

## Estrutura da matéria e radiação

**Radiação:** qualquer forma de energia que se origina em uma fonte, propagando-se através de um meio material ou do vácuo.

**Radiação Ionizante:** radiação capaz de ionizar (arrancar elétrons), direta ou indiretamente, os átomos do meio material por onde ela passa, podendo, por isso, ser prejudicial à saúde. Devido ao seu poder de penetração em materiais, é utilizada em:

- Agricultura: - Indústria: - Medicina:	conservação de alimentos; medida de espessura, esterilização e controle de qualidade de materiais; Radioterapia: tratamento de câncer com RX de alta energia (MeV), elétrons, cobalto, célio, irídio, etc;
energia   cromo,  gine-	Radiodiagnóstico: diagnóstico por imagem com RX de baixa e média energia (10 a 150 KeV) ; Medicina nuclear “in vivo”: diagnóstico por imagem com iodo, tálio, tecnécio, etc.; Medicina nuclear “in vitro” (hematologia, gastrologia, endocrinologia, ginecologia-obstetrícia): marcação de células com fósforo e trítio, enxofre, iodo, carbono, etc.; Oftalmologia: tratamento de pterígeo com estrôncio.

A radiação pode ser de natureza:

a) **Corpuscular:** transporte de matéria, ou melhor, feixe de partículas subatômicas em alta velocidade. Radiação muito ionizante e pouco penetrante.

Ex: raios- $\beta$ , raios- $\alpha$ , prótons, nêutrons.

b) **Ondulatória:** transporte de energia por ondas. Divide-se em:

■ **Mecânica:** vibração atômica ou molecular de um meio material (não se propaga no vácuo). Ex: infra-som, som, ultra-som.

■ **Eletromagnética:**

- ondas (campos elétrico e magnético oscilantes) que se propagam no vácuo com velocidade  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, ou num meio material com velocidade  $v = \lambda f$ ,

onde:  $f$  é a frequência de oscilação ( $s^{-1}$ ) e  $\lambda$  é o comprimento de onda (m, ou angstrom,  $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  m), responsável pelo comportamento da radiação.

- “partículas” (fótons ou pacotes de energia) que viajam no vácuo com a velocidade das ondas e transportam energia  $E = h \cdot f$ , onde  $h$  é a constante de Planck ( $6,61 \cdot 10^{-34}$  J.s).

## **Noções básicas de cálculo de blindagens**

O cálculo e construção de uma blindagem para uma instalação devem levar em consideração o tipo de fonte e radiação emitida, sua energia, localização (distância da fonte à área de interesse), as direções possíveis de incidência do feixe, o tempo de ocupação da fonte, a carga de trabalho, os locais e áreas circunvizinhas, a taxa de dose que é aceitável fora do material da blindagem, ou seja, taxa de dose nos locais que são ocupados por trabalhadores e pessoas do público, e a planta da instalação. Além do cálculo da barreira primária, deve-se calcular a barreira secundária devido ao espalhamento da radiação nas paredes, equipamentos e no ar. Após a escolha dos materiais da construção da instalação e da blindagem, calcula-se as espessuras e escolhe-se a geometria que otimiza a redução do nível de radiação aos estabelecidos por normas, específicas e gerais, de radioproteção.

### **Blindagens para diferentes tipos de radiação.**

Existem diferentes tipos de radiação ionizante:

RAIOS-X e GAMA, assim como a luz, apresenta transmissão de energia por ondas, sem movimento de matéria, do mesmo modo o calor e a luz do fogo ou do sol viajam através do espaço. Ao contrário da luz, raios – x e gama têm grande poder de penetração e podem passar através do corpo humano. Espessuras de concreto, chumbo ou água são usadas como barreiras de proteção para raios – x e gama.

PARTÍCULAS ALFA, têm carga elétrica positiva e são emitidas de elementos encontrados na natureza, tais como urânio ou rádio, bem como de alguns elementos artificiais. Por causa dos seus tamanhos relativamente grandes, as partículas alfa colidem facilmente com a matéria e perdem suas energias rapidamente. Portanto, elas têm pouco poder de penetração e podem ser retidas pelas primeiras camadas da pele ou por uma folha de papel. Contudo, se alcançam o interior do corpo, por exemplo, por inalação ou ingestão, as partículas alfa podem afetar as células do mesmo. Dentro do corpo(contaminação interna), as partículas alfa podem causar mais danos biológicos que outras radiações, porque cedem suas energias em distância relativamente curta em relação as células.

PARTÍCULAS BETA, são elétrons movendo-se rapidamente, ejetados do núcleo dos átomos. Essas partículas são muito menores que as partículas alfa

e podem penetrar até 1 ou 2 centímetros de água ou tecido humano. No intervalo de energia em que normalmente são encontradas (1 à 10 Mev), as partículas beta necessitam de uma blindagem de cerca de 10 mm de acrílico para uma absorção completa, ou por camadas de alumínio de alguns milímetros de espessura. O chumbo nunca deve ser utilizado para blindagem de partículas beta(feixe de elétrons), devido à produção de radiação de frenamento que agravaria a situação em termos de níveis de radiação e penetrabilidade.

Devido à facilidade com que as fontes beta podem ser blindadas, tem-se a impressão errônea de que elas não são tão perigosas como as fontes gama ou as de neutrons, e muitas vezes são manuseadas diretamente. Essa é uma ação perigosa, desde que a taxa de dose a uma distância de 3 mm de uma fonte beta de 1 MBq seja cerca de 1Gy/h., ver tabela a seguir.

Alcances aproximados das partículas beta no ar:

ENERGIA ( Mev )	ALCANCE NO AR (m)
0.1	0.11
0.5	1.5
1.0	3.7
2.0	8.5
3.0	13.0

**RADIAÇÃO CÓSMICA**, consiste de partículas de alta energia que, do espaço, bombardeiam a Terra. Em altitudes maiores, são mais intensas que ao nível do mar, onde a atmosfera terrestre é mais densa e, dá uma proteção maior.

**NÊUTRONS**, são partículas que também são muito penetrantes. Elas são provenientes do espaço, de colisões com átomos na atmosfera, e de divisão ou fissão, de certos átomos dentro do reator nuclear. Água, concreto, parafina borada e o grafite são as blindagens mais comumente usadas contra radiação de nêutrons do centro do reator nuclear.

## **Apresentação de projetos para instalações de radiodiagnóstico.**

Deverão ser apresentados contendo :

- 1) Planta baixa, em escala, da instalação e adjacências, com indicação também em escala do equipamento como um todo (comando, mesa , estativa, etc.) e do biombo ou cabine protetora;
- 2) Características do equipamento: marca, modelo, utilização (tipos de exame que realiza), tensão máxima do aparelho (em KV), corrente máxima permitida para tensão máxima, números de tubos do aparelho;
- 3) Classificação das barreiras em primárias e secundárias;
- 4) Identificação de áreas controladas e livres, através do uso dos símbolos:

△ ÁREA CONTROLADA

□ ÁREA LIVRE

- 5) Indicação dos usos das áreas adjacentes ao compartimento onde se localiza o aparelho de raios-x;
- 6) Indicação dos fatores utilizados no cálculo das barreiras radiológicas (KV, W, U, T, etc.).

