



# PMT 3530 - PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES I

Humberto Gracher Riella

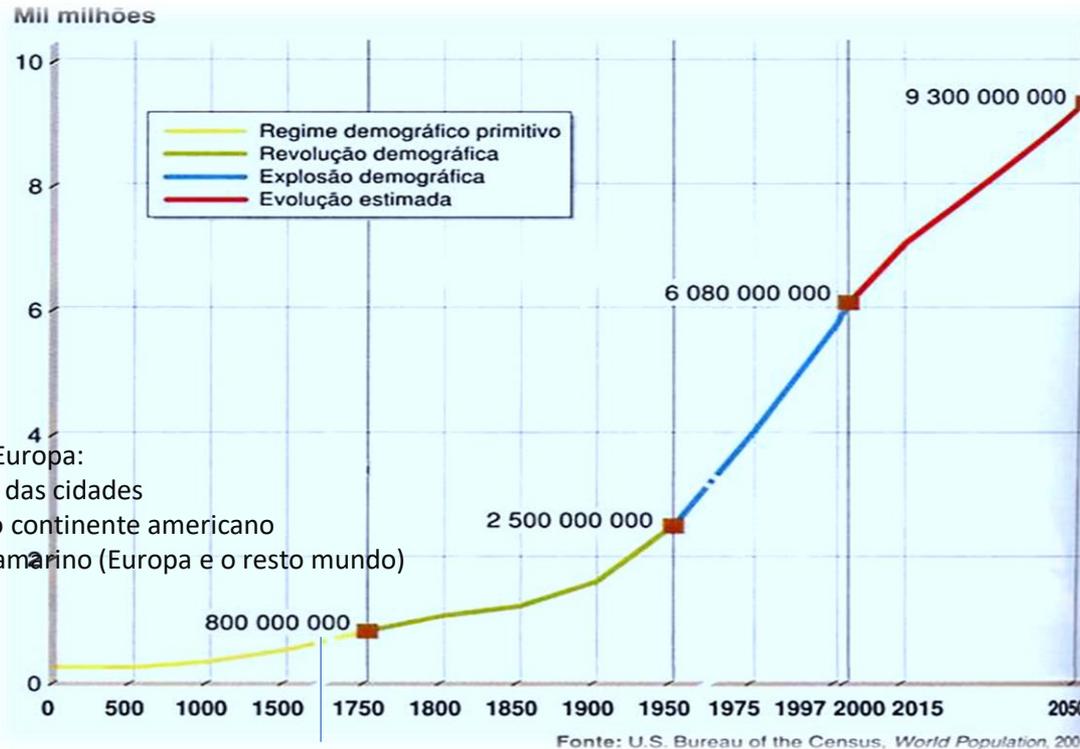
[Humberto.riella@ufsc.br](mailto:Humberto.riella@ufsc.br) 3133 9269

# AVALIAÇÃO

- Alunos farão “upload” utilizando a plataforma Moodle
- A plataforma receberá os textos/apresentações até dia 08/06/2020(até 24:00 h)
- Cada aluno terá um tema (serão tantas questões quanto o número de alunos)
- As questões serão sorteadas no dia 04/05/2020. Serão baseadas em temas abordados em classe.
- O aluno deverá fazer pesquisa bibliográfica, aprofundando o tema sorteado  
Cada aluno deverá preparar um texto com pelo menos 5 páginas sobre o tema sorteado
- Texto com margens moderadas, espaço 1,5 e letra Arial ou Calibri 12.
- Juntamente com o texto, o aluno deverá preparar uma apresentação sobre o seu tema com 5 “slides” para apresentação nos dias 15,22 e 29/06/2020



# Evolução do Crescimento Populacional



Transformações Europa:

- Renascimento das cidades
- Descoberto do continente americano
- Comercio ultramarino (Europa e o resto mundo)

## REGIME DEMOGRÁFICO PRIMITIVO

crescimento muito lento da população mundial;  
taxa de mortalidade elevada;  
taxa de crescimento natural muito reduzida

## EXPLOSÃO DEMOGRÁFICA

### Países industrializados

Taxa de natalidade muito baixa;  
Taxa de mortalidade baixa;

### Países em desenvolvimento

Taxa de natalidade alta;  
Taxa de mortalidade baixa;  
Taxa de crescimento natural elevada

## REVOLUÇÃO DEMOGRÁFICA

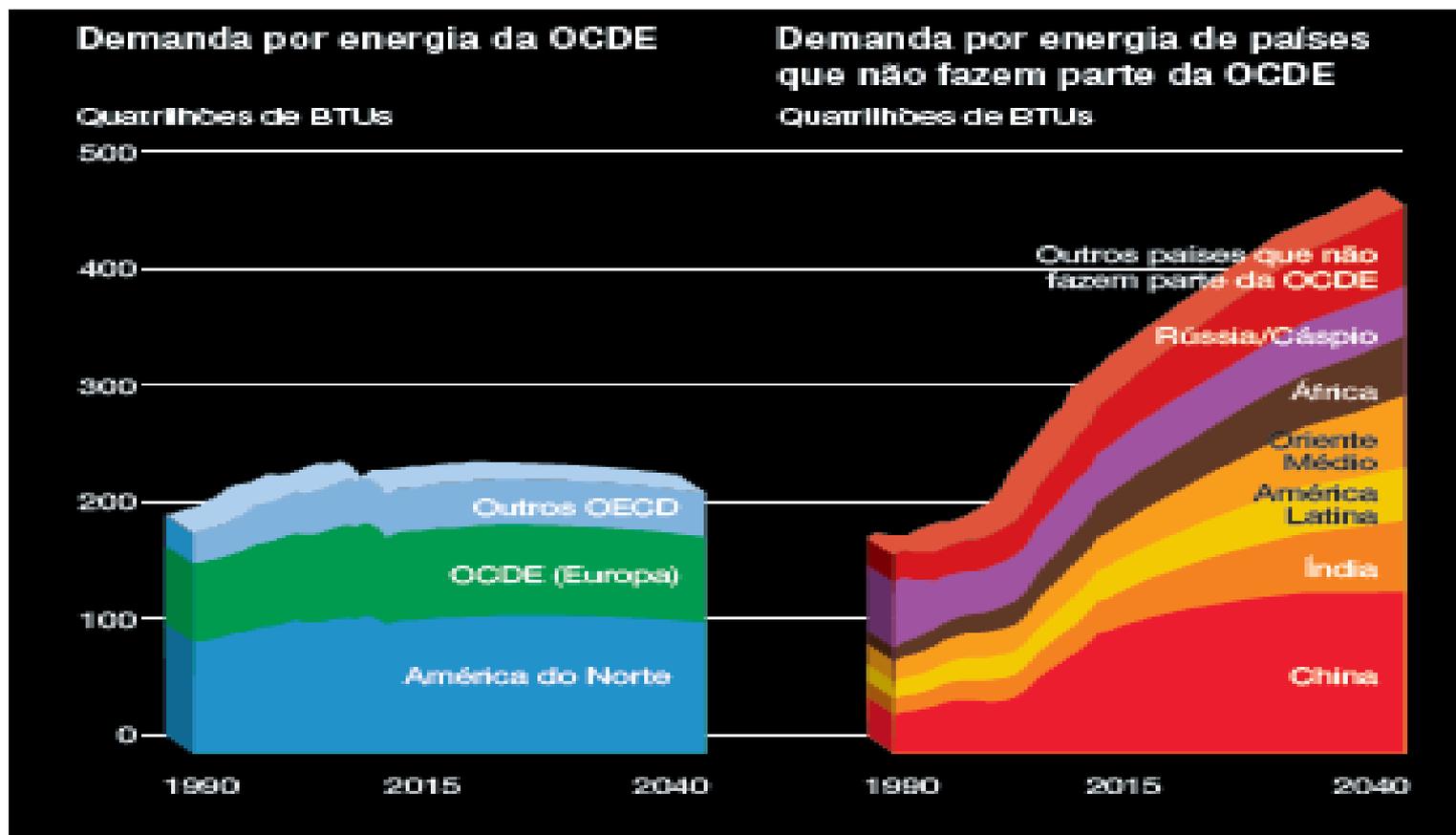
Crescimento rápido;  
Diminuição da taxa de mortalidade nos países industrializados  
Taxa de natalidade elevada



# PANORAMA ENERGÉTICO

## Perspectivas

[Terra visto pela estação espacial.wmv](#)



Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coréia, Dinamarca, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Letônia, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Peru, Polônia, Portugal e Reino Unido.

# Em 2040, esperamos ver....

- 2 bilhões de pessoas a mais  
no planeta
- 130%  
de aumento na economia global
- Cerca de 35%  
de aumento na demanda por energia – o que poderia mais do  
que dobrar sem ganhos de eficiência
- Países não membros da OCDE  
como China e Índia lideram o crescimento na demanda por  
energia

# Em 2040, esperamos ver....

- Cerca de 60%  
da demanda atendida por petróleo e gás natural
- Gás natural supera o carvão  
como a segunda maior fonte de combustível
- 90% de crescimento  
na demanda por eletricidade
- CO<sub>2</sub> relacionado com a energia  
estabilização das emissões e declínio gradual.

"A energia é uma parte fundamental  
no aumento da prosperidade e na  
erradicação da pobreza."

Jim Yong Kim, Presidente do Grupo do Banco Mundial

Jim Yong Kim, Presidente do Grupo do Banco Mundial

# População e Progresso

## ■ 500 quatrilhões

As pessoas ao redor do mundo ajudarão a gerar uma economia de energia de cerca de 500 quatrilhões de BTU's em 2040.

Aumento da demanda de energia em cerca de 35%  
Metade deste crescimento virá da China e Índia

(mais populosos e com ganhos de qualidade de vida).  
Em 2040 nove das 20 cidades mais populosas do mundo – e uma em cada 3 pessoas no planeta –vão estar na China ou Índia.

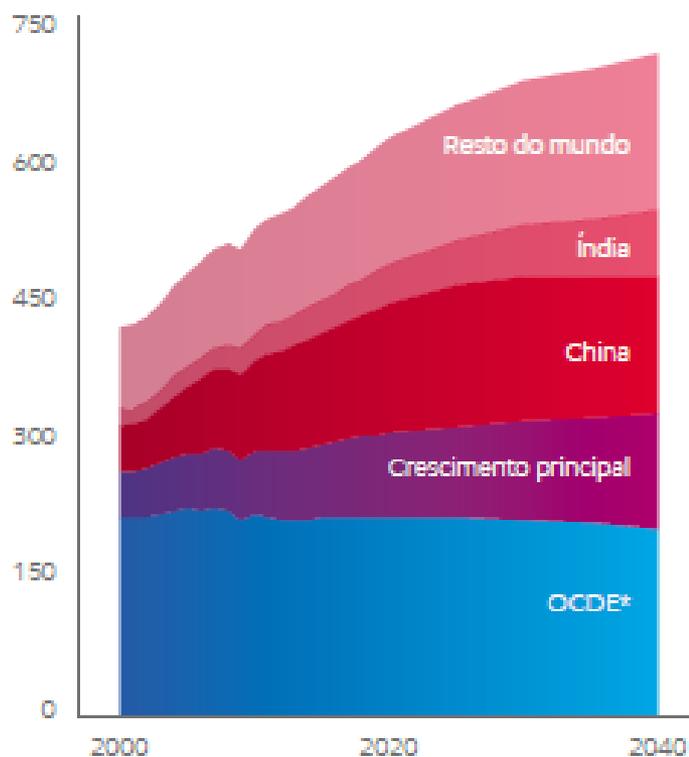
Brasil, Indonésia, Arabia Saudita, Irã, Africa do Sul, Nigéria, Tailândia, Egito, **México e Turquia.**

O Petróleo vai continuar sendo o ideal para o transporte, o gás natural irá emergir com força em outros setores (90%)

**A energia nuclear e renovável também crescerão.**

Demanda energética mundial

Quatrilhões de BTUs



\*México e Turquia incluídos no crescimento principal

# Demanda de Energia

- Até 2040, a maior fonte de demanda por energia será por combustíveis usados para produzir eletricidade





Três indicadores significativos de tendências globais de energia – o aumento populacional, a urbanização e o aumento do padrão de vida da população - são claramente evidentes nos setores residencial e comercial.

