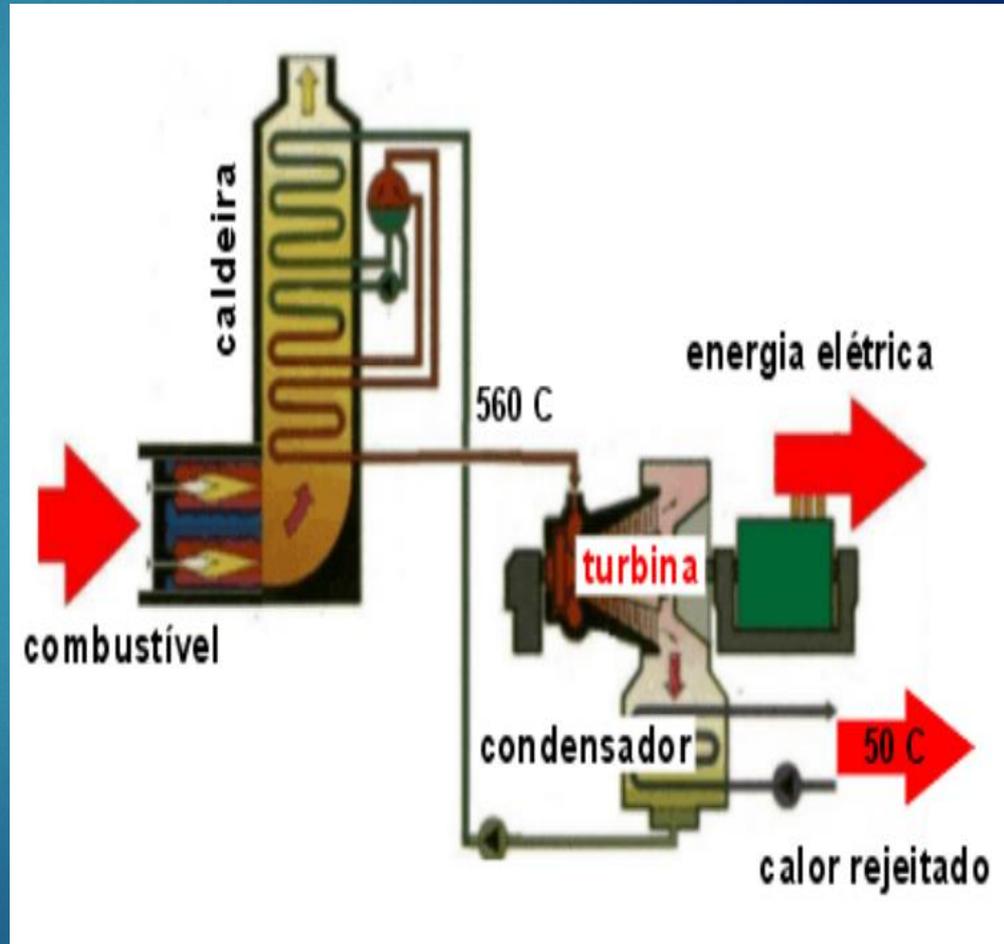
18

- As centrais termoelétricas (convencionais) são classificadas de acordo com o método de combustão utilizado.
- **Combustão Externa:** O combustível não entra em contato com o fluido de trabalho. Este é um processo usado principalmente nas centrais termoelétricas a vapor, nas quais o combustível aquece o fluido de trabalho (em geral a água) em uma caldeira até gerar o vapor que, ao se expandir em uma turbina, produzirá trabalho mecânico;
- **Combustão interna:** A combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível. Dessa maneira, o fluido de trabalho será o conjunto de produtos da combustão. A combustão interna é o processo usado principalmente nas turbinas a gás e nas máquinas térmicas a pistão (motores a diesel).

# Turbinas a Vapor

19

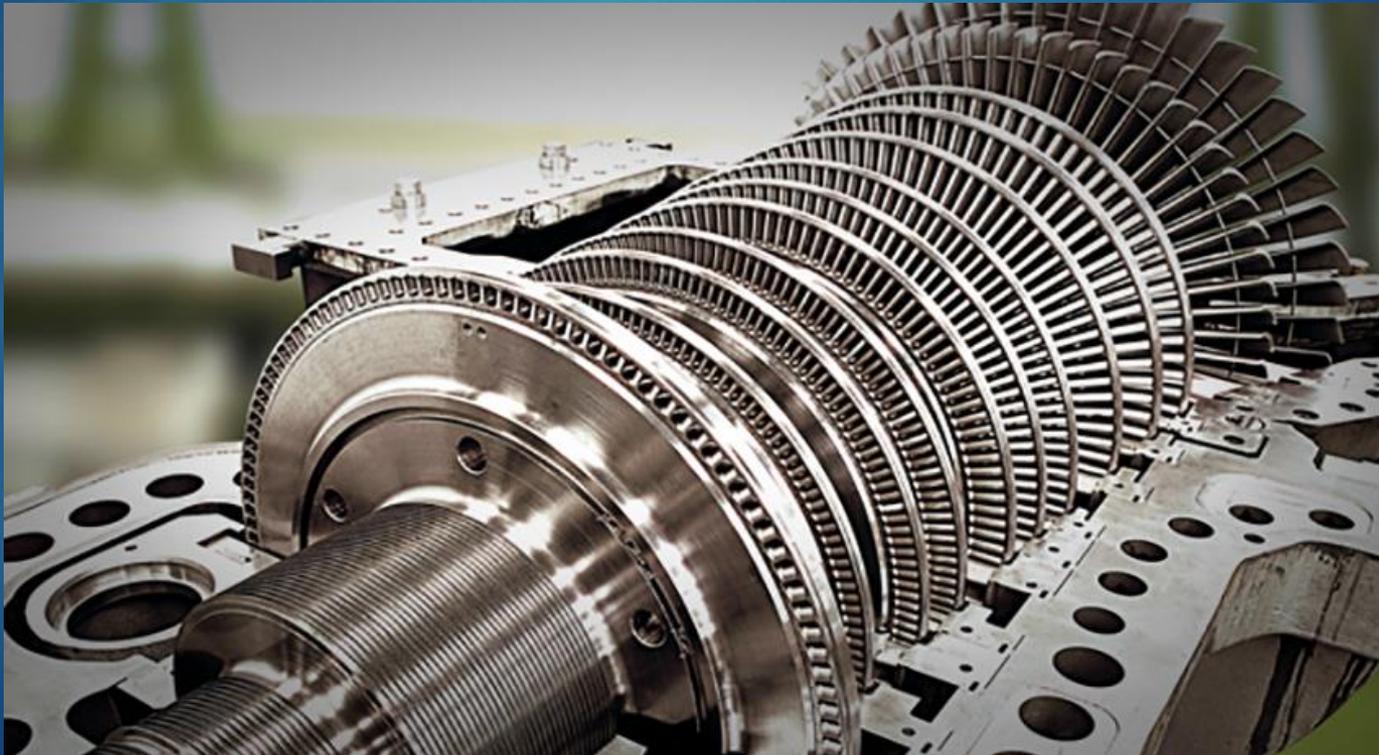
- **Turbina a Vapor:** As turbinas a vapor são máquinas de combustão externa (os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo). Devido a isto apresentam uma flexibilidade em relação ao combustível a ser utilizado, podendo usar inclusive aqueles que produzem resíduos sólidos (cinzas) durante a queima.



# Turbinas a Vapor

20

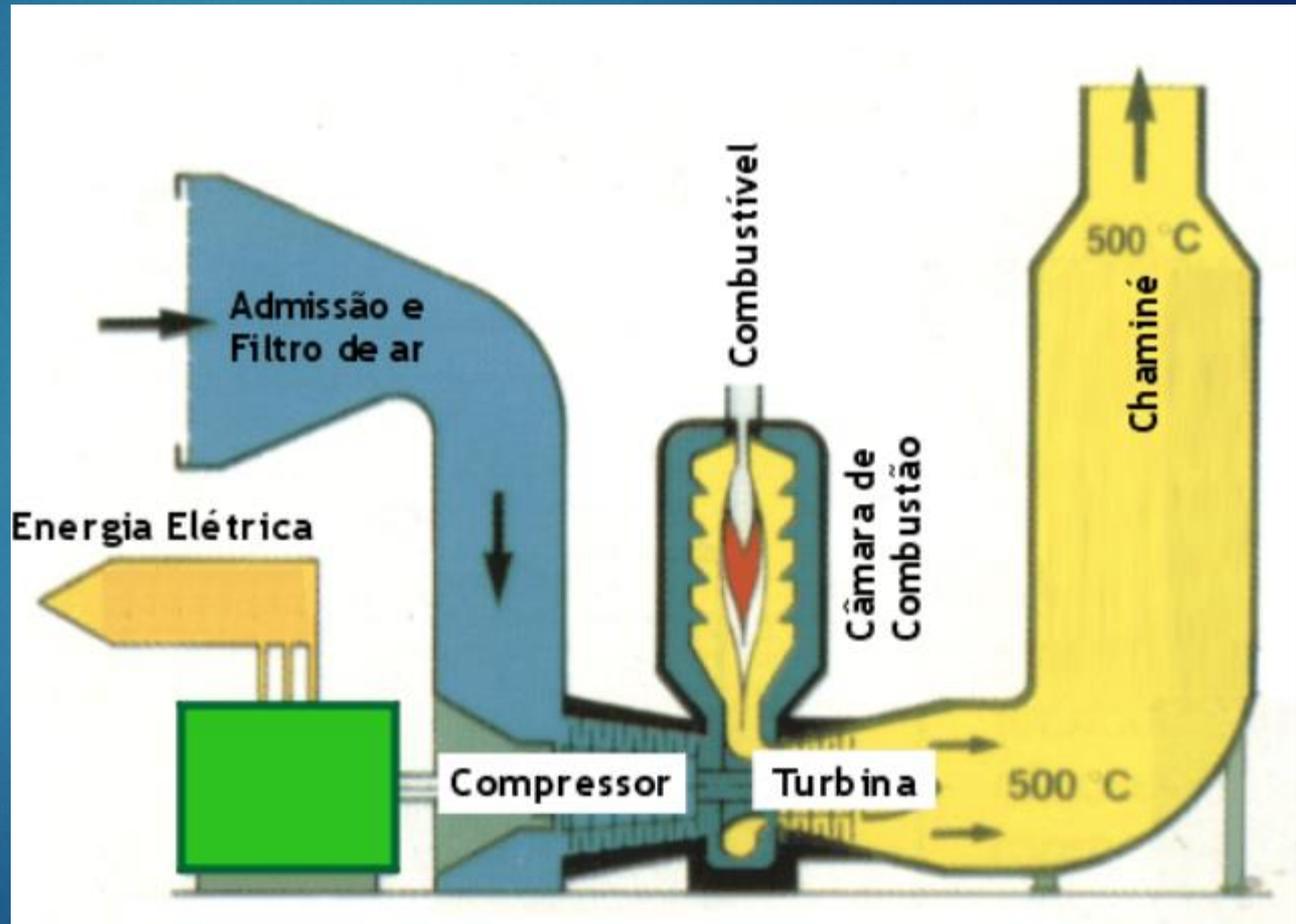
- Como as turbinas a vapor são máquinas de combustão externa então o calor necessário para a ebulição do condensado e para o superaquecimento posterior deve ser transferido dos produtos de combustão ao fluido de trabalho através das serpentinas no interior da caldeira.



# Turbinas a Gás

21

- Turbina a Gás: A expansão dos gases resultantes da queima do combustível aciona a turbina a gás, que está diretamente acoplada ao gerador e, desta forma, a potência mecânica é transformada em potência elétrica.