## **CÁLCULO DE BARREIRAS PARA RAIOS X.**

### Barreira Primária

O cálculo da transmissão permissível (I) para a obtenção da espessura (x) de material atenuante é feito pela equação:

$$I = \frac{P.d^2}{W.U.T}$$

P, limite permissível de exposição à radiação (em R/SEMANA), para pessoas do público P=0.002 R/SEMANA e para o trabalhador, P= 0.05 R/SEMANA. Esses valores foram obtidos a partir dos níveis otimizados de dose para trabalhadores (20 mSv/ano) e para o público (1 mSv/ano), dividindo por 50 semanas e por  $0,876 \times 10^{-2}$  (para transformar de Sv para R).  
d, distância do foco do tubo de raios-x à posição que pode ser ocupada na sala vizinha por uma pessoa.

W ,carga de trabalho, é dada pelo produto:  $i.t$  ( mA.min/semana ).

Onde  $i$ , é a corrente máxima permitida para a tensão máxima e  $t$  é o tempo que o aparelho permanece ligado por semana.

U, fator de uso (depende do direcionamento do feixe útil )

Onde U, assume os seguintes valores: para pisos U=1

paredes U=1/4

o teto é considerado uma barreira secundária em radiodiagnóstico, conforme especificado na tabela 3 da norma NCRP49.

T, fator de ocupação, cujos valores são dados na tabela a seguir:

Área	Local	T
Controlada	utilizado por trabalhadores	1
Livre	adjacências da área controlada ( permanência constante )	1
Livre	vestiário e circulação interna	1/4
Livre	salas de espera para o público	1
Livre	circulação externa ( wc ,escada ,etc. )	1/16

Obs.: T=1(ocupação integral), T=1/4(ocupação parcial), T=1/16(ocupação ocasional).

Calculamos o valor de I e transportamos o valor encontrado a um gráfico de curvas de atenuação( curvas de I x espessura ), de onde obtemos a espessura da barreira ( x ).

Barreira Secundária.

O cálculo do fator de transmissão  $I_e$  da radiação espalhada é feito pela equação:

$$I_e = \frac{P \cdot d_{pp}^2 \cdot d_{fp}^2 \cdot 400}{A \cdot W \cdot T \cdot F}$$

$d_{pp}$  ,distância do paciente à posição que pode ser ocupada na sala vizinha por uma pessoa .

$d_{fp}$ , distância do foco ao paciente.

$a$ , razão da radiação espalhada pela radiação incidente, é uma função da energia e do ângulo de espalhamento, conforme tabela B-2 do NCRP49.

$F$ , área do campo máximo que pode ser utilizado.

Os valores numéricos de  $a$ , na tabela B-2, foram obtidos experimentalmente para um campo de área  $F = 400\text{cm}^2$  na superfície de um "phantom".

Após determinar  $I_e$ , transportamos o valor encontrado para um gráfico  $I$  x espessura, onde obtemos a espessura da barreira ( $X_e$ ) para radiação espalhada.

Em seguida, calcula-se o fator de transmissão  $I_v$  da radiação de fuga ou de vazamento do envólucro da ampola.

Aparelhos de raios-X diagnóstico, onde a fuga de radiação é limitada à 0.1R em 1h à 1m do tubo ,

$$I_v = \frac{P \cdot d_s^2 \cdot (600i)}{W \cdot T}$$

Aparelhos de raios-X para terapia abaixo de 0.5MV ou 500KV, onde a fuga de radiação é limitada à 1R em 1h à 1m do tubo,

$$I_v = \frac{P \cdot d_s^2 \cdot (60i)}{W \cdot T} \quad , \text{ onde:}$$

$d_s$ , é a distância do tubo à posição que pode ser ocupada por uma pessoa na sala adjacente;

$i$ , corrente contínua do tubo, pode ser obtida da tabela B-3 do NCRP49 para a KV desejada.

Calculamos o valor de  $I_v$  e transportamos o valor encontrado a um gráfico de curva de atenuação (curva de  $I$  x  $n^\circ$  de camada semi-redutora (HVL)), onde obtemos o valor de  $X_v$  (em número de HVL).

Exemplo, se o valor encontrado para  $X_v = 1.75\text{HVL}$  e a tensão desejada é 100KV, basta consultar a tabela 27 do apêndice C do NCRP49, onde obtemos o equivalente em HVL (para 100KV,  $1\text{HVL}=0.27$ ), então,

$$X_v = 1.75\text{HVL} = 1.75 \cdot 0.27 = 0.47\text{mmPb.}$$

Para obter o valor final da barreira secundária fazemos uma comparação entre  $X_e$  e  $X_v$  :

Se  $X_e \cong X_v \Rightarrow X = X_v + 1HVL$  ,no exemplo acima ficaria  $X=0.5 + 0.27=$   
 $=0.77\text{mm de Pb}$

Se  $X_e \neq X_v \Rightarrow X = X_e \text{ ou } X_v$  ,no exemplo anterior ficaria  $X = 0.5\text{mm de Pb}$

### Otimização na determinação de blindagens

A otimização da espessura de uma blindagem deve ser feita pela análise do seu custo - benefício, por meio de um coeficiente monetário  $\alpha$  em moeda nacional corrente / pessoa – Sievert. No Brasil, de acordo com a norma CNEN-NE 3.01,  $\alpha = \frac{10.000\text{US\$}}{\text{PESSOA} - \text{Sv}}$  ou  $\alpha = \frac{\text{US\$10}}{\text{PESSOA} - \text{mSv}}$ . Na análise, também é levado em conta a dose coletiva (S) na vida útil do equipamento que é dada por:

$$S = H.N.T.t_m = H.N.T.20, \text{ onde:}$$

$t_m=20$ , é a média de vida útil do equipamento emissor de radiação;

T, é o fator de ocupação;

N, o número de pessoas que trabalham no local onde se calculou a blindagem;

H, a dose equivalente desejada, reduzida pela blindagem.

Em seguida, o que devemos fazer é calcular, para cada valor de H, o custo(x), o incremento no custo( $\Delta x$ ) para acréscimos de blindagens, a dose coletiva(S), e a dose economizada. De posse desses valores, fazemos uma comparação entre  $\alpha$  e a razão  $\Delta x / \Delta S$ , se  $\Delta x / \Delta S < \alpha$ , a opção estará justificada, em caso contrário  $\Delta x / \Delta S > \alpha$ , a opção não deve ser justificada.

## Grandezas e unidades de Radioproteção

### Unidades de radiação

Uma vez que a proteção radiológica é uma ciência relativamente moderna, as definições e as unidades de radiação ainda estão sujeitas a modificações. As unidades de radiação antigas (Curie, Roentgen, rad e rem) foram substituídas pelas novas (Bequerel, Roentgen, Gray e Sievert).

As definições técnicas e legais são as das novas unidades, mas muitos instrumentos de detecção e textos técnicos utilizam ainda as unidades antigas. Ambos os sistemas de unidades serão descritos a seguir.

### Atividade (A)

Conforme visto anteriormente, a atividade ( $A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$ ) de um nuclídeo radioativo é relacionada à sua taxa de desintegração. A unidade antiga de atividade é o Curie (Ci), definido como  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo:

$$1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

A nova unidade padrão de atividade é o Bequerel, definida como uma desintegração por segundo:

$$1\text{Bq} = 1\text{dps} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Por exemplo, para uma fonte utilizada em gamagrafia, que contenha num determinado instante, 60Ci de irídio, o número de átomos de irídio que se desintegram em cada segundo (emitindo, em consequência, a radiação gama) é de:

$$60 \times 3,7 \times 10^{10} \text{ ou } 2,22 \times 10^{12} \text{ átomos}$$

### Exposição (raios – x ou gama) (X)

Conforme já mencionado, a ionização de um gás fornece um método de detecção de radiações. A exposição é uma medida da quantidade de ionizações que as radiações gama e X produzem no ar.

