

O ciclo de palestras “Física para Todos” apresenta

Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil e sua Importância para a Sociedade

Dr. *José Augusto Perrotta*, Comissão Nacional de Energia Nuclear - IPEN



Auditório da Biblioteca Mario de Andrade
São Paulo 04/06/2016

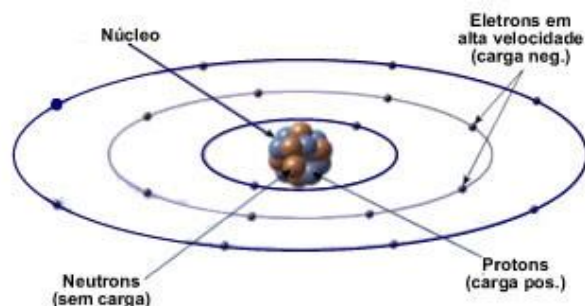
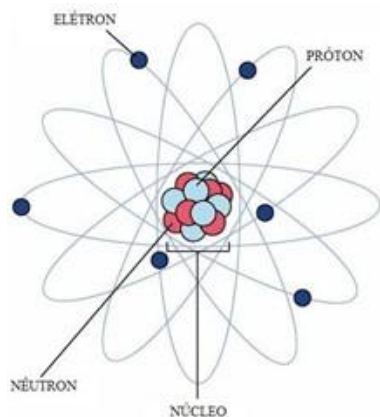
Sumário

- *Conceitos básicos sobre energia nuclear*
- *Aplicação na medicina nuclear*
- *Conceitos sobre reatores nucleares de pesquisa*
- *Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil*
- *O Empreendimento Reator Multipropósito Brasileiro - RMB*

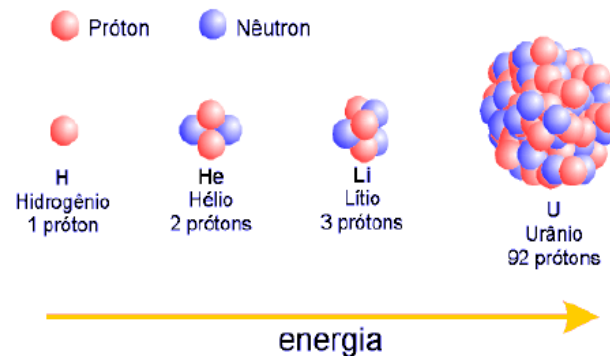
Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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.



ELEMENTOS QUÍMICOS NATURAIS



Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Classificação Periódica dos Elementos Químicos

Tabela Periódica Virtual - 1.0.164

Mostrar grupos como: Famílias IUPAC

Legenda

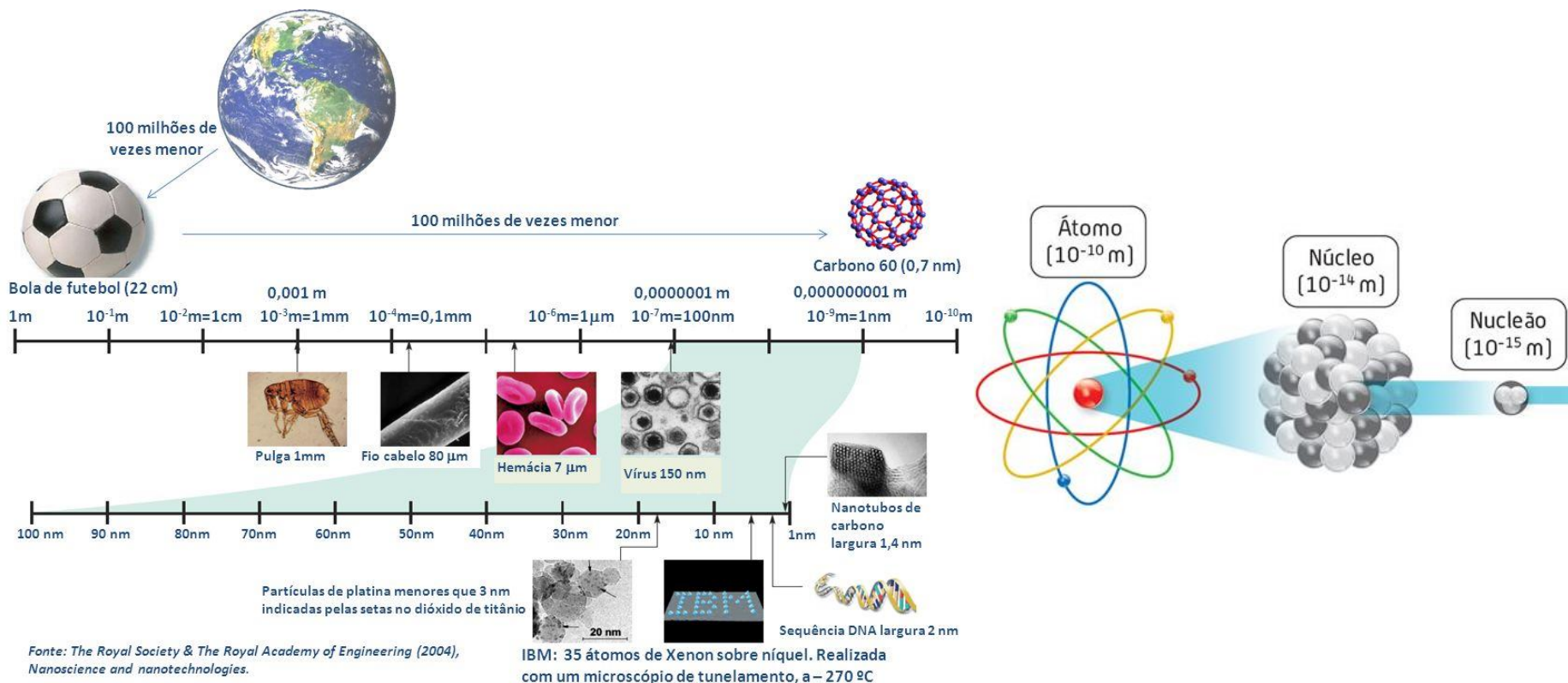
- Metais Alcalinos
- Alcalinos -Terrosos
- Metais de Transição
- Outros Metais
- Semimetais
- Não - Metais (Ametais)
- Ametais Calcogênios
- Ametais Halogênios
- Gases Nobres
- Série dos Lantanídeos
- Série dos Actinídeos
- Sem Classificação

Propriedades

Número Atômico	Urânio - 092		Massa Atômica	Camadas	Orbital
92			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	Condutividade Elétrica
1132 °C	3818 °C	Sólido	18,90 g/cm³	1,38	3,6 E6/ohms/m
Rede Cristalográfica		Origem	1ª E. de Ionização	Nome em Inglês	
Ortorrômbica		Natural	6,05 V	Uranium	
Origem do Nome			Descoberto por / Descoberto em		
Do astrônomo Urano (q. v.) + -io³			Klaproth / 1789		

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Escala de Dimensões



Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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.



Hidrogênio
1 próton



Deutério
1 próton
1 nêutron



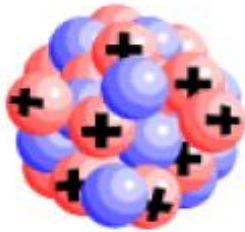
Trítio (Trítio)
1 próton
2 nêutrons

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

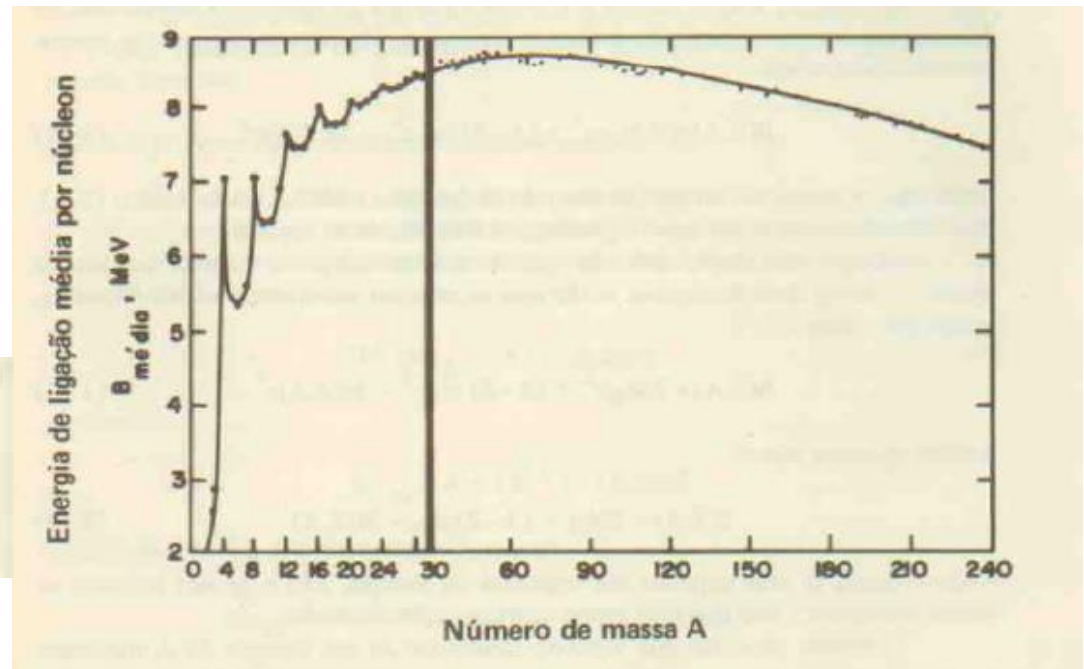
Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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).



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



Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Estrutura do Núcleo do Átomo

Abundância relativa dos elementos

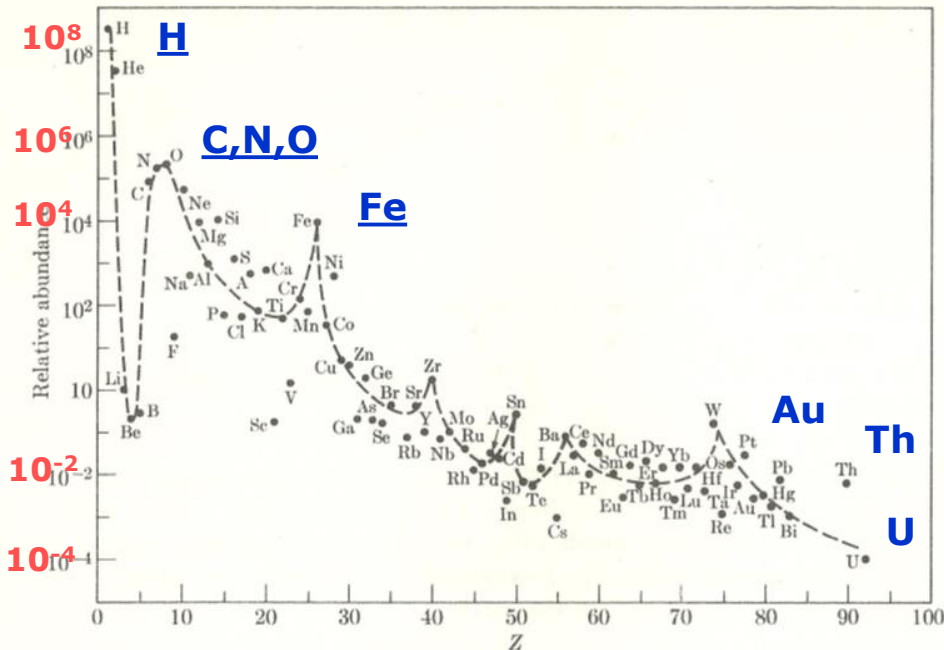


Fig. 8-23. Cosmic abundance of the elements. [Data from H. Urey and H. Brown, *Phys. Rev.* 88, 248 (1952)]

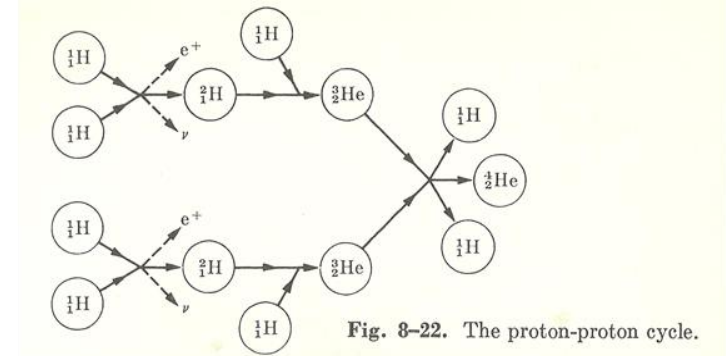


Fig. 8-22. The proton-proton cycle.

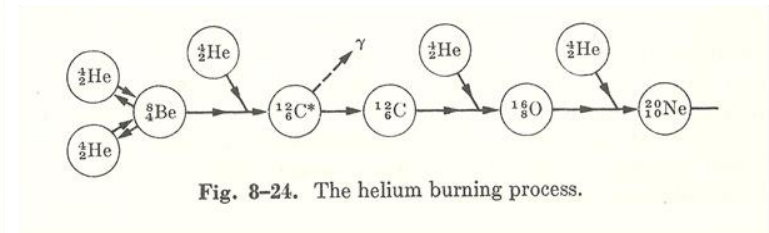


Fig. 8-24. The helium burning process.

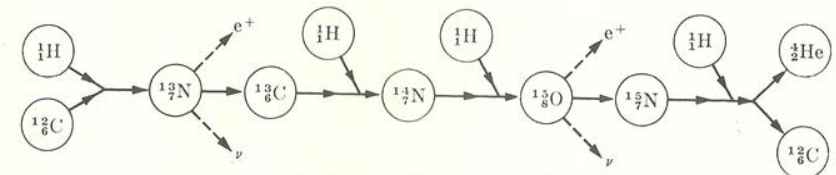
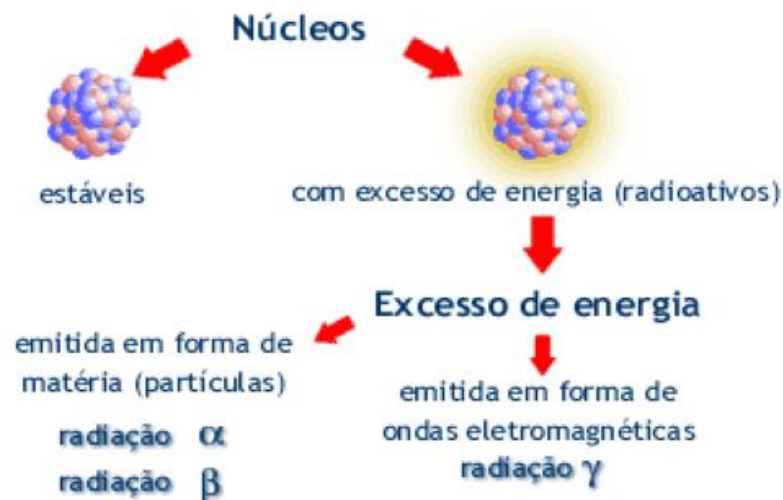


Fig. 8-21. The carbon cycle.

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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.



Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Principais radiações

Partículas: (Possuem massa)

Alfa (α)

Beta (β^+ ; β^-)

Nêutrons (n)

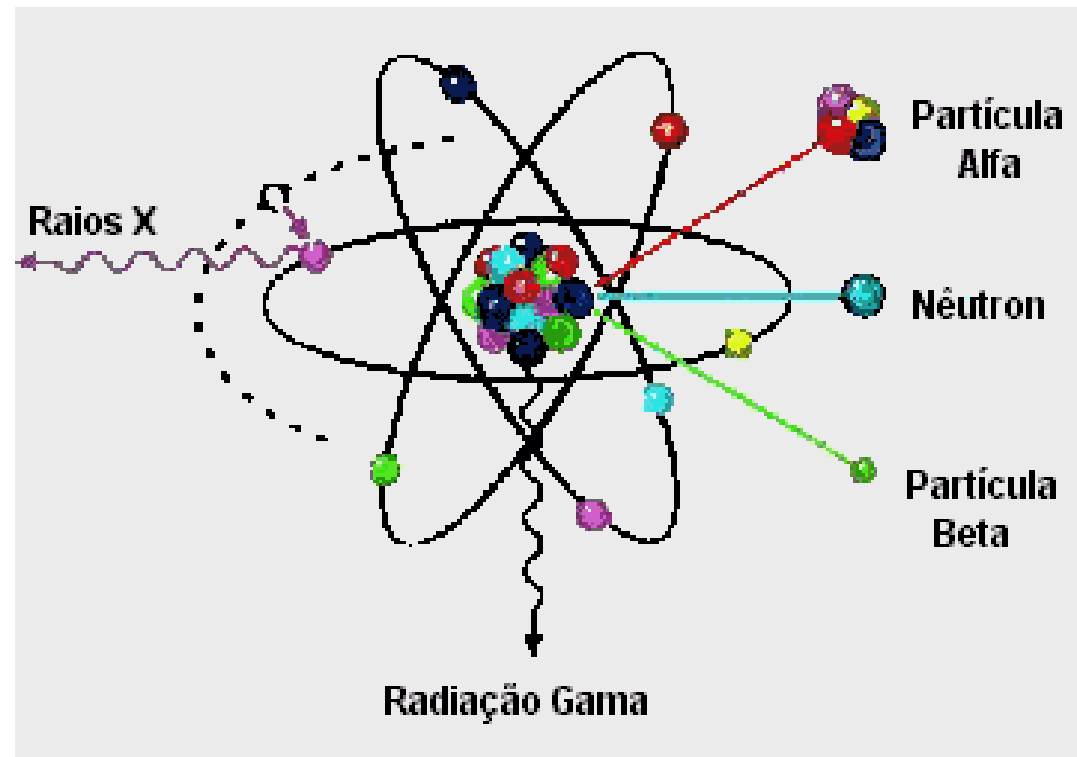
Prótons (p^+)

Elétrons (e^-)

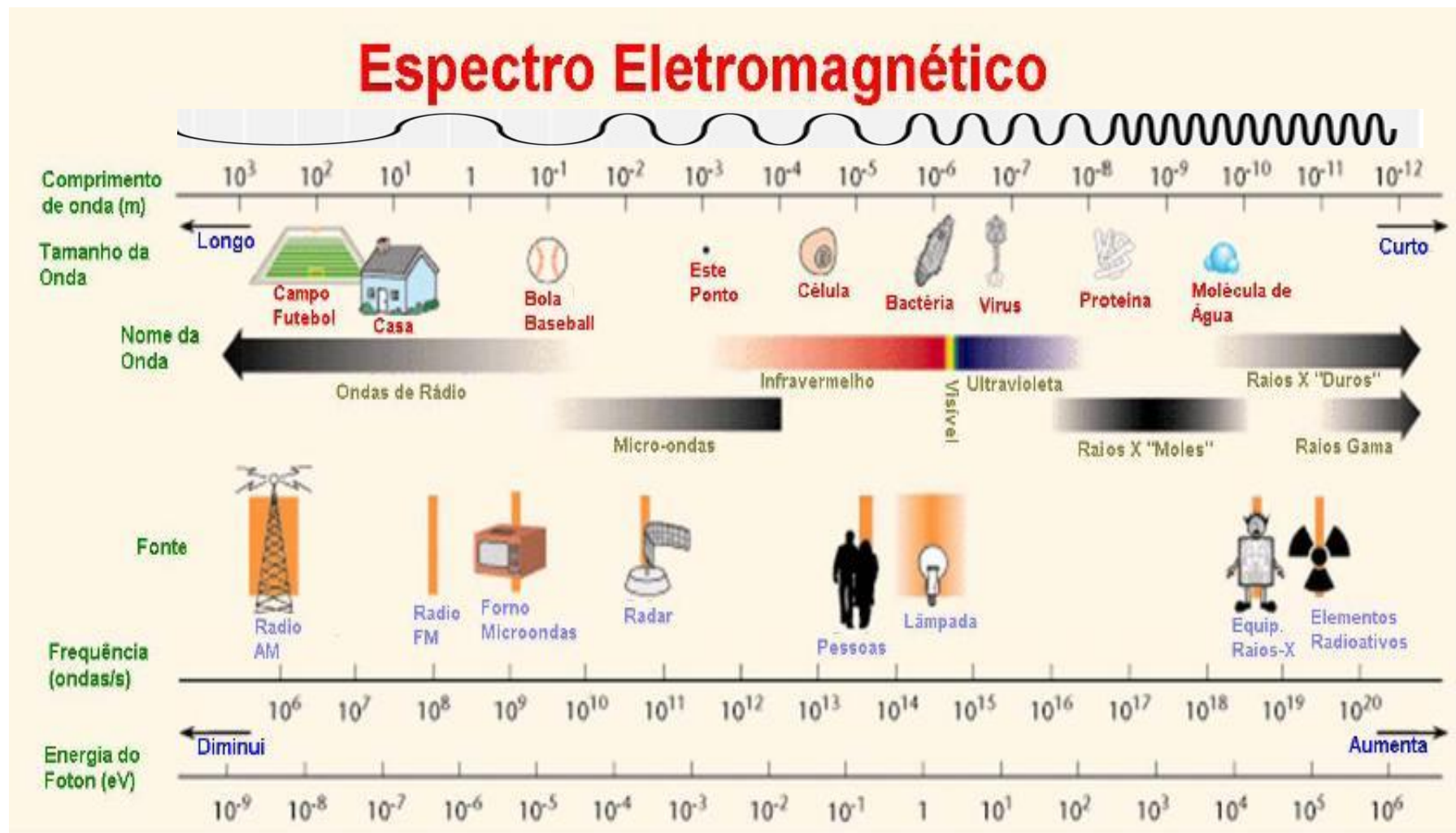
Radiações eletromagnéticas:

Raio Gama (γ)

Raio X



Conceitos Básicos – Energia Nuclear



Radiação Não-Ionizante

Radiação Ionizante

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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”.

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

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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

The Karlsruher Nuklidkarte is a comprehensive chart of nuclides. It displays the following information for each nuclide:

- Element Symbol:** Located at the top of each cell.
- Atomic Number (Z):** Located at the bottom left of each cell.
- Mass Number (A):** Located at the top right of each cell.
- Half-life:** Indicated by a horizontal line with a vertical tick mark.
- Decay Mode:** Indicated by a color-coded background.
- Stability:** Indicated by a small 's' in the bottom right corner of stable nuclides.

This section continues the Karlsruher Nuklidkarte, showing nuclides from Z=119 to 118. It maintains the same color-coding and information as the previous section.

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

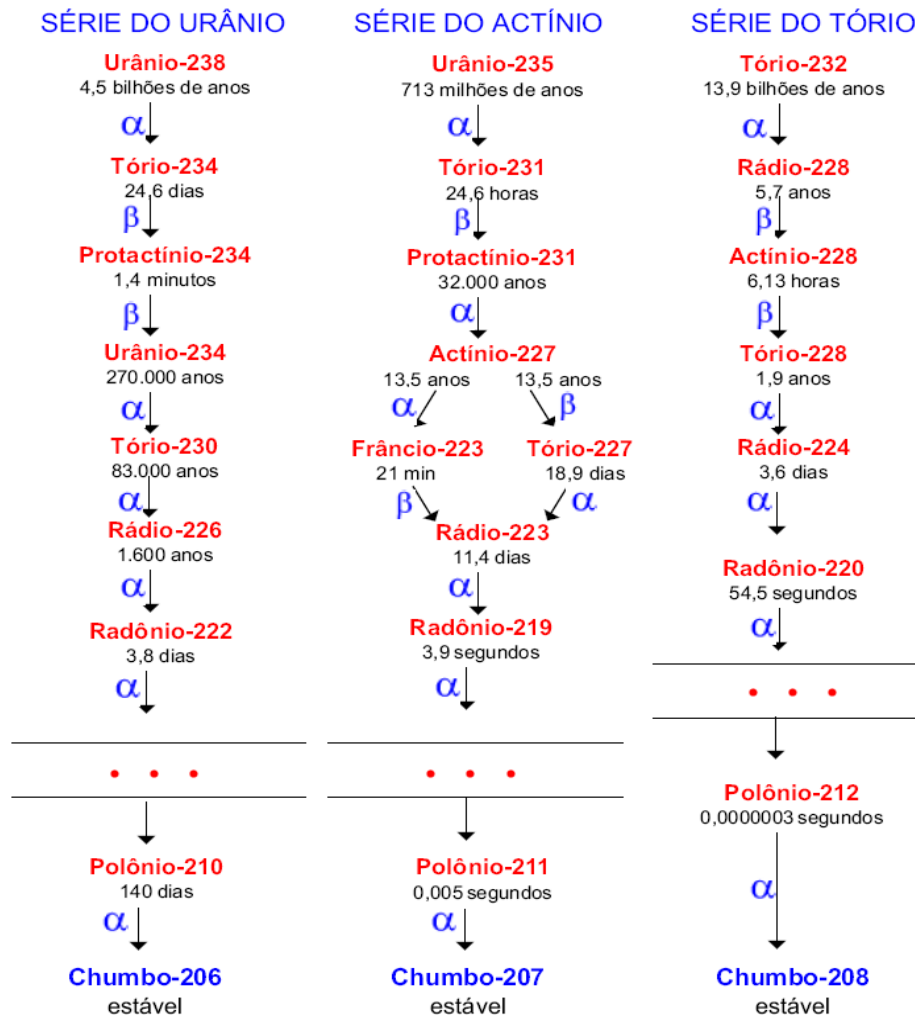
Tabela de Nuclídeos

This table displays the periodic table of nuclides, showing isotopes for elements from Hydrogen (Z=1) to Oganesson (Z=118). Each entry includes the element symbol, mass number (A), atomic number (Z), and half-life (t_{1/2}). The table is color-coded to indicate the stability of the nuclides: stable nuclides are white, while unstable ones are colored in shades of blue, green, and red.

This table continues the periodic table of nuclides, showing isotopes for elements from Atomic Number 119 to 118. Each entry includes the element symbol, mass number (A), atomic number (Z), and half-life (t_{1/2}). The table is color-coded to indicate the stability of the nuclides: stable nuclides are white, while unstable ones are colored in various shades of blue, green, and red.

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Séries Radioativas Naturais



Conceitos Básicos – Energia Nuclear

➤ *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.