# Residencial/Comercial

- A demanda por eletricidade residencial / comercial irá aumentar para quase 90% durante o período de 2014-2040.
- O número de famílias no mundo vai aumentar significativamente nas próximas décadas. Esperamos um aumento próximo de 50%, de 1,9bilhão de residências em 2010 para 2,8bilhões em 2040 – devido ao aumento da população e da urbanização.
- Em 2040, a eletricidade irá fornecer 40% da demanda mundial de energia residencial e Comercial;
- África, China, Índia e América Latina irão liderar um aumento líquido global em residência até 2040.

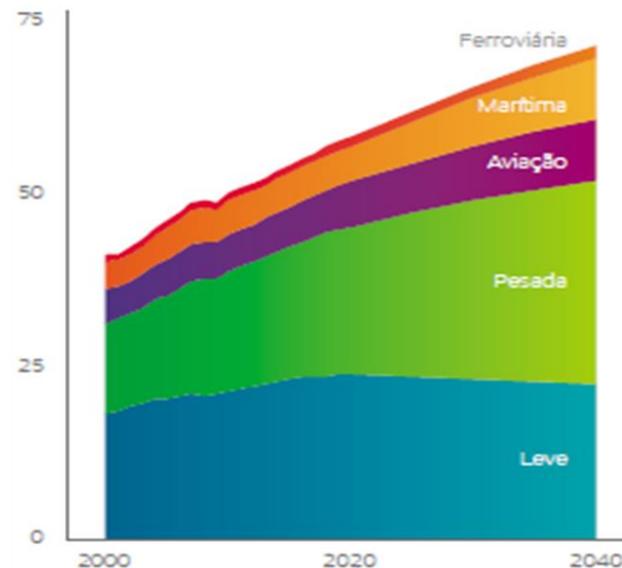


# Transportes

## 75%

A demanda por diesel e combustível na aviação deve crescer 75% de 2010 a 2040.

Demanda de transporte por setor  
Milhões de barris equivalentes de petróleo por dia



- Em 2040, 90% dos transportes globais será feito por combustíveis baseados em petróleo líquido, comparado a 95%, nos dias de hoje.
- A demanda por transporte comercial deverá aumentar em todas as regiões do mundo, mesmo com ganhos significativos em eficiência.
- Em 2040, quase 35% dos veículos de transporte leve na estrada serão híbridos e outros veículos avançados, em comparação com cerca de 1% dos dias de hoje.

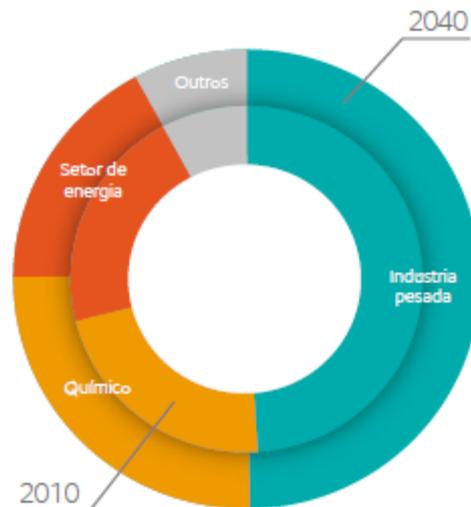
# Indústria

## 50%

Globalmente, a demanda por energia do setor químico vem crescendo cerca de 50% mais rapidamente do que a demanda geral por energia



Demanda energética industrial por setor  
Percentual



- A demanda por energia industrial no mundo, incluindo a eletricidade, irá crescer cerca de 30% até 2040, visto que os países que não fazem parte da OCDE irão liderar o crescimento econômico global.
- Cerca de 90% do aumento pela demanda de energia industrial virá de subsectores de fabricação e produtos químicos.
- Atualmente, a China utiliza um  $\frac{1}{4}$  da energia industrial global. Em 2040 seu crescimento será estabilizado, enquanto que na Índia, em outros países da Ásia, da África e da América Latina o crescimento irá aumentar

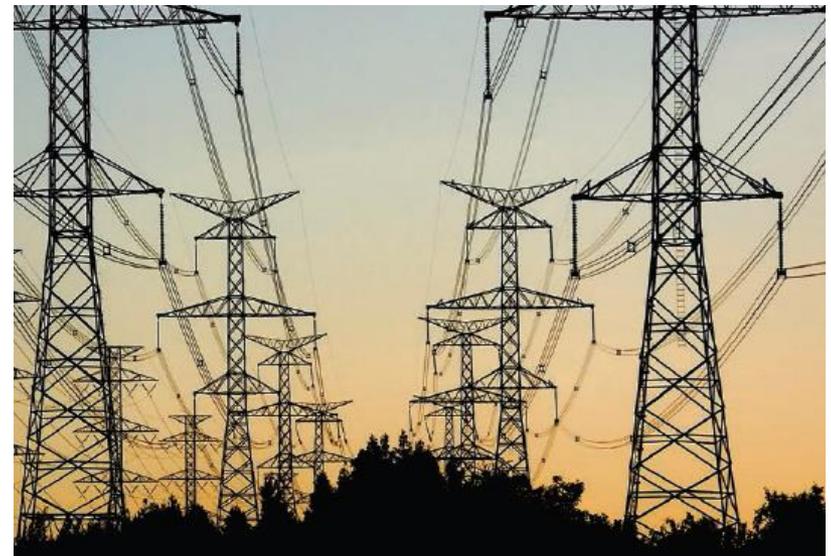
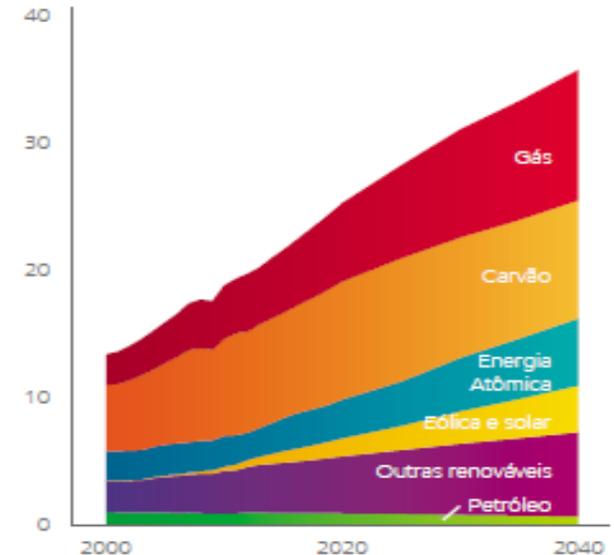
# Geração de Eletricidade

## 1,3 bilhão

Não tem acesso à eletricidade. A África responde pela metade deste total, com aproximadamente 55% de sua população sem acesso a eletricidade

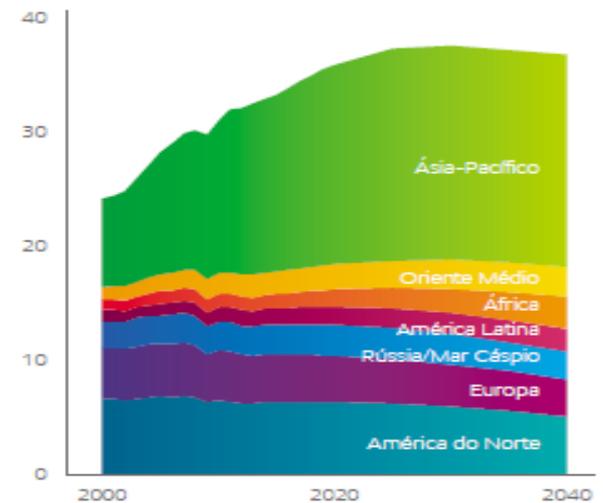
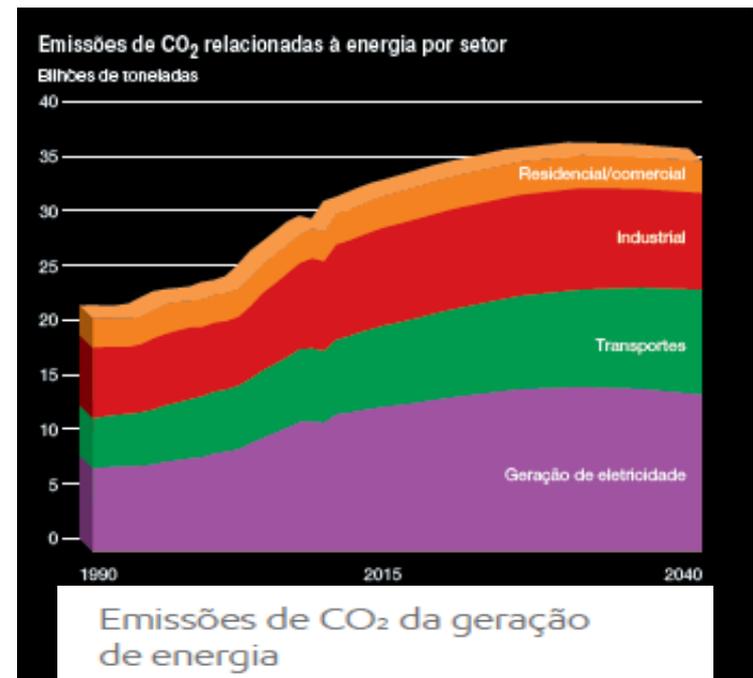
- Em 2040, a demanda de eletricidade no mundo será 90% maior do que era em 2010.
- O gás natural, que emite até 60% menos de CO<sub>2</sub> do que o carvão quando utilizado para gerar eletricidade, terá maior demanda.
- Em 2040, espera-se que o uso da **Energia Nuclear** seja aproximadamente o dobro e o uso de energias renováveis aumente em cerca de 150% liderado pela energia eólica e hidrelétrica

Oferta mundial de eletricidade por combustível  
Milhares de terawatt-horas



# Emissões

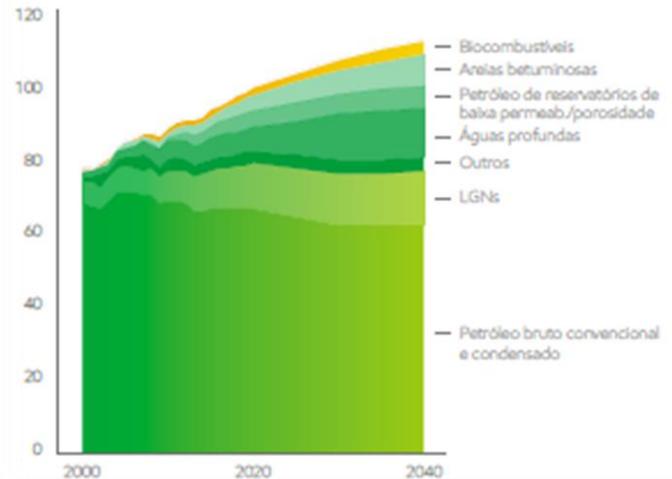
Emissões de gases de efeito estufa  
Relacionadas ao uso da energia  
deverão se estabilizar até 2040.





# O petróleo e outros suprimentos líquidos

Oferta mundial de líquidos por tipo  
Milhões de barris equivalentes de petróleo por dia



## Abastecimento de Energia

Avanços da tecnologia continuam a disponibilizar uma série de fontes de energia para os consumidores. Ao mesmo tempo, os combustíveis escolhidos para satisfazer o consumo de pessoas e das empresas continuam a evoluir. Essas escolhas são baseadas não apenas no preço, mas também em atributos como a conveniência, o desempenho e os efeitos ambientais. O gás natural deverá se tornar o combustível com mais rápido crescimento até 2040.