A **exposição (X)** é definida pelo quociente entre  $\Delta Q$  e  $\Delta m$  onde  $\Delta Q$  é a soma das cargas elétricas de todos os íons de um mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os íons (negativos e positivos), liberados por fótons num volume elementar de ar, cuja massa é  $\Delta m$ , são completamente freados no ar.

$$X = \Delta Q / \Delta m$$

A primeira unidade de radiação, ainda amplamente utilizada é o Roentgen (R), cuja definição é:

$$1\text{R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg de ar.}$$

Embora o Roentgen continue a ser usado, ele é inadequado como unidade de radiação, uma vez que só se aplica às radiações X e gama, e por ter sido definido por seus efeitos no ar. Geralmente, o meio de interesse é o tecido humano, e a absorção de energia no mesmo



é maior do que no ar. O conceito de dose absorvida de radiação foi introduzido para superar esta dificuldade.

### **Dose Absorvida (D)**

Quando colocamos um material qualquer em um campo de radiação, este absorverá uma certa quantidade de energia. A energia absorvida por cada grama de material chama-se dose absorvida, sendo medida em joules por kilograma, ou seja:

A Dose Absorvida (D), de qualquer radiação ionizante, é o quociente entre  $\Delta E$  e  $\Delta m$ , onde  $\Delta E$  é a energia transferida pela radiação à matéria, num volume elementar cuja massa é  $\Delta m$ .

$$D = \Delta E / \Delta m$$

A unidade antiga de dose absorvida que se aplica a qualquer tipo de radiação e a qualquer meio material, é o rad (radiation absorbed dose) e equivale a:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/Kg}$$

1 rad é aproximadamente igual a dose absorvida pelo tecido mole vivo quando exposto a 1R de raios X de média energia (aproximadamente 250Kev).

A nova unidade de dose absorvida é denominada “gray” símbolo Gy, sendo definida como:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/Kg} \text{ e, portanto: } 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

A dose absorvida não é suficiente para caracterizar os diversos efeitos biológicos das radiações: uma mesma dose absorvida pode produzir efeitos biológicos distintos, dependendo do tipo de radiação. Por esse motivo foi definido o conceito de dose equivalente.

### **Equivalente de Dose, H(Dose Equivalente)**

Esta grandeza, definida no Brasil como Dose Equivalente, é uma tradução equivocada de “Equivalent Dose” das recomendações da ICRP 26. Esta grandeza, assim denominada, ficou estabelecida nas normas da CNEN – 3.01, e no vocabulário dos usuários. A tradução correta seria Equivalente de dose, pois o conceito definido foi de equivalência entre doses de diferentes radiações para produzir o mesmo efeito biológico.

O Equivalente de Dose H, é obtido multiplicando-se a dose absorvida D pelo Fator de qualidade Q, ou seja,

$$H = D.Q \quad (\text{J/Kg} = \text{Sievert})$$

O fator de qualidade Q é adimensional e constitui um fator de peso proveniente da simplificação dos valores da Eficiência Biológica Relativa (RBE) dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico. Na prática, por motivos de simplicidade, utiliza-se o valor médio do Fator de Qualidade Q, com valores efetivos conforme tabela abaixo. Estes valores não devem ser usados para avaliar os efeitos de exposições acidentais com altas doses.

Tipo de radiação	Q
Raios X, Radiação gama e elétrons	1
Prótons e partículas com uma (1) unidade de carga e com massa de repouso maior que uma unidade de massa atômica e de energia desconhecida	10
Nêutrons com energia desconhecida	20
Radiação alfa e demais partículas com carga superior a uma ( 1 ) unidade de carga	20

Equivalente de Dose no órgão ou tecido,  $H_T$

O Equivalente de Dose no órgão ou tecido, é o equivalente de dose médio em um tecido específico T, expresso por:

$$H_T = D_T \cdot Q_T,$$

onde  $Q_T$  é o fator de qualidade médio no órgão ou tecido T e  $D_T$  a dose absorvida.

Equivalente de Dose Efetiva,  $H_e$

O Equivalente de Dose Efetiva  $H_e$ , é a soma dos equivalentes de dose,  $H_T$ , ponderados nos tecidos pelos fatores de peso de tecido,  $w_T$ , ou seja:

$H_e = \sum_T w_T \cdot H_T$  , com  $\sum_T w_T = 1$ . Os valores de  $w_T$  estão associados à radiosensibilidade do órgão à radiação e seus valores estão na tabela abaixo.

Órgão ou tecido	Fator de peso $w_T$
Gônadas	0.20
Medula óssea (vermelha)	0.12
Cólon	0.12
Pulmão	0.12
Estômago	0.12
Bexiga	0.05
Mama	0.05
Fígado	0.05
Esôfago	0.05
Tireóide	0.05
Pele	0.01
Superfície óssea	0.01
Restantes*	0.05

\*cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, útero, pâncreas, vesícula, timo, adrenais e músculo.

Esta grandeza,  $H_e$ , não é mensurável. Assim, para as aplicações práticas, a ICRU39 introduziu grandezas operacionais mensuráveis relacionadas ao equivalente de dose efetiva, tais como Equivalente de Dose Ambiental,  $H^*(d)$ , Equivalente de Dose Direcional,  $H(d, \Omega)$ , e Equivalente de Dose Pessoal,  $H_p(d)$ .

Dose efetiva coletiva,  $S_e$ .

É o produto do equivalente de dose efetiva média,  $H_e$  de um grupo exposto pelo número  $N$  de indivíduos naquele grupo.

$$S_e = N \cdot \sum_T w_T \cdot H_T$$

Dose efetiva comprometida,  $H(\tau)$ .

Integral no tempo pelo período  $\tau$  da taxa de equivalente de dose efetiva resultante de uma incorporação no instante  $t_0$ ,

$$H(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(t)$$

Nota: quando o período de integração não é especificado, ficam implícitos os valores de 50 anos para adultos e de 70 anos para crianças.

# Fundamentos de Proteção Radiológica

## Definição de radiação:

Radiação é energia que se difunde de uma fonte, natural ou artificial, propagando-se através de um meio material ou do vácuo.

## Classificação da radiação:

Podemos classificar a radiação quanto à sua origem e natureza.

Quanto à sua origem, a radiação (ionizante e não ionizante) pode ser proveniente de uma fonte natural e artificial.

Exemplos de fontes naturais: o sol, os elementos que compõem a crosta terrestre, tais como:  $^{40}\text{K}$  (potássio-40),  $^{238}\text{U}$  (urânio-238),  $^{232}\text{Th}$  (tório-232), raios cósmicos (provenientes do espaço sideral).

Exemplos de fontes artificiais: tubos de raios X, aceleradores de partículas, lâmpadas, etc.

A radiação natural pode ser classificada em dois tipos: externa e interna ao corpo do ser humano.

A radiação externa é subdividida em cósmica e terrestre.

Cósmica: provém do espaço sideral e do sol, e varia com a altitude (quanto mais alto o local, maior é a dose de radiação recebida).

Terrestre: provém do solo e varia com a latitude (posição geográfica).

A radiação interna ao nosso corpo é proveniente do ar que respiramos e dos alimentos que ingerimos. Os radioisótopos naturais existentes no nosso organismo são: potássio-40, rádio-226, tório-232, carbono-14, etc.

As fontes naturais de radiação podem ser encontradas nos estados sólido, líquido e gasoso.

