

Energia Nuclear Riscos ou Oportunidades? Sua Importância para a Sociedade

José Augusto Perrotta

Comissão Nacional de Energia Nuclear

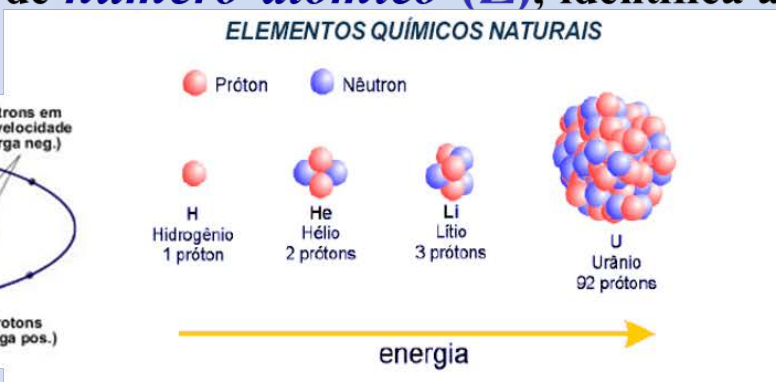
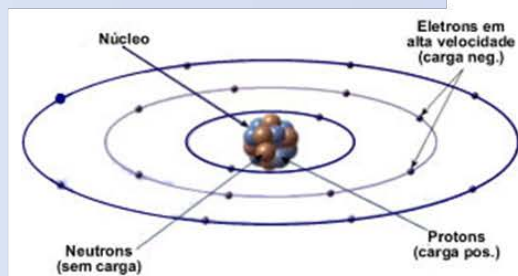
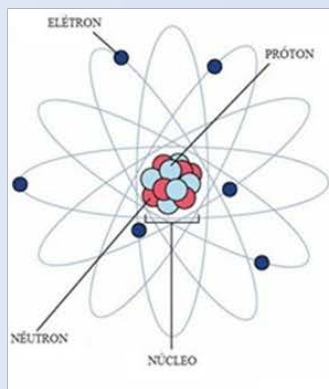
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP

perrotta@ipen.br

- *Conceitos básicos sobre energia nuclear*
- *Aplicação na medicina nuclear*
- *Conceitos sobre reatores nucleares*
- *Reatores Nucleares no Brasil*
- *Ciclo do Combustível Nuclear*
- *Organização Atual do Programa Nuclear Brasileiro*

Átomo

- O átomo é a menor parte da estrutura da matéria.
- A estrutura do átomo consiste de um núcleo onde fica concentrada sua massa formada, basicamente, por partículas de carga positiva (**prótons**) e partículas de mesmo tamanho mas sem carga (**nêutrons**) .
- Girando ao redor do núcleo estão os **elétrons**, de carga negativa.
- Em equilíbrio, o número de elétrons é igual ao número de prótons no átomo.
- As reações químicas ocorrem pela interação dos elétrons dos átomos.
- O número de prótons, denominado de **número atômico (Z)**, identifica a característica química do átomo.



Classificação Periódica dos Elementos Químicos

Tabela Periódica Virtual - 1.0.164

Mostrar grupos como: Famílias IUPAC

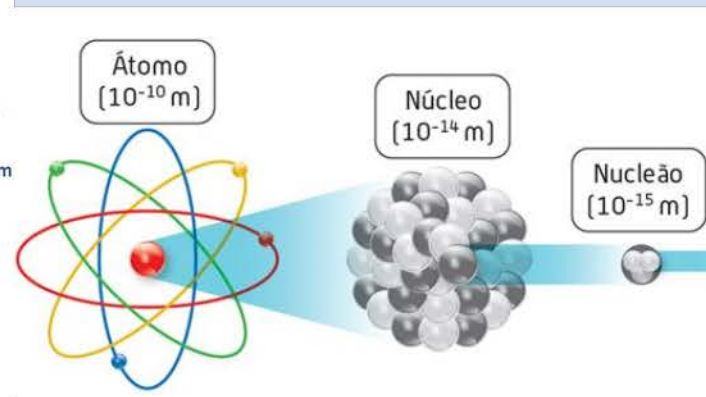
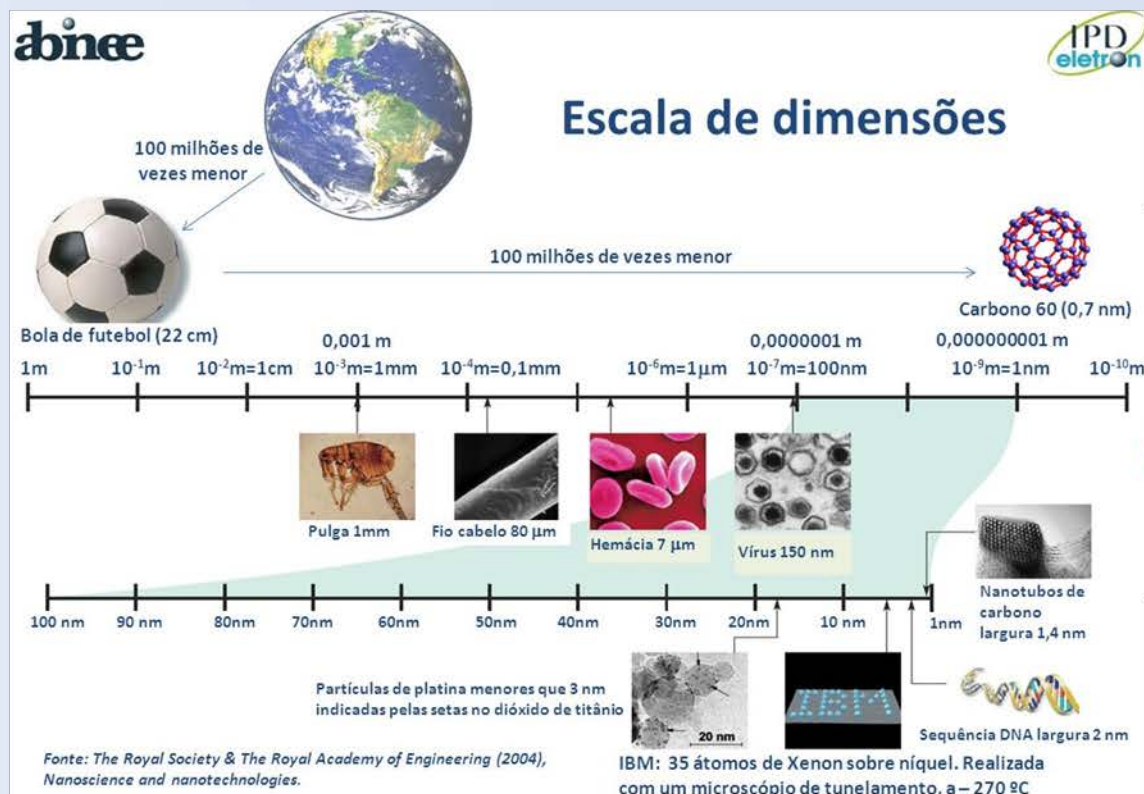
Legenda

- Metais Alcalinos
- Alcalinos-Terrosos
- Metais de Transição
- Outros Metais
- Semimetais
- Não-Metais (Ametais)
- Ametais Calcogênios
- Ametais Halogênios
- Gases Nobres
- Série dos Lantanídeos
- Série dos Actínidos
- Sem Classificação

Propriedades

Número Atômico	Elemento	Massa Atômica	Camadas	Orbital
92	Urânio - 092	238,02891(3)	2,8,18,32,21,9,2	5f3
Raio Covalente	Raio Iônico	Raio Atômico	Volume Atômico	Configuração Eletrônica
1,42 Å	1,11E+3 / 0,89E+4	1,61 Å	12,5 cm³/mol	[Rn] 5f3,6d1,7s2
Fusão	Ebulição	Estado à C.N.T.P.	Densidade a 300K	Eletronegatividade
1132 °C	3818 °C	Sólido	18,90 g/cm³	1,38
Condutividade Elétrica	Rede Cristalográfica	Origem	1ª E. de Ionização	Nome em Inglês
3,6 E6/ohms/m	Ortorrômbica	Natural	6,05 V	Uranium
Origem do Nome	Descoberto por / Descoberto em			
Do astrônomo Urano (q. v.) + -io³	Klaproth / 1789			

Escala de Dimensões



Átomo

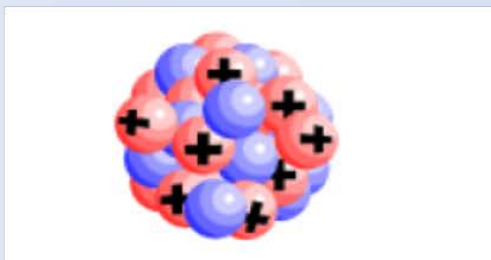
- O número de nêutrons no núcleo do átomo pode ser variável, pois eles não têm carga elétrica. Desta forma, um mesmo elemento químico pode ter massas diferentes. A soma do número de prótons e número de nêutrons de um núcleo é denominado **número de massa (A)**. Átomos de um mesmo elemento químico (mesmo número atômico) e número de massa diferentes são denominados **isótopos**.
- Exemplos de isótopos:
 - Hidrogênio, $Z=1$, existe na natureza na forma de 3 isótopos: o hidrogênio, o deutério e o trítio.



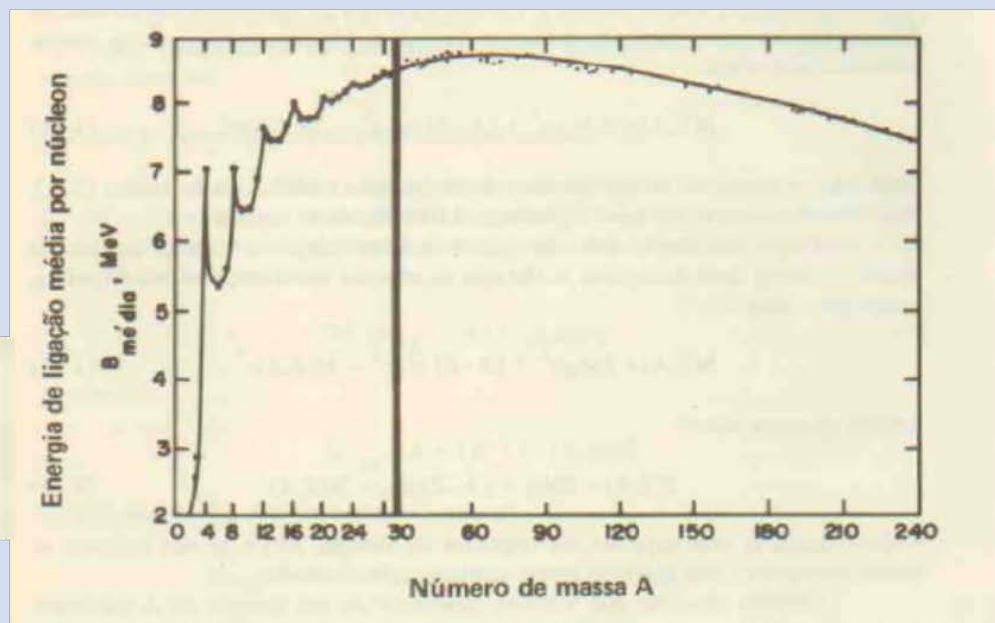
- Urânio, $Z=92$, existe na natureza na forma de 3 isótopos:
 - U-234 com $A=142$ e teor isotópico desprezível
 - U-235 com $A=143$ e teor isotópico de 0,7%
 - U-238 com $A=146$ e teor isotópico de 99,3%

Estrutura do Núcleo do Átomo

- Os prótons têm a tendência de se repelirem, pois têm a mesma carga (positiva). Como eles estão juntos no núcleo, comprova-se a existência de uma energia nos núcleos dos átomos com mais de uma partícula para manter essa estrutura. A energia que mantêm os prótons e nêutrons juntos no núcleo é a *energia nuclear*, isto é a *energia de ligação dos nucleões* (partículas do núcleo).



$$B(Z,A) = Z M_H c^2 + (A-Z) m_n c^2 - M(Z,A) c^2$$



Estrutura do Núcleo do Átomo

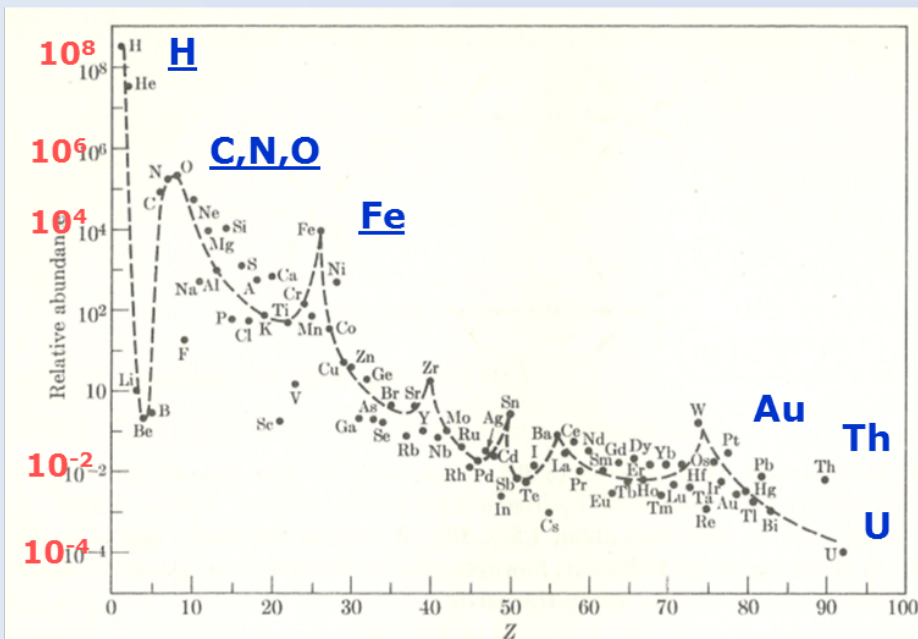


Fig. 8-23. Cosmic abundance of the elements. [Data from H. Urey and H. Brown, *Phys. Rev.* **88**, 248 (1952)]

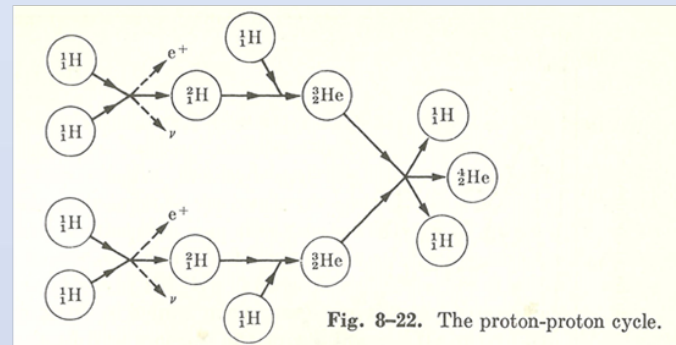


Fig. 8-22. The proton-proton cycle.