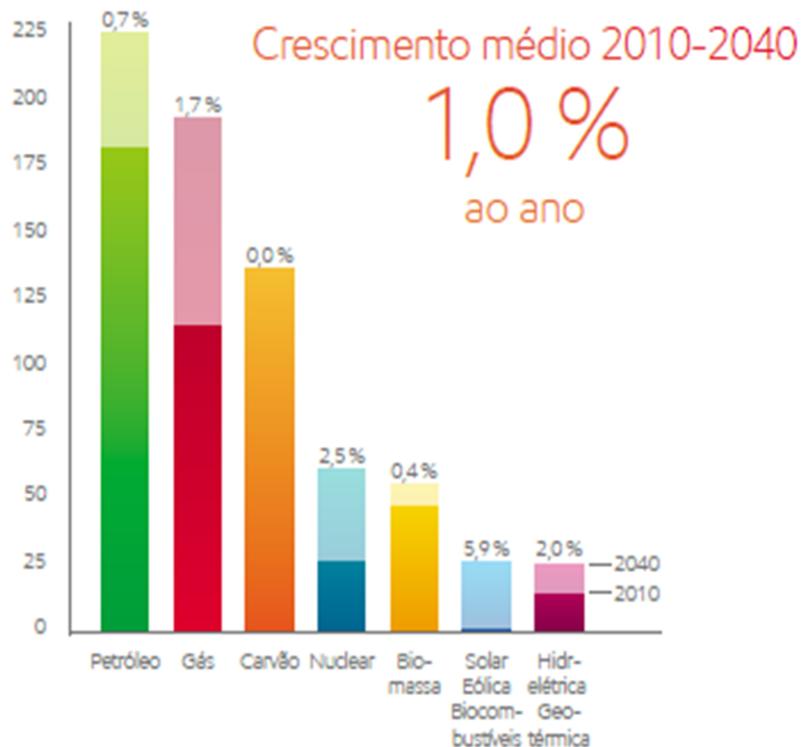
# 65%

Até 2040, cerca de 65% dos recursos mundiais de petróleo bruto recuperável e condensado ainda estará por ser produzido.

# Fornecimento e Tecnologia

Matriz energética continua em evolução

Quadrilhões de BTUs



- O petróleo e outros combustíveis líquidos continuará sendo a maior fonte de energia do mundo em 2040, atendendo a cerca de um terço da demanda.

- O gás natural será o combustível com maior crescimento até 2040, com uma crescente demanda de 60%.

- A oferta de energias, dentre as quais biomassa tradicional, hidrelétrica e geotérmica, além da eólica, da solar e dos biocombustíveis, irá crescer até cerca de 60%.

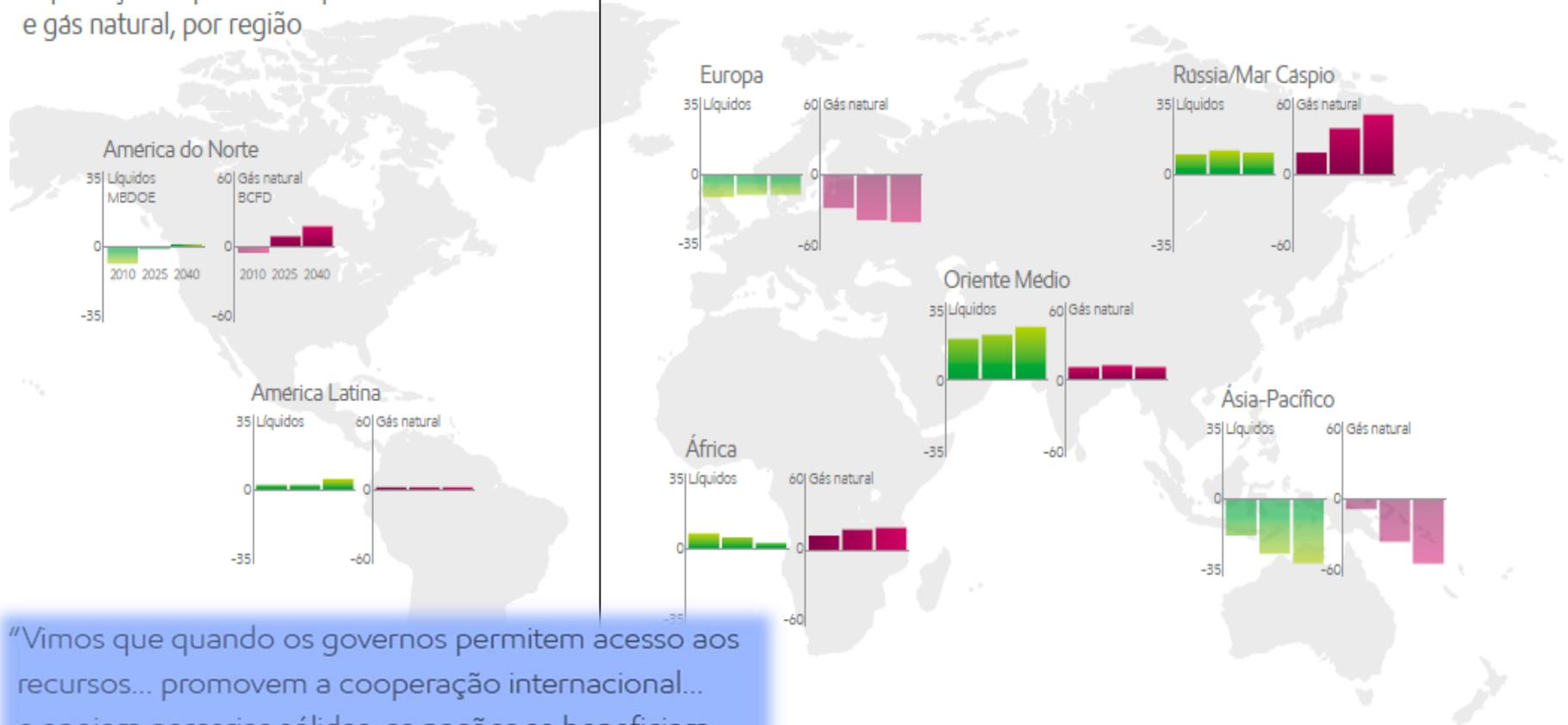
- O carvão, atualmente é o principal combustível para fins de geração de energia e responde pela segunda maior parcela atual de energia

- Prevemos um sólido crescimento da energia nuclear;

- A expansão energética exigirá trilhões de dólares em investimentos.

# Energia e Comércio

Exportações líquidas de líquidos e gás natural, por região



“Vimos que quando os governos permitem acesso aos recursos... promovem a cooperação internacional... e apoiam parcerias sólidas, as nações se beneficiam da expansão do comércio internacional, que gera valor econômico e aumenta a diversidade energética.”

Rex W. Tillerson,  
Presidente do Conselho de Administração  
e Diretor-Executivo da ExxonMobil

# Consumo energia elétrica no mundo

Tabela 1.23 Consumo de energia elétrica no mundo - 10 maiores países em 2015 (TWh)

World electricity consumption - 2015 top ten countries (TWh)

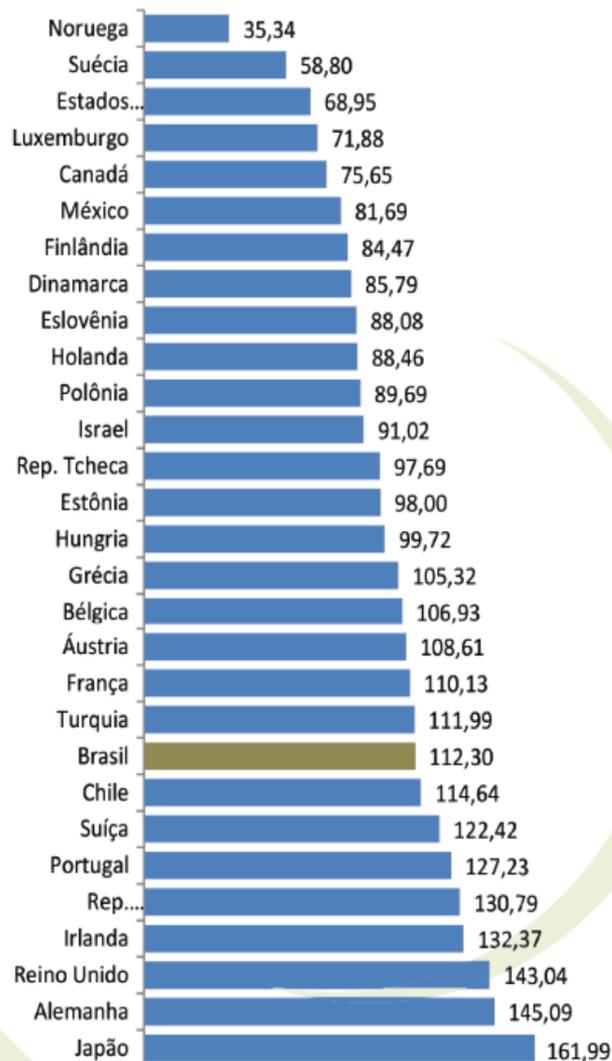
	2011	2012	2013	2014	2015	Δ% (2015/2014)	Part. % (2015)"	
<b>Mundo</b>	<b>19.344,9</b>	<b>19.713,6</b>	<b>20.317,7</b>	<b>20.760,4</b>	<b>21.167,8</b>	<b>2,0</b>	<b>100,0</b>	<b>World</b>
China	4.178,9	4.435,1	4.845,4	5.066,5	5.270,5	4,0	24,9	China
Estados Unidos	3.882,6	3.832,3	3.868,3	3.903,3	3.900,2	-0,1	18,4	United States
Índia	802,3	845,7	897,6	973,1	1.053,7	8,3	5,0	India
Japão	1.029,5	957,0	960,1	952,4	933,7	-2,0	4,4	Japan
Rússia	874,8	889,1	881,1	891,1	890,2	-0,1	4,2	Russia
Alemanha	546,2	546,3	544,3	532,7	536,3	0,7	2,5	Germany
Brasil	481,0	498,4	516,2	532,6	524,6	-1,5	2,5	Brazil
Canadá	525,9	519,0	538,5	541,1	520,5	-3,8	2,5	Canada
Coreia do Sul	472,7	482,8	487,8	495,0	498,1	0,6	2,4	South Korea
França	443,5	455,1	455,0	432,6	440,1	1,7	2,1	France
Outros	6.107,5	6.252,7	6.323,5	6.440,1	6.600,0	2,5	31,2	Other

Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA); Elaboração: EPE; Para o Brasil, Balanço Energético Nacional 2018. Inclui autoprodução.

# Tarifas médias de energia elétrica no mundo

Gráfico 1.7a Tarifas Médias de Energia Elétrica em 2015 - Industrial US\$

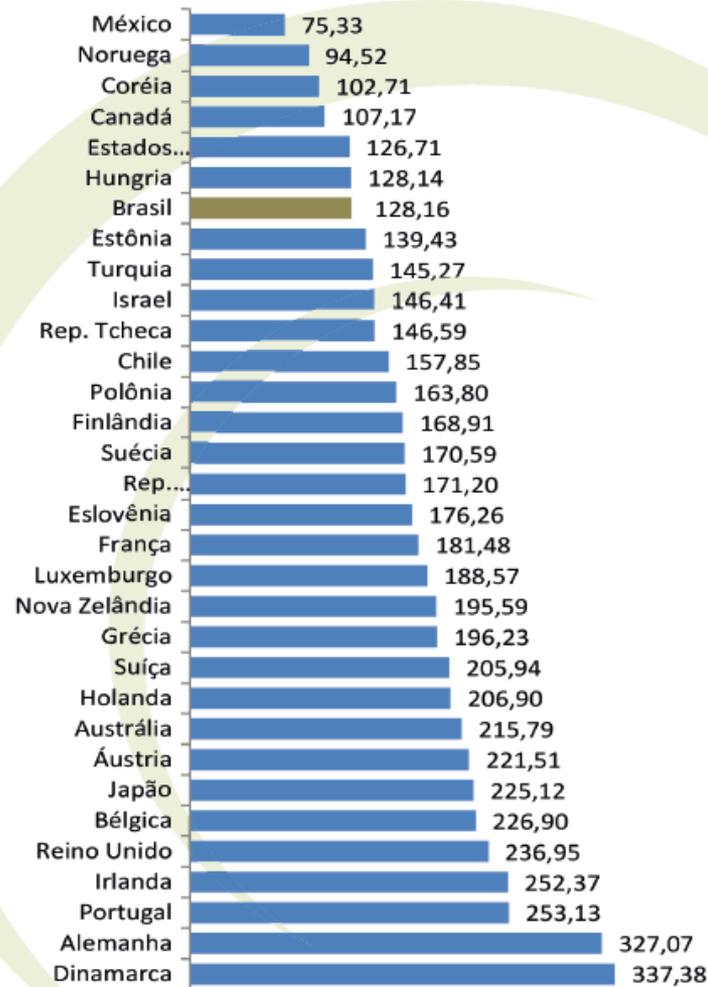
Industrial Electricity Average rates in 2015



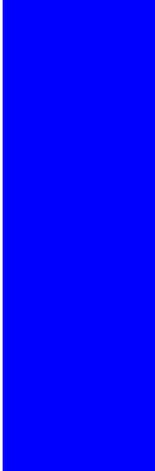
Fonte: International Energy Agency (IEA); Para o Brasil, ANEEL consulta em 08/07/18; Elaboração: EPE  
Nota: Tarifas referentes ao ano de 2013, excluindo impostos para os EUA; Para o Brasil, tarifa média da Aneel

Gráfico 1.7b Tarifas Médias de Energia Elétrica em 2015 - Residencial US\$

Residential Electricity Average rates 2015



Fonte: International Energy Agency (IEA); Para o Brasil, ANEEL consulta em 08/07/18; Elaboração: EPE  
Nota: Tarifas referentes ao ano de 2013, excluindo impostos para os EUA; Para o Brasil, tarifa média da Aneel



# **EVOLUÇÃO DA POLÍTICA ENERGÉTICA: MUNDO E BRASIL**

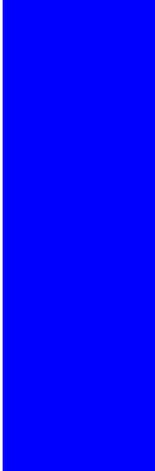
A política energética que orienta as ações e decisões de governos e empresas, em escala local e internacional, está centrada em torno dos conceitos de:

- a. Segurança econômica
- b. Segurança energética
- c. Segurança ambiental



# **Fatores que influenciam o fornecimento e a demanda de energia em nível global, regional e nacional**

- A expansão da prosperidade entre uma crescente população mundial.
- O custo e a provável disponibilidade de várias formas de energia.
- O desenvolvimento e a implantação de novas tecnologias.
- Políticas governamentais e preferências públicas.



