

Histórico da indústria nuclear no Brasil e no Mundo

Desafios do projeto de novos reatores

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

4 de abril de 2021

1 Motivação

2 Urânio

3 Uma pequena (grande) história do Urânio

4 Situação atual

5 Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

6 Síntese

ENERGIA

Escala Kardashev

N. Kardashev (1964)

Civilização classe I toda a energia que incide no planeta

Civilização classe II toda a energia da própria estrela

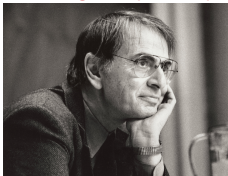
Civilização classe III toda a energia da própria galáxia



Escala Kardashev

Onde estamos?

C. Sagan (1973)



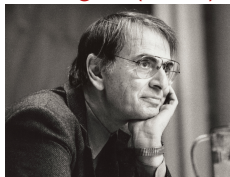
$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10} \quad (1)$$

P : Potência total utilizada pela humanidade.

Escala Kardashev

Onde estamos?

C. Sagan (1973)



$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10} \quad (1)$$

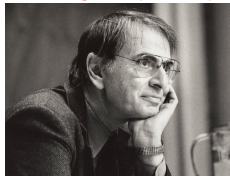
P : Potência total utilizada pela humanidade.

Em 2015: $K = 0,7239 \downarrow$

Escala Kardashev

Onde estamos?

C. Sagan (1973)



$$K = \frac{\log_{10} P - 6}{10} \quad (1)$$

P : Potência total utilizada pela humanidade.

Em 2015: $K = 0,7239 \downarrow$

E tudo isso preservando o meio ambiente!

O quê e Por quê?

Pesquisa em materiais para energia

us- apresentar custos de operação
re- equivalentes. O ponto, entre-
is a tanto, não é apenas econômico.
ge- O País não pode prescindir de
por Angra 3, assim como não pode
prescindir de Belo Monte. Ne-
cessitamos de uma rede flexí-
vel, em que as diferentes partes
possam compensar deficiên-
cias de fornecimento em situa-
ções de emergência.
Há, entretanto, uma fonte de
vulnerabilidade. O Brasil care-

Fonte: C. G. Schön, *O Estado de São Paulo*, 1/06/2015, p. A2

Pesquisa em materiais para energia

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- Tecnologias de petróleo e gás natural
- Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- Tecnologias nucleares

Pesquisa em materiais para energia

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- **Tecnologias de petróleo e gás natural**
- Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- Tecnologias nucleares



Centro de Pesquisa
para Inovação em Gás

Pesquisa em materiais para energia

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- Tecnologias de petróleo e gás natural
- **Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica**
- Tecnologias nucleares

Pesquisa em materiais para energia

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- Tecnologias de petróleo e gás natural
- Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- Tecnologias nucleares
 - Fissão nuclear
 - Fusão nuclear

Pesquisa em materiais para energia

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- Tecnologias de petróleo e gás natural
- Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- Tecnologias nucleares
 - Fissão nuclear
 - Fusão nuclear

Pesquisa em materiais para energia

Desenvolvimento de materiais e tecnologias para o aproveitamento de energia

- Tecnologias de petróleo e gás natural
- Tecnologias para conversão de luz solar e energia eólica
- Tecnologias nucleares
 - Fissão nuclear
 - Fusão nuclear

Desafios nos fundamentos e na tecnologia

- 1 Motivação
- 2 Urânio**
- 3 Uma pequena (grande) história do Urânio
- 4 Situação atual
- 5 Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro
- 6 Síntese

De onde vem nossa energia?

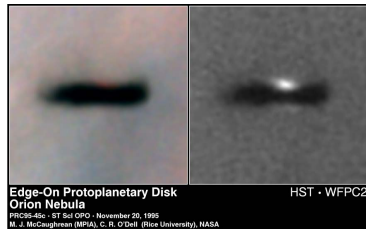
- *Big Bang*: Hidrogênio e Hélio (fusão nuclear)



Fonte: NASA, The Big Bang (<http://svs.gsfc.nasa.gov/10128>)

De onde vem nossa energia?