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

➤ *As radiações ionizantes podem ser de origem:*

❖ *Natural*

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

❖ *Artificiais*

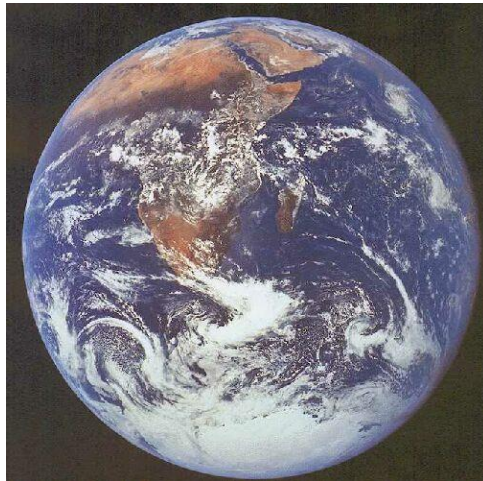
- ✓ Produzidas em Reatores Nucleares
- ✓ Produzidas em Aceleradores de Partículas
- ✓ Equipamentos de Raio X

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

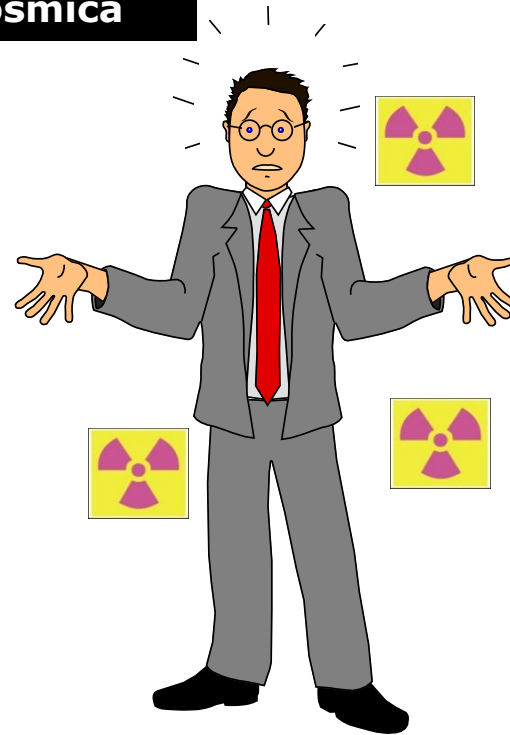
Radioatividade Natural



**Radiação
Cósmica**



**Crosta
terrestre**



**Corpo
Humano**

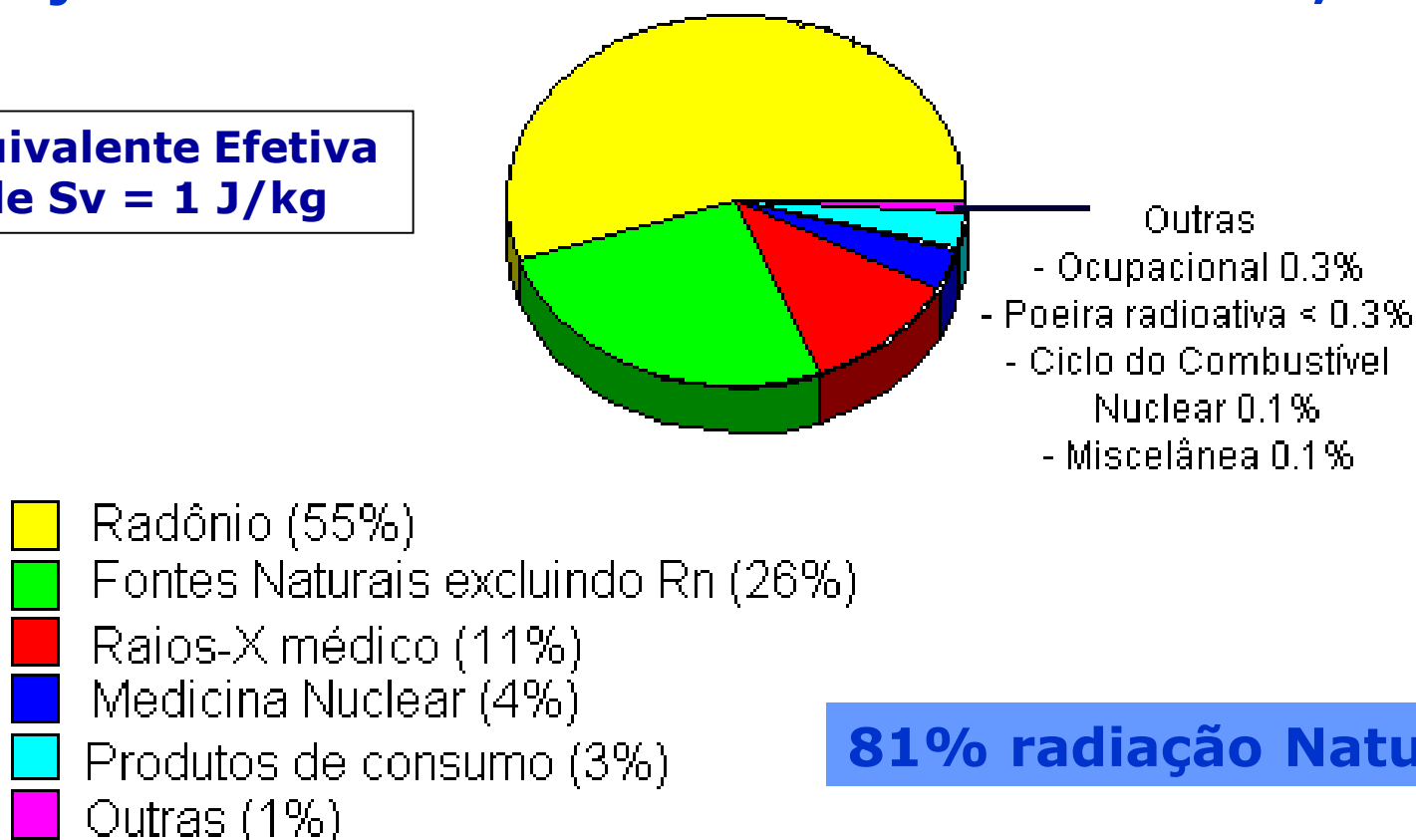
Potássio-40	4000 Bq
Carbono-14	2500 Bq
Rubídio-87	500 Bq
Polônio-210	20 Bq

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

FONTES DE EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO

Radiação natural - Dose media mundial 2,4 mSv

Dose Equivalente Efetiva
Unidade Sv = 1 J/kg



81% radiação Natural

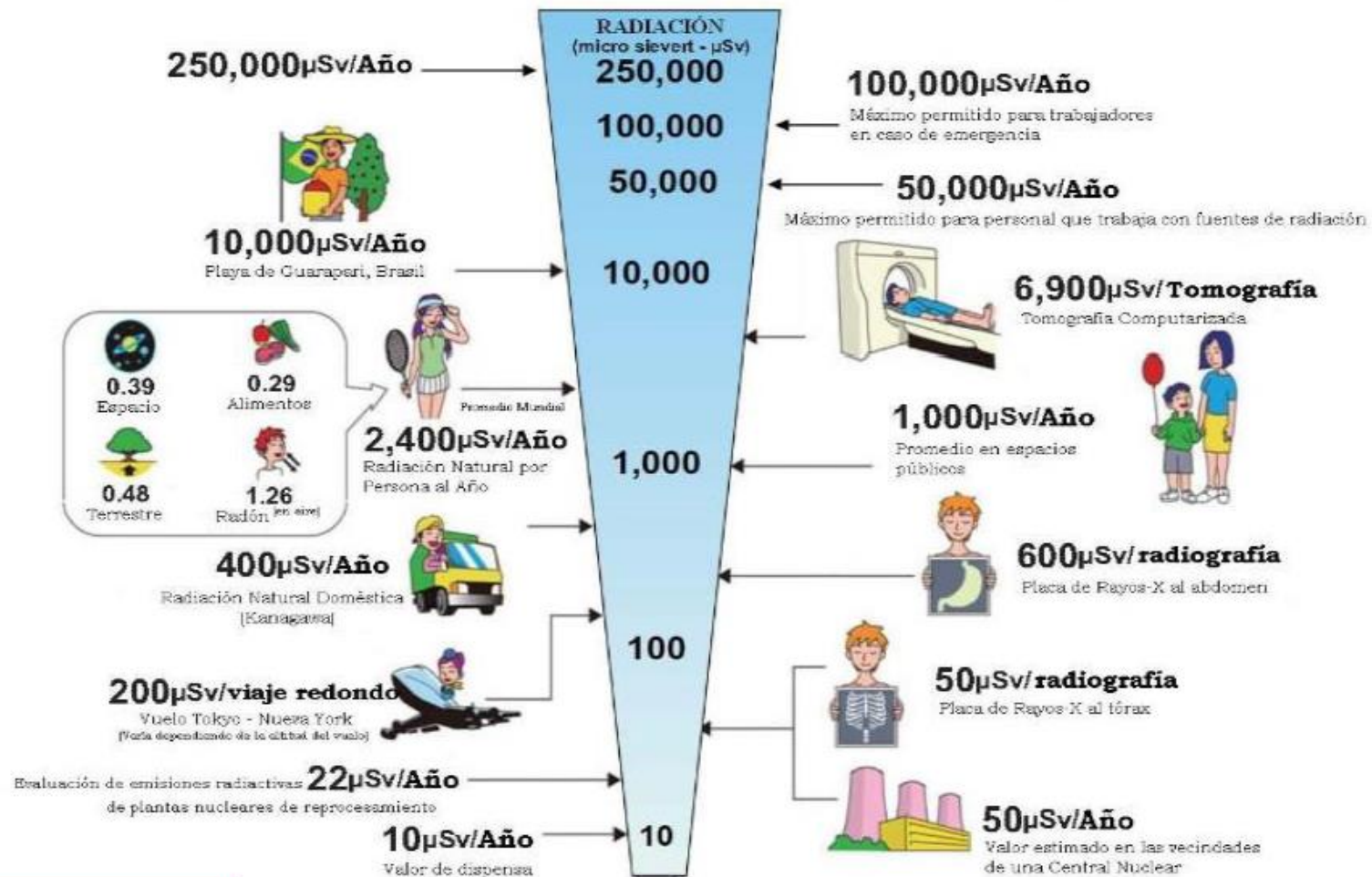
Conceitos Básicos – Energia Nuclear

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



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

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Principais Aplicações da Energia Nuclear

Reatores Nucleares

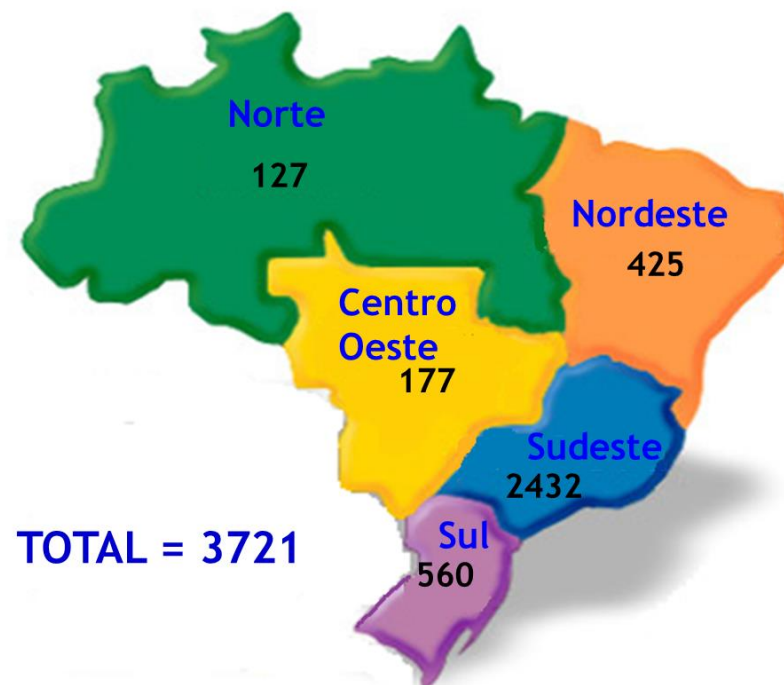
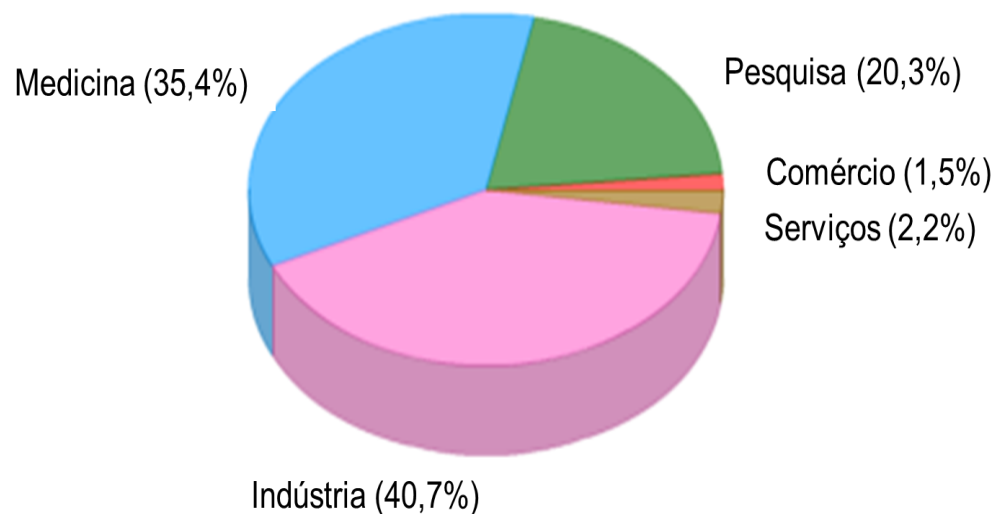
- **Reatores de Pesquisa**
 - ❖ **Produção de radioisótopos**
 - ❖ **Pesquisa tecnológica**
 - ❖ **Pesquisa fundamental**
- **Propulsão Naval**
- **Usinas Nucleares de Geração de Energia Elétrica**

Utilização de Radioisótopos

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

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Principais Aplicações da Energia Nuclear



Total de Instalações Radioativas: 3721

Dados da DRS-CNEN em 2011

Medicina Nuclear

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.

Medicina Nuclear

RADIOFÁRMACO

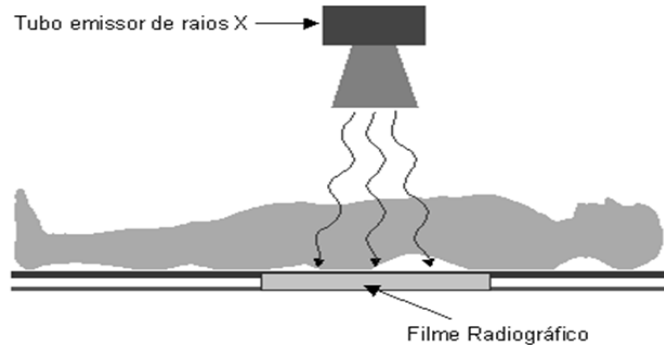
Toda substância que, por sua forma farmacêutica, quantidade e qualidade de radiação emitida por um radioisótopo constituinte, pode ser utilizada na Medicina Nuclear no diagnóstico e terapia, independente da forma ou via de administração (intravenosa, oral, inalação, intersticial, etc.)

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

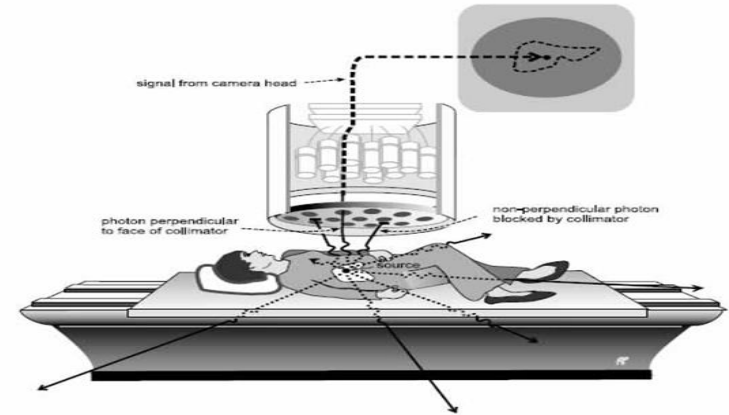
Duas possibilidades de uso:

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

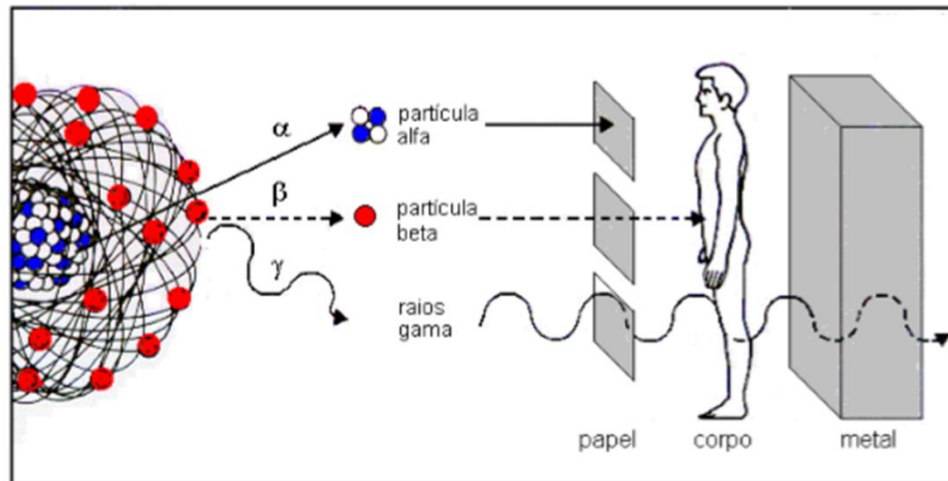
Medicina Nuclear



Esquema do trajeto da radiação numa radiografia



Esquema do exame por cintilografia



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

Medicina Nuclear

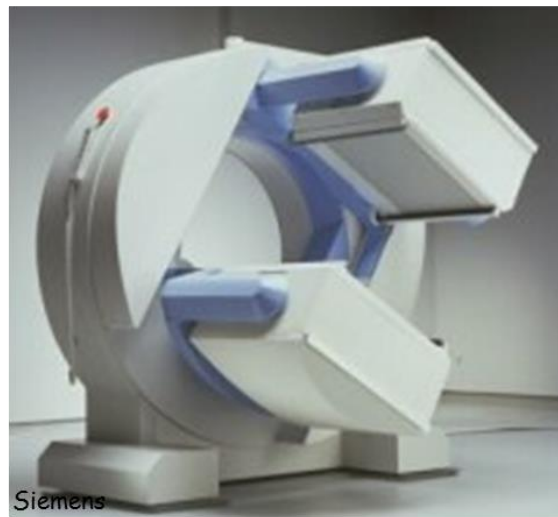
Técnicas aplicadas no diagnóstico

- 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

Medicina Nuclear

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

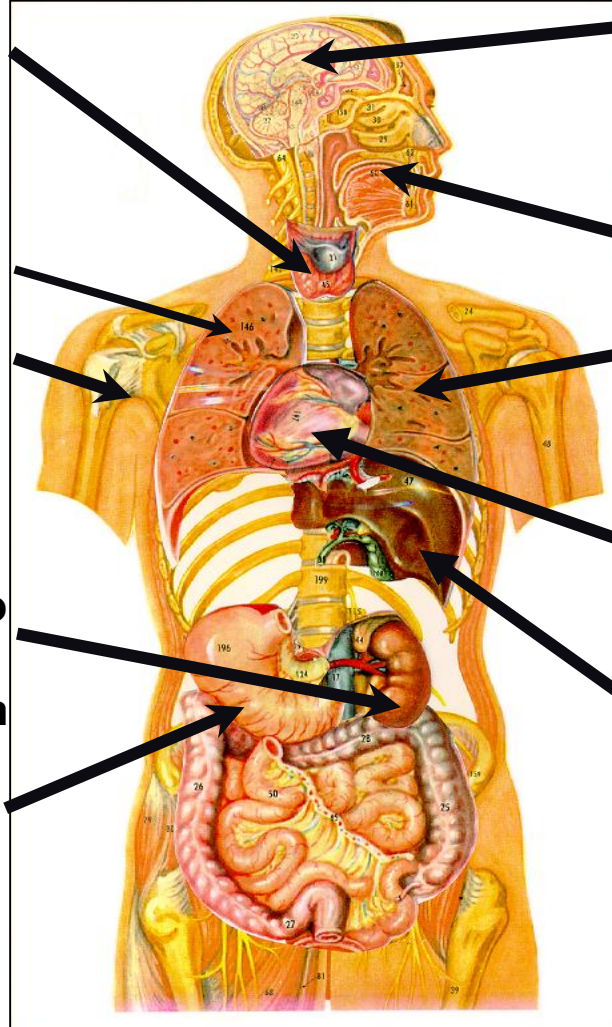
^{99m}Tc Citrato Estanoso

^{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

Medicina Nuclear

Exemplo: Radiofármacos aplicados em terapia – alta atividade

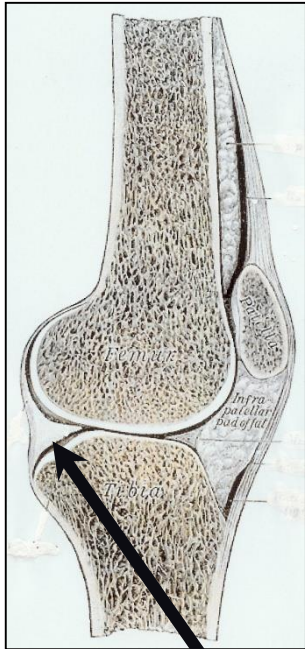
TIREÓIDE

^{131}I NaI

^{131}I Capsula

SISTEMA ÓSSEO

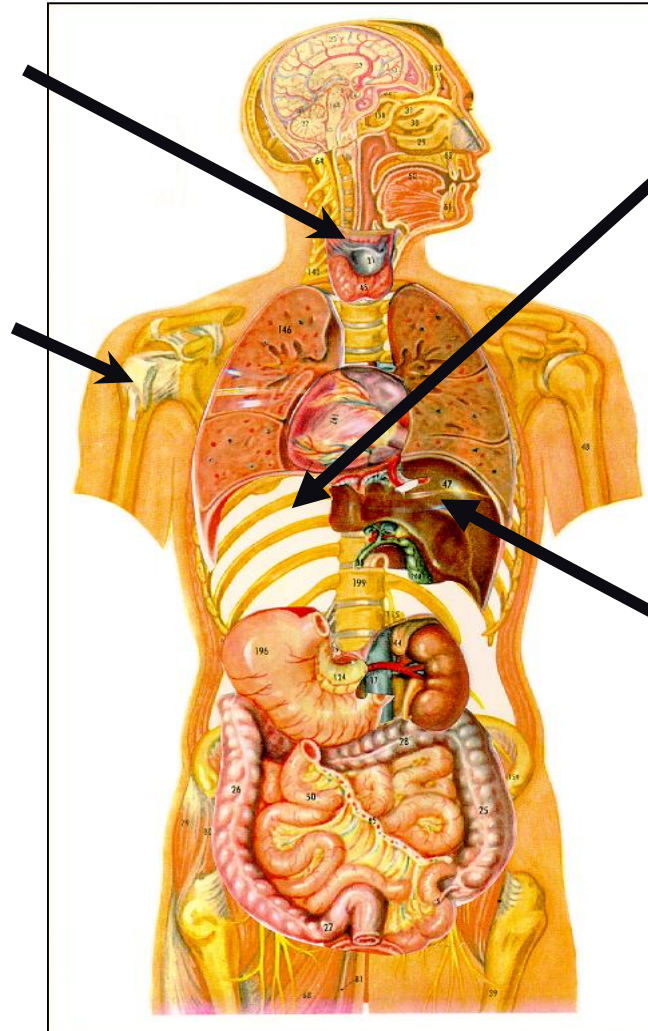
^{153}Sm EDTMP



SINOVECTOMIA

^{153}Sm - Hidroxiapatita

^{90}Y - Hidroxiapatita



TUMORES NEUROEN- DÓCRINOS

^{177}Lu DOTATATE

^{111}In DOTATOC

^{131}I MIBG

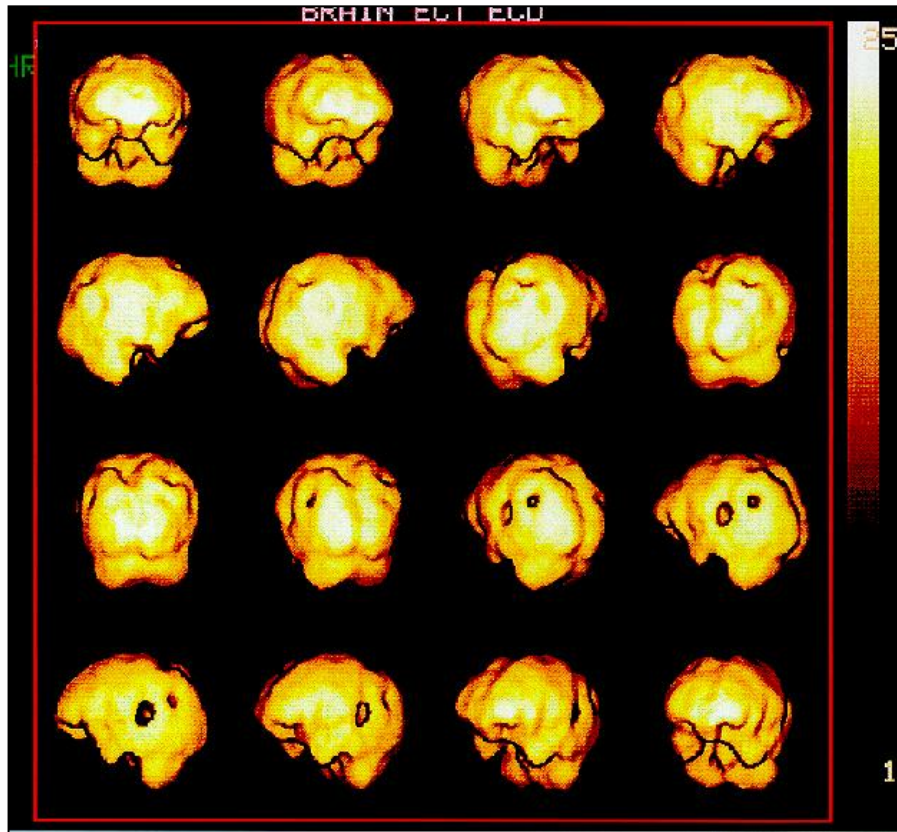
FÍGADO

^{131}I Lipiodol

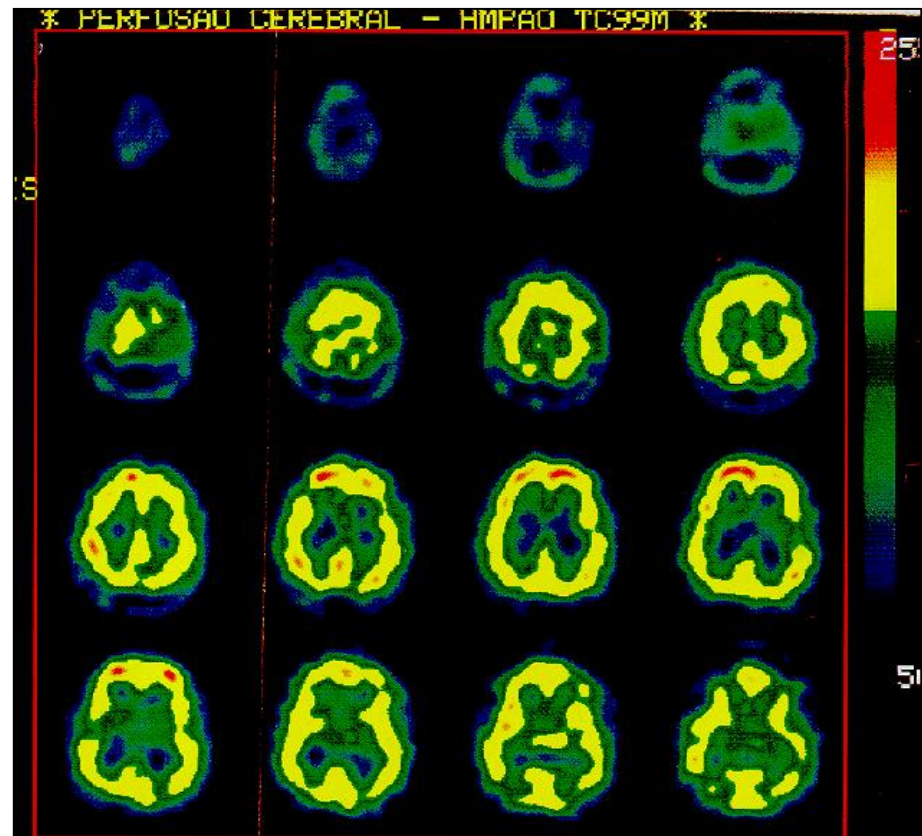
Medicina Nuclear

SPECT(single photon emission computerized tomography) **cerebral com ECD- ^{99m}Tc**