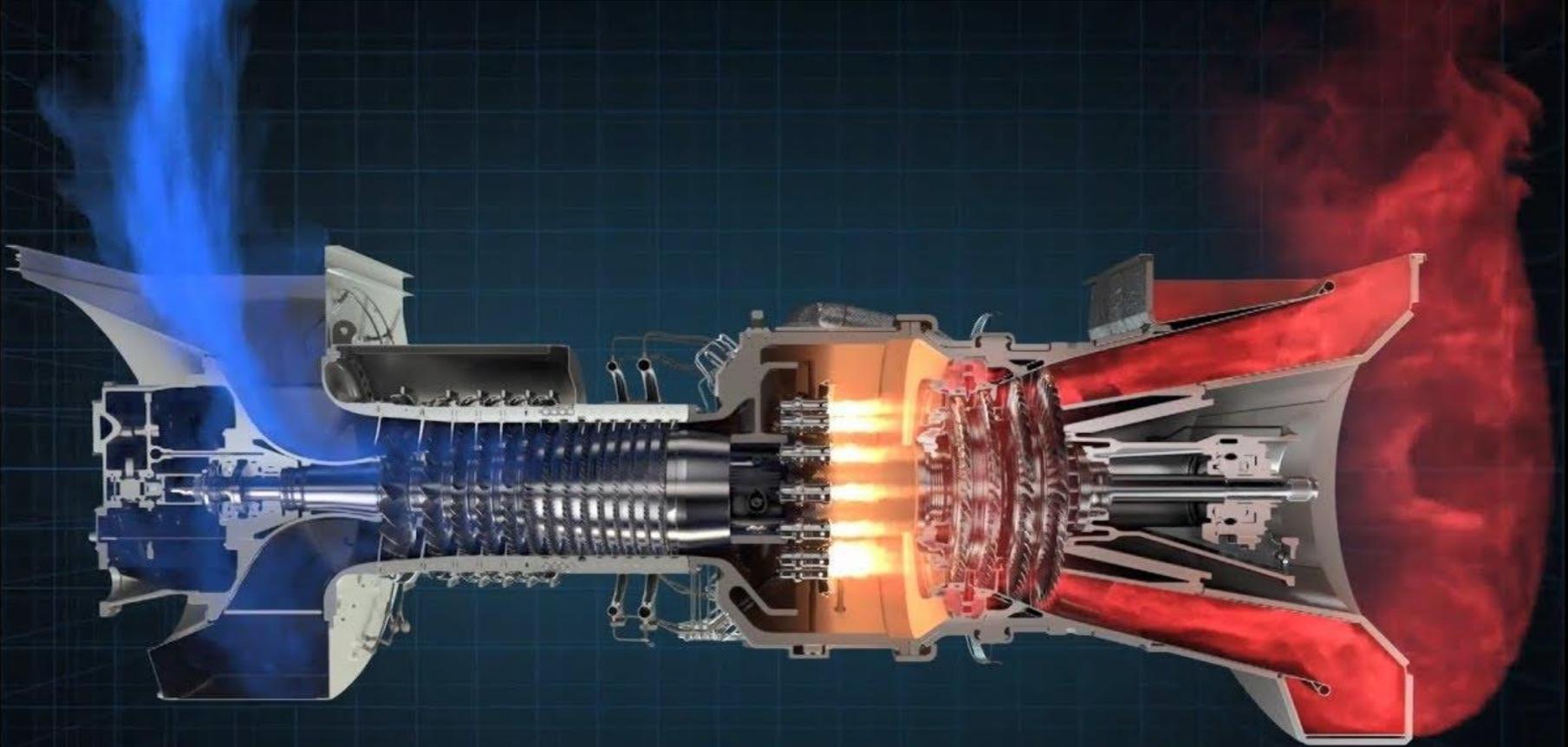


# Turbinas a Gás

- As turbinas a gás são motores térmicos que realizam a conversão da energia de um combustível em potência de propulsão, potência de eixo ou potência elétrica.
- As turbinas a gás são máquinas de combustão interna ( a mistura de gases resultantes da queima do combustível é o fluido de trabalho que escoam no interior da máquina realizando os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo ) e portanto necessitam de um combustível de qualidade, por exemplo: gás natural.

# Turbinas a Gás

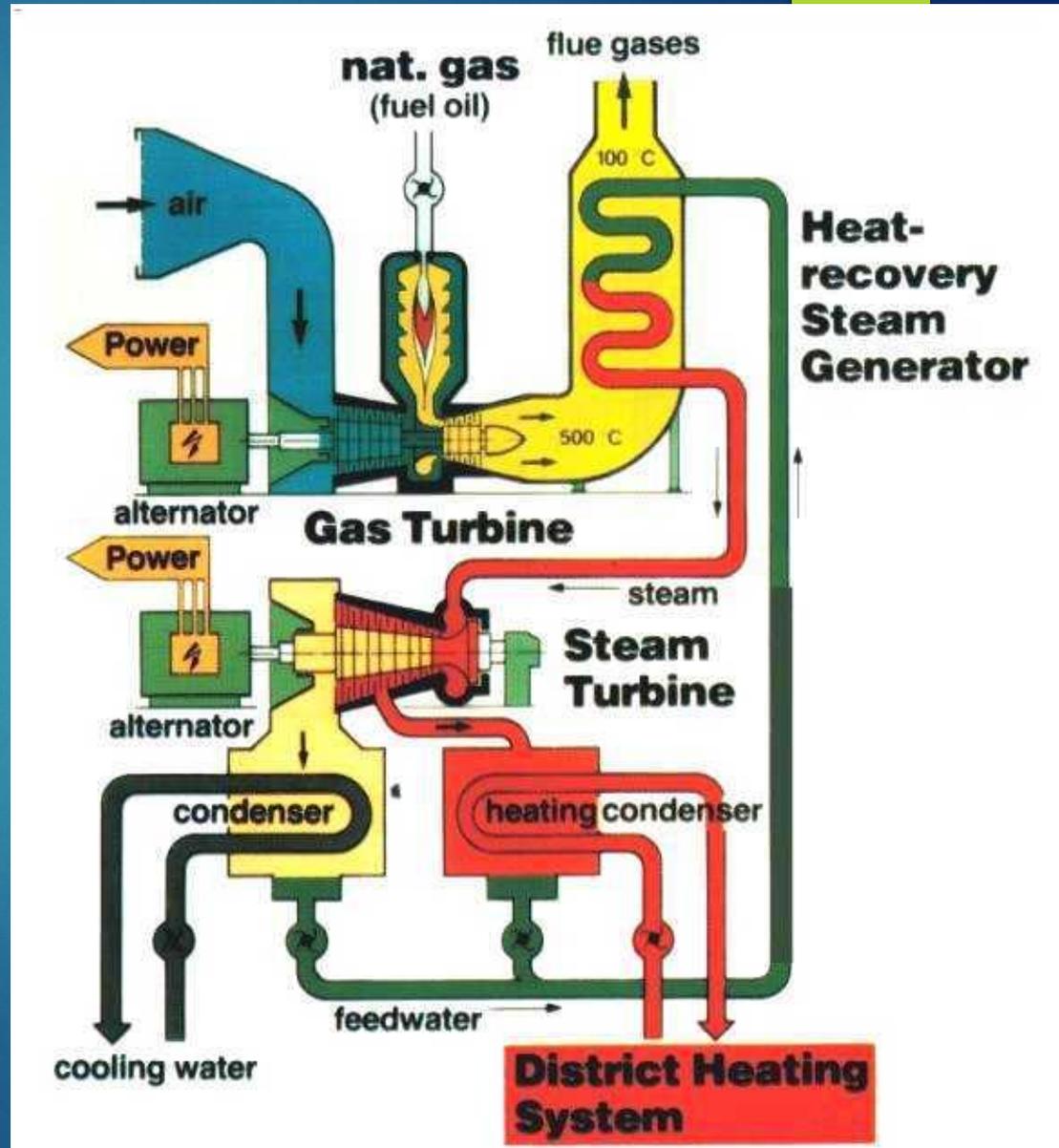
23



# Turbina de Ciclo Combinado

24

**Ciclo Combinado:** Devido às características das turbinas a gás e das turbinas a vapor, as condições de acoplamento térmico entre os dois ciclos são muito boas. No ciclo combinado (turbina a gás/turbina a vapor), o calor necessário para a caldeira da turbina a vapor é fornecido pelos gases quentes da exaustão da turbina a gás.



# Uso de Usinas Termoelétricas

25

- Vantagens
  - Próxima aos consumidores;
  - Menos linhas de transmissão;
  - Redução das perdas em 16%;
  - O gás natural pode ser usado como matéria prima;
- Desvantagens
  - Alto custo de operação – combustíveis;
  - Chuva ácida;
  - Efeito estufa;

# Uso de Usinas Termoeletricas

26

- O crescimento da geração de eletricidade por termelétricas que utilizam combustíveis fósseis em 177% nas duas últimas décadas – de 30,6 TWh, em 2000, para 84,4 TWh, em 2020 – favoreceu um aumento de 90% nas emissões de gases de efeito estufa no setor elétrico, nesse mesmo período.

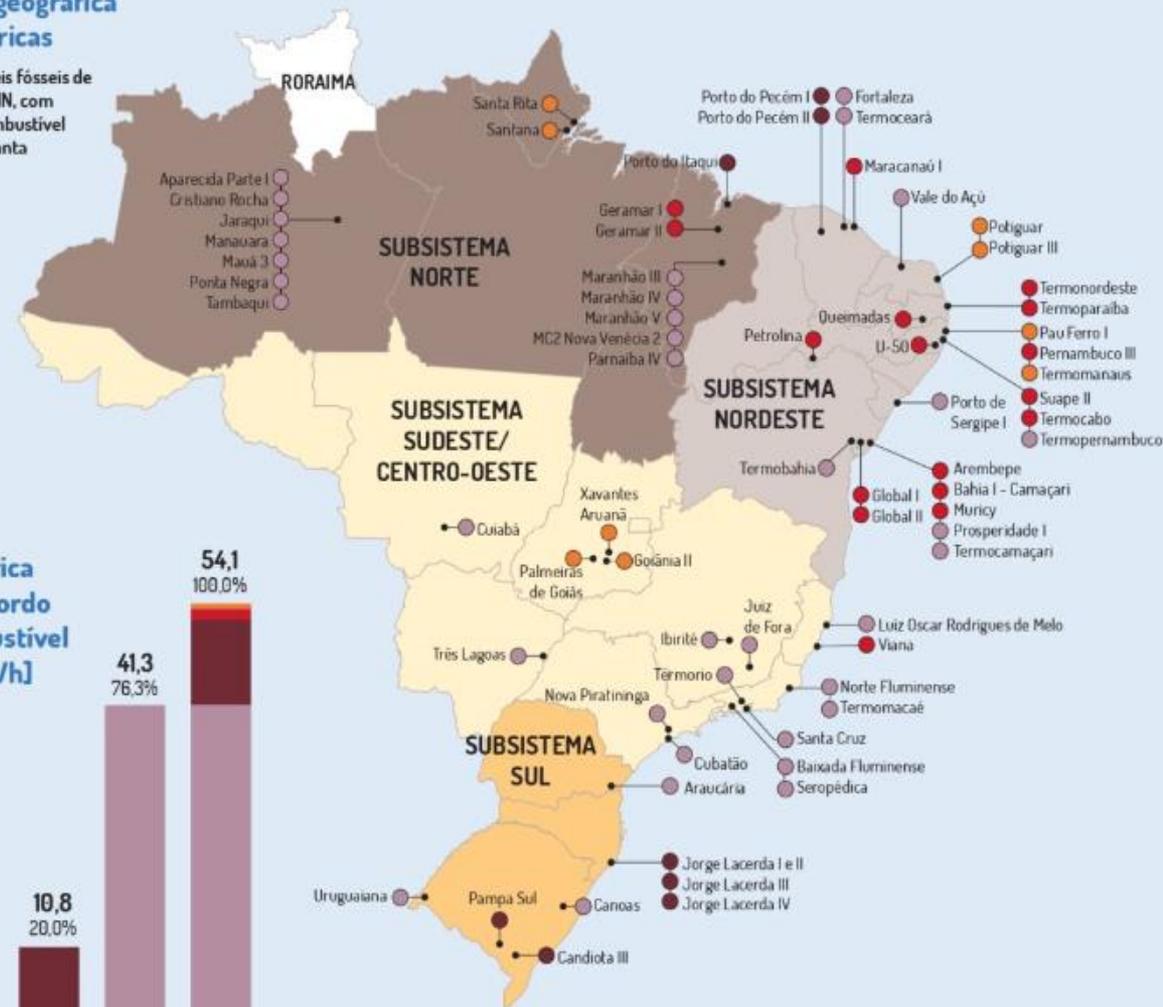
## Distribuição geográfica das termelétricas

Usinas a combustíveis fósseis de serviço público do SIN, com destaque para o combustível principal de cada planta

- Gás natural
- Carvão Mineral
- Óleo diesel
- Óleo combustível

Nota: As usinas a óleo diesel PCT, CEMAT e PCT ENERSUL não estão representadas por ausência de informações sobre suas coordenadas geográficas.