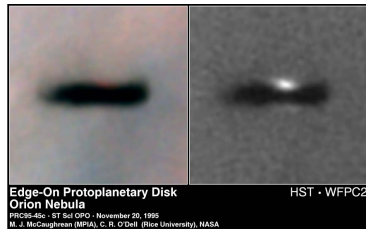
- *Big Bang*: Hidrogênio e Hélio (fusão nuclear)
 - Energia potencial gravitacional (nebulosa primordial)



Fonte: Hubble Space Telescope (http://messier.seds.org/more/m042_hst2.html)

De onde vem nossa energia?

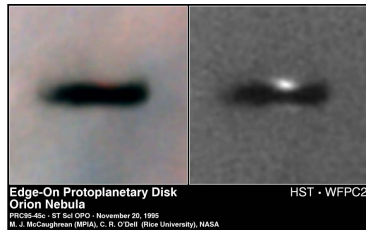
- *Big Bang*: Hidrogênio e Hélio (fusão nuclear)
 - Energia potencial gravitacional (nebulosa primordial)
 - Fontes anteriores ao próprio sistema solar



Fonte: Hubble Space Telescope (http://messier.seds.org/more/m042_hst2.html)

De onde vem nossa energia?

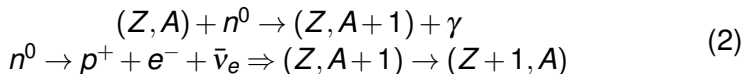
- *Big Bang*: Hidrogênio e Hélio (fusão nuclear)
 - Energia potencial gravitacional (nebulosa primordial)
 - Fontes anteriores ao próprio sistema solar



Fonte: Hubble Space Telescope (http://messier.seds.org/more/m042_hst2.html)

Nucleosíntese do Urânio

Urânio $\rightarrow$ fase de expansão da onda de choque em explosões de supernovas tipo II (colapso de núcleo) pelo processo de absorção rápida de nêutrons (*r-process*, $\rho_n \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$):



SN 1987A

- 1 Motivação
- 2 Urânio
- 3 Uma pequena (grande) história do Urânio**
- 4 Situação atual
- 5 Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro
- 6 Síntese

Primórdios

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).

Primórdios

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).
Como os astrofísicos sabem disso?

Primórdios

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).

Como os astrofísicos sabem disso?

- **Cronologia: razão U/Pb (depende da eficiência do *r-process*).**
- Múltiplos eventos: heterogeneidade da composição das estrelas do halo galático.

Fonte: D. J. Clayton *Astrophys. J.* **139** (1964) 637 – 663.

Primórdios

Entre 11 e 5 bilhões de anos antes da formação do sistema solar, múltiplos eventos de supernovas enriqueceram o meio interestelar em elementos mais pesados que o Ferro (incluindo Urânio).

Como os astrofísicos sabem disso?

- Cronologia: razão U/Pb (depende da eficiência do *r-process*).
- Múltiplos eventos: heterogeneidade da composição das estrelas do halo galático.

Fonte: Sneden *et. al.*, *Astrophys. J.* **533** (2000) L139 – L142.

Urânio: formação e composição da Terra

- Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), só $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U} \rightarrow 8 \text{ de } 44 \text{ TW}$.

Medidas de neutrinos, fonte: The KamLAND Collab. *Nature Geoscience* **4** (2011) 647 – 651.

Urânio: formação e composição da Terra

- Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural),
 $U + Th + K \rightarrow 20 \text{ de } 44 \text{ TW}$.

Medidas de neutrinos, fonte: The KamLAND Collab. *Nature Geoscience* **4** (2011) 647 – 651.

Urânio: formação e composição da Terra

- Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20 \text{ de } 44 \text{ TW}$.
- Hipótese: há um reator nuclear no centro da Terra (+2 TW).

Medidas de neutrinos, fonte: The KamLAND Collab. *Nature Geoscience* **4** (2011) 647 – 651.

Urânio: formação e composição da Terra

- Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20 \text{ de } 44 \text{ TW}$.
- Hipótese: há um reator nuclear no centro da Terra (+2 TW).
- Na crosta terrestre: disseminado (amplamente em pequenas quantidades, pois o Urânio é litófilo).

Fonte: A. N. Holden, *Physical Metallurgy of Uranium*, Reading-MA:Addison-Wesley Pub. Co., 1958.