# Segurança econômica, energética e ambiental

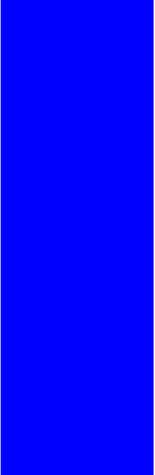
## SEGURANÇA ECONÔMICA

- a) Melhorar as condições de acesso da população à energia;
- b) A atração de novos investimentos ao país;
- c) A competitividade da economia no plano internacional
- d) O crescimento econômico

# Segurança econômica, energética e ambiental

## SEGURANÇA ENERGÉTICA

Se refere ao fornecimento de energia, determinado pelas condições de acesso físicas, geopolíticas e tecnológicas aos recursos energéticos. Nesse sentido, a diversificação da matriz energética e a diversidade na origem das fontes de abastecimento são dois aspectos cruciais para garantir a segurança energética. A confiabilidade na oferta de energia elétrica, seja pela tecnologia utilizada, seja por sua proximidade dos centros de carga, reforça a segurança energética.



# Segurança econômica, energética e ambiental

## SEGURANÇA AMBIENTAL

Diz respeito à redução de impactos ambientais e ao controle de emissão de gases de efeito estufa. A produção e o consumo de combustíveis fósseis tem dimensão local e regional, podendo superar os limites territoriais de um país e alcançar escala global, resultando em níveis de emissão que se ampliam ao longo do tempo

# Panorama Nacional



# Escolhas energéticas práticas

*Enfrentar os desafios energéticos mundiais significa ajudar bilhões de pessoas a melhorar seus padrões de vida e ainda reduzir o impacto do uso da energia sobre o meio ambiente.*

## **É FATO:**

- A necessidade de energia continuará aumentando com a expansão econômica,
- o aumento dos padrões de vida e o crescimento da população mundial em mais de 25 %.
- A demanda mundial de energia deve crescer em cerca de 35 % entre 2010 e 2040.

# Principais tendências da Política energética do Brasil

## recomendamos que:

*(...) que a política energética brasileira tenha uma estratégia de longo prazo, com objetivos explicitados em matéria de oferta e demanda de energia elétrica, que sirvam como referência e indicação das oportunidades de investimento, permitindo que investidores privados possam planejar com maior segurança o desenvolvimento de projetos de médio e longo prazo*

Critérios da política energética do Brasil estão sendo determinados por três prioridades:

- (1) desenvolvimento da produção de petróleo e gás natural da camada pré-sal,
- (2) preservação da modicidade nas tarifas de energia elétrica e na precificação dos derivados de petróleo que possam ter efeito sobre a inflação, e
- (3) estruturação de uma matriz energética com baixo teor de carbono. Esses aspectos envolvem, no entanto, uma dinâmica própria, porque a modicidade nas tarifas de energia elétrica e na precificação de certos derivados de petróleo afeta

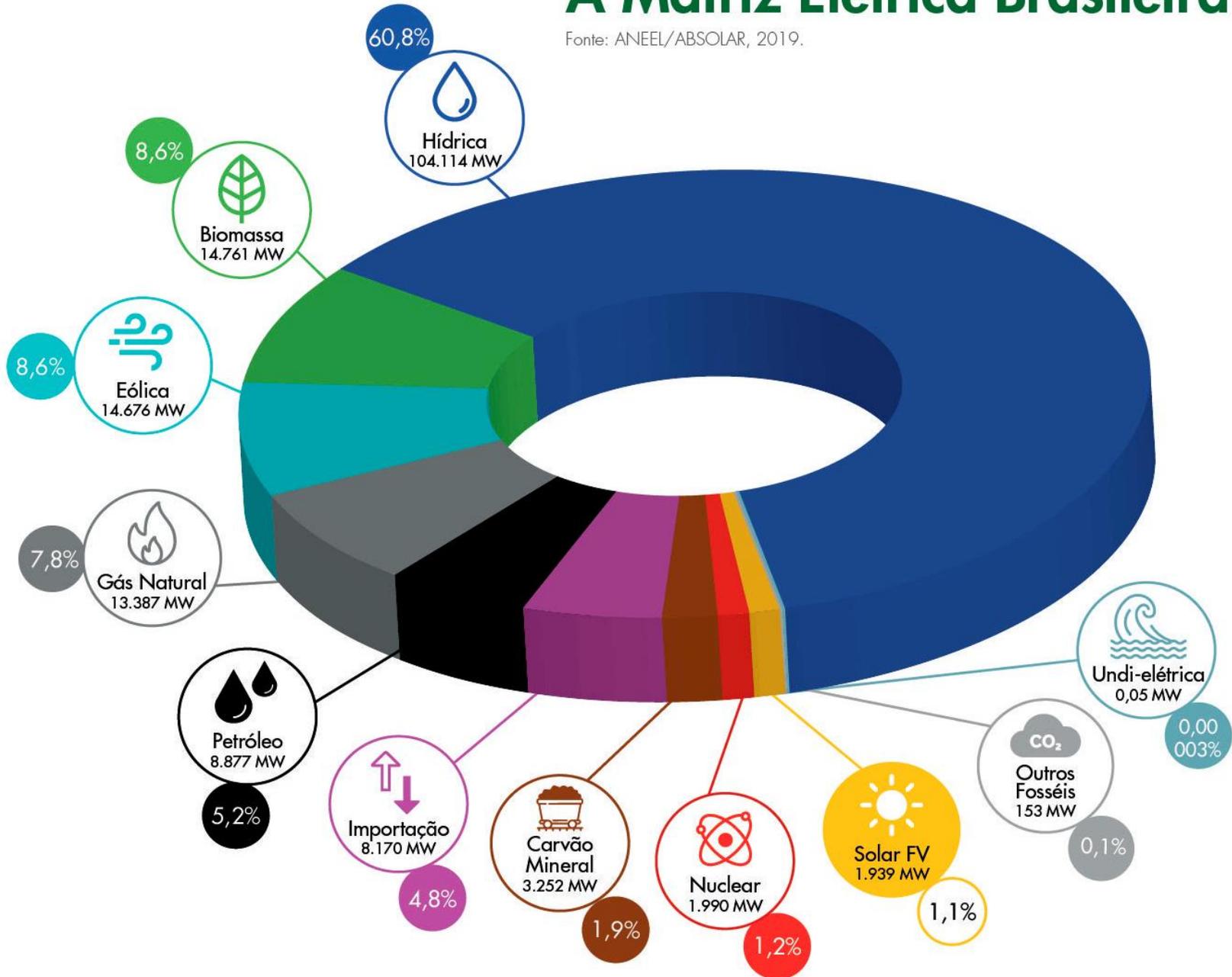
# Principais tendências da política energética do Brasil

A segurança energética (i.e., segurança de fornecimento) depende:

- (1) das condições pluviométricas;
- (2) das fontes que geram continuamente, com fator de capacidade elevado, como a geração nuclear;
- (3) da geração complementar; e
- (4) da evolução da demanda de energia elétrica.  
desenvolvimento da produção de petróleo e gás natural da camada pré-sal,

# A Matriz Elétrica Brasileira

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2019.



# FONTES RENOVÁVEIS AVANÇAM NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA EM 2019

META de 2019

**5.781,58 MW**

REALIZADO em 2019

**7.246,41 MW**

CAPACIDADE INSTALADA  
TOTAL

**170.071 MW**

## CAPACIDADE INSTALADA ACRESCIDA EM 2019 POR TIPO DE GERAÇÃO



**UHE**  
4.755 MW



**PCH**  
184 MW



**UTE**  
776 MW



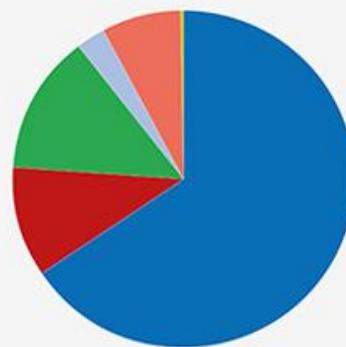
**UFV**  
551 MW



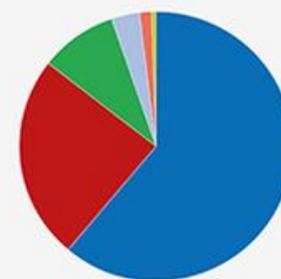
**EOL**  
971 MW



**CGH**  
10 MW

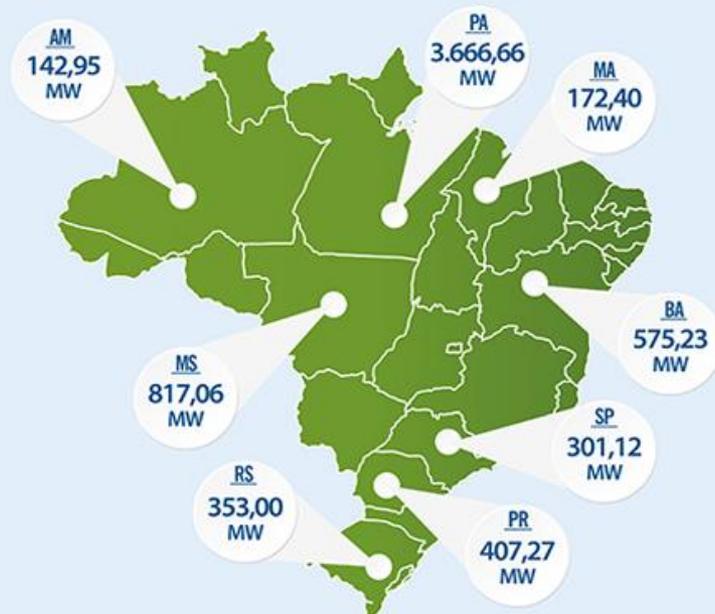


## CAPACIDADE INSTALADA TOTAL



Em 2019, as fontes eólica e solar se destacaram entre os novos empreendimentos, o que demonstra a diversificação da matriz energética em relação à capacidade total.