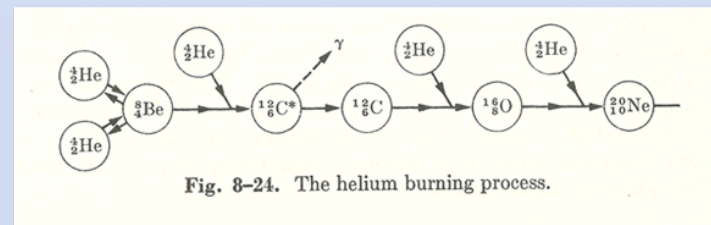


Fig. 8-24. The helium burning process.

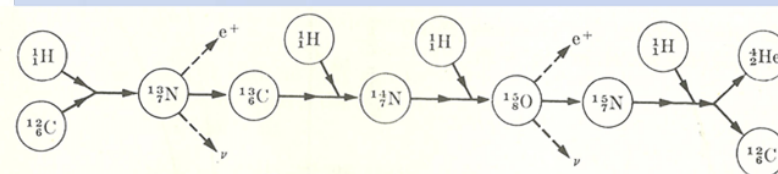
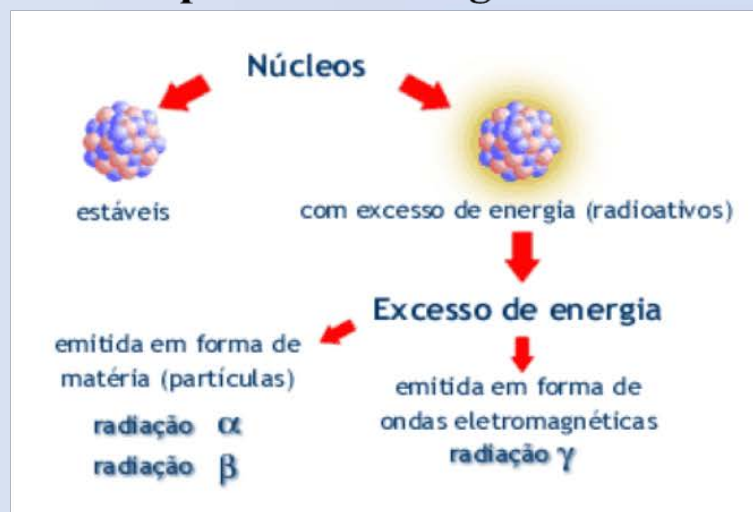


Fig. 8-21. The carbon cycle.

Radioatividade

- Comprovou-se que um núcleo energético, por excesso de partículas ou de cargas, tende a estabilizar-se emitindo algumas partículas. O fenômeno foi denominado *radioatividade* e os elementos que apresentam essa propriedade são chamados de *elementos radioativos ou radioisótopos*.
- A radioatividade tem característica única para cada nuclídeo, ou seja, tipo de radiação emitida e espectro de energia dessa radiação emitida.



Principais radiações

Partículas: (Possuem massa)

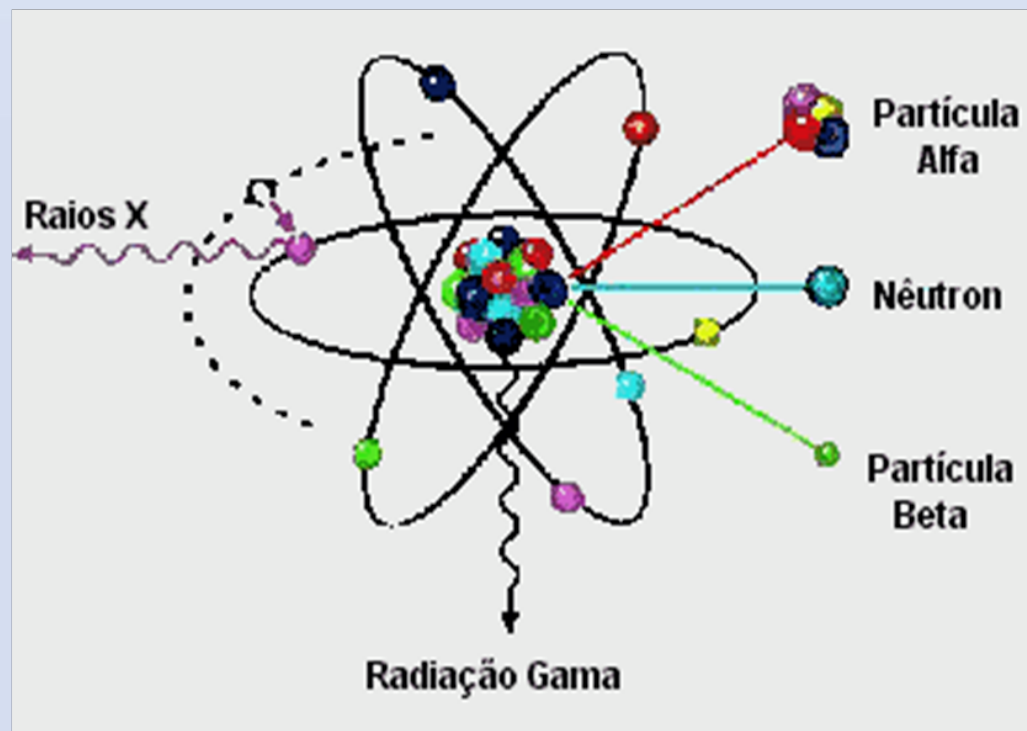
Alfa (α)

Beta (β^+ ; β^-)

Nêutrons (n)

Prótons (p^+)

Elétrons (e^-)

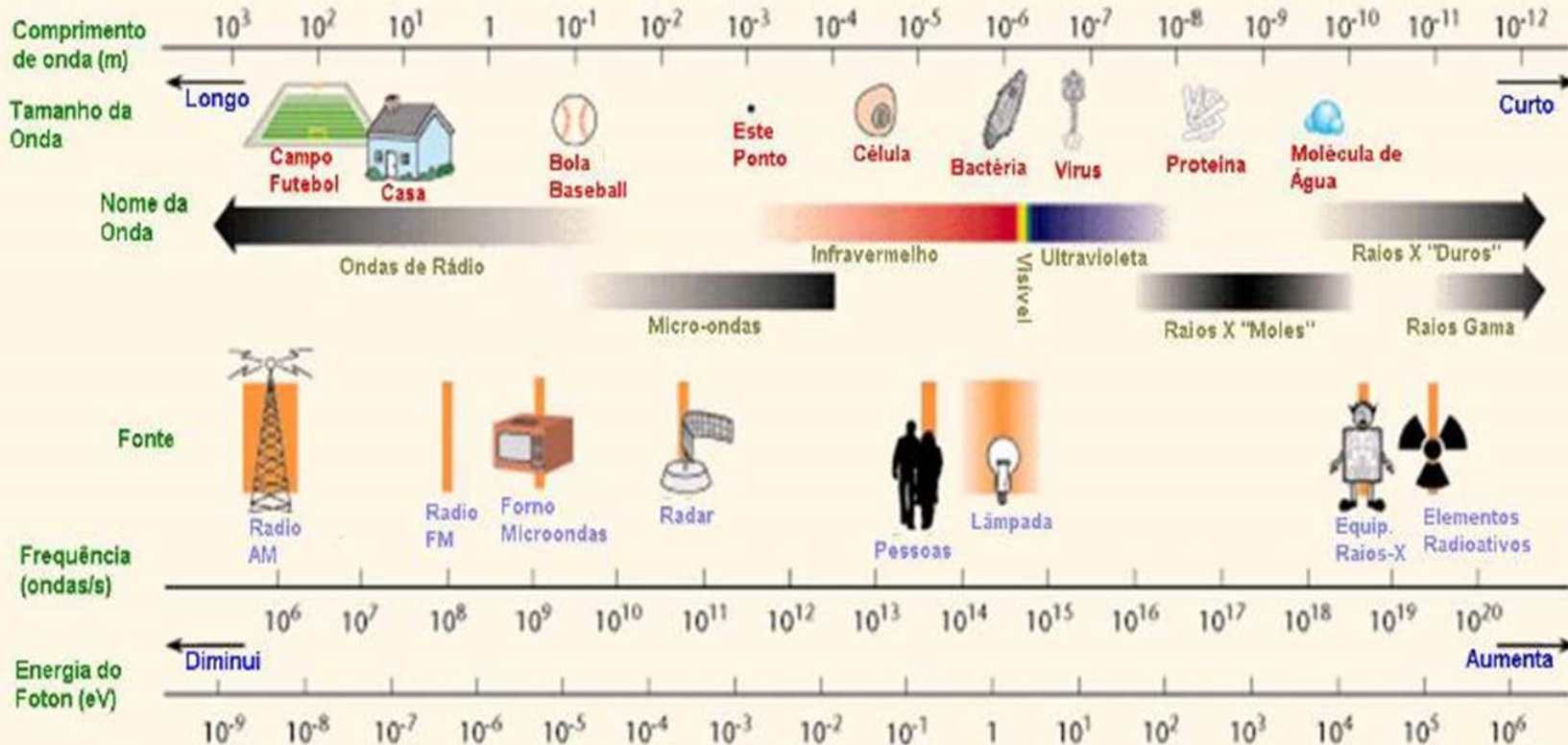


Radiações eletromagnéticas:

Raio Gama (γ)

Raio X

Espectro Eletromagnético



Radiação Não-Ionizante

Radiação Ionizante

Decaimento Radioativo

- Um núcleo com excesso de energia tende a estabilizar-se emitindo partícula alfa ou beta. Em cada emissão dessas partículas, há variação do número de prótons no núcleo, isto é, o elemento se transforma ou se transmuta em outro de comportamento químico diferente. Essa transformação é conhecida como *decaimento radioativo*.
- Cada elemento radioativo, seja natural ou obtido artificialmente, se transmuta a uma velocidade que lhe é característica.

