

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO

MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS
RECURSOS ENERGÉTICOS - ENERGIA NUCLEAR



ESTRUTURA DA APRESENTAÇÃO

- Introdução
 - Energia Nuclear
 - Urânio
 - Fissão Nuclear
- Reservas de Urânio no Brasil e no mundo
- Produção de Urânio no Brasil e no mundo
- Panorama do mercado mundial de Urânio
- Ciclo do combustível
- Usina Nuclear
- Visão da Energia Nuclear pós Japão
- Avaliação da Energia Nuclear
- Referências bibliográficas

ENERGIA NUCLEAR

- A energia nuclear é o fenômeno físico de liberação da energia, sob a forma de calor, da ligação entre prótons e nêutrons no núcleo do átomo, que ocorre como resultado da fissão nuclear. Os elementos mais utilizados nestes processos são: **Urânio, Plutônio e o Tório.**
- A reação nuclear pode acontecer controladamente em um reator de usina nuclear ou descontroladamente em uma bomba atômica. Em outras aplicações aproveita-se da radiação ionizante emitida.



PROPRIEDADES DO URÂNIO

- É encontrado na forma de três isótopos: ^{234}U , ^{235}U (1), ^{238}U (2);
- Número atômico: 92
- Pertence ao grupo dos actinídeos;
- Coloração prateada, maleável, dúctil e menos duro do que o aço;
- Quando exposto ao ar, forma em sua superfície uma camada de óxido;

(1): O ^{235}U é o isótopo radioativo mais utilizado, seu teor indica o quão energético é o material, indicando, pois, sua aplicação (Militar ou civil).

(2): O ^{238}U é a forma mais estável do urânio, portanto é o isótopo mais abundante. Estima-se que sua meia-vida é da ordem de 4,5 bilhões de anos

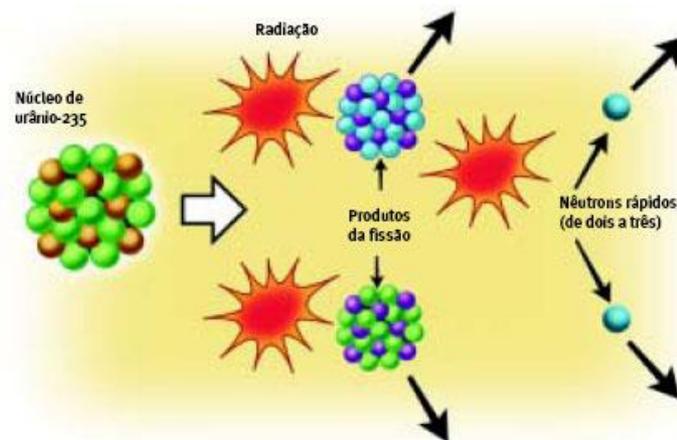


PRINCIPAIS MINERAIS DE URÂNIO

- Uraninita (uranato complexo de uranilo e chumbo, e que pode conter lantânio, tório, ítrio);
- Carnotita (uranovanadato de potássio e sódio);
- Autunita (fosfato de urânio e cálcio hidratado);
- Torbernita (fosfato de urânio e cobre hidratado);
- Zeunerita (arseniato de cobre e urânio hidratado).
- Também encontrado em rochas fosfáticas, no linhito (carvão fóssil, estágio intermediário entre a turfa e o carvão betuminoso) e em areais monazíticas (fosfato de cério, lantânio, praseodímio, neodímio, com óxido de tório).

FISSÃO NUCLEAR

- No caso da fissão do átomo do urânio 235, quando um nêutron atinge seu núcleo, divide-o e ocorre a emissão de dois a três nêutrons, sendo que parte da energia que os ligava é liberada em forma de calor e outra parte na forma de radiações (alfa, beta e gama). Os nêutrons liberados na fissão atingem, sucessivamente, outros núcleos, provocando a chamada reação em cadeia, com grande liberação de energia térmica.