As fontes de radiação artificiais são produzidas pela mão do homem. Algumas utilizam a eletricidade como fonte de energia para acelerar partículas e gerar radiação, outros irradiadores utilizam radioisótopos como fonte de radiação, acoplados a um sistema blindado de exposição e guarda da fonte (exemplo: aparelhos de cobalto, aparelhos de gamagrafia, etc).

Quanto à natureza, a radiação classifica-se em: ondulatória e corpúscular.

A ondulatória (transporte de energia por ondas) se subdivide em eletromagnética e mecânica.

Eletromagnética: propaga-se em um meio material ou vácuo. Exemplo: ondas de rádio, de TV, de luz infravermelha, ultravioleta, raios X e gama (essas duas últimas são ionizantes e penetrantes).

Mecânica: propaga-se num meio material. Exemplo: som, ultra-som e infra-som.

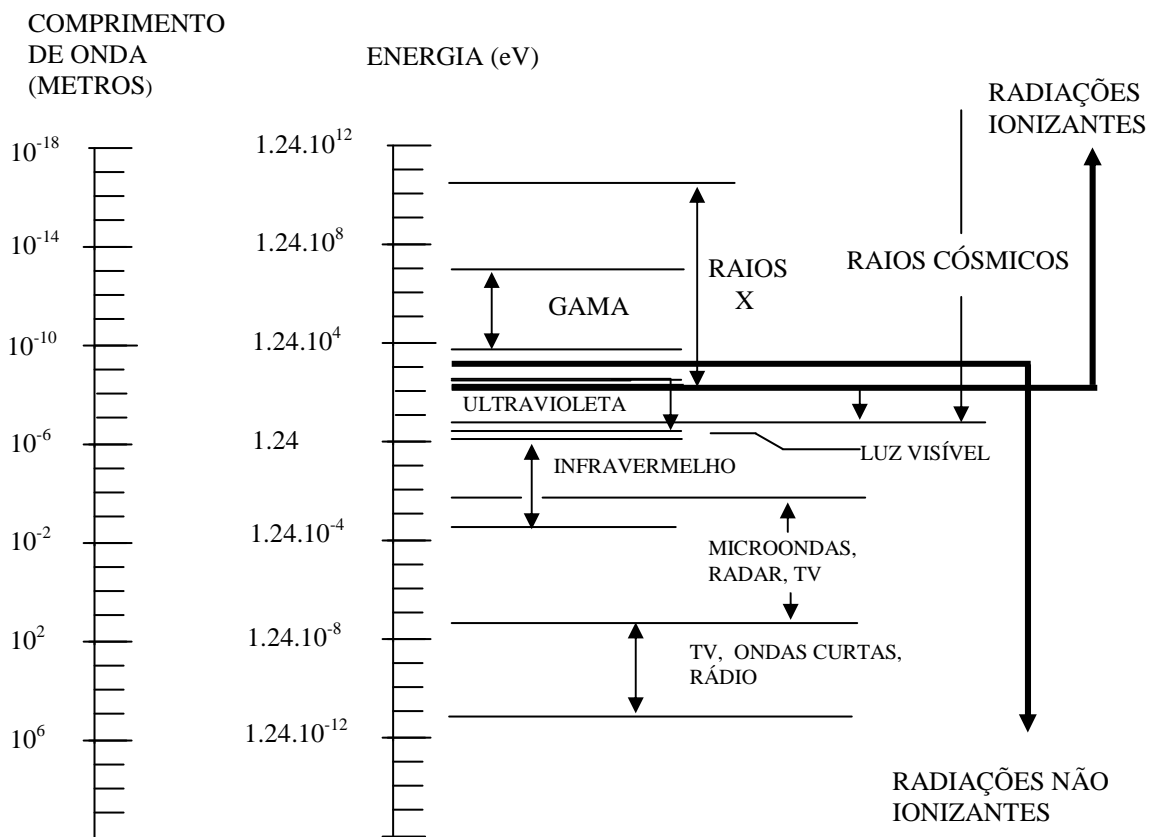
A radiação corpúscular, que corresponde a feixes de partículas subatômicas em alta velocidade é muito ionizante e pouco penetrante em relação aos raios X e gama. Exemplo: partículas carregadas (alfa e beta) ou neutras (nêutrons).

## Radiação ionizante e não ionizante:

Radiação ionizante é aquela energia que, ao encontrar átomos, moléculas ou tecidos, pode produzir íons (átomos ionizados) através da retirada de elétrons. Dentro do tecido humano, ou na matéria orgânica, esta ionização produz os “radicais livres” e pode levar a uma quebra de moléculas, isso ocasiona uma interrupção ou modificação do processo de multiplicação celular. Moléculas importantes como as de DNA, cuja função é transportar os genes, podem ser modificadas, causando assim, os efeitos genéticos da radiação.

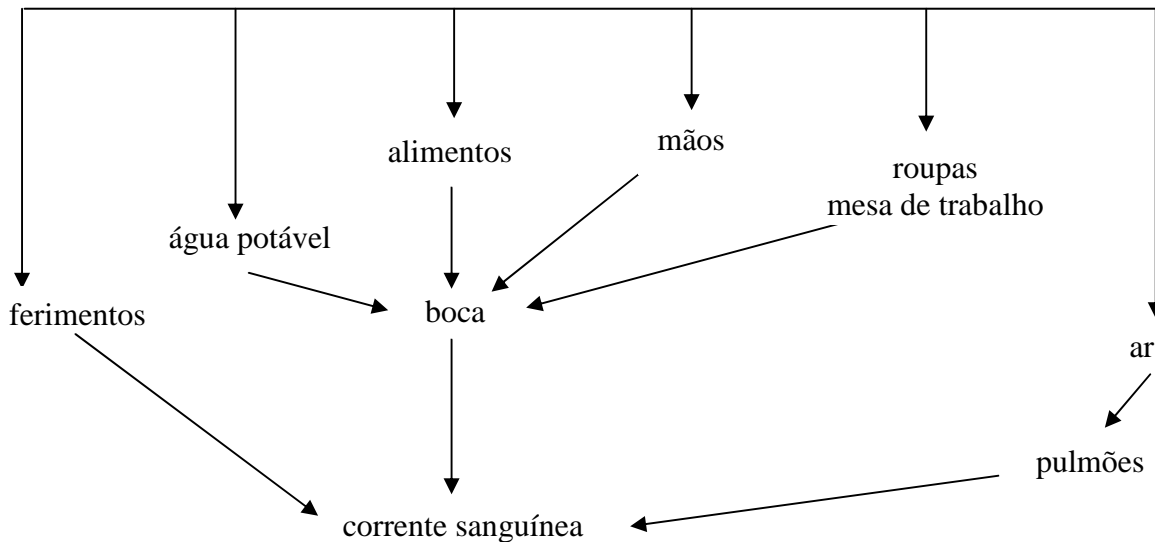
As radiações não-ionizantes são por demais conhecidas (o calor, a luz visível, as ondas de rádio e TV, etc.) e não apresentam riscos à saúde.

As radiações não ionizantes, também fazem parte do espectro eletromagnético, são classificadas pelo comprimento de onda e frequência. No gráfico abaixo, percebemos que as divisões entre as faixas não são rígidas, as separações servem apenas para fazer idéia da “ região” de mudança de características.



