

Fissão nuclear: energia farta disponível para a humanidade

Nuclear fission: abundant energy available to humanity

Odilon A. P. Tavares*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCTI,

Rua Dr. Xavier Sigaud 150, Rio de Janeiro, RJ – 22290-180, Brasil

Resumo: Nos anos 1940, o mundo tomou conhecimento de que a quantidade de energia primária proveniente das transformações do núcleo atômico é da ordem de milhão de vezes maior do que a queima de lenha, carvão ou petróleo. Em particular, a fissão nuclear de urânio e plutônio pode gerar algo como 20 milhões de kWh por quilograma de material. Os benefícios para a sociedade começaram a aparecer nos anos 1950 e, hoje, só no item eletricidade, cerca de um bilhão de pessoas no mundo são beneficiadas, além do uso cotidiano de radioisótopos em milhões de procedimentos de medicina nuclear. E tudo isso sem produzir os indesejáveis gases de efeito estufa. Os recursos mundiais do minério de urânio são fartos (cerca de 7 milhões de toneladas; no Brasil, 326 mil toneladas) e, juntamente com a experiência acumulada de 60 anos no domínio das tecnologias nucleares, permitem trazer benefícios enormes para um número de pessoas cada vez maior. Tório é cerca de três vezes mais abundante do que urânio e afigura-se como o combustível do futuro, sem os incômodos da produção de plutônio, sem contar com a redução significativa dos rejeitos radioativos. O tema é apresentado em três módulos: *i)* origens da era nuclear; *ii)* o fenômeno da fissão nuclear; *iii)* energia nuclear para o bem da humanidade.

Palavras chave: fissão nuclear; era nuclear; energia nuclear; rejeitos radioativos; tório como combustível; combustíveis fósseis; fontes renováveis de energia.

Abstract: In the 1940s, the world became aware that the amount of primary energy released from atomic nucleus transformations is of the order of a million times greater than the burning of wood, coal or oil. In particular, the nuclear fission of uranium and plutonium can generate as many as 20 million kWh per kilogram of material. The benefits to society began to appear in the 1950s, and today, only in the item electricity, about one billion people in the world are benefited, in addition to the use of radioisotopes in millions of nuclear medicine procedures every day, without producing the undesirable greenhouse gases. The world's resources of uranium are plentiful (about 7 million tons; in Brazil, 326,000 tons) and, together with the accumulated experience of 60 years in the field of nuclear technologies, allow bringing huge benefits to an increasing number of people. Thorium is about three times more abundant than uranium, and it appears as the fuel of the future, without the inconvenience of plutonium production, not to mention the significant reduction of radioactive waste. The subject is displayed in three modules: *i)* origins of the nuclear age; *ii)* the phenomenon of nuclear fission; *iii)* nuclear energy for the benefit of mankind..

Keywords: nuclear fission; nuclear era; nuclear power; radioactive waste; Thorium as fuel; fossil fuels; renewable energy sources.

*Electronic address: oaptavares@cbpf.br

Conteúdo

– Prólogo	3	– Reprocessamento e o crescimento da potência nucleoelétrica no mundo	22
– Antecedentes imediatos à fissão nuclear	4	– Desenvolvimento humano e consumo de eletricidade ..	23
– Descoberta da fissão pela evidência química	6	– Índice de desenvolvimento nuclear e novos reatores ...	24
– Fissão nuclear e a reação em cadeia	7	– Fatalidades e acidentes na geração de eletricidade	25
– A era nuclear, o Projeto Manhattan e o término da 2 ^a Guerra Mundial.....	9	– Tório: combustível do futuro	27
– O processo e a energética da fissão nuclear	10	– Brasil: energia com fartura e sustentabilidade	28
– Reatores para produção de radioisótopos	14	– Aspectos econômicos	29
– Reatores de potência nucleoelétrica no mundo	15	– Considerações sobre a energia da fissão nuclear na geração de eletricidade	31
– Geração de eletricidade e o ciclo do urânio como combustível	16	– Epílogo: despertar para o nuclear	32
– Recursos de urânio no Brasil e no mundo	18	– <i>Agradecimento</i>	32
– Produção de eletricidade e “cinzas” em um reator nuclear convencional	19	– Bibliografia	32
		– Apêndice: Tratamento às “cinzas” nucleares (ou aos rejeitos radioativos).....	33
		– Sobre o autor	34

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

(Fundado em 15 de janeiro de 1949)

COLÓQUIOS CBPF



Centro Brasileiro de
Pesquisas Físicas

Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



FISSÃO NUCLEAR: ENERGIA FARTA DISPONÍVEL PARA A HUMANIDADE

Odilon A. P. Tavares - CBPF/MCTI

- Rio de Janeiro, 07 de abril de 2015 -

Prólogo

Dois foram os motivos que me levaram a preparar a presente publicação. O primeiro insere-se num contexto histórico, lembrando que neste ano de 2015, no dia 10 de agosto, completam 70 anos do término da 2ª Guerra Mundial com a rendição do Japão às forças aliadas, fato que se seguiu de imediato ao lançamento das bombas por fissão nuclear sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki (06 e 09 de agosto, respectivamente, do ano de 1945). Ficou assim demonstrado para o mundo a extraordinária quantidade de energia contida nos artefatos de poucos quilogramas de urânio e plutônio, de poder destruidor jamais visto, e em curtíssimo período de tempo, com o sacrifício de centenas de milhares de pessoas. O segundo diz respeito à crise energética por que passa o Brasil em decorrência da escassez de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas que, em consequência, passaram a produzir uma menor quantidade de eletricidade para os con-

sumidores, levando o setor elétrico a complementar o sistema de abastecimento de energia elétrica com sistemas geradores que utilizam combustíveis fósseis, elevando a tarifa de eletricidade e ao mesmo tempo contribuindo para o aumento da produção de gases de efeito estufa. Ambos os motivos estão diretamente ligados ao fenômeno da fissão do núcleo atômico, processo físico capaz de disponibilizar para o bem da humanidade energia limpa com fartura, milhões de vezes maior do que as demais fontes produtoras de eletricidade. Com o objetivo de instruir as pessoas interessadas em saber o que é a fissão nuclear e os benefícios que ela tem trazido (e pode trazer) para o ser humano, o tema tem sido apresentado, ainda que resumidamente, em palestras pelo autor no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF, Centro Federal de Educação Tecnológica-CEFET/RJ (*campus* Petrópolis), e outros, e agora vem aqui registrado na forma de texto-legenda para a revista *Ciência e Sociedade*, editada pelo CBPF.

1934: Descobertas em Roma, prenúncio em Berlim

Roma (fev-mar): Fermi e equipe: **Radioatividade artificial induzida por nêutrons**

(abr-mai): Fermi e equipe: $n + U \rightarrow$ transurânicos
(conclusão equivocada!)

Berlim (set): Ida Noddack: i) contestou a conclusão de Fermi sobre transurânicos; ii) **mencionou pela 1ª vez ser possível a fissão do U.**

Roma (out): Fermi e equipe descobrem a **moderação de nêutrons**

n's rápidos $\rightarrow$ **parafina** $\rightarrow$ n's lentos

**Chave para a
Energia Nuclear por fissão**



Química alemã
Ida Noddack
(1896-1978)



Físico Italiano
Enrico Fermi
(1901-1954)

L. Szilárd acreditou em Ida Noddack, contestando assim a interpretação de Fermi em ter obtido transurânicos.

- Intensifica-se a perseguição dos nazistas aos judeus.
- Adolf Hitler adota o título de Führer (Líder) do 3º Reich (Alemanha).
- Físicos emigram: Einstein para New Jersey, Hans Bethe para a América, Szilárd para a Inglaterra, Bernard Gross para o Rio de Janeiro e, por recomendação de Fermi, Gleb Wataghin para São Paulo.

O ano de 1934 foi de importantes e novas surpresas na física nuclear, mas também cruel para o mundo ocidental. Em Paris, o casal de químicos franceses Irène Curie (1897-1956) e Frédéric Joliot (1900-1958) descobriu a radioatividade artificial quando bombardearam alumínio com partículas alfa, obtendo um nêutron e fósforo ativo, emissor de pósitron (elétron positivo) com meia-vida de dois minutos e meio, transformando-se no produto estável silício. Como os nêutrons não possuíam carga elétrica, em Roma, o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954) e sua equipe, no período fevereiro-março, se serviram dos nêutrons para provocar com maior facilidade a radioatividade artificial em um grande número de elementos ao longo da Tabela Periódica, o que foi conseguido com êxito. Em abril-maio daquele ano, quando bombardearam urânio com nêutrons, o grupo de Roma concluiu (equivocadamente) ter produzido novos elementos artificiais, os transurânicos, isto é, de número atômico Z maior do que o do urânio ($Z = 92$), último elemento da Tabela Periódica encontrado na natureza. Em setembro, em Berlim, a química alemã Ida Noddack (1896-1978) contestou a conclusão de Fermi a respeito da produção de transurânicos, e mencionou pela primeira vez ser possível a fissão do urânio, isto é, o urânio poderia dividir-se em dois fragmentos de massa intermediária quando bombardeado por nêutrons. Porém, como ela não fizesse a prova experimental, tudo ficou na esfera das conjecturas. Em outubro daquele ano, em

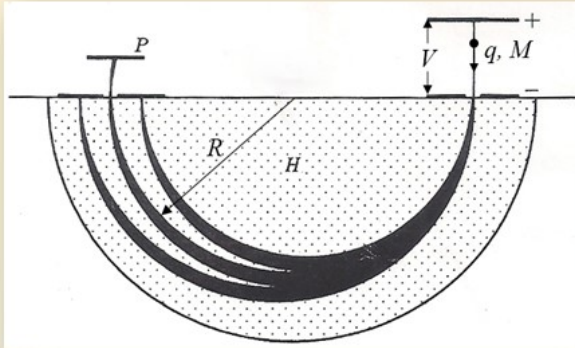
Roma, Fermi e seus assistentes descobrem o que chamaram de “moderação de nêutrons”, isto é, a diminuição da energia cinética dos nêutrons rápidos de uma fonte quando estes atravessam materiais hidrogenados, como a parafina. O fenômeno era o resultado das colisões elásticas principalmente com os prótons em repouso no material, o que fazia com que os nêutrons rápidos incidentes se tornassem nêutrons “lentos” (ou térmicos), de energia cinética bem menor. Esta foi uma descoberta-chave para o futuro funcionamento dos reatores na produção de energia pela fissão nuclear.

Entretanto, essas e outras descobertas científicas transcorreram num ambiente extremamente hostil e cruel na Europa daquela época. Já em 1933, o líder político de origem austríaca Adolf Hitler (1889-1945) era nomeado chanceler do Terceiro Reich na Alemanha, e então começou a perseguição implacável dos nazistas aos judeus e àqueles de origem não-ariana. Muitos dos perseguidos conseguiram emigrar, inclusive cientistas de diferentes nacionalidades.

1935: Identificação do Isótopo ^{235}U

ISÓTOPOS e Abundância Isotópica

1920: Espectrômetro de Dempster



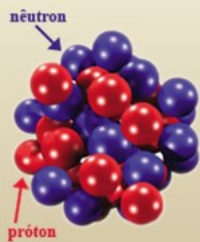
$$MV = \frac{q}{2} (R \cdot H)^2$$



Físico canadense
Arthur Dempster
(1886-1970)

Descobridor do isótopo
U-235 em 1935

Núcleo Atômico



Isótopos do Urânio

Nº Atômico Z	Nº de Massa A	Nº de Nêutrons N	% de átomos
92	234	142	0,0054
92	235	143	0,7204
92	238	146	99,2742

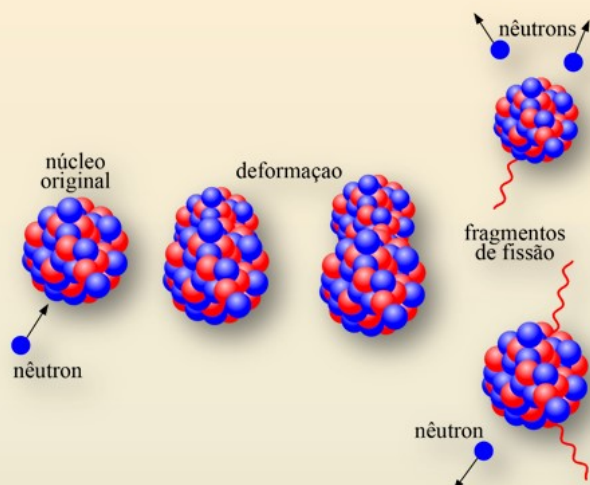
O físico teórico altamente prestigiado de origem alemã, Albert Einstein (1879-1955), transferiu-se para New Jersey (EUA); o físico húngaro Leó Szilárd (1898-1964) foi para a Inglaterra e depois seguiu para os EUA. Szilárd havia acreditado em Ida Noddack sobre a possibilidade do urânio se quebrar em dois fragmentos quando bombardeado por nêutrons. Visionário que foi, Szilárd conjecturou ser possível construir uma arma de enorme poder destruidor utilizando a fissão do urânio, pelo que patenteou na Inglaterra, em 1936, o princípio de uma bomba atômica.

Importante lembrar aqui que, três anos antes, o físico alemão Bernhard Gross (1905-2002) havia se transferido para o Rio de Janeiro, estabelecendo-se no INT (Praça Mauá). Também em 1934, por recomendação de Fermi, deu-se a vinda do físico de origem ucraniana Gleb Wataghin (1899-1986) para São Paulo, introduzindo no Brasil a pesquisa científica em física moderna. Três anos depois, também veio para o Brasil o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993), que se juntou a Gleb Wataghin em São Paulo.

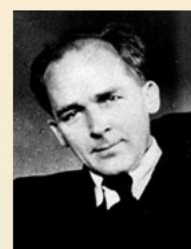
A palavra *isótopos* aplica-se a espécies nucleares diferentes, porém de um mesmo elemento químico, isto é, núcleos atômicos diferentes que ocupam a mesma posição na Tabela Periódica. Isótopos foram percebidos pela primeira vez pelo químico inglês Frederick Soddy (1887-1956) em 1902, quando notou que o chumbo proveniente das desintegrações radioativas sucessivas a partir do tório era ligeiramente mais pesado do que aquele proveniente do urânio. A variedade isotópica de um dado elemento é o resultado das diferenças de massa dos diferentes núcleos desse elemento, justamente por eles possuírem números diferentes de nêutrons. O físico canadense Arthur Dempster (1886-1970) desenvolveu, em 1920, um dos instrumentos chamados espectrômetros de massa, de grande precisão, com o qual foi possível obter a composição isotópica de um grande número de elementos. Dempster, em 1935, obteve pela primeira vez a composição isotópica do urânio, descobrindo o isótopo de número de massa 235 (^{235}U), de 92 prótons e 143 nêutrons, o qual comparece no urânio natural na proporção de 0,72% de átomos. Quatro anos depois ficaria compreendido que a fissão do urânio por nêutrons era o resultado da absorção de nêutrons lentos pelo isótopo ^{235}U .

Dez/38 – Set/39: Um novo, inesperado fenômeno nuclear foi descoberto e firmemente estabelecido:

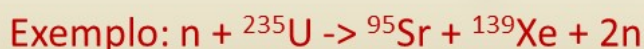
A FISSÃO DE NÚCLEOS DE URÂNIO E TÓRIO POR BOMBARDEAMENTO COM NEUTRONS



Químico Alemão
Otto Hahn
(1879 – 1968)



Químico Alemão
Fritz Strassmann
(1902 – 1980)



- Aumenta o radicalismo do regime nazista contra os judeus.
- Anexação da Áustria (1938) e da Tchecoslováquia (1939) à Alemanha.



A física da Fissão Nuclear

Física austríaca
Lise Meitner
(1878 – 1968)

Foi na época conturbada pela força e perseguição implantadas pelo regime nazista do final dos anos 1930 que teve lugar uma das mais importantes descobertas da física nuclear, responsável pela total mudança dos destinos da Humanidade. Grupos de físicos e químicos na Europa haviam se debruçado sobre a importante e desafiadora conclusão a respeito dos transurânicos colocada por Fermi e contestada pelos Noddack e Szilárd. Pelo menos três desses grupos se destacaram em desvendar o mistério: Fermi e sua equipe em Roma, Joliot-Curie em Paris, e a física austríaca Lise Meitner (1878-1968), que à época trabalhava em conjunto com os químicos alemães Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980) em Berlim.

Por essa ocasião, aumentara o radicalismo do regime nazista de Hitler, e em 1938 deu-se a anexação da Áustria e parte da Tchecoslováquia (hoje República Tcheca) à Alemanha. Fermi, que era casado com uma judia (Laura Fermi), viu-se obrigado a abandonar a Itália e, em dezembro de 1938, passou pela Suécia e emigrou com a família para os EUA.

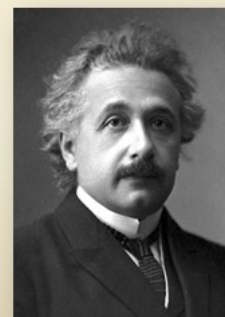
O mesmo aconteceu com Lise Meitner (também judia), que em julho do mesmo ano refugiou-se na Suécia, e em seguida partiu para a Inglaterra.

Coube aos químicos alemães Hahn e Strassmann anunciarem, em dezembro de 1938, a prova insuspeitável da presença de isótopos de bário e de lantânio (posteriormente de estrôncio e ítrio) como resultado do bombardeamento de urânio por nêutrons, isto é, urânio (e também tório) quando bombardeado por nêutrons produzia elementos identificáveis de números atômicos intermediários ($Z = 38, 39, 56, 57$, e outros) na Tabela Periódica. Eram as primeiras evidências químicas para o novo fenômeno nuclear.