## Energia elétrica gerada de acordo com o combustível utilizado [TWh]



# Geração de Energia Elétrica por Biomassa

27



# O que é Biomassa?

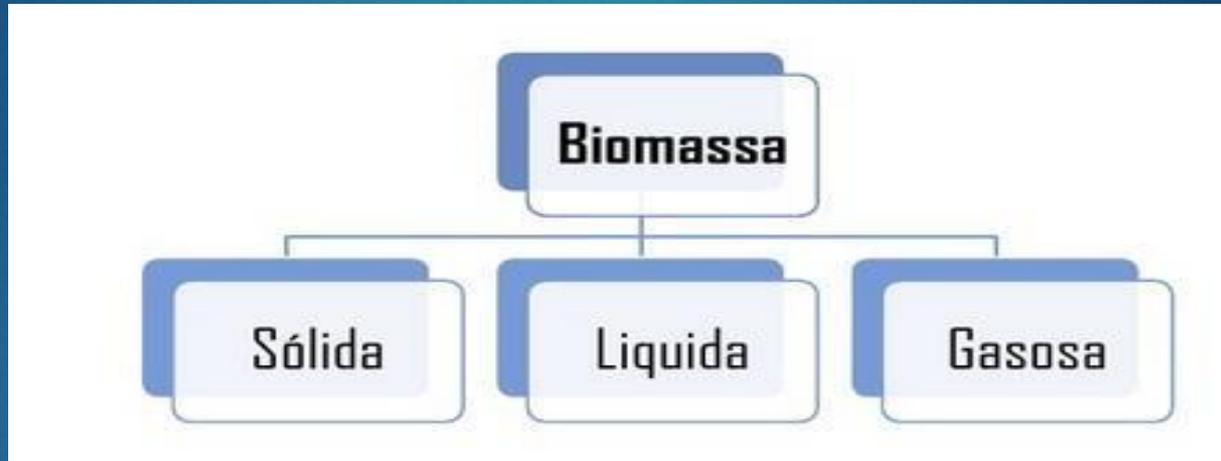
28

- A Biomassa é uma fonte renovável de energia que utiliza a matéria orgânica para a obtenção de energia. Esta matéria orgânica pode ter origem na limpeza das florestas, bem como nos resíduos da agropecuária, na indústria alimentar ou nos resíduos resultantes do tratamento de efluentes domésticos ou industriais.



# Tipos de Biomassa

29



- A biomassa sólida: São os resíduos das florestas, da agricultura e a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.
- A biomassa líquida: É o biodiesel e o etanol.
- A biomassa gasosa: É a mistura de metano e gás carbônico.

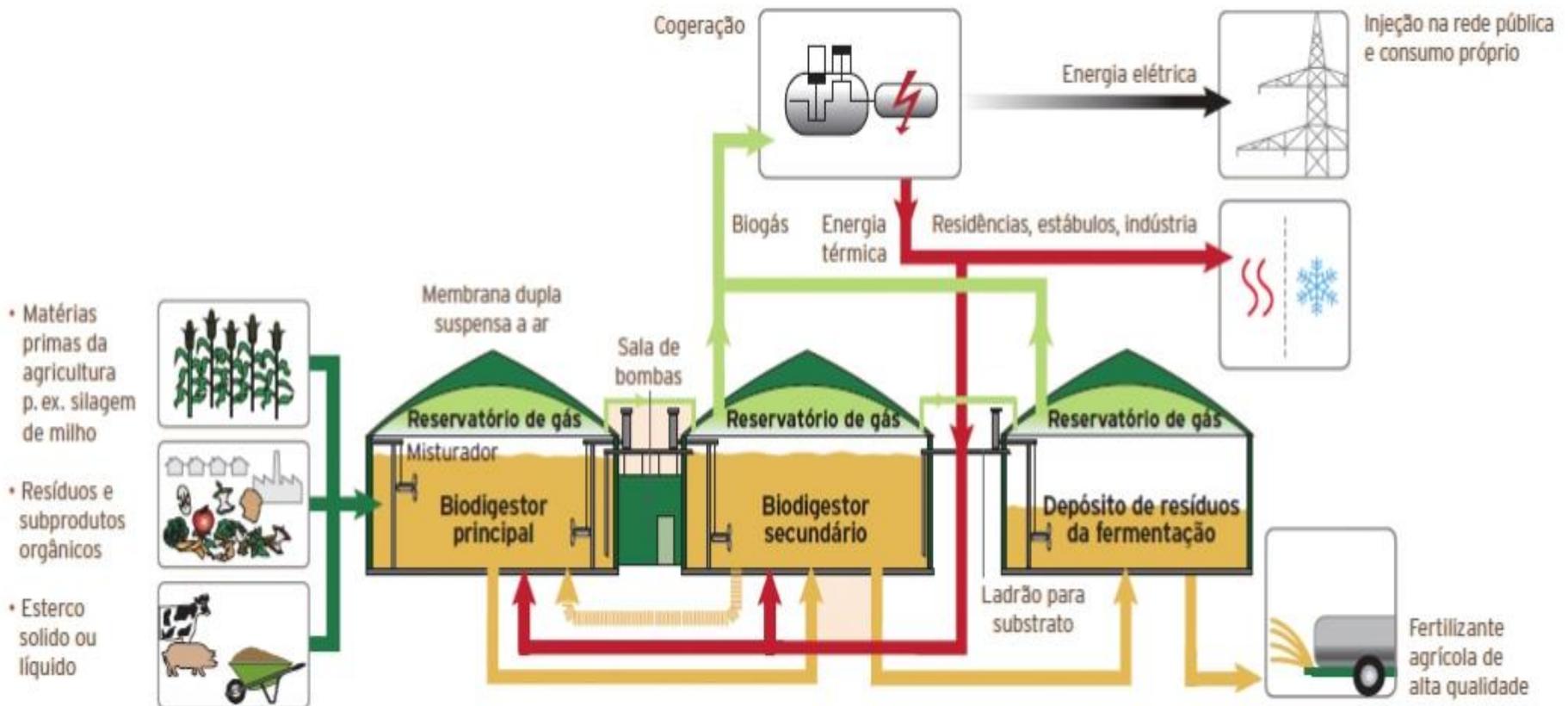
# Tipos de Biomassa

30



# Ciclo Completo da Biomassa até a Geração de Energia

31



# Usina de Biomassa

32

- No ano de 2014 devido à estiagem, na semana de 15 a 21 de fevereiro conforme o Boletim Semanal da Operação, divulgado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), a Usina gerou em média 286,17 MW para o Sistema Interligado Nacional (SIN).



Usina Termelétrica Luís Carlos Prestes, da Petrobrás, em Três Lagoas (MS)

# Usina de Biomassa

33

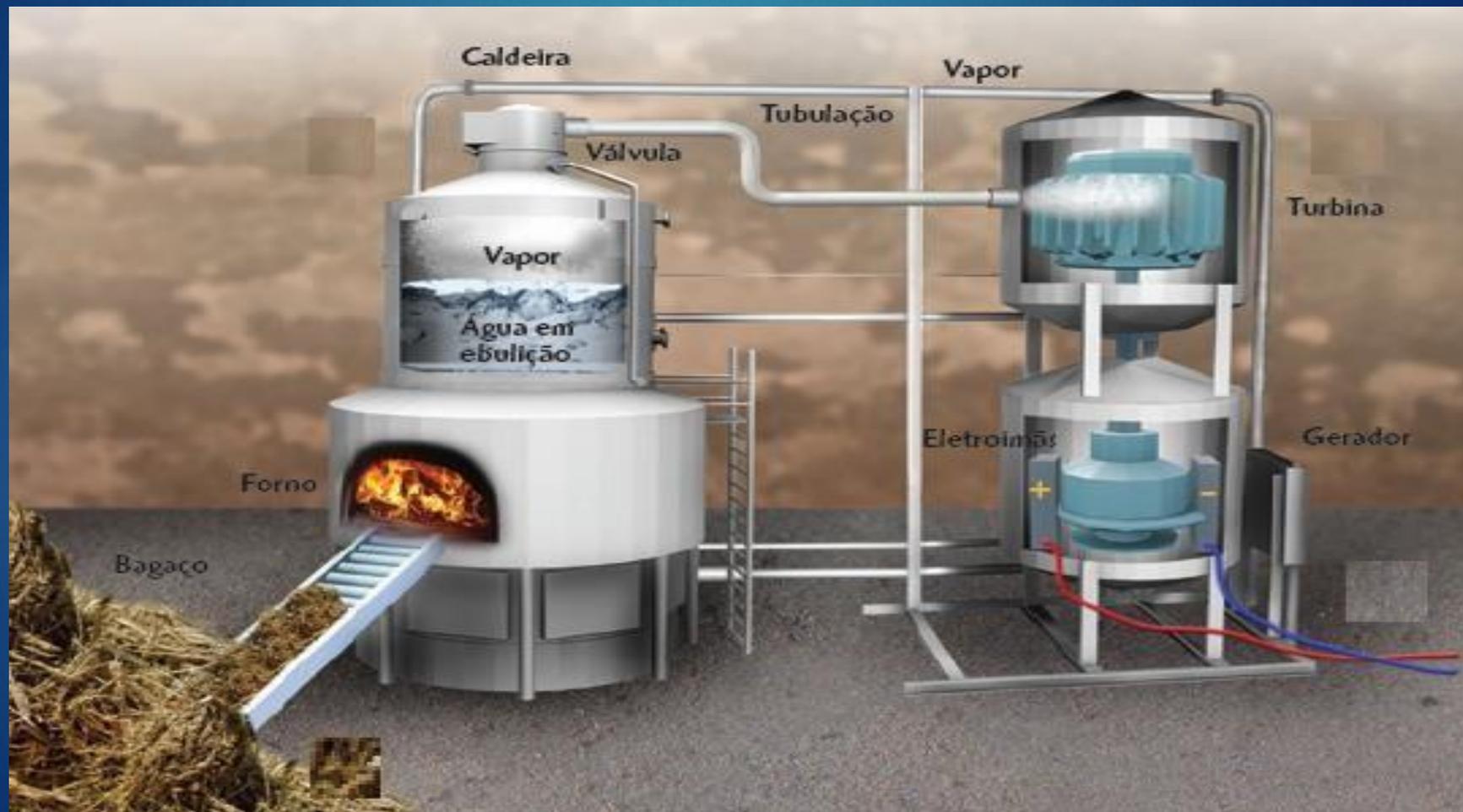
- A Usina tem capacidade instalada de 368 MW, energia suficiente para atender uma cidade de 1,2 milhões de habitantes.



Usina Termelétrica Luís Carlos Prestes, da Petrobrás, em Três Lagoas (MS)

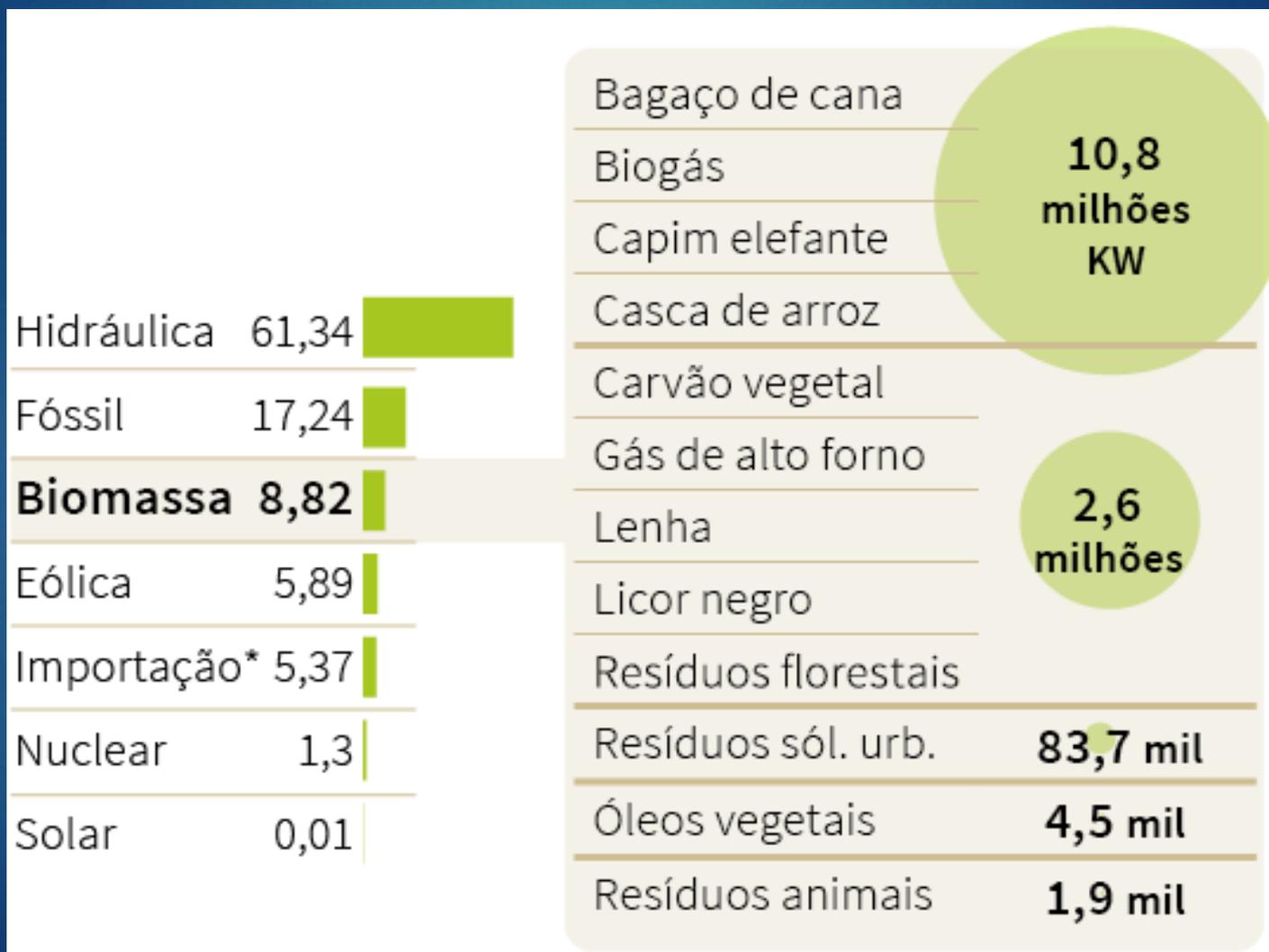
# Funcionamento de uma Usina de Biomassa

34



# Geração de Energia por Tipo de Biomassa

35



# PERFIL DAS PRINCIPAIS FONTES ALTERNATIVAS DE BIOMASSA NO BRASIL



## NORTE

Lenha, carvão, resíduos agrícolas, óleos vegetais



## CENTRO-OESTE

Lenha, resíduos industriais, resíduos agrícolas, óleos vegetais



Bagaço de cana e etanol, resíduos agropecuários, resíduos industriais

## SUL



## NORDESTE

Bagaço de cana e etanol, resíduos agrícolas e óleos vegetais, lenha, carvão

## SUDESTE

Bagaço de cana e etanol, lenha, carvão, resíduos industriais, resíduos agrícolas

# Impactos Ambientais

37

- Biocombustíveis líquidos que contribuem diretamente para a formação de chuvas ácidas.