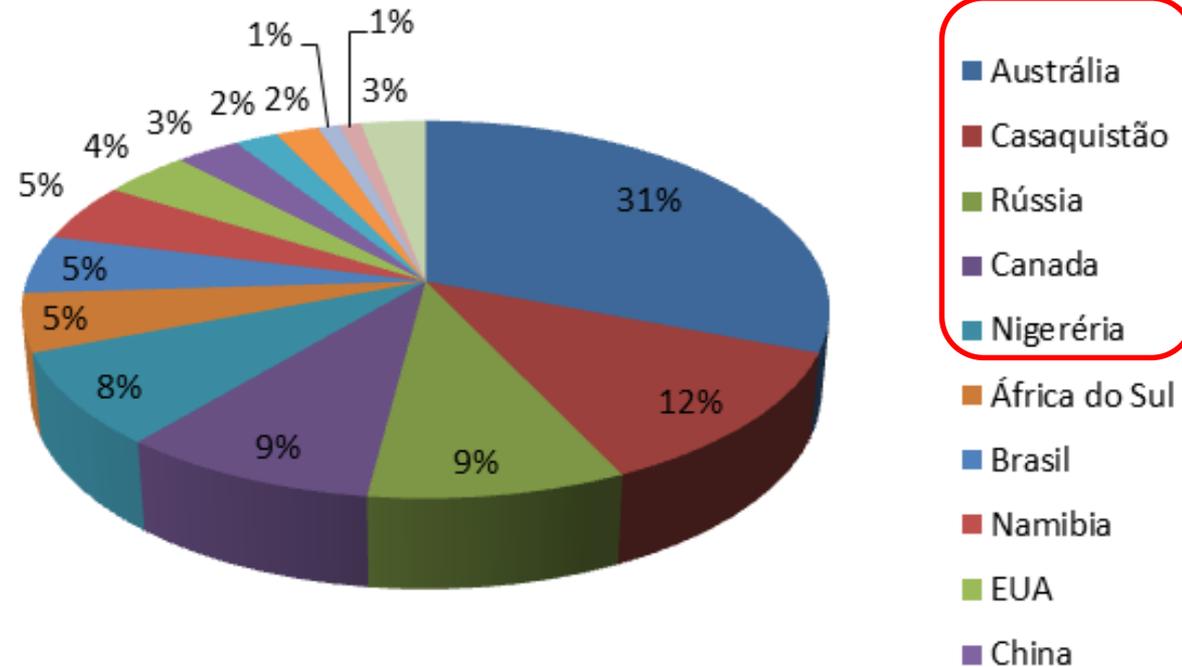
FISSÃO NUCLEAR

- Uma amostra de urânio deve ser enriquecida de modo que seu **teor de ^{235}U seja de 3%** para o uso em um reator nuclear civil usado para geração de energia. **O urânio destinado a armas é composto de 90% ou mais de ^{235}U .**
- A energia liberada por uma única fissão resulta do fato de que os produtos da fissão e os nêutrons, juntos, pesam menos que o átomo original de ^{235}U . A diferença no peso é convertida diretamente em energia na taxa regulada pela equação **$E = mc^2$** .
- **Algo na ordem de 200MeV (milhões de elétron-volts) é liberado pelo decaimento de um átomo de ^{235}U .**

RESERVAS MUNDIAIS DE URÂNIO

Known Recoverable Resources of Uranium 2011

	tonnes U	percentage of world
Australia	1,661,000	31%
Kazakhstan	629,000	12%
Russia	487,200	9%
Canada	468,700	9%
Niger	421,000	8%
South Africa	279,100	5%
Brazil	276,700	5%
Namibia	261,000	5%
USA	207,400	4%
China	166,100	3%
Ukraine	119,600	2%
Uzbekistan	96,200	2%
Mongolia	55,700	1%
Jordan	33,800	1%
other	164,000	3%
World total	5,327,200	



- Austrália
- Casaquistão
- Rússia
- Canada
- Nigéria
- África do Sul
- Brasil
- Namibia
- EUA
- China

Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources, to US\$ 130/kg U, 1/1/11, from OECD NEA & IAEA, *Uranium 2011: Resources, Production and Demand* ("Red Book"). The total to US\$ 260/kg U is 7,096,600 tonnes U, and Namibia moves up ahead of Niger.

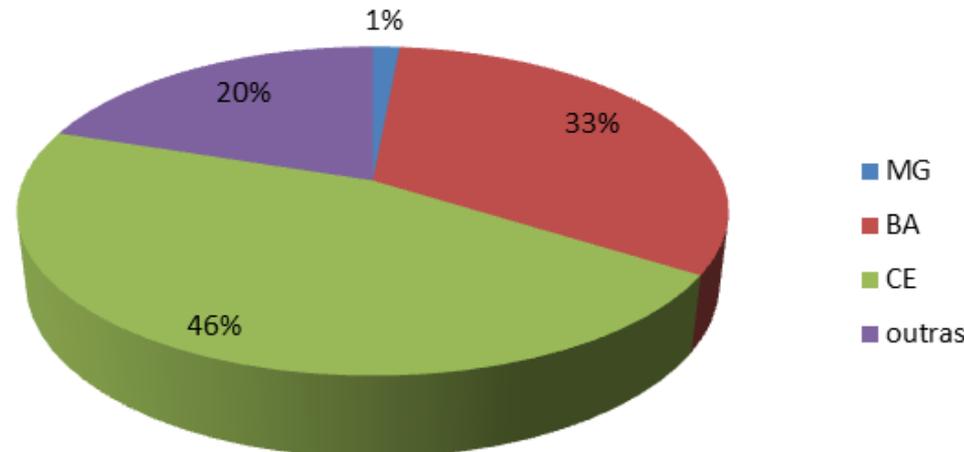
RESERVAS BRASILEIRAS DE URÂNIO

Tabela 2
RESERVAS DE URÂNIO DO BRASIL- 2007
 (em toneladas de U_3O_8)

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

Fonte: INB/DNPM

Reservas Totais



RESERVAS BRASILEIRAS DE URÂNIO

Mapa 1
INSTALAÇÕES E RESERVAS DE URÂNIO NO BRASIL



Fonte: INB

PRODUÇÃO MUNDIAL DE URÂNIO

Production from mines (tonnes U)

Country	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Kazakhstan	4357	5279	6637	8521	14020	17803	19451	21317
Canada	11628	9862	9476	9000	10173	9783	9145	8999
Australia	9516	7593	8611	8430	7982	5900	5983	6991
Niger (est)	3093	3434	3153	3032	3243	4198	4351	4667
Namibia	3147	3067	2879	4366	4626	4496	3258	4495
Russia	3431	3262	3413	3521	3564	3562	2993	2872
Uzbekistan	2300	2260	2320	2338	2429	2400	2500	2400
USA	1039	1672	1654	1430	1453	1660	1537	1596
China (est)	750	750	712	769	750	827	885	1500
Malawi					104	670	846	1101
Ukraine (est)	800	800	846	800	840	850	890	960
South Africa	674	534	539	655	563	583	582	465
India (est)	230	177	270	271	290	400	400	385
Brazil	110	190	299	330	345	148	265	231
Czech Republic	408	359	306	263	258	254	229	228
Romania (est)	90	90	77	77	75	77	77	90
Germany	94	65	41	0	0	0	52	0
Pakistan (est)	45	45	45	45	50	45	45	45
France	7	5	4	5	8	7	6	3
total world	41 719	39 444	41 282	43 764	50 772	53 663	53 494	58 344
tonnes U₃O₈	49 199	46 516	48 683	51 611	59 875	63 285	63 085	68 805
percentage of world demand*	65%	63%	64%	68%	78%	78%	85%	86%