1939: CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DA FISSÃO NUCLEAR

- A quebra do núcleo em 2 fragmentos de massas comparáveis;
- A descrição do novo fenômeno pelo **Modelo da Gota**;
- A predição de **distribuições de carga, massa e energia cinética** dos fragmentos de fissão;
- A detecção de uma **ionização elevada** causada pelos fragmentos de fissão;
- A estimativa de **~200 MeV** liberada no processo (**~ 0,8 MeV/nucleon**);
- A **emissão de 2 a 3 nêutrons** por fissão;
- A fissão decorrente da **absorção de nêutrons lentos pelo isótopo ^{235}U** ;
- A descrição detalhada de uma possível reação em cadeia da fissão do urânio;

- 2/ago: Carta de A. Einstein ao Presidente norte-americano Roosevelt pedindo providências e apoio para combater o inimigo, pois os cientistas na Inglaterra e nos EUA receavam que os alemães pudessem fabricar uma arma de grande destruição. Após assinar a carta Einstein disse: ***“pela primeira vez na história o homem usará energia que não aquela proveniente do sol”***.
- 1/set: Adolf Hitler invade a Polônia (INÍCIO DA II GUERRA MUNDIAL)



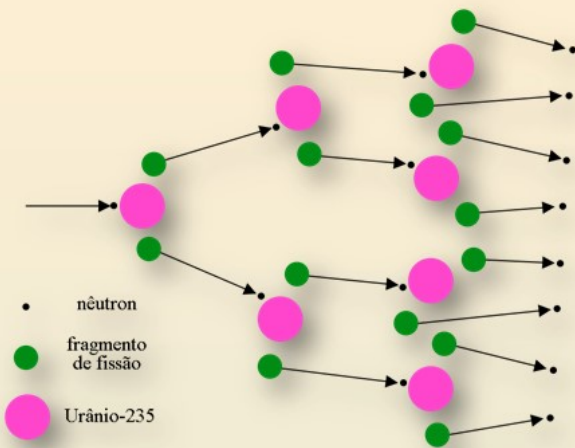
Físico alemão
Albert Einstein
(1879-1955)

Por carta, Lise Meitner soube da grande novidade e, prontamente (janeiro de 1939), ela e seu sobrinho, o físico austríaco Otto Frisch (1904-1979), deram a correta interpretação física ao fenômeno, batizando-o de fissão, significando que os núcleos de urânio, pela ação dos nêutrons incidentes, partiam-se em fragmentos de massa intermediária comparáveis. Lise Meitner, então com 60 anos, foi a personagem central dessa descoberta: ela sugeriu o modelo nuclear da gota para explicar a fissão, e forneceu a correta estimativa de ~ 200 MeV (duzentos milhões de elétron-volts) para a energia liberada no processo em um único núcleo de urânio. Otto Frisch, logo em janeiro de 1939, previu a distribuição de carga, massa e energia cinética dos fragmentos de fissão, e forneceu a evidência física para o novo fenômeno mediante a detecção de uma ionização elevada provocada pelos fragmentos de fissão. No período março-abril de 1939, Fermi e Szilárd nos EUA, a equipe Joliot-Curie em Paris e outros grupos de pesquisa concluíram de seus experimentos que havia a emissão de 2 a 3 nêutrons por evento de fissão. Surpreendente foi a descrição detalhada de uma reação de fissão em cadeia divulgada pelo físico alemão Siegfried Flügge (1912-1997) em julho de 1939, criando a suspeita e o temor nos cientistas refugiados e nos que se sentiam ameaçados de que os alemães pudessem fabricar um artefato nuclear de alto poder de destruição. Finalmente, em setembro do mesmo ano, o modelo nuclear da gota foi utilizado pelo físico dina-

marquês Niels Bohr (1885-1962) juntamente com o físico norte-americano John Wheeler (1911-2008) para explicar com detalhes o mecanismo da fissão nuclear, ocasião em que ficou claro que a fissão era decorrente da absorção de nêutrons lentos pelo isótopo ^{235}U .

Ao mesmo tempo, já em março daquele ano, Hitler havia anexado à Alemanha o restante da Tchecoslováquia (Bohemia). Em julho, os cientistas estabelecidos nos EUA e liderados por Leó Szilárd redigiram uma carta a ser endereçada ao Presidente norte-americano Franklin D. Roosevelt (1882-1945) alertando-o e pedindo providências e apoio do governo para combater o inimigo, pois os cientistas na Inglaterra e nos EUA tinham receio de que os alemães pudessem fabricar uma arma de alto poder destrutivo. A carta foi assinada por Albert Einstein em 02 de agosto, após o que Einstein disse: “...pela primeira vez na história o homem usará energia que não aquela proveniente do Sol”. Um mês depois, em 1º de setembro, Hitler invade a Polônia dando início à 2ª Guerra Mundial.

FISSÃO NUCLEAR: ENERGIA PRIMÁRIA COM FARTURA



- 1940: Invasão da Noruega, Dinamarca, Holanda, Bélgica e França
EIXO ALEMANHA – ITÁLIA – JAPÃO
Início do bombardeio sobre Londres
- 1941: Iugoslávia e Grécia são tomados
Ataque dos Japoneses ao Havaí
EUA entram na Guerra

Material	Valor energético (MJ/kg)	Valor energético relativo	Equivalência energética
Urânio e/ou Plutônio*	80 M	3,3 M	1 kg
Gasolina	47,3	2,0	2,2ML
Óleo Diesel	44,8	1,9	2,0ML
Carvão Preto	32,5	1,3	2400 ton
Lenha	24,2	1,0	3300 ton

$$1 \text{ fissão} \rightarrow \sim 200 \text{ MeV} \approx 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

Fissão por nêutrons lentos

Núcleo alvo	E* [MeV]	B _f [MeV]	Tipo de Núcleo	Formação
Th-232	4,8	~ 5,7	Fértil	Natureza
U-233	6,8	~ 5,6	Físsil	Th → U*
U-235	6,5	~ 5,8	Físsil	Natureza
U-238	4,8	~ 5,4	Fértil	Natureza
Pu-239	6,5	~ 5,8	Físsil	U → Pu*

$$* (Z,A) + n \xrightarrow{2\beta} (Z+2,A+1)$$

O receio dos alemães avançarem nas pesquisas em direção à fabricação de uma arma com base na fissão do urânio não era para ser desprezado. De fato, os cientistas na Inglaterra e nos EUA já haviam percebido que a quantidade de energia a ser disponibilizada numa reação de fissão do urânio em cadeia (ver esquema no quadro) alcançaria valores milhões de vezes maiores do que com o uso dos combustíveis convencionais (óleo, gasolina, carvão etc. Ver tabela na parte superior com valores de hoje). Esta é, aliás, a grande característica para fins práticos do processo de fissão: a altíssima concentração de energia a ser liberada quando comparada aos processos de combustão química com combustíveis fósseis. Como se sabe, numa reação de combustão, cerca de 40-70 eV de energia são liberados, uma vez que tomam parte do processo apenas ligações de elétrons (força eletromagnética), enquanto que a fissão nuclear envolve energias de ligação de prótons e nêutrons (força nuclear), que em média é de ~ 7-8 MeV, e no balanço final de massa-energia chega a ser ~ 200 MeV por evento de fissão.

No início de 1940, Otto Frisch, então naturalizado inglês, e o físico alemão Rudolf Peierls (1907-1995), também radicalizado na Inglaterra, haviam chegado à conclusão de que era factível a fabricação de um artefato bélico com base na gigantesca quantidade de energia liberada no processo de fissão do urânio. Eles concluíram que a reação em cadeia explosiva seria possível com a fissão do ²³⁵U e

nêutrons rápidos. Esse estudo de viabilidade fazia parte do conteúdo do famoso Memorando Frisch-Peierls, de março de 1940, documento que convenceu seus colegas americanos e britânicos de que a bomba atômica era possível.

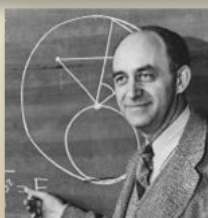
Ao mesmo tempo, o avanço das tropas nazistas seguia implacável. Naquele ano de 1940 deu-se a invasão na Noruega, Dinamarca, Holanda, Bélgica e na França. Juntaram-se as forças de Adolf Hitler, Benito Mussolini (1883-1945) e as do imperador Hiroito (1901-1989) para formar o EIXO ALEMANHA-ITÁLIA-JAPÃO, e começaram em setembro os bombardeios sobre Londres, que se estenderam até maio do ano seguinte. Concomitantemente, em Berkeley (EUA) eram produzidos pela primeira vez os elementos transurânicos, neptúnio e plutônio, sendo físsil o isótopo ²³⁹Pu (ver tabela na parte inferior). Esse isótopo veio a ser, cinco anos mais tarde, a matéria-prima usada na preparação da primeira bomba atômica, o chamado Teste Trinity. No ano seguinte (1941), a Iugoslávia e a Grécia foram tomadas pelas tropas nazistas. No Pacífico, em decorrência do ataque-surpresa à base naval norte-americana em Pearl Harbor (Havaí) pelos japoneses, em dezembro, os EUA declararam guerra ao Japão e, em consequência, a Alemanha e a Itália declararam guerra aos EUA. E, em 1942, era formada a frente dos Aliados, inclusive com a incorporação do Brasil, para combater as tropas inimigas na Europa.

CONTROLADA A ENERGIA LIBERADA NA FISSÃO NUCLEAR

- Reação em cadeia autossustentada -

02 dezembro, 1942: 1º Reator Nuclear (200W)

Inaugurada a Era Nuclear



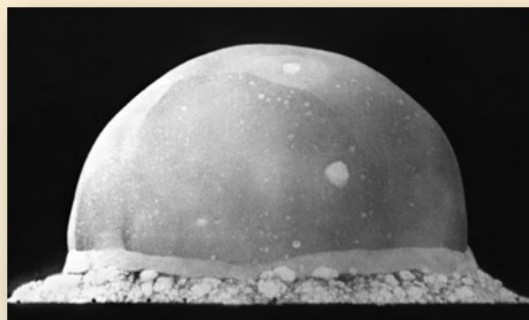
Liderado por
Enrico Fermi



Leona Marshall
(1919-1986)

PROJETO MANHATTAN

(1942-1946)



1945: 1ªs bombas por fissão nuclear

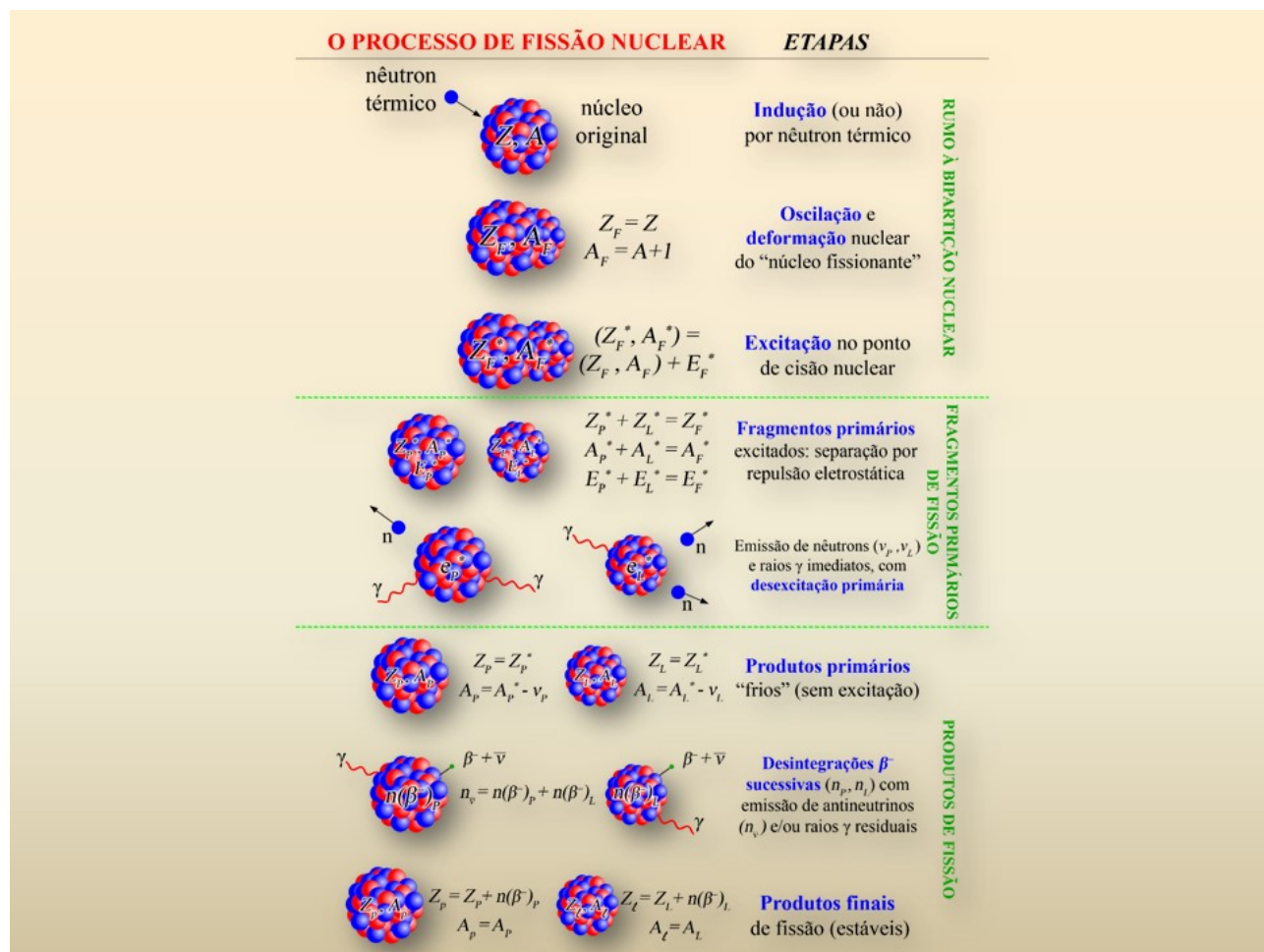
- | | |
|---------------|--|
| 02/mai | Queda e suicídio de Hitler |
| 07/mai | Rendição da Alemanha aos aliados |
| 16/jul | Teste Trinity: Pu^{239} , 23GWh |
| 26/jul | EUA, Inglaterra e China pedem a rendição do Japão. Como não houvesse resposta... |
| 06/ago | Hiroshima: U^{235} , 17GWh
Como ainda não houvesse resposta... |
| 09/ago | Nagasaki: Pu^{239} , 24GWh |
| 10/ago | Japão aceita a rendição |

De posse das informações contidas no Memorando Frisch-Peierls, os cientistas sediados nos EUA conseguiram convencer o governo norte-americano a apoiá-los, criando, no início de 1942, o que ficou conhecido como Projeto Manhattan, com o objetivo de construir uma bomba atômica. Um passo fundamental para o sucesso de tal empreendimento foi a demonstração, com êxito, da primeira reação em cadeia autossustentada com liberação de energia nuclear controlada. O feito foi conseguido na tarde de 02 de dezembro de 1942 por Enrico Fermi e sua equipe, ocasião em que fizeram funcionar, nas dependências da Universidade de Chicago, o primeiro reator nuclear que atingiu modestos 200 W. Este foi o acontecimento ímpar da história recente da humanidade, com o qual se inaugurou a chamada era nuclear. O químico norte-americano Linus Pauling (1901-1994) considerou o controle da energia liberada na fissão nuclear como o acontecimento mais importante da Ciência desde a conquista do fogo pelo homem primitivo.

O Projeto Manhattan mobilizou mais de 100 mil pessoas por cerca de três anos, e consumiu algo como 30 bilhões de dólares em valores atuais. Foi, até hoje, o maior empreendimento científico-tecnológico-inovador que o homem desenvolveu. Cerca de noventa cientistas, entre físicos, químicos e profissionais de várias outras áreas, bem como um grande número de engenheiros de diferentes especialidades, tomaram parte do Projeto. A maioria dos cientistas

tinha na época entre 30 e 35 anos de idade, e a média não passava dos 40 anos. Além de norte-americanos, um grande número deles era proveniente de várias nações da Europa, imigrantes que haviam procurado acolhida fugidos do regime nazista. A direção geral do Projeto ficou a cargo do físico norte-americano Robert Oppenheimer (1904-1967). O produto final imediato foram três bombas atômicas acionadas em julho e agosto de 1945 (a guerra na Europa já havia terminado com o suicídio de Hitler e a subsequente rendição da Alemanha aos aliados), pondo fim à 2ª Guerra Mundial com a rendição dos japoneses em 10 de agosto (alguns detalhes estão mostrados na figura).

Embora a energia proveniente da fissão dos núcleos de urânio tivesse sido obtida pela primeira vez de forma controlada no primeiro reator nuclear em Chicago (dezembro de 1942), as circunstâncias da guerra fizeram com que ela fosse utilizada de maneira totalmente descontrolada, com finalidade bélica, nas primeiras explosões nucleares do final da Segunda Grande Guerra, em agosto de 1945.



Terminado o grande conflito, os cientistas começaram a retornar a seus locais de trabalho: escritórios, laboratórios, oficinas, instalações e à atividade acadêmica nas universidades. Muitos físicos e químicos se debruçaram em investigar mais profundamente o fenômeno da fissão nuclear, coisa que ao tempo da guerra se tornara proibitivo. Nos anos 1950-60 inúmeros resultados importantes foram publicados sobre o mecanismo e as características da fissão dos núcleos pesados, notadamente os isótopos físeis de urânio e plutônio por nêutrons lentos, e a fissão espontânea dos isótopos par-par acima do tório, incluindo-se os tansurânicos.

O processo de bipartição de um núcleo pesado pode ser mais facilmente compreendido dividindo-o em três etapas (ver figura). Na primeira, o núcleo é atingido (ou não, no caso da fissão espontânea) por um nêutron térmico que prontamente é absorvido, provocando no núcleo composto uma oscilação levando-o a se deformar; quando o grau de

deformação é tal que não é mais possível retornar à forma original, o núcleo, agora com certa energia de excitação, parte-se, originando dois fragmentos de massas comparáveis e excitados, que se separam em direções opostas pela repulsão eletrostática. Na segunda etapa, os fragmentos primários excitados procuram descarregar seus excessos de energia emitindo nêutrons e raios gama (são os nêutrons prontos e gamas prontos), resultando assim os produtos primários de fissão, “frios”, porém com excesso de nêutrons em relação aos correspondentes isótopos estáveis. Finalmente, na terceira etapa, os produtos primários de fissão experimentam desintegrações β^- sucessivas acompanhadas da emissão de antineutrinos e, eventualmente, raios gama residuais (produtos intermediários de fissão) até se transformarem nos produtos finais de fissão estáveis.