# Vantagens e Desvantagens da Biomassa

38

## • Vantagens:

- É uma energia renovável;
- Menor emissão de poluentes, se comparado à queima de combustíveis fósseis, diminuição do CO<sub>2</sub> na atmosfera.
- Capacidade de reaproveitamento de resíduos;
- Mais barata do que a energia gerada em termoelétricas movidas a combustíveis fósseis.
- Menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos, etc);

## • Desvantagens:

- Desmatamentos de florestas, além da destruição de habitats;
- Possui um menor poder calorífico quando comparado com outros combustíveis;
- Os biocombustíveis líquidos contribuem para a formação de chuvas ácidas;
- O vapor quando resfriado utilizando água de um rio, causa danos ecológicos devido ao aquecimento da água e conseqüentemente uma diminuição do oxigênio.

# Geração de Energia Elétrica a Gás Natural

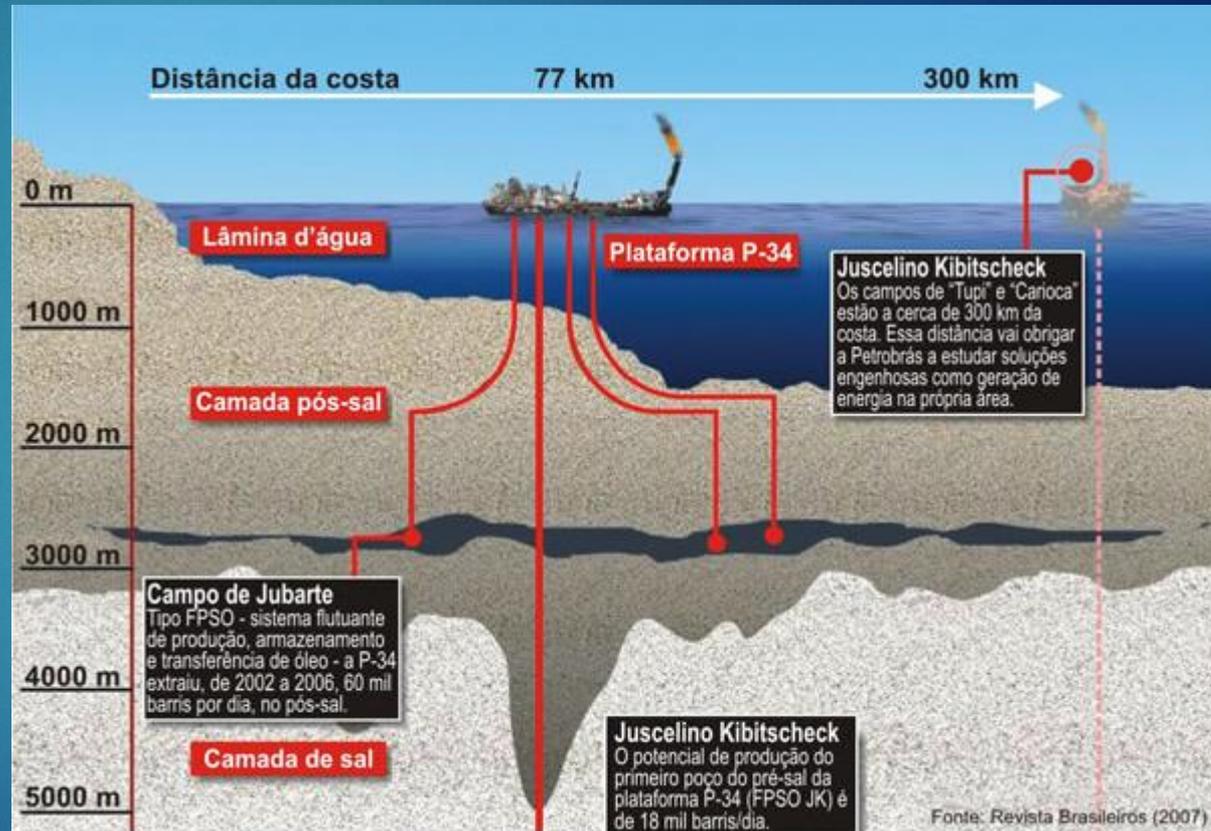
39



# Gás Natural

40

No Brasil a primeira perfuração foi na Bahia em 1940, e com a descoberta da Bacia de Campos a reserva de gás nacional quadruplicou no período de 1980 a 1985. A última grande descoberta foi o pré-sal em 2009 com 2172m de profundidade com aproximadamente 100 bilhões de barris de petróleo e gás natural.



# Gás Natural

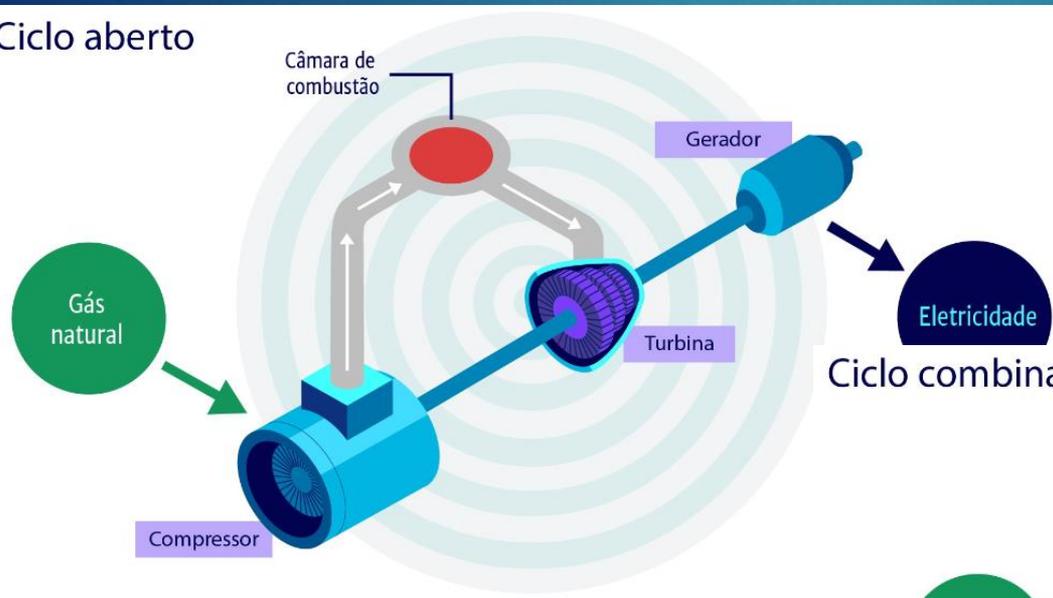
- O gás natural é um combustível que resulta do processo natural de degradação de matéria orgânica como, por exemplo, os restos de plantas, animais, etc. O princípio de funcionamento das usinas movidas pelo insumo é similar ao das demais termelétricas, com algumas diferenças.
- No Brasil, as termelétricas que operam a gás natural respondem por cerca de 12% da geração energética e 8% da geração elétrica, e contam com mais de 12 GW de potência instalada, com previsões de aumento nos próximos anos.

# Princípio de Funcionamento

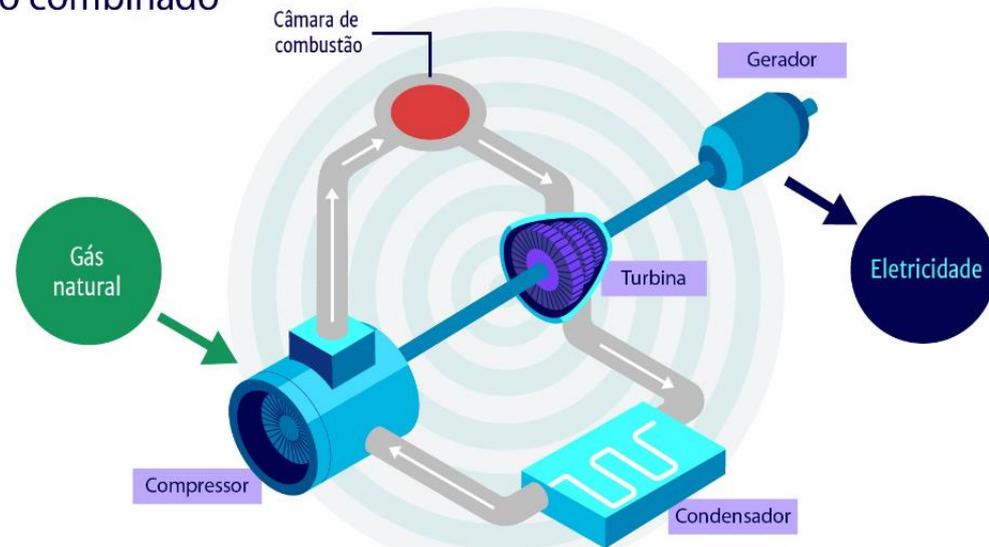
42

- No entanto, as termelétricas a gás natural apresentam uma particularidade: podem funcionar de duas formas principais, o ciclo aberto ou ciclo combinado.

Ciclo aberto



Ciclo combinado



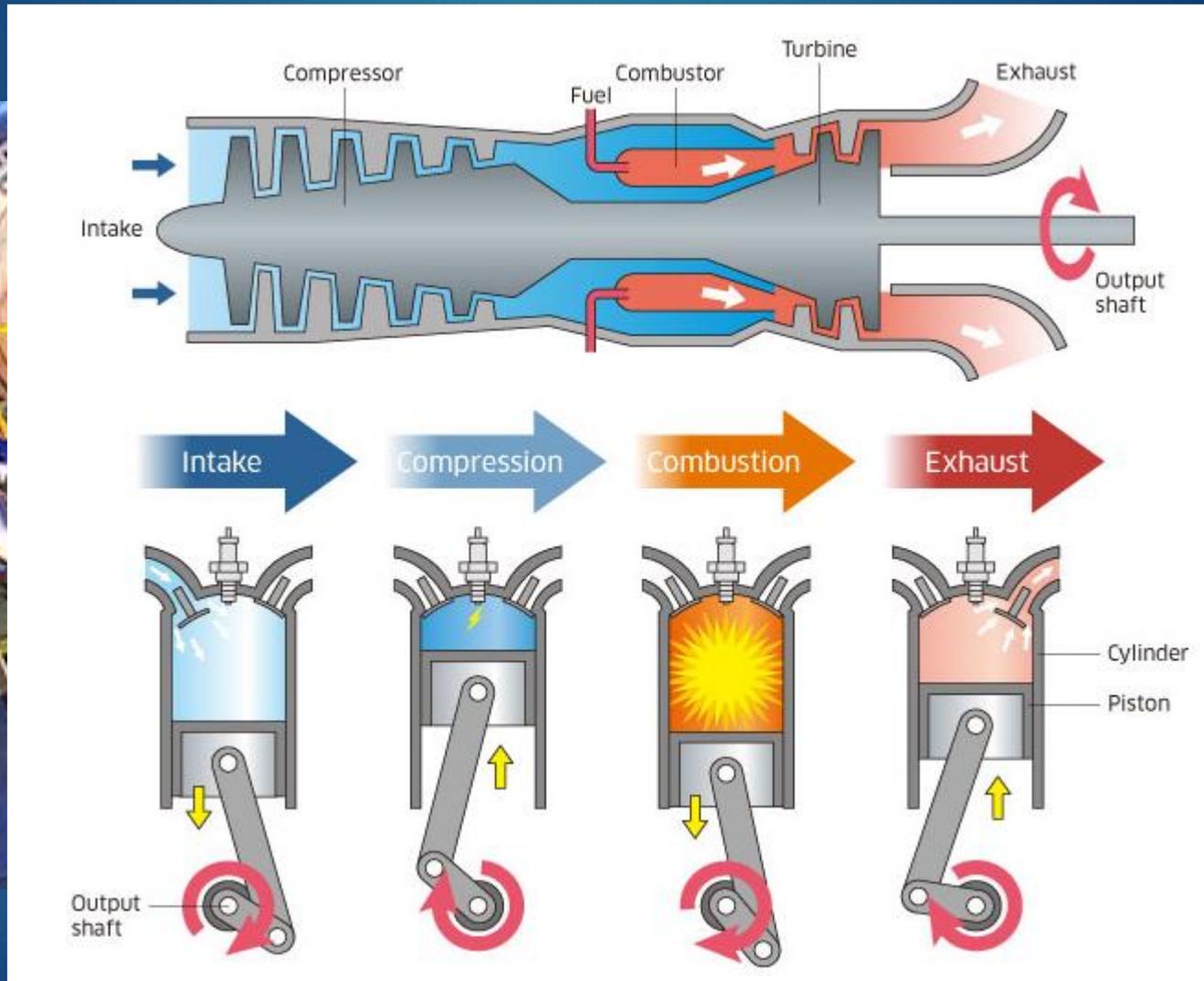
# Princípio de Funcionamento

43



# Princípio de Funcionamento

44



34,6%

# Vantagens e Desvantagens do Gás Natural

45

- Vantagens:

- Segurança;
- Eficiência;
- Estabilidade e baixo custo;
- O gás não é tóxico e se dispersa rapidamente no ambiente diminuindo os riscos de acidentes;
- Geração de grandes quantidades de energia com poucas perdas;
- Não é necessário estocar, por isso tem seu custo de produção reduzido.