Lei fundamental: “A probabilidade por unidade de tempo de um dado núcleo decair é uma constante”.

$$-\frac{dN}{N} = \lambda = \text{cte. de decaimento}$$

Decaimento Radioativo

- É definida *Atividade* do elemento radioativo, a taxa do decaimento radioativo:

$$A(t) = \lambda N(t)$$

UNIDADE DE ATIVIDADE

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) é medida em:

Bq (Becquerel) = uma desintegração por segundo

Ci (Curie) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq

- É definida *Meia Vida* do elemento radioativo, o intervalo de tempo cuja atividade (ou número de átomos) se reduz à metade:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T^{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T^{1/2}}$$
$$\ln 2 = \lambda \cdot T^{1/2} \Rightarrow T^{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Exemplos:

flúor 18	– 110 minutos
tecnécio 99	– 6 horas
iodo 131	– 8,02 dias;
césio 137	– 30,2 anos
urânio 235	– 700 milhões de anos

Conceitos Básicos - Energia Nuclear



Tabela de Nuclídeos

KARLSRUHER NUKLIDKARTE 6. Auflage 1995
CHART OF THE NUCLIDES – TABLEAU DES NUCLIDES – TABLA DE NUCLIDOS

G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius, W. Seelmann-Eggebert †
Institut für Radiochemie

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Alle Rechte vorbehalten – All rights reserved
Tous droits réservés – Todos los derechos están reservados



Conceitos Básicos - Energia Nuclear

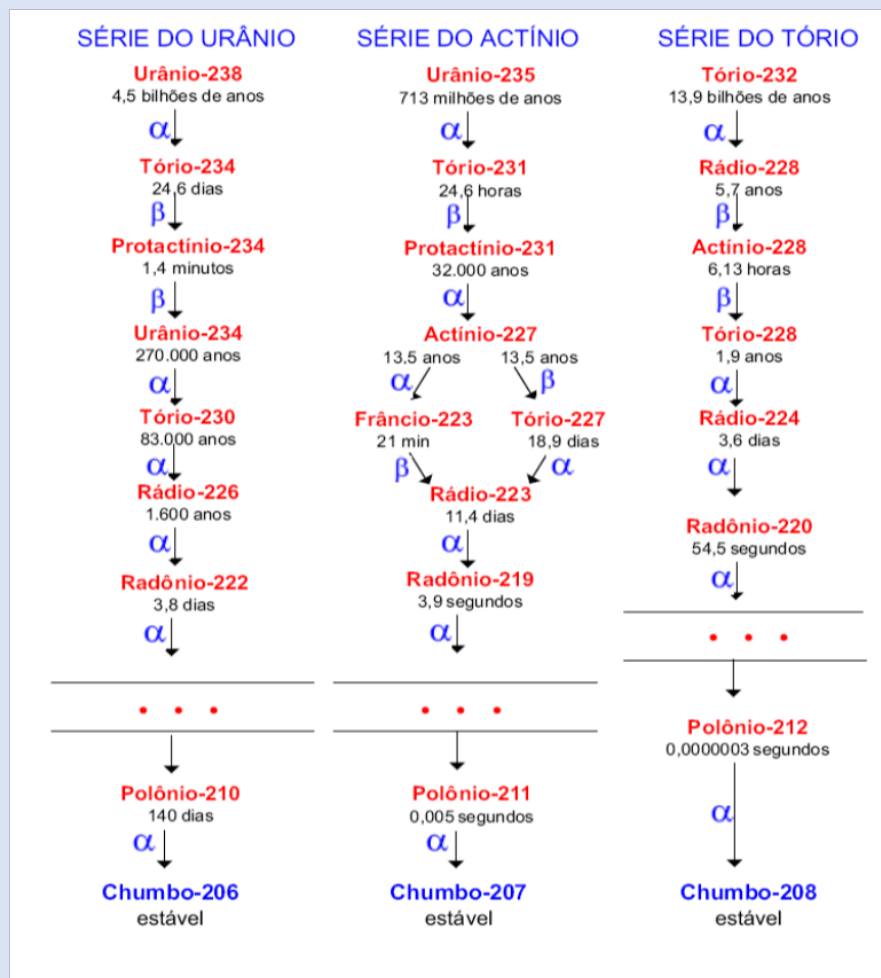


Tabela de Nuclídeos



- ~1500 nuclídeos são conhecidos; 325 existem na natureza; 284 são estáveis; e nenhum nuclídeo com número de massa maior que 209 é estável.
- Cada elemento radioativo, é encontrado de forma natural ou obtido artificialmente.
- A forma natural é obtida pelo decaimento radioativo de U e Th e por fissão espontânea desses elementos.
- A forma de se obter artificialmente um elemento radioativo é através de reações nucleares em aceleradores de partículas ou em reatores nucleares.

Séries Radioativas Naturais



➤ *Radioproteção*

É o conjunto de ações cujo objetivo é promover um padrão de proteção adequado aos indivíduos e à espécie humana como um todo, dos danos causados pela exposição à radiação ionizante, sem limitar indevidamente as práticas benéficas que advêm de sua utilização.

➤ *Radiação Ionizante*

São radiações que ionizam o meio por onde passam.

➤ *As radiações ionizantes podem ser de origem:*

❖ *Natural*

- ✓ Radiação cósmica
- ✓ Radionuclídeos na crosta terrestre
- ✓ Radionuclídeos no corpo humano

❖ *Artificiais*

- ✓ Produzidas em Reatores Nucleares
- ✓ Produzidas em Aceleradores de Partículas
- ✓ Equipamentos de Raio X

Radioatividade Natural



**Radiação
Cósmica**



**Crosta
terrestre**



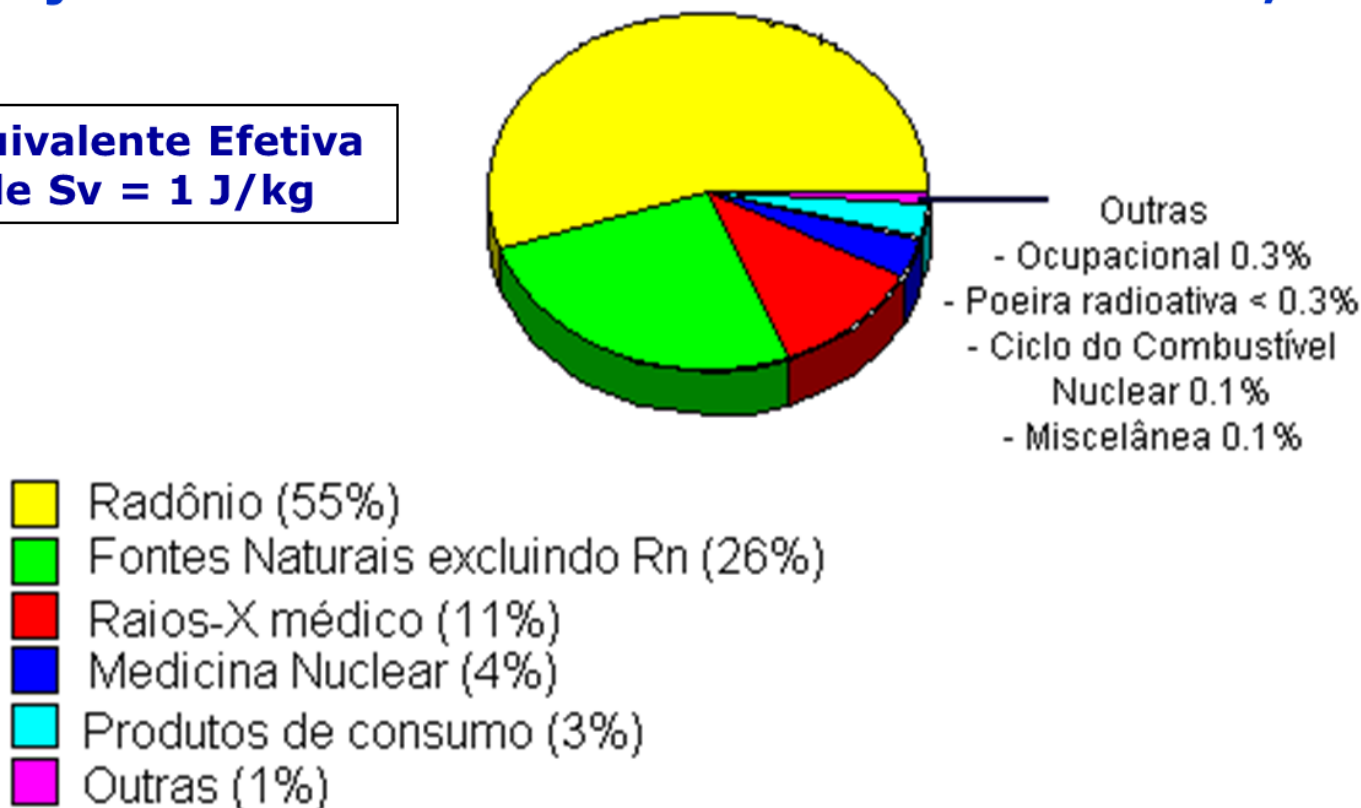
**Corpo
Humano**

<i>Potássio-40</i>	<i>4000 Bq</i>
<i>Carbono-14</i>	<i>2500 Bq</i>
<i>Rubídio-87</i>	<i>500 Bq</i>
<i>Polônio-210</i>	<i>20 Bq</i>

FONTES DE EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO

Radiação natural - Dose media mundial 2,4 mSv

Dose Equivalente Efetiva
Unidade Sv = 1 J/kg

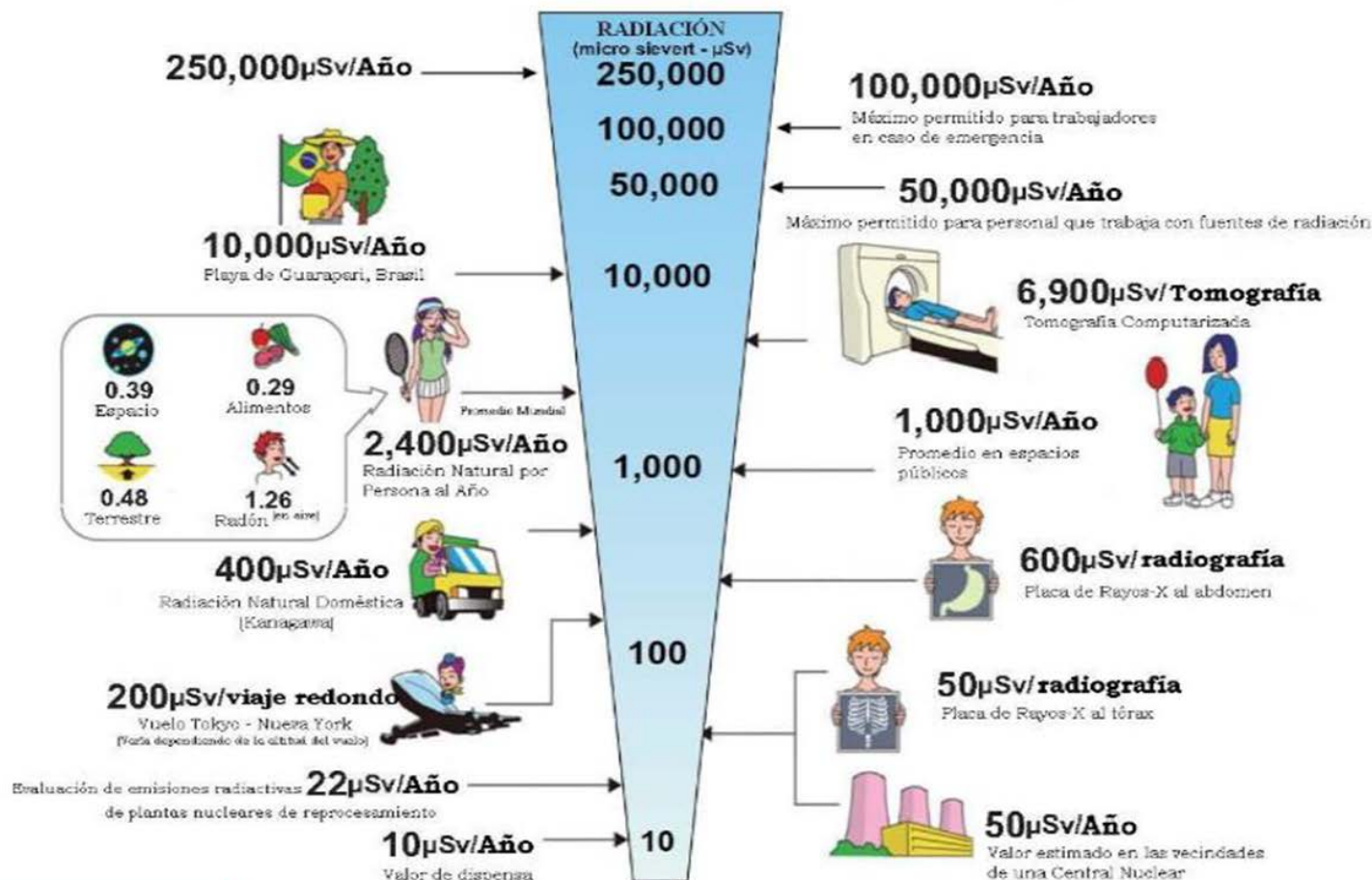


Efeitos Biológicos da Radiação

Doses Agudas	Provável Efeito Biológico
0 – 250 mSv	Nenhuma lesão evidente
250 – 500 mSv	Alterações possíveis no sangue, mas nenhuma lesão grave
500 – 1000 mSv	Alterações nas células sanguíneas. Alguma lesão. Nenhuma incapacidade.
1000 – 2000 mSv	Lesão. Possível incapacidade.
2000 – 4000 mSv	Certeza de lesão e incapacidade. Probabilidade de disfunção.
4000 mSv	50% de probabilidade de morte
6000 mSv	80% de probabilidade de morte