## Noções de exposição e contaminação:

Como vimos anteriormente, as fontes de radiação (com exceção dos aparelhos que produzem radiação) podem estar em um dos estados físicos da matéria. Isto nos leva a pensar no risco devido à contaminação. Cuidados devem ser tomados para evitar a contaminação com material radioativo que pode chegar à corrente sanguínea através dos seguintes caminhos:



Alguns pontos precisam ser esclarecidos no tocante a exposição e contaminação com radiação ionizante:

- Em uma pessoa **exposta** à radiação, o **dano biológico** produzido na mesma não se transmite. O que pode eventualmente ser transmitido é um efeito de doses elevadas, que lesando significativamente as células reprodutivas, pode resultar num descendente portador de defeito genético. Não há relação nenhuma entre a parte irradiada numa pessoa e o local de aparecimento do defeito no organismo do filho.
- Após uma exposição, a pessoa ou objeto irradiado não fica emitindo radiação.
- Uma pessoa acidentada pela exposição à radiação, mesmo exibindo sintomas da síndrome de irradiação aguda, pode ser manuseada, medicada e transportada como um paciente qualquer, pois sua “doença” “não pega”. O cuidado que se deve ter no tratamento destas pessoas e instalações, é dos médicos, enfermeiros, demais pessoas e instalações não contaminá-las por vírus ou bactérias, uma vez que, nestas condições, sua resistência imunológica está muito baixa.
- Somente pessoas que sofreram irradiação por contaminação interna ou externa é que precisam ser manuseadas com cuidado, para evitar a contaminação química com radionucléios, dos quais são portadoras. Por exemplo, as vítimas do acidente com <sup>137</sup>Cs, em Goiânia, tiveram que ficar isoladas e, durante o tratamento especial, os técnicos tiveram que usar luvas, macacão e sapatilhas para não se contaminarem radioativamente e não contaminarem biologicamente os enfermos.

## **Efeitos biológicos da radiação ionizante**

No processo de interação com a matéria ocorre uma transferência de energia que pode provocar excitação ou ionização de átomos, com a conseqüente alteração das moléculas a que pertencem. Se as moléculas afetadas estão em uma célula viva, esta pode ser danificada. Entre os danos que a radiação pode causar nas células, o mais importante é o que ocorre na molécula de DNA. O dano no DNA é freqüentemente reparado adequadamente, pode ocorrer:

- morte prematura da célula;
- incapacidade de se reproduzir;
- transformação em uma célula viável, porém modificada.

Os processos que conduzem a produção do efeito biológico pela radiação são complexos e são freqüentemente considerados em quatro estágios:

- físico – dura somente uma fração de segundos ( $10^{-16}$ ), em que a energia é depositada na célula e causa ionização;
- físico-químico – dura cerca de  $10^{-6}$  segundos, em que os íons interagem com outras moléculas resultando em novos produtos;
- químico – durando uns poucos segundos, em que os produtos da reação interagem com as moléculas orgânicas mais importantes da célula;
- biológico – em que a escala de tempo varia de dezenas de minutos a dezenas de anos, dependendo dos sintomas.

Convém salientar que o efeito biológico constitui a resposta natural de um organismo, ou parte dele, a um agente agressor ou modificador. Necessariamente não significa uma doença. Quando a quantidade de danos biológicos é pequena, o organismo pode se recuperar sem que a pessoa perceba. Por exemplo, numa exposição à radiação X ou gama, pode ocorrer uma redução de leucócitos, hemácias e plaquetas e, após algumas semanas, tudo retorna aos níveis anteriores de contagem no sangue, isto significa que houve a radiação, ocorreram efeitos biológicos sob a forma de morte celular e, posteriormente, os elementos figurados do sangue foram repostos por efeitos biológicos reparadores, operados pelo tecido hematopoético.

## **Reversibilidade, Transmissividade e Fatores de Influência**

### Reversibilidade

A célula possui muitos mecanismos de reparo, uma vez que, durante sua vida, sofre danos provenientes de substâncias químicas, variação da concentração iônica no processo de troca de nutrientes e dejetos junto à membrana celular, danos físicos produzidos por variações térmicas e radiações. Mesmos danos mais profundos, produzidos no DNA podem ser reparados ou compensados, dependendo do tempo e das condições disponíveis. Assim, um tecido atingido por uma dose de radiação única e de baixo valor, tem muitas condições de recuperar sua integridade, mesmo que nele haja um certo percentual de morte de suas células. Em condições normais, ele repõe as células e retoma o seu ritmo de operação. Nestas condições, pode-se dizer que o dano

foi **reversível**. Entretanto, para efeito de segurança, em proteção radiológica, considera-se que o efeito biológico produzido por radiação ionizante é de caráter acumulativo, ou seja, despreza-se o reparo do dano.

### Transmissividade

Outra questão importante é que o dano biológico produzido numa pessoa não se transmite, conforme comentamos anteriormente.

### Fatores de influência

A reação de um indivíduo à exposição depende de diversos fatores, como:

- idade;
- sexo;
- estado físico;
- quantidade total de radiação recebida;
- quantidade total de radiação recebida anteriormente pelo organismo, sem recuperação;
- textura orgânica individual;
- dano físico recebido simultaneamente com a dose de radiação (queimadura, por exemplo);
- intervalo de tempo durante o qual a quantidade total de radiação foi recebida.

Pessoas que receberam a mesma dose de radiação não apresentam os mesmos danos e nem sempre respondem em tempos semelhantes. A relação dose - resposta é o resultado estatístico obtido de vários experimentos, in vivo, in vitro, e acidentes com radiação. Existem alguns fatores, tais como a idade, o sexo e o estado físico, que modificam a resposta ou o efeito biológico.

O indivíduo é mais vulnerável à radiação quando criança ou idoso. Na criança, os órgãos, o metabolismo, as proporções ainda não se estabeleceram definitivamente e, assim, alguns efeitos biológicos podem ter resposta com intensidade ou tempo diferentes de um adulto. Por exemplo, com relação ao tempo de retenção de um radionuclídeo como o  $^{137}\text{Cs}$ , na forma de cloreto de céσιο, a meia-vida efetiva é cerca de 55 dias, enquanto que, num adulto de 110 dias. Isto significa por um lado que, o  $^{137}\text{Cs}$  teve “menos tempo” para irradiar os órgãos internos e que por isso, resultaria numa menor dose de radiação. Por outro lado, como o processo de multiplicação celular é muito significativo nesta fase da vida do indivíduo, as células são mais sensíveis à radiação, morrendo em maior quantidade, mesmo que a reposição seja em grande taxa. No caso do idoso, o processo de reposição ou reparo celular é de pouca eficiência e a resistência imunológica é menor que de um adulto normal.

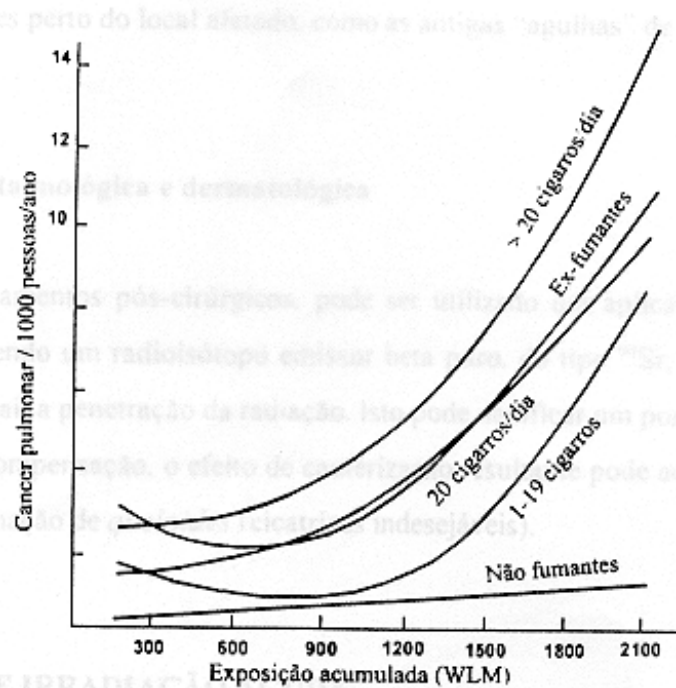
As mulheres são mais sensíveis e devem ser mais protegidas contra a radiação que os homens. Isto porque possuem órgãos reprodutores internos e os seios, tecidos muito sensíveis à radiação. Além disso, existe o período de gestação, onde o feto apresenta a fase mais vulnerável à radiação e a mãe, tem seu organismo bastante modificado em forma, composição hormonal e química.