## CAPACIDADE INSTALADA ACRESCIDA EM 2019 POR UF



UHE BELO MONTE

**3.667 MW**

INJETADOS NA REDE

CENTRAIS EÓLICAS CRESCERAM



**970 MW**

FOTOVOLTAICAS SOMARAM



**551 MW**

# Capacidade de geração Instalada no BRASIL

## Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW)

Brazil electricity generation installed capacity (MW)

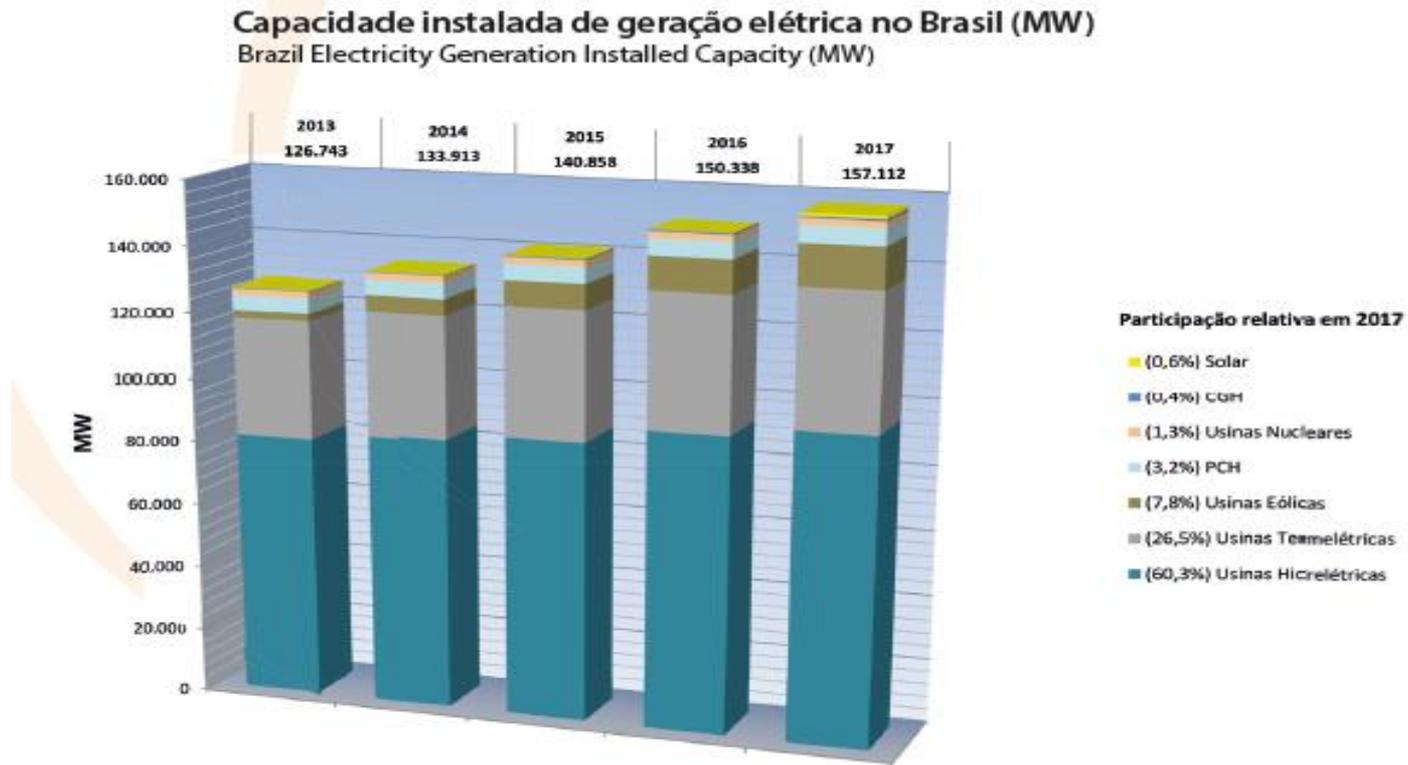
	2013	2014	2015	2016	2017	Δ% (2017/2016)	Part. % (2017) <sup>1</sup>	
<b>Total</b>	<b>126.743</b>	<b>133.913</b>	<b>140.858</b>	<b>150.338</b>	<b>157.112</b>	<b>4,5</b>	<b>100,0</b>	<b>Total</b>
Usinas Hidrelétricas	81.132	84.095	86.366	91.499	94.662	3,5	60,3	Hydropower Plants
Usinas Termelétricas	36.528	37.827	39.564	41.275	41.628	0,9	26,5	Thermoelectric Plants
PCH	4.620	4.790	4.886	4.941	5.020	1,6	3,2	SHP
CGH	266	308	398	484	594	22,6	0,4	CHG
Usinas Nucleares	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	-	1,3	Nuclear Power Plants
Usinas Eólicas	2.202	4.888	7.633	10.124	12.283	21,3	7,8	Wind Power Plants
Solar	5	15	21	24	935	3.836,3	0,6	Solar Power Plants

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); Balanço Energético Nacional 2018; Elaboração: EPE

Nota: Inclui autoprodução clássica; Considera-se a parte nacional de Itaipu (6.300 MW até o ano de 2006, 7.000 MW a partir de 2007)

PCH: Pequena Central Hidrelétrica; CGH: Central Geradora Hidrelétrica;

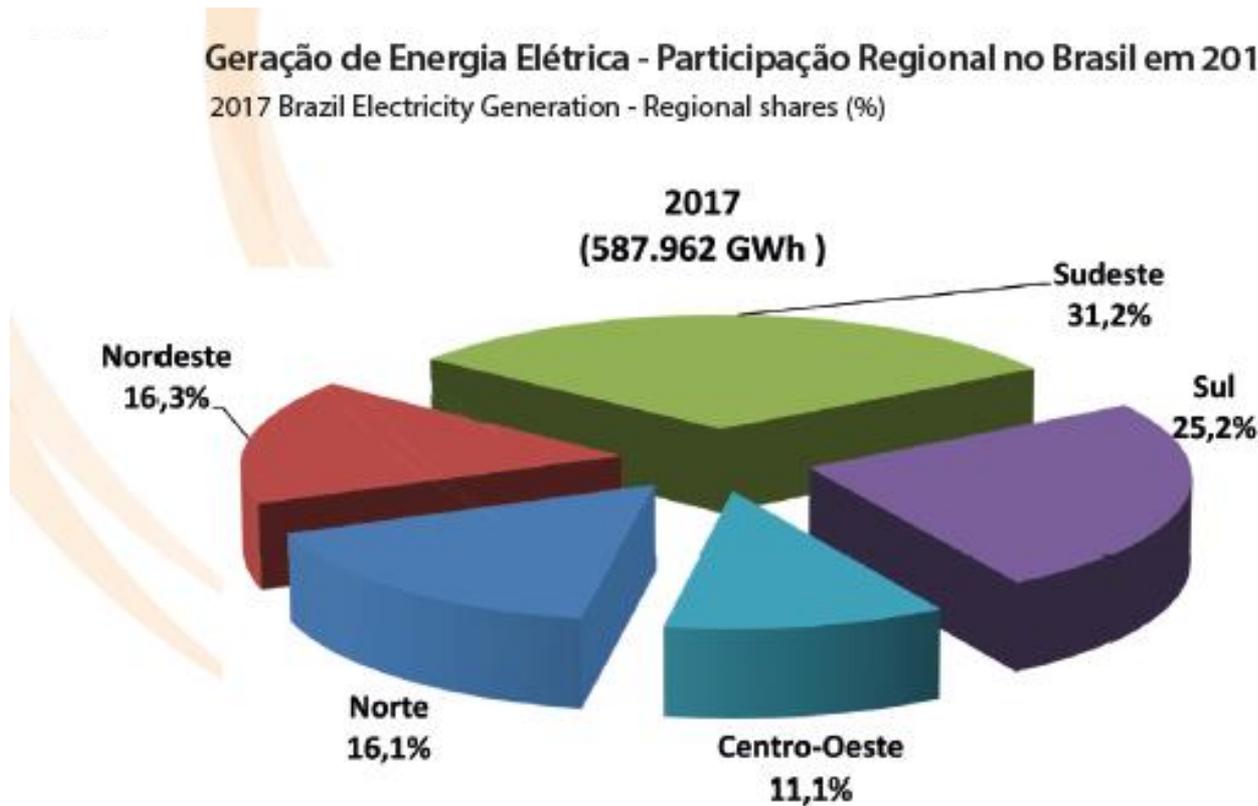
# Capacidade Instalada de geração elétrica no BRASIL



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL); para o ano de 2017, dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2016; Elaboração: EPE  
Nota: Considera-se a parte nacional de Itaipu (6.300 MW até o ano de 2006, 7.000 MW a partir de 2007)  
PCH: Pequena Central Hidrelétrica; CGH: Central Geradora Hidrelétrica

# Capacidade de energia elétrica Regional no BRASIL

Geração de Energia Elétrica - Participação Regional no Brasil em 2017 (GWh)  
2017 Brazil Electricity Generation - Regional shares (%)



Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN) 2018; Elaboração: EPE  
Nota: Inclui autoprodução



## Intercâmbio de Energia Elétrica entre as regiões

Figura 2.1 Intercâmbio de Energia elétrica entre as regiões do SIN em 2017 (MW médio)  
2017 Total Energy Interchange by region (average MW)



# Consumo de energia elétrica

## Consumo de Energia Elétrica na Rede 10 Maiores Distribuidoras em 2017

Average residential consumption rates: 2017 top ten countries (R\$/MWh)

	Distribuidora	Consumo (GWh)	% Brasil
1ª	CEMIG	50.716	10,9
2ª	AES - ELETROPAULO	43.019	9,2
3ª	CPFL PAULISTA	29.989	6,4
4ª	COPEL DISTRIBUIÇÃO	28.610	6,1
5ª	LIGHT	25.061	5,4
6ª	CELESC	23.991	5,1
7ª	COELBA - NEOENERGIA	19.623	4,2
8ª	ELEKTRO	16.525	3,5
9ª	BANDEIRANTE	14.540	3,1
10ª	CPFL PIRATININGA	13.730	2,9

# Empreendimentos

## Empreendimentos em construção no Brasil em 2017

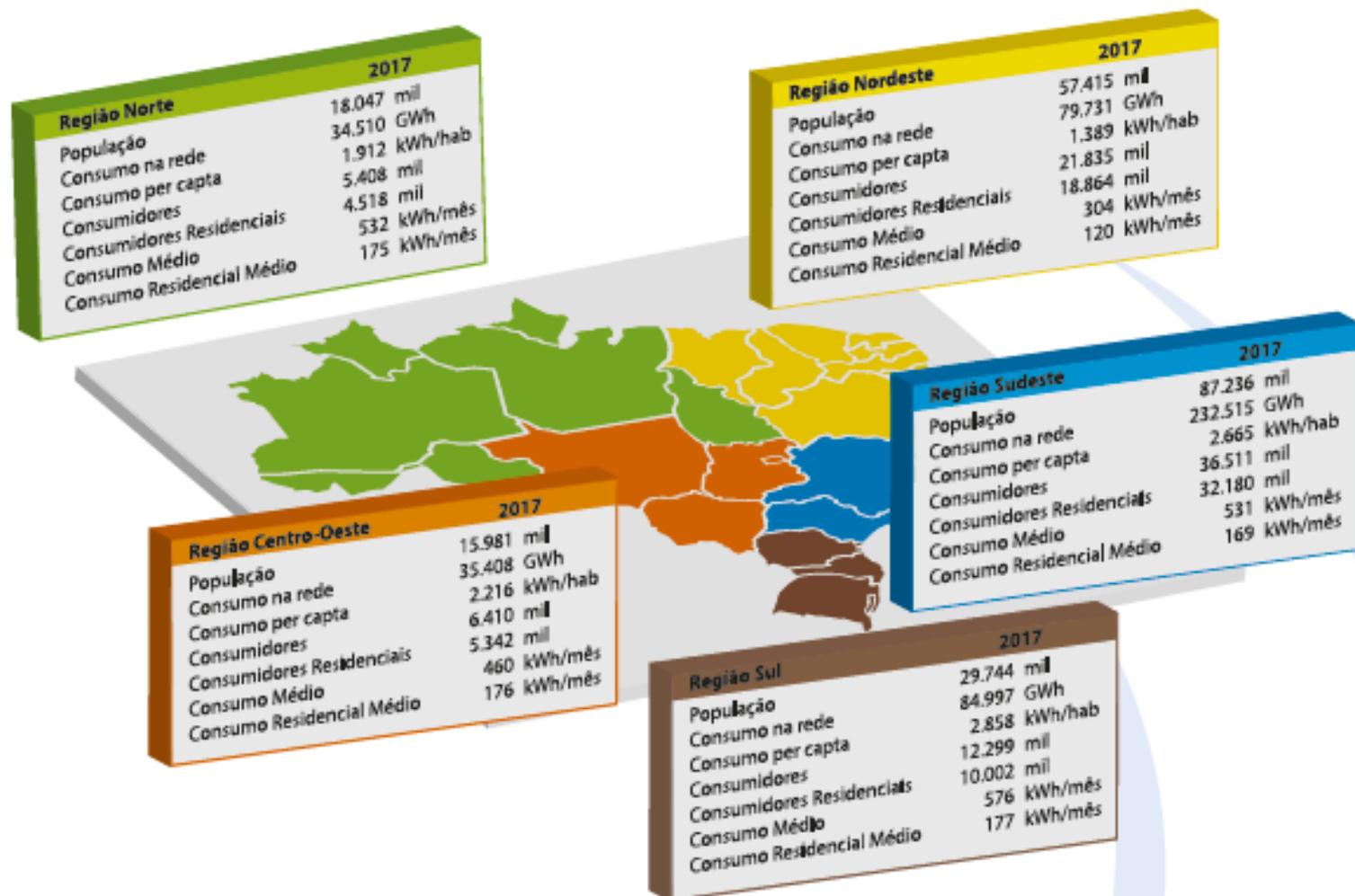
Energy Power Plants under construction in Brazil in 2017

	Usinas 2017	Potência Outorgada 2017 (MW)	Part. % (2017)	
<b>Total</b>	<b>207</b>	<b>9.912,1</b>	<b>100,0</b>	<b>Total</b>
Usina Hidrelétrica	6	1.254,1	12,7	Hydroelectric
Central Eolielétrica	111	2.473,8	25,0	Windelectric
Usina Termelétrica	29	3.677,6	37,1	Thermal
Usina Termonuclear	1	1.350,0	13,6	Nuclear
Usina Fotovoltaica	29	826,3	8,3	Photovoltaic
Pequena Central Hidrelétrica	27	327,0	3,3	Small Hydroelectric
Central Hidrelétrica	4	3,3	0,0	Hydroelectric

Fonte: ANEEL - BIG, consulta em 02/01/2018.