Conceitos Básicos - Energia Nuclear

Exposición a la Radiación en la Vida Diaria



$1 \mu\text{Sv} = 1 \times 10^{-6} \text{ Sv}$

Principais Aplicações da Energia Nuclear

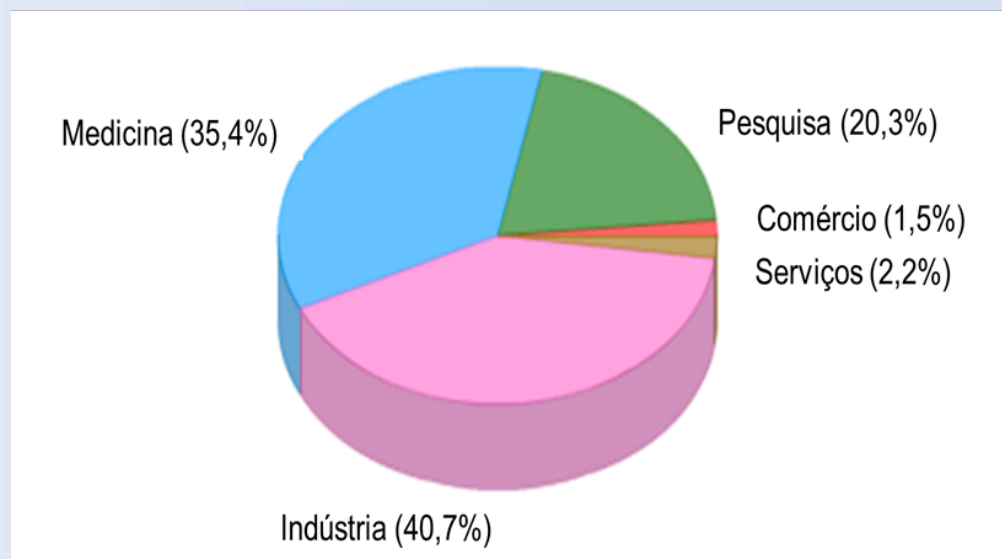
Reatores Nucleares

- Reatores de Pesquisa
 - ❖ Produção de radioisótopos
 - ❖ Pesquisa tecnológica
 - ❖ Pesquisa fundamental
- Propulsão Naval
- Usinas Nucleares de Geração de Energia Elétrica

Utilização de Radioisótopos

- Medicina
- Indústria
- Espacial (termoenergia)
- Agricultura
- Meio Ambiente
- Irradiação (alimentos / esterilização)

Principais Aplicações da Energia Nuclear



Total de Instalações Radioativas: 3721

Dados da DRS-CNEN em 2011

Aplicações na Medicina

- Medicina Nuclear – diagnóstico e radioterapia.
- Radioterapia externa: teleterapia e braquiterapia.
- Banco de tecidos.
- Irradiadores de sangue.

Medicina Nuclear

Especialidade da medicina que utiliza **materiais radioativos** para diagnóstico ou terapia de diversas doenças ou disfunções do corpo humano.

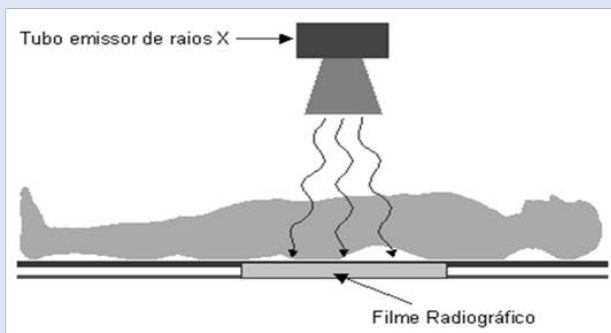
RADIOFÁRMACO

Toda substância que, por sua forma farmacêutica, quantidade e qualidade de radiação emitida por um radioisótopo constituinte, pode ser utilizada na Medicina Nuclear no diagnóstico e terapia, independente da forma ou via de administração (intravenosa, oral, inalação, intersticial, etc.)

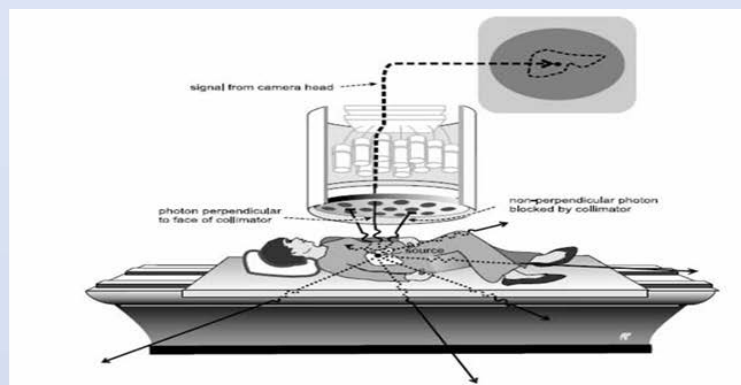
- Os **radioisótopos** são incorporados a moléculas que são metabolizadas e incorporadas temporariamente ao organismo.

Duas possibilidades de uso:

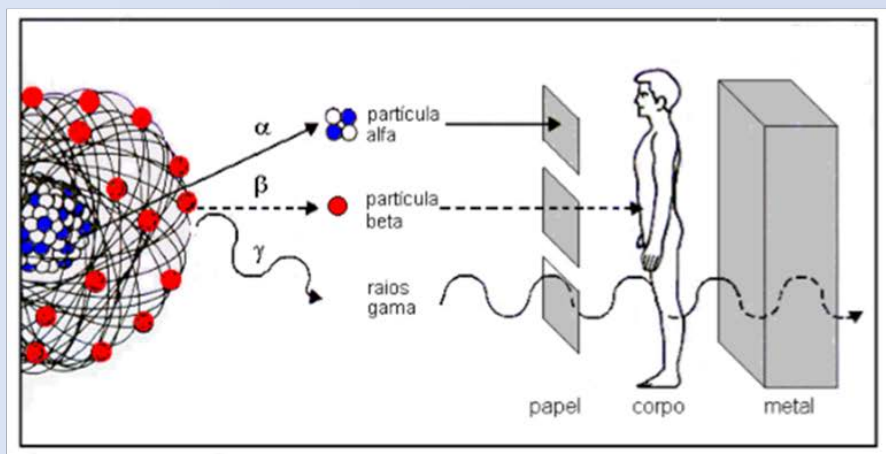
- *Imagem de sua emissão gama que atravessa o corpo humano – **Diagnóstico***
- *Destruição de tecidos circunvizinhos para terapia (câncer hemofilia, etc.) – **Terapia***



Esquema do trajeto da radiação numa radiografia



Esquema do exame por cintilografia



- **Diagnóstico** – radioisótopo emissor **radiação gama**
- **Terapia** – radioisótopo emissor **partícula beta**

Técnicas aplicadas no diagnóstico

- Gama Câmeras (Emissão gama)
- SPECT – Tomografia por emissão de fóton único (emissão gama)
- PET e PET/CT – Tomografia por emissão de pósitrons (emissão de pósitrons (β^+) e sua aniquilação com emissão de raio gama de 511keV)

(CT – Tomografia computadorizada)



Sonda - detecta e conta



Câmara de cintilação detecta, forma imagem e permite processamento e análise



Tomógrafo PET
detecta, forma imagem e permite processamento e análise

Exemplo - Aplicações de radiofármacos com ^{99m}Tc em diagnóstico

TIREÓIDE

^{99m}Tc
Pertecnetato

LINFOGRAFIA

^{99m}Tc Dextran 500

SISTEMA ÓSSEO

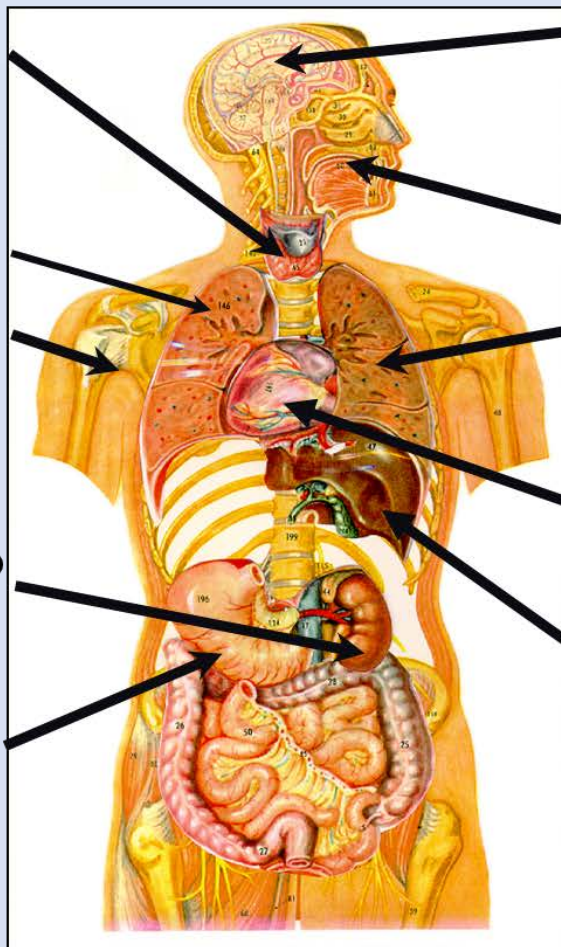
^{99m}Tc Metileno
Difosfonato

RINS

^{99m}Tc DTPA
 ^{99m}Tc Citrato Estanoso
 ^{99m}Tc DMSA
 ^{99m}Tc Etilenodicisteína

ESTÔMAGO

^{99m}Tc Pertecnetato



CÉREBRO

^{99m}Tc DTPA
 ^{99m}Tc Elinododicisteína
Dietilester

GLÂNDULAS SALIVARES

^{99m}Tc Pertecnetato

PULMÃO

^{99m}Tc Macroagregado de
Soro Albumina Humano

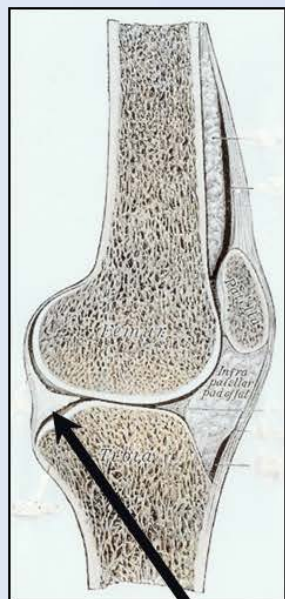
CORAÇÃO

^{99m}Tc Pirofosfato
 ^{99m}Tc MIBI

FÍGADO

^{99m}Tc Estanho Coloidal
 ^{99m}Tc Enxofre Coloidal
 ^{99m}Tc Fitato,
 ^{99m}Tc Diisopropil
minodiacético