O estado físico do irradiado influencia bastante à irradiação do indivíduo. Se uma pessoa é forte, resistente, bem alimentada, sua resposta aos possíveis danos da radiação será atenuada quando comparada com a de uma pessoa fraca, subalimentada e com deficiência imunológica. Isto é esperado em relação a qualquer agente agressor, interno



ou externo. A avaliação do estado físico é importante quando da tomada de decisão para o tratamento de radioterapia de uma pessoa com câncer, pois, em alguns casos, o tratamento poderia resultar num agravamento do quadro clínico.

Um fato notável é a composição dos efeitos danosos da radiação com outros fatores agressivos ao organismo, como por exemplo, o fumo. Dentre os males causados pelo fumo, destaca-se o câncer nas vias respiratórias. Assim, a diferença entre a frequência de incidência, por exemplo, de câncer no pulmão em trabalhadores de minas de exploração de urânio, fumantes e não fumantes, pode atingir quase um fator dez, conforme mostra a figura abaixo.



### Classificação dos efeitos biológicos

Os efeitos biológicos classificam-se quanto:

- 1) a dose absorvida:
  - estocástico;
  - determinístico.
- 2) ao tempo de manifestação:
  - imediatos;
  - tardios ou retardados.
- 3) ao nível de dano:
  - somático;
  - genéticos.

### **Efeitos estocásticos**

- a probabilidade de ocorrência é função da dose absorvida e não possui limiar (exemplo: câncer, leucemia);
- aparecem após um longo intervalo de tempo (tardios);
- são difíceis de serem medidos experimentalmente, devido ao longo tempo de latência;
- admite-se que qualquer dose (alta ou baixa) seja capaz de aumentar a probabilidade do aparecimento do efeito;
- as doses são acumulativas.

### **Efeitos determinísticos**

- a gravidade do dano é função da dose absorvida e possui um limiar de ocorrência (exemplo: catarata, perda de fertilidade, redução das células da medula óssea);
- aparecem num curto intervalo de tempo (imediatos);
- podem ser medidos experimentalmente;
- abaixo do limiar de dose não se detecta efeito algum;
- são oriundos de um grande número de células danificadas.

### **Efeitos somáticos**

- manifestam-se somente no indivíduo exposto à radiação;
- ocorrem em consequência de variadas doses;
- podem surgir logo ou vários anos após a exposição (determinístico ou somático)
- podem afetar quase todos os tecidos e órgãos do corpo humano.

Exemplos: redução da expectativa de vida, câncer, leucemia, radiodermite crônica e catarata.

### **Efeitos genéticos**

- manifestam-se na descendência do indivíduo exposto;
- os danos provocados nas células que participam do processo reprodutivo de indivíduos que foram expostos à radiação, podem resultar em defeitos, mal formações em indivíduos de sua descendência.

## **Uso de efeitos biológicos na terapia**

### **1. Radioterapia**

O fato de radiações penetrantes do tipo raios X e gama induzirem danos em profundidades diversas do organismo humano e, com isso, causar a morte de células, pode ser utilizado para a terapia do câncer. Assim, tumores profundos podem ser destruídos ou regredidos sob a ação de feixes de radiação gama adequadamente aplicados. Como a intensidade do feixe decai exponencialmente com a espessura de tecido penetrado, a dose e a correspondente quantidade de dano produzido, é maior na superfície de entrada do que no ponto de localização do tumor. Isto irradiaria, com maior dose os tecidos de entrada e intermediário, desnecessariamente. Para minimizar isso, focaliza-se sempre o tumor, e aplica-se o feixe de radiação em diferentes direções, movendo o irradiador ou o paciente, de modo que a dose induza à morte as células do tumor e, o tecido sadio irradiado seja naturalmente repostado. O uso de raios X é

semelhante, com a diferença que se pode variar o poder de penetração da radiação e a intensidade de feixe.

Para tumores localizados em certas regiões do corpo é preferível utilizar fontes de radiação gama aplicadas diretamente sobre eles, numa técnica conhecida como Braquiterapia. Dependendo da situação, pode-se imbutir fontes perto do local afetado, como as antigas “agulhas” de rádio e as “sementes” de céσιο e cobalto.