tridimensional

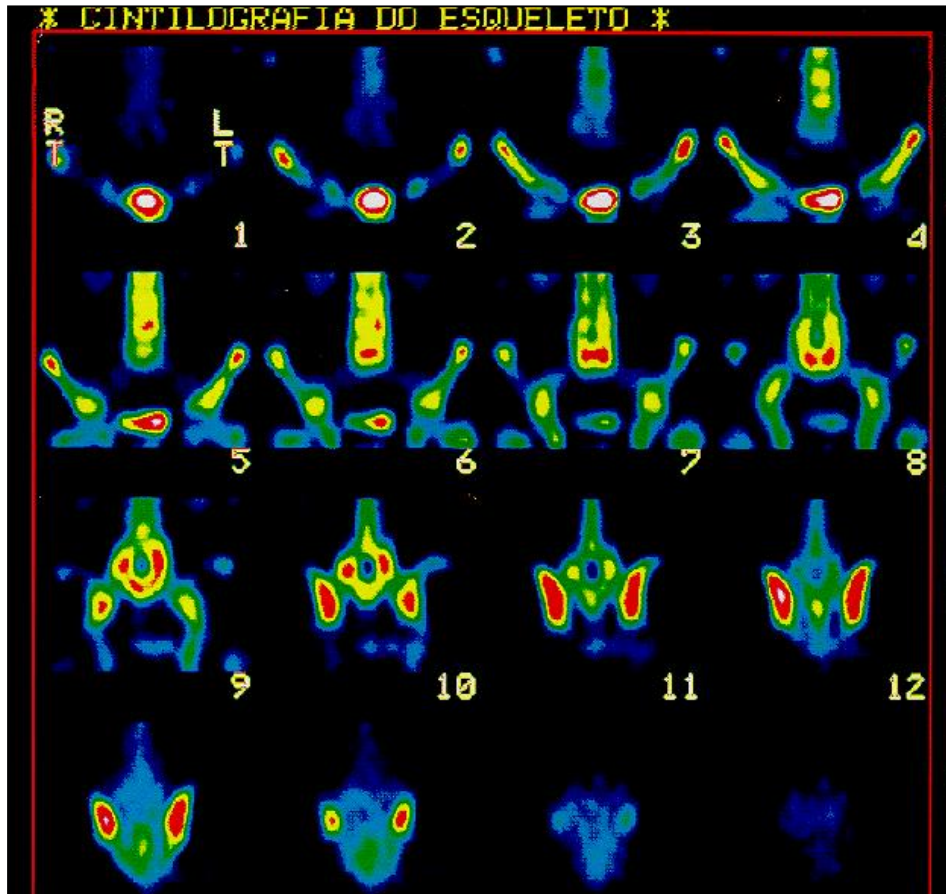


cortes

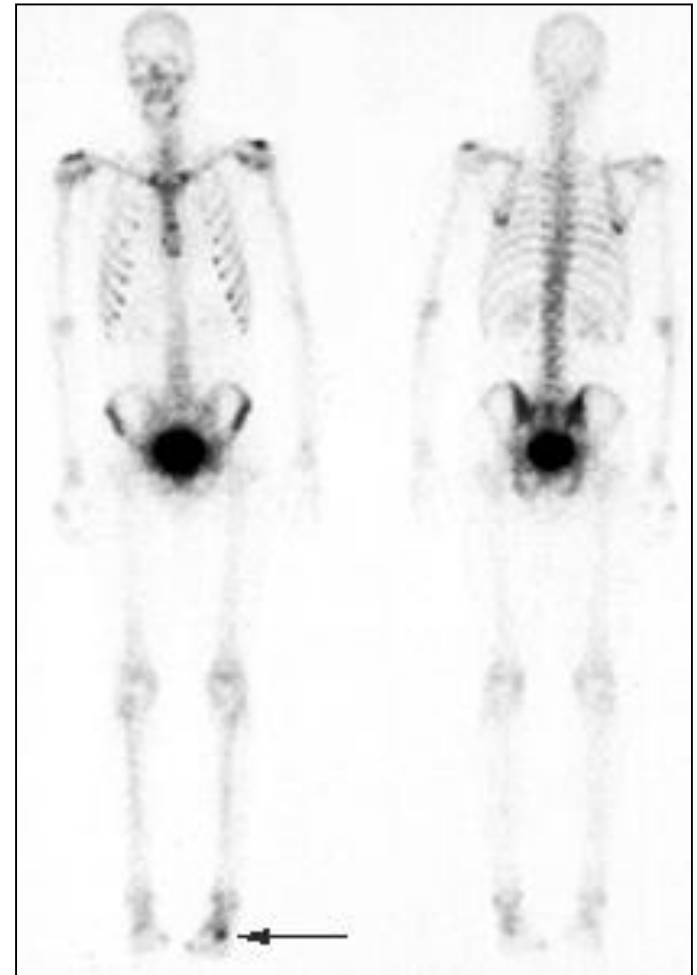


Medicina Nuclear

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

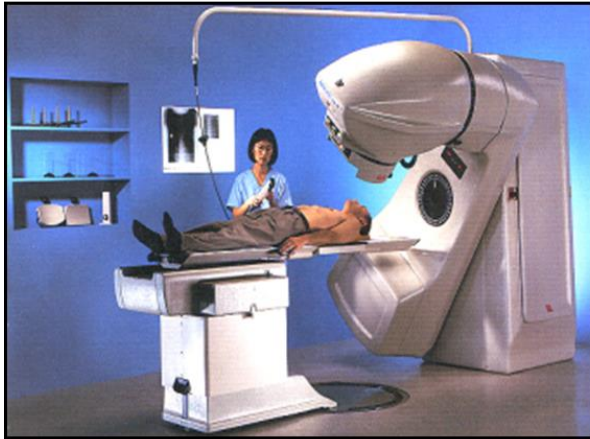


(inserido em 2010 nos serviços de saúde)

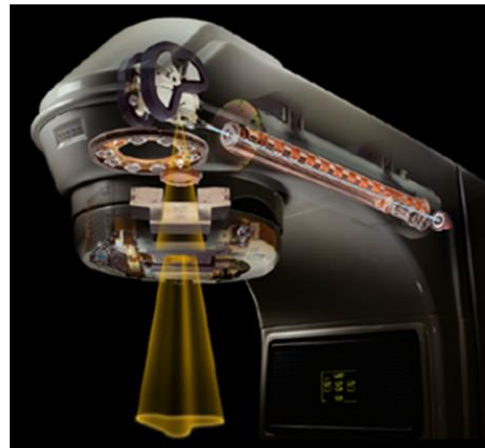
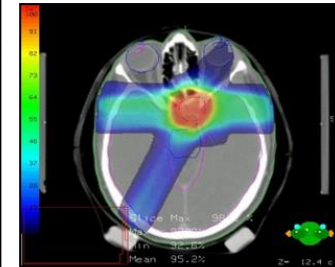


Medicina Nuclear

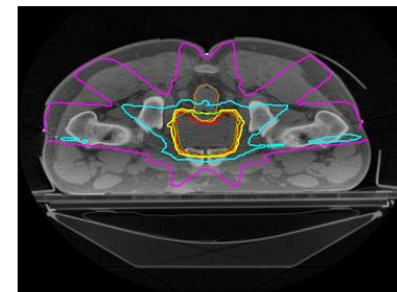
TELETERAPIA (Radioterapia Externa)



Cobalto-60



**Acelerador Linear
(10MeV)**



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

José A. Perrotta 04/06/2016

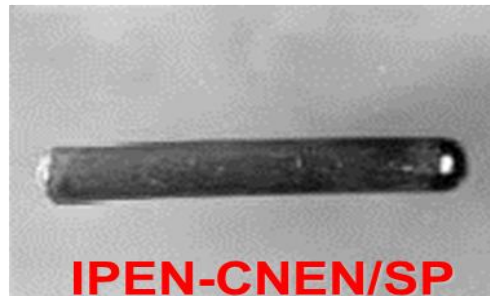
Medicina Nuclear

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

Medicina Nuclear

<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 Cíclotron	Diagnóstico	100% nacional
^{123}I	Produzido em Cíclotron	Diagnóstico	100% nacional
^{111}In	Produzido em Cíclotron	Diagnóstico	100% importado
^{51}Cr	Produzido em Cíclotron	Diagnóstico	100% importado
^{67}Ga	Produzido em Cíclotron	Diagnóstico	Parcialmente nacional
^{201}Tl	Produzido em Cíclotron	Diagnóstico	Parcialmente nacional

Medicina Nuclear

Fármacos	Radioisótopos	Aplicações
ECD	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Cérebro
Pertecnetato	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Glândulas Salivares, Estômago
Nal	Iodo 1-123 ^(2a) e Iodo- 131 ⁽³⁾	Tireóide
Estanho Coloidal	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Fígado
Fitato	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Fígado
MIAA	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Fígado
MAA	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾ e Iodo-131 ⁽³⁾	Pulmão
MIBG	Iodo-123 ^(2a) e Iodo-131 ⁽³⁾	Coração, Tumores
Cloreto de Tálío	Tálío-201 ^(2a)	Coração, Tumores
SAH	Cromo – 51 ⁽⁴⁾	Intestino
Citrato de Gálio	Gálio-67 ^(2a)	Tecidos moles, Tumores, Infecção
EDTPM	Samário-153 ⁽²⁾	Ossos
MDP	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Ossos
PIRO	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Ossos, Coração
Dextran 500	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Sistema Linfático
DMSA	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Rins
GHA	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Rins
DTPA	Tecnécio – 99m ⁽¹⁾	Rins
Hippuran	Iodo 1-123 ^(2a) e Iodo- 131 ⁽³⁾	Rins
FDG	Flúor-18 ^(2a)	Coração, Cérebro, Tumores, Infecção
In-DTPA-octreotídeo	Índio -111 ⁽²⁾	Oncologia
Lu – octreotato	Lutécio – 177 ⁽⁴⁾	Oncologia
Y – Citrato	Ítrio – 90 ⁽⁴⁾	Radiosinoviotese
Y – Hidroxiapatita	Ítrio – 90 ⁽⁴⁾	Radiosinoviotese
Produtos	Radioisótopos	Aplicações
* Fio de Iridio	Íridio-192 ⁽²⁾	Garganta (Braquiterapia)
* Sementes de Iodo	Iodo-125 ⁽⁴⁾	Próstata (Braquiterapia)

Produção de Radiofármacos no Brasil

(1) Produzido a partir do Mo-99 – importado pelo IPEN-CNEN/SP.

(2) Produção 100% nacional – IPEN-CNEN/SP.

(2a) Produção 100% nacional em Ciclotrons

(3) 30% produção nacional – IPEN-CNEN/SP, 70% importado.

(4) 100% importado

Medicina Nuclear



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

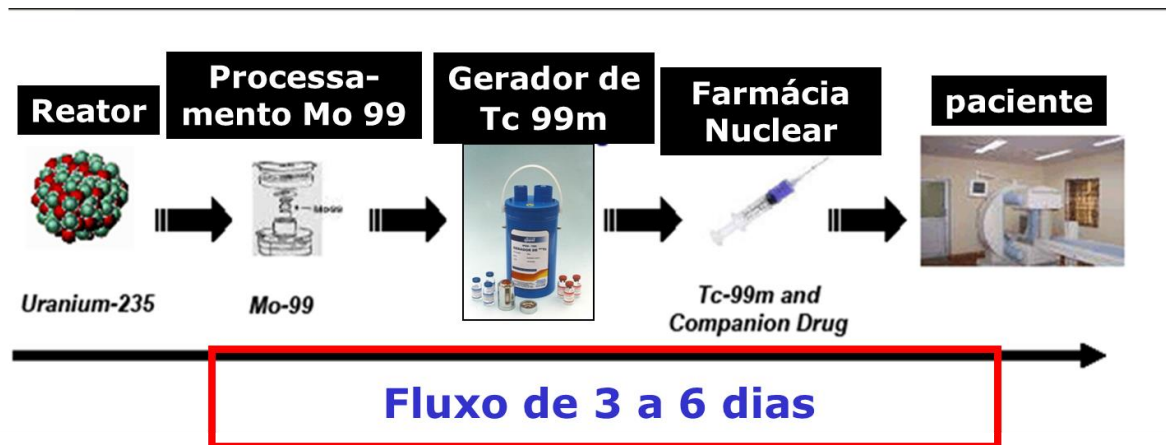
- Produzidos em torno de 400 geradores por semana
- Atendidas mais de 400 unidades médicas
- Realizados em torno de 2 milhões de procedimentos por ano

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

Medicina Nuclear

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

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

- ~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.
- 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.

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ As principais reações nucleares com nêutrons no reator nuclear são:

➤ *Absorção*

- Captura Radioativa
- Formação de Partículas Carregadas

➤ *Espalhamento*

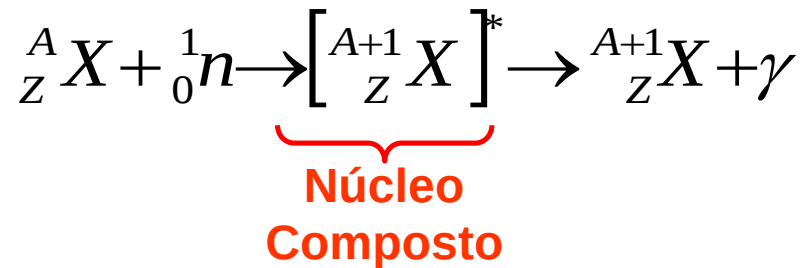
- Elástico
- Inelástico

➤ *Fissão*

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Captura Radioativa



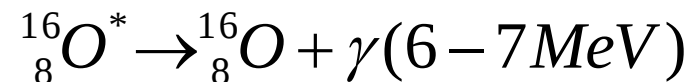
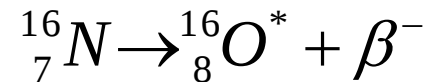
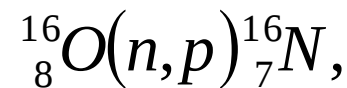
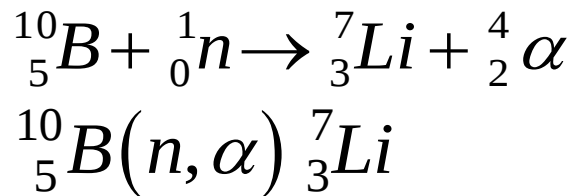
Exemplo:



➤ Formação de partículas carregadas

(n,p); (n, α), ou outra reação qualquer que gere partícula carregada

Exemplos:



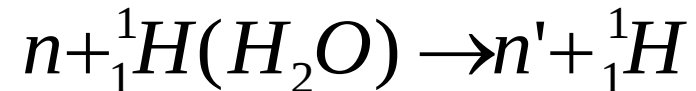
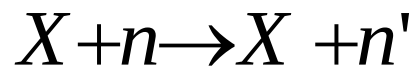
Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Espalhamento Elástico

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

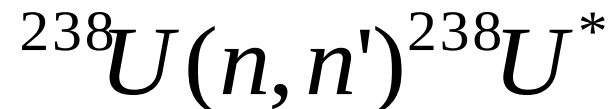
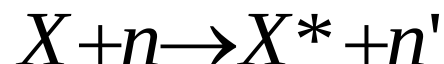
Exemplo:



➤ 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:

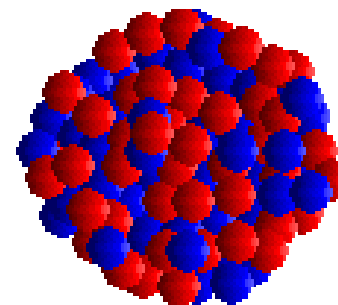
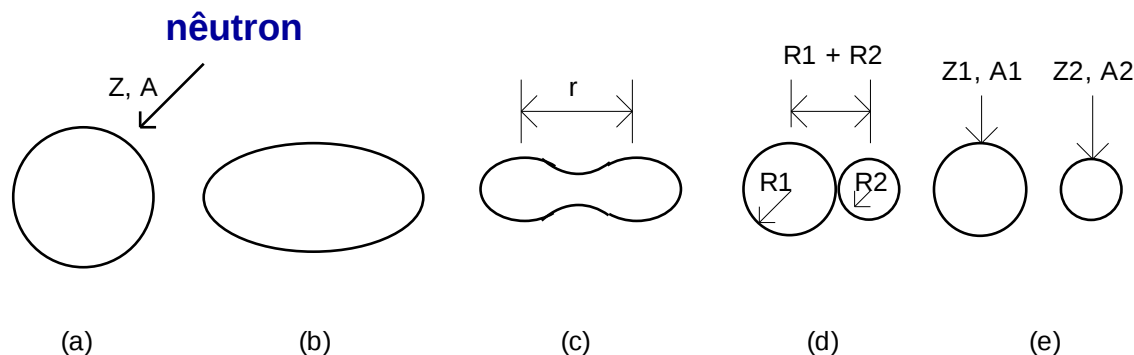


Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Reações Nucleares

➤ Fissão

Modelo da Gota Líquida:

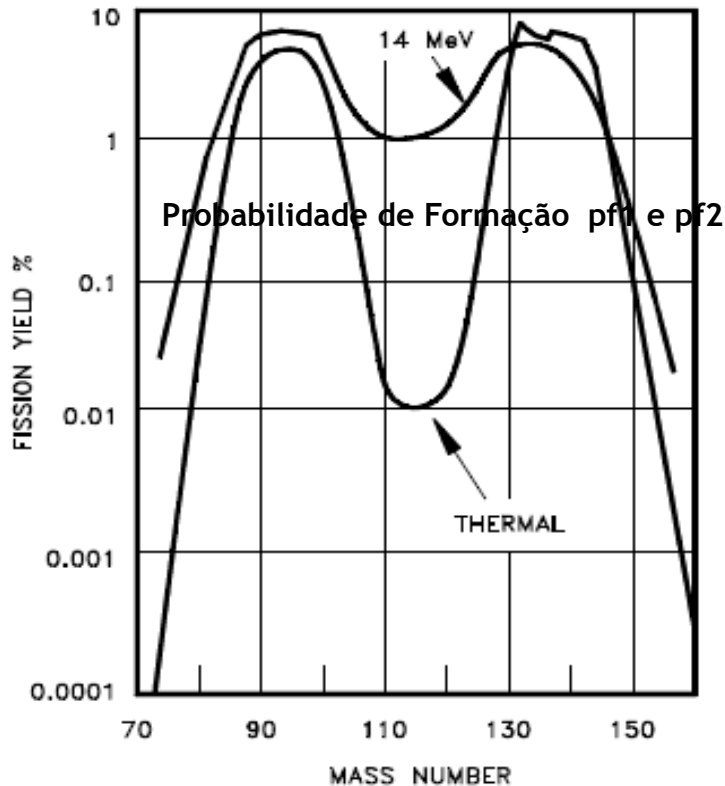
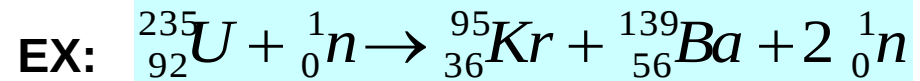
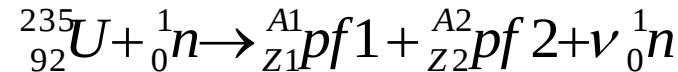


- (a) Energia externa (nêutron incidente). Núcleo com carga uniformemente distribuída;
- (b) Estado excitado. Ação de forças radiais e diametralmente opostas (coulombianas e nucleares) que o deformam dando origem a uma forma de um elipsóide;
- (c) Se a distorção for suficientemente intensa, a gota assume em seguida uma forma de um haltere;
- (d) O haltere (c) oscila até o "pescoço" se tornar tão estreito que se rompe em 2 fragmentos (força coulombiana supera a força nuclear de curto alcance);
- (e) Fragmentos de fissão.

Conceitos Básicos – Energia Nuclear

Reações Nucleares

➤ Produtos de Fissão



MASSA ANTES DA FISSÃO	MASSA DEPOIS DA FISSÃO
${}^{235}\text{U}=235,124\text{u.m.a.}$	${}^{95}\text{Kr}=94,945\text{u.m.a.}$
$n=1,009\text{u.m.a.}$	${}^{139}\text{Ba}=138,955\text{u.m.a.}$
	$2n=2,018\text{ u.m.a.}$
TOTAL=236,133u.m.a.	TOTAL=235,918u.m.a.

$$E = \Delta m.c^2$$

$$\Delta m = 236,133 - 235,918 = 0,215 \text{ u.m.a.}$$

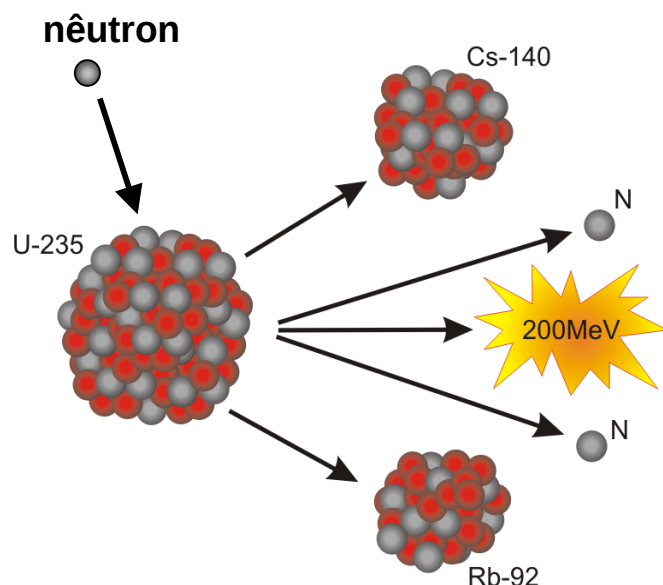
$$\Delta E = 0,215 \times 931 = 198 \text{ MeV}$$

~200MeV

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Energia na Fissão



Forma da energia	Emitida (MeV)	Recuperada (MeV)
pf (cinética)	168	168
Decaimento 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

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Nêutrons de Fissão

⊕ Tempo de emissão:

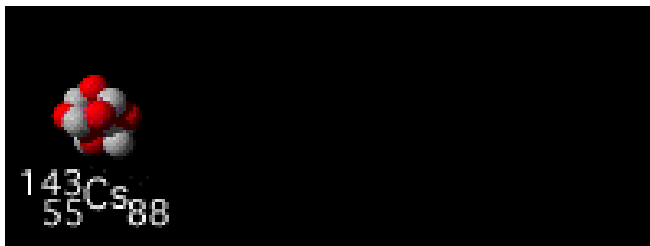
i) n-prontos ($t < 10^{-14}s$).

Produzidos na fissão



ii) n-atrasados ($t > 10^{-14}s$).

Decaimento de pfs.



⊕ Energia:

i) n-térmicos ($E < 1\text{eV}$)

Estão em equilíbrio térmico com o meio.

$$E = KT = 8.6 \times 10^{-5} \text{eV} / K$$

$$E = 0.025 \text{eV} \rightarrow T = 20.4^\circ \text{C}$$

$$E = 0.049 \text{eV} \rightarrow T = 300^\circ \text{C}$$

ii) n-intermediários
(epitérmicos)

$$(1\text{eV} < E < 100\text{keV})$$

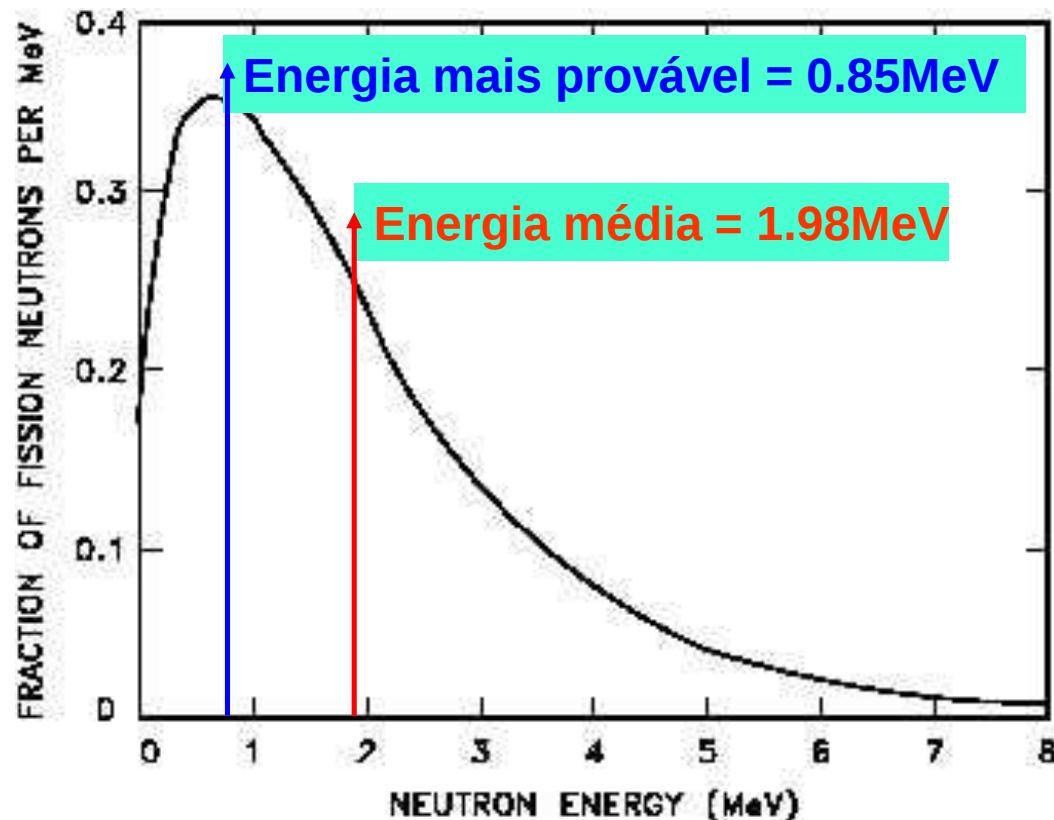
iii) n-rápidos ($E > 100\text{keV}$)

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Nêutrons de Fissão

Espectro de nêutrons prontos

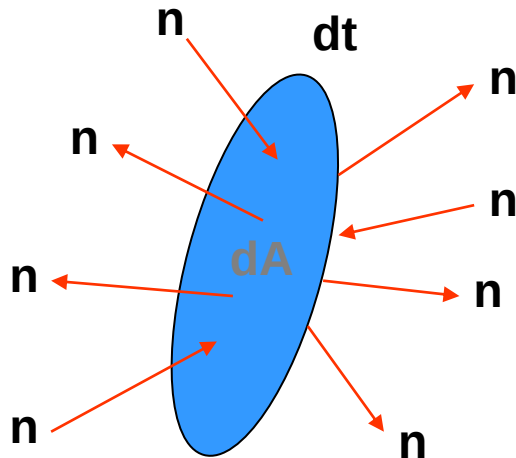


Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Fluxo de nêutrons ϕ

Definição: fluxo de nêutrons é a quantidade de nêutrons que atravessam uma unidade de área em um segundo, independente de direção ou sentido.



$$\phi = \frac{\text{número de nêutrons}}{dA \times dt} = nv \left(\frac{\text{nêutrons}}{\text{cm}^2 \text{s}} \right)$$