Exemplo: Radiofármacos aplicados em terapia – alta atividade



TIREÓIDE

^{131}I NaI

^{131}I Capsula

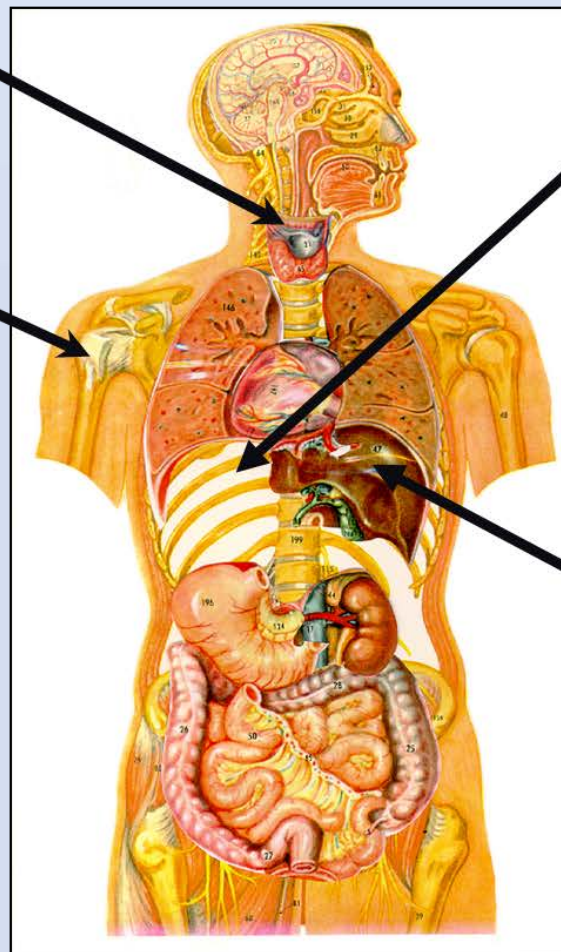
SISTEMA ÓSSEO

^{153}Sm EDTMP

SINOVECTOMIA

^{153}Sm - Hidroxiapatita

^{90}Y - Hidroxiapatita



TUMORES NEUROEN- DÓCRINOS

^{177}Lu DOTATATE

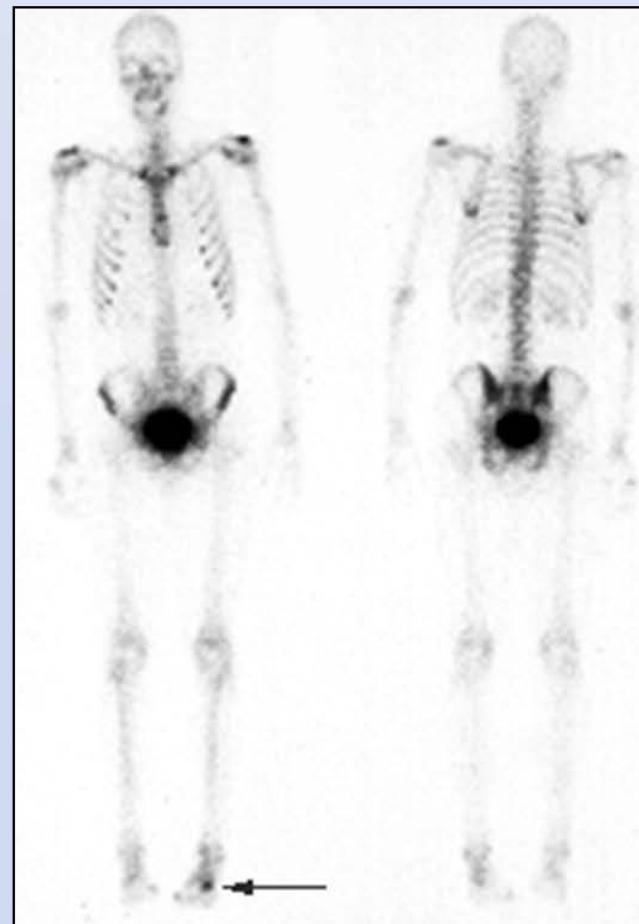
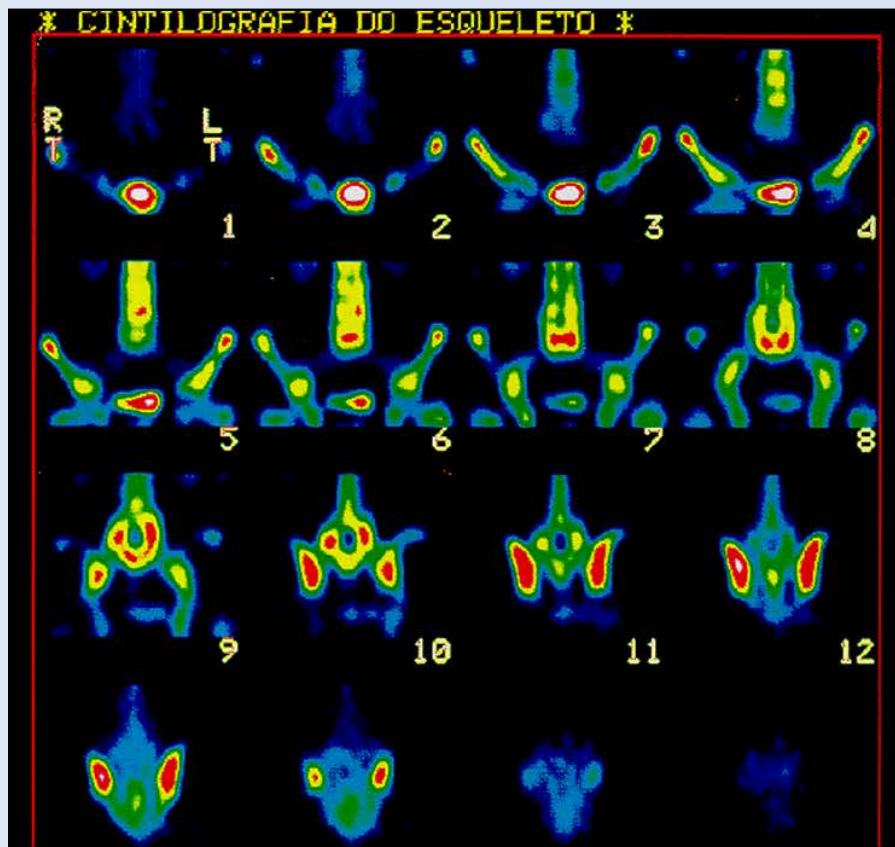
^{111}In DOTATOC

^{131}I MIBG

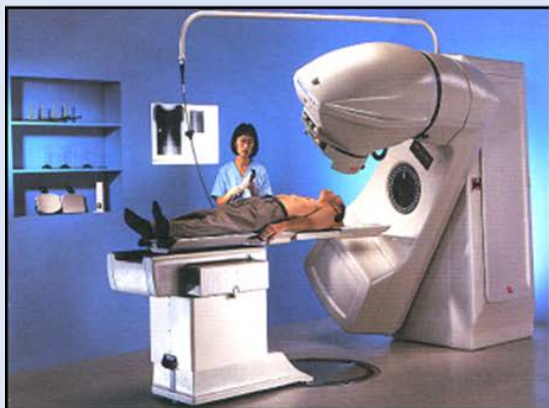
FÍGADO

^{131}I Lipiodol

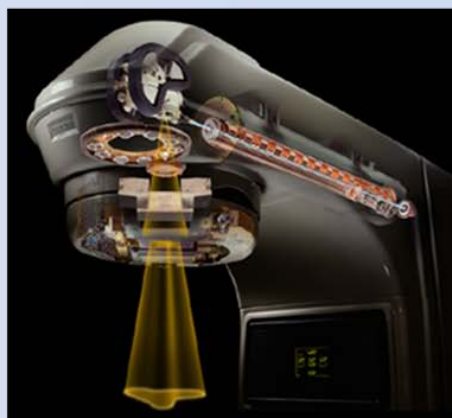
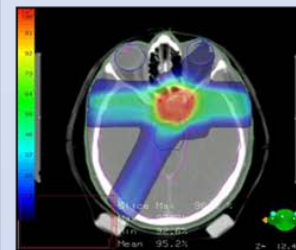
Cintilografia e SPECT ósseo com MDP- ^{99m}Tc



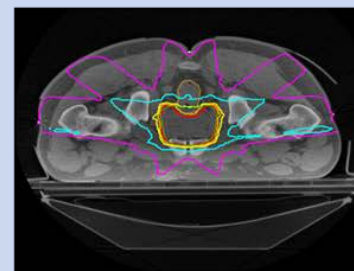
TELETERAPIA (Radioterapia Externa)



Cobalto-60



Acelerador Linear
(10MeV)



Fonte: Dr. João Victor Salvajoli - Hospital do Câncer/SP

BRAQUITERAPIA

Produção e Distribuição de Sementes de ^{125}I e Fios de ^{192}Ir



Fios de ^{192}Ir
(1- 4mCi/cm)



IPEN-CNEN/SP
Protótipo



Sementes de ^{125}I
(0,5mCi, 36,000/ano)

Câncer de Próstata

<i>Radionuclídeos utilizados na Medicina</i>			
Radionuclídeo	Forma de Produção	Aplicação	Situação no Brasil
^{99m}Tc	Produção de ^{99}Mo em reator nuclear de pesquisa	Diagnóstico	100% importado Gerador produzido no IPEN
^{131}I	Produção em reator nuclear de pesquisa	Diagnóstico Terapia	Parcialmente importado Processado no IPEN
^{153}Sm	Produção em reator nuclear de pesquisa	Terapia	100% nacional Produzido no IPEN
^{90}Y	Produção em reator nuclear de pesquisa	Terapia	100% importado
^{177}Lu	Produção em reator nuclear de pesquisa	Terapia	100% importado
^{125}I	Produção em reator nuclear de pesquisa	Braquiterapia	100% importado Processado no IPEN
^{192}Ir	Produção em reator nuclear de pesquisa	Braquiterapia	100% importado
^{60}Co	Produção em reator nuclear de pesquisa	Teleterapia	100% importado
^{18}F	Produzido em Ciclotron	Diagnóstico	100% nacional
^{123}I	Produzido em Ciclotron	Diagnóstico	100% nacional
^{111}In	Produzido em Ciclotron	Diagnóstico	100% importado
^{51}Cr	Produzido em Ciclotron	Diagnóstico	100% importado
^{67}Ga	Produzido em Ciclotron	Diagnóstico	Parcialmente nacional
^{201}Tl	Produzido em Ciclotron	Diagnóstico	Parcialmente nacional



Gerador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$

Meia vida ^{99}Mo = 66 horas

Meia vida $^{99\text{m}}\text{Tc}$ = 6 horas

- Produzidos em torno de 400 geradores por semana
- Atendidas mais de 400 unidades médicas
- Realizados em torno de 2 milhões de procedimentos por ano

**100% produzido no
IPEN/CNEN-SP, com ^{99}Mo
importado**

Importância do gerador ^{99}Mo – $^{99\text{m}}\text{Tc}$

- 80 % de todos os procedimentos de medicina nuclear;
- Tem papel fundamental no diagnóstico de câncer, doenças cardiológicas, renais, etc.;
- Procedimentos alternativos são menos eficazes, menos efetivos e não universais;
- Tendência de aumento de uso em decorrência do maior envelhecimento populacional.

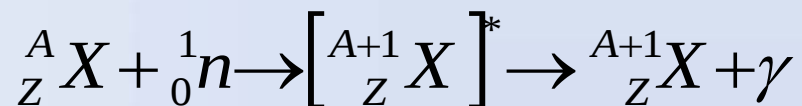


Etapas críticas: irradiação de U235 em Reator Nuclear e Processamento do elemento irradiado

- A forma de se obter artificialmente um elemento radioativo é através de reações nucleares em aceleradores de partículas ou em reatores nucleares.
- É definido como reator nuclear o “equipamento” ou “sistema” onde se realizam as reações nucleares de forma controlada.
- As reações nucleares induzidas por nêutrons são as mais importantes em um reator nuclear.
- As principais reações nucleares com nêutrons no reator nuclear são:
 - Absorção
 - Captura Radioativa
 - Formação de Partículas Carregadas
 - Espalhamento
 - Elástico
 - Inelástico
 - Fissão

Reações Nucleares

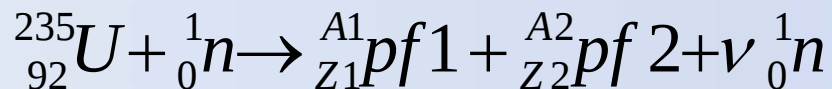
➤ Captura Radioativa



Exemplo:

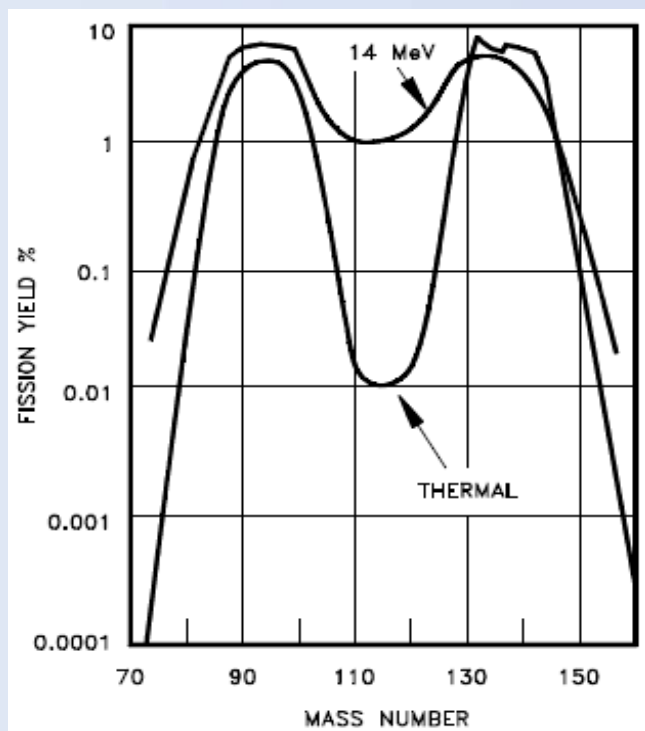
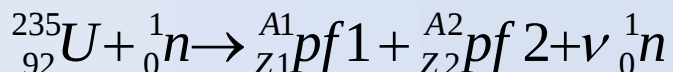


➤ Fissão



Reações Nucleares -Fissão

➤ Produtos de Fissão



➤ Energia na Fissão

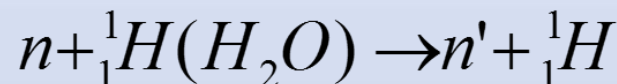
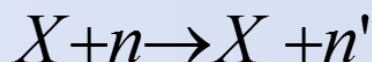
Forma da energia	Emitida (MeV)	Recuperada (MeV)
pf (cinética)	168	168
Dcaimento pf:		
β	8	8
γ	7	7
Neutrinos	12	0
γ-prontos	7	7
Nêutrons de fissão (prontos+atrasados)	5	5
γ de captura radiativa	0	3-12
TOTAL	207	198-207

Reações Nucleares - Espalhamento

➤ Espalhamento Elástico

Reação (n, n'), onde a energia interna do núcleo alvo [X] não é alterada.

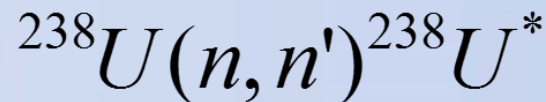
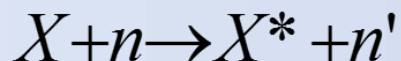
Exemplo:



➤ Espalhamento Inelástico

Pode ser considerado como uma reação (n, n') onde o nêutron é absorvido pelo núcleo alvo formando um núcleo composto que decai emitindo "outro nêutron" com menor energia.