- Desvantagens:

- Necessita de robusta infraestrutura de funcionamento;
- O gás não pode ser extraído de qualquer lugar por ser um recurso não renovável;
- Sua queima emite diversos gases poluentes na atmosfera.

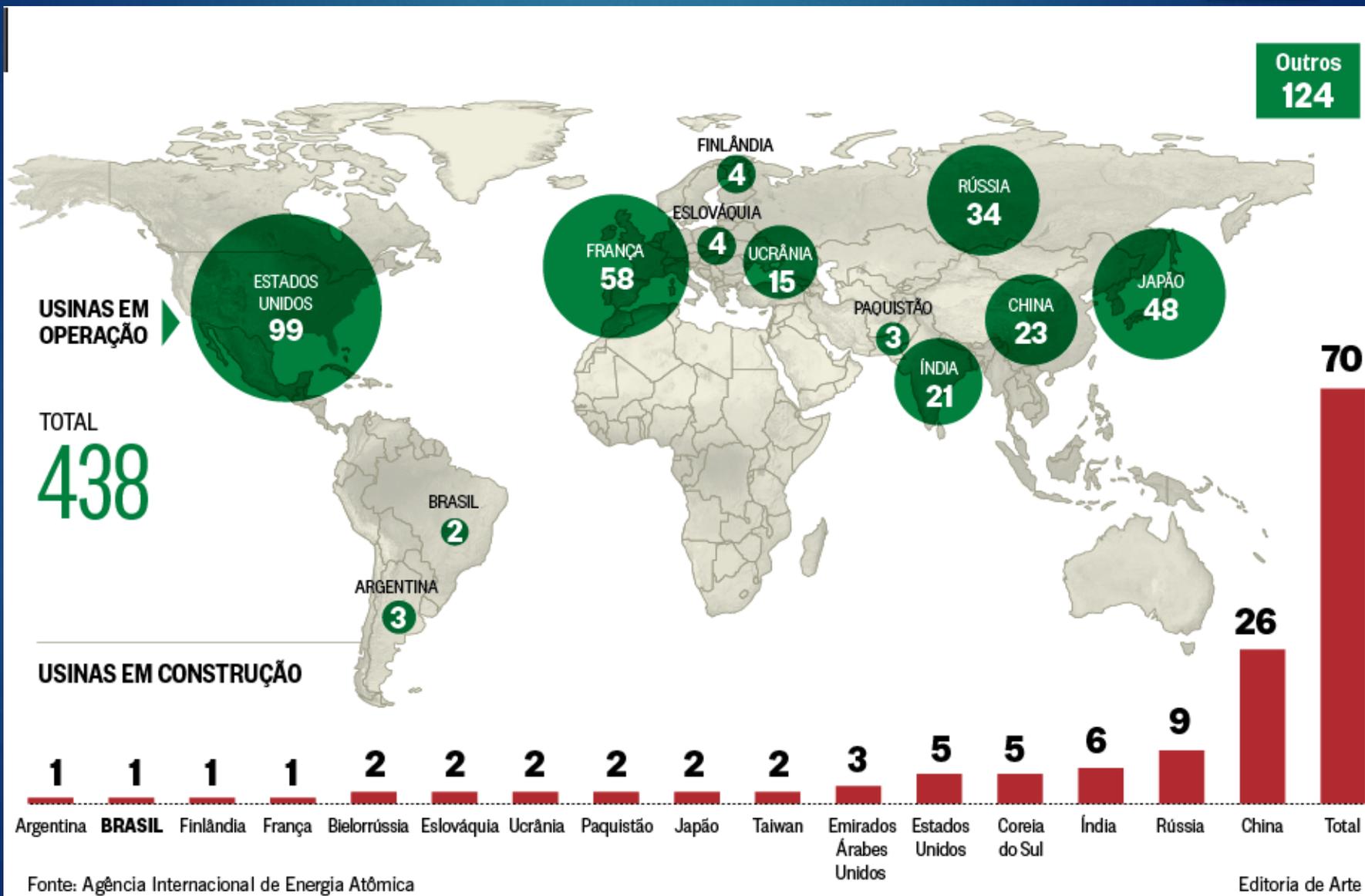
# Geração de Energia Elétrica em Usinas Nucleares

46



# Usinas Nucleares em Operação

47



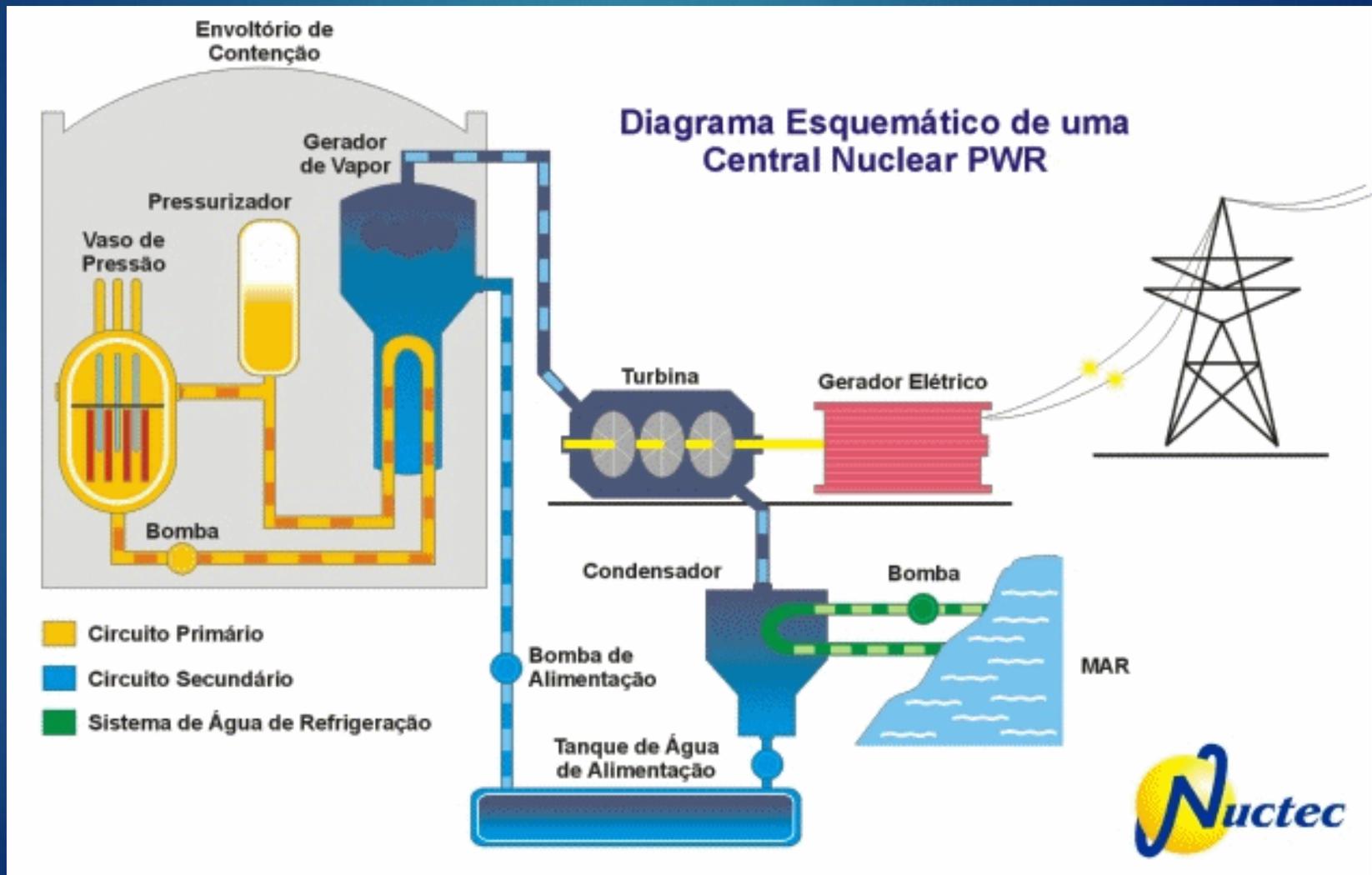
# Usinas Nucleares em Construção

48



# Funcionamento de uma Usina Nuclear

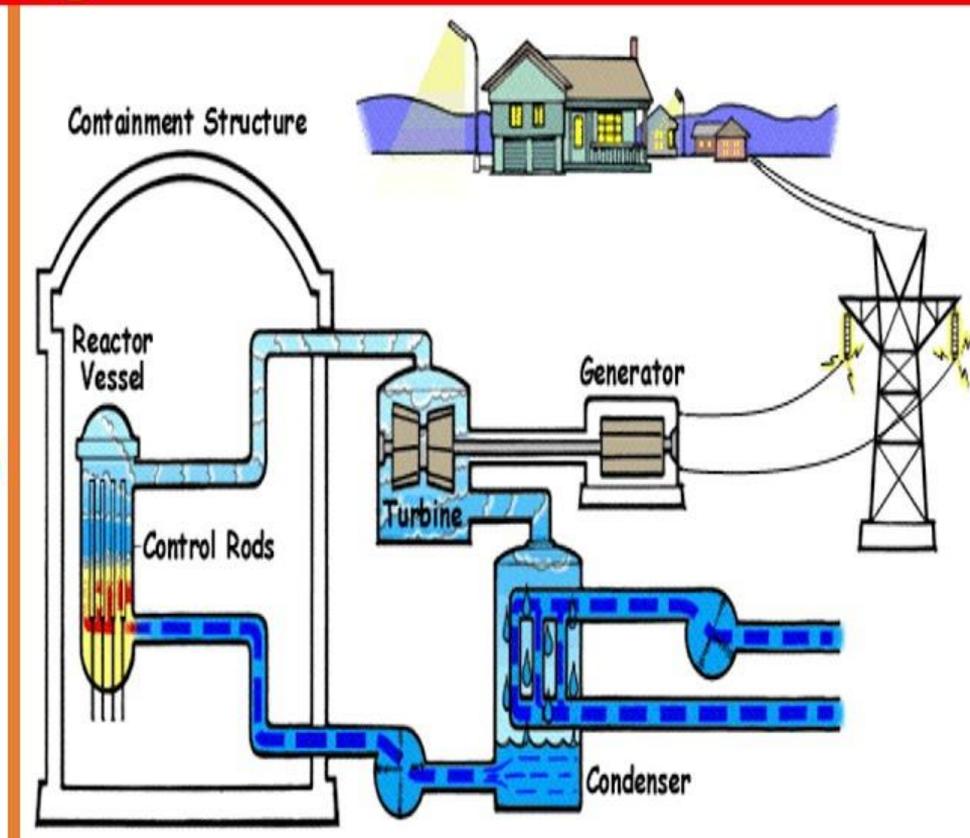
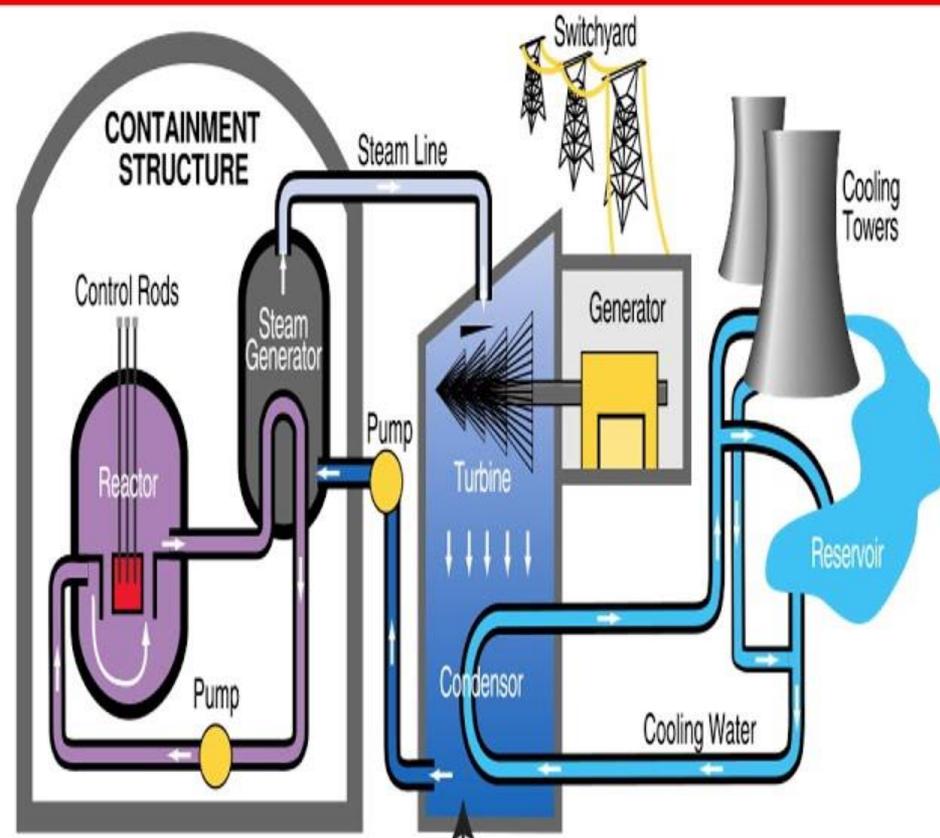
49