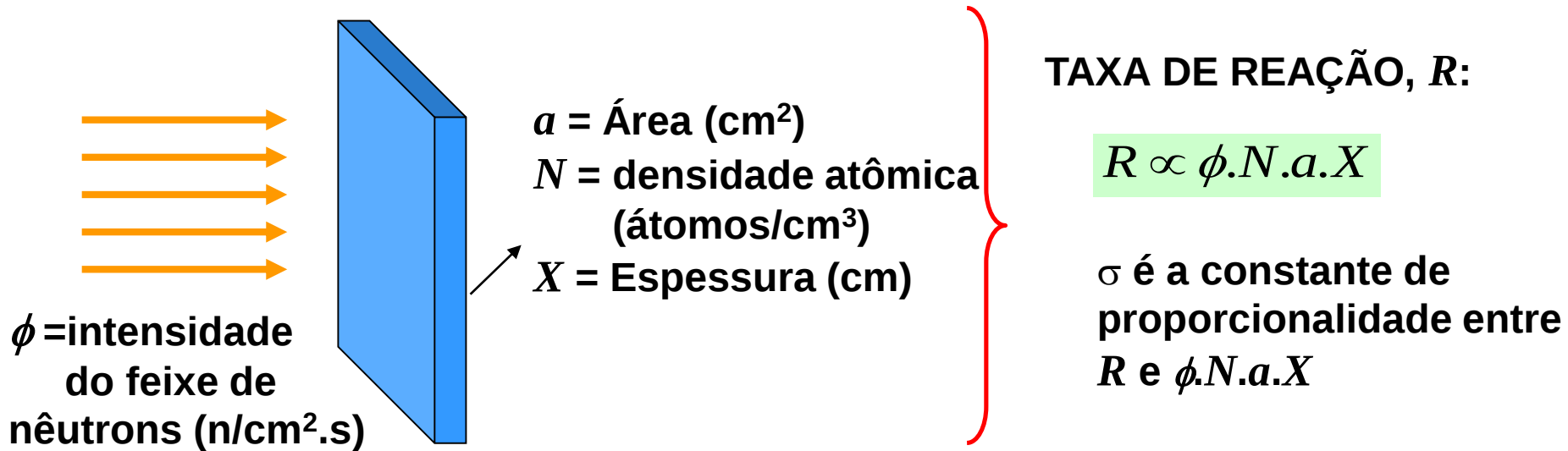
onde: n = densidade de nêutrons (n / cm^3)
 v = velocidade do nêutron

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Seção de Choque microscópica σ

A *seção de choque* é uma medida da probabilidade de ocorrência de uma dada reação nuclear. Unidade: 1 barn (b) = 10^{-24}cm^2



$$\sigma = \frac{\text{taxa de reação} / \text{número de átomos do alvo}}{\text{intensidade do feixe incidente}} = \frac{R / NaX}{\phi}$$

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

⊕ Seção de Choque microscópica σ

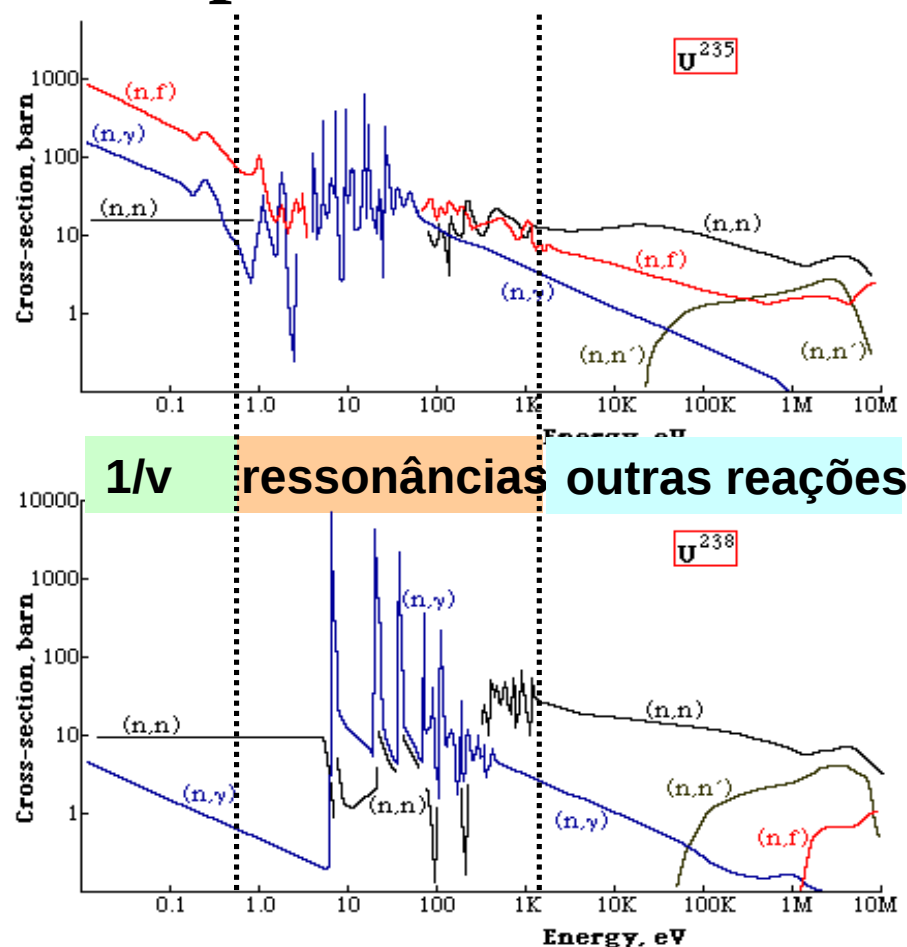
Para cada tipo de reação nuclear, existe uma seção de choque correspondente que é uma característica do núcleo alvo, sendo entretanto, função da energia do nêutron incidente.

A seção de choque total é a somatória das seções de choque individuais para cada tipo de reação nuclear.

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

Seção de choque
de espalhamento σ_s

Seção de choque
de absorção σ_a



Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

✚ Seção de Choque macroscópica Σ

Definição: $\Sigma = N\sigma$ Unidade: cm^{-1}

N = densidade atômica do alvo = $6.02 \times 10^{23} \frac{\rho}{A}$ átomos/ cm^3

σ = seção de choque microscópica

Da mesma forma que para a seção de choque microscópica:

$$\Sigma_t = \underbrace{(\Sigma_e + \Sigma_i)}_{\text{Seção de choque de espalhamento } \Sigma_s} + \underbrace{(\Sigma_\gamma + \Sigma_f + \Sigma_\alpha + \dots)}_{\text{Seção de choque de absorção } \Sigma_a}$$

Seção de choque
de espalhamento Σ_s

Seção de choque
de absorção Σ_a

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

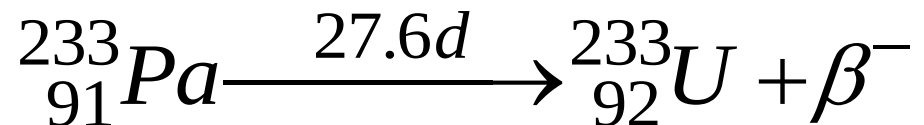
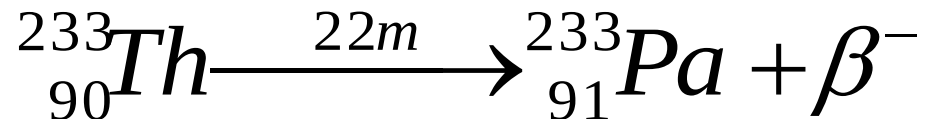
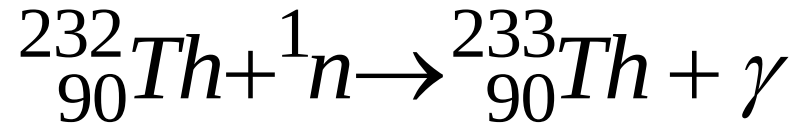
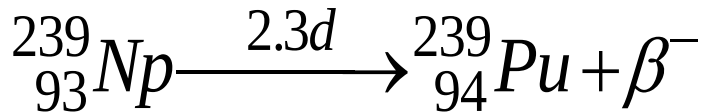
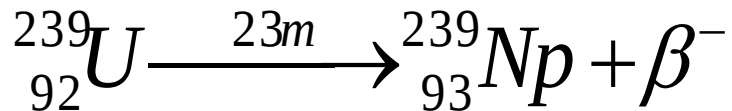
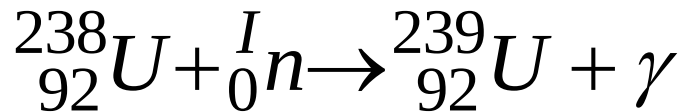
Reações Nucleares

- 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

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Reações Nucleares

➤ Transformações Fértéis → Físseis

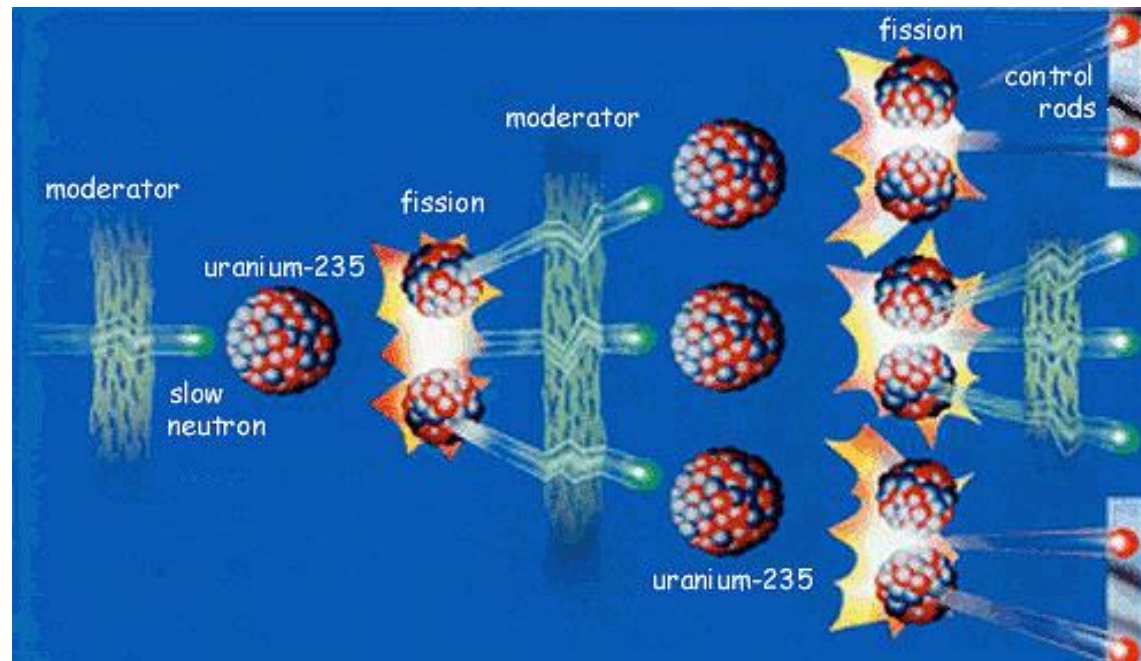


Conceitos Básicos – Reactores Nucleares

Reações Nucleares

➤ 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.



Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

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

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

Fator de Multiplicação

➤ Fator de Multiplicação de um Meio

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

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

(*) 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

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

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

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

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.)

Conceitos Básicos – Reatores Nucleares

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	IEN/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

Produção de Energia Elétrica - Nuclear

Angra II

Angra I

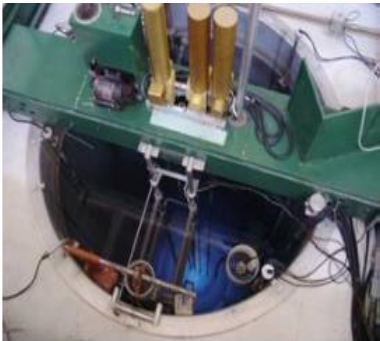


Produção de Energia Elétrica - Nuclear



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

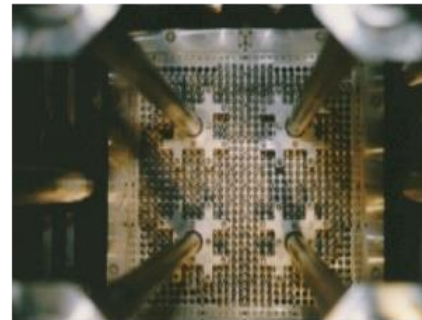
Nome	Utilização	Potência	Localização	Início de Operação	Tipo
IPEN/MB-01	Unidade Crítica – Análise de Núcleo de PWR	100 W	IPEN/CNEN-SP São Paulo	1988	Núcleo Aberto – Vareta
ARGONAUTA	Pesquisa – Ensino	500 W	IEN/CNEN-RJ Rio de Janeiro	1965	Argonaut
IPR-R1	Pesquisa – Ensino	100 kW	CDTN/CNEN-MG Belo Horizonte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



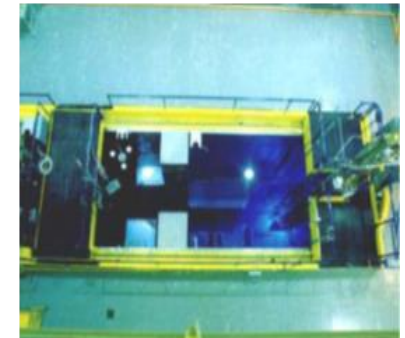
IPR-R1



ARGONAUTA



IPEN/MB-01



IEA-R1

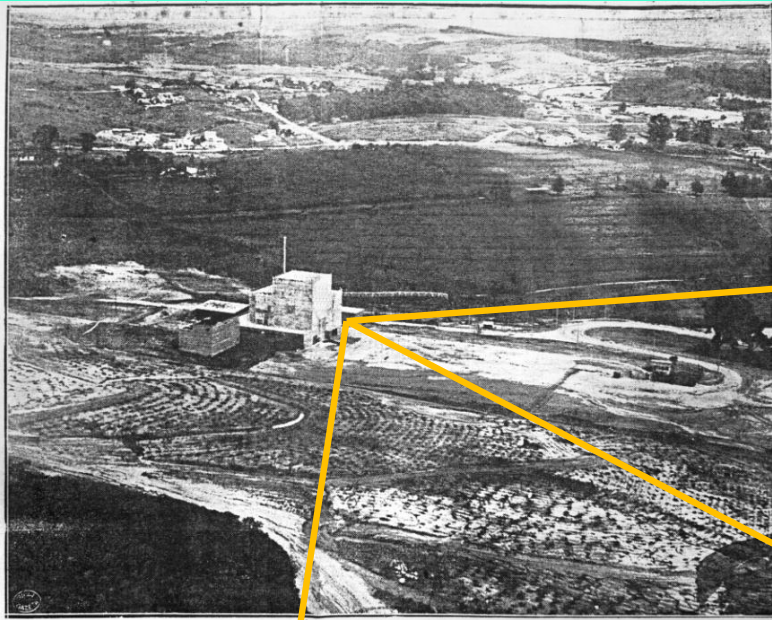
Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil



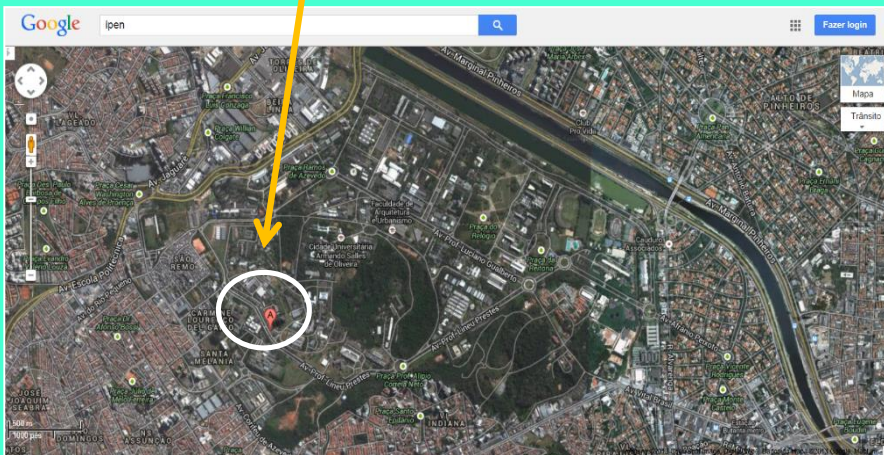
IEA-R1 (1958)



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil



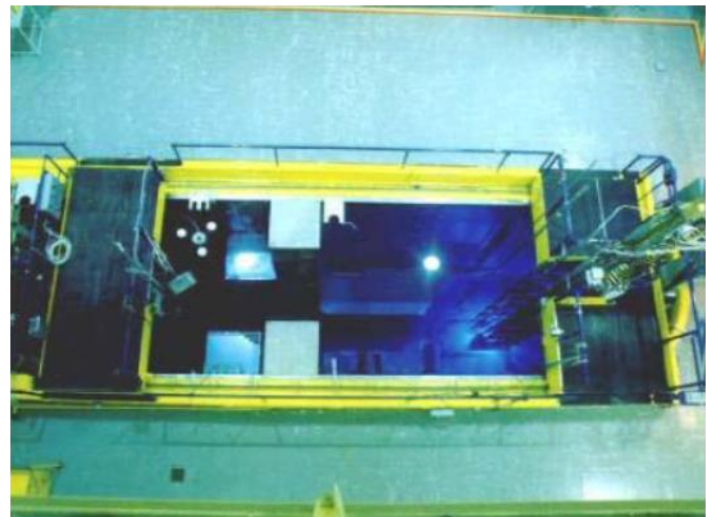
IEA-R1 (1958) ----- IPEN (2016)



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

Reator IEA-R1

- Reator tipo piscina, MTR, projeto Babcock & Wilcox.
- Instalado no antigo IEA- Instituto de Energia Atômica, atual IPEN da CNEN, no campus da USP em São Paulo
- O reator ficou crítico em 16 de Setembro de 1957.
- Potência máxima de 5 MW (original 2 MW)
- O reator utilizava combustível de liga de U-Al com 93% de enriquecimento e hoje utiliza combustível tipo dispersão de U_3Si_2 -Al, produzido no IPEN, com com 20% de enriquecimento

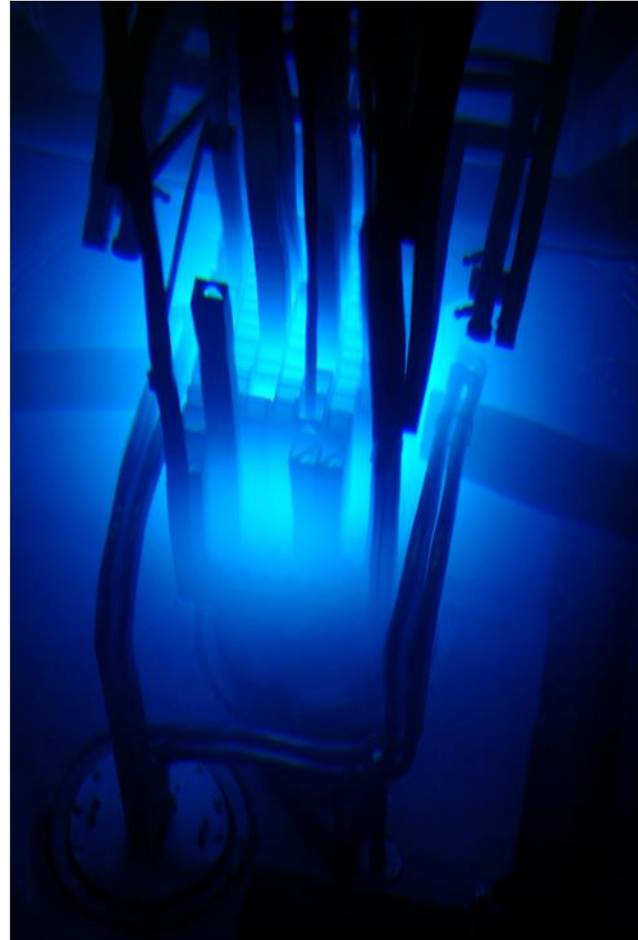


Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

Reator IEA-R1

Principal Utilização

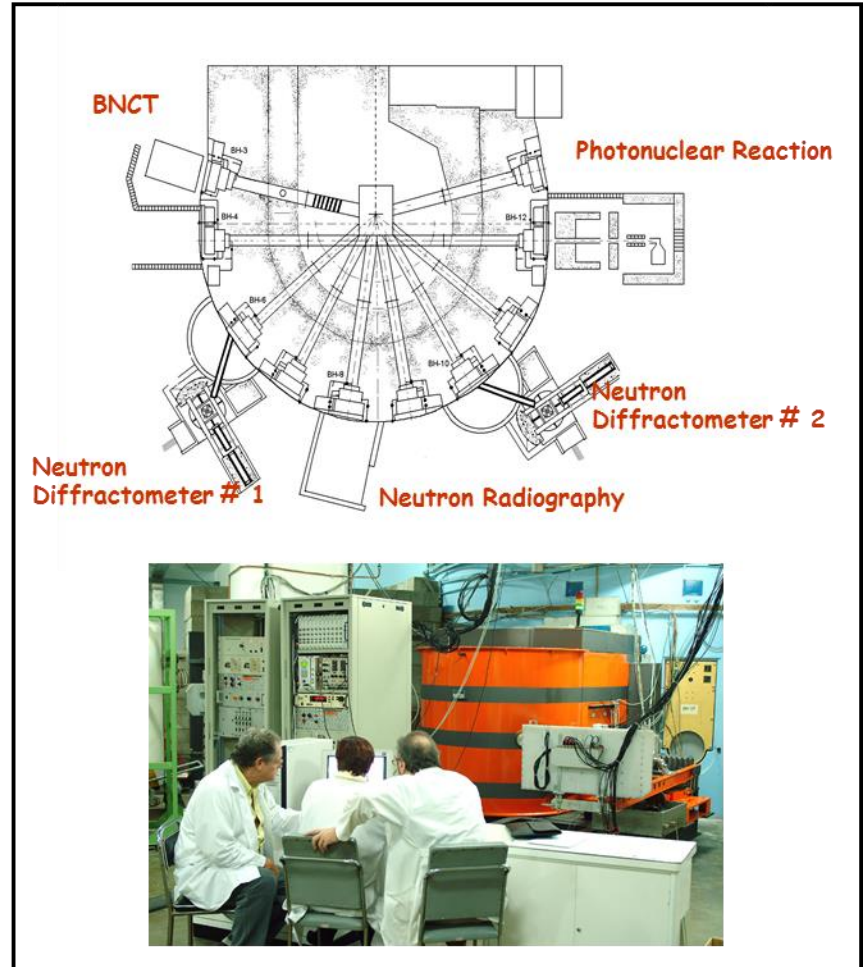
- Produção de radioisótopos
 - ^{131}I (ativação)
 - ^{99}Mo (ativação)
 - ^{153}Sm
 - ^{192}Ir
 - ^{198}Au
 - ^{82}Br
 - ^{41}Ar
- Análise por ativação de nêutrons
- Dopagem de silício



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

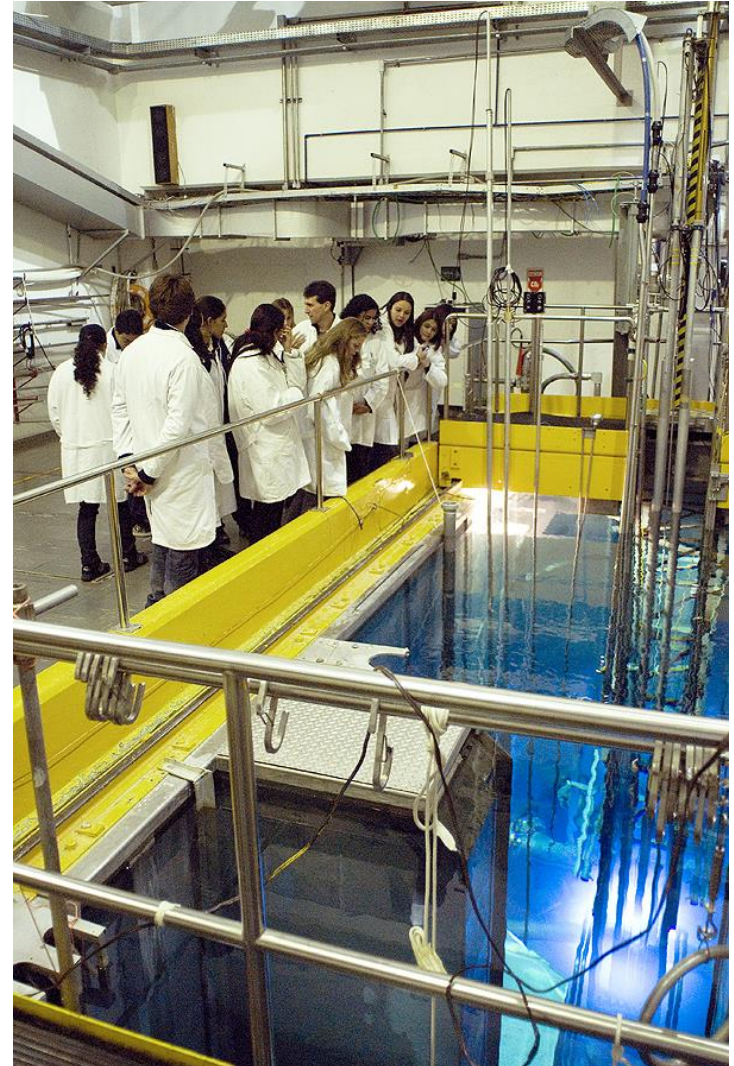
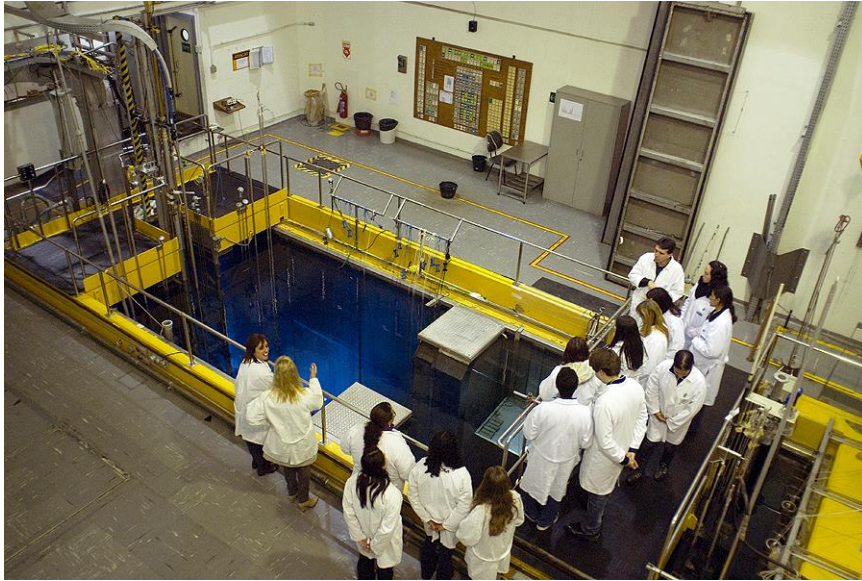
Reator IEA-R1

- Utilização de Feixe de Nêutrons
 - Difractometria
 - Pesquisa em BNCT
 - Neutronografia
 - Reações Fotonucleares
- Irradiação de Materiais
 - Irradiação de mini-placas combustíveis tipo MTR
 - Irradiação de mini-varetas combustíveis tipo PWR com dispositivos a alta pressão e temperatura
 - Teste de materiais estruturais com dispositivos especiais em alta temperatura
- Testes ND na Piscina do Reator
 - Inspeção dimensional
 - Inspeção visual
 - Gamma scanning
 - Sipping test
- Ensino e Treinamento.