Exemplo:

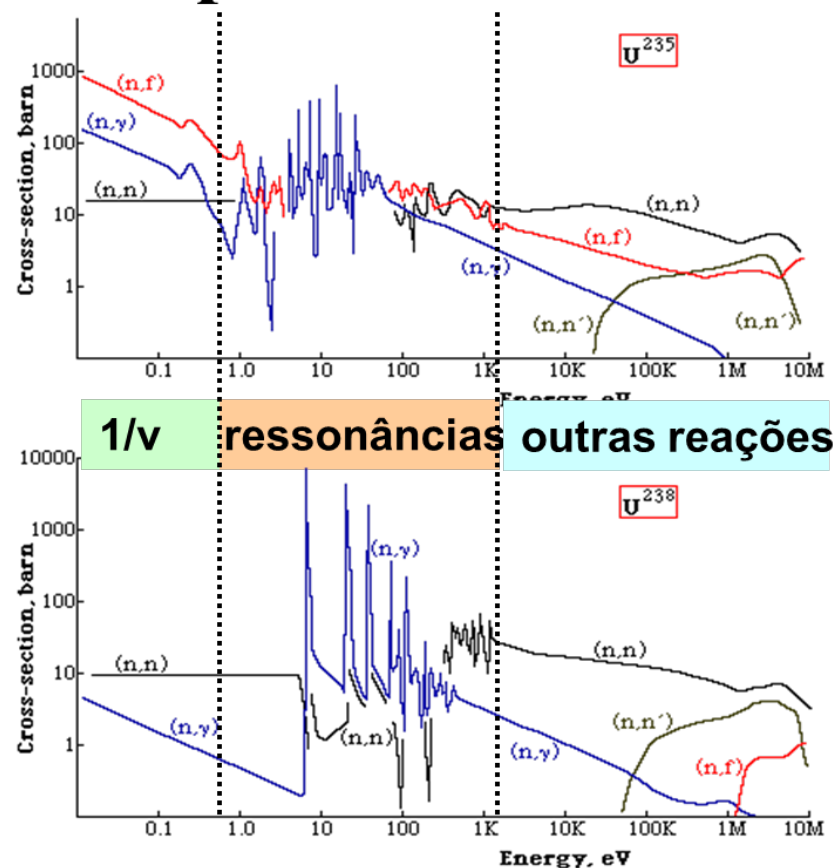


Reações Nucleares

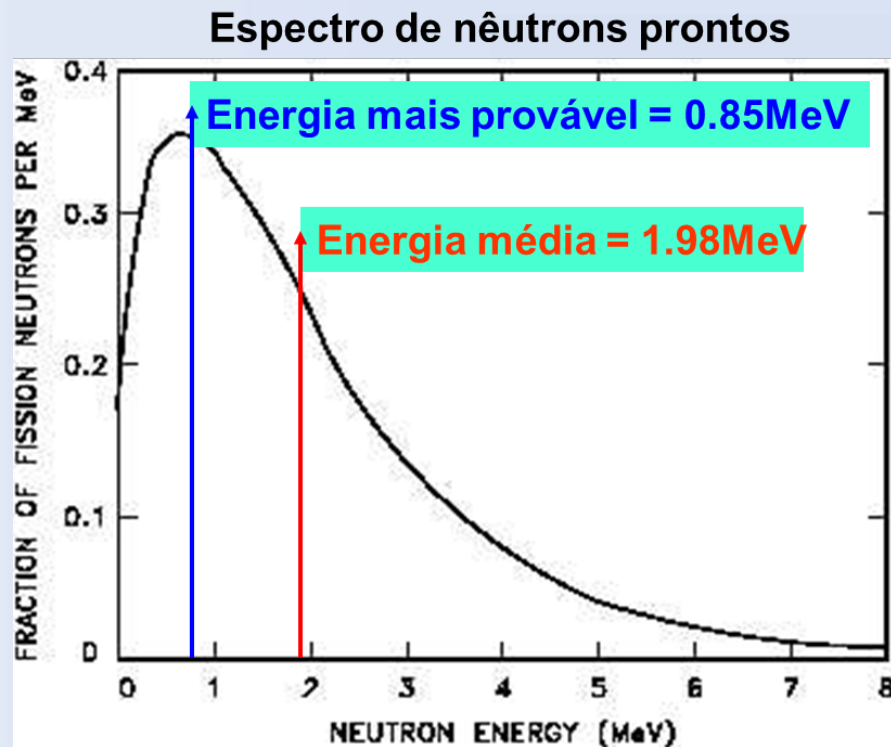
Seção de Choque microscópica σ

Para cada tipo de reação nuclear, existe uma seção de choque correspondente que é uma característica do núcleo alvo, sendo entretanto, função da energia do nêutron incidente. A seção de choque total é a somatória das seções de choque individuais para cada tipo de reação nuclear.

$$\sigma_t = \underbrace{(\sigma_e + \sigma_i)}_{\text{Seção de choque de espalhamento } \sigma_s} + \underbrace{(\sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_\alpha + \dots)}_{\text{Seção de choque de absorção } \sigma_a}$$

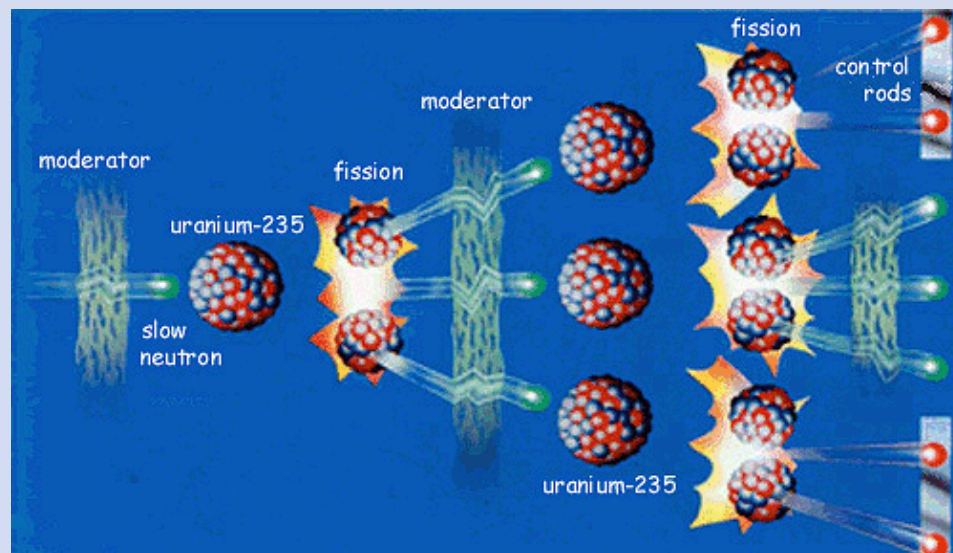


➤ Nêutrons de Fissão



➤ Moderação de nêutrons

Define-se por moderação o processo de perda de energia dos nêutrons de fissão através de espalhamentos elásticos e inelásticos até o equilíbrio térmico com o meio.



Reações Nucleares

- Define-se nuclídeo *físsil* aquele que tem probabilidade de reação de fissão bem maior do que captura radioativa
- Define-se nuclídeo *fértil* (ou fissionável) aquele que tem probabilidade de captura radioativa bem maior do que fissão, mas decai radioativamente para um nuclídeo físsil
 - ✓ U-235 é o principal nuclídeo físsil na natureza
 - ✓ U-238 e Th-232 são os principais nuclídeos férteis na natureza
 - ✓ U-233 é físsil, produzido através da captura radioativa no Th-232
 - ✓ Pu-239 é físsil, produzido através da captura radioativa no U-238
 - ✓ Os isótopos ímpares de Pu (Pu-241, Pu-243) são físseis
 - ✓ Os isótopos pares do Pu (Pu-238, Pu-240, Pu-242) são férteis
 - ✓ O U-235 possui maior probabilidade de fissão com nêutrons térmicos
 - ✓ O Pu-239 e U-233 possui grande probabilidade de fissão tanto com nêutrons térmicos como com nêutrons epitérmicos e rápidos

Reação em Cadeia

Se os nêutrons emitidos por uma fissão causarem ao menos uma nova fissão, o processo poderá ser auto-suficiente e constituir-se no que é chamado **Reação em Cadeia**.

Massa Crítica é a mínima massa de combustível suficiente para manter uma reação em cadeia.

Nuclear Fission Chain Reaction

-  — ^{235}U
-  — Neutron
-  — Fission Product

Fator de Multiplicação

➤ Fator de Multiplicação de um Meio

❖ k_{ef} = produção de nêutrons no meio / perda de nêutrons no meio

$$\text{❖ } k_{ef} = (v_{235} \cdot \Sigma_{f235}) / ((\Sigma_{acomb} + \Sigma_{aestr} + \Sigma_{aabs}) + DB^2) \quad (*)$$

(*) OBS: apenas como exemplo - aproximação da teoria de difusão para 1 grupo de energia)

$$B^2 \propto (1/x^2 + 1/y^2 + 1/z^2); \quad D = 1/3(\Sigma_s + 2/3A)$$

- $k_{ef} = 1$ crítico
- $k_{ef} < 1$ subcrítico
- $k_{ef} > 1$ supercrítico

$$P = {}^{235}\text{n} \cdot {}^{235}\sigma_f \cdot \varphi_n \cdot V \cdot E_f$$

$$\varphi_n = (P/V) \cdot (1/{}^{235}\text{n}) \cdot (1/{}^{235}\sigma_f \cdot E_f)$$

Componentes dos Reatores Nucleares

CLASSIFICAÇÃO	FUNÇÃO	MATERIAIS PRINCIPAIS
COMBUSTÍVEL NUCLEAR	Tem a função de conter os elementos físséis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia	urânio, plutônio, tório
ESTRUTURAS	São todos os materiais utilizados como estrutura e revestimento dos diversos componentes do reator	zircaloy, aço, inox, ligas de níquel
MODERADORES	Tem a função de moderar a energia dos nêutrons produzidos na fissão e também servem como refletores na periferia do núcleo do reator de forma a minimizar a fuga de nêutrons do núcleo	grafite, água leve, água pesada, berílio
ABSORVEDORES (controlador)	Tem a função de manter de forma controlada a reação em cadeia dentro do núcleo	boro, cádmio, háfnio, índio, prata, gadolínio
REFRIGERANTES	Tem a função de retirar o calor gerado no núcleo do reator devido às fissões nucleares	hélio, CO ₂ , água leve, água pesada, metais líquidos (NaK, Na)
BLINDAGEM	Tem a função de servir de barreira para a radiação (blindar) de forma a atenuar os efeitos desta sobre componentes estruturais ou o meio exterior ao reator	água leve, elementos de médio e alto número atômico (Pb, Fe, etc.)

Classificação dos Reatores Nucleares

- Define-se um reator como o conjunto de todos os materiais, componentes e estruturas onde é gerada a reação em cadeia da fissão nuclear.
- O reator poderá ser constituído de uma gama grande de formas e composição. A condição para se obter criticalidade é que exista uma relação entre geometria e os materiais que constituem o reator.
- Definido o tipo de reator e sua finalidade procura-se então uma combinação de materiais físséis/férteis, moderadores, refletores, refrigerantes, e de controle que façam com que o reator funcione como desejado.
- Pode-se basear a classificação de reatores nucleares sob os seguintes itens:
 - ❑ *energia dos nêutrons utilizados para fissão*
 - ❑ *propósito de funcionamento do reator*
 - ❑ *tipo de combustível e/ou refrigerante e/ou moderador*
- **Quanto ao propósito de funcionamento:**
 - ❖ **reatores de potência** - tem a finalidade de gerar energia. Podem gerar energia elétrica, servir para aquecimento industrial e residencial, servir para propulsão de embarcações, etc.
 - ❖ **reatores de pesquisa** - tem a finalidade de pesquisa, irradiação e teste de materiais, produção de radioisótopos, etc.
 - ❖ **reatores de ensino** - tem a finalidade de treinamento e ensino.