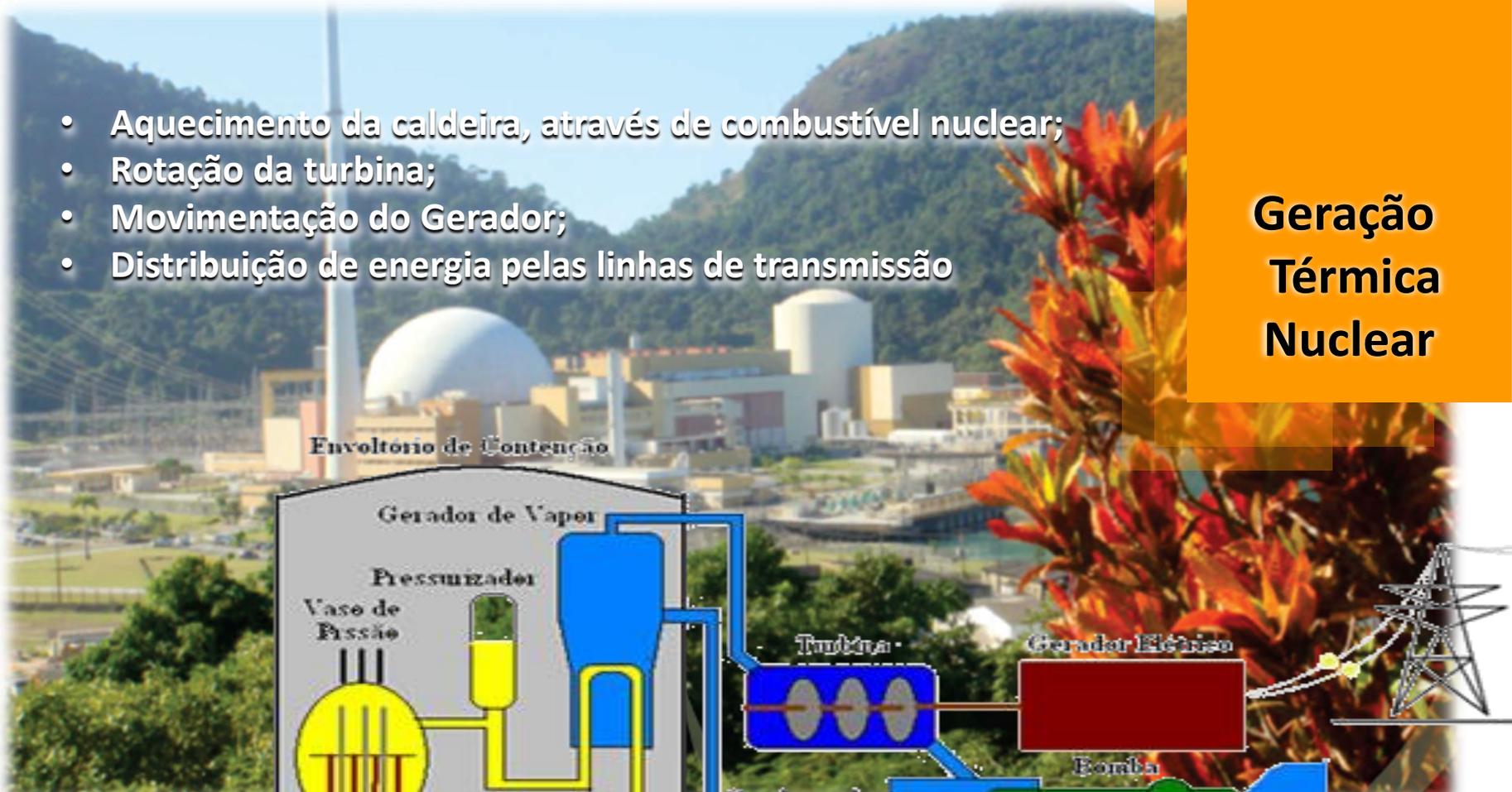
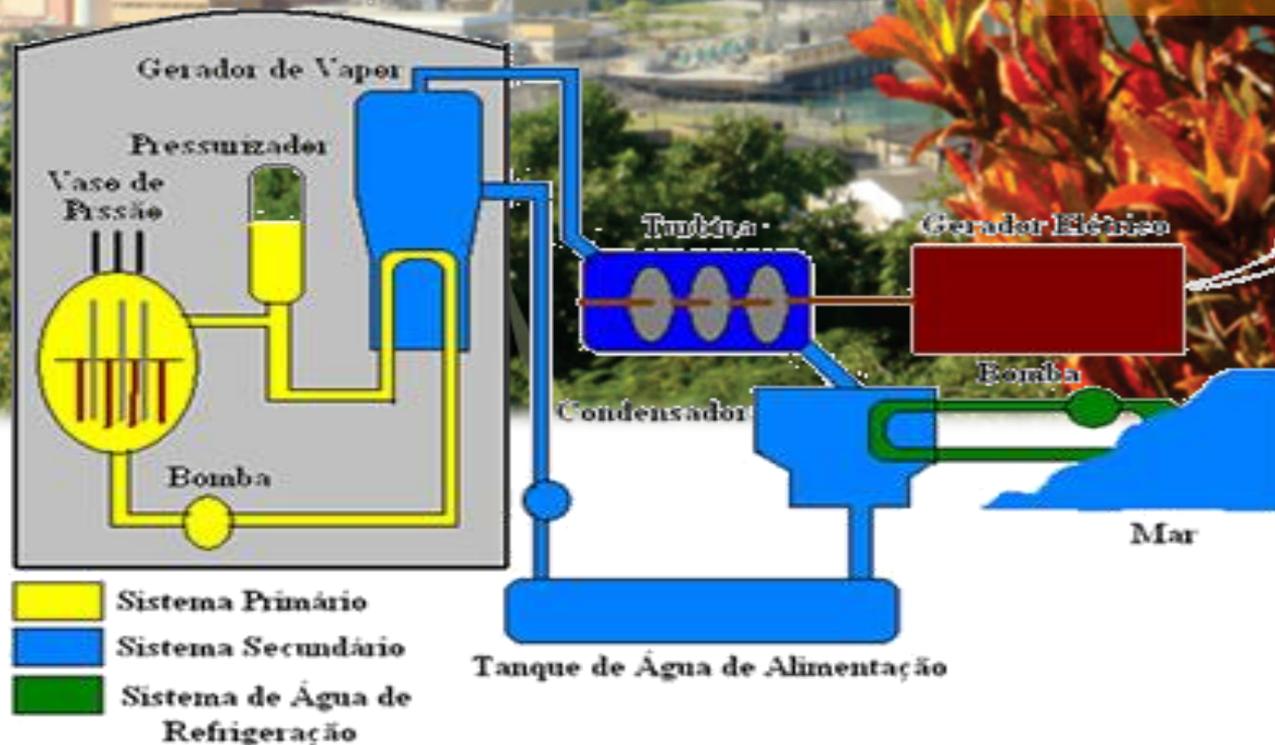
Nota: Em 2016, entrou em operação a Usina de Belo Monte com Potência Outorgada de 11.233,1 MW.

# Consumo de energia elétrica por regiões geográficas -2017



- Aquecimento da caldeira, através de combustível nuclear;
- Rotação da turbina;
- Movimentação do Gerador;
- Distribuição de energia pelas linhas de transmissão

## Geração Térmica Nuclear



# Reator Nuclear de Fissão

É uma instalação onde é produzida uma REAÇÃO DE FISSÃO NUCLEAR de forma ordenada e autossustentada para:

- geração de energia;
- produção de material físsil;
- produção de radioisótopos;
- aproveitamento da radiação para pesquisas científicas.

# Urânio



O **urânio**, elemento natural mais pesado do planeta, foi utilizado em muitas dessas experiências iniciais. O urânio é o elemento natural mais pesado, com 93 prótons.



Um isótopo de urânio, o urânio-235, tem 143 nêutrons, e entra em fissão induzida com grande facilidade. Quando um átomo de urânio se divide, ele essencialmente está perdendo massa. De acordo com a famosa equação de Einstein,  $E = mc^2$ , onde E representa **energia**, m é **massa** e c é a **velocidade da luz**, matéria pode ser convertida em energia.



O urânio é pesado porque tem muitos prótons e nêutrons, de modo que quando se divide em duas ou mais partes, dispõe de mais matéria a perder. Essa perda de massa, por menor que um átomo seja, equivale à criação de um grande volume de energia.

# Alguns fundamentos da geração nuclear

**Fissão nuclear** é a divisão de um núcleo de um átomo pesado, por exemplo, do urânio -235, em dois menores, quando atingido por um nêutron. Seria como jogar uma bolinha de vidro (nêutron) contra várias outras bolinhas agrupadas (o núcleo).

- **CONDIÇÕES PARA OCORRER**

Os núcleos com número de massa grande estão sujeitos à fissão espontânea com uma probabilidade muito pequena e sujeitos à fissão induzida artificialmente com uma probabilidade bem maior

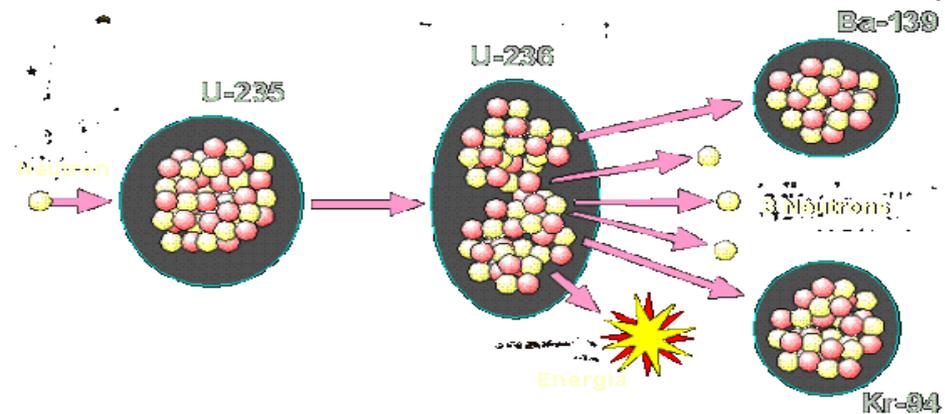
- **ENERGIA GERADA**

6 g de urânio, elemento mais usado na fissão, rendem  $0,520 \times 10^{23}$  MeV, equivalente ao abastecimento de uma casa com quatro pessoas durante um dia

- **HISTÓRICO**

Começou a ser pesquisada na década de 1930 e depois passou a ser estudada para uso militar.

Daí surgiram as bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki. Em 1957, foi inaugurado o primeiro reator de fissão nuclear para gerar energia.