*WNA Market Report data

PRODUÇÃO BRASILEIRA DE URÂNIO

Tabela 6
EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO E TEORES DE CAETITÉ – 2000-2007

Ano	Minério Beneficiado (t)	Teor Médio de U no Minério (%)	Produção de U (t U ₃ O ₈)
2000	56.569	0,181	13
2001	36.400	0,172	66
2002	155.460	0,226	329
2003	157.832	0,194	271
2004	198.944	0,186	352
2005	49.973	0,250	129
2006	153.378	0,209	231
2007	190.033	0,230	353

Fonte: INB

A produção brasileira de urânio é realizada pelas **Indústrias Nucleares Brasileiras – INB**

Tabela 7
PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO POTENCIAL DE U₃O₈ NO BRASIL ATÉ 2013

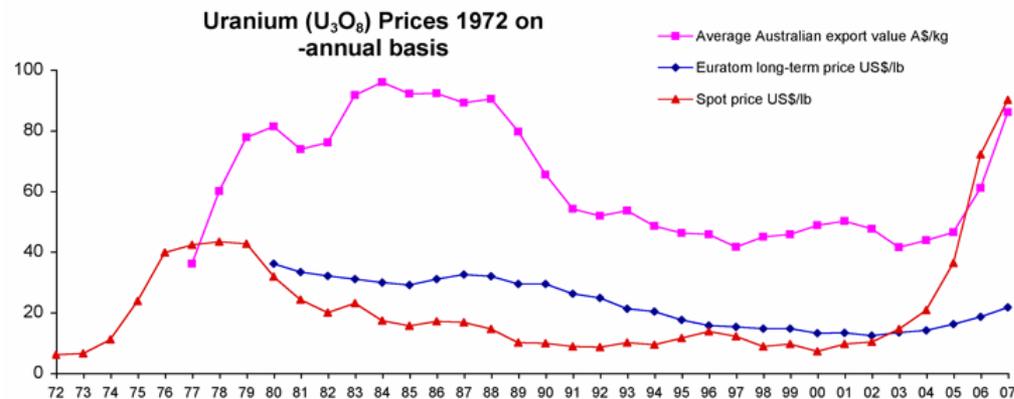
Ano	Produção de U em Caetité – BA (t de U ₃ O ₈)	Produção de U em Santa Quitéria – CE (t de U ₃ O ₈)	Produção de Urânio (t de U ₃ O ₈)
2009	400	-	400
2010	500	-	500
2011	800	-	800
2012	800	1.000	1.800
2013	800	1.200	2.000