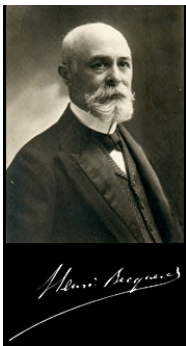
Urânio: formação e composição da Terra

- Fonte de calor atual para o núcleo terrestre (decaimento natural), $U + Th + K \rightarrow 20 \text{ de } 44 \text{ TW}$.
- Hipótese: há um reator nuclear no centro da Terra (+2 TW).
- Na crosta terrestre: disseminado (amplamente em pequenas quantidades, pois o Urânio é litófilo).
- Isolado por M. Klaproth (1789) $\rightarrow$ propriedades físico-químicas peculiares

Fonte: A. N. Holden, *Physical Metallurgy of Uranium*, Reading-MA: Addison-Wesley Pub. Co., 1958.

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)

Estudava a fosforescência de um sal de Urânio — $K_2(UO_2)(SO_4)_2$.



se voile pas par une exposition au Soleil, durant une journée.

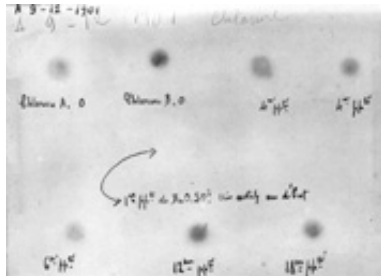
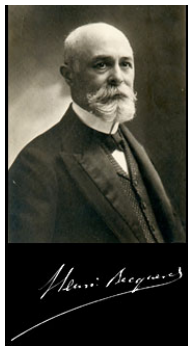
» On pose sur la feuille de papier, à l'extérieur, une plaque de la substance phosphorescente, et l'on expose le tout au Soleil, pendant plusieurs heures. Lorsqu'on développe ensuite la plaque photographique, on reconnaît que la silhouette de la substance phosphorescente apparaît en noir sur le cliché. Si l'on interpose entre la substance phosphorescente et le papier une pièce de monnaie, ou un écran métallique percé d'un dessin à jour, on voit l'image de ces objets apparaître sur le cliché.

On peut répéter les mêmes expériences en interposant entre la sub-

Fonte: H. Becquerel, *Comptes Rendus* **122** (1896) 420 – 421.

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)

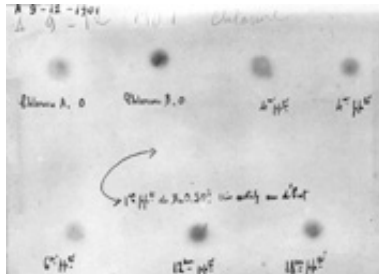
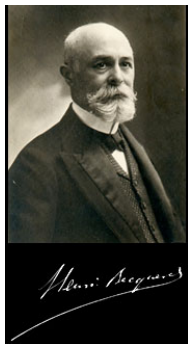
Estudava a fosforescência de um sal de Urânio — $\text{K}_2(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_2$.



Fonte: H. Becquerel, *Mem. Acad. Sciences Institut de France* **46** (1903).

Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)

Estudava a fosforescência de um sal de Urânio — $\text{K}_2(\text{UO}_2)(\text{SO}_4)_2$.



Fonte: **Radioatividade**: M. Curie, *Compte Rendus* **126** (1898) 1101 – 1103.

James Chadwick (1891 – 1974)

$$A \gtrapprox 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick): prótons e elétrons estão combinados em pares no núcleo.

Fonte: J. Chadwick, *Proc. Royal Soc. A* **176** (1932) 692 – 708.

James Chadwick (1891 – 1974)

$$A \gtrapprox 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick): prótons e elétrons estão combinados em pares no núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação por partículas α de uma fonte de Po.

Fonte: J. Chadwick, *Proc. Royal Soc. A* **176** (1932) 692 – 708.

James Chadwick (1891 – 1974)

$$A \gtrapprox 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick): prótons e elétrons estão combinados em pares no núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação por partículas α de uma fonte de Po.

- Hipótese inicial: suposto γ teria energia cinética irreal.

Fonte: J. Chadwick, *Proc. Royal Soc. A* **176** (1932) 692 – 708.

James Chadwick (1891 – 1974)

$$A \gtrapprox 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick): prótons e elétrons estão combinados em pares no núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação por partículas α de uma fonte de Po.