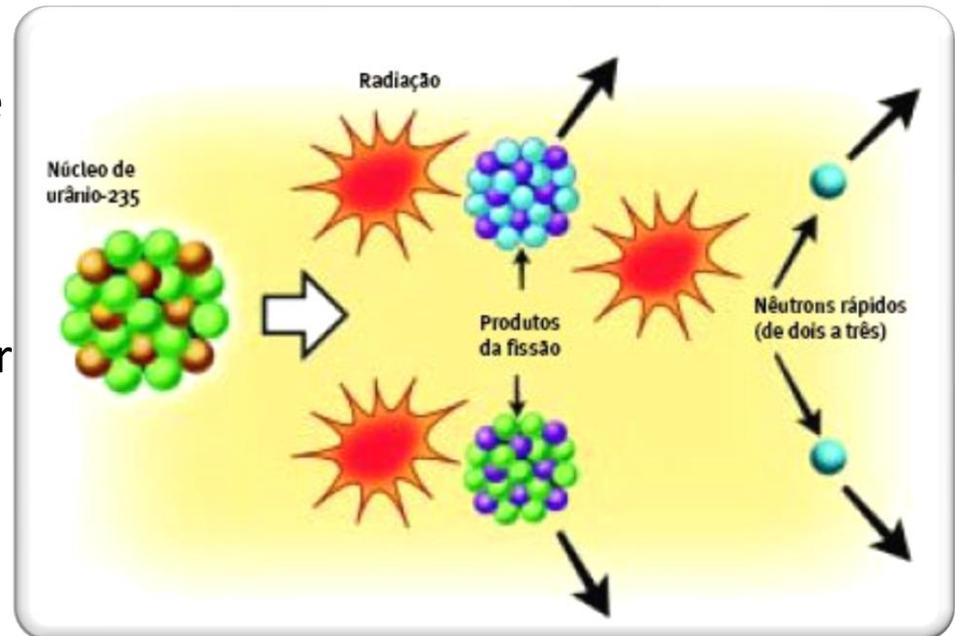
# Isótopos Físseis e Fértéis

- ✓  $^{235}\text{U}$  é o único isótopo físsil encontrado na natureza (0,71 %)
- ✓ Urânio natural contém 0,7%  $^{235}\text{U}$  e 99,3%  $^{238}\text{U}$  (em massa)  
 $^{238}\text{U}$  pode produzir  $^{239}\text{Pu}$  físsil por captura de nêutrons  
 $^{232}\text{Th}$  pode produzir  $^{233}\text{U}$  físsil por captura de nêutrons
- ✓ Isótopos físséis:  $^{235}\text{U}_n$ ,  $^{233}\text{U}_a$ ,  $^{239}\text{Pu}_a$  e  $^{241}\text{Pu}_a$
- ✓ Isótopos fértéis:  $^{232}\text{Th}_n$ ,  $^{238}\text{U}_n$  e  $^{240}\text{Pu}_a$
- ✓ Fissão  $^{235}\text{U}$ : mais provável c/ nêutrons de baixa energia ( $\downarrow E$ )

# Fissão e Reação em Cadeia

## Isótopos físséis X isótopos fissionáveis

- Em engenharia nuclear, um material **físsil** é aquele capaz de sustentar uma reação em cadeia de fissão nuclear, com nêutrons de qualquer energia.
- **Isótopos físséis** são os nuclídeos que podem sofrer fissão nuclear (são fissionáveis) e também produzir nêutrons de fissão de tal forma que podem sustentar uma reação nuclear em cadeia, com a configuração adequada.
- Sob esta definição, **isótopos fissionáveis** são os nuclídeos que podem sofrer fissão nuclear, mas produzem nêutrons insuficientes, tanto em energia ou número, para sustentar uma reação nuclear em cadeia.



# Evolução da energia nuclear no Plano internacional

- A primeira fase (de 1970 a 1986): pode ser considerada a **fase de primeira expansão**, relacionada ao grande potencial da energia nuclear para superar (1) as restrições apresentadas pela reestruturação das matrizes energéticas para enfrentar a dependência em relação ao petróleo, e (2) a necessidade de atender ao crescimento da demanda de energia elétrica em uma dinâmica de sustentabilidade
- A segunda fase (de 1986 a 2000) foi uma **fase de revisão** para a indústria nuclear, diante dos efeitos políticos e sociais dos acidentes de Chernobyl (na Ucrânia) e de Three Mile Island (nos Estados Unidos). A expansão dos programas nucleares foi interrompida na maior parte dos países, exceto na Ásia (Japão e Coreia do Sul), enquanto a indústria nuclear procedia a uma avaliação detalhada e profunda dos processos técnicos, econômicos e de segurança envolvidos na geração elétrica a partir das usinas nucleares.
- A terceira fase, que teve início em 2000 e prevalece atualmente, considerada a **fase de consolidação da energia nuclear**, tem sido marcada pelo desenvolvimento de nova geração de reatores (Geração III+), com recursos que melhoram substancialmente o desempenho tecnológico, econômico (com a construção modular e padronizada dos reatores nucleares) e as condições de segurança.

# Evolução da energia nuclear no plano internacional

## Estados Unidos

- 103 usinas nucleares, onde 102 pertencem ao setor privado.
- A geração nuclear no país teve início em meados da década de 1950.
- A participação do setor privado é substancial na indústria nuclear, mas a política do governo – orientada para a independência energética e o controle das emissões de carbono – é fundamental tanto na geração nuclear, quanto na proposição de regulações ambientais e de segurança, envolvendo construção e operação de usinas, e o ciclo do combustível.
- O licenciamento das usinas nucleares planejadas e em operação é responsabilidade da Nuclear Regulatory Commission (NRC), agência independente, criada em 1974, que regula todos os aspectos da energia nuclear, inclusive a geração elétrica e a ampliação em mais 20 anos de licenças de reatores em operação há 40 anos
- Exelon é a maior empresa geradora de energia nuclear dos Estados Unidos (21.000 MWe bruto) e a terceira maior empresa mundial

# Evolução da energia nuclear no plano internacional

## França

- A geração nuclear na França teve início em 1974;
- Objetivo de consolidar a segurança energética do país, que tem 58 usinas nucleares, todas pertencentes à empresa Electricité de France - EdF (85% estatal, maior operadora de energia nuclear do mundo) e utilizando a tecnologia PWR da Westinghouse.
- Maior exportador líquido de energia elétrica do mundo, exportando a países da União Europeia e auferindo cerca de 3 bilhões de euros por ano.
- Areva (90% estatal) é a maior fabricante de usinas nucleares do mundo.

## Canadá

- A geração nuclear no Canadá está vinculada à tecnologia PHWR, mais conhecida como CANDU (Canada Deuterium Uranium), desenvolvida ao final da década de 1950 pela empresa estatal Atomic Energy of Canada Ltd (AECL), em cooperação com a indústria do país, e comercializada a partir de 1971, tendo exportado 31 reatores para 7 países. Há 19 reatores utilizando essa tecnologia no país, a maior parte operada pela Ontario Power Generation.

# Evolução da energia nuclear no plano internacional

## Ásia

- 117 reatores de energia nuclear em operação na região, 44 em construção e 90 planejados. Entre 1990 e 2002, a Coreia do Sul adicionou 9 novos reatores (mais do que duplicando sua geração nuclear)
- Japão acrescentou 16 novos reatores (a maior parte com capacidade acima de 1.000 MW). No período 2010-2020, a Ásia aumentou em cerca de 36% da capacidade de geração nuclear mundial, localizada principalmente na China, Japão, Índia e Coreia do Sul.
- A Coreia do Sul deverá se tornar um exportador relevante de tecnologia para geração nuclear. O país deverá ter 35 usinas nucleares até 2030, incluindo reatores de desenho avançado, e gerar 59% de sua energia elétrica. O reator OPR-1000 (Optimized Power Reactor), de 1.000 MWe, desenvolvido em colaboração com a Westinghouse e produzido em sua quase totalidade localmente, poderá ser exportado para a Indonésia e o Vietnã. Usinas APR-1400 serão exportadas para a União dos Emirados Árabes em um negócio de US\$ 20 bilhões, vencido sob acirrada concorrência

# Evolução da energia nuclear no plano internacional

## China

- 15 reatores nucleares em operação.
- A demanda de energia elétrica no país cresceu cerca de 80% ao longo da década 2011-2020.
- A capacidade instalada da China deve atingir 60.000 a 70.000 MW em 2020.
- A China tem capacidade para desenhar e construir reatores, tendo 14 centrais nucleares em operação, 25 em construção e 51 planejadas. Algumas das usinas planejadas disporão de tecnologias avançadas, em um plano para aumentar a capacidade de geração nuclear e atingir 200.000 MWe em 2030 e 400.000 MWe em 2050.
- O AP1000 da Westinghouse é a base tecnológica que será utilizada para essa evolução da política do país, qualificada pelo governo, em 2011-2012, como desenvolvimento estável com segurança, que pretende tornar a energia nuclear a fundação do sistema de geração elétrica no período 2020-2030.

# Evolução da energia nuclear no plano internacional

## Brasil

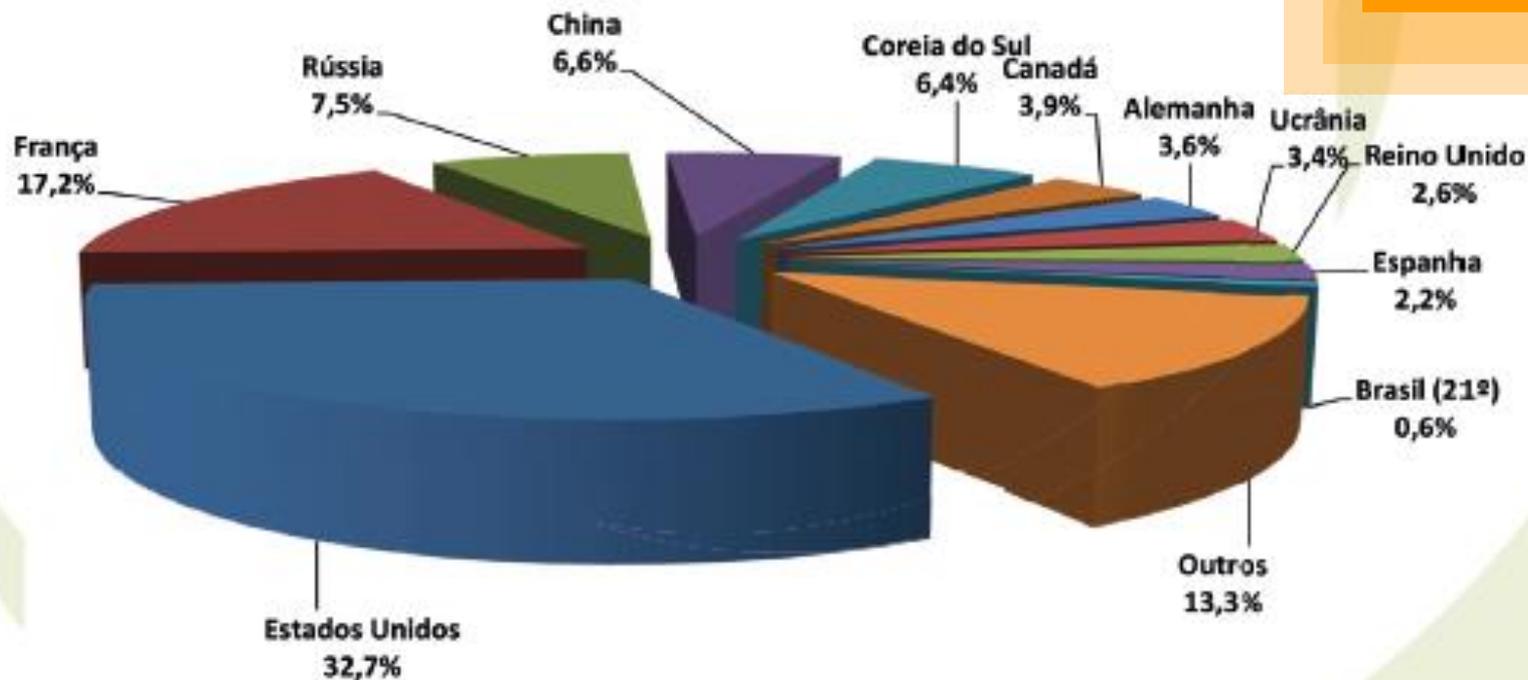
- ▲ No Brasil, a expansão do parque nuclear faz parte do Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (2006/2015). Possui duas vantagens competitivas nesse segmento:
  1. as boas reservas de urânio e
  2. o domínio da tecnologia de enriquecimento de urânio.
  