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

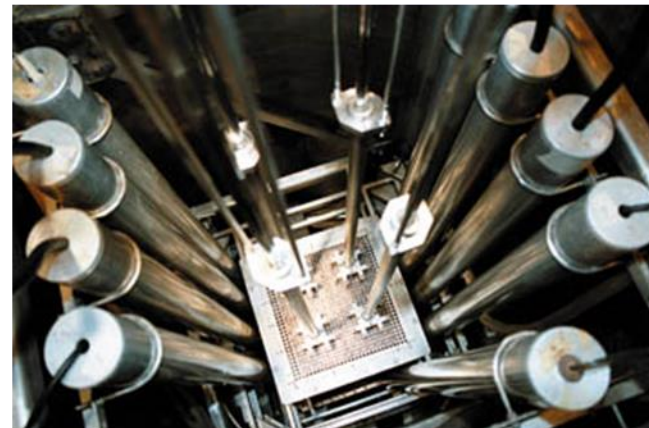
Reator IEA-R1



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

Reator IPEN/MB-01

- Projetado e construído com tecnologia nacional (IPEN e CTMSP)
- Instalado no IPEN, ficou crítico em 1988.
- Máxima potência de 100 W.
- Combustível de varetas de UO_2 com 4.3% de enriquecimento de urânio.
- Principal utilização:
 - Validação de metodologia de análise em física de reatores para núcleos de reatores tipo PWR.
 - Ensino e treinamento em física de reatores



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

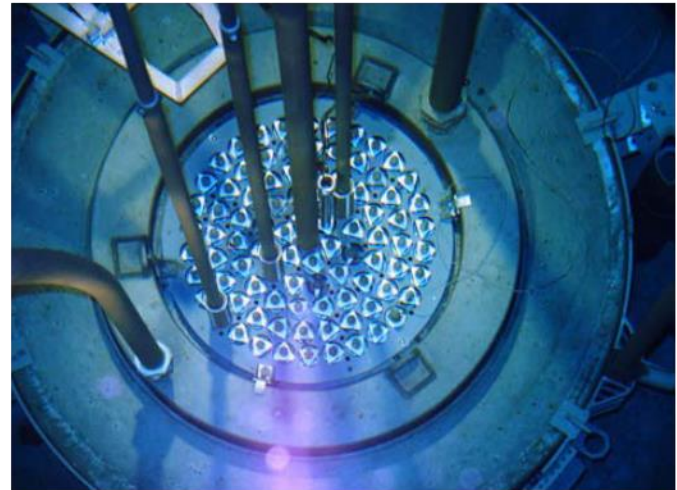
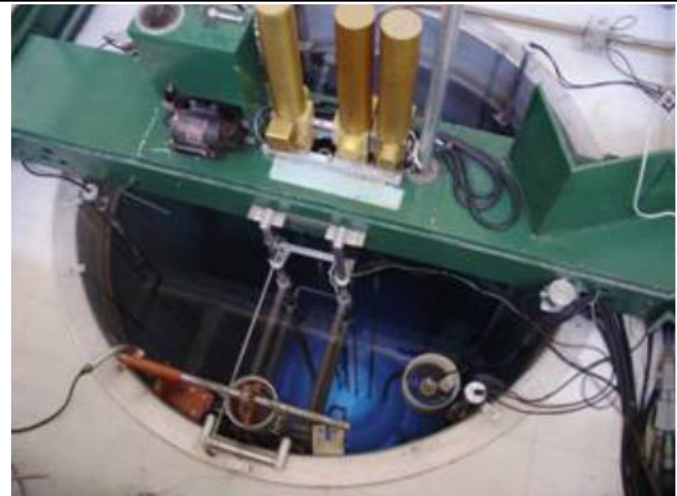
Reator IPEN/MB-01



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

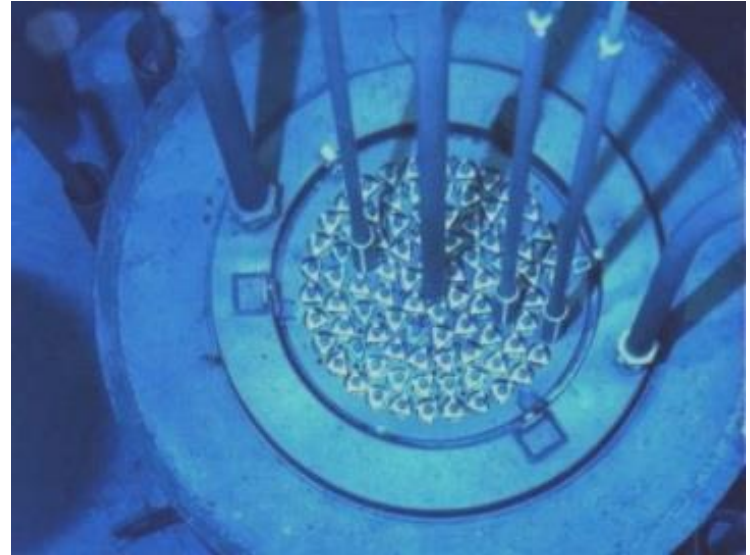
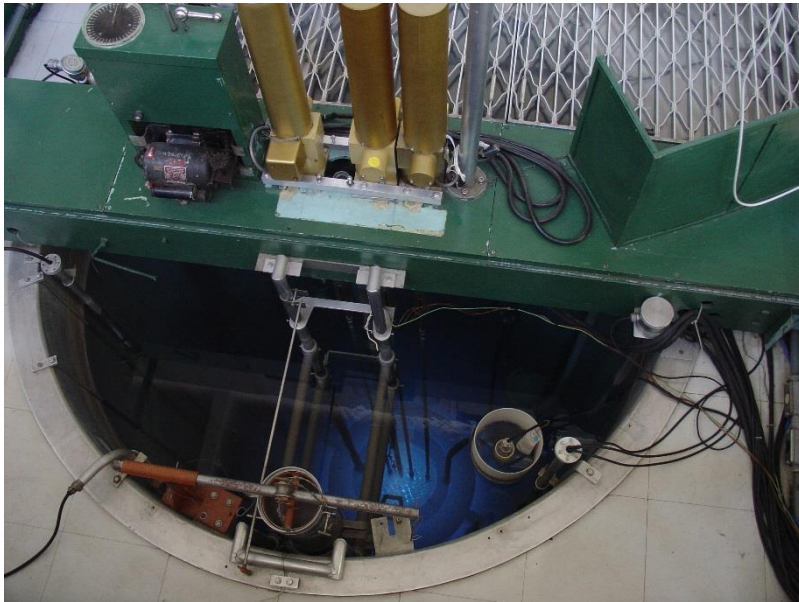
Reator IPR-R1

- Reator tipo TRIGA MarkI, produzido pela General Atomic Company, USA.
- Instalado em 1960 no antigo Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), atual CDTN – Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear da CNEN em Belo Horizonte, Minas Gerais
- Máxima potência de 100 kW para operação contínua
- Combustível tipo vareta de U-Zr-H com 20% de enriquecimento de urânio
- Principal utilização:
 - Produção de alguns radioisótopos para aplicação na indústria, medicina, agricultura, e aplicações tecnológicas
 - Ensino e treinamento em física de reatores
 - Análise por ativação com nêutrons
 - O reator é bastante utilizado no treinamento de operadores das centrais nucleares Angra I e Angra II



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

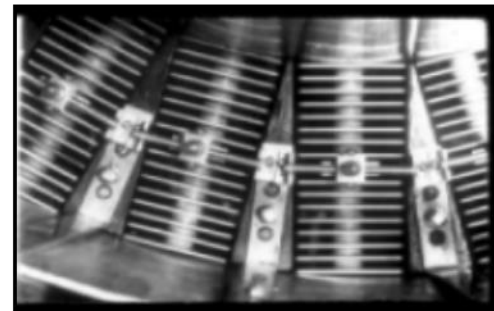
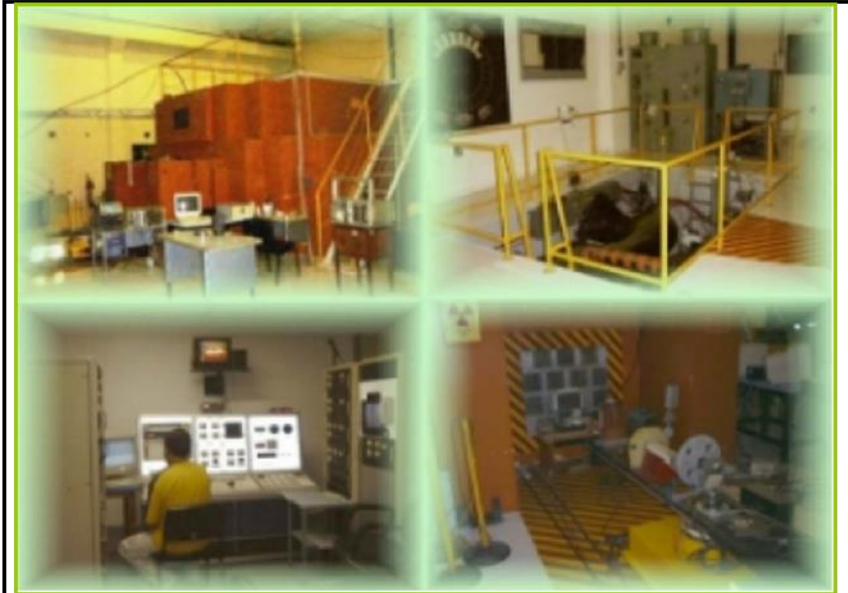
Reator IPR-R1



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

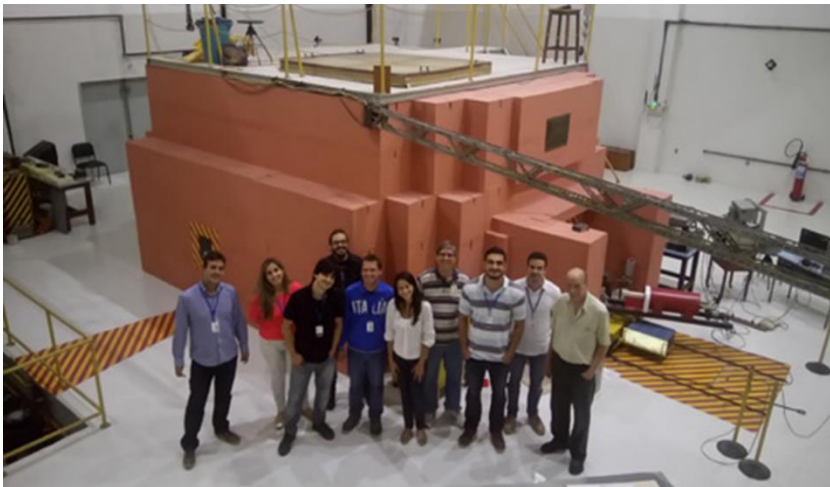
Reator ARGONAUTA

- Reator tipo Argonaut (Argonne National Laboratory Nuclear Assembly for University Training)
- Instalado em 1965 no IEN - Instituto de Energia Nuclear da CNEN no campus da UFRJ
- Potência máxima de 500 W
- Combustível tipo dispersão de U_3O_8 -Al com 20% de enriquecimento de urânio
- Principal utilização
 - Ensino e treinamento em física de reatores
 - Neutronografia
 - Análise por ativação com nêutrons



Reatores Nucleares de Pesquisa no Brasil

Reator ARGONAUTA



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.

Objetivos do Empreendimento RMB

APLICAÇÕES SOCIAIS

-  **Autonomia nacional na produção de radioisótopos para aplicações na saúde, indústria, agricultura e meio ambiente**
-  **Ênfase na produção do radioisótopo Mo-99 para assegurar o abastecimento do radiofármaco tecnécio-99m**
-  **Ampliação da medicina nuclear no país em benefício da sociedade**



- Em torno de 2 milhões de procedimentos por ano
- São atendidas mais de 400 clínicas semanalmente
- Os geradores são produzidos com ^{99}Mo importado
- Custo de importação:
 - > US\$ 12 milhões por ano para ^{99}Mo
 - > US\$ 3 milhões por ano com importação de outros radioisótopos utilizados na Saúde

RMB é fundamental para garantir segurança no suprimento de tecnécio-99m

Radioisótopos para Radiofármacos Injetáveis

- ❖ ^{99}Mo , ^{131}I , ^{51}Cr , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{166}Ho , ^{90}Y , ^{188}W , ^{32}P
- ❖ ^{99}Mo obtido por irradiação de alvos LEU e processados >1000 Ci/semana - (hoje são importados 450 Ci/semana pelo IPEN)

Radioisótopos para Braquiterapia

- ❖ ^{125}I , ^{192}Ir

Radioisótopos para Indústria

- ❖ ^{192}Ir , ^{60}Co

Traçadores

- ❖ ^{203}Hg , ^{131}I , ^{82}Br

Objetivos do Empreendimento RMB

Estratégicos e Industriais

➡ Criação de capacidade nacional para testar e qualificar:

- combustíveis nucleares para reatores de potência
- combustíveis nucleares para reatores de propulsão naval;
- novos combustíveis para reatores de pesquisa;
- materiais para serem utilizados em reatores nucleares

RMB é fundamental para o desenvolvimento nacional de combustíveis nucleares e materiais para uso em reatores

Objetivos do Empreendimento RMB Estratégicos e Industriais



Objetivos do Empreendimento RMB

Desenvolvimento Científico e Tecnológico

- ➔ **Ampliação da capacidade nacional existente em pesquisa e em aplicações de técnicas nucleares**
- ➔ **Laboratório de Análise por Ativação disponível à comunidade científica nacional**
- ➔ **Criação de um Laboratório Nacional de pesquisas com feixes de nêutrons para complementar as pesquisas feitas no Laboratório Nacional de Luz Sincrotron – LNLS/CNPEM**

RMB amplia a capacidade nacional em ciência, tecnologia e inovação.

REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



RMB um Laboratório Nacional para Utilização de Feixe de Nêutrons em complemento ao LNLS (CNPEM)

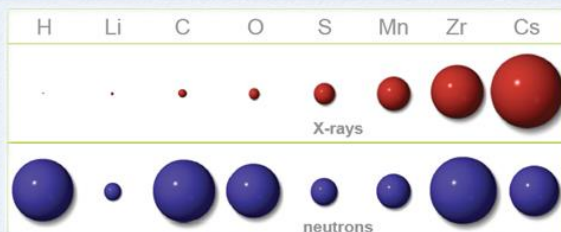
LNLS- Laboratório Nacional de Luz Sincrotron (em operação)

Sirius–Nova fonte de luz sincrotron brasileira (em projeto)

X-RAYS & NEUTRONS CROSS SECTIONS

X-ray and neutron cross sections

As compared with x-ray scattering cross sections, which vary as Z^2 , neutron scattering cross sections show little systematic variation with atomic number.



RESPONSÁVEL PELO EMPREENDIMENTO

Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação

Empreendedor

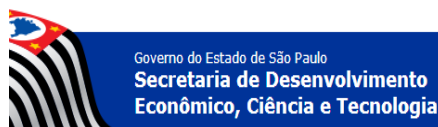
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

Órgão
Responsável

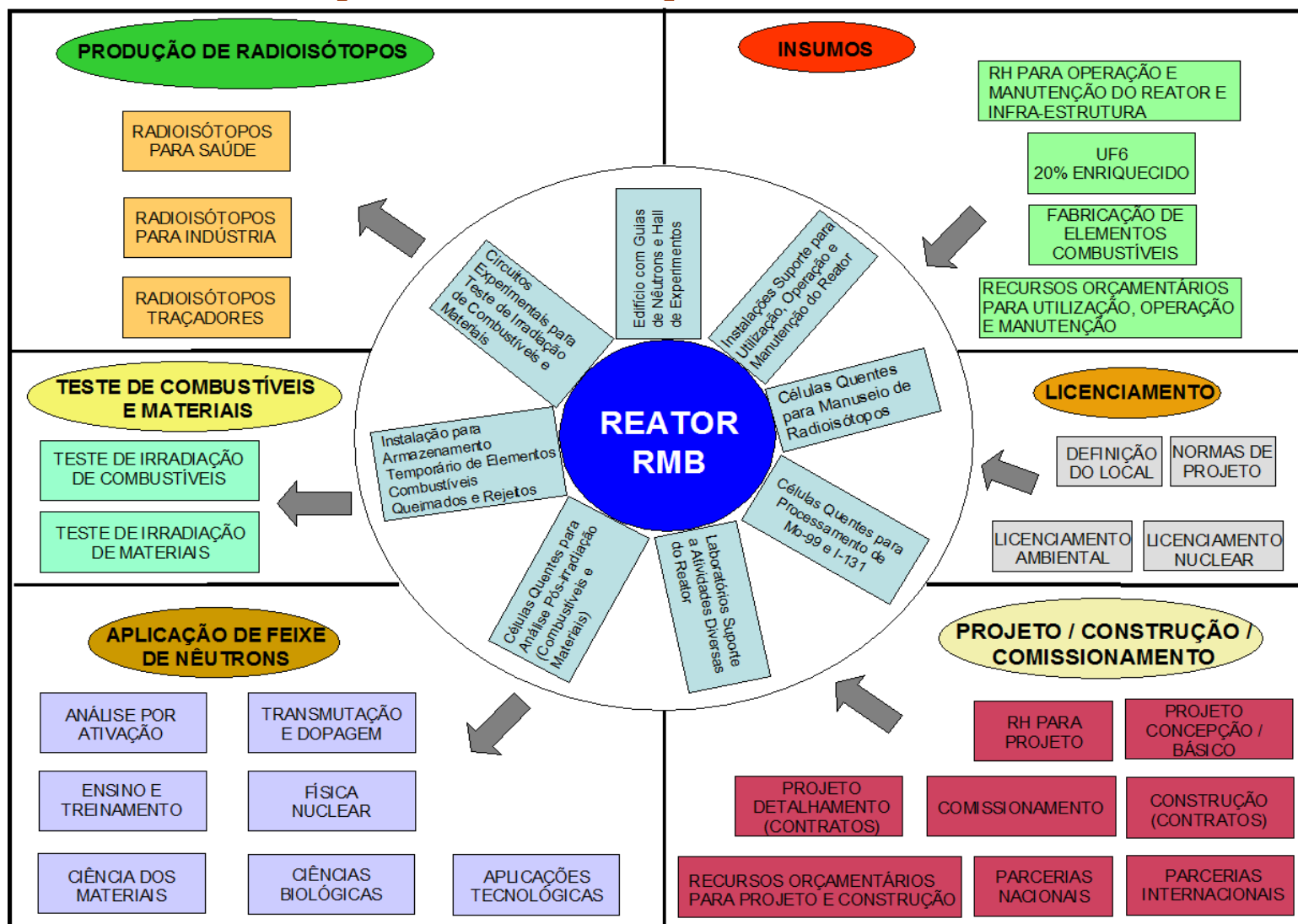
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento - DPD



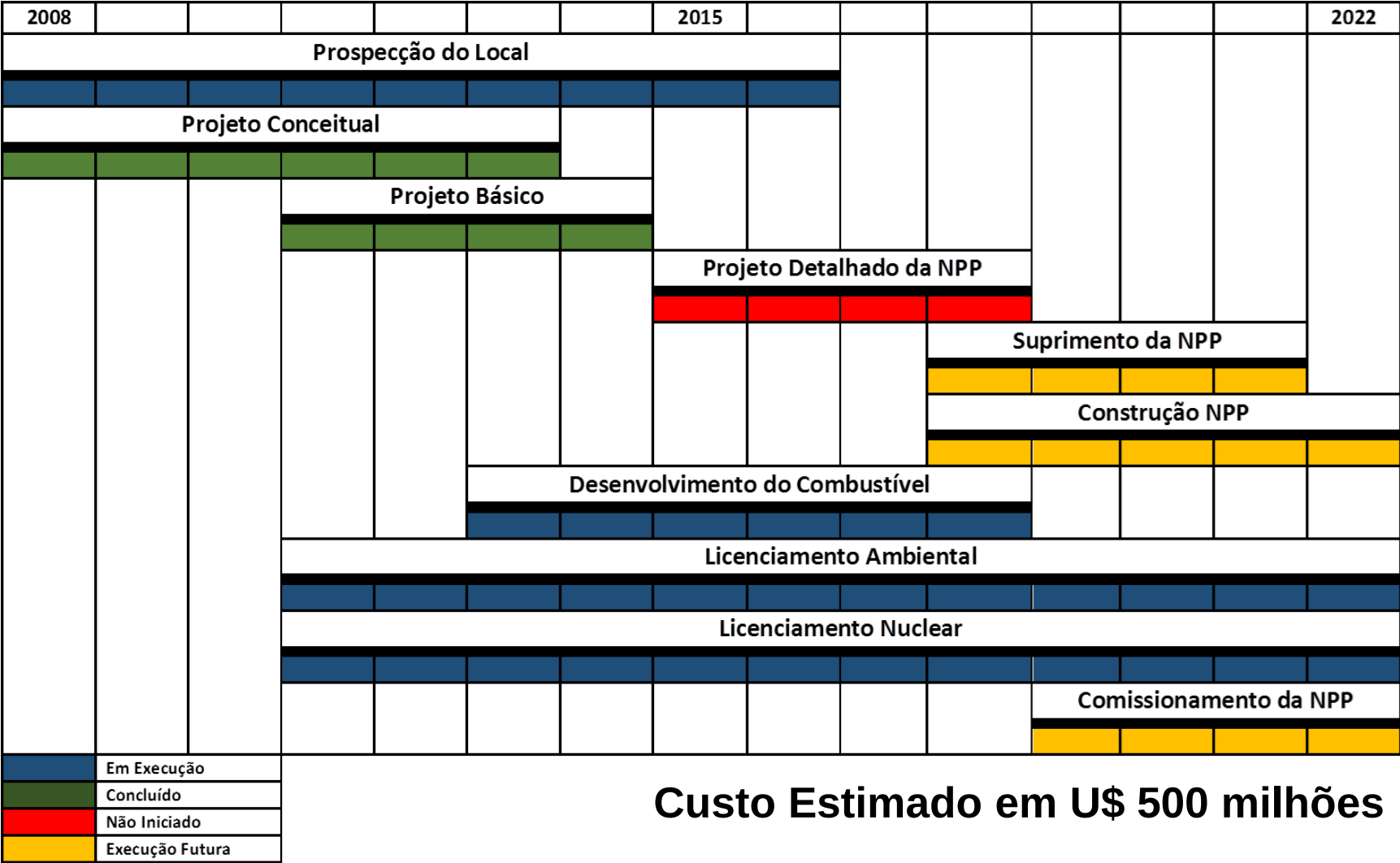
APOIO



Escopo do Empreendimento

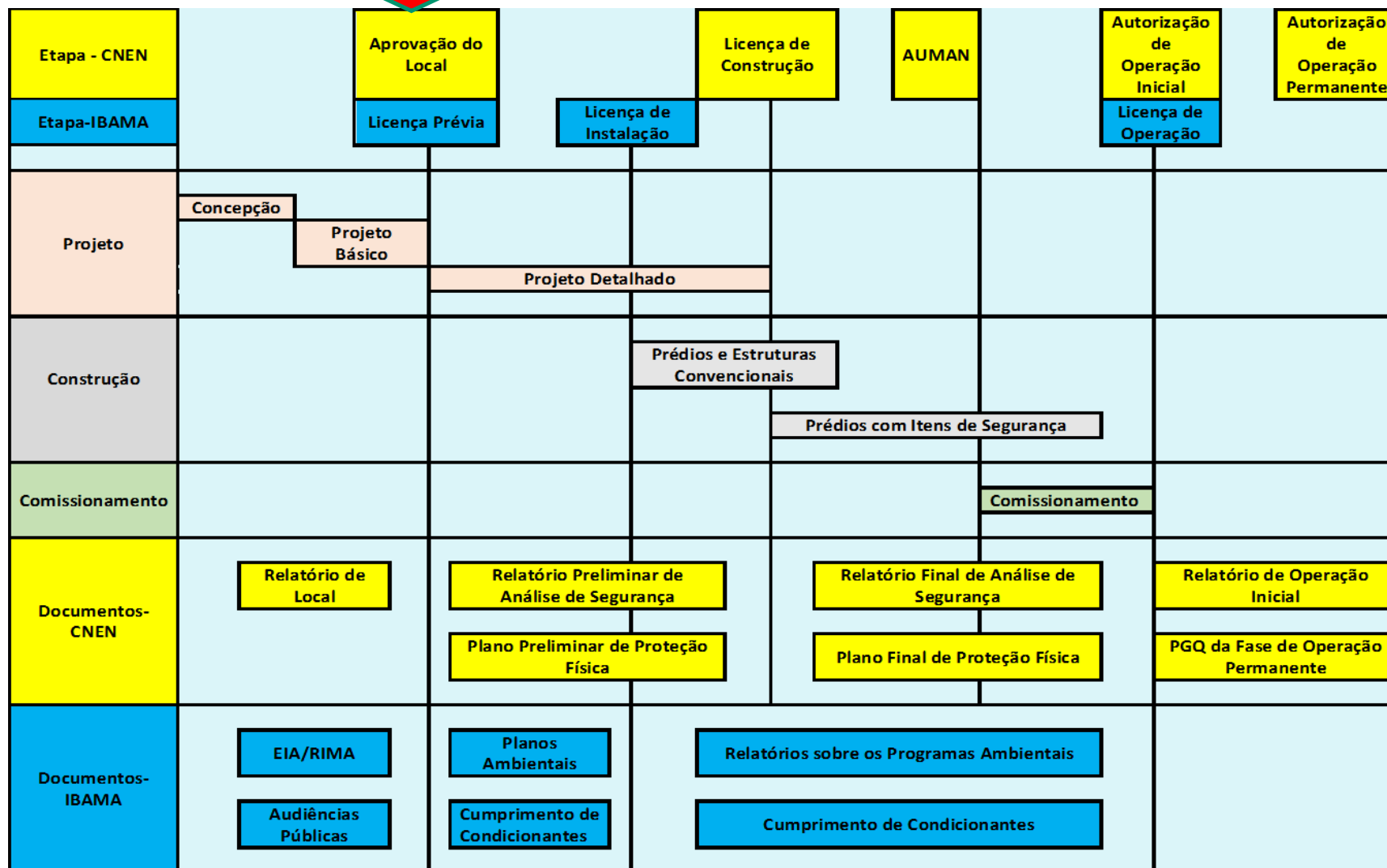


Cronograma



Custo Estimado em U\$ 500 milhões

Situação Atual Etapas do Licenciamento



LOCALIZAÇÃO DO RMB



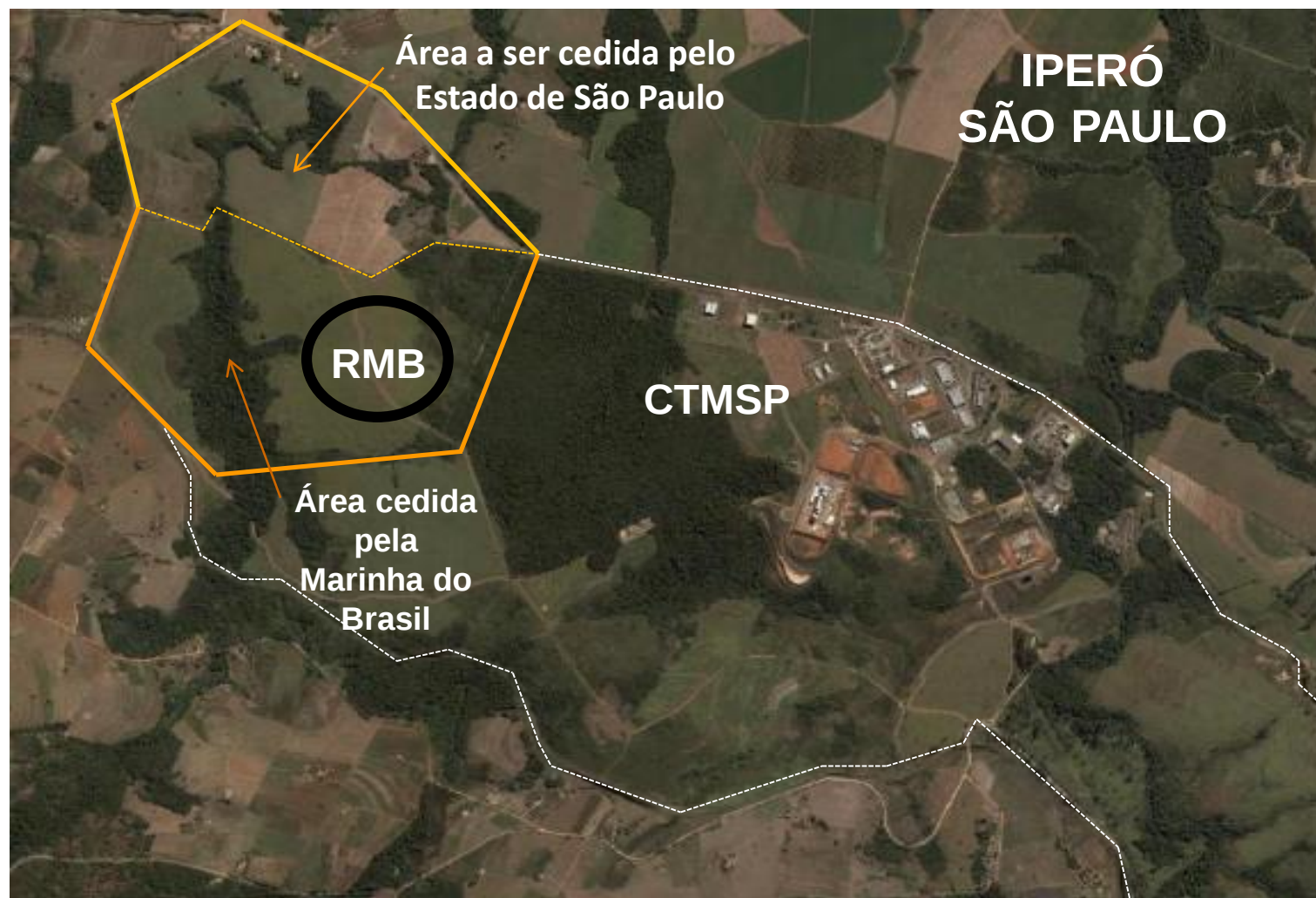
Distâncias: (Rota / Linear)