ENERGÉTICA DA FISSÃO NUCLEAR

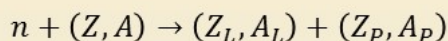
Excesso de massa atômica:

$$M[\text{u}]; 1\text{u} = (M(^{12}\text{C}))/12$$

$$\Delta M = M - A = m + Zm_e - A$$

$$\text{Massa nuclear: } m = \Delta M + A - Zm_e$$

- Fissão induzida por nêutron:**



- Energia Liberada na fissão:**

$$Q_f = m_n + m(Z, A) - [m(Z_L, A_L) + m(Z_P, A_P)]$$

$$Z = Z_L + Z_P, \quad A + 1 = A_L + A_P$$

$$Q_f = \Delta M(Z, A) - [\Delta M_L + \Delta M_P - \Delta M_n]$$

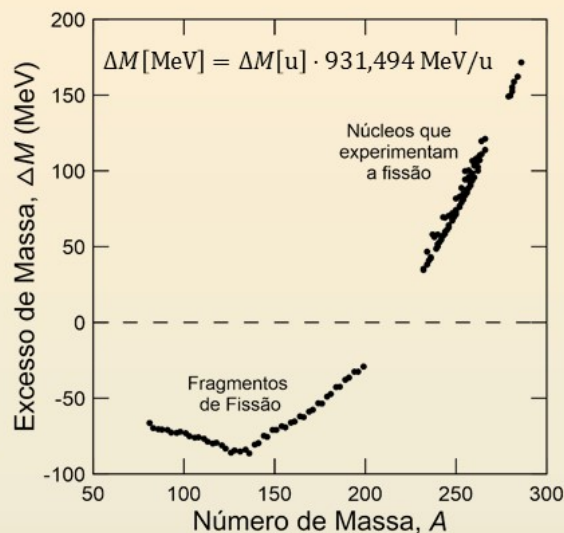
1º Exemplo: $n + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{96}\text{Sr} + ^{140}\text{Xe}$

$$Q_f = 40,921 - (-72,932 - 72,986 - 8,071) \approx 195 \text{ MeV}$$

- Fissão espontânea (suprimir ΔM_n)**

2º Exemplo: $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^{108}\text{Tc} + ^{144}\text{Cs}$

$$Q_f = 76,035 - (-75,919 - 63,27) \approx 215 \text{ MeV}$$



Os fragmentos primários de fissão (segunda etapa do processo) são os portadores de toda a energia primária liberada na fissão (cinética + excitação), conhecida como valor Q do processo. O valor Q é obtido do balanço de massa-energia dos núcleos envolvidos. Ocorre que, quando a massa atômica, M , é expressa em unidades de massa atômica, u (referida ao isótopo ^{12}C), a massa do átomo difere muito pouco do número de massa, A (total de prótons e nêutrons no núcleo), e a diferença $\Delta M = M - A$, definida como excesso de massa, é muito pequena, podendo ser positiva — caso dos núcleos de $A \gtrsim 210$ — ou negativa — núcleos de massa intermediária (ver o gráfico). Como na bipartição nuclear (induzida por nêutron ou espontânea) o número de partículas se conserva, o balanço de massa pode ser avaliado pelos excessos de massa (que são valores tabelados), como se mostra nos exemplos da figura.

A grande quantidade de energia disponibilizada na fissão é decorrente do fato de que a natureza atômica é tal que os núcleos que experimentam a fissão possuem excesso de massa positivo, e os fragmentos de fissão, negativo, de tal modo que no balanço de massa essas quantidades se somam em módulo. Dito de outra maneira, no processo de fissão há uma perda de massa (a massa do nêutron incidente somada à massa do urânio é maior do que a soma das massas dos fragmentos primários formados), a qual aparece sob a forma de energia (cinética + excitação) trazida pelos fragmentos primários. Essa foi a grande descoberta anunciada pela física austríaca Lise Meitner em janeiro de 1939.

II- ENERGIA SECUNDÁRIA: PRODUTOS DE FISSÃO

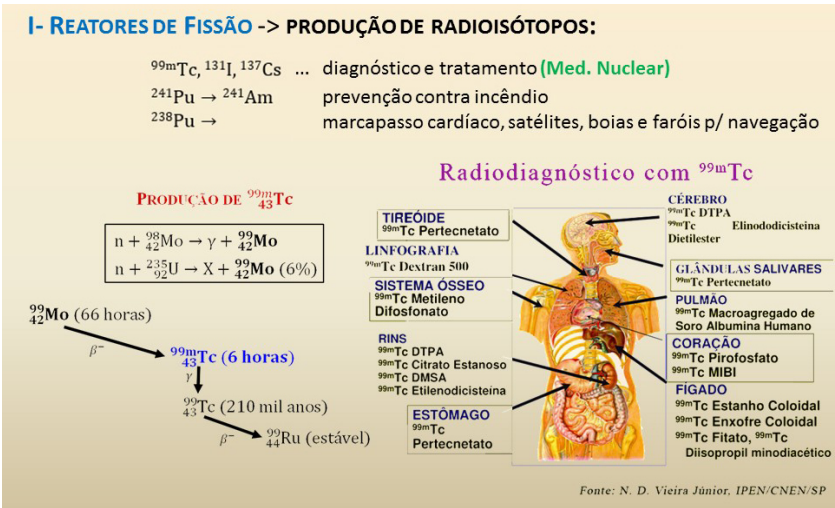
Tabela 2.3 - Energia total média secundária liberada na fissão, $\overline{T}_{\beta^-+\overline{\nu}}$.

Caso de fissão ^a	PRODUTOS DE FISSÃO			Decaimentos β^-			$\overline{T}_{\beta^-+\overline{\nu}}$ (MeV)
	Primários	Intermediários ^b	Finais ^b	n_L	n_P	$n_{\overline{\nu}}^c$	
$^{233}\text{U} + n_t$	^{94}Sr (75 s) $\rightarrow$	^{94}Y (18,7 m) $\rightarrow$	^{94}Zr (est.)	2			16,71
	^{138}Xe (14 m) $\rightarrow$	^{138}Cs (33 m) $\rightarrow$	^{138}Ba (est.)		2	4	
$^{235}\text{U} + n_t$	^{95}Sr (23,9 s) $\rightarrow$	^{95}Y (10,3 m) $\rightarrow$ ^{95}Zr (64 d) $\rightarrow$ ^{95}Nb (35 d) $\rightarrow$	^{95}Mo (est.)	4			24,16
	^{139}Xe (40 s) $\rightarrow$	^{139}Cs (9,3 m) $\rightarrow$ ^{139}Ba (83 m) $\rightarrow$	^{139}La (est.)		3	7	
$^{239}\text{Pu} + n_t$	^{99}Zr (2,1 s) $\rightarrow$	^{99}Nb (15 s) $\rightarrow$ ^{99}Mo (66 h) $\rightarrow$ ^{99}Tc (2×10^5 a) $\rightarrow$	^{99}Ru (est.)	4			18,27
	^{138}Xe (14 m) $\rightarrow$	^{138}Cs (33 m) $\rightarrow$	^{138}Ba (est.)		2	6	

^a $n_t \equiv$ nêutron térmico;
^b Formados por decaimentos β^- sucessivos a partir dos produtos primários; entre parênteses estão indicadas as meias-vidas dos produtos formados; s $\equiv$ segundo; m $\equiv$ minuto; h $\equiv$ hora; d $\equiv$ dia; a $\equiv$ ano.
^c $n_{\overline{\nu}} = n_L + n_P$ é o número total de anti-neutrinos emitidos.
⁺ $\overline{T}_{\beta^-+\overline{\nu}} \approx \sum Q_{\beta^-}$, isto é, a energia total secundária é aproximadamente igual à soma das energias dos decaimentos β^- sucessivos.

A terceira fase do processo de fissão é a que contempla os produtos de fissão: *i*) primários —formados logo após a emissão dos nêutrons e gamas imediatos pelos fragmentos primários; *ii*) intermediários—os que surgem após uma ou mais desintegrações β^- sucessivas a partir dos produtos primários; *iii*) finais—isótopos estáveis produzidos após ter sido completada a sequência de desintegrações β^- sucessivas. Como há pelo menos uns cinquenta modos diferentes para a bipartição nuclear, centenas de produtos de fissão (radioativos e/ou estáveis) são formados com liberação de energia (energia secundária de fissão), em decorrência dos decaimentos β^- sucessivos. Na tabela acima estão mostrados alguns poucos casos de formação de produtos de fissão

e a correspondente energia total secundária liberada. Nos exemplos mostrados, indo da esquerda para a direita, notar que, em geral, as meias-vidas vão aumentando após cada desintegração β^- (setas) até atingir o produto final estável. Os produtos de fissão com a energia secundária que carregam constituem o que podemos chamar de “cinzas” que resultam da produção de energia pela fissão nuclear. Exceto pelos casos de fissão espontânea (tório, urânio e transurânicos) a fissão nuclear induzida por nêutrons (^{233}U , ^{235}U e ^{239}Pu) ocorre nos dispositivos chamados “reatores de fissão”, que ao mesmo tempo funcionam como fonte de nêutrons, fábrica de radionuclídeos e geradores de energia.



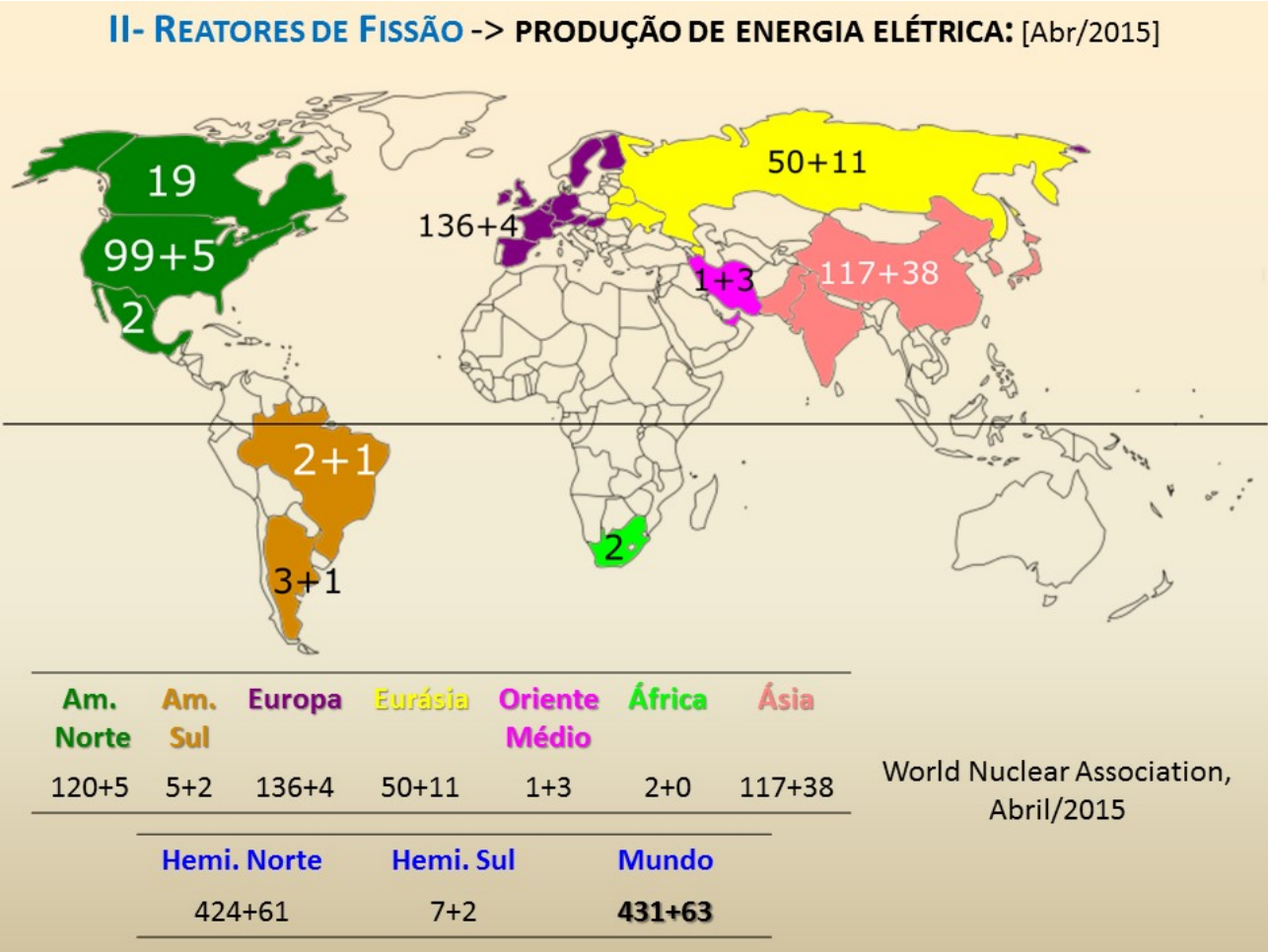
Uma das primeiras aplicações dos radioisótopos produzidos em reatores, e utilizados em larga escala até os dias de hoje, têm sido na Medicina Nuclear, seja em radiodiagnóstico (^{99m}Tc , ^{131}I), radioterapia (^{137}Cs), como também nos marcapassos cardíacos (^{238}Pu). Inúmeras outras aplicações dos radioisótopos podem ser encontradas na indústria, na agricultura, na navegação, prevenção contra incêndios e muito mais. O caso típico é o do uso do radioisótopo ^{99m}Tc (tecnécio, número atômico $Z = 43$; a letra m significa que o radioisótopo é produzido do decaimento

β^- do ^{99}Mo (molibdênio) para um estado de energia do ^{99}Tc acima do estado fundamental (^{99m}Tc , metaestado), o qual decai para o ^{99}Tc com meia-vida de 6 horas). ^{99m}Tc é largamente empregado no diagnóstico de uma variedade de órgãos do corpo humano (veja figura). Os reatores de fissão, sejam usados como fonte de nêutrons ou de produtos de fissão, são os dispositivos que fornecem o ^{99}Mo para dar origem ao ^{99m}Tc .



Reatores que produzem radioisótopos são absolutamente necessários para atender à grande demanda de radiodiagnósticos. Até há bem pouco tempo, estavam operando no mundo cerca de meia dúzia desses reatores (ver tabela). Exceto pelo reator OPAL na Austrália, os demais já funcionam por cerca de 50 anos ou mais, de modo que estão

próximos ao desligamento definitivo. Por essa razão, o Brasil tomou a decisão acertada de construir o seu Reator Multipropósito Brasileiro-RMB, que terá inúmeras finalidades, previsto inicialmente para entrar em funcionamento em 2017 (veja figura para outros detalhes).

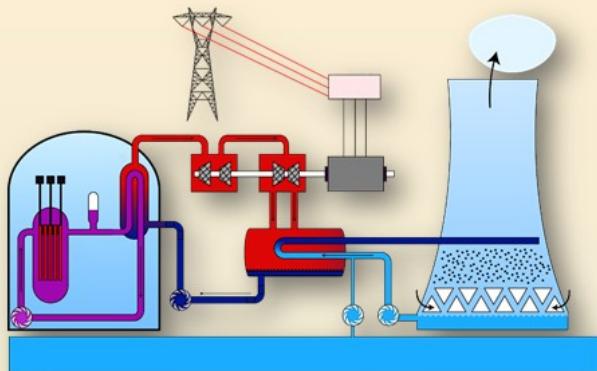


Reatores a fissão nuclear são dispositivos que essencialmente produzem uma extraordinária quantidade de energia (energia primária da fissão nuclear) que pode ser transformada em eletricidade para consumo em geral ou outras aplicações, como propulsão naval, dessalinização da água e a produção de hidrogênio a ser usado como combustível em veículos. A primeira unidade nuclear de produção de eletricidade em larga escala foi a de Calder Hall, localizada em Seascale (Reino Unido), que entrou em operação em outubro de 1956, e funcionou por 50 anos, fornecendo potência elétrica equivalente a um milhão e meio de lâmpadas de 60 W. Nos dias de hoje, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para assegurar a produção de energia nucleoeletrica com maior segurança, economia e de forma sustentável. A figura mostra a distribuição geográfica por continente dos reatores de potência operacionais em abril de 2015 (www.world-nuclear.org/, acesso em abril de 2015). Os nú-

meros que seguem ao sinal + indicam reatores em construção. A Europa contém o maior número deles (136), seguido da América do Norte (120) e Ásia (117), esta última a região onde se constrói o maior número de reatores de potência elétrica (38). Nota-se uma carência de unidades de geração nucleoeletrica no hemisfério Sul (menos de 2% do total em operação, e ~ 3% do total dos que estão sendo construídos). Os reatores em operação atualmente respondem por 381 GW_e (bilhões de Watt elétricos), dos quais apenas 1,4% atendem ao hemisfério Sul. Com a entrada em operação dos novos reatores nos próximos 3-5 anos espera-se um acréscimo de potência elétrica de ~ 70 GW_e, e dos que estão encomendados ou planejados para operarem nos próximos 10-15 anos, poderão ser adicionados outros ~ 186 GW_e.