- ▲ Angra I – início em 1972 com tecnologia Americana Westinghouse adquirida em sistema turn key (sem transferência tecnologia). Entrou em operação 1985 (Potência de 657MW) 1975 o país assinou com a Republica Federal da Alemanha o Acordo de Cooperação para o uso pacifico da Energia Nuclear.
  
- ▲ Em julho de 1975 adquiriu as usinas de Angra II e AngraIII da empresa Kraftwerk Union A.G.-KWU, subsidiária da Siemens. O contrato previa transferência de tecnologia. (Potência de 1.350MW em 2000). Angra III também com Potência de 1.350MW, A construção foi paralisada diversas vezes sendo posteriormente inserida PDEEE (2006/2015) e em 2008 o IBAMA expediu licença provisória autorizando a retomada das obras.
  
- ▲ Em 2008 , Ministro Edson Lobão anunciou a intenção do Governo em construir uma usina nuclear / ano ao longo dos 50anos o que resultaria em uma capacidade instalada total de 60milMW.

# Geração Térmica Nuclear

## Geração nuclear no mundo – 10 maiores países em 2015

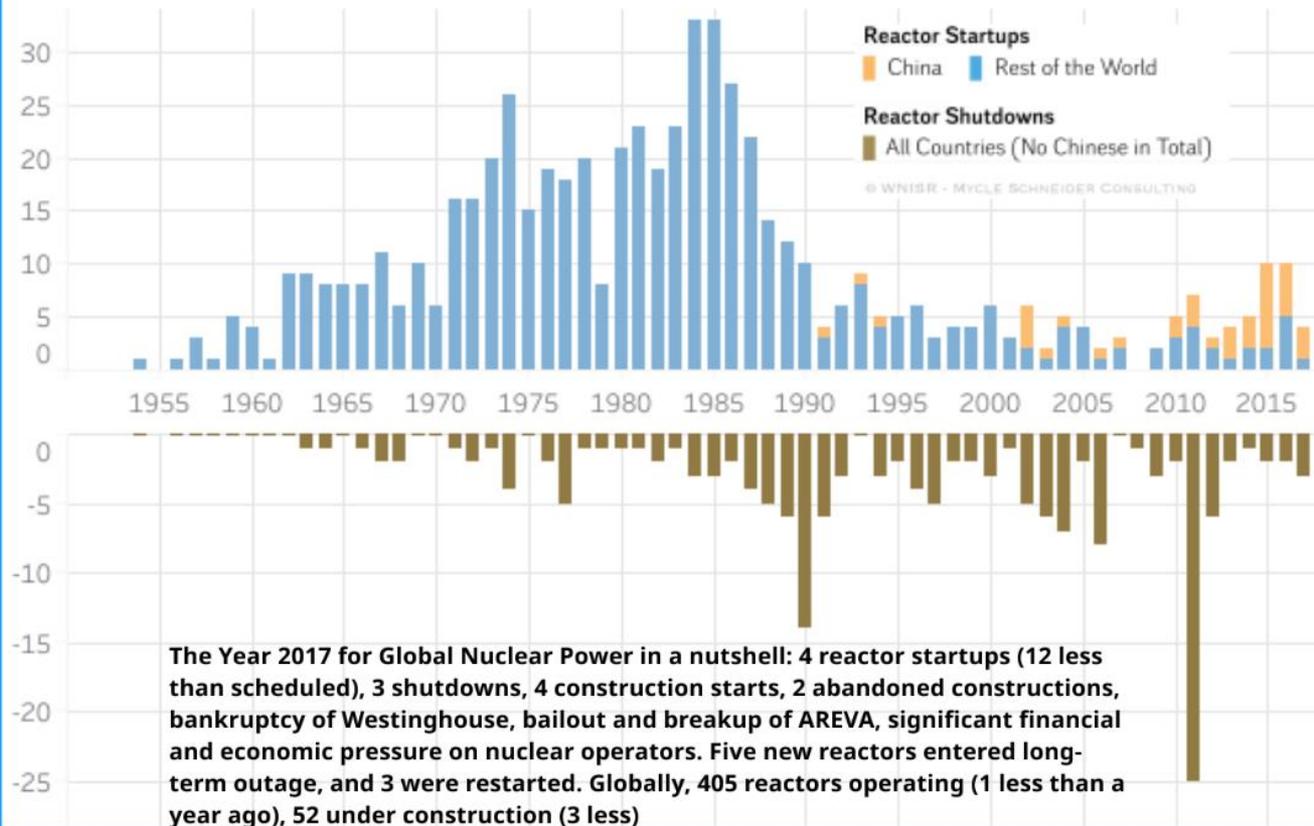
World nuclear power generation – 2014 top ten countries

2015 ( 2.441 TWh )



# Nuclear Reactor Startups and Shutdowns in the World

In Units, from 1954 to 31 December 2017



## Geração nuclear no mundo – 10 maiores países em 2015 (TWh)

World nuclear power generation – 2015 top ten countries (TWh)

	2011	2012	2013	2014	2015	Δ% (2015/2014)	Part. % (2015)"	
<b>Mundo</b>	<b>2.518,6</b>	<b>2.345,7</b>	<b>2.365,0</b>	<b>2.409,8</b>	<b>2.441,3</b>	<b>1,3</b>	<b>100,0</b>	<b>World</b>
Estados Unidos	790,2	769,3	789,0	797,2	797,2	0,0	32,7	United States
França	423,5	407,4	403,7	418,0	419,0	0,2	17,2	France
Rússia	162,0	166,3	161,4	169,1	182,8	8,1	7,5	Russia
China	82,6	92,7	110,7	123,8	161,2	30,2	6,6	China
Coreia do Sul	147,8	143,6	132,5	149,2	157,2	5,4	6,4	South Korea
Canadá	88,3	89,1	97,0	98,6	95,6	-3,0	3,9	Canada
Alemanha	102,3	94,1	92,1	91,8	86,8	-5,4	3,6	Germany
Ucrânia	84,9	84,9	78,0	83,1	82,4	-0,9	3,4	Ukraine
Reino Unido	62,7	64,0	64,1	57,9	63,9	10,3	2,6	United Kingdom
Espanha	55,1	58,7	54,3	54,9	54,8	-0,2	2,2	Spain
Brasil (21º)	15,7	16,0	15,4	15,4	14,7	-4,2	0,6	Brazil (21th)
Outros	503,6	359,7	366,7	351,0	325,7	-7,2	13,3	Other

Geração  
Térmica  
Nuclear

Fonte: U.S. Energy Information Administration (EIA); para o Brasil: Balanço Energético Nacional 2018.

# Energia Nuclear

## Impactos Ambientais e Desenvolvimento Tecnológico



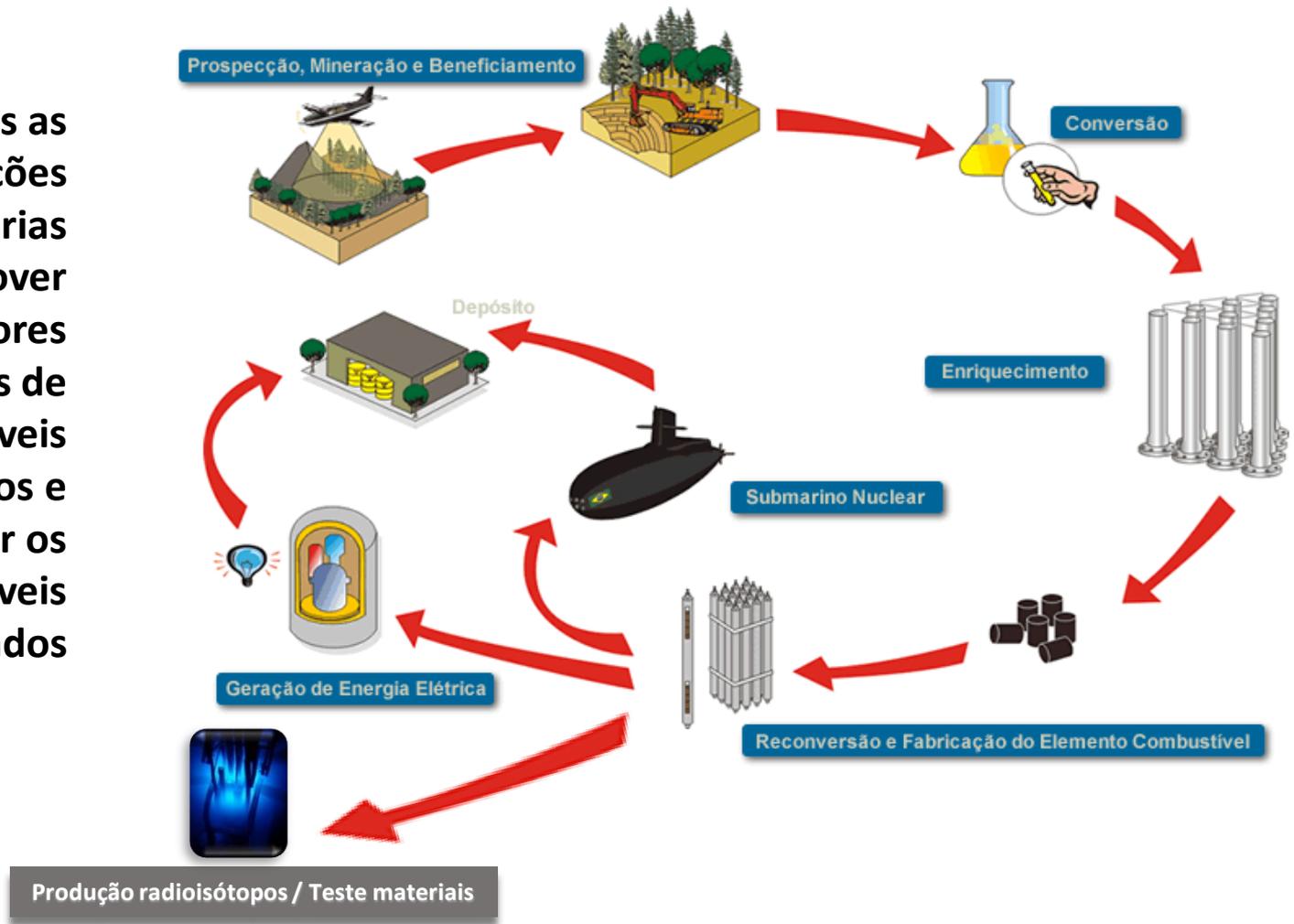
Central nuclear.

Fonte: Elettronuclear.

Das formas de produção de eletricidade, a usina nuclear é uma das menos agressivas ao meio ambiente. Ainda assim, a possibilidade de uma unidade provocar grande impacto socioambiental é um dos aspectos mais controversos de sua construção e operação. Isto justificada em toda a cadeia produtiva do urânio - extração até os dejetos derivados da operação da usina – é permeada pela radioatividade.

# Ciclo do Combustível Nuclear do Urânio

Todas as operações necessárias para prover reatores nucleares de combustíveis novos e tratar os combustíveis irradiados





# PMT 3530 - PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES I

Humberto Gracher Riella

[Humberto.riella@ufsc.br](mailto:Humberto.riella@ufsc.br) 3133 9269

# A descoberta da fissão nuclear

1919 e o começo dos anos 30, os cientistas estavam começando a definir as partes essenciais da estrutura do ÁTOMO.

Em 1919, na Universidade de Manchester, Inglaterra, o físico Ernest Rutherford, da Nova Zelândia, descobriu os **PRÓTONS**, partículas de carga positiva localizadas no núcleo do átomo, as quais, em companhia dos **ELÉTRONS**, partículas de carga negativa que orbitam em torno do núcleo, formam o **ÁTOMO**.

1932, quando James Chadwick, um dos colegas de Rutherford, descobriu o **NÊUTRON**, a terceira partícula subatômica.

Em 1934 o físico italiano Enrico Fermi concebeu a ideia de usar nêutrons nos bombardeios. Como os nêutrons não têm carga elétrica, eles podem atingir sem rejeição o núcleo de um átomo. Fermi, sem que o soubesse, havia descoberto o processo de **fissão nuclear**. Dois cientistas alemães, Otto Hahn e Fritz Strassmann, foram os primeiros a reconhecer formalmente o processo, em 1938, ao dividirem átomos de urânio em duas ou mais partes, em suas experiências