## **2. Aplicações oftalmológica e dermatológica**

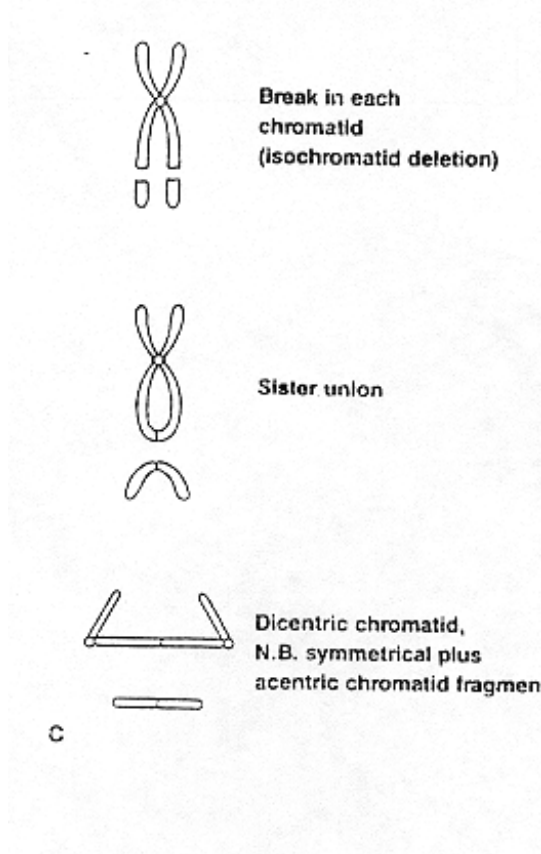
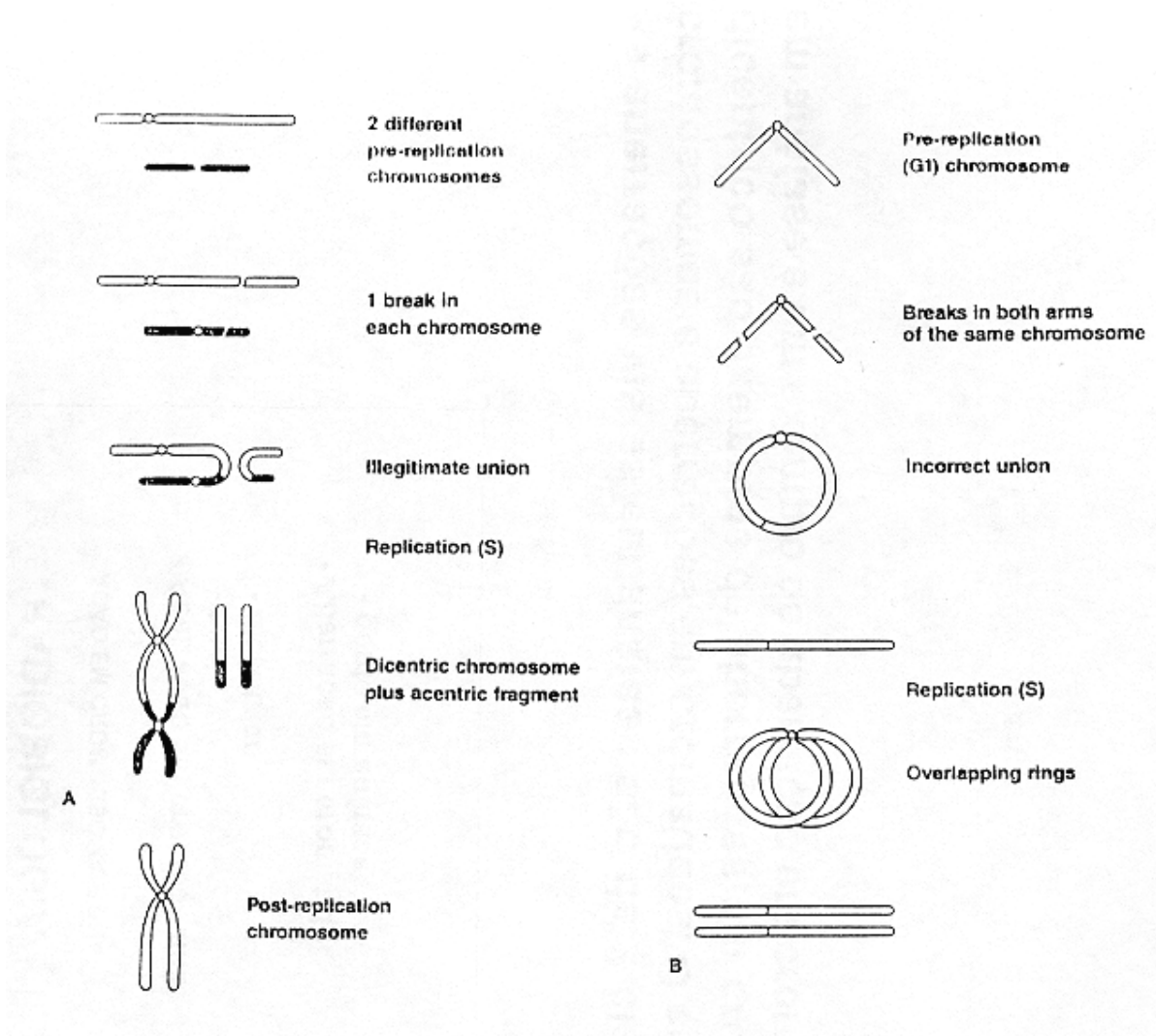
Em alguns tratamentos pós- cirúrgicos, pode ser utilizado um aplicador do tipo oftalmológico ou dermatológico, contendo um radioisótopo emissor beta puro, do tipo  $^{90}\text{Sr}$ , cujas radiações causam dano superficial devido à baixa penetração da radiação. Isto pode danificar um pouco a lente dos olhos ou a pele da pessoa mas, em compensação, o efeito de cauterização resultante pode acelerar a cicatrização, evitar a hemorragia ou a formação de queloides (cicatrizes indesejáveis).

## **Manifestação dos efeitos da radiação para doses elevadas**

### **1. Exposições acidentais com altas doses**

A exposição com feixes externos de radiação e, em alguns casos, com contaminação interna por radionuclídeos, pode resultar em valores elevados de dose absorvida, envolvendo partes do corpo ou todo o corpo. Estas exposições ocorrem em situações de acidente, envolvendo fontes radioativas de alta atividade ou feixes de radiação intensos produzidos por geradores de radiação ionizantes, como aceleradores de partícula, reatores e máquinas de raios X. Como resultado destas exposições o organismo humano desenvolve reações biológicas que podem se manifestar sob a forma de sintomas indicativos de alterações profundas provocadas pela radiação, conhecida como Síndrome de Irradiação Aguda.

Na análise microscópica do organismo humano, percebe-se que muitas células tiveram, entre outros danos, seus cromossomos atingidos e, algumas células exibem aberrações cromossômicas. Estas aberrações cromossômicas podem ser observadas com auxílio de um microscópio óptico, após devido procedimento de cultura biológica, separação e tratamento do material amostrado para análise, por exemplo, o sangue. As formas mais características de aberrações produzidas são os denominados cromossomas dicêntricos e em forma de anel. Os dicêntricos são formados pela emenda aleatória de dois cromossomos mutilados pela radiação, cada um contribuindo com um centro. Os anéis aparecem quando um cromossomo é cortado nas duas extremidades, e elas se ligam formando um anel. A frequência relativa de dicêntricos e anéis depende da dose, da energia da radiação e do tipo de radiação. Na figura a seguir são apresentados os passos na formação de dicêntricos por irradiação.



## 2. Exposição externa localizada

As lesões mais severas produzidas por exposições localizadas e de doses altas são resumidamente:

- a. Lesões na pele:
  - eritema precoce
  - queda de pelos e cabelos
  - radiodermite
  - necrose ( $D > 25\text{Gy}$ )
- b. Lesões no olho:
  - ocorre para  $D > 2\text{Gy}$
- c. Lesões nas gônadas :
  - Homem: - esterilidade temporária  $D > 0.3\text{Gy}$   
- esterilidade definitiva  $D > 5\text{Gy}$
  - Mulher: - alterações provisórias na fecundidade  $D > 3\text{Gy}$   
- esterilidade  $5 < D < 8\text{Gy}$
- d. Lesão no feto:
  - efeitos em função da dose e idade do feto.

## 3. Síndrome de Irradiação Aguda

O conjunto e a sucessão de sintomas que aparecem em vítimas de acidentes envolvendo doses elevadas de radiação é denominado de Síndrome de Irradiação Aguda. Os sistemas envolvidos são o circulatório, particularmente o tecido hematopoiético, o gastrointestinal e o sistema nervoso central. Os valores de dose e os sintomas podem ser simplificados conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Síndrome de Irradiação Aguda.

FORMA	DOSE ABSORVIDA	SINTOMAS
Infra - clínica	$< 1\text{Gy}$	Ausência de sintomas, na maioria dos indivíduos
Reações leves generalizadas	1 a 2Gy	Astenia, Náuseas, Vômitos, de 3 a 6 horas após a exposição efeitos desaparecendo em 24h.
Síndrome Hematopoiética Leve	2 a 4Gy	Depressão da função medular (linfopenia, leucopenia, trombopenia, anemia). Máximo em 3 semanas após a exposição e voltando ao normal em 4 a 6 meses.
Síndrome Hematopoiética Grave	4 a 6Gy	Depressão severa da função medular
Síndrome do sistema gastro-intestinal	6 a 7Gy	Diarréia, vômitos, hemorragia
Síndrome Pulmonar	6 a 10Gy	Insuficiência respiratória aguda
Síndrome do Sistema Nervoso Central	10Gy ou mais	Coma e morte, horas após a exposição.

A dose letal média fica entre 4 e 4.5Gy. Isto significa que, de 100 pessoas irradiadas com esta dose, metade morre.

Na tabela 2 são apresentados o índice de sobrevivência, o tempo de manifestação e os sintomas.