Reatores Nucleares no Brasil



Reatores Nucleares em Operação no Brasil

Nome	Aplicação	Potência	Localização	Características
ANGRA I	Central Nuclear - produção de energia elétrica	1950 MWt 657 MWe	Angra dos Reis	Reator tipo PWR Westinghouse
ANGRA II	Central Nuclear - produção de energia elétrica	3970 MWt 1350 MWe	Angra dos Reis Rio de Janeiro	Reator tipo PWR Siemens
IEA-R1	Pesquisa - produção de radioisótopos	5 MW	IPEN/CNEN-SP São Paulo	Reator tipo MTR, Piscina
IPEN-MB/01	Pesquisa - Unidade Crítica	100 W	IPEN/CNEN-SP São Paulo	Reator simulador de núcleo de PWR
TRIGA-IPR1	Pesquisa	100 kW	CDTN/CNEN-MG Belo Horizonte	Reator tipo TRIGA MARK-1
ARGONAUTA	Ensino; Pesquisa	500 W	IPEN/CNEN-RJ Rio de Janeiro	Reator tipo placa (Argone)

Reatores Nucleares em Construção no Brasil

Nome	Aplicação	Potência	Localização	Características
ANGRA III	Central Nuclear - produção de energia elétrica	3970 MWt 1350 MWe	Angra dos Reis Rio de Janeiro	Reator tipo PWR Siemens
LABGENE	Propulsão Naval	50 MWt	Iperó São Paulo	Reator tipo PWR CTMSP
RMB	Reator de Pesquisa Multipropósito	30MW	Iperó São Paulo	Reator tipo MTR, Piscina

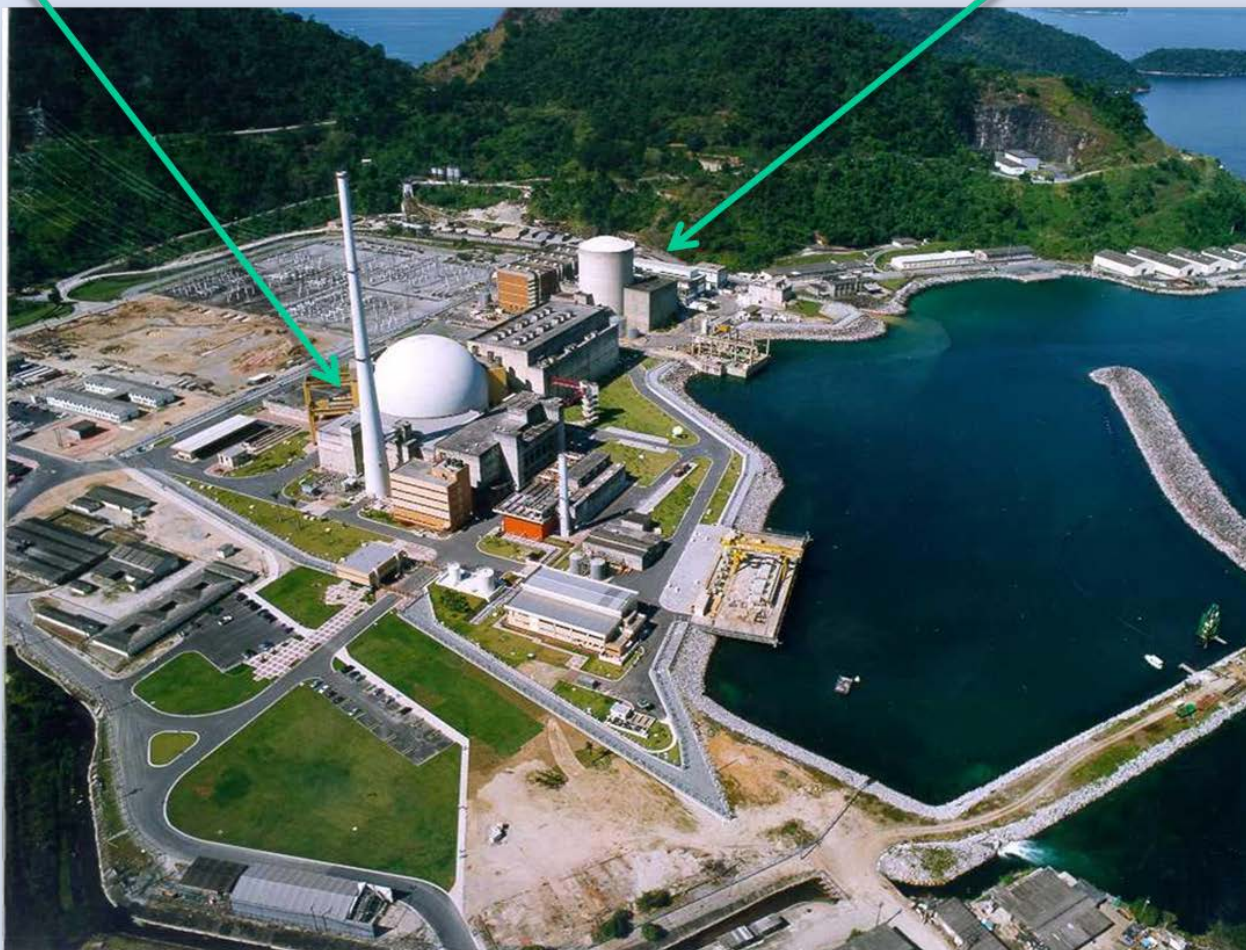


Reatores Nucleares no Brasil



Angra II

Angra I



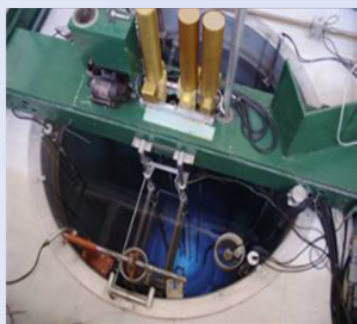
Reatores Nucleares no Brasil



Reatores Nucleares no Brasil



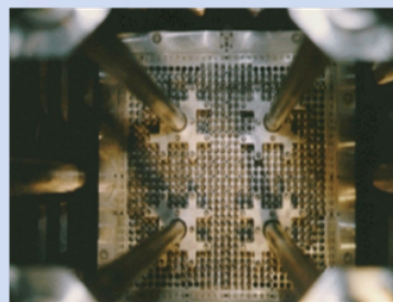
Nome	Utilização	Potência	Localização	Início de Operação	Tipo
IPEN/MB-01	Unidade Crítica – Análise de Núcleo de PWR	100 W	IPEN/CNEN-SP São Paulo	1988	Núcleo Aberto – Vareta
ARGONAUTA	Pesquisa – Ensino	500 W	IPEN/CNEN-RJ Rio de Janeiro	1965	Argonaut
IPR-R1	Pesquisa – Ensino	100 kW	CDTN/CNEN-MG Belo Horizonte	1960	TRIGA MARK-I
IEA-R1	Pesquisa e Produção de Radioisótopos	5 MW (2MW)	IPEN/CNEN-SP São Paulo	1957	Reator MTR Piscina Aberta



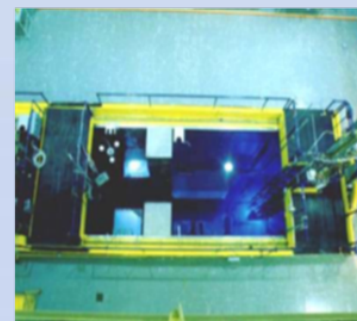
IPR-R1



ARGONAUTA



IPEN/MB-01



IEA-R1



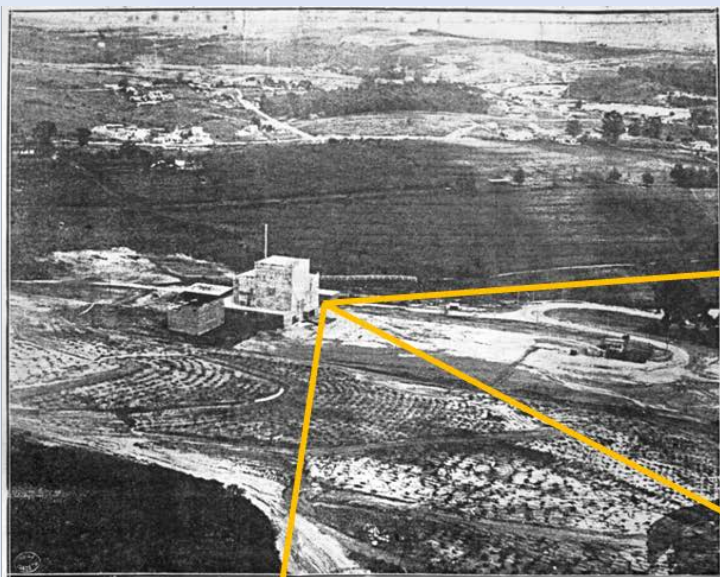
Reatores Nucleares no Brasil



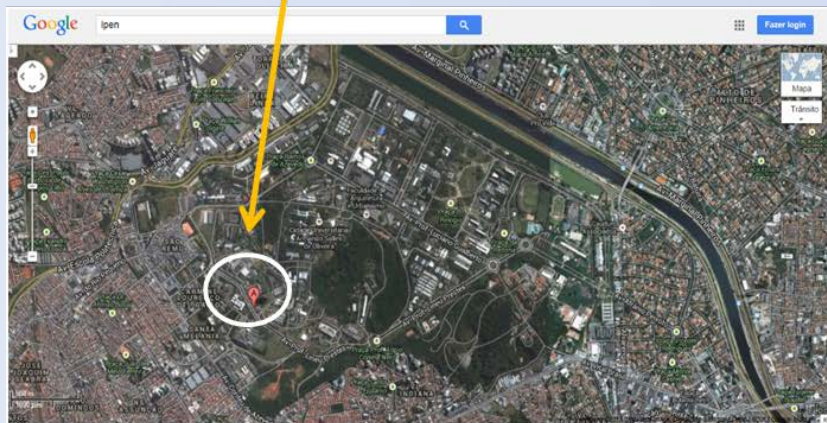
IEA-R1 (1958)



Reatores Nucleares no Brasil



IEA-R1 (1958) ----- IPEN (2016)



Porque um Novo Reator de Pesquisa?

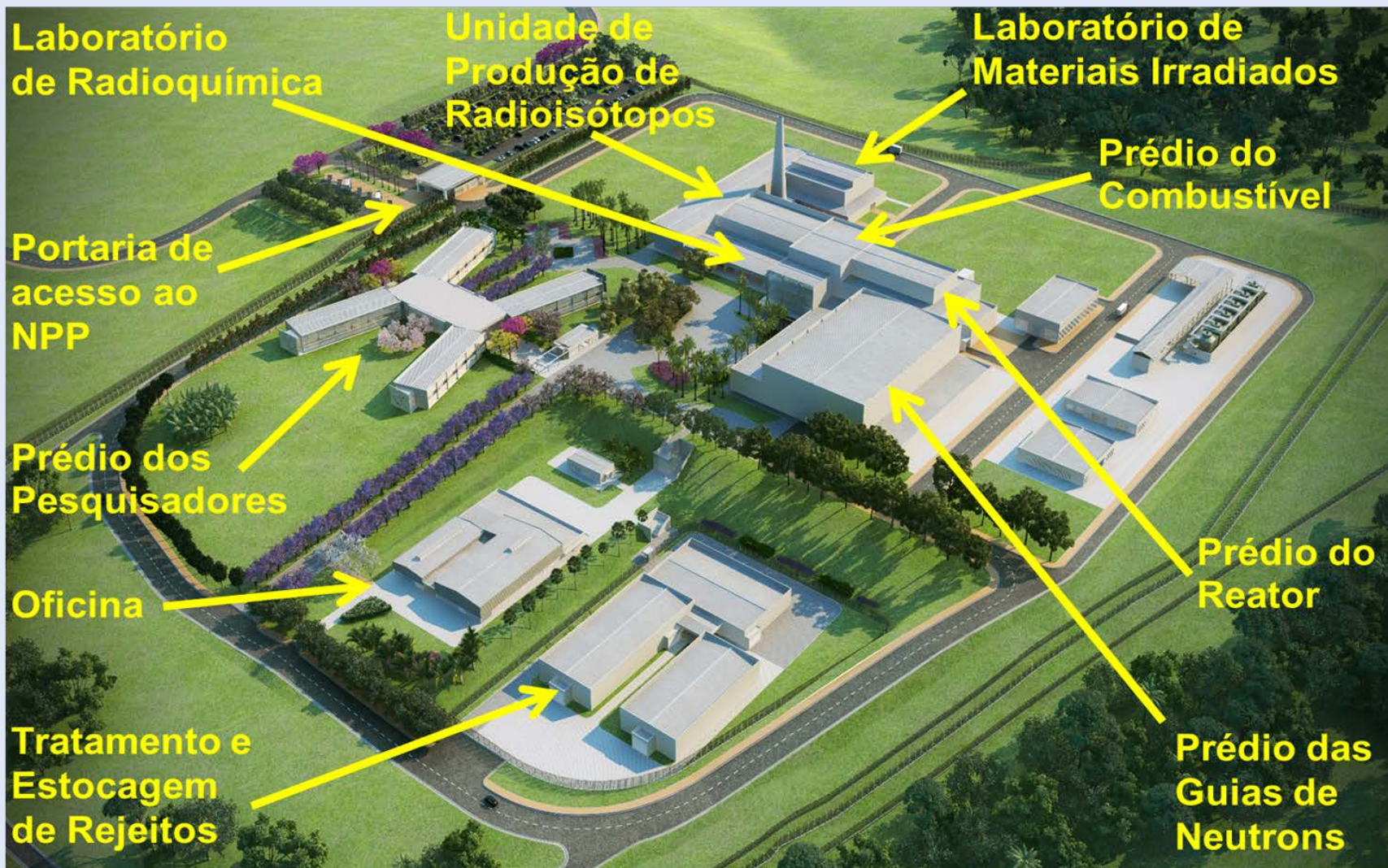
- O RMB dotará o Brasil de uma *infraestrutura fundamental* para o desenvolvimento nacional das atividades do setor nuclear nas áreas de aplicações sociais, estratégicas, industriais, e desenvolvimento científico e tecnológico.
- Projeto estruturante e de arraste.