GERAÇÃO NUCLEOELÉTRICA COM REATOR CONVENCIONAL

Nuclear > Mecânica > Térmica > Mecânica > Elétrica



Teor de ^{235}U no U-combustível: 3,5 %
Eficiência global média: $\sim 33\%$
Energia primária por fissão: $\sim 200\text{ MeV}$
($1\text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13}\text{ J}$)

Térmica Nuclear: $m_U [\text{ton/ano}] \approx 24\text{ P}_e [\text{GW}]$
Térmica a Diesel: $m_D [\text{ton/ano}] \approx 1,5\text{M P}_e [\text{GW}]$

$24\text{ ton } (^e\text{U}) \leftarrow 27\text{ ton } (^e\text{UO}_2) \leftarrow 35\text{ ton } (^e\text{UF}_6) \leftarrow$
 $288\text{ ton } (^n\text{UF}_6) \leftarrow 230\text{ ton } (^n\text{U}_3\text{O}_8)$

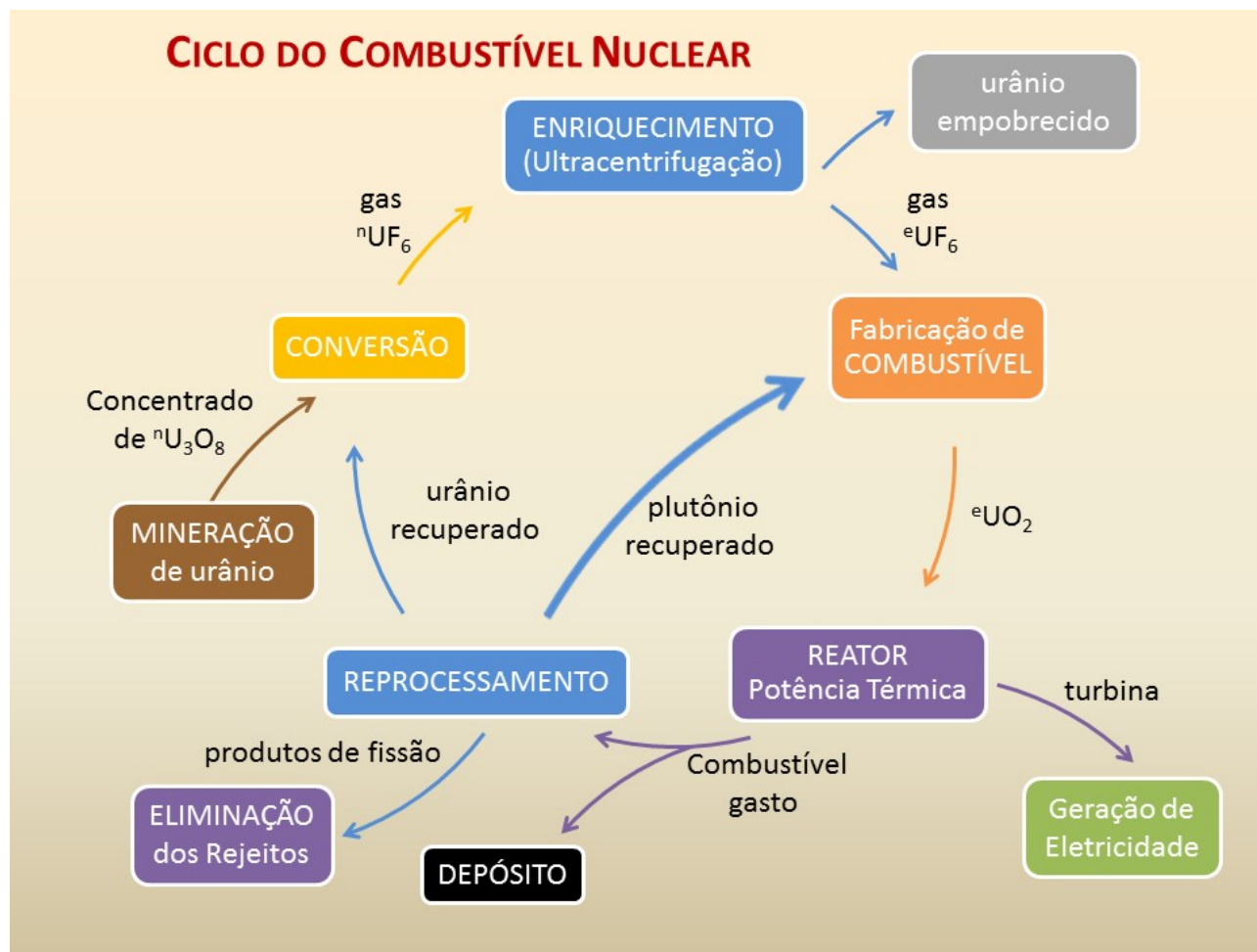
Ciclo do combustível

- Extração do minério de Urânio
- Moagem e refino (U_3O_8)
- Conversão a UF_6
- Enriquecimento no ^{235}U ($\sim 3,5\%$)
- Elemento combustível (UO_2)
- Produção de Energia Elétrica
- Estocagem e/ou reprocessamento do combustível utilizado

Usinas Nucleares Brasileiras	Potência Térmica (GW_t)	Potência Elétrica (GW_e)	Entrada em Operação
Angra I	1,88	0,61	1982
Angra II	3,77	1,28	2000
Angra III	4,03	1,33	2018
Total	9,68	$3,22 \rightarrow 740\text{ ton } (^n\text{U}_3\text{O}_8)/\text{ano}$	

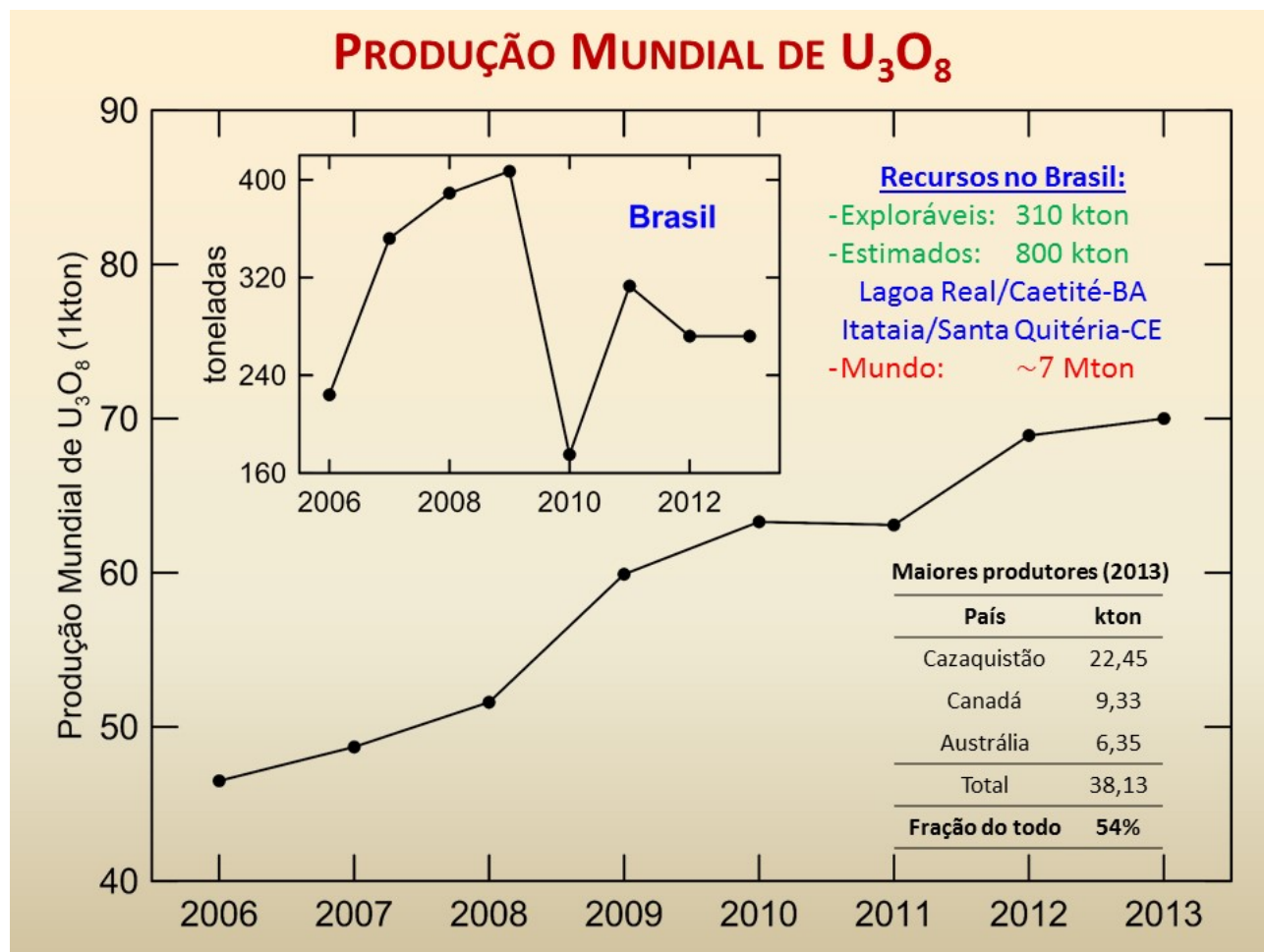
Desde a década de 1950 diferentes tecnologias de reatores de potência para geração de eletricidade têm sido desenvolvidas visando a uma melhor eficiência energética e, sobretudo, segurança e sustentabilidade, para resguardar as populações de hoje e futuras, bem como o meio ambiente, de eventuais malefícios que a geração nucleoeletrica poderia trazer. Dentre os modelos de reatores usados hoje no mundo, o mais difundido é o do tipo água leve pressurizada (PWR na sigla em inglês), com cerca de 280 PWR's em operação, incluindo-se os dois reatores da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto-CNAAA, em Angra dos Reis-RJ. O PWR está mostrado esquematicamente na figura, onde se destacam os dois circuitos fechados de água leve: o primeiro, que passa vaso do reator que contém as barras do combustível nuclear (bem à esquerda, na figura) converte a energia da fissão nuclear em energia térmica, produzindo vapor a alta pressão, e o segundo transforma a energia térmica em mecânica (turbina) e finalmente em energia elétrica (gerador). Um terceiro circuito (aberto) tem a finalidade de condensar o vapor que acionou as turbinas, e a água é então bombeada para novamente se transformar em vapor (parte central do esquema).

Um PWR típico é dimensionado para uma potência de $\sim 1\text{GW}_e$ (um bilhão de Watt elétricos) utilizando como combustível urânio enriquecido a $\sim 3,5\%$ no isótopo físsil ^{235}U ; a eficiência global média do sistema é avaliada em $\sim 33\%$. Um cálculo simples mostra que, nessas condições, uma unidade nuclear PWR necessita de 24 ton de urânio enriquecido por ano para cada GW_e . Essa quantidade de combustível é conseguida a partir de $\sim 230\text{ ton}$ de óxido de urânio (U_3O_8) no processo de mineração. A título de comparação, uma usina térmica convencional consumiria 1,5 Mton (um milhão e meio de toneladas) de óleo Diesel, ou 2 Mton de carvão anualmente para a mesma potência elétrica de 1GW_e . Quando as três unidades de geração nucleoeletrica da CNAAA estiverem funcionando juntas ($3,22\text{GW}_e$) deverão ser utilizadas 740 ton de U_3O_8 anualmente. Para tanto, todo um caminho precisa ser percorrido até se chegar à geração de eletricidade para consumo. É o chamado ciclo do combustível, cujas fases estão listadas à esquerda da figura.



O ciclo do urânio combustível começa na mineração (quadro à esquerda na figura), onde é obtido o concentrado de urânio natural sob a forma de óxido (70 a 90% de ${}^n\text{U}_3\text{O}_8$), o chamado “bolo amarelo”. Em seguida, ele é convertido no gás hexafluoreto de urânio (${}^n\text{UF}_6$) e transportado para a unidade de enriquecimento isotópico. O enriquecimento consiste em passar do urânio natural, que contém apenas 0,72% de átomos do isótopo ${}^{235}\text{U}$, para o urânio dito enriquecido, a um teor de 3-4% (em geral 3,5%) desse isótopo físsil. A ultracentrifugação a gás é o método utilizado no Brasil (é o princípio de separação isotópica do urânio mais usado nas instalações em outros países), e foi genuinamente desenvolvido no Centro Tecnológico da Marinha do Brasil em São Paulo (CTMSP) em parceria com o IPEN/CNEN/SP e o IPT/SP. As cascatas de ultracentrífugas vêm sendo instaladas progressivamente na Unidade de Enriquecimento Isotópico da Fábrica de Combustível Nuclear da INB em Resende-RJ na quantidade necessária a atender a demanda do combustível nuclear para as usinas geradoras Angra-1, Angra-2 e brevemente Angra-3. O urânio “empobrecido” (baixo teor do isótopo ${}^{235}\text{U}$) é separado, e o gás ${}^e\text{UF}_6$, agora com 3,5% de ${}^{235}\text{U}$, é convertido no dióxido de urânio (${}^e\text{UO}_2$), que será

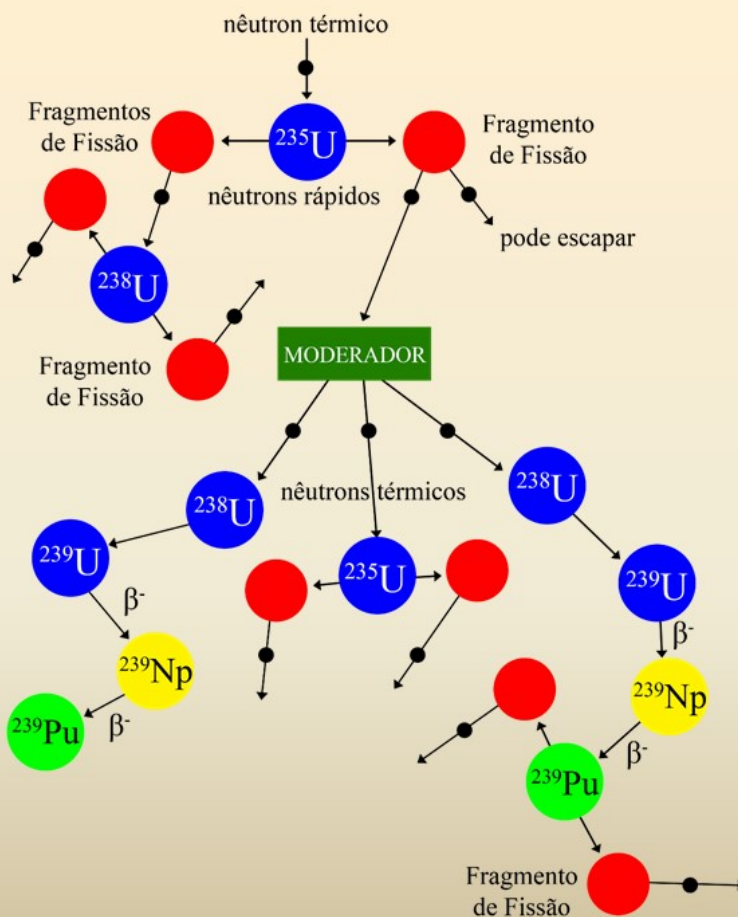
usado na preparação das pastilhas de combustível (pequenos cilindros de diâmetro e altura $\sim 1\text{cm}$), as quais preencherão os tubos metálicos de zircaloy que irão constituir o elemento combustível que alimentará o reator. Funcionando continuamente, o reator fornece potência térmica que produz vapor a alta temperatura que irá acionar as turbinas conectadas aos geradores que produzirão eletricidade para o consumo. Depois de meses de operação, o combustível utilizado (substituído por novo carregamento) é mantido em piscinas ao lado do reator para resfriamento e posterior armazenamento em depósito apropriado. Em alguns países, o combustível utilizado (que ainda contém $\sim 95\%$ de energia capaz de ser aproveitada) passa pelo processo de reprocessamento, no qual são recuperados o urânio e o plutônio que servirão de matéria-prima para novos elementos combustíveis, enquanto que os produtos de fissão e os demais actínídeos, após resfriamento, são acondicionados em recipientes especiais (*dry cask storage*[Apêndice]) estruturados de tal modo a isolar completamente os materiais ativos do meio ambiente.