Dados da DNPM de 2007

Fonte: INB

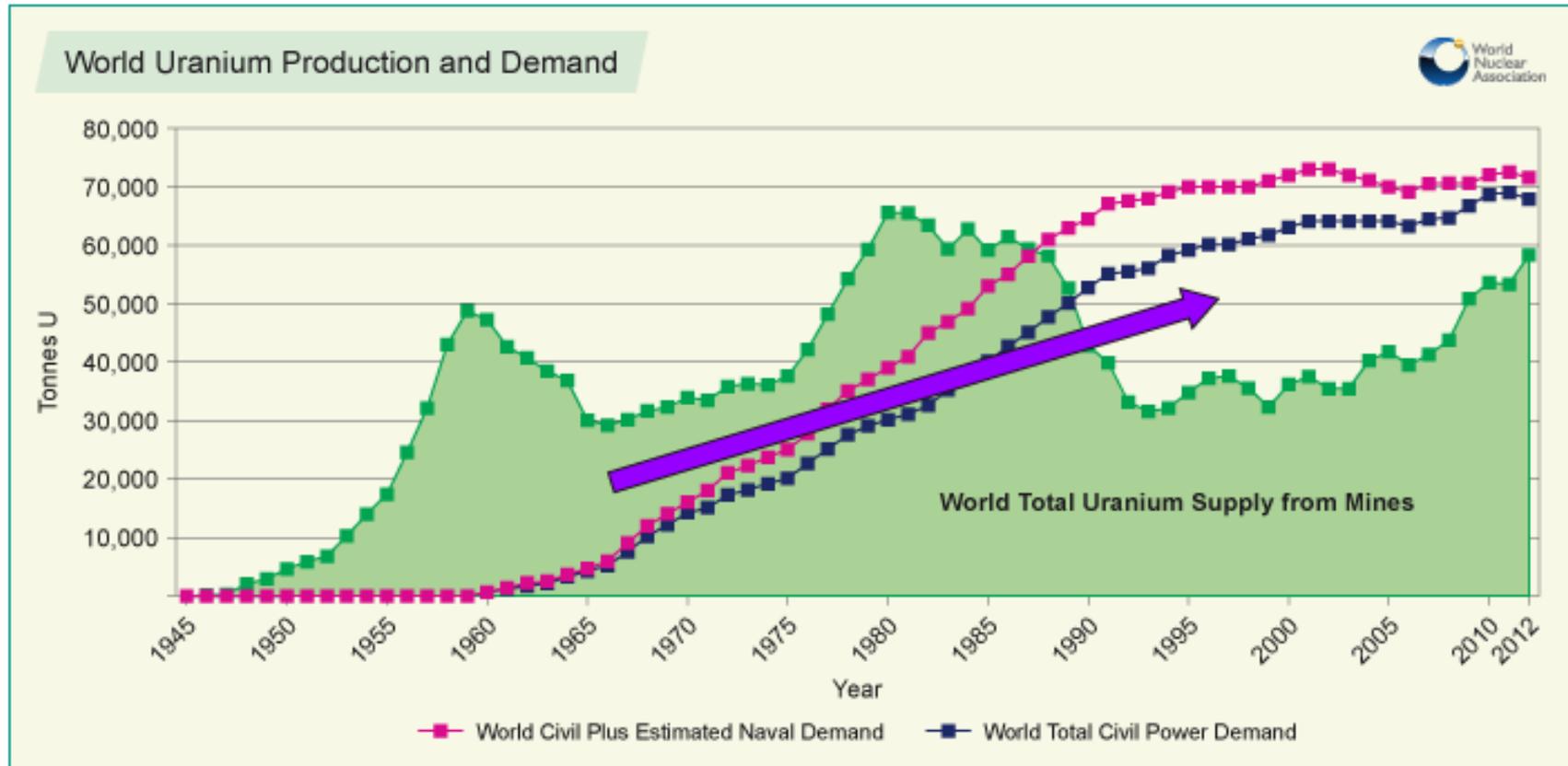
PANORAMA DO MERCADO MUNDIAL DE URÂNIO

- A produção mundial de Urânio atualmente fornece apenas 75% da necessidade energética;
- A produção primária de minas é complementada pelo fornecimento secundário de material ex-militar e outros inventários;
- A produção mineradora agora está se expandindo significativamente;



Note that the Euratom long-term price is the average price of uranium delivered into the EU that year under long term contracts. It is not the price at which long-term contracts are being written in that year.

PANORAMA DO MERCADO MUNDIAL DE URÂNIO



COMÉRCIO EXTERIOR BRASILEIRO

Tabela 9
COMÉRCIO EXTERIOR DO BRASIL DE URÂNIO E OUTROS MATERIAIS
RADIOATIVOS – 2001-2007 ⁽¹⁾

Anos	Exportação		Importação	
	toneladas	US\$ (1.000)	toneladas	US\$ (1.000)
2001	24	91	48	19.837
2002	23	517	71	28.998
2003	31	183	40	16.392
2004	34	969	86	40.649
2005	333	967	65	39.847
2006	33	646	69	54.901
2007	95	242	38	34.834

Fonte: SECEX/MDIC

⁽¹⁾ Em metal contido (bens manufaturados)



EMPRESAS PRODUTORAS DE URÂNIO

Tabela 5
MAIORES EMPRESAS PRODUTORAS DE URÂNIO (U₃O₈) DO MUNDO – 2005

Mina	País	Proprietário	Produção (t)	% Prod. mundial
McArthur River	Canadá	Cameco	7.200	17%
Ranger	Austrália	ERA (Rio Tinto)	5.000	12%
Olympic Dam	Austrália	BHP Biliton	3.700	9%
Rossing	Namíbia	Rio Tinto	3.100	7%
krazbokamensk	Rússia	TVEL	3.000	7%
Rabbit Lake	Canadá	Cameco	2.300	5%
McClellan Lake	Canadá	Cogema	2.100	5%