- Hipótese inicial: suposto γ teria energia cinética irreal.
- Resultados de Curie e Joliot: essa radiação era capaz de extrair prótons de materiais contendo hidrogênio (parafina).

Fonte: J. Chadwick, *Proc. Royal Soc. A* **176** (1932) 692 – 708.

James Chadwick (1891 – 1974)

$$A \gtrapprox 2Z \quad (3)$$

Conjectura de Rutheford (orientador de Chadwick): prótons e elétrons estão combinados em pares no núcleo.

Radiação misteriosa emitida por Be e B após irradiação por partículas α de uma fonte de Po.

- Hipótese inicial: suposto γ teria energia cinética irreal.
- Resultados de Curie e Joliot: essa radiação era capaz de extrair prótons de materiais contendo hidrogênio (parafina).
- Chadwick demonstrou que essa estranha radiação era uma partícula sem carga, mas com massa aproximadamente igual à do próton $\rightarrow$ o nêutron.

Fonte: J. Chadwick, *Proc. Royal Soc. A* **176** (1932) 692 – 708.

Otto Hahn - Lise Meitner

- Neutrons são partículas sem carga elétrica $\rightarrow$ não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo

Otto Hahn - Lise Meitner

- Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)

Otto Hahn - Lise Meitner

- Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos

Otto Hahn - Lise Meitner

- Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos
- Hahn e Meitner se destacavam (trinta anos de trabalhos conjuntos), mas ela teve que fugir para a Suécia em 1938

Otto Hahn - Lise Meitner

- Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos
- Hahn e Meitner se destacavam (trinta anos de trabalhos conjuntos), mas ela teve que fugir para a Suécia em 1938
- Hahn tem a primazia da descoberta da fissão

Fonte: O. Hahn, F. Strassmann *Naturwiss.* **27** (1939) 11 – 15.

Otto Hahn - Lise Meitner

- Neutrons são partículas sem carga elétrica → não sujeitos à barreira Coulombiana do núcleo
- Tão logo eles foram descobertos, começaram a ser empregados como sondas → elementos transurânicos (os Curie, Fermi, Hahn, Meitner e muitos outros)
- Urânio, como o elemento de maior número atômico, era preferido nesses experimentos
- Hahn e Meitner se destacavam (trinta anos de trabalhos conjuntos), mas ela teve que fugir para a Suécia em 1938
- Hahn tem a primazia da descoberta da fissão
- Meitner deu uma clara interpretação (e definiu o nome)

Fonte: L. Meitner, O. R. Frisch *Nature* **143** (1939) 239 – 240.

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura

Leo Szilárd (1898 – 1964)

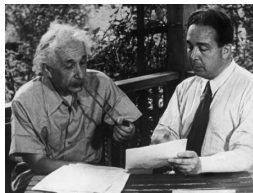
- Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares
- Publicou tudo em patentes (ele deteve a patente da produção de energia por reações nucleares)

Leo Szilárd (1898 – 1964)

- Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares
- Publicou tudo em patentes (ele deteve a patente da produção de energia por reações nucleares)
- Foi responsável pela carta de Einstein a Roosevelt



Fonte: Atomic Heritage Foundation <http://www.atomicheritage.org/key-documents/einstein-szilard-letter>

Leo Szilárd (1898 – 1964)

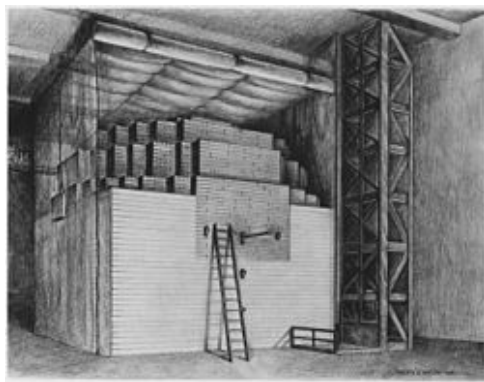
- Idéia da reação em cadeia veio a ele quando Rutheford declarou que gerar energia a partir do átomo era loucura
- Desenvolveu o conceito de massa crítica e previu o uso em energia e em aplicações militares
- Publicou tudo em patentes (ele deteve a patente da produção de energia por reações nucleares)
- Foi responsável pela carta de Einstein a Roosevelt → **Projeto Manhattan**



Fonte: Atomic Heritage Foundation <http://www.atomicheritage.org/key-documents/einstein-szilard-letter>