Atualmente, a matéria-prima que fornece energia de origem nuclear em abundância é o elemento urânio (tório é esperado complementar o urânio dentro de uns 25-30 anos com novas tecnologias vantajosas (ver adiante)). Urânio é um metal comum, encontrado em rochas e nas águas. Enormes concentrações são registradas no Canadá (até 200 kg de U por ton do minério); concentrações mais baixas são encontradas, por exemplo, na Namíbia (100gU/ton), nos granitos em geral (3-5gU/ton), e na água do mar ($\sim 3\mu\text{gU/litro}$). O minério de urânio mais comum e de importância estratégica é a uraninita, que contém uma mistura dos óxidos UO_2 e U_3O_8 , este último formado por oxidação do primeiro. Com o aumento da exploração mineral, as riquezas de urânio conhecidas aumentaram nos últimos dez anos e, atualmente, dez países detêm as maiores reservas de urânio aproveitáveis economicamente (valores em mil ton de U_3O_8): Austrália (2012), Cazaquistão (801), Rússia (597), Canadá (582), Níger (477), Namíbia (451), África do Sul (399), Brasil (326), EUA (245) e China (235); as demais ocorrências significativas somam 829 kton, totalizando ~ 7 Mton de U_3O_8 [fonte: Supply of Uranium, outubro 2014, em

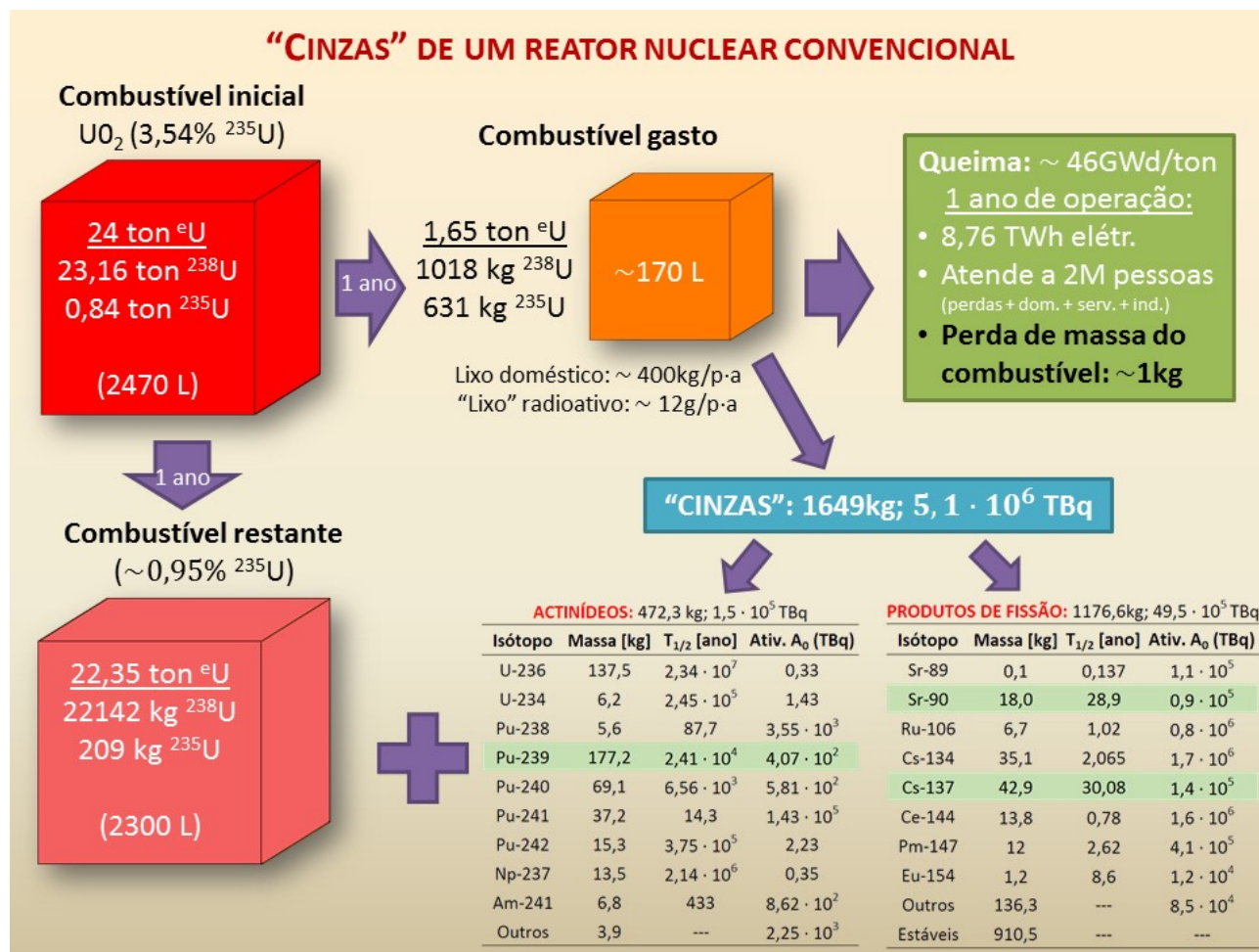
www.world-nuclear.org, acesso em maio/2015]. No Brasil, as maiores ocorrências do minério de urânio estão localizadas em Lagoa Real (Caetité-BA) e Itataia (Santa Quitéria-CE); somadas, representam mais de 310 kton de U_3O_8 . Há ainda no Brasil cerca de 800 kton estimadas do minério, distribuídas nas localidades Espinharas (PB), Amorinópolis (GO), Quadrilátero Ferrífero (MG), Figueira (PR) e outras, de modo que o país pode alcançar com o tempo o montante de ~ 1 Mton a serem exploradas, garantindo desse modo combustível necessário para abastecer, por exemplo, 40 usinas nucleares típicas durante um século! A produção de U_3O_8 no Brasil e no mundo está mostrada na figura. Globalmente, ela tem crescido em média à razão de ~ 4 kton/ano, e apenas três países (Cazaquistão, Canadá e Austrália) respondem por cerca da metade da produção mundial. O Brasil chegou a produzir 400 ton de U_3O_8 em Lagoa Real, e está se preparando para dobrar a produção a partir de 2015, como também deu partida ao beneficiamento do urânio em Itataia.

REAÇÃO EM CADEIA E A PRODUÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR EM UM REATOR CONVENCIONAL



Num reator convencional a fissão nuclear, a energia disponibilizada pelos fragmentos primários da fissão (cinética + excitação nuclear) nas reações em cadeia que ocorrem de forma autossustentada e controlada na massa de combustível é convertida em calor. Este produz o vapor d'água que acionará as turbinas, ao mesmo tempo que parte dos nêutrons de fissão servirão para manter a continuidade do processo. No esquema acima, um nêutron previamente termalizado, isto é, com energia cinética tão pequena quanto 0,025 eV, vindo a ser absorvido por um núcleo de ^{235}U provocará a bipartição desse isótopo, gerando um par de fragmentos primários que emitirão 2 a 3 nêutrons rápidos (energia cinética média de 1-2 MeV); um desses nêutrons poderá escapar do meio material combustível; um outro pode provocar a fissão do isótopo ^{238}U ; e um terceiro, depois de passar através do moderador (água leve, para os reatores da classe PWR), resulta termalizado. Nêutrons térmicos dessa segunda geração podem tomar dois caminhos: *i*) induzir

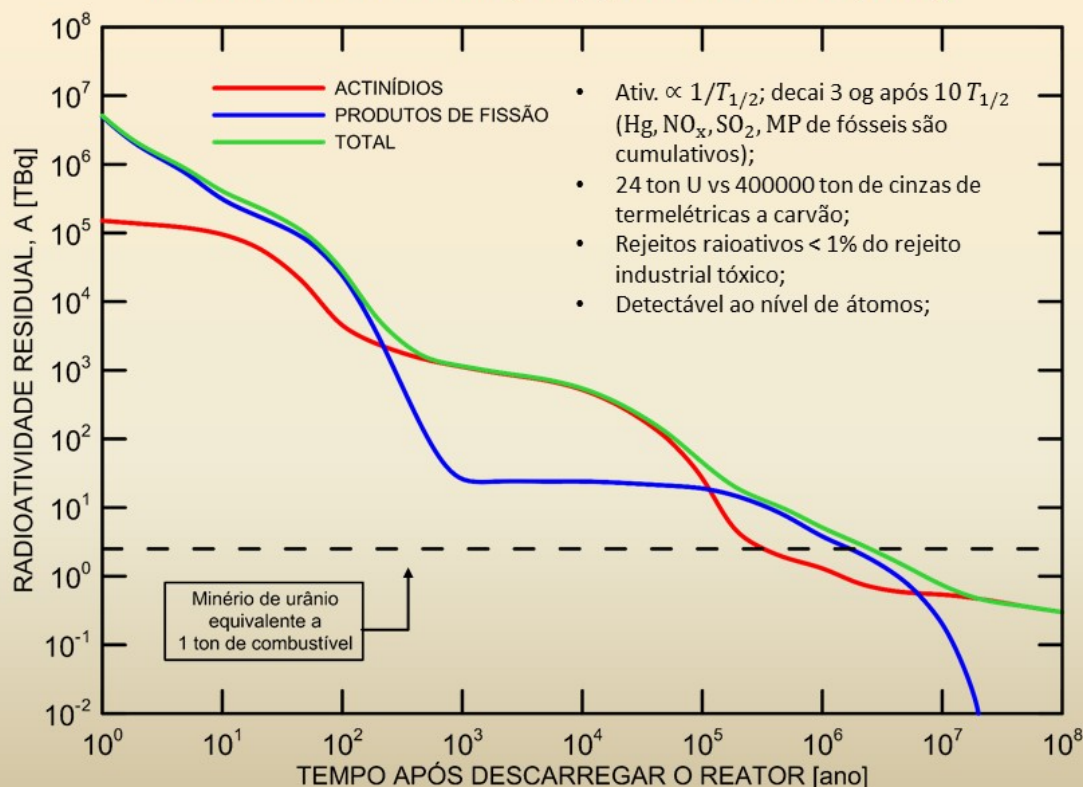
fissão em isótopos de ^{235}U , ou *ii*) ser absorvidos por isótopos de ^{238}U , levando à formação de ^{239}Np e ^{239}Pu após dois decaimentos β^- sucessivos a partir do núcleo composto ^{239}U . O isótopo físsil ^{239}Pu pode também contribuir (ou não) para novas fissões, alimentando ainda mais o processo de geração de energia nuclear em cadeia. Uma variedade de actínídeos (isótopos par-par de urânio e plutônio, ^{241}Pu , ^{237}Np , ^{241}Am e outros), não mostrados no esquema, é também produzida em decorrência de uma série de reações e decaimentos nucleares sucessivos. Além disso, um bom número de produtos de fissão provenientes dos decaimentos β^- sucessivos a partir dos produtos primários é gerado como subproduto do processo. São as "cinzas", ou rejeitos, de alta radioatividade, ao lado dos produtos finais estáveis. Em resumo, as reações nucleares em cadeia que acontecem em um reator convencional basicamente dão como resultado *i*) energia cinética que se converte em calor; *ii*) nêutrons rápidos, que podem ser termalizados; e *iii*) produtos de fissão.



O que acontece em um reator nuclear convencional dimensionado para uma potência elétrica de 1 GW após um ano de funcionamento ininterrupto? A carga inicial do combustível é de 27 ton de dióxido de urânio com 3,54 % do isótopo ^{235}U . Esse material ocupa tão somente o volume de um cubo de 1,35 m de aresta, e contém 23,16 ton de ^{238}U + 0,84 ton de ^{235}U . Depois de um ano de operação do reator 1,65 ton de U foram gastos, dos quais 1018 kg de ^{238}U e 631 kg de ^{235}U , equivalentes ao volume de um pequeno cubo de 55 cm de aresta. Os 1649 kg constituem as “cinzas” da “queima” do combustível inicial, formadas por 472,3 kg de actínídeos + 1176,6 kg de produtos de fissão. Um quilograma do material inicial transformou-se em energia térmica à razão de ~ 46 GWd/ton, produzindo 8,76 TWh elétricos com uma eficiência média de ~ 33%. Esta quantidade de eletricidade é suficiente para atender as necessidades de dois milhões de pessoas, incluindo-se as perdas energéticas por diferentes causas, consumo doméstico, serviços e atividade industrial associada. O combustível restante, isto é, a parte que não foi gasta ou “queimada”, corresponde a 22,35 ton de ^eU , que ocupa o volume de um cubo de 1,32 m de aresta; o grau de enriquecimento é ainda significativo (~ 0,95% de ^{235}U), e ele poderá ser usado na preparação de nova carga de combustível caso seja separado total ou parcialmente das “cinzas”. O combustível utilizado durante um ano (toda a linha de baixo na figura) é constituído pelas 22,35 ton de ^eU “não

queimado” + 472,3 kg de actínídeos + 1176,6 kg de produtos de fissão. O actínídeo produzido em maior quantidade é o ^{239}Pu , o qual pode ser separado no reprocessamento do combustível utilizado para ser misturado ao urânio formando um preparado conhecido como MOX (mistura de óxidos de plutônio e urânio) que servirá novamente como combustível. O mais ativo dos actínídeos é o ^{241}Pu , e o menos ativo é o ^{236}U . Dentre os produtos de fissão ativos, os isótopos de cério são os formados em maior quantidade, predominando o ^{137}Cs . ^{90}Sr é também significativo. No geral, a atividade total dos produtos de fissão é 33 vezes maior do que a dos actínídeos. Havendo reprocessamento do combustível utilizado, as cinzas propriamente ditas são constituídas pelos produtos de fissão e os actínídeos de meia-vida mais longa. Considerando as ~ 24 ton do combustível utilizado como material descartado ou rejeitado, isto é, como “rejeito” radioativo, a divisão equitativa pelos consumidores da eletricidade gerada daria, ao final de um ano, 12 g de rejeito per capita (volume equivalente ao de dois caroços de feijão, que pode ser comparado aos ~ 400 kg de lixo doméstico anual por pessoa). Supondo que em média uma pessoa viva 80 anos, o “rejeito radioativo” acumulado durante toda uma vida seria pouco menos de um kg, e ocuparia o volume de um tomate!

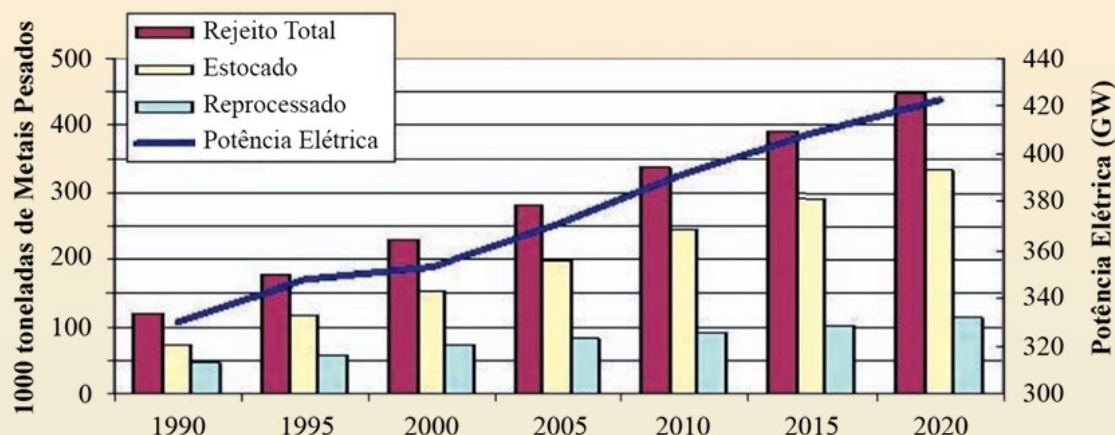
DECAIMENTO RADIOATIVO DAS “CINZAS” DE 24 TON DE ${}^{\text{e}}\text{U}$ (3,5%) APÓS 1 ANO DE OPERAÇÃO (QUEIMA: 46GWd/ton)



O combustível de urânio utilizado nas condições descritas anteriormente é constituído de espécies nucleares radioativas, algumas de meia-vida ($T_{1/2}$) relativamente curtas, como a dos isótopos ${}^{241}\text{Pu}$ ($T_{1/2} = 14,3$ a), ${}^{89}\text{Sr}$ ($T_{1/2} = 50,5$ d) e ${}^{144}\text{Ce}$ ($T_{1/2} = 285$ d). Entretanto, a maioria dos actínidos formados no processo de “queima” do combustível possui meia-vida muito longa (milhares ou milhões de anos), e dentre os produtos de fissão destacam-se ${}^{137}\text{Cs}$ e ${}^{90}\text{Sr}$, ambos de meia-vida em torno a 30 anos. A quantidade de radioatividade, ou atividade, é proporcional à quantidade do radioisótopo presente e inversamente proporcional à sua meia-vida. Como a atividade diminui de modo exponencial, segue-se que após transcorrer o tempo de dez meias-vidas o material ativo fica reduzido de um fator mil (três ordens de grandeza). A figura mostra o decréscimo da radioatividade com o passar do tempo para os rejeitos produzidos nas condições especificadas. A atividade total inicial é $\sim 4,5$ trilhões de desintegrações por segundo e por grama do material ($\sim 93\%$ sendo devida aos produtos de fissão). Os produtos de fissão diminuem mais rapidamente (redução de cinco

ordens de grandeza após ~ 300 anos) por possuírem meias-vidas bem menores do que os actínidos (estes últimos necessitam de uns 100 mil anos para a mesma redução da atividade total). Ao contrário de mercúrio, óxidos tóxicos de nitrogênio e enxofre e metais pesados do rejeito industrial e dos combustíveis fósseis, todos cumulativos, a atividade dos rejeitos da geração nucleoe elétrica (e, portanto, a taxa de emissão de partículas ionizantes e das radiações) diminui com o tempo, transformando os produtos radioativos em produtos estáveis. Além disso, eles somam menos de 1% do rejeito tóxico produzido pela indústria em geral. As 24 ton de ${}^{\text{e}}\text{U}$ do combustível utilizado por um ano numa térmica nuclear de potência elétrica 1 GW representam uma quantidade muitíssimas vezes menor do que as 400 kton de cinzas produzidas numa termelétrica a carvão nas mesmas condições. Por outro lado, rejeitos radioativos são facilmente detectáveis em nível de átomos, o que permite um controle quase absoluto sobre esses materiais, proporcionando desse modo alto nível de segurança para as populações e o meio ambiente.