— Iperó / São Paulo (140 Km / 109 Km)

— Iperó / Sorocaba (50 Km / 39 Km)

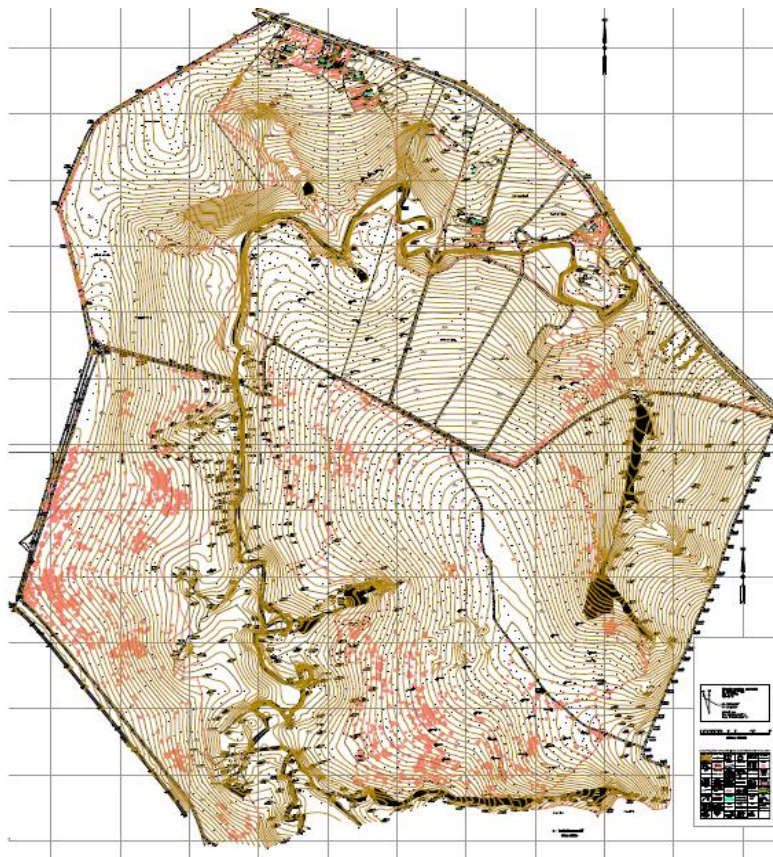


LOCALIZAÇÃO DO RMB



Prospecção do Local

Levantamento Topográfico



Sondagem



Torre Meteorológica



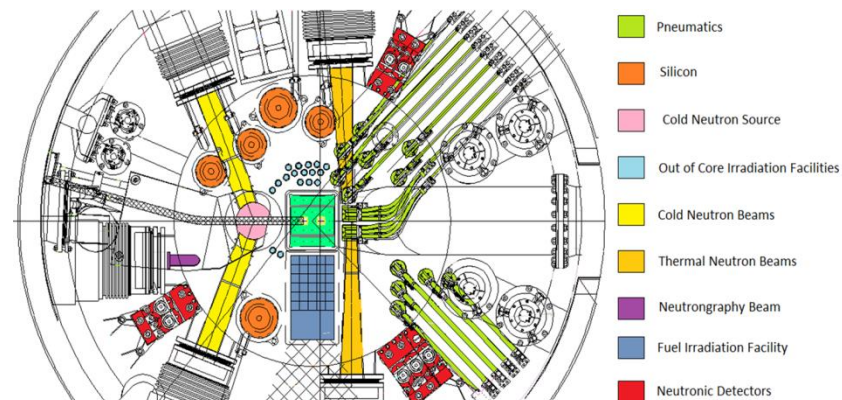
REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação

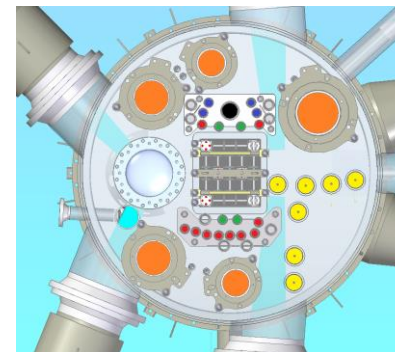
RMB

Brasil
(em projeto)



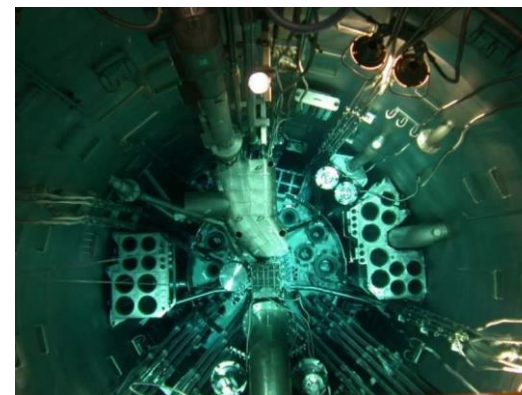
RA-10

Argentina
(em projeto)



OPAL

Austrália
(em operação)



REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB

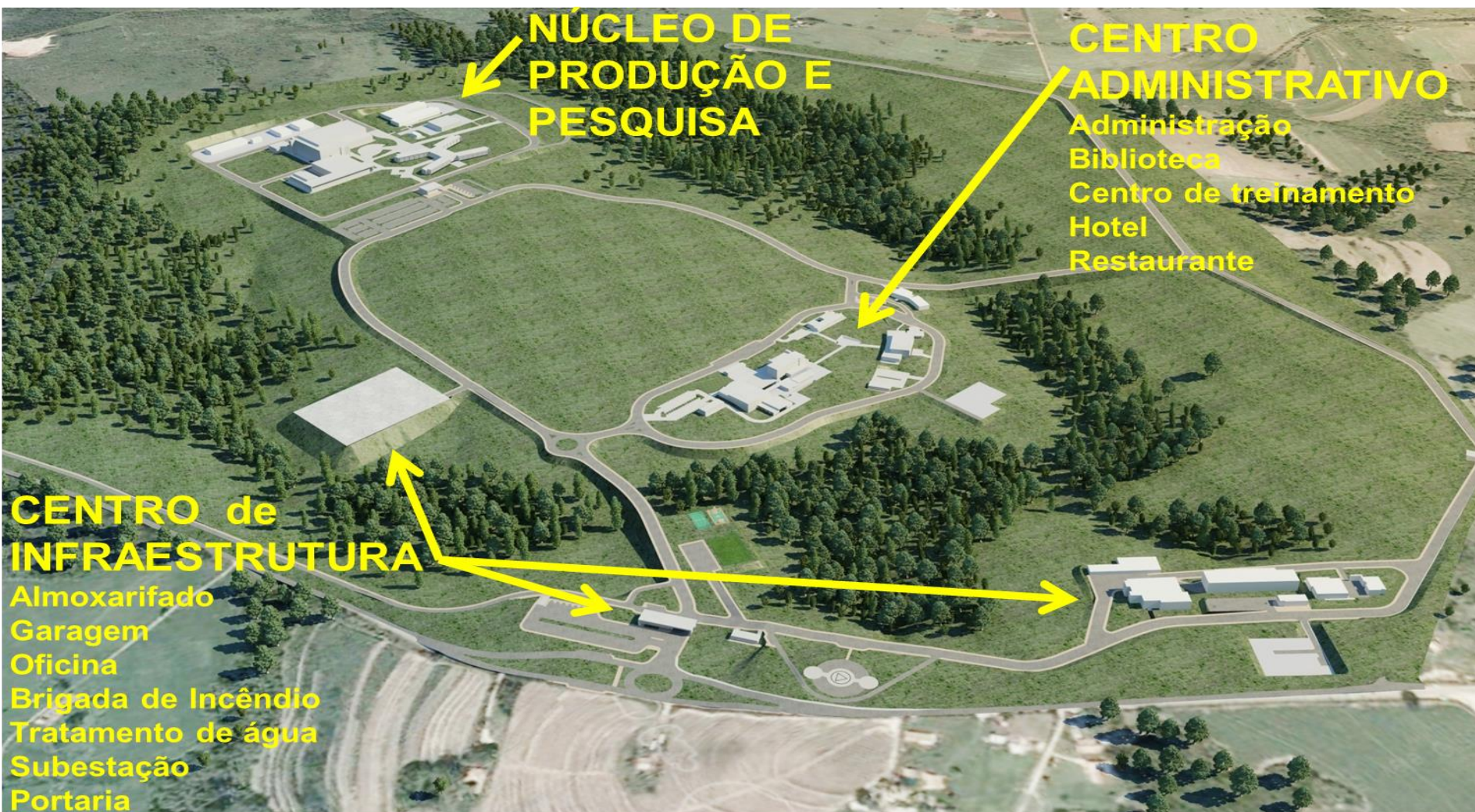


Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação

	RMB	RA-10	OPAL
Potência	30 MW	30 MW	20 MW
Material Refletor	D ₂ O & Be	D ₂ O	D ₂ O
Vazão de Água	3100 m ³ /h	3200 m ³ /h	1900 m ³ /h
Arranjo do Núcleo	5 x 5 (23 EC)	5 x 5 (19 EC)	4 x 4 (16 EC)
Primeiro Sistema de Desligamento	6 placas de Hf	6 placas de Hf	4 Placas de Hf
Segundo Sistema de Desligamento	Esvaziamento do D ₂ O	Esvaziamento do D ₂ O	Esvaziamento do D ₂ O
Posições de Irradiação In-core	2 Posições	6 Posições	Nenhuma
Facilidades Out-of- Core	OPAL + Loop	OPAL + Loop	Referência
Diâmetro do Tanque do Reator	5100 mm	4500 mm	4500 mm