Enrico Fermi (1901 – 1953)

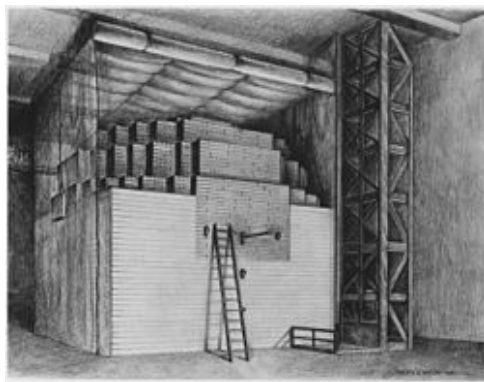
Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio



Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL (<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

Enrico Fermi (1901 – 1953)

Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio
→ reação em cadeia de Szilárd.

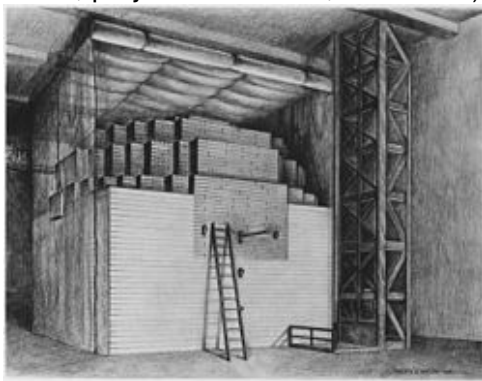


Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL (<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

Enrico Fermi (1901 – 1953)

Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio
→ reação em cadeia de Szilárd.

Enrico Fermi construiu o primeiro reator artificial da história (Chicago Pile 1, projeto Manhattan, 2/12/1942)



Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL (<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

Enrico Fermi (1901 – 1953)

Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio
→ reação em cadeia de Szilárd.

Enrico Fermi construiu o primeiro reator artificial da história (Chicago



Pile 1, projeto Manhattan, 2/12/1942)
(camada)

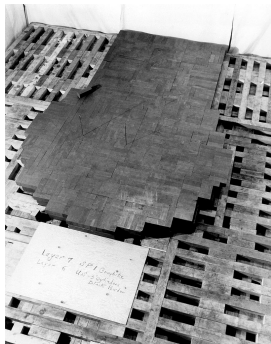
(Quarta

Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL (<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

Enrico Fermi (1901 – 1953)

Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio
→ reação em cadeia de Szilárd.

Enrico Fermi construiu o primeiro reator artificial da história (Chicago



Pile 1, projeto Manhattan, 2/12/1942)
camada)

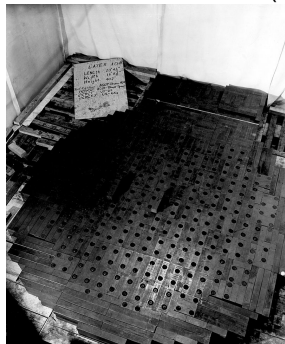
(Sétima

Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL (<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

Enrico Fermi (1901 – 1953)

Por volta de 1939 - 1940 → nêutrons são produtos de fissão do Urânio
→ reação em cadeia de Szilárd.

Enrico Fermi construiu o primeiro reator artificial da história (Chicago



Pile 1, projeto Manhattan, 2/12/1942)
camada)

(Décima

Fonte: Atomic Heritage Foundation, Chicago-IL (<http://www.atomicheritage.org/location/chicago-il>)

E no Brasil?

1934 - 1937: Criação da Universidade de São Paulo (e da FFCL) → Gleb Wathagin, Mário Schönberg, Marcello Damy de Souza Santos.



Gleb Wathagin

Fonte: N. Marcolin, Revista Pesquisa FAPESP, Ed. 195, maio 2012.

E no Brasil?

1947: Almirante Álvaro Alberto de Mota e Silva → Criação do CNPq para impulsionar a pesquisa nuclear (núcleo da CNEN).



Almirante Álvaro Alberto

Fonte: Instituto Histórico e Geográfico de Sorocaba.

E no Brasil?

Primeiros reatores de pesquisa:

1957 IEA-R1 → IPEN

1960 TRIGA Mark 1 (UFMG) → produção de radioisótopos

1962 Argonauta (IEN, Rio de Janeiro) → primeiro reator
construído no Brasil



Núcleo do reator IEA-R1

J. P. N. Cárdenas, CRPq/IPEN.

E no Brasil?