# Funcionamento de uma Usina Nuclear

50

## PWR vs BWR



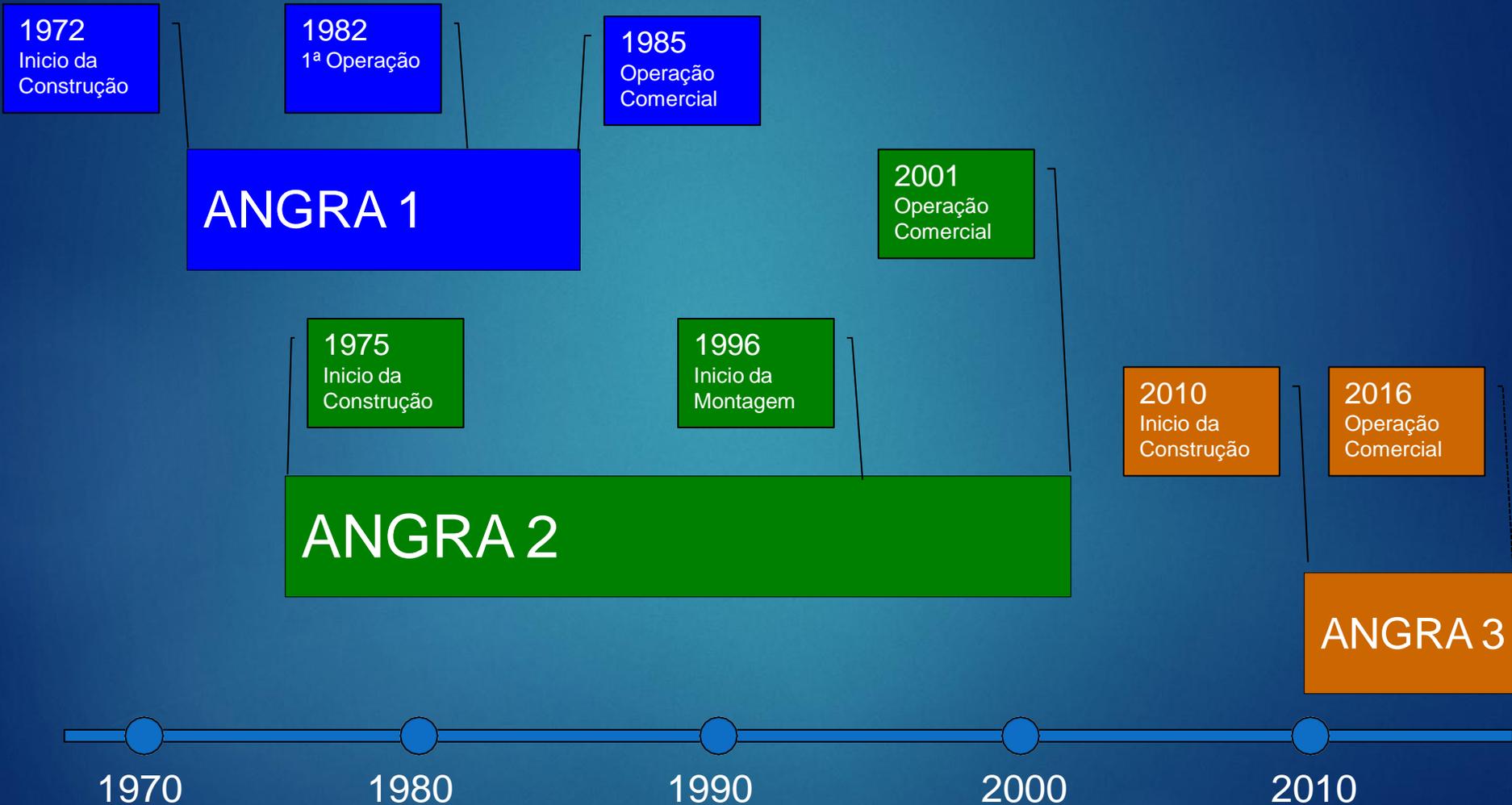
# Angra 1 e 2

51



# Angra 1 e 2

52



# Central Nuclear de Angra

53

## ANGRA 1 - PWR

Potência: 640 MW

Tecnologia: Westinghouse

Operação Comercial: janeiro 1985



## ANGRA 2 - PWR

Potência: 1.350 MW

Tecnologia: KWU/ Siemens

Operação Comercial: fevereiro 2001

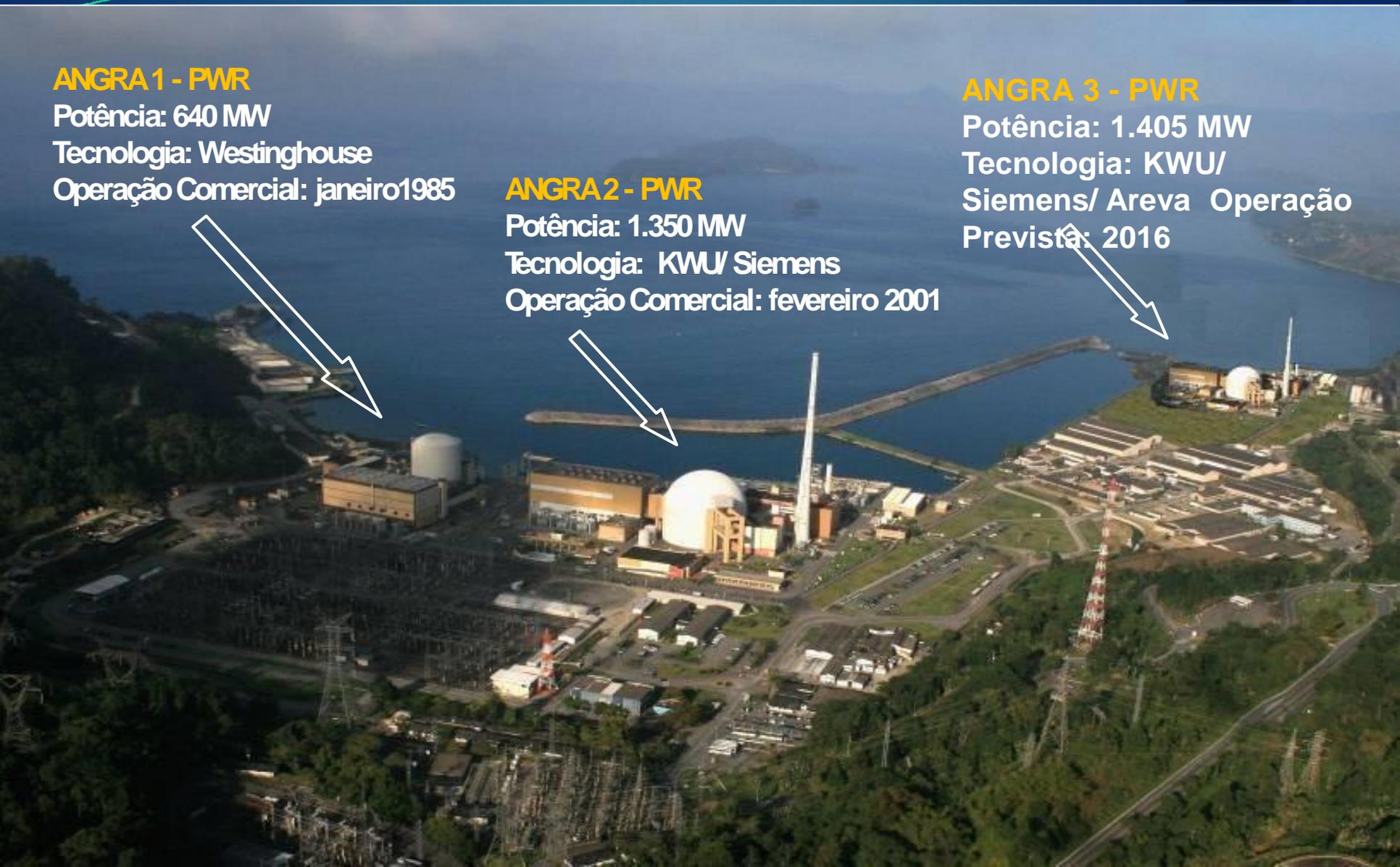


## ANGRA 3 - PWR

Potência: 1.405 MW

Tecnologia: KWU/ Siemens/ Areva

Operação Prevista: 2016



# Geração – Angra 1 e 2

54

ANO	ANGRA 1		ANGRA 2		CENTRAL
	Número de dias com reator crítico	Geração bruta (MWh)	Número de dias com reator crítico	Geração bruta (MWh)	Geração bruta (MWh)
1982	27	54.113,4	-	-	54.113,4
1983	52	183.730,0	-	-	183.730,0
1984	172	1.642.511,6	-	-	1.642.511,6
1985	303	3.412.087,3	-	-	3.412.087,3
1986					
1987	85				
1988					
1989	228				
1990					
1991	212				
1992	179	1.752.277,1	-	-	1.752.277,1
1993	64	441.769,9	-	-	441.769,9
1994	14	54.960,4	-	-	54.960,4
1995	337	2.520.684,7	-	-	2.520.684,7
1996	212	2.428.936,2	-	-	2.428.936,2
1997	261	3.161.440,0	-	-	3.161.440,0
1998	296	3.265.251,5	-	-	3.265.251,5
1999	359	3.976.943,2	-	-	3.976.943,2
2000	134	2.602.652,0	-	-	6.045.959,6
2001	349	10.403.432,7	-	-	14.351.931,9
2002	277	9.800.746,1	-	-	13.836.850,1
2003	336	10.000.936,2	-	-	13.336.037,5
2004	281	7.400.332,2	-	-	11.552.091,4
2005	235	6.100.765,3	-	-	9.852.955,0
2006	288	3.399.426,4	335	10.000.936,2	13.769.410,3
2007	232	2.708.723,5	319	9.600.000,0	12.365.398,8
2008	294	3.515.485,9	325	10.400.000,0	14.003.774,8
2009	225	2.821.494,7	338	10.150.000,0	12.975.088,2
2010	305	4.263.040,8	326	10.280.766,5	14.543.807,3
2011	334	4.654.487,0	363	10.989.764,4	15.644.251,4
2012	365	5.395.561,3	337	10.645.229,2	16.040.790,5
TOTAIS	7.049	79.384.766,2	4.015	119.106.166,2	198.490.932,4

Em 2011 Angra 2 bateu o recorde de geração em ano sem "parada de recarregamento" e em 2012 foi quebrado o recorde de geração em ano com parada

Em Angra 1, assim como na CENTRAL, os recordes de geração foram quebrados em 2010, 2011 e 2012