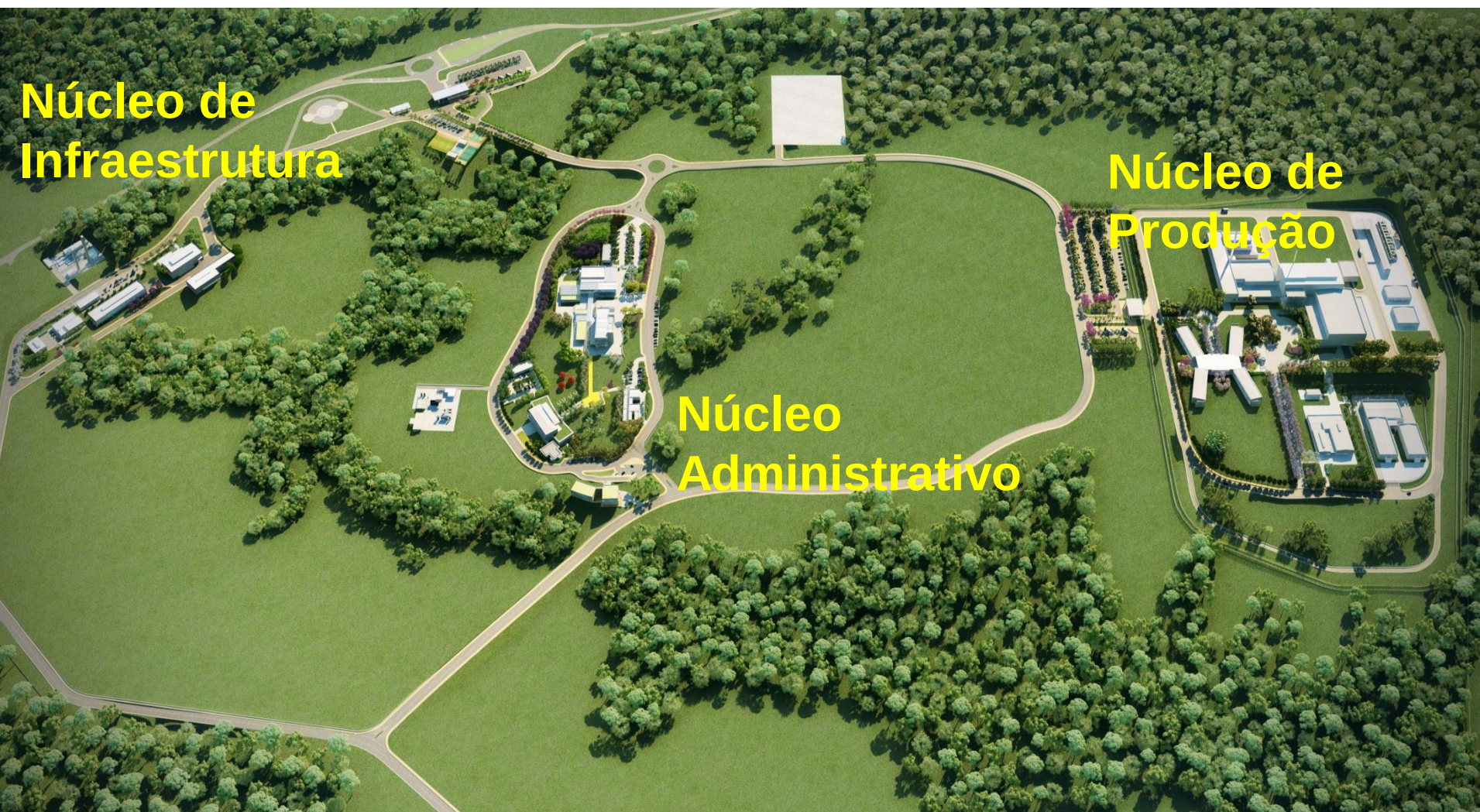
INSTALAÇÕES DO RMB

Plano Diretor



INSTALAÇÕES DO RMB

Plano Diretor



INSTALAÇÕES DO RMB

Portaria RMB



INSTALAÇÕES DO RMB

Centro de Infraestrutura

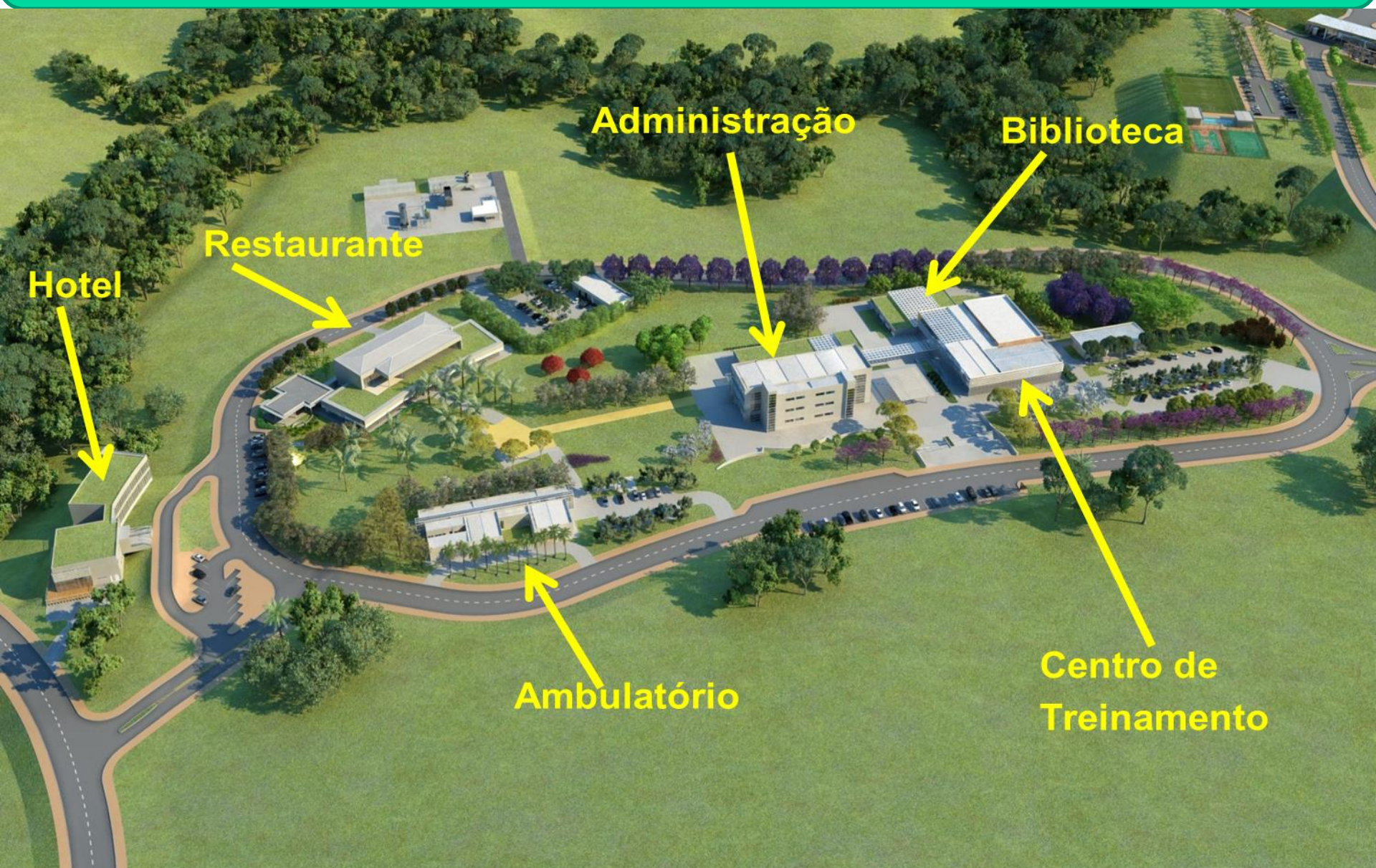


REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO – RMB

Instalações Administrativas



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação

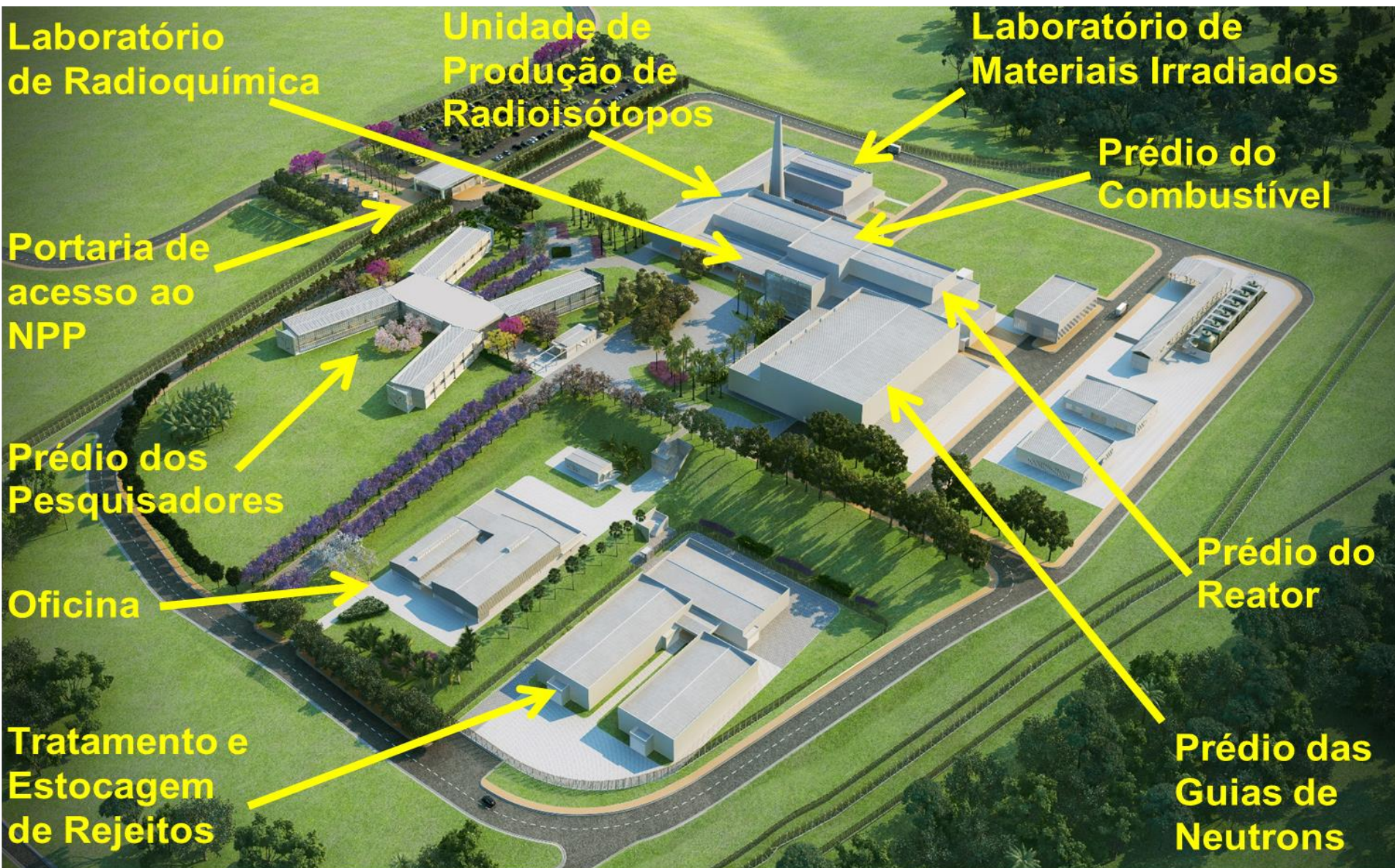


REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO – RMB

Núcleo de Produção e Pesquisa



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



INSTALAÇÕES DO RMB

Entrada do NPP



INSTALAÇÕES DO RMB

Prédio do Reator e Laboratórios



INSTALAÇÕES DO RMB

Prédio dos Pesquisadores

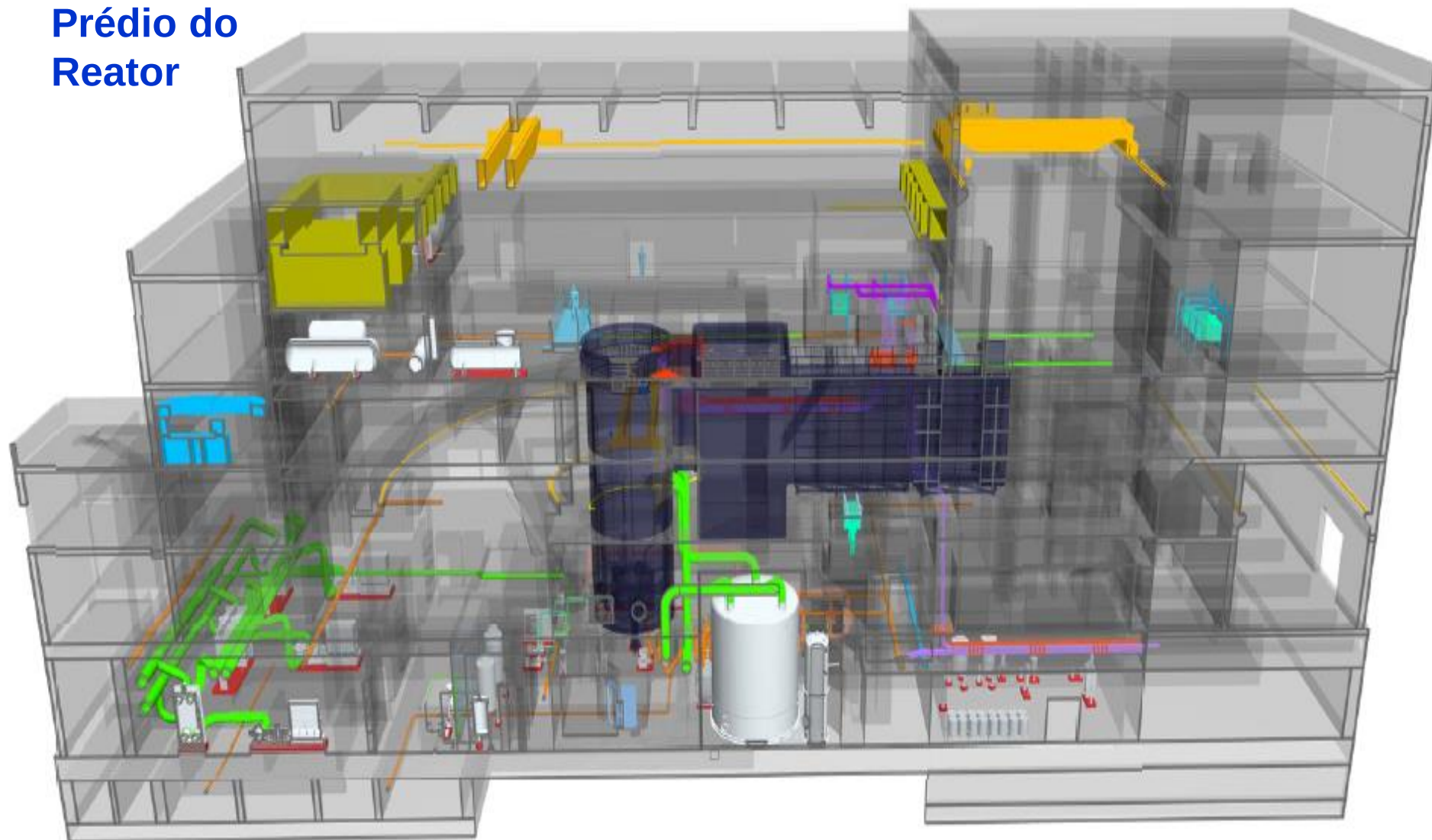


REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB

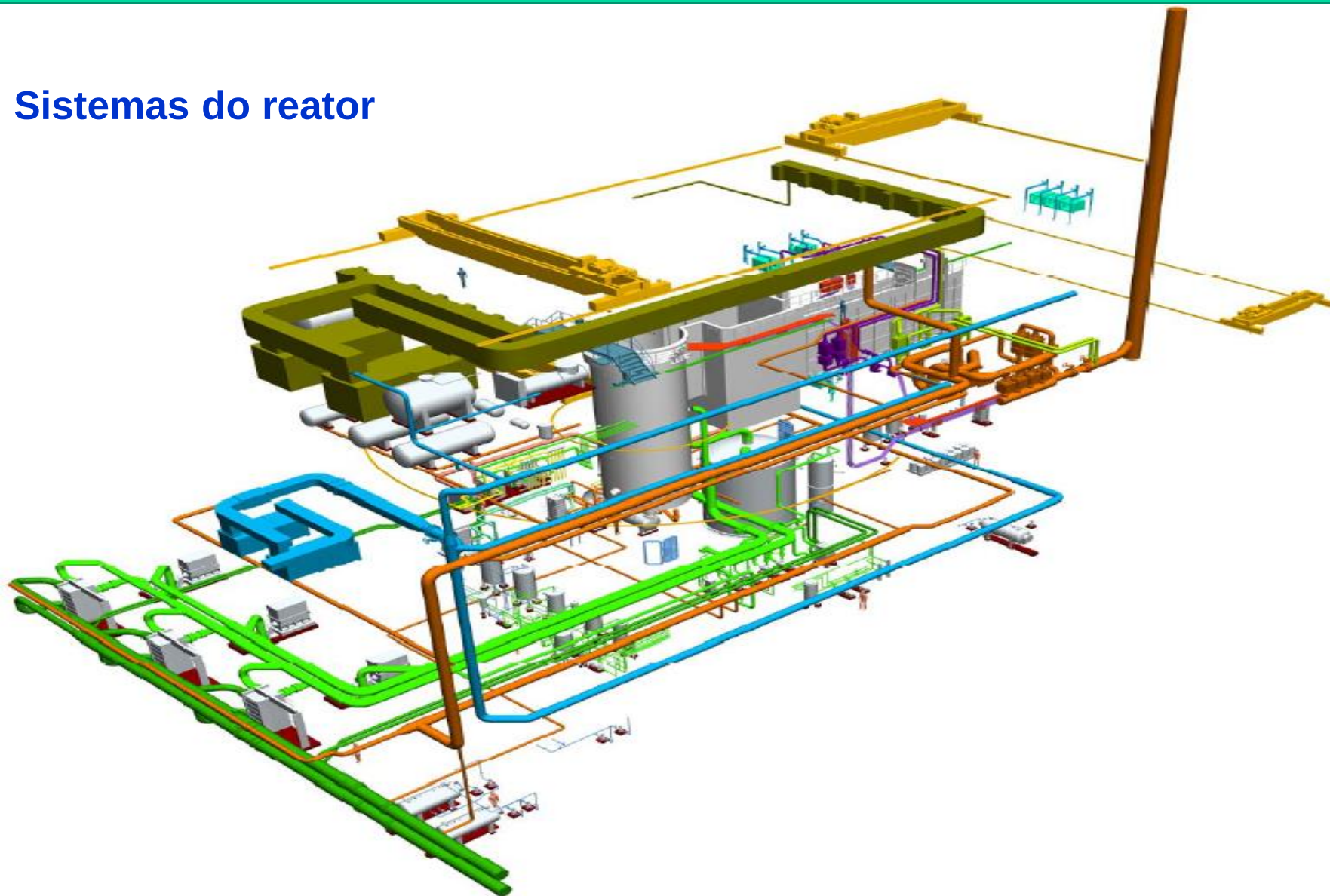


Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação

Prédio do Reator



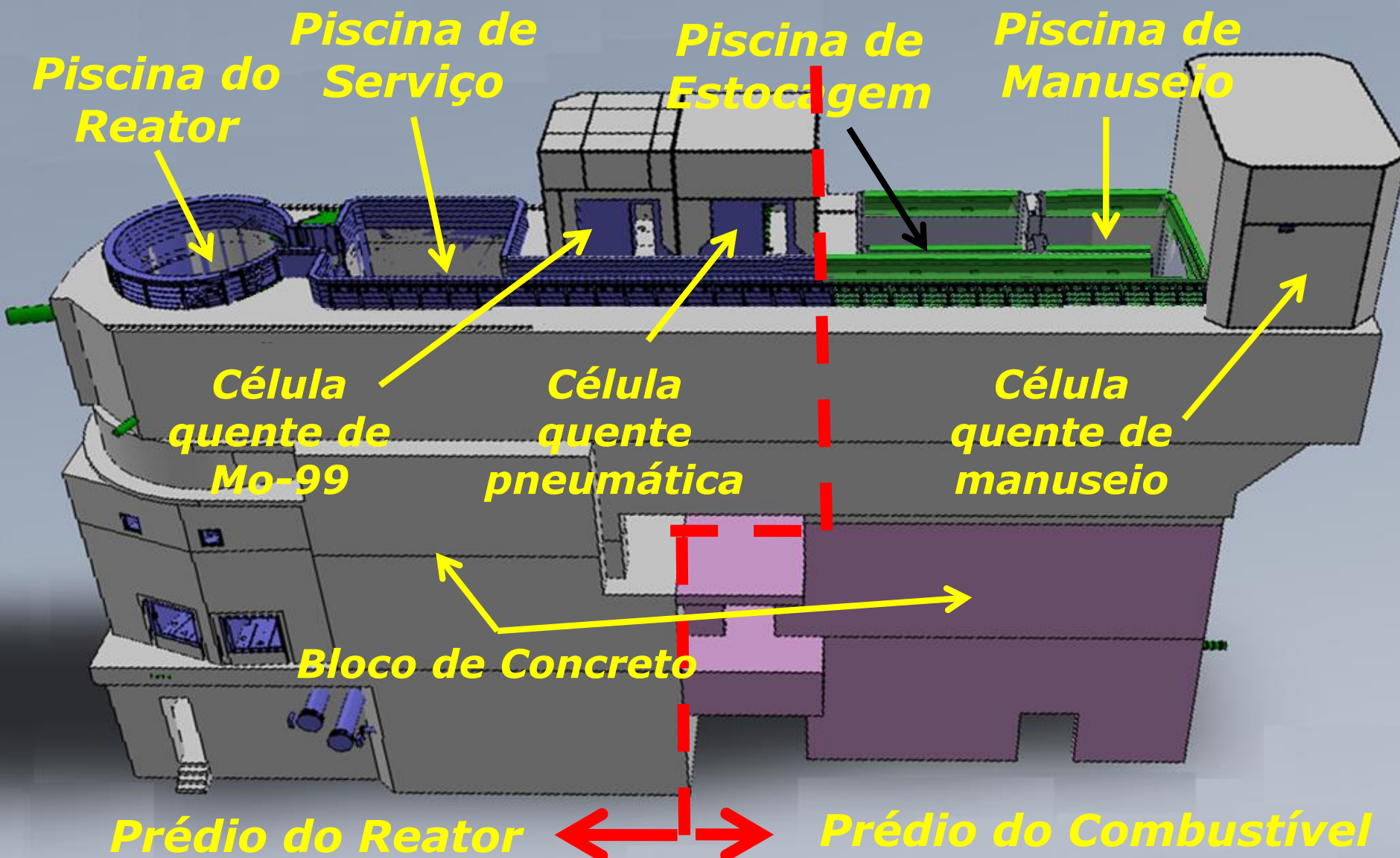
Sistemas do reator



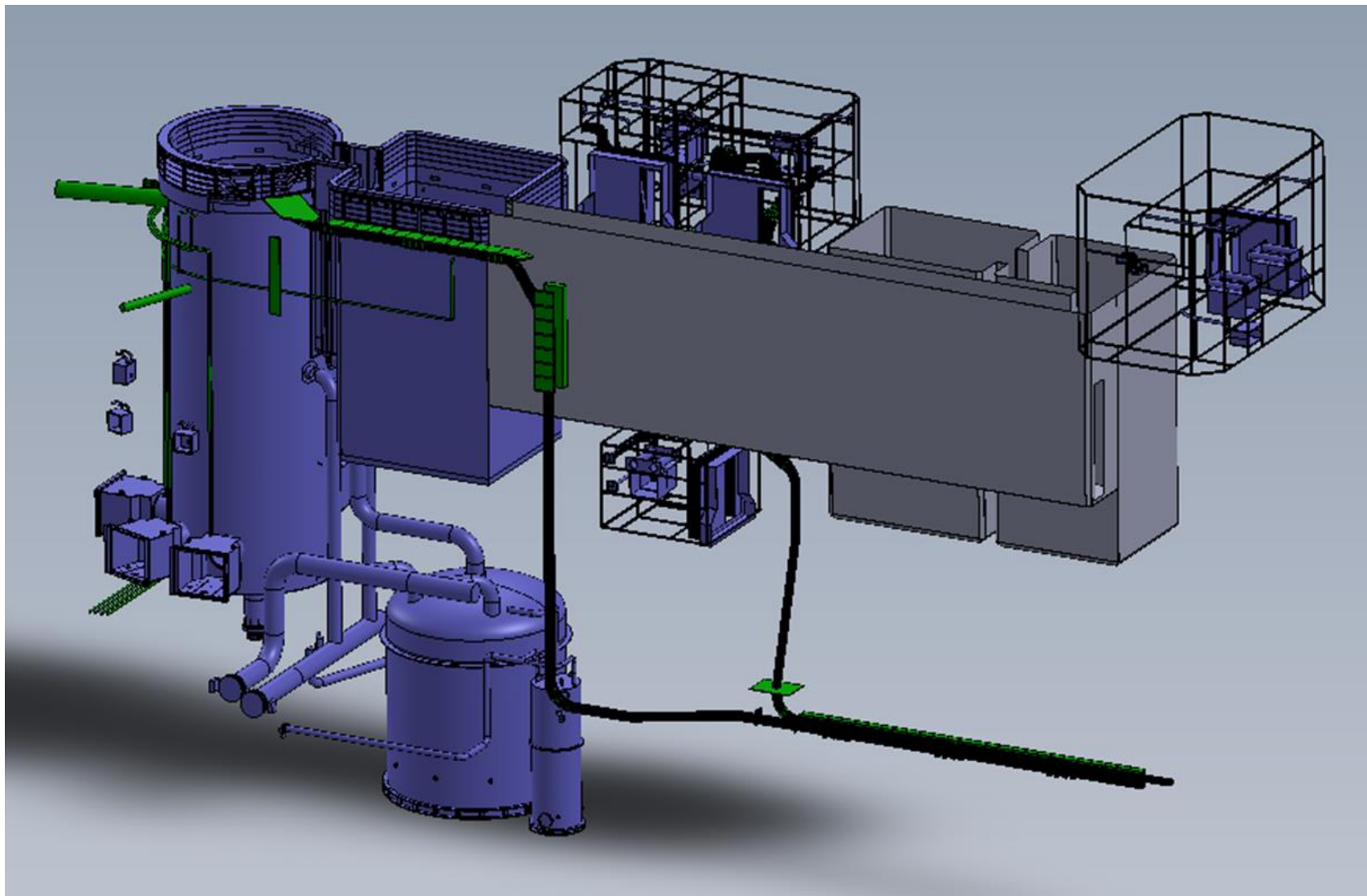
REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB



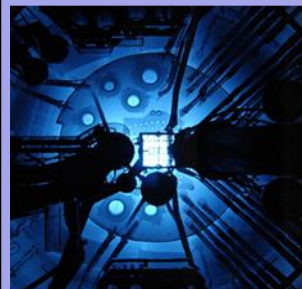
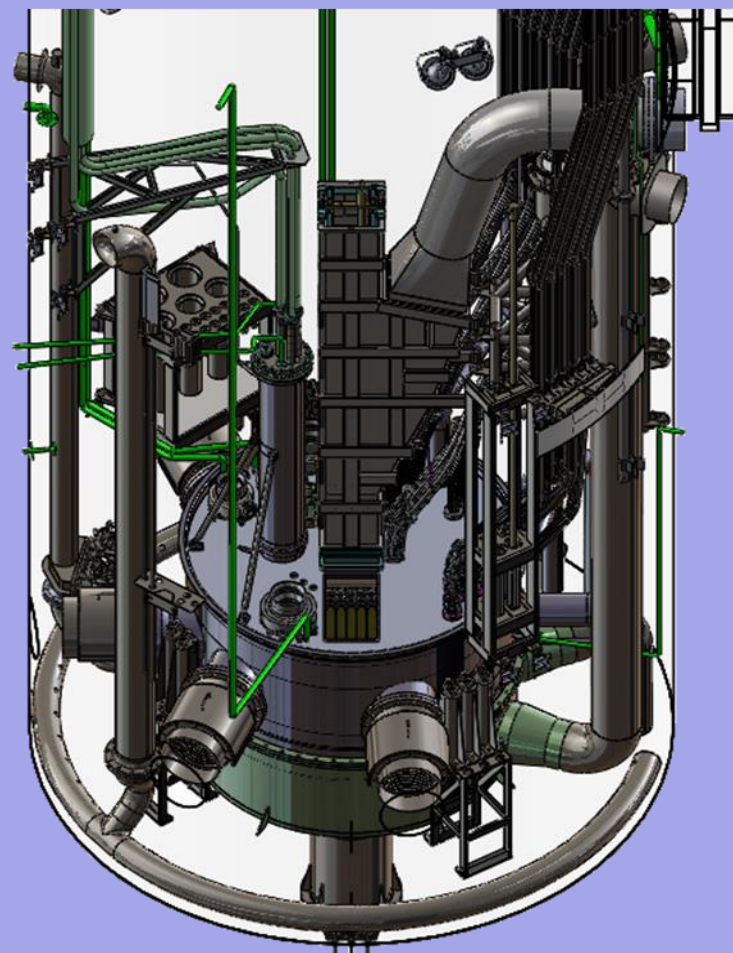
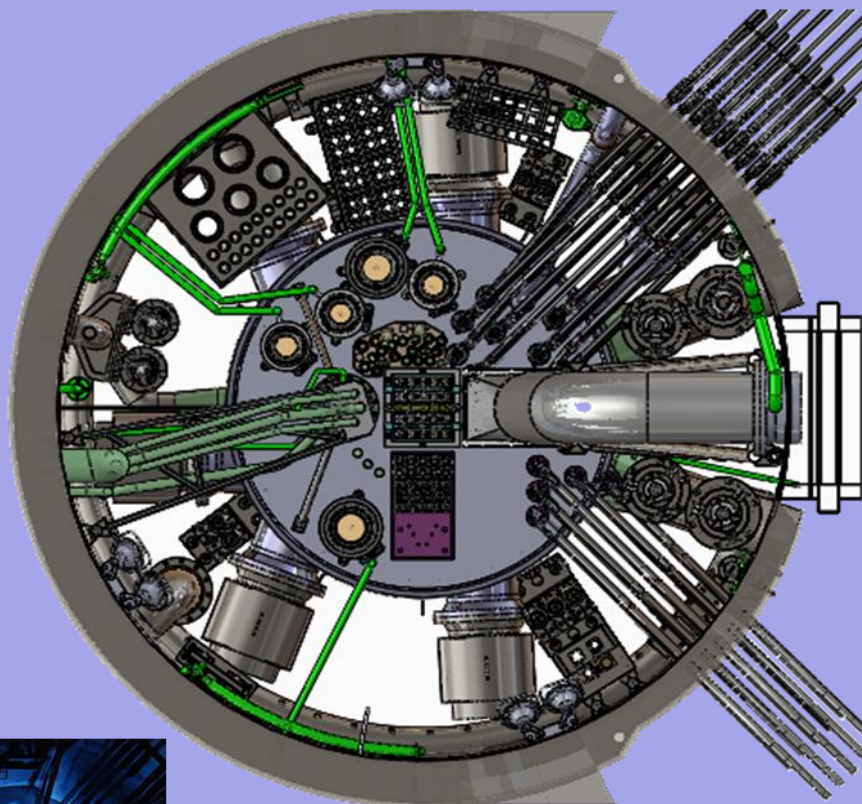
Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



Estruturas metálicas do reator



Leiaute Reator



REATOR MULTIPROPÓSITO BRASILEIRO - RMB



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação

20 Posições para
irradiação tipo “bulk”

14 Posições para
irradiação tipo
“pneumática”

Feixe para neutrongrafia

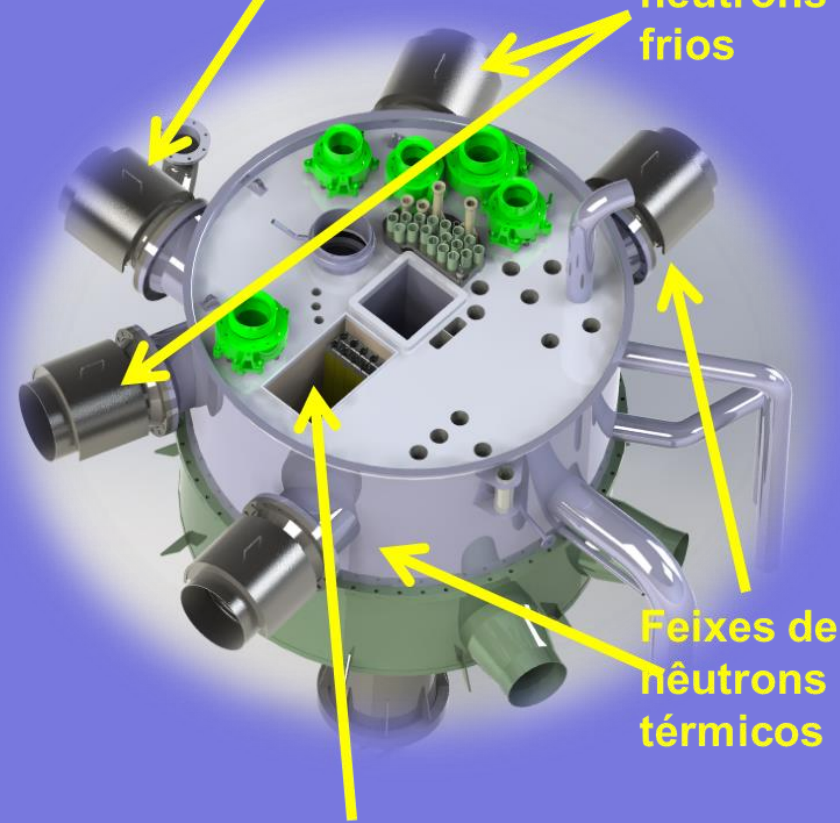
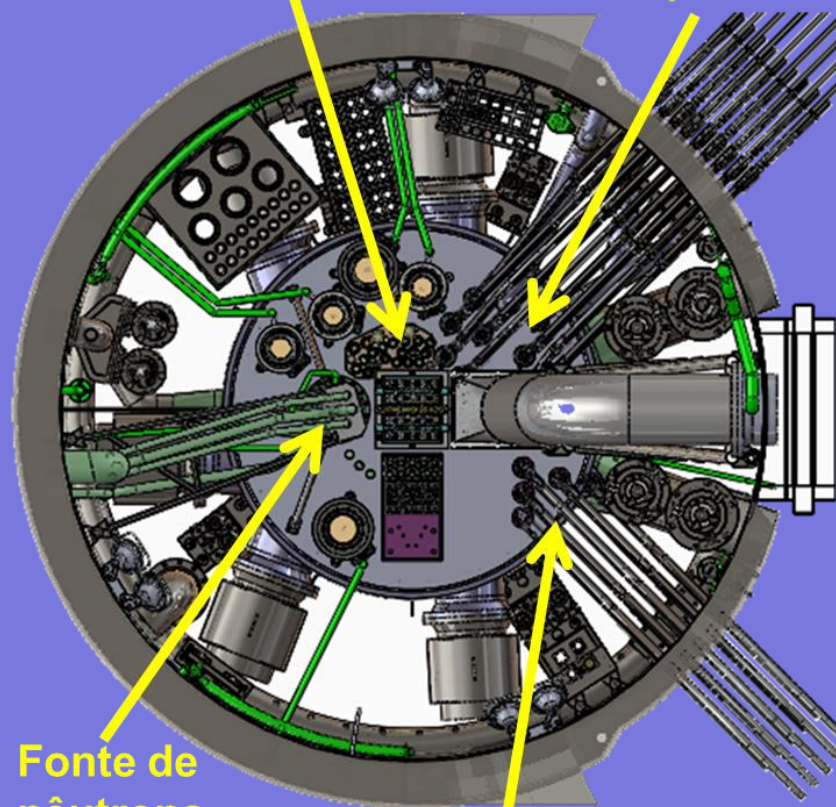
Feixes de
nêutrons
frios