ACÚMULO DE REJEITO NUCLEAR PRODUZIDO, ESTOCADO E REPROCESSADO E DE POTÊNCIA NUCLEOLÉTRICA (1990-2020)

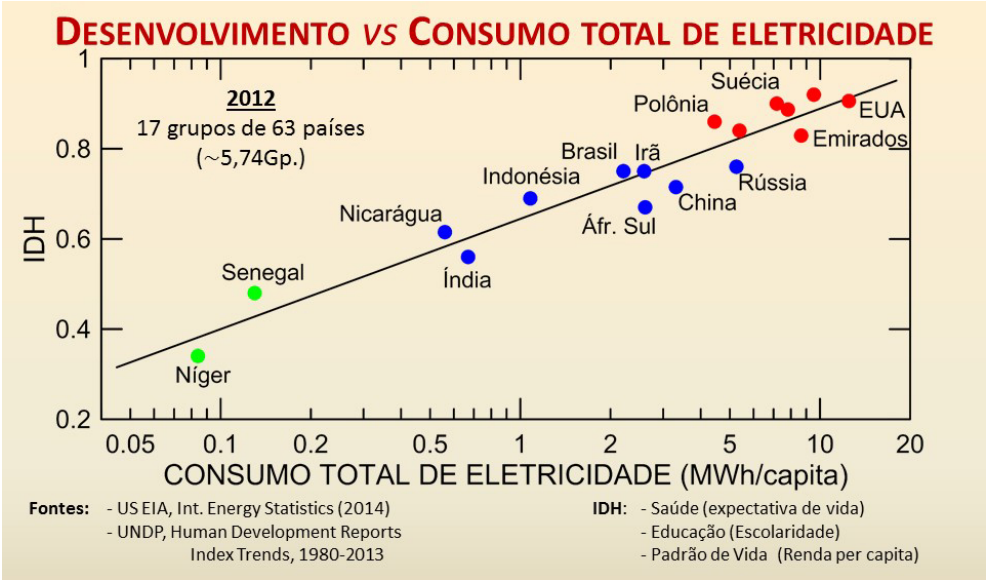


Reprocessamento (2007)

País	ton/ano
Reino Unido	2100
França	1700
Japão	800
Rússia	400
Índia	330

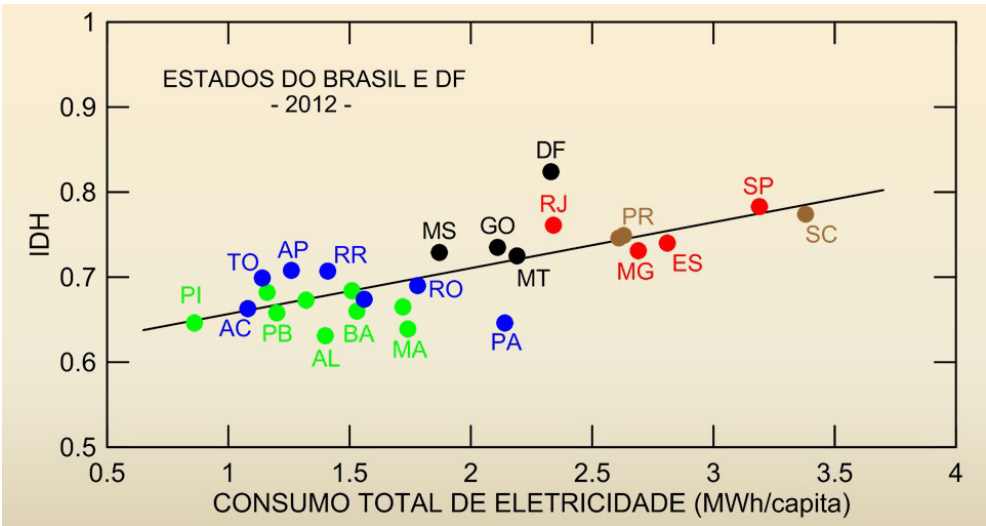
Os rejeitos de alto nível de radioatividade produzidos pelo uso de reatores nucleares na geração de eletricidade constituem a grande questão, no sentido dos cuidados que devem ser tomados para isolá-los da população e do meio ambiente. Ao contrário dos rejeitos tóxicos de origem industrial, o nível de perigo de todo o rejeito nuclear diminui com o tempo, pois cada um dos radionuclídeos que o compõe possui uma meia-vida de decaimento. Produtos de fissão (em geral de meia-vida relativamente curta) e elementos transurânicos são produzidos nas reações nucleares com urânio e plutônio durante a “queima” do combustível e nele estão contidos. Aqui, é bom frisar mais uma vez que quanto mais radioativo for um radioisótopo mais rapidamente ele decai. Em países que adotam o ciclo fechado do combustível nuclear (reutilizando urânio e plutônio extraídos do combustível usado), os produtos de fissão e actínídeos, estes últimos em menor proporção, são separados e tratados como rejeito de alta radioatividade. Essa operação é conhecida como reprocessamento. No caso de não se adotar o reprocessamento (ciclo aberto), todo o combustível utilizado é considerado como rejeito e classificado como de alta atividade. Tal não é o caso nas fases de

mineração e moagem para se obter o concentrado de urânio; o material que resta dessa operação (refugo) contém ~ 75% da radioatividade do mineral extraído e, portanto, não é classificado como rejeito radioativo. Também, nas etapas de conversão (${}^{\text{U}}\text{O}_3\text{O}_8 \rightarrow {}^{\text{U}}\text{F}_6$), enriquecimento (${}^{\text{U}}\text{F}_6 \rightarrow {}^{\text{e}}\text{U}\text{F}_6$) e fabricação do combustível (${}^{\text{e}}\text{U}\text{F}_6 \rightarrow {}^{\text{e}}\text{U}\text{O}_2$) o principal subproduto é o urânio empobrecido (essencialmente ${}^{238}\text{U}$), na forma UF_6 ou U_3O_8 , que não oferece perigo. Este material pode ser (e tem sido) usado inclusive na diluição do urânio altamente enriquecido da fabricação de artefatos bélicos (ogivas) que agora estão sendo desmontados. Depois, ele é reutilizado na preparação de novo combustível para reatores de potência. A figura mostra a tendência no gerenciamento do combustível nuclear utilizado, com estimativas até 2020 [fonte: Spent Fuel Reprocessing Options, IAEA-TEC-DOC-1587(2008)], e uma tabela sobre a capacidade de reprocessamento de países que optaram por esse procedimento [WNA, abril 2015].



É um fato reconhecido que o nível de desenvolvimento de um país, região ou cidade está ligado ao consumo total de eletricidade por habitante daquele país, região ou cidade. Diferentes organismos internacionais adotam o chamado Índice de Desenvolvimento Humano-IDH com o qual são classificados os países, grupos de países ou regiões quanto ao nível de desenvolvimento. O IDH combina saúde, educação e padrão de vida da população avaliados com base na expectativa de vida, escolaridade e renda per capita, respectivamente. O autor selecionou 63 países (cerca de 1/3 do total) abrangendo 82% da população mundial, e agrupou-os por região e/ou IDH's próximos (dentro de $\pm \sim 8\%$), compondo assim 17 grupos de países (por exemplo, Europa central, mundo árabe, sudeste da Ásia, América do Norte, e assim por diante). A figura mostra (dados de 2012) a variação do IDH com o consumo total de eletricidade per capita para os 17 grupos de países (o nome junto a cada ponto é o do país

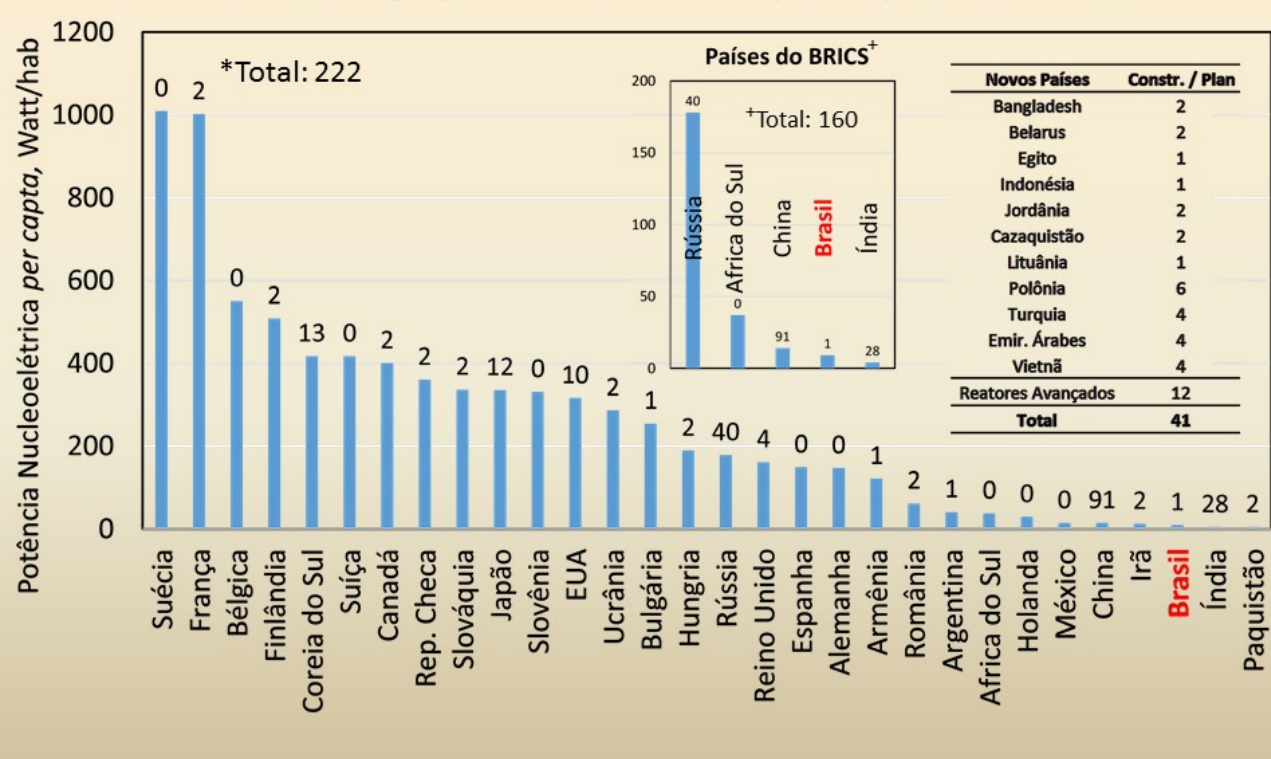
que representa o grupo (por exemplo, o Irã representa o Oriente Médio)). Pontos em vermelho indicam as regiões desenvolvidas; em azul, as em desenvolvimento; e em verde, dois representantes de regiões bem menos desenvolvidas. É claro o crescimento do IDH com o consumo per capita de eletricidade. Segundo o andamento geral na figura acima, para elevar o IDH de uma dada região de 0,7 a 0,9 o consumo de eletricidade per capita precisa aumentar de um fator ~ 7 . Vê-se que o Brasil precisaria triplicar o consumo de eletricidade (e, portanto, a oferta) para alcançar o padrão de desenvolvimento dos países mais adiantados. Na figura abaixo, a mesma correlação é feita para os estados do Brasil e o DF (cores diferentes são usadas para as diferentes regiões do país).



FISSÃO NUCLEAR: RECURSO ENERGÉTICO INEVITÁVEL

Índice de Desenvolvimento Nuclear - IDN [W_e /hab]

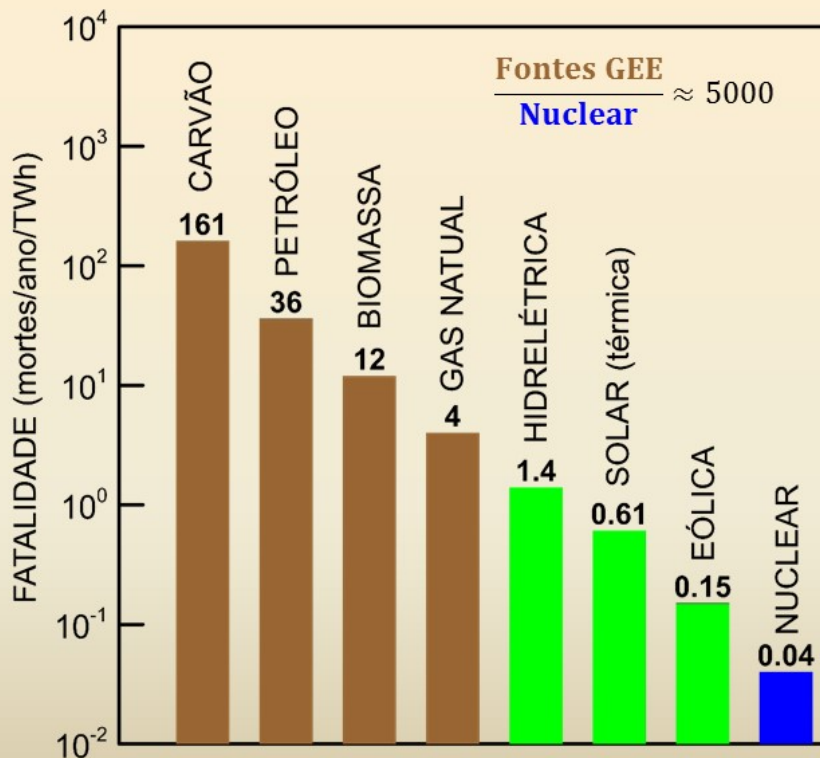
(Números: unidades de geração nucleoeétrica em construção, planejadas e encomendadas)*



Uma forma de aumentar a oferta de energia elétrica é fazer uso da geração com reatores nucleares, como já fazem 30 países há várias décadas. No futuro, com o aumento da população e a demanda por energia, o uso de reatores a fissão nuclear para produzir eletricidade deverá crescer, e tornar-se-á imprescindível em muitos outros países, sobretudo aqueles em desenvolvimento. A figura mostra um estudo do Índice de Desenvolvimento Nuclear-IDN, definido como potência nucleoeétrica instalada per capita, dos diferentes países que hoje produzem eletricidade a partir da energia da fissão. Suécia e França encabeçam a lista com a oferta de $1kW_e$ /hab, seguido pela Bélgica e Finlândia, ambos com pouco mais de $0,5kW_e$ /hab. A média geral para os trinta países está bem próxima de $250 W_e$ /hab. Acima da média encontram-se, por exemplo, os EUA, Japão, Canadá e Coreia do Sul, e abaixo, além dos países do BRICS (figura inserida) estão, entre outros, o Reino Unido, Espanha, Alemanha, Argentina e o México; o Paquistão é o menos favorecido em potência nucleoeétrica per capita. O Brasil aparece

em antepenúltimo lugar na lista, com modestos $8W_e$ /hab. Os números junto às barras indicam a quantidade de reatores em construção, planejados e/ou encomendados para entrar em operação dentro dos próximos 15-20 anos, totalizando 222 novas unidades de geração nucleoeétrica. Dentre os países do BRICS, a China desponta como futuro maior usuário da energia nuclear, seguida da Rússia e da Índia. Dos demais países, a Coreia do Sul, o Japão, e os EUA mostram ter grande interesse no aumento da produção de energia elétrica com a fissão nuclear. Além dos trinta países mencionados, outros onze estão em processo de adesão à geração nucleoeétrica, com 29 reatores em construção e/ou planejados, somando-se a esses outros doze reatores avançados (ver lista inserida). Em relação aos trinta países citados, o quadro mostra que o Brasil está se desenvolvendo muito lentamente no que diz respeito à produção de eletricidade com uso da energia nuclear, de certa forma podendo comprometer o desenvolvimento global do país, embora tenha todas as condições para crescer neste particular.

FATALIDADES NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE



Fonte: Willem Post, The Energy Collective, Fev. 2013

Toda e qualquer atividade humana está sujeita a acidentes, com maior ou menor frequência, inclusive envolvendo mortes, resultando em índices de risco-benefício que podem variar de ordens de grandeza. Com as tecnologias de produção de eletricidade não seria diferente. Há vários estudos sobre essa questão. Aqui, o autor selecionou o resultado da análise de fatalidades na geração de eletricidade por várias fontes conforme a referência indicada (notar que os índices estão em escala logarítmica). O estudo mostra que as termelétricas a combustíveis fósseis e biomassa são as que mostram os maiores índices de fatalidade, além de serem as campeãs na emissão de gases poluentes e de efeito estufa. Juntas, elas representam perigo de morte ~ 5000 vezes maior do que as termelétricas a fissão nuclear. En-

tre esses extremos encontram-se as fontes de eletricidade consideradas renováveis, com índices que variam de 0,15 a 1,4 mortes anuais para cada bilhão de kWh produzido. O índice de fatalidade mostrado para a fonte nuclear de eletricidade é ainda 4 a 35 vezes menor do que os índices das fontes renováveis. O fator preponderante que responde pelo mais baixo índice de fatalidade na geração nucleoeletrônica é a altíssima concentração de energia produzida, em decorrência do altíssimo valor energético do processo de fissão no combustível nuclear ($\sim 1\text{TWh/ton}$) quando comparado, por exemplo, com a queima de combustíveis fósseis ($\sim 7\text{-}13\text{ MWh/ton}$).

ACIDENTES SEVEROS RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE ENERGIA *

Fonte de Energia	Natureza do acidente	Período ou data	Nº de acidentes	Nº de mortes	Total	Mortes por ano
Hidro	Rompimento de barragem	1979-2009	4	2851	2851	95
Fóssil	Soterramento/explosão em mina de carvão	1980-2015	46**	4872**	8148	233
	Explosão por gás	1980-1995	7	1774		
	Incêndio por óleo	1988-2010	5	1502		
	Chernobil – 4 (Ucrânia)	1986	1	71+4000 (ONU, 2005)	4281	91
Nuclear (em 60 anos)	Explosão de depósito de resíduos atômicos (Kyshtym, Rússia)	1957	1	~200		
	Reator em Mihama (Japão)	2004	1	5		
	Reator experimental militar (EUA)	1961	1	3		
	Fábrica de combustível em Tokaimura (Japão)	1999	1	2		
Total Geral			67		15280	
Pior Acidente	Rompimento de barragens (Henan, China) perda de 18GW	1975		170000 – 230000		
			1960-2015	100	19337	350

* World Nuclear Association (May, 2014)

** Inclui acidente na Ucrânia em março/2015

[AVIAÇÃO COMERCIAL](#)

O quadro acima é uma listagem dos acidentes fatais relacionados à produção de energia elétrica que ocorreram nas últimas 5-6 décadas. O uso de combustíveis fósseis na geração de eletricidade mostra um elevado índice de mortes/ano (233) no período 1980-2015, sobretudo decorrentes do grande número de soterramentos e/ou explosões (46 acidentes) em minas de carvão. Em seguida, têm-se os acidentes envolvendo rompimento de barragens na geração de hidroeletricidade, com 95 mortes/ano no período 1979-2009. Nesta categoria, é importante assinalar o maior desastre ocorrido, que teve lugar na província de Henan, na China, em 1975, com a perda estimada em 170 000 a 230 000 vidas, além de 18GW de potência hídrica; várias barragens se romperam em consequência do imprevisível e enorme volume d'água formado pela quantidade de chuva esperada para um ano ter acontecido em um só dia. Os acidentes severos na produção de eletricidade com a fissão nuclear, incluindo

todo o ciclo do combustível, somam cinco no intervalo de 47 anos quando ocorreram (1957-2004)— ou nos ~ 60 anos desde o início da produção de eletricidade em larga escala com reatores nucleares—com uma média de 91 mortes/ano. O de maior impacto foi o grande desastre ocorrido em 1986 na Ucrânia (Chernobil-4), com mais de 4000 mortes e um estrago ambiental sem precedentes. Para comparação, no final da tabela estão mostrados dados referentes à aviação comercial no mundo. Eles indicam 100 acidentes fatais de 1960 até hoje, com pouco mais de dezenove mil mortes, produzindo a taxa de ~ 350 mortes por ano. Considerando que, em todo o mundo, a energia nucleoeletrônica serve diariamente a ~ 1 bilhão de pessoas, e que a aviação comercial transporta 8,2 milhões de pessoas todos os dias, pode-se concluir que a atividade nuclear na geração de eletricidade é 400 a 500 vezes mais segura do que a aviação comercial.