Akouta	Níger	Areva/Onarem	1.800	4%
Arlit	Níger	Areva/Onarem	1.300	3%
Beverly	Austrália	Heathgate	800	2%

Fonte: World Nuclear Association / WNA Market Report data

A indústria mineral de urânio no Brasil está restrita aos órgãos federais por questões de segurança nacional. Desta forma, a INB responde pelo conjunto das atividades representativas do “**ciclo do combustível nuclear**”.

CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

- O ciclo do combustível nuclear compreende as etapas abaixo:
 - **Mineração e beneficiamento de urânio** - produção do concentrado de urânio, também chamado de “yellowcake”;
 - **Conversão** – transformação do “yellowcake” em hexafluoreto de urânio (UF_6);
 - **Enriquecimento isotópico** – etapa que promove o aumento da concentração do isótopo físsil ^{235}U presente no hexafluoreto de urânio, de 0,7% para cerca de 4%;
 - **Reconversão** – transformação do hexafluoreto de urânio em pó de dióxido de urânio (UO_2);
 - Produção das pastilhas de dióxido de urânio;
 - Montagem dos elementos combustíveis.

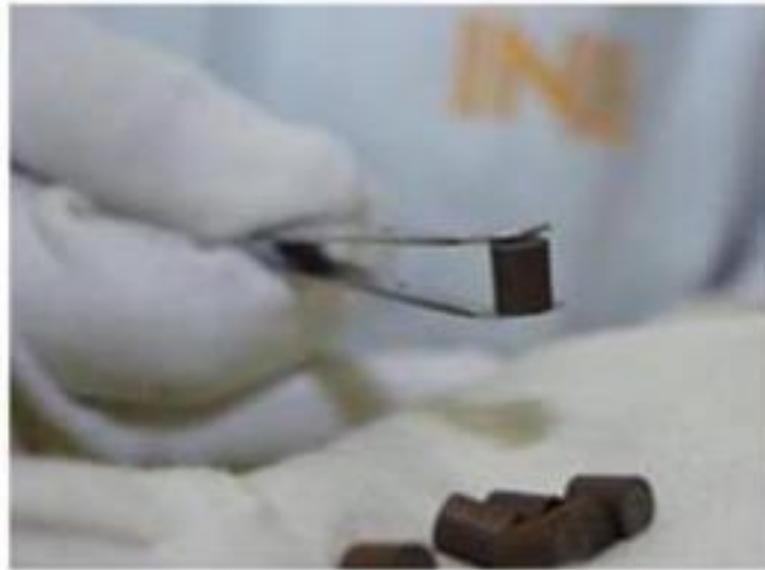
CICLO DO COMSUTÍVEL NUCLEAR



Etapas do Ciclo do Combustível Nuclear até a Geração de Energia – fonte INB

CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Produção das pastilhas de dióxido de urânio



Pastilha do elemento combustível de Angra 1 – fonte INB S/A

CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Montagem dos elementos combustíveis.