A partir de 1974: Operação comercial (e programa paralelo)

1974 -1975 Criação da Nuclebrás (atual INB) e assinatura do tratado Brasil - Alemanha

1978 Início do “Programa Paralelo” (núcleo do PROSUB)

1982 - 1985 Início de operação de Angra 1 (tecnologia da Westinghouse) e anúncio do domínio do ciclo completo

1990 Lacração da Serra do Cachimbo

2000 - 2001 Início das operações de Angra 2 (tecnologia da Siemens - KWU) e Fábrica de Combustível Nuclear (FCN, Resende-RJ)

2010 Início da construção de Angra 3

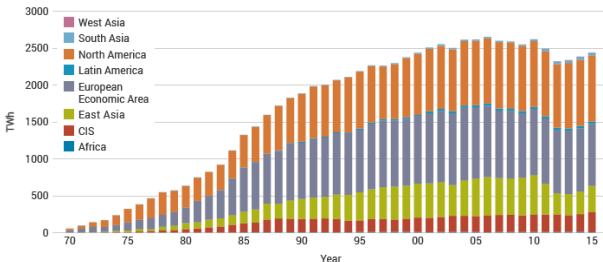
jan 2015 Apagão devido aos reservatórios vazios

- 1 Motivação
- 2 Urânio
- 3 Uma pequena (grande) história do Urânio
- 4 Situação atual**
- 5 Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro
- 6 Síntese

Evolução da produção de energia nuclear

Participação atual na matrix mundial: 11 % (era 13% em 2009).

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

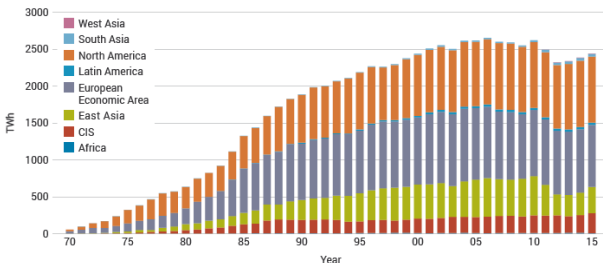
1979: Three Miles Island

Fonte: World Nuclear Association.

Evolução da produção de energia nuclear

Participação atual na matrix mundial: 11 % (era 13% em 2009).

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

1979: Three Miles Island

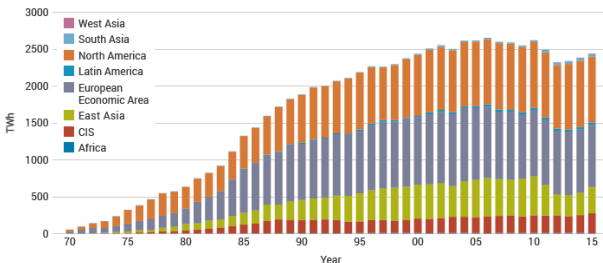
1986: Chernobyl

Fonte: World Nuclear Association.

Evolução da produção de energia nuclear

Participação atual na matrix mundial: 11 % (era 13% em 2009).

Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

1979: Three Miles Island

1986: Chernobyl

2011: Fukushima

Fonte: World Nuclear Association.

- 1 Motivação
- 2 Urânio
- 3 Uma pequena (grande) história do Urânio
- 4 Situação atual
- 5 Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro**
- 6 Síntese

Desafios

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Novos projetos de reatores

- Reatores com tolerância a acidentes (Geração IV)

Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro

Novos projetos de reatores

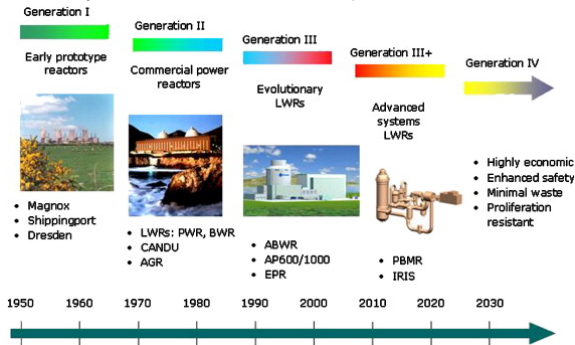
- Reatores com tolerância a acidentes (Geração IV)
- Reatores para propósitos especiais

Reatores de Geração IV

Consórcio internacional (2001)

Brasil participa como membro não signatário.