# Angra 3



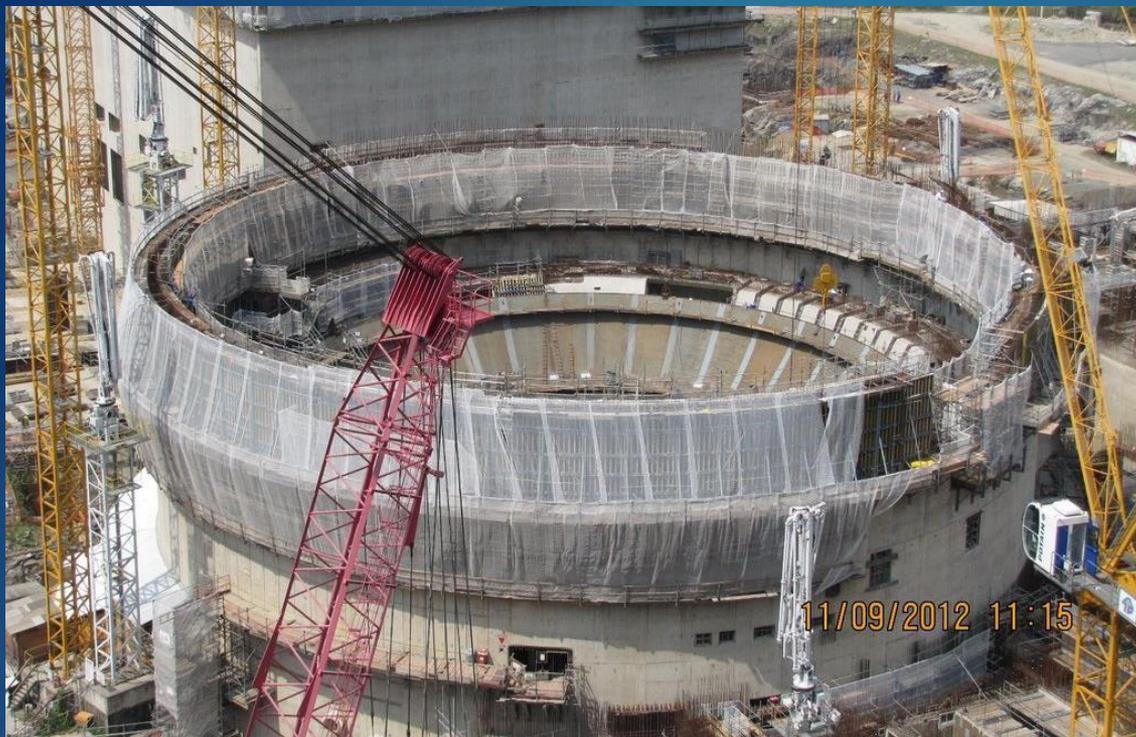
# Angra 3

56



# Angra 3 - Reator

57



# Angra 3 – Edifício do Turbogenerador

58



# CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA

2016

ANGRA 3 PWR

Potência:

1405 MW

Tecnologia:

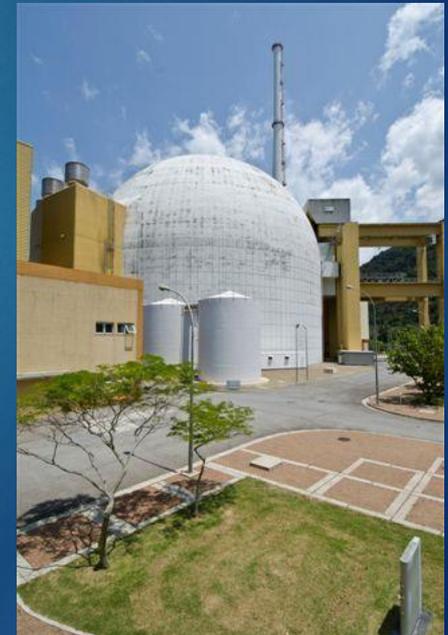
KWU/ Siemens/ AREVA



# Produção do Complexo Angra

60

- Angra I
  - Potência instalada de 657MW;
  - Início em 1985.
- Angra II
  - Potência instalada de 1350MW;
  - Início em 2000.
- Angra III
  - Potência instalada de 1350MW;
  - Obra paralisada durante muitos anos;
  - 2008 – Ibama expediu licença autorizando a retomada das obras;
  - Retomada em 2018.



# Produção de Urânio

61

- INB – Indústrias Nucleares Brasileiras
  - Única autorizada pelo Governo Federal a extrair e processar o urânio;
  - Responsável pela produção e comércio de materiais nucleares;
  - Domina a tecnologia dos três ciclos de processamento do átomo do urânio.



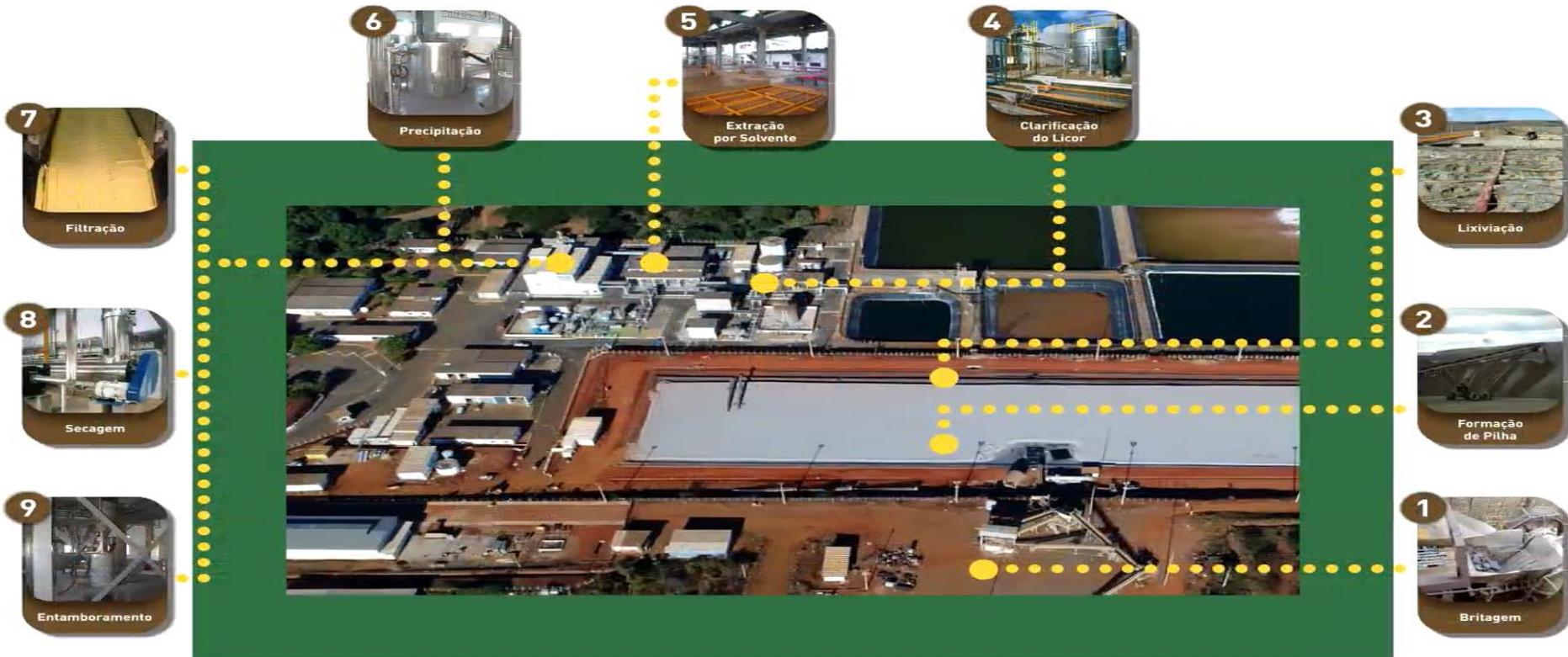
# Mineração

62



**Unidade de Concentração de Urânio - URA  
Caetité / BA**

## Unidade de Concentração de Urânio - URA



# Conversão

64



**A conversão ocorre no exterior.**

# Enriquecimento do Urânio

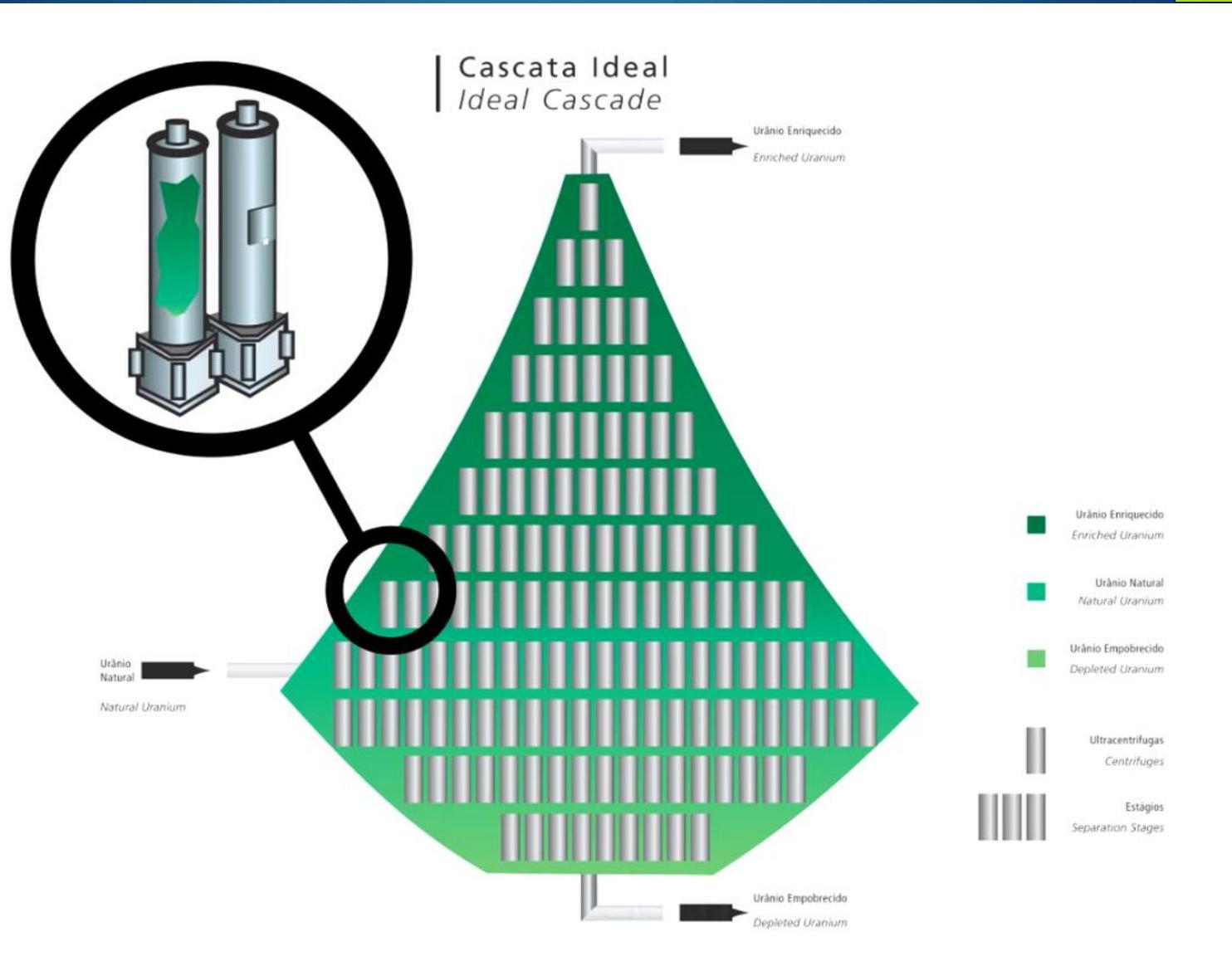
65

- Processo de separação e aumento da concentração do isótopo de urânio;
- Grande parte do urânio enriquecido ainda é importado;

## Enriquecimento



# Enriquecimento do Urânio



# Reconversão

67

- A reconversão retorna o urânio ao gás hexafluoreto de urânio e o dióxido de urânio sob a forma de pó;
- Esse pó é estabilizado e reutilizado na próxima etapa do processo.