TÓRIO: COMBUSTÍVEL DO FUTURO

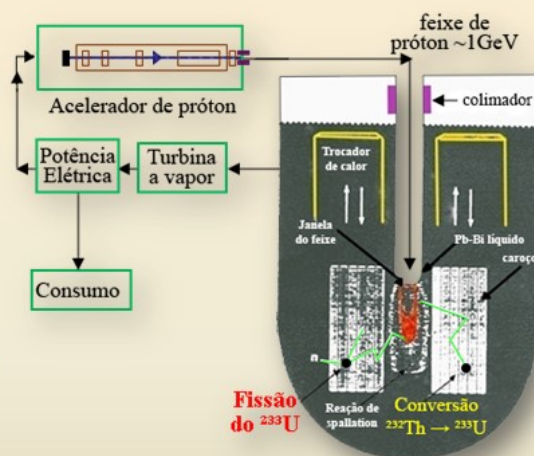
(Alemanha, Bélgica, Canadá, China, EUA, Índia, Japão, Noruega, Reino Unido, Rússia)

- Mais barato e mais abundante do que o urânio; Brasil: 632kton;
- Subproduto rejeitado na produção de terras raras a partir da monazita; ≥ 100 ton de Th por ano acumuladas como “lixo”;
- Extraído de minas a céu aberto;
- Dispensa o custoso enriquecimento;
- $\sim 300\text{--}500$ vezes menos rejeitos radioativos do que U-Pu convencional;
- 1 ton de Th $\approx$ 200 ton de minério de U $\approx$ 3,5Mton de carvão (que geram ~ 12 Mton de CO_2);
- Sem potencialidade militar;

ADS OU ADTR

- Acelerador de prótons a 1GeV
- $p + (\text{Pb-Bi}) \rightarrow 12$ nêutrons/interação
- Carço com Th-232 $\xrightarrow{n, 2\beta^-}$ U-233
- Pb-Bi é alvo e refrigerante

ADS: gerador de energia por fissão e queima de rejeitos
(Carlo Rubbia, ~ 1990)



Transmutação de rejeitos

- ^{99}Tc (200ka) + n $\rightarrow$ ^{100}Tc (β^- , 16 s) $\rightarrow$ ^{100}Ru (estável)
- ^{129}I (15,7Ma) + n $\rightarrow$ ^{130}I (β^- , 12,5h) $\rightarrow$ ^{130}Xe (estável)

Os benefícios, como também os riscos e as dificuldades impostos pela energia nuclear como apresentados até aqui, pertencem a um particular modo de geração de eletricidade, qual seja, aquele que tem como base urânio e/ou plutônio como combustível. Nos dias de hoje, vários países da América do Norte, Europa e Ásia vêm investindo em novas tecnologias para produção de eletricidade com reatores nucleares dentro da perspectiva do uso do elemento tório (100% do isótopo ^{232}Th na natureza) como combustível nuclear. Dentre as muitas vantagens, destacam-se i) a dispensa do custoso processo de enriquecimento como exigido no caso do urânio combustível; ii) a limitação, em centenas de vezes menor, de rejeitos radioativos que seriam produzidos em comparação com os reatores convencionais a U-Pu; e iii) a dificuldade de aplicações com fins militares, uma vez que não haveria formação de plutônio no ciclo Th-U. O uso de tório em reatores nucleares não é novo. Já a partir de 1962 entraram em operação, em caráter experimental, os primeiros reatores alimentados com tório, principalmente na Alemanha, EUA e Índia (o reator do tipo LMFBR, sigla para Liquid Metal Fast Breeder Reactor, de 40 MW térmicos, construído na Índia em 1985, opera ainda hoje). Tório pode ser usado como combustível em diferentes tipos de reatores, sendo mais promissores os que usam combustível nuclear líquido (Molten Salt Reactor-MSR), como os de fluoreto líquido com tório (LFTR, Liquid Fluoride Thorium Reactor)

e os reatores comandados por acelerador (ADS, Accelerator Driven System) que geram energia por fissão, ao mesmo tempo que queimam rejeitos radioativos. Ambos são projetados de tal modo a converter ^{232}Th (fétil) em ^{233}U (físsil) o qual disponibilizará energia abundante pela fissão. Reatores a combustível líquido com tório podem ajudar consideravelmente a solucionar as questões de segurança e eliminação de rejeitos, hoje as maiores dificuldades impostas pelas tecnologias de reatores a água. A figura mostra um esquema resumido de um sistema ADS que utiliza tório. Basicamente, o sistema consiste de um grande reservatório de chumbo líquido contendo na parte de baixo o carço do reator com tório e, eventualmente, os rejeitos a serem destruídos provenientes de outros reatores. Na parte de cima estão os trocadores de calor que produzirão vapor para as turbinas e a subsequente produção de energia elétrica para consumo. Prótons acelerados até ~ 1 GeV interagem com o alvo de chumbo (ou Pb-Bi), produzindo cerca de 12-15 nêutrons por interação. Parte deles fará a conversão de ^{232}Th em ^{233}U ; uma outra fração dos nêutrons, uma vez termalizados, é usada para transmutar produtos de fissão de alta atividade (dois exemplos estão mostrados). O Pb-Bi líquido funciona como alvo e refrigerante, transferindo calor de baixo para cima por convecção.

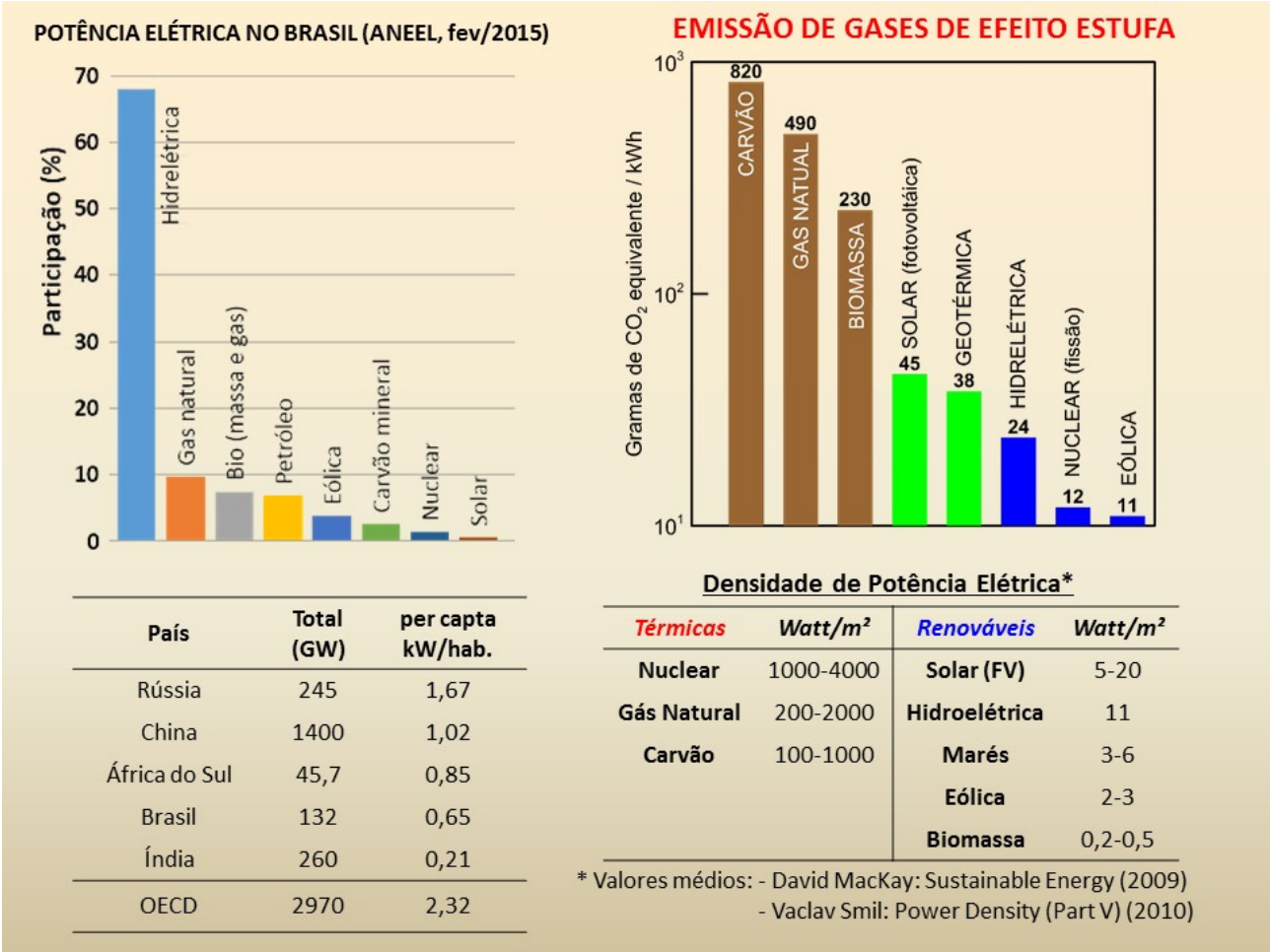
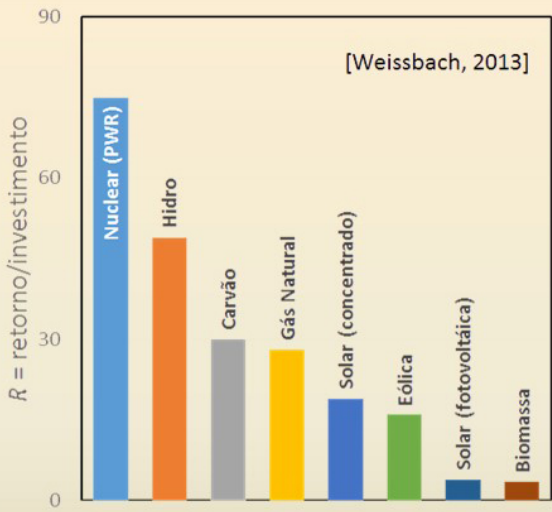


Tabela A: Eficiência média de geração de eletricidade [WNA, 2015]

Usina ou Combustível	Retorno/Investimento R (valores médios)
Nucleoeletricidade (centrifugação)	58 ± 15
Hidroeletricidade	56 ± 14
Eólica	38 ± 22
Carvão	25 ± 7
Gás Natural	14 ± 10
Solar (concentrado)	9,6
Solar (fotovoltaico)	5 ± 4

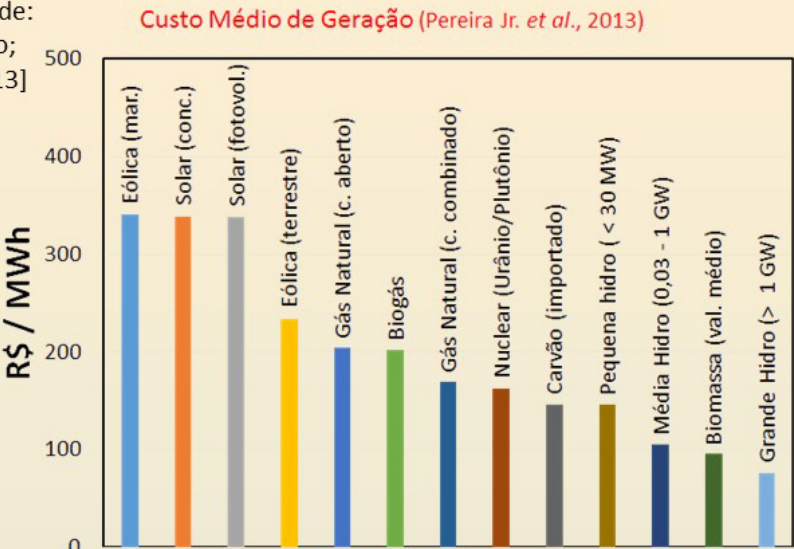


Alguns **aspectos econômicos** na geração de eletricidade por diferentes tecnologias correntemente em uso são aqui brevemente mencionados. Primeiro, uma palavra sobre retorno/investimento. A quantidade R , definida como quociente entre a energia que uma usina geradora disponibiliza durante sua vida média de operação (output) e toda a energia gasta direta ou indiretamente para disponibilizar essa energia (input), é uma medida da viabilidade econômica de um dado sistema de geração de eletricidade. O valor de R responde à pergunta “quanta energia útil é obtida do investimento feito para obtê-la?” [na literatura especializada é comumente usado o parâmetro conhecido como EROI (sigla para “energy returned on invested”, ou “energy return on investment”)]. Em países desenvolvidos o valor $R \approx 7$ é considerado o mínimo economicamente aceitável. Uma análise do balanço energético do retorno sobre investimento não é, em geral, tarefa fácil. Por exemplo, o gasto de combustível para deslocar uma massa de carvão para uma termelétrica, ou a quantidade de eletricidade usada no processo de enriquecimento de urânio para o preparo do combustível nuclear, entram na estimativa dos investimentos (inputs). Porém, o que dizer sobre o quanto foi gasto para construir o trem que deslocou o carvão ou na construção e montagem das cascatas de ultracentrífugas para o enriquecimento de urânio? Certos investimentos são relativamente simples de quantificar. Por exemplo, a energia necessária para produzir certa quantidade de U_3O_8 numa mina, ou a que é gasta para deslocar por navio ou trem uma quantidade de carvão, ou ainda na transferência de gás por longas distâncias em dutos especiais. Outros, entretanto, podem apresentar dificuldades numa estimativa de “inputs” como, por exemplo, a energia que é gasta para construir uma unidade de geração nucleoeletrônica com características especificadas, ou o investimento feito para levantar e montar

uma turbina movida a ventos na geração eólica de eletricidade. Outros investimentos precisam também ser levados em conta: o desmonte de usinas e/ou centrais de geração de eletricidade após o término do período operacional, o gerenciamento, guarda e/ou eliminação dos rejeitos produzidos, etc. A World Nuclear Association-WNA na seção “Energy Analysis of Power Systems” (www.world-nuclear.org, acesso em maio-2015) relaciona um bom número de estudos (com as respectivas referências) que indicam valores estimados da razão $R = \text{“output/input”}$ para diferentes tecnologias de geração de eletricidade. Valores médios de R ($\equiv$ EROI) extraídos dos dados citados na WNA para os diferentes sistemas de geração de eletricidade são mostrados na Tabela A. Pode-se concluir que, dentro das variações de R como mostradas na Tabela A, os sistemas de geração de eletricidade com o uso da fissão nuclear, hidroeletricidade e eólica são bastante competitivos do ponto de vista econômico. Em seguida, vem a geração por combustíveis fósseis, com valores de R intermediários. Por último, têm-se os sistemas de produção de eletricidade por captação da energia solar radiante que mostram valores de R ainda pouco atraentes. A título de comparação, a recente publicação por Weissbach *et al.* [Weissbach 2013] relata valores de R (ou EROI) para diferentes sistemas geradores de eletricidade (figura), bem como o detalhamento dos métodos de obtenção desses valores. Tendo em vista a extraordinária taxa de insolação no Brasil, é possível alcançar valores de R bem maiores na geração solar fotovoltaica do que os mostrados na Tabela A e na figura, de tal modo que a geração de eletricidade pelo uso da tecnologia fotovoltaica possa vir a contribuir significativamente para a matriz da geração elétrica brasileira num futuro próximo.

Tabela B: Retorno/investimento de uma usina nuclear de referência (capacidade: 1,34 Gw_e; operação plena: 8000h/ano; vida média: 60 anos) [Weissbach, 2013]

Ítem	TWh (elétrico)
Energia elétrica total produzida (output)	643,2
Construção	1,125
Manutenção	1,917
Combustível	5,222
Desativação	0,317
Investimento Total (input)	8,583
R = output/input ≈ 75	



Para o caso particular da geração de eletricidade com a fissão nuclear, a Tabela B (preparada com dados contidos na Tabela 8 em [Weissbach 2013]) mostra os gastos com investimentos e as características de operação na geração de eletricidade de uma unidade de referência para a qual $R \approx 75$. Constatase que a maior parcela dos investimentos concentra-se nas etapas relacionadas ao combustível nuclear (sabidamente não menos de 70% dela no processo de enriquecimento).

Agora, umas poucas palavras sobre estimativas de custos de geração de eletricidade. O chamado custo nivelado (ou equilibrado) da eletricidade (LCOE, sigla para Levelized Cost of Electricity) é a avaliação econômica do custo total médio de construção e operação de uma unidade geradora durante o tempo de sua vida média, dividido pela quantidade total de energia gerada naquele tempo. O LCOE representa o custo com o qual a eletricidade deve ser gerada para equilibrar economicamente o sistema gerador durante toda a sua vida média. É uma avaliação econômica da competitividade

do custo de uma tecnologia de geração de eletricidade que incorpora todos os custos durante a vida média do sistema, tais como investimento inicial, operação, manutenção, custo do combustível e custo do capital. Há inúmeros estudos sobre os custos de geração de eletricidade. Para dar uma ideia ao leitor, na figura estão mostradas estimativas de custo médio de geração de eletricidade a partir das diferentes fontes geradoras mais expressivas [metodologia e dados conforme Pereira Jr. et al. (2013)]. Deste estudo, observa-se que a geração hidrelétrica, a que usa biomassa e as termelétricas com combustíveis fósseis ou fissão nuclear, exibem, em média, custos de geração cerca da metade daqueles da geração de eletricidade pelas chamadas fontes renováveis (eólica e tecnologia fotovoltaica).