- Reatores térmicos (nêutrons são moderados)
- Reatores rápidos (nêutrons não são moderados, possibilidade de “queima” de actínidos)

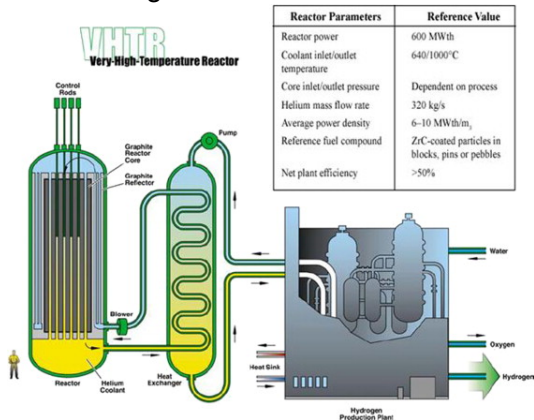


Fonte: T. Abram, S. Ion, Energy Policy **36** (2008) 4323 – 4330.

Reatores térmicos

Reator de ultra alta temperatura, VHTR

Fluído refrigerante: Hélio.

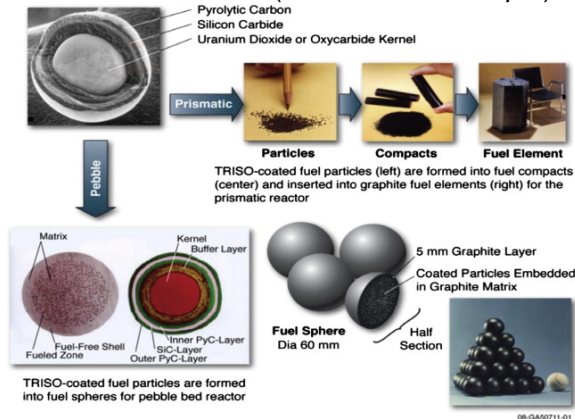


Fonte: T. Abram, S. Ion, Energy Policy **36** (2008) 4323 – 4330.

Reatores térmicos

Reator de ultra alta temperatura, VHTR

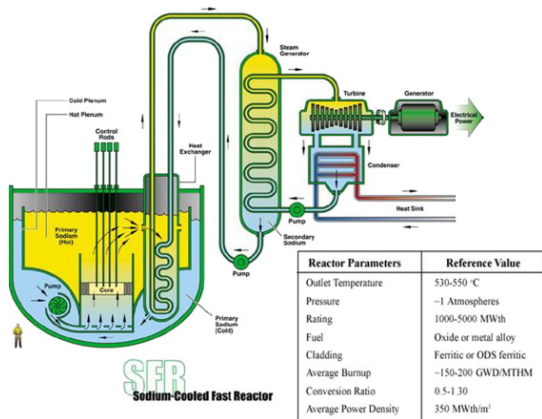
Combustível TRISO (*tristructural isotropic*)



Fonte: P. Sabharwal *et al.*, Energy Conv. Management **74** (2013) 574 – 581.

Reatores rápidos

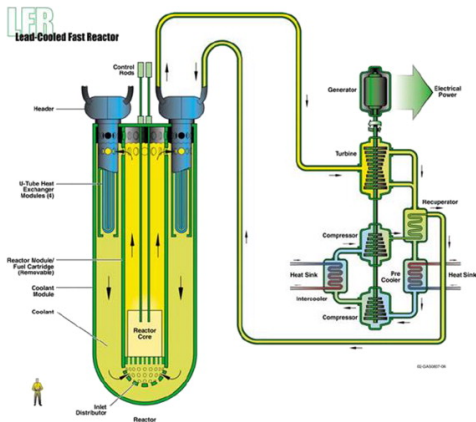
Reator resfriado a Sódio, SFR



Fonte: T. Abram, S. Ion, Energy Policy **36** (2008) 4323 – 4330.