Fonte de
nêutrons
frios

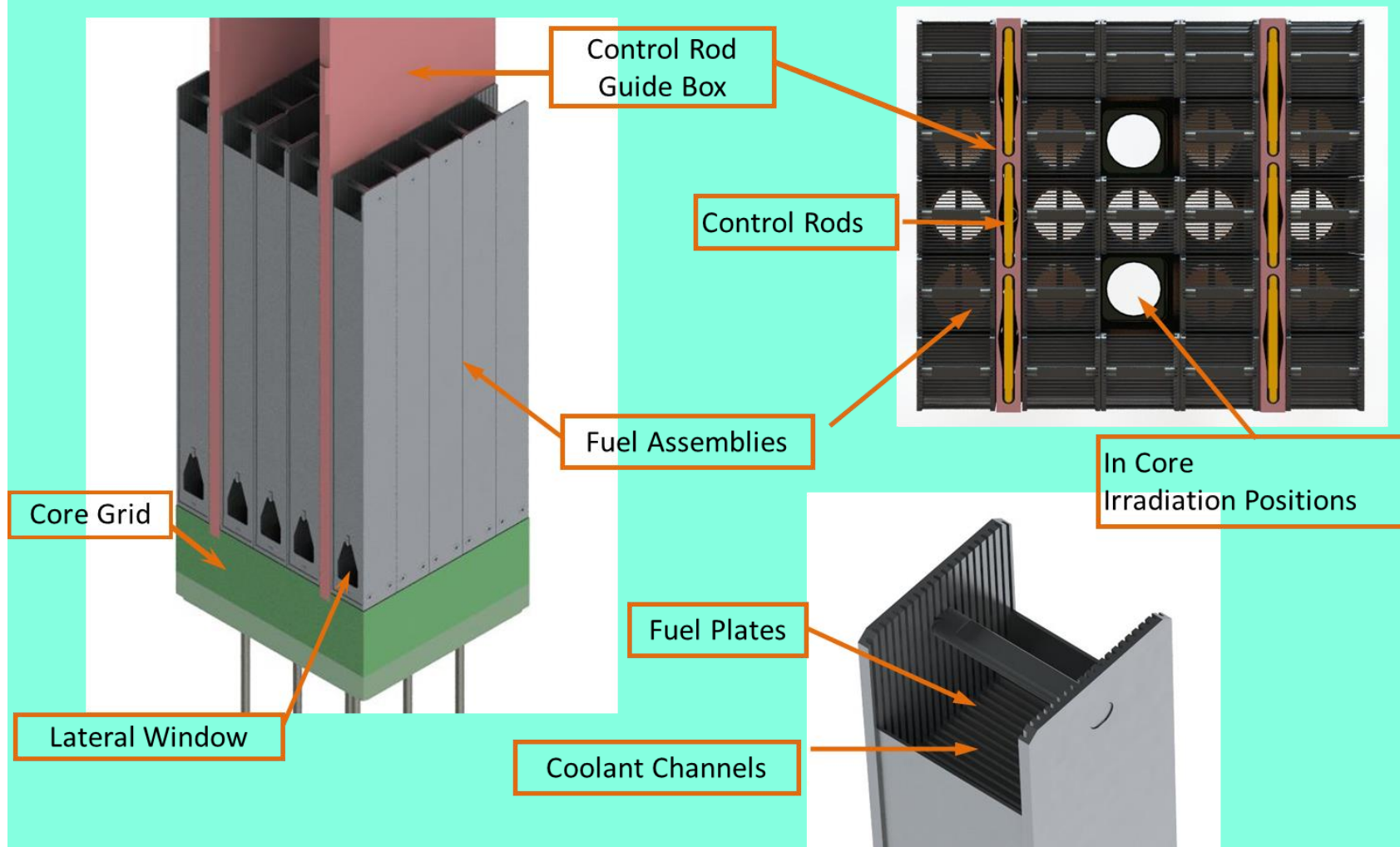
5 posições para
análise por ativação

Feixes de
nêutrons
térmicos

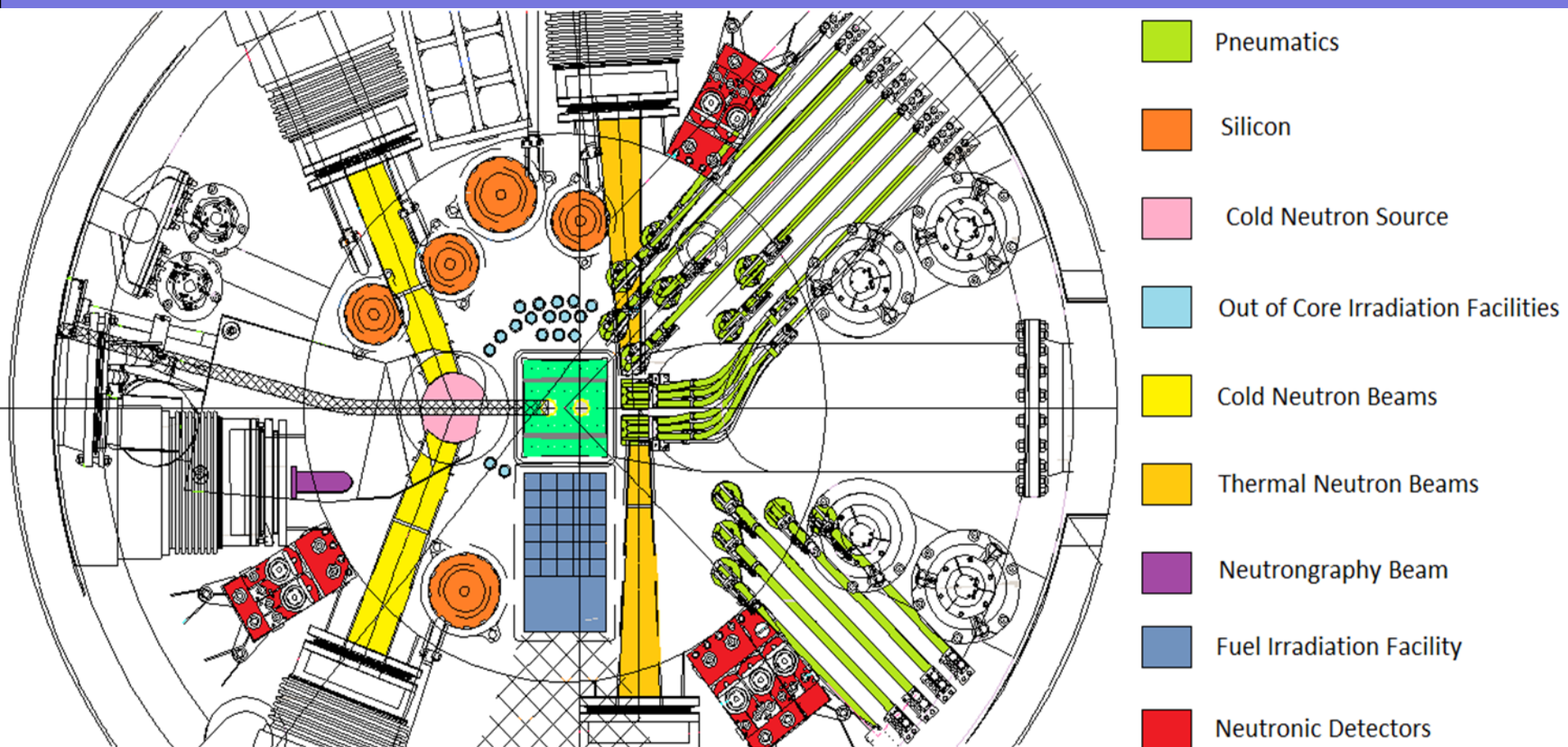
Cavidade para teste
de combustíveis



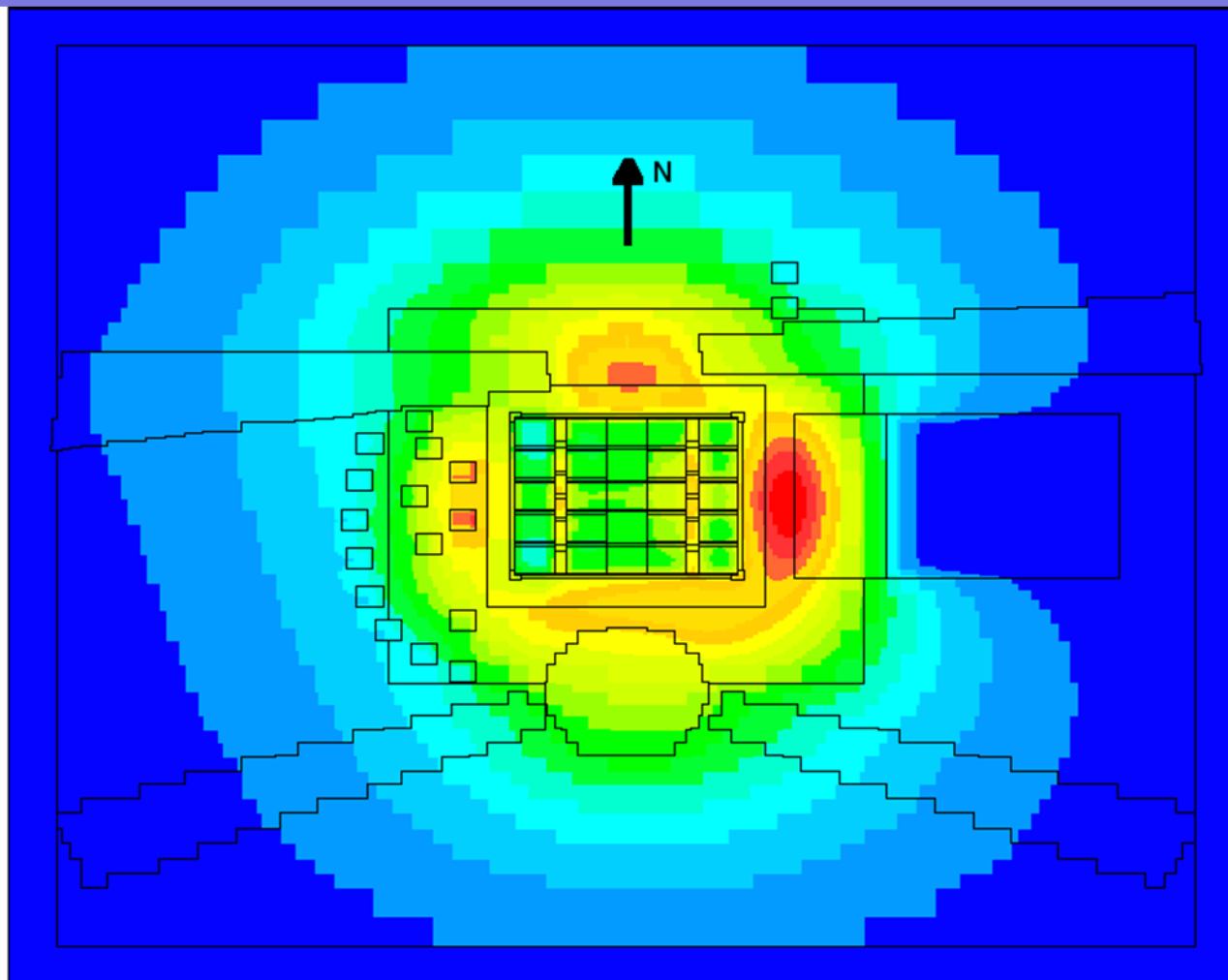
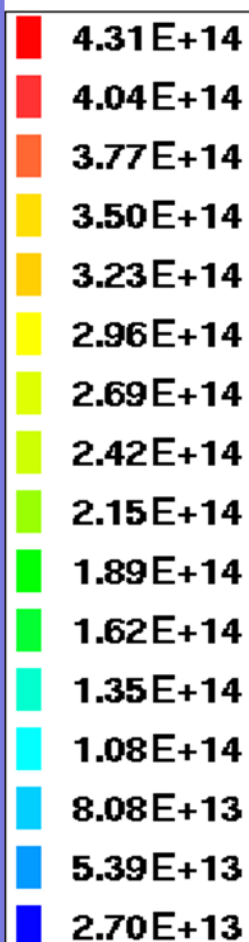
Core and Fuel Assemblies



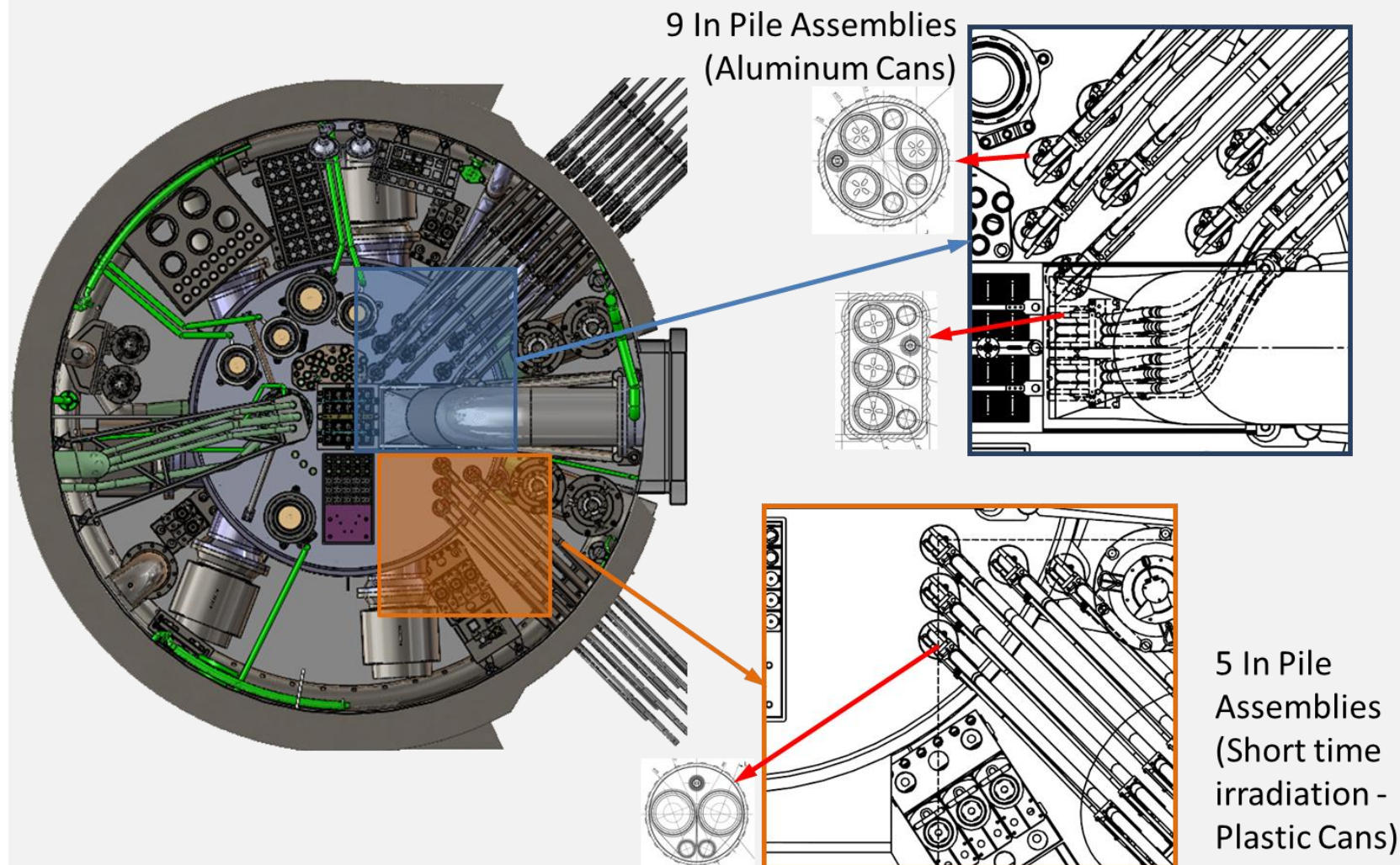
Leiaute Reator



Thermal flux [$\text{n}/\text{cm}^2\text{s}$] $E_n < 0.625 \text{ eV}$ - Midline of active length



Pneumatic Irradiation Facilities

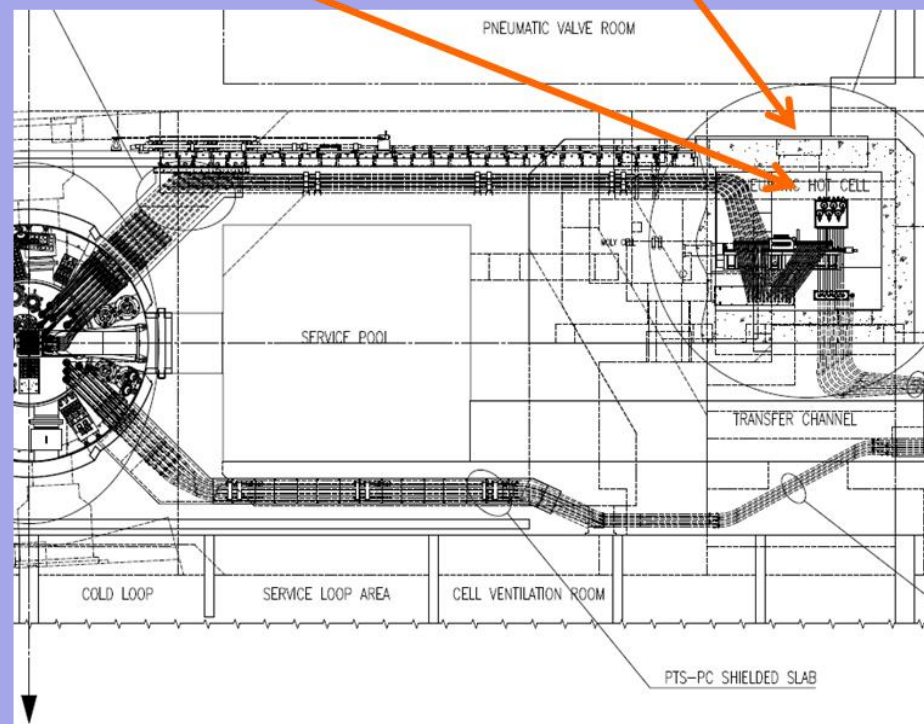
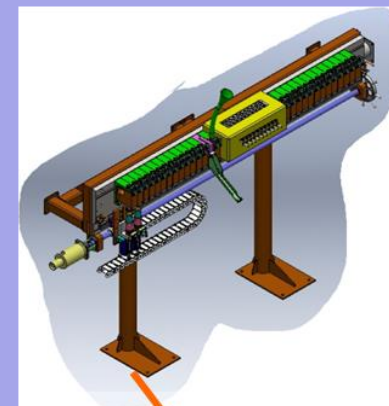
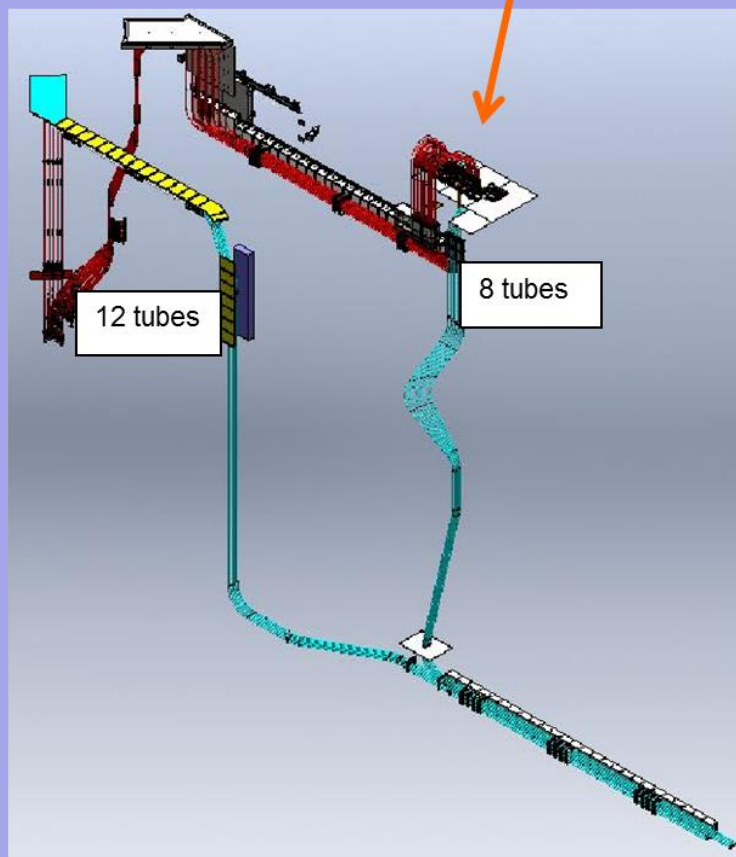


Pneumatic Irradiation Facilities



Pneumatic Hot Cell

Terminal station

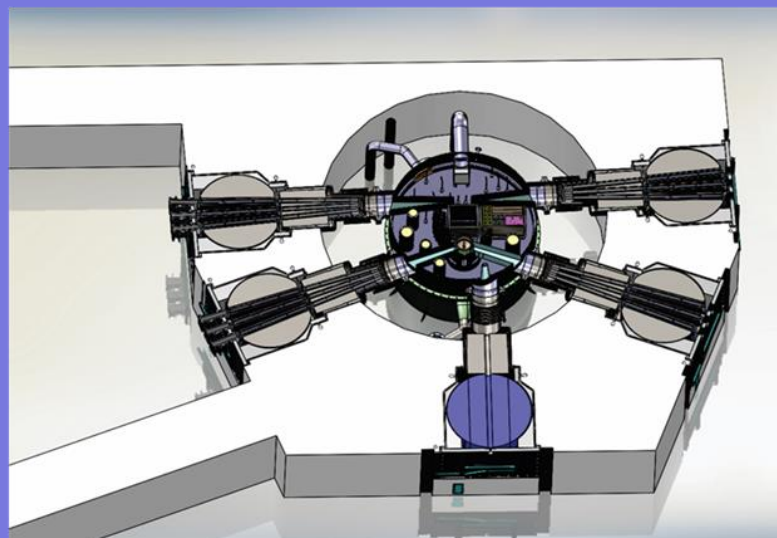
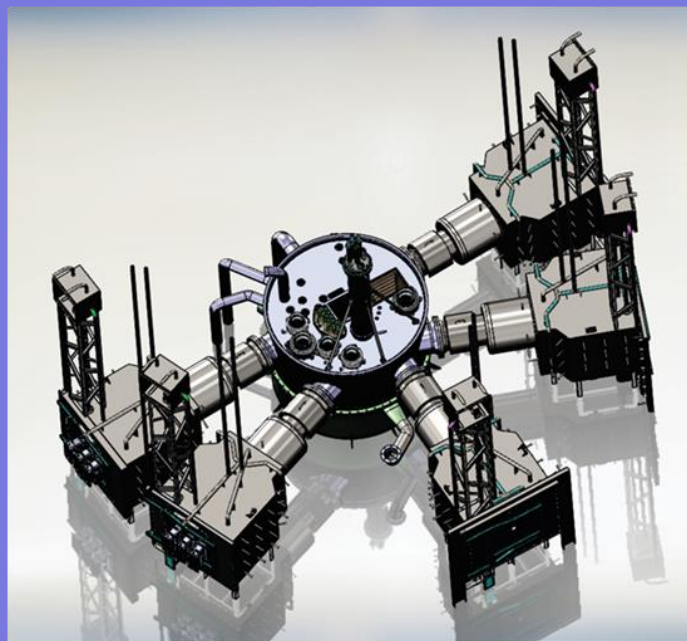
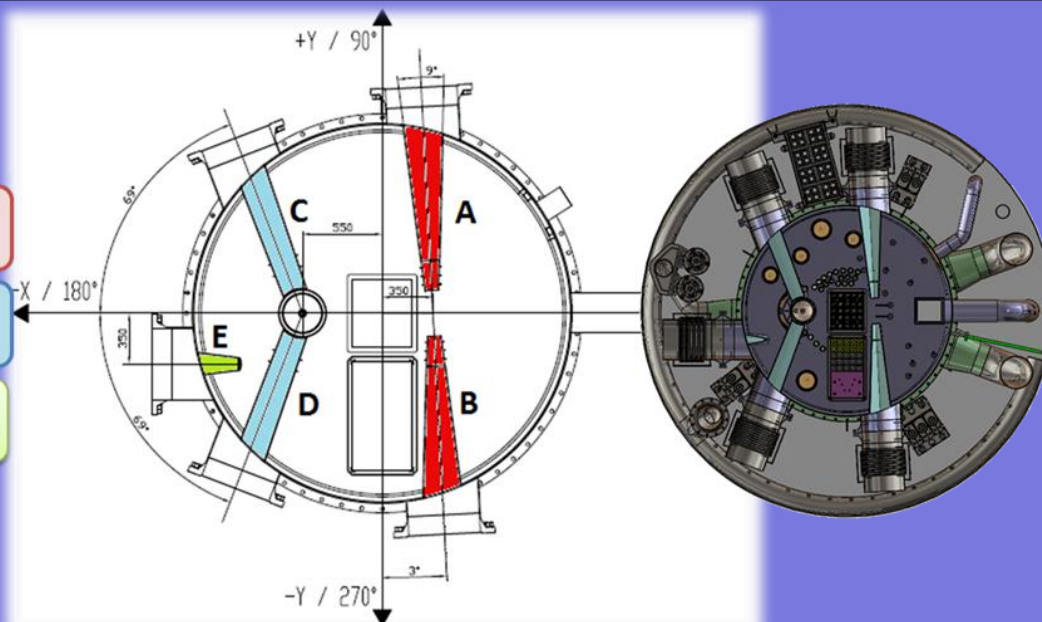


Feixe de Nêutrons

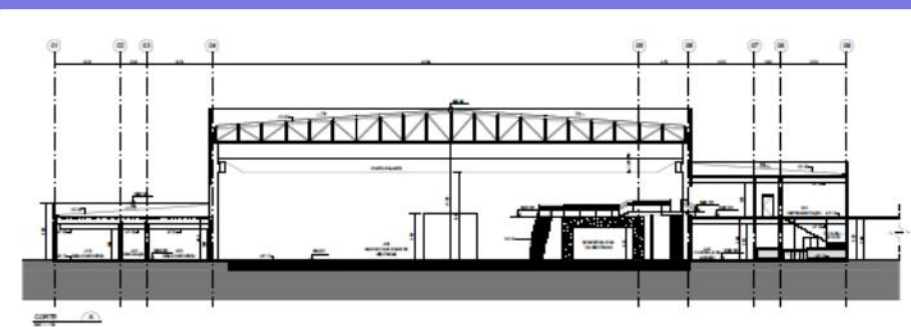
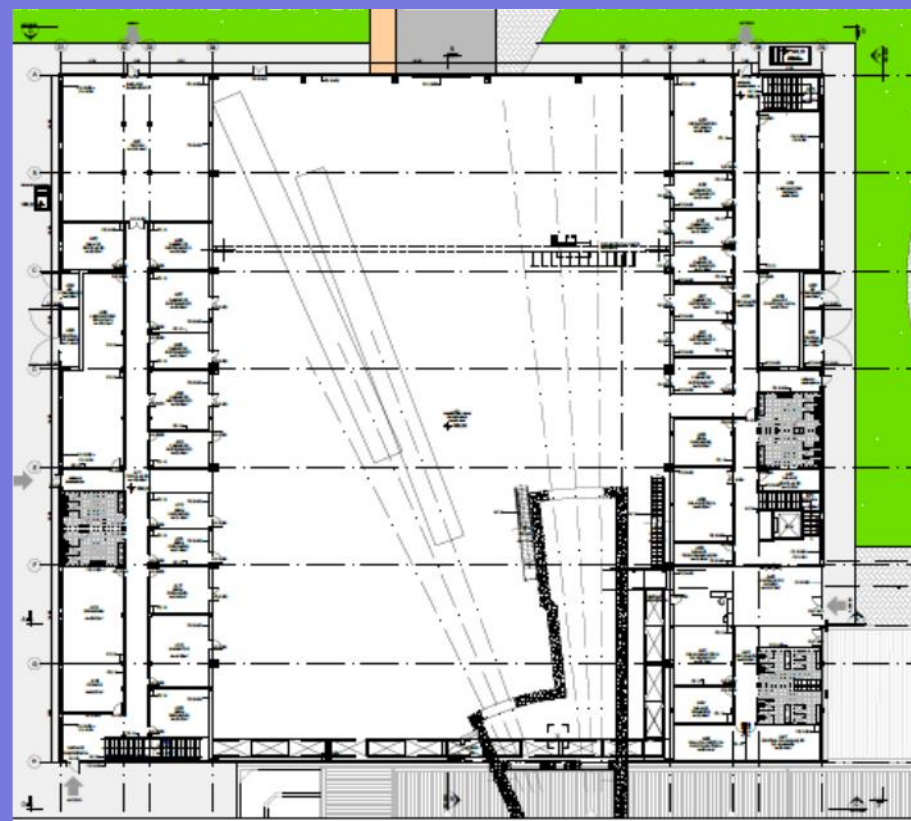
A – B : THERMAL BEAMS

C – D : COLD BEAMS

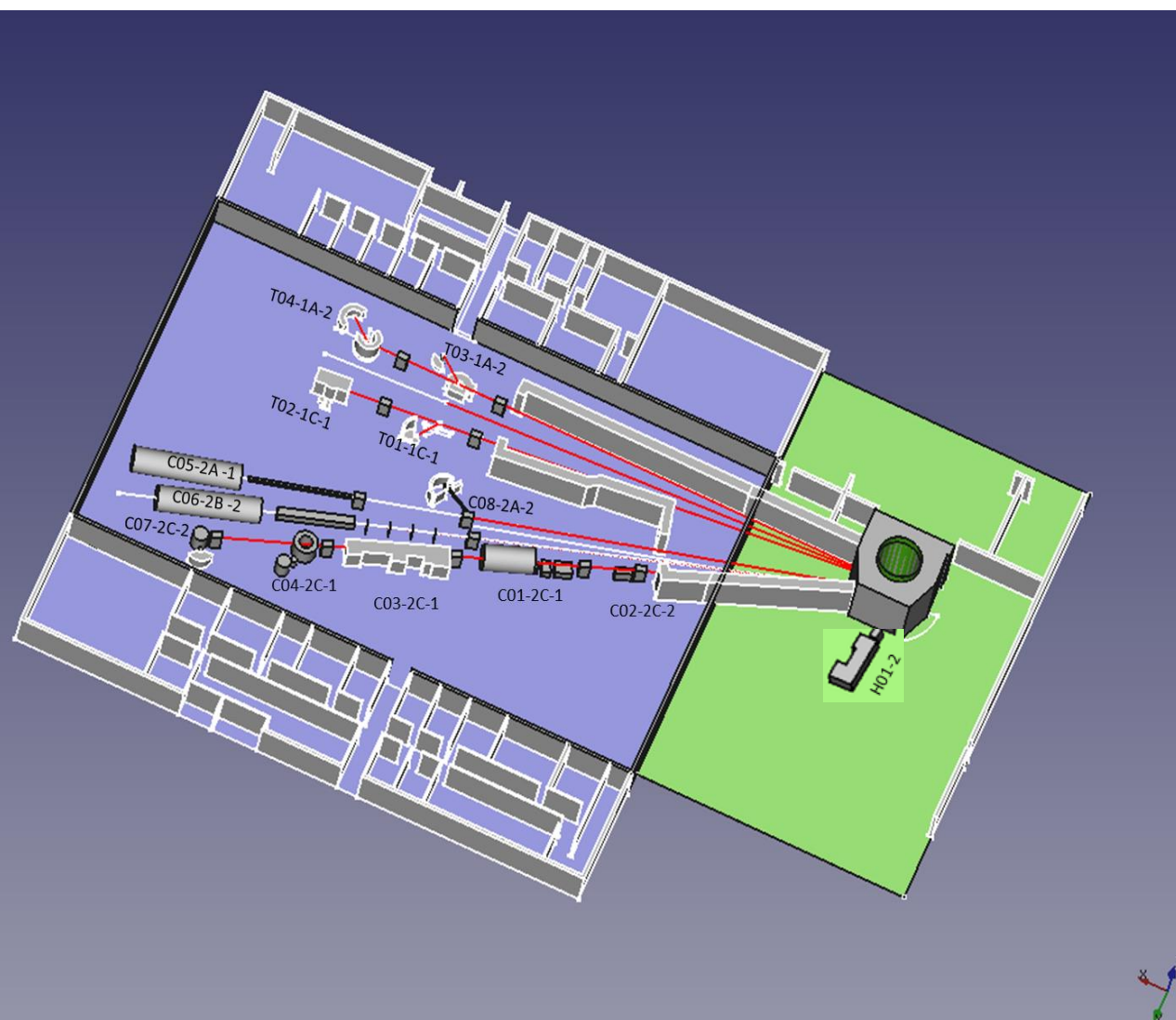
E : NEUTROGRAPHY BEAM



LABORATÓRIO DAS GUIAS DE NÊUTRONS



LABORATÓRIO DAS GUIAS DE NÊUTRONS



Equipamentos Previstos

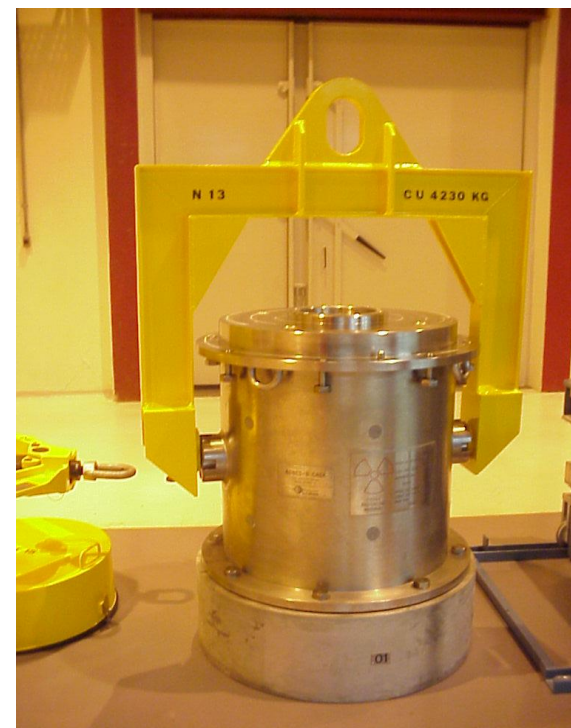
C01-2C-1	Refletrômetro
C02-2C-2	Laue
C03-2C-1	Tomografia e Neutrografia
C04-2C-1	Espectrômetro de três eixos
C05-2A-1	Small Angle Scattering
C06-2B-2	v-Small Angle Scattering
C07-2C-2	Espectrômetro de tempo de vôo
C08-2A-2	Espectrômetro de bakscattering
T01-1C-1	Difratômetro para monocristais
T02-1C-1	Difratômetro para análise de stress residual e textura
T03-1A-1	Difratômetro de pó de alta intensidade
T04-1A-2	Difratômetro de pó de alta resolução
H01-2	Neutrografia e Tomografia

1- Fase Inicial

2- Fase Avançada

José A. Perrotta 04/06/2016

Células Quentes



**Muito
Obrigado!!**