Elemento combustível da Central de Angra 1 – fonte INB S/A

USINA NUCLEAR

- Classificação quanto ao funcionamento do reator (mais comuns):
 - PWR – Reator a água pressurizada (do inglês *pressurized water reactor*)
 - BWR – Reator a água fervente (do inglês *boiling water reactor*)

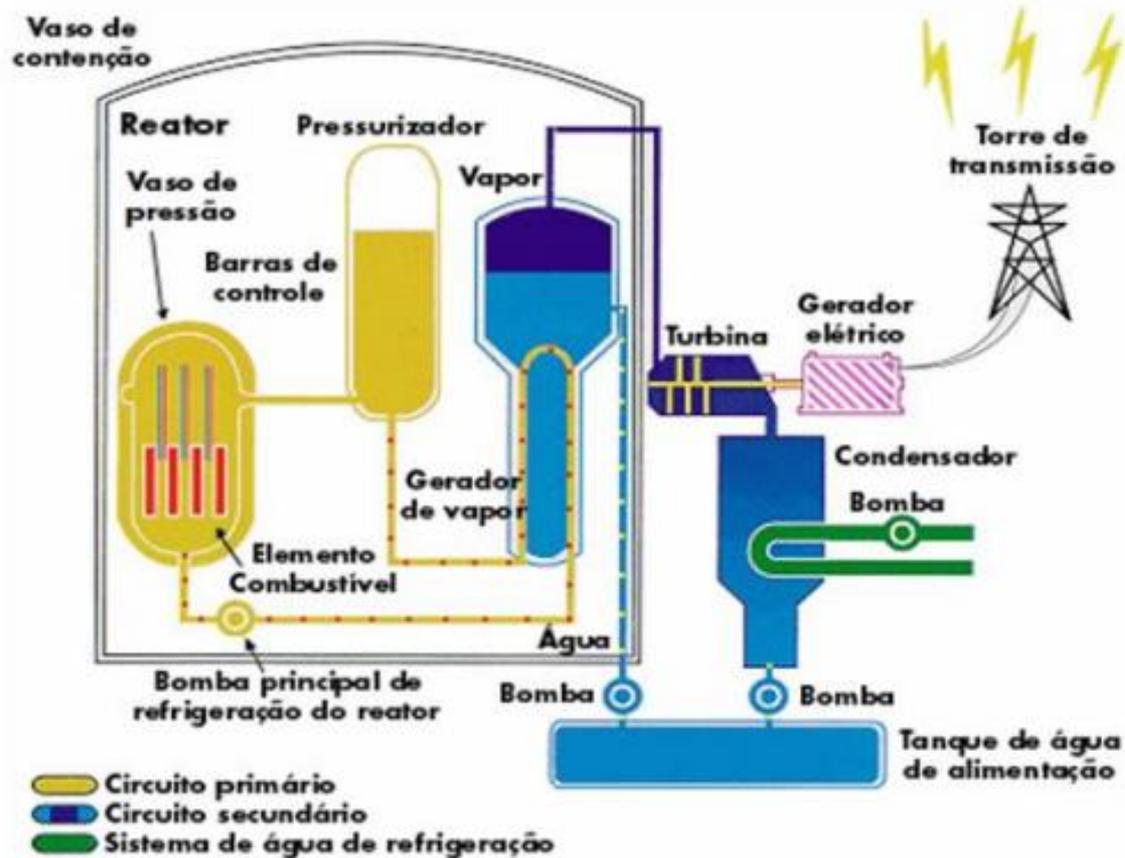


Cofrentes (Espanha) é uma usina BWR



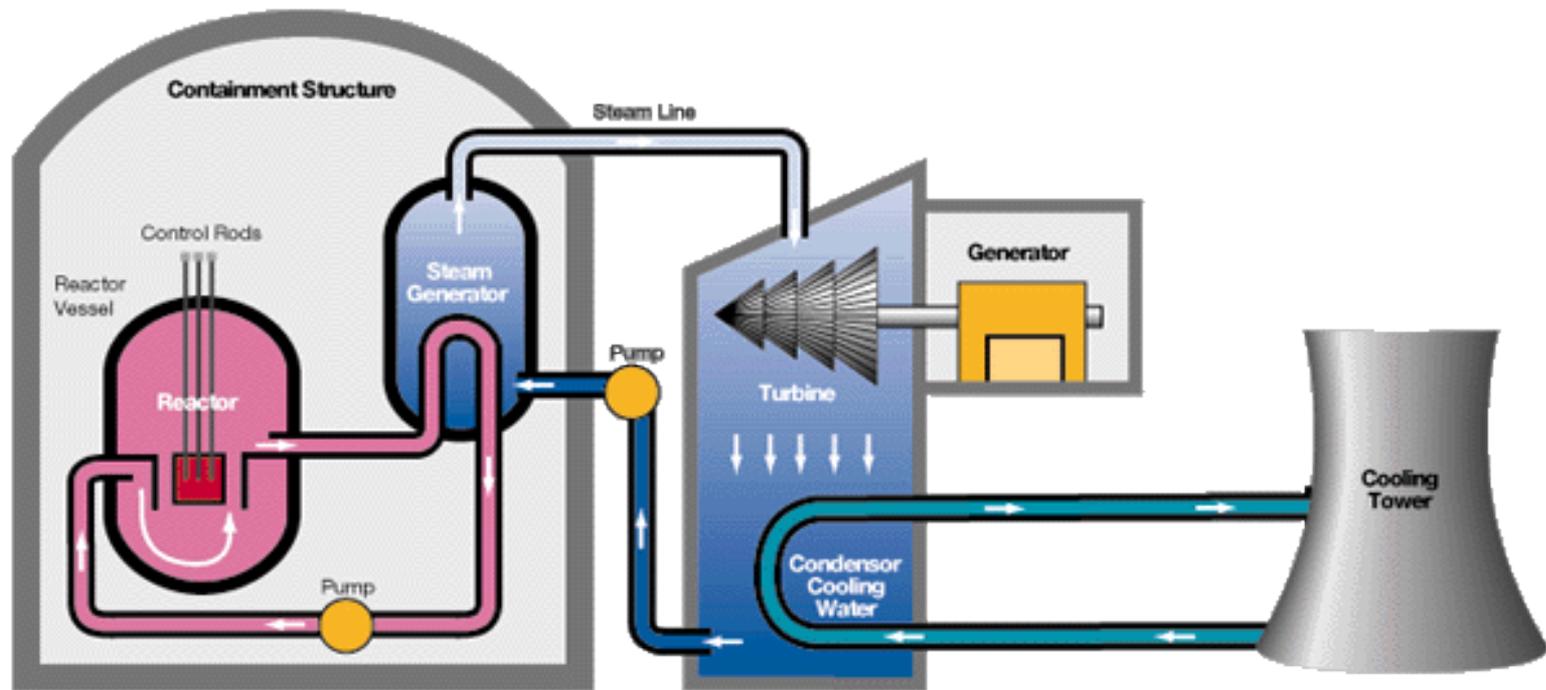
Angra 1 e 2 (Brasil) são usinas PWR

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO: PWR



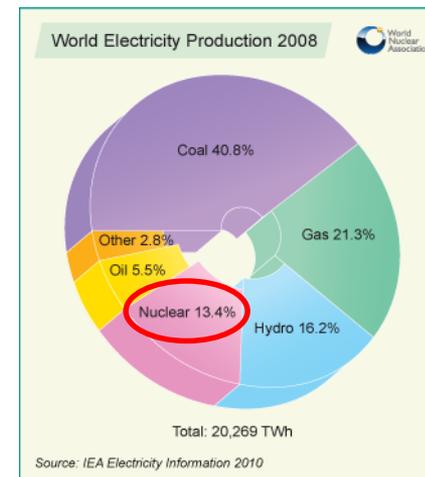
Esquema de funcionamento de geração de energia elétrica term nuclear – fonte
ELETRONUCLEAR

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO: BWR



ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

- As primeiras centrais nucleares comerciais entraram em operação em **1950**;
- Existem hoje mais de 430 reatores nucleares comerciais que operam em 31 países, com 372 mil MWe de capacidade total;
- Eles fornecem cerca de 13,5% da eletricidade do mundo;
- 56 países operam um total de cerca de 240 reatores de pesquisa e mais de 180 reatores nucleares;