## Reconversão

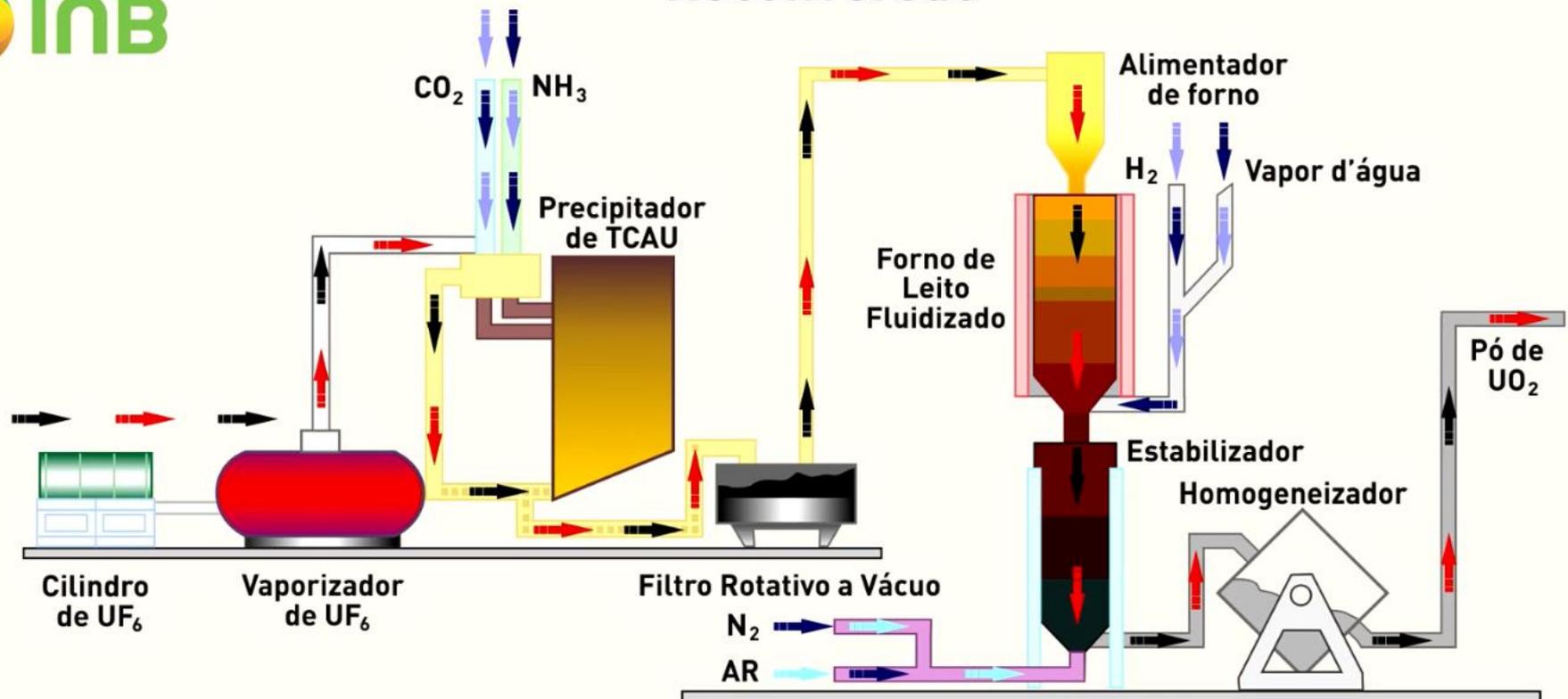


# Reconversão

68



## Reconversão



# Produção das Pastilhas de Urânio

69

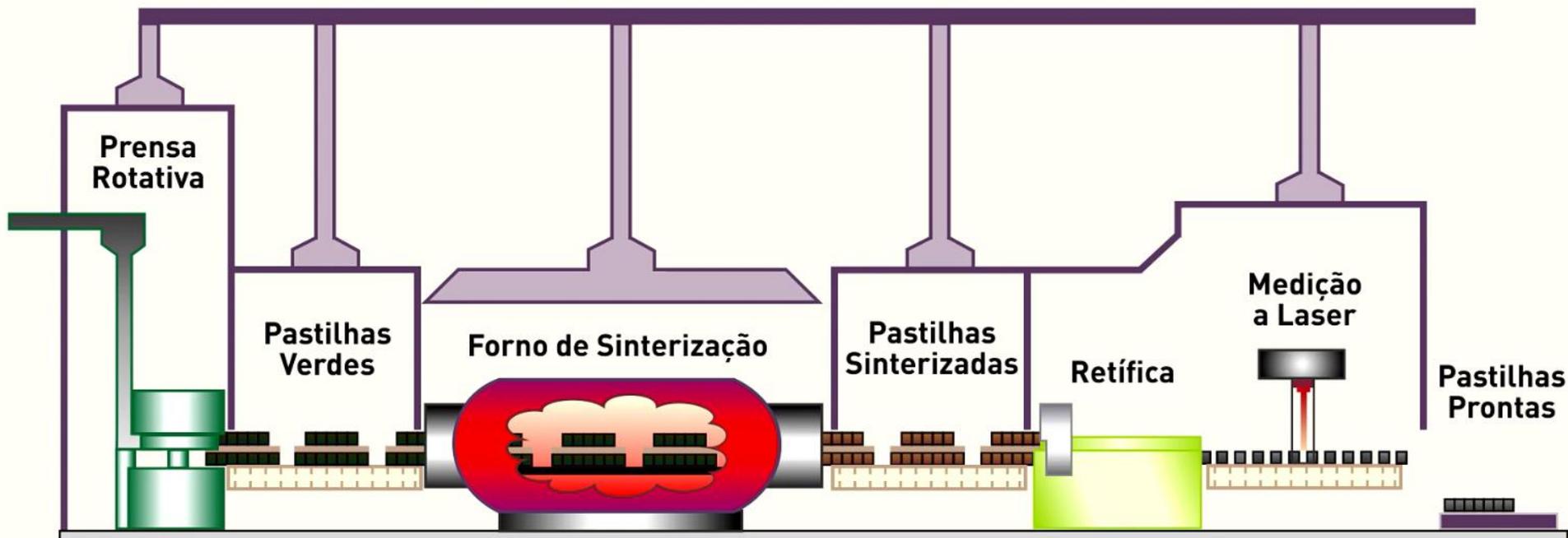
- O pó enriquecido dá origem as pastilhas de urânio;
- Formato cilíndrico de 1 cm de diâmetro e de comprimento;
- São submetidas a temperaturas de  $1750^{\circ}$  para ganharem rigidez e resistência.

## Pastilhas



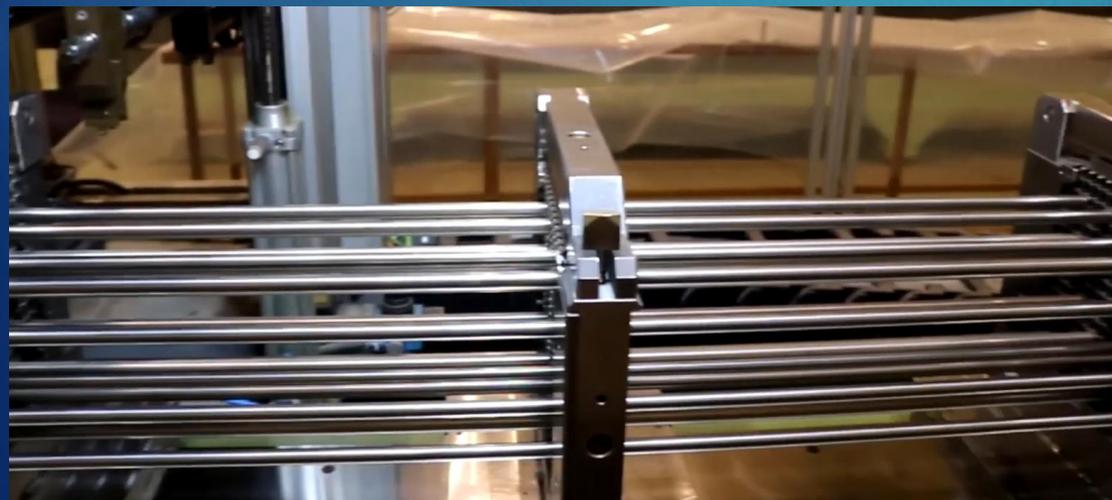
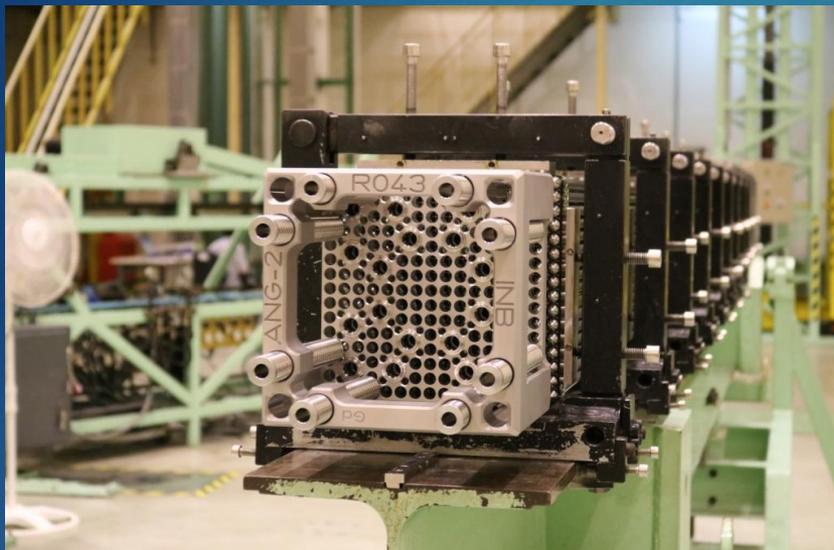
# Produção das Pastilhas de Urânio

70



# Urânio como Elemento Combustível

71

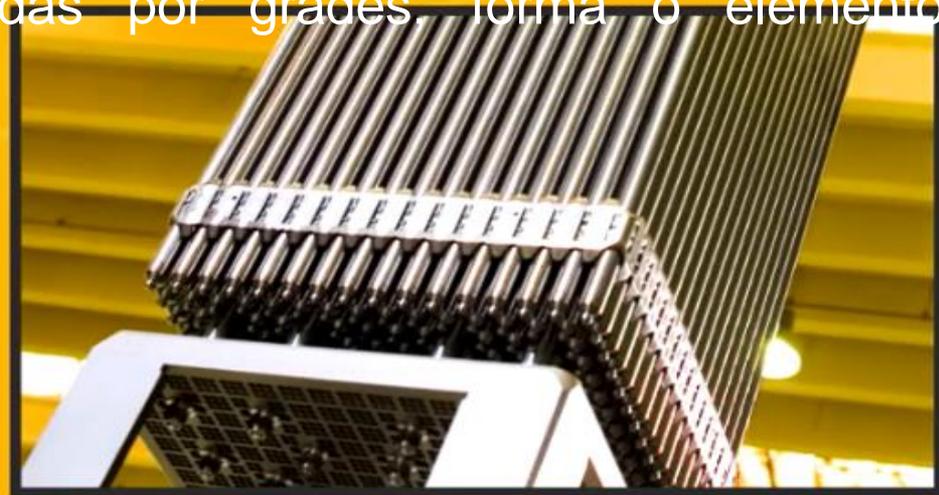


# Urânio como Elemento Combustível

72

- As pastilhas de urânio são empilhadas em varetas de uma liga super resistente chamada **zircaloy**;
- Um conjunto de varetas, espaçadas por grades, forma o elemento combustível.

**Elemento  
Combustível**



# Urânio como Elemento Combustível

73

- Angra 1, utiliza 121 elementos combustíveis com 4 metros de comprimento;
- Angra 2, são utilizados 193 elementos combustíveis com 5 metros de comprimento;
- Cada elemento combustível tem um ciclo de duração de 3 anos, aproximadamente

**Geração  
de Energia**



# Urânio como Elemento Combustível

74



# O Acidente de Fukushima

75

## AÇÕES EM ANDAMENTO PELA ELETRONUCLEAR

(Comitê criado pela Diretoria Executiva em 16.03.2011)

Reavaliação de Bases de Projeto para Eventos Externos para Usinas da CNAEA

Reavaliação de Recursos da Central para Controle de Acidentes Além das Bases de Projeto

Definição de Recursos Externos Adicionais para Mitigação de Catástrofes Naturais

Reavaliação das Condições do PEL e PEE

Ameaça Sísmica

Resfriamento do Reator

Meios de Transporte e Acessos para Movimentação de Pessoal, Equipamentos e Materiais

Cenários de Liberações para Cálculo de Doses e de Limites para Evacuação

Estabilidade das Encostas

Integridade da Contenção

Equipamentos para Suprimento de Energia Elétrica

Meios Alternativos de Evacuação

Movimentos de Mar

Suprimento Local de Energia Elétrica

Equipamentos para Suprimento de Água

Condições da Estrada

Chuvas de Grande Intensidade (Flooding)

Instrumentação Pós-Acidente

Resfriamento das Piscinas de Combustível

Condições de Meios de Transporte

Ventos de Grande Intensidade (tornados, furacões, etc...)

Procedimentos e Treinamento de Pessoal

Equipamentos e Insumos Diversos

Condições de Abrigagem

# Vantagens e Desvantagens de Usinas Nucleares

76

- **Vantagens:**

- Próximo aos centros consumidores (sistemas de transmissão curtos);
- Complementação térmica para o sistema hidráulico (independe de fatores climáticos);
- Combustível abundante no país (6ª reserva mundial – baixo custo) (competitiva com as outras opções térmicas);
- Limpa em relação às outras térmicas (menos óxidos nitrosos e sulfurosos);
- Não contribui para aquecimento global (não libera CO<sub>2</sub>);
- Mantém controle sobre os rejeitos gerados.

- **Desvantagens:**

- Aceitação pública;
- Custos - tem que ser competitiva;
- A questão dos rejeitos.
- Em caso de vazamento, os danos podem ser permanentes.