Considerações adicionais sobre a energia da fissão nuclear na geração de eletricidade

– Energia nucleoe elétrica é uma fonte primária de energia, de base, ininterrupta e que não depende do comportamento da natureza (estações do ano, regime de chuvas e dos ventos, e da insolação). Além disso, não há (ou é mínima) produção de gases de efeito estufa, que, de outro modo, acarretaria num aumento da temperatura do meio ambiente. As demais fontes de energia (renováveis, e sazonais por natureza) são também importantes e necessárias na geração de eletricidade, porém devem ser usadas como alternativas complementares.

– É preciso educar, instruir e informar corretamente a sociedade em geral e os tomadores de decisões sobre as questões relativas ao uso da energia nuclear. Aqueles a quem cabe decidir devem ter pleno conhecimento e vontade política de implantar no país um parque industrial nuclear bem mais arrojado do que o atual. É preciso muito mais divulgação técnico-científica junto às escolas e ao grande público para que a aceitação dessa forma de energia pelas pessoas aumente cada vez mais. É preciso também criar muitos outros cursos para a formação de novos profissionais do setor nuclear, lembrando que a capacitação tecnológica na atividade nuclear requer um mínimo de dez anos de aprendizado e aperfeiçoamento; estímulo para a capacitação a médio prazo em centros de energia nuclear especializados fora do país para candidatos selecionados é também essencial.

– Planejamento e execução dos programas de geração nucleoe elétrica, incluindo todas as etapas (da mineração ao armazenamento seguro dos rejeitos radioativos ou a sua eliminação final) transcendem a Governos. As propostas devem fazer parte de uma política de Estado, com alcance sobre as gerações futuras, no longo prazo. Hoje usufruímos o que nossos antepassados plantaram. É como um pé de jabuticaba: planta-se hoje para colher os frutos muitos anos depois (não havendo modificação genética ou enxertos, naturalmente), servindo-se deles os netos e os bisnetos.

– O Brasil, como os EUA e a Rússia, é o país que possui conhecimento, pessoal capacitado, domínio do ciclo do combustível e urânio em abundância para tocar adiante um programa de energia nuclear genuíno e de larga escala. O que faltaria então? Supostamente, vontade política, disponibilidade de investimentos e a garantia de continuidade dos recursos a longo prazo.

– Em média, após decisão de implantar uma usina nuclear,

precisa-se esperar de 4 a 5 anos para o licenciamento, mais uns 5, 6 ou 7 anos para a construção propriamente dita, e outro ano para testes e entrada em funcionamento comercial pleno (caso não hajam contratempos nesse percurso). É preciso, pois, mobilização rápida para que os brasileiros não percam o trem da modernidade. Uma vez pronta, uma unidade de geração nucleoe elétrica poderá produzir eletricidade para até três gerações.

– Os engenheiros e técnicos do setor nuclear precisam estar preparados para lidar de forma segura e sustentável com a grande concentração de energia proveniente do núcleo atômico, como também com a grande concentração dos subprodutos radioativos que a acompanha. Este é o grande desafio, que várias nações já demonstraram ser possível vencer; o Brasil também já demonstrou, mas em escala bem modesta.

– Acidentes sempre são inevitáveis, pois energia nuclear é, como todas as outras, uma atividade na mão dos homens. Entretanto, a frequência de acidentes de maior dano a pessoas e/ou ao meio ambiente no setor nuclear é extremamente pequena em decorrência, entre outros, das lições que são aprendidas dos poucos sinistros ocorridos e colocadas em prática de tal modo a se evitar novos acidentes. Acidentes, quando ocorrem, são explorados sempre de forma emocional e tendenciosa, transformando a energia nuclear em tabu, como se as demais tecnologias de produção de eletricidade não apresentassem perigos e destruição. Os divulgadores deixam de comentar os inúmeros benefícios decorrentes da energia nuclear (na medicina, agricultura, segurança, geração de eletricidade, propulsão naval) usufruídos por ~1 bilhão de pessoas diariamente.

– Em si mesmas, a energia nuclear e as radiações que a acompanham não causam prejuízos ou danos às pessoas e ao meio ambiente quando bem utilizadas e de modo seguro. A energia nuclear que mata e traz destruição é a mesma que cura e propicia conforto e bem estar à sociedade. As decisões sobre essa riqueza de origem no núcleo atômico que a natureza pôs à disposição da humanidade é que farão dela algo benéfico ou não. A fissão de núcleos pesados é, no momento, a transformação física de maior concentração energética disponível. O domínio das tecnologias de utilização da energia nuclear para o bem só trará mais conforto, saúde e bem estar para a humanidade, como fartamente já demonstrado pelos países que as utilizam desde há muito.

DESPERTAR PARA O NUCLEAR

A energia liberada nas transformações nucleares já trouxe muito mais conforto, saúde e bem-estar à sociedade do que morte e destruição. Não há, pois, por que rejeitá-la.

Assim como o homem primitivo aprendeu a lidar com o fogo, o homem da atualidade não deve medir esforços para dominar com segurança o bom uso da energia nuclear, “o fogo dos deuses”.

Imprescindível é, portanto, pensar o BRASIL NUCLEAR para que tenhamos no futuro um BRASIL GRANDE, SOBERANO e SEM POBREZA.

MAIS ENERGIA $\equiv$ { MAIS DESENVOLVIMENTO
MELHOR QUALIDADE DE VIDA

Por fim, à guisa de **epílogo**, o autor conclama os leitores a lerem o pequeno texto acima sobre a necessidade do país desenvolver em escala ainda maior programas de pesquisa e inovação em direção ao bom uso e ao domínio completo da energia nuclear com total segurança, garantindo desse modo mais energia e saúde para todos, que se traduzem em mais desenvolvimento e melhor qualidade de vida. Concluindo, é bom recordar que “toda a energia primária de que a humanidade necessita é de origem nuclear”: i) fissão de núcleos pesados (energia disponível na Terra proveniente dos núcleos físséis); ii) fusão de núcleos leves (energia produzida no Sol pela queima de hidrogênio); e iii) radioatividade alfa e beta dos radionuclídeos (os que ocorrem na natureza e os produzidos artificialmente).

Agradecimento – O autor deseja aqui expressar o seu reconhecimento a José Guilherme T. Monteiro pelo empenho, competência e esmero colocados na preparação das ilustrações de qualidade ímpar. A leitura crítica e cuidadosa do texto original com as valiosas sugestões pelo Dr. Antonio F. F. Teixeira foram essenciais para a apresentação primorosa do texto final, pelo que o autor sente-se extremamente agradecido. Por fim, a qualidade insuperável da composição gráfica pela Francisca Valéria é especialmente reconhecida pelo autor.

Bibliografia

— E. Segrè, *From X-Rays to Quarks. Modern Physicists and their Discoveries*: Dover Publications, Mineola, N. Y. (1980); primeira publicação original: *Personaggi e Scoperte*

nella Fisica Contemporanea: Mondadori, Milano (1976) [tradução para o português: *Dos Raios X aos Quarks. Físicos Modernos e suas Descobertas*: Editora Universidade de Brasília, Brasília-DF (1987)].

– R. L. Sime, *Lise Meitner, a Life in Physics*: University of California Press, Berkeley, Ca. (1996).

– I. Hore-Lacy, *Nuclear Energy in the 21st Century*: World Nuclear University Press and Elsevier (2006).

– G. Camargo, *O Fogo dos Deuses. Uma história da energia nuclear*: Contraponto Editora Ltda., Rio de Janeiro-RJ (2006).

– A. D. Aczel, *Uranium Wars*: Palgrave Macmillan, New York (2009).

– J. Tennenbaum, *Energia Nuclear, Uma Tecnologia Feminina* (2^a Edição): Capax Dei Editora Ltda., Rio de Janeiro-RJ (2007).

– A. Marques, *Energia Nuclear e Adjacências*: EdUERJ, Rio de Janeiro-RJ (2009).

– O. A. P. Tavares, *Conversando sobre o Núcleo Atômico: Ciência e Sociedade*, vol. 1, Nº 1, p. 32 (2013).

– A. M. R. de Andrade, *A Opção Nuclear. 50 anos rumo à autonomia*: MAST, Rio de Janeiro-RJ (2006).

– J. F. de Carvalho, *Lixo Atômico. O que fazer?* : *Ciência Hoje*, vol. 2, Nº 12, p. 19 (1984).

– D. Weissbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb, A. Hussein, *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*: *Energy* **52**, 210 (2013).

– A. O. Pereira Jr., R. C. Costa, C. V. Costa, J. R. Marreco, and E. L. La Rovere, *Perspectives for the expansion of new*

renewable energy sources in Brazil: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **23**, 49 (2013).

– ANS-American Nuclear Society, *2015 International High-Level Radioactive Waste Management Conference*, Charleston, SC (USA), April 2015.

– Technology Roadmap-Nuclear Energy: OECD/IEA and OECD/NEA, 2015 Edition.

– Eletrobras-Eletronuclear: *Panorama da Energia Nuclear no Mundo*: Edição Nov. 2014.

– Sítios consultados: - WNA:World Nuclear Association, www.world-nuclear.org, - EIA: Energy Information Administration (USA), www.eia.doe.gov

– ABEN, Associação Brasileira de Energia Nuclear: Notícias (2014 e 2015).

– Revista BRASIL NUCLEAR (editada pela ABEN): Nºs 42 e 43 (2014).

Apêndice: Tratamento às “cinzas” nucleares (ou aos rejeitos radioativos)

Uma questão frequentemente colocada por grande número de pessoas em vários países, inclusive nos desenvolvidos e nos que optaram pelo uso da energia nuclear na geração de eletricidade, é sobre o destino do combustível utilizado, altamente radioativo, após reprocessamento, ou não, bem como dos diferentes tipos de resíduos de baixa e média atividade que são produzidos em todo o ciclo do combustível nuclear. Algumas considerações gerais ajudam numa resposta a essa questão: *i*) a tecnologia nuclear de geração de eletricidade em larga escala é uma indústria que se responsabiliza por todo o subproduto radioativo (rejeitos em geral) gerado em todas as fases do processo; *ii*) a quantidade de rejeito é mínima quando comparada à do rejeito gerado com o uso de combustíveis fósseis e ao “lixo” industrial; *iii*) o combustível utilizado nos reatores nucleares pode ser tratado como recurso energético (quando opção é feita pelo reprocessamento) ou considerado todo ele como rejeito a ser eliminado; *iv*) rejeitos radioativos não são, por excelência, nem mais perigosos e nem mais difíceis de serem tratados em comparação com o rejeito industrial; *v*) o consenso internacional sobre onde descartar os rejeitos de alta radioatividade é a eliminação em sítios geológicos profundos após acondicionamento apropriado; *vi*) o relativo baixo custo do tratamento e eliminação dos rejeitos está contido na composição do custo total da eletricidade produzida, pelo qual os consumidores deverão pagar.

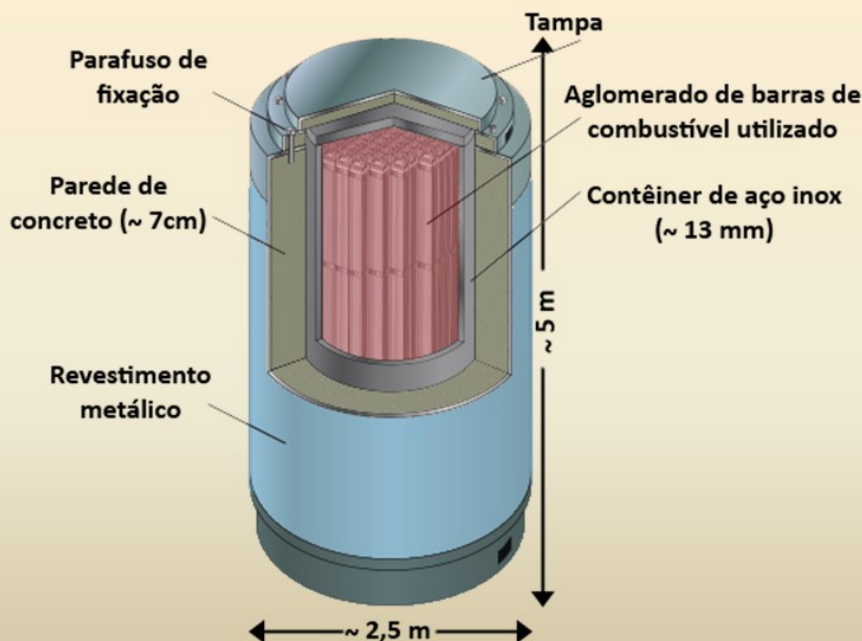
A finalidade última do tratamento dos rejeitos radioativos é proteger as pessoas e o meio ambiente contra os danos que os rejeitos poderiam eventualmente causar. Isolamento ou diluição do material ativo são procedimentos adotados de tal modo a não permitir um eventual retorno de radionuclídeos à biosfera numa quantidade que seja capaz de produzir males e/ou prejuízos. Os rejeitos radioativos são integralmente embalados e/ou encapsulados e/ou acondicionados em recipientes especiais, e o conjunto é rigorosamente administrado de modo a não produzir poluição nociva em qualquer nível

de radioatividade.

Rejeitos de baixo nível de radioatividade produzidos no ciclo do combustível nuclear (papéis, toalhas, ferramentas, aventais, filtros e outros) não necessitam blindagem e, após compactados e incinerados, podem ser descartados em depósitos comuns. Materiais contaminados, resinas, restos de produtos químicos e outros, constituem os resíduos de radioatividade de nível intermediário; alguns necessitam blindagem, e outros são solidificados com concreto ou betumem para isolamento final.

O principal componente do rejeito radioativo gerado no ciclo do combustível é o que resulta da “queima” do urânio enriquecido no elemento combustível dos reatores. Como já explicado anteriormente (página 20), ele contém uma variedade de actínídeos e produtos de fissão. Como o combustível utilizado é extremamente quente logo após ser retirado do caroço do reator, ele precisa primeiro ser resfriado e blindado. Isso é feito colocando-o em piscinas profundas junto do próprio reator, onde a água serve de blindagem e refrigerante. Onde houver reprocessamento para reciclagem do combustível utilizado, os produtos de fissão e os actínídeos que não ^{235}U , ^{238}U e ^{239}Pu serão tratados como rejeitos de alto nível de radioatividade (U e Pu serão, nesse caso, reutilizados em novas cargas de combustível para uso nos reatores); caso contrário, todo o combustível utilizado será classificado como rejeito de alto nível de radioatividade. Em ambos os casos, após anos ou décadas de acondicionamento em piscinas o calor e a atividade dos rejeitos ficarão reduzidos substancialmente em relação ao que era no instante da remoção do interior do reator. Nessas condições eles poderão ser encapsulados, vitrificados e/ou acondicionados em tambores de estrutura sólida apropriada (*dry cask storage**) que permitirão o transporte e/ou armazenamento por tempo indeterminado em depósitos subterrâneos. Há também a perspectiva de eliminar os rejeitos nucleares de alta atividade em furos extremamente profundos e estreitos (*boreholes*), de ~ 5 km de profundidade e largura não maior do que 60cm, espaçados de alguns metros uns dos outros e selados de forma segura. Os furos deverão ser feitos em rochas ígneas (granito) geologicamente estáveis, e o material ativo vem previamente embalado em recipientes cilíndricos especiais. Pesquisadores na Suécia, Reino Unido, EUA e Rússia têm considerado essa alternativa desde os anos 1990. Resultados de pesquisas recentes sobre essa forma inovadora de descarte de rejeitos radioativos e questões afins foram apresentados e discutidos na última conferência internacional sobre gerenciamento de rejeitos de alto nível de radioatividade [ANS, 2015] (o leitor interessado em tratamento aos rejeitos radioativos poderá também consultar, entre outras fontes, a biblioteca da World Nuclear Association-WNA (www.world-nuclear.org) nos artigos pertinentes (radioactive wastes, disposal concepts, management, waste disposal, myths and reality, treatment, national policies, ethical aspects and others)).

CONTÊINER PARA ARMAZENAMENTO A SECO DE COMBUSTÍVEL NUCLEAR UTILIZADO



**Dry cask storage* é um grande recipiente cilíndrico preparado para armazenar combustível nuclear utilizado que foi resfriado previamente em piscinas ao lado dos reatores por pelo menos um ano. Esses recipientes são de aço inoxidável, revestidos com parede espessa de concreto, e envoltos por uma camada metálica externa. Podem ser lacrados com solda especial ou aparafusados com extrema segurança. São recipientes considerados inexpugnáveis, permitindo confinamento absolutamente seguro do material ativo. Os cilindros podem ser recobertos com aço adicional, concreto ou outro material que sirva de blindagem contra as radiações. São apropriados para transporte e/ou armazenamento. Começaram a ser usados há uns 35 anos, quando as piscinas montadas ao lado dos reatores não mais conseguiam dar conta de armazenar a quantidade cada vez maior do combustível utilizado. Desde 2000, EUA, Canadá e vários países da Europa e Ásia e a Argentina vem utilizando os “*dry cask storage*” ou similares.

Sobre o autor – Odilon A. P. Tavares (72) é Doutor em Física Nuclear pelo CBPF (1978) onde é Pesquisador Titular desde 1985. Liderou e/ou participou de vários projetos de pesquisa científica em colaboração com instituições brasileiras e estrangeiras. É autor em cerca de 130 publicações sobre temas relacionados à radioatividade natural e artificial (desintegração por emissão de próton, partícula alfa, clusters e fissão) e reações nucleares de fissão, “spallation” e íons pesados. Um dos descobridores, em 1975, da radioatividade exótica, na qual o núcleo atômico emite fragmentos nucleares mais pesados do que a partícula alfa, atualmente é pesquisador colaborador junto ao grupo de física nuclear do CBPF.