INSTALAÇÕES DO RMB

Plano Diretor



Reatores Nucleares no Brasil



INSTALAÇÕES DO RMB

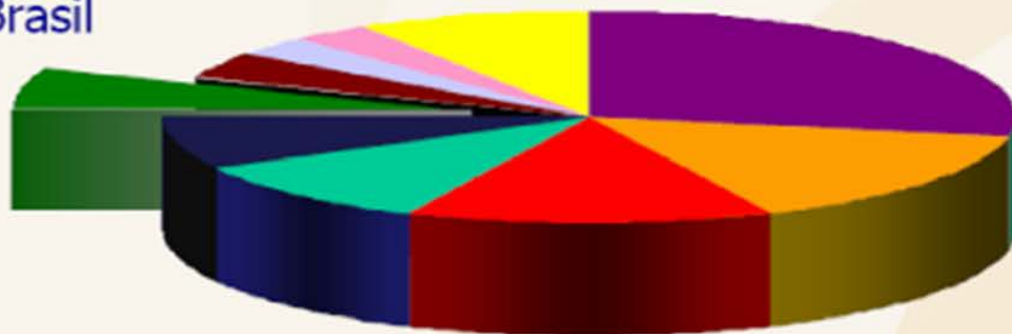
Prédio do Reator e Laboratórios



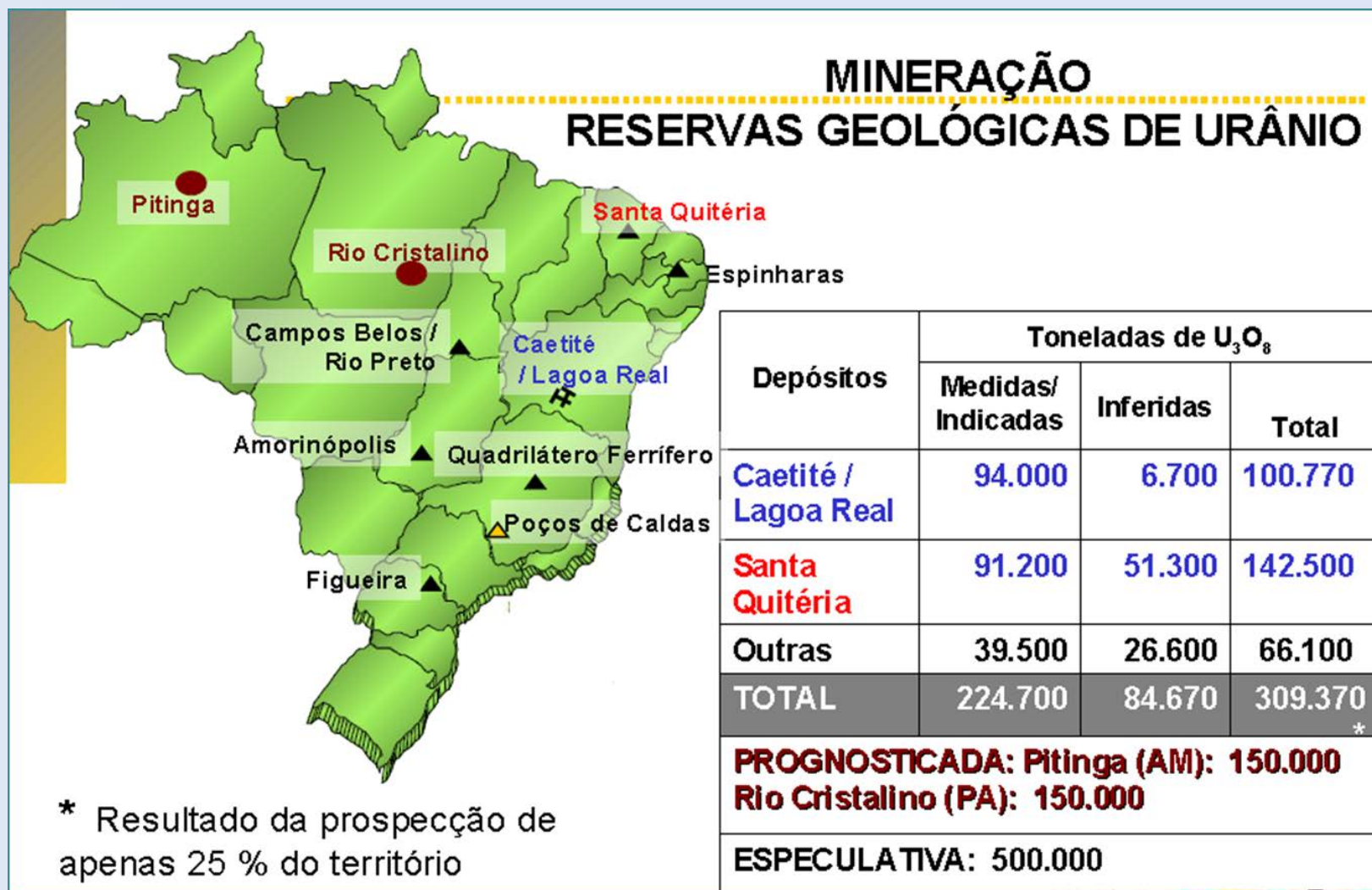
- O Brasil é um dos poucos países do mundo que dominam toda a tecnologia do ciclo do combustível e também possuem urânio

Reservas de Urânio Conhecidas

Brasil



■ Austrália	= 28%
■ Cazaquistão	= 15%
■ Canadá	= 14%
■ África do Sul	= 10%
■ Namíbia	= 8%
■ Brasil	= 6%
■ Rússia	= 4%
■ EUA	= 3%
■ Uzbequistão	= 3%
■ Resto	= 9%



Ciclo do Combustível Nuclear



Ciclo do Combustível Nuclear



Instalações do Ciclo do Combustível no Brasil

Mineração- Caetité



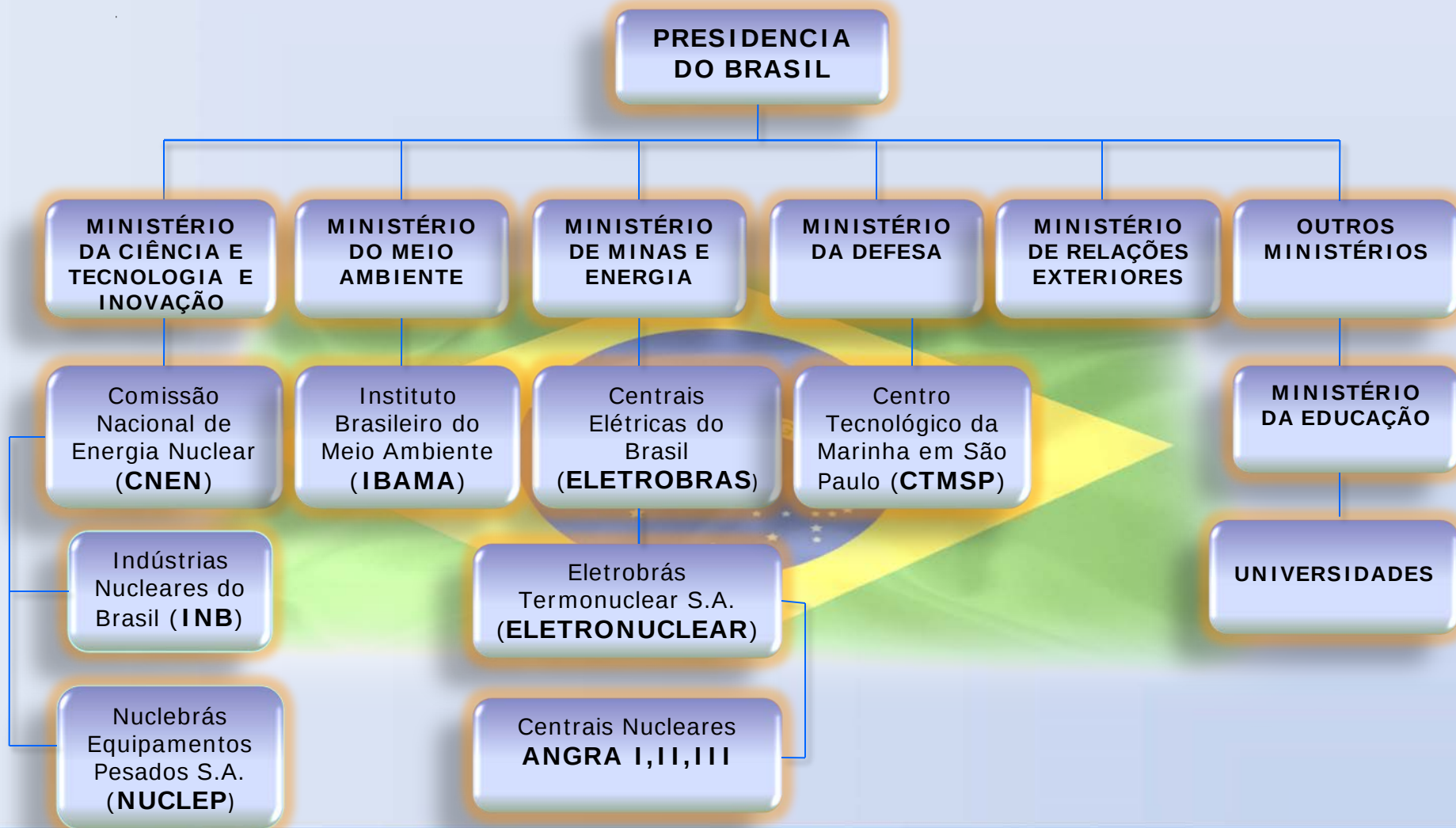
Enriquecimento / Reconversão / Pastilha- Resende



Montagem de Elemento Combustível - Resende



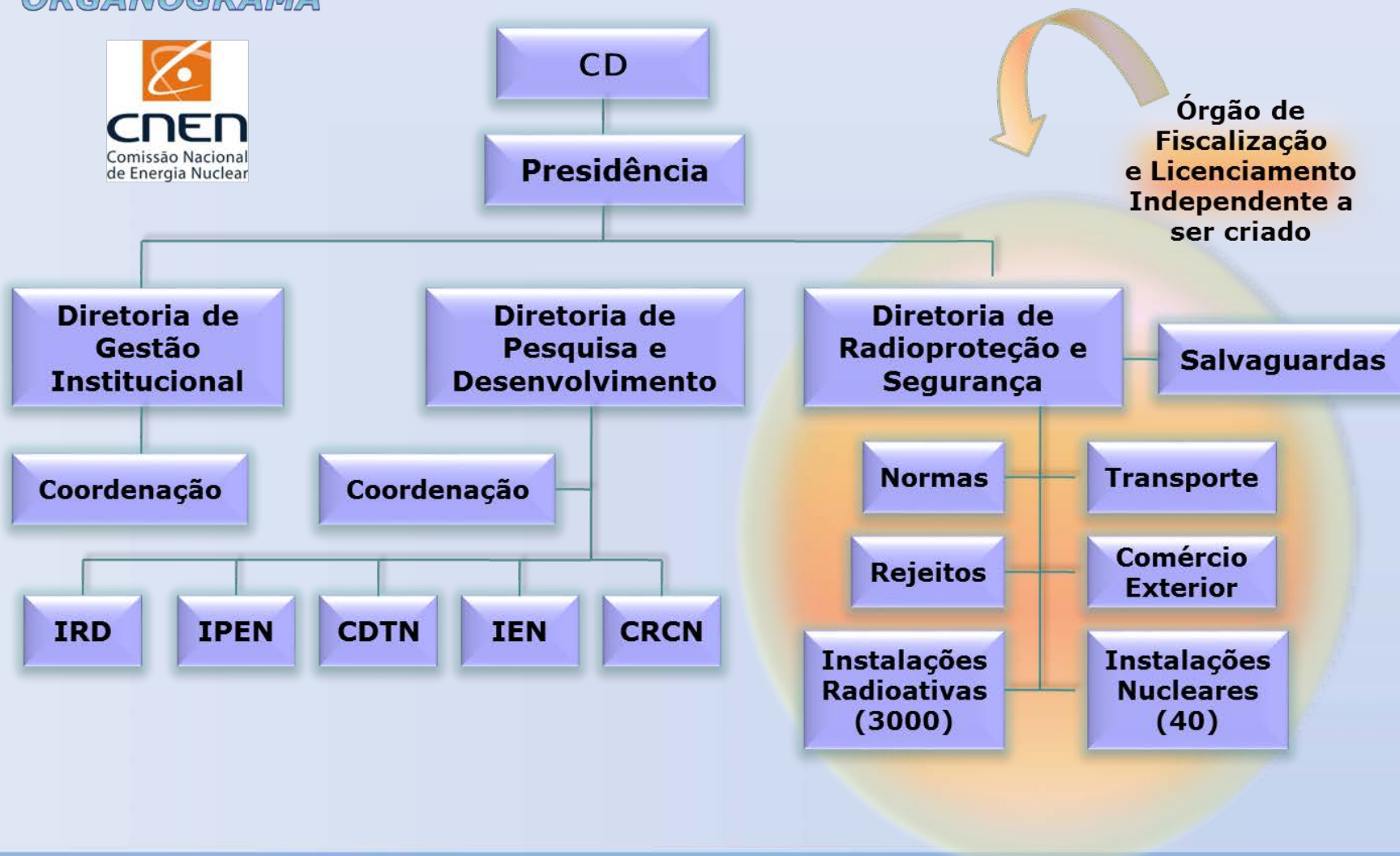
Organização Nacional do PNB



Organização Nacional do PNB



ORGANOGRAMA



OBRIGADO!