Reatores rápidos

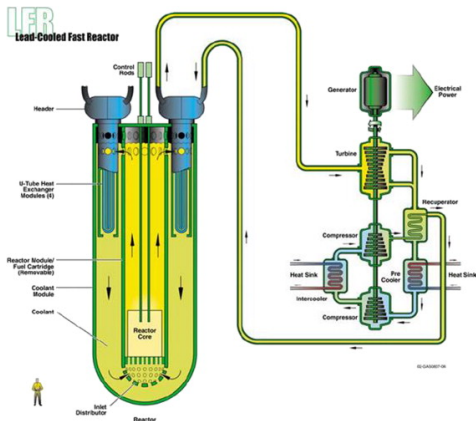
Reator resfriado a Chumbo, LFR



Fonte: T. Abram, S. Ion, Energy Policy **36** (2008) 4323 – 4330.

Reatores rápidos

Reator resfriado a Chumbo, LFR



Produz Polônio no líquido refrigerante → Termodinâmica do sistema Bi – Pb – Po (*ab initio*).

Projeto CNPq-FWO (Bélgica): C. G. Schön, H. M. Petrilli (USP), S. Cottenier (U. Ghent).

Reatores para propósitos especiais

- Reatores para produção de radiofármacos (RMB, IPEN)
- Reatores compactos (Pesquisa, propulsão)

Reatores para propósitos especiais

- Reatores para produção de radiofármacos (RMB, IPEN)
- Reatores compactos (Pesquisa, propulsão)

C. G. Schön, M. A. Tunes, V. O. Santos, Projeto Escola Politécnica - Marinha do Brasil.

O caso brasileiro



Produção de energia (diversificação da matriz) e produção de radiofármacos.

<https://www.noticiasaoiminuto.com.br/tech/323887/angra-3-e-reator-multiproposito-sao-prioridades-para-2017>

O caso brasileiro



É a 5ª reserva mundial de Urânio: Austrália (28,7%), Cazaquistão (11,2%), Canadá (8,3%), Rússia (8,3%), **Brasil (5,3%)**.

http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/outras_fontes/10_2_3.htm

<http://www.inb.gov.br/pt-br/Detalhe/Conteudo/>

[inb-quer-retomar-producao-de-uranio-em-2017-e-busca-novas-parcerias/Origem/394](http://www.inb.gov.br/pt-br/Detalhe/Conteudo/inb-quer-retomar-producao-de-uranio-em-2017-e-busca-novas-parcerias/Origem/394)

O caso brasileiro



Detém a tecnologia de enriquecimento (ciclo completo).

<http://diariodovale.com.br/economia/inb-produz-mais-uma-recarga-de-angra-2/>

O caso brasileiro



Tem áreas para descarte seguro de resíduos.

<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Gerenciametoderes%C3%ADduos/Res%C3%ADduosradioativos>.

O caso brasileiro



Tem áreas para descarte seguro de resíduos. A faca e o queijo.

<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Gerenciametoderes%C3%ADduos/Res%C3%ADduosradioativos>.

- 1 Motivação
- 2 Urânio
- 3 Uma pequena (grande) história do Urânio
- 4 Situação atual
- 5 Desafios da Engenharia Nuclear: o caso brasileiro
- 6 Síntese**

Síntese

Síntese

Energia não é apenas algo útil, mas também um objetivo a ser perseguido.

Síntese

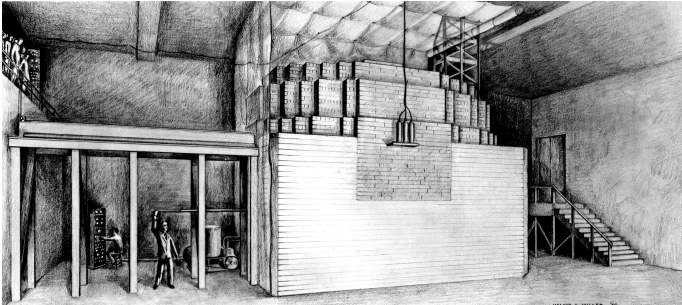
Urânio é um presente do universo, dado muito antes da formação do sistema solar. Não usá-lo, portanto, é um “insulto” àquelas pobres estrelas que explodiram por nós.

Síntese

O Brasil, com a 5^a maior reserva de minério de Urânio do mundo, tem condições ideais (e necessidade) para a exploração da energia nuclear.

Síntese

O trabalho está apenas se iniciando!



“It’s a long way to the top, if you wanna rock’n’roll...”

Young, Young, Scott, 1975