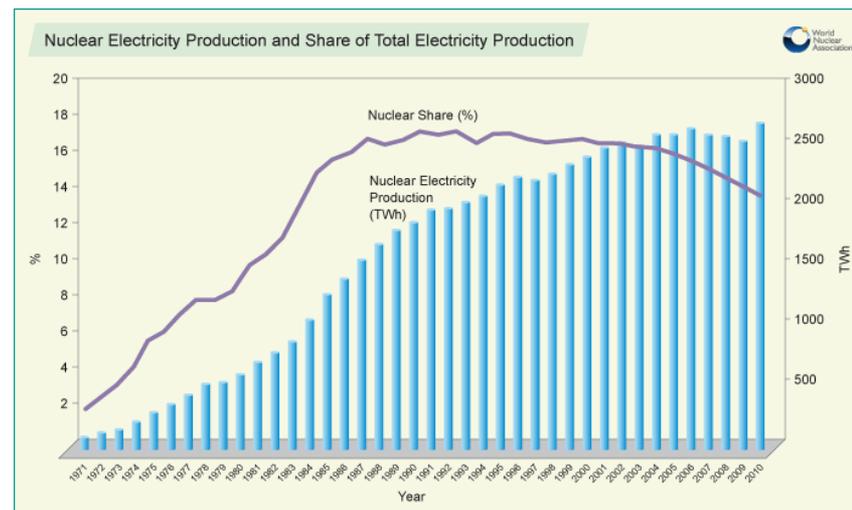


ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

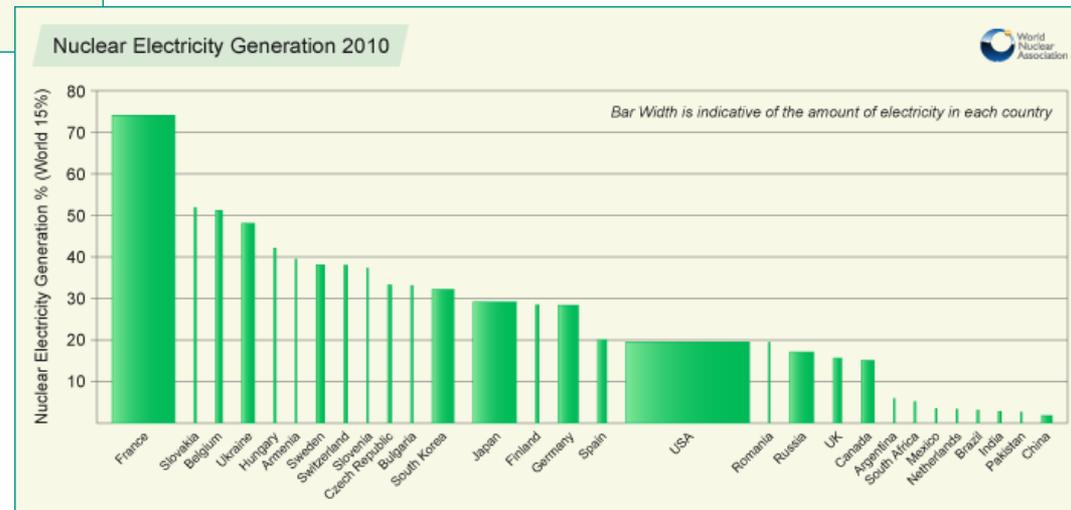
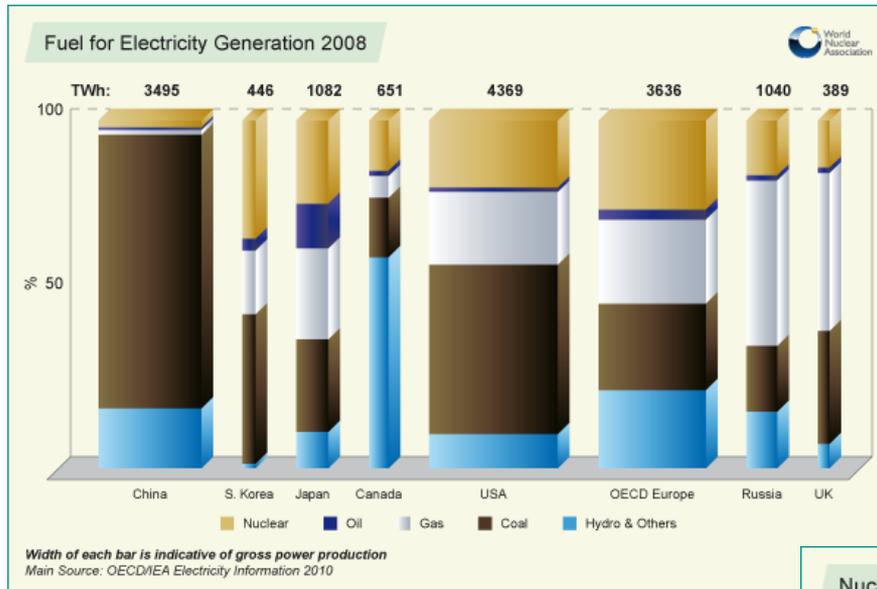
Tabela 8.4 - Maiores consumidores mundiais de energia nuclear (2007)

País	TWh	%
Estados Unidos	848,9	30,9
França	440,4	16,0
Japão	279,0	10,1
Rússia	159,8	5,8
Coréia do Sul	142,9	5,2
Alemanha	140,5	5,1
Canadá	93,3	3,4
Ucrânia	92,5	3,4
Suécia	67,4	2,5
China	62,9	2,3
Brasil	12,4	0,4
Total	2.748,9	100,0

Fonte: BP, 2008.



FONTES DE ENERGIA NO MUNDO



ENERGIA NUCLEAR NO MUNDO

Distribuição de Reatores pelo Mundo



FONTE: IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY

PAÍS	Nº DE REATORES	MWE	PAÍS	Nº DE REATORES	MWE
EUA	104	100.747	SUIÇA	5	3.263
FRANÇA	58	63.130	FINLÂNDIA	4	2.716
JAPÃO	54	46.821	HUNGRIA	4	1.889
RÚSSIA	32	22.693	ESLOVÁQUIA	4	1.816
COREIA DO SUL	21	18.698	ARGENTINA	2	935
ÍNDIA	20	4.391	BRASIL	2	1.884
REINO UNIDO	19	10.137	BULGÁRIA	2	1.906
CANADÁ	18	12.569	MÉXICO	2	1.300
ALEMANHA	17	20.490	PAQUISTÃO	2	425
UCRÂNIA	15	13.107	ROMÊNIA	2	1.300
CHINA	13	10.058	AFRICA DO SUL	2	1.800
SUÉCIA	10	9.298	ARMÊNIA	1	375
ESPAÑHA	8	7.514	HOLANDA	1	487
BÉLGICA	7	5.926	ESLOVÊNIA	1	666
REP. CHECA	6	3.678			

VISÃO DA ENERGIA NUCLEAR APÓS JAPÃO

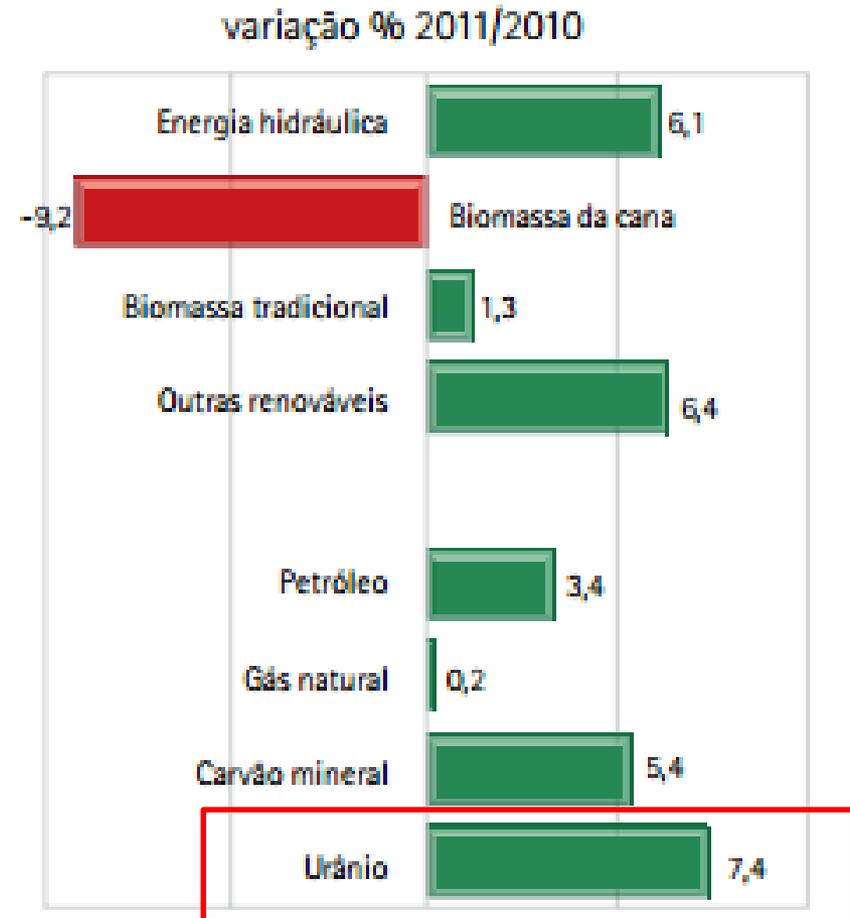
- Após o acidente nuclear de Fukushima, no Japão, a energia nuclear passou a ser ainda mais “abominada” pelo senso comum.
- Um dos seus principais usuários, a **Alemanha, desativou 8 dos 17 reatores nucleares presentes no país e pretende desativar todos até o ano de 2022.**⁽¹⁾
- O acontecido no Japão não mudou as perspectivas da energia no Brasil, que pretende até 2030 instalar usinas no Nordeste do país.

⁽¹⁾: Existe uma grande ironia neste caso da Alemanha, que desativou seus reatores e passou a comprar energia da França, esta que possui a energia nuclear como principal fonte em sua matriz energética.



ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

Fonte	em Mtep	
	2011	2010
RENOVÁVEIS	120,1	121,2
Energia hidráulica e eletricidade	39,9	37,7
Biomassa da cana	42,8	47,1
Biomassa tradicional	26,3	26,0
Outras renováveis	11,1	10,4
NÃO RENOVÁVEIS	152,2	147,6
Petróleo	105,2	101,7
Gás natural	27,6	27,5
Carvão mineral	15,2	14,5
Urânio (U₃O₈)	4,1	3,9



ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

- O Brasil possui duas usinas tipo PWR (urânio enriquecido e água leve pressurizada), situadas no município de Angra dos Reis – RJ. Angra I tem capacidade instalada de 657 MW.
- Angra II é uma usina com reator PWR também, adquirida durante a vigência do acordo Brasil-Alemanha. A usina tem capacidade instalada de 1.350 MW.
- Além disto, a já em construção da usina Angra III, adicionará mais 1350 MW ao sistema energético. Teremos assim , um parque de energia nuclear gerando 3300 MW consumindo 750 t/ano de U3O8.

ENERGIA NUCLEAR NO BRASIL

Tabela 9
GERAÇÃO NUCLEOELÉTRICA NO BRASIL – PNE 2030

Usina	Potência (MW)	Conc. U308 (t)	Conversão UF6 (t)	Enriquecimento UTS (t)	Elemento Combustível	Status
Angra 1	650	150	128	90	17	Em operação
Angra 2	1350	290	246	176	30	Em operação
Angra 3	1350	290	246	176	30	2013/15
Sub total 1		730	620	442	77	
Nuclear 4	1000	225	190	135	24	Prev. 2020
Nuclear 5	1000	225	190	135	24	Prev. 2025
Nuclear 6/7	2x1000	450	380	270	48	Prev 2030
Total	7.350	1.630	1.380	982		

Fonte: INB

http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=uS7WJ0pl9Po

AVALIAÇÃO ENERGIA NUCLEAR

Vantagens:

- Não contribui para o efeito estufa;
- Não utiliza grandes áreas de terreno;
- Pouco ou quase nenhum impacto na biosfera;
- A quantidade de resíduos é extremamente pequena e compacta;
- A tecnologia de processo é bastante conhecida;
- Risco de transporte significamente menor quando comparado ao gás e ao óleo das termoelétricas;
- Não necessita de armazenamento da energia produzida em baterias;

AVALIAÇÃO ENERGIA NUCLEAR

Desvantagens:

- Dificuldade no armazenamento de **resíduos nucleares**, principalmente em questões de localização e segurança;
- Os resíduos produzidos emitem radioatividade durante muitos anos;
- Necessidade de se isolar a central após seu encerramento;
- É mais cara se comparado as outras fontes de energia;
- Risco de acidente nuclear na central.

BIBLIOGRAFIA

<http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/#.Ua1JPNLVCRN>

https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf

http://www.inb.gov.br/pt-br/webforms/RelAtividades.aspx?secao_id=11

<http://www.biodieselbr.com/energia/nuclear/energia-nuclear.htm>

<http://www.cnen.gov.br/ensino/energ-nuc.asp#fis>

https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3971

<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000046.pdf>

<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/uranio-e-derivados>

<http://www.esg.br/uploads/2012/03/OLIVEIRAMarcos.pdf>

<http://www.nuclear.ufrj.br/>

<http://www.slideshare.net/TaylorCarli/energia-nuclear-4965303>