Tabela 2. Síndrome de Irradiação Aguda e tempo de manifestação dos sintomas

<b>SOBREVIVÊNCIA:</b>	Provável	Possível	Improvável
Dose Absorvida:	Moderada(1- 3Gy)	Meio letal(4 -7Gy)	Letal (>8Gy)
Semanas após a exposição	<b>SINTOMAS</b>		
1	Fase latente, nenhum sintoma definido	Náusea, vômito	Náusea, vômito, diarreia, garganta inflamada, úlcera, febre, emagrecimento rápido e morte
2		Depilação, perda de apetite, indisposição, garganta dolorida, diarreia, emagrecimento e morte	
3 4	Depilação, perda de apetite, indisposição, garganta dolorida, diarreia, emagrecimento moderado		

## Utilidades da radiação ionizante

A radiação ionizante é utilizada na pesquisa, indústria, agricultura e medicina.

Na indústria, de uma maneira geral, utiliza-se radiação ionizante para controle de qualidade. Exemplo: através da gamagrafia pode-se checar se uma peça de metal produzida apresenta alguma falha; determinar a espessura de tecido ou papel, etc.

A agricultura faz uso da radiação para conservação de alimentos.

Em medicina é utilizado no diagnóstico, bem como na terapia.

Os principais locais no Hospital das Clínicas de Ribeirão Preto, onde se faz uso de radiação ionizante são:

- Radiodiagnóstico: as fontes são aparelhos de raios X de diversos modelos e funções, exemplo: tomógrafo, aparelhos portáteis, etc. ;
- Radioterapia: acelerador linear, aparelhos de cobalto, aparelhos de raios X e fontes para implantes para pacientes com câncer no colo do útero;
- Medicina Nuclear: utilização de radioisótopos líquidos para marcação in vivo e in vitro.

## Radioproteção

Os aparelhos que servem para medir dose de radiação são chamados “dosímetros” e todas as pessoas que trabalham com radiação e que tenham a probabilidade de receber 1/3 do limite anual estabelecido para o trabalhador com radiação deve receber e utilizar o dosímetro pessoal, que é o dispositivo que permite saber o quanto de radiação o funcionário recebeu e se esta quantidade está ou não de acordo com as normas estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

A radioproteção utiliza basicamente três maneiras para proteger as pessoas dos possíveis riscos que podem prover da radiação. São elas: **tempo, blindagem e distância**, e que devem ser usados com coerência.

Todos os procedimentos em radioproteção envolvem combinações destes fatores de redução de dose ou pelo menos um deles. Exemplos: aventais de chumbo, biombo de chumbo, e outros protetores individuais e coletivos. Caso seja necessária a presença de um funcionário perto de uma fonte de radiação deverá utilizar avental de chumbo e eventualmente luva de chumbo.

## Controle do tempo de exposição

Quanto menor o tempo perto de uma fonte radioativa, menor será a dose recebida. A dose total recebida é igual a taxa de dose multiplicada pelo tempo de exposição:

$$\text{Dose} = \text{Taxa de Dose} \times \text{Tempo}$$

Portanto, para uma dada taxa de dose, quanto menor o tempo que um trabalhador permanece na área, menor será a dose que ele receberá.

Exemplo:

Um trabalhador com radiação pode receber até 50mSv por ano, o que corresponde a 1.04mSv/semana. Quantas horas por semana ele poderá permanecer em uma área onde a taxa de dose média é de 0.1mSv/hora ?

Solução: Dose = Taxa de Dose x Tempo

$$1.04 = 0.1 \times T, \text{ então: } T = 10.4 \text{ horas.}$$

## **Blindagem**

A blindagem é um material que é colocado entre a fonte e a pessoa a ser irradiada, e quanto mais espesso, menor é a dose recebida. Pode ser de vários tipos de materiais: chumbo, concreto, ferro, etc. ).

## **Controle da distância da fonte ao trabalhador**

A dose de radiação varia com o inverso do quadrado da distância da fonte:

$$I_o d_o^2 = I_f d_f^2$$

Onde:

$I_o$  = nível inicial de radiação

$d_o$  = distância inicial

$I_f$  = nível final de radiação

$d_f$  = distância final

Assim, a intensidade da radiação se reduz com o quadrado da distância entre a fonte pontual e o ponto considerado. Desse modo, conhecendo-se a intensidade de radiação a uma determinada distância, pode-se calcular a distância adequada do trabalhador à fonte, a fim de que radiológica fique assegurada. Deve-se notar que dobrando a distância da fonte, se reduz a intensidade de radiação a  $1/4$  de seu valor original, triplicando-se a distância, se reduz a intensidade a  $1/9$ , etc.

Isto quer dizer que quanto mais longe da fonte, menor é a dose recebida.

Para radiação alfa ou beta, que percorrem um trajeto relativamente curto no ar, manter uma distância adequada poderá ser suficiente para garantir a proteção radiológica completa.

Se a radiação for gama, neutrons ou raios X e a fonte puntiforme, o nível de radiação varia proporcionalmente ao quadrado da distância.

Observação: Uma fonte é considerada puntiforme se o objeto irradiado estiver a uma distancia de no mínimo 3 vezes a maior dimensão da fonte. Se uma fonte não é puntiforme, então o nível de radiação não decresce tão rapidamente com a distância. A distância é utilizada em uma instalação fazendo-se um controle de acesso adequado às áreas com radiação e utilizando-se, em determinadas tarefas, ferramentas especiais (garras mecânicas, pinças, etc.).

Exemplo:

A taxa de dose, a uma distância de 2m de uma fonte gama é de 1mSv/hora. A que distância a taxa de dose seria 0.1mSv/hora?

Solução:  $I_o d_o^2 = I_f d_f^2$  e, portanto,  $d_f^2 = (I_o d_o^2) / I_f$ , logo,  $d_f^2 = 1 (2)^2 / 0.1 = 40$ , então  $d_f = 6.3m$ .

## **Objetivos da Proteção Radiológica :**

- Proteger a pessoa e seu ambiente dos efeitos nocivos das radiações ionizantes e das substâncias radioativas e ao mesmo tempo possibilitar aos seres humanos desfrutar todos os benefícios que se podem originar do uso de energia atômica.
- Evitar a ocorrência de efeitos determinísticos.
- Limitar a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos a níveis aceitáveis.



Para atingir esses objetivos a Norma CNEN – 3.01 baseada na ICRP 60 recomenda um Sistema de Limitação de Doses cujos princípios básicos são:

- Princípio da Justificação – qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas e produzir um benefício líquido positivo para a sociedade.  
Em outras palavras: toda exposição desnecessária à radiação deve ser evitada. Por exemplo, um exame médico com raios X deve ser feito apenas se existe razão para acreditar que a informação resultante ajudará no diagnóstico de uma doença ou fratura.
- Princípio da Otimização – o projeto, o planejamento do uso e a operação de instalação e de fontes de radiação devem ser feitos de modo a garantir que as exposições sejam tão reduzidas quanto razoavelmente exequível, levando-se em consideração fatores sociais e econômicos (Princípio Alara).
- Princípio da Limitação da Dose Individual - as doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente estabelecidos em normas.

## Equipamento de Raios-X e Acessórios

- Equipamento de RX:  
(convencional)
- 1-Tubo de raios-X
  - 2-Carçaça ('housing')
  - 3-Filtro
  - 4-Colimador
  - 5-Mesa ("Bucky" ou estativa)
  - 6-Grade
  - 7-Gerador
  - 8-Sistema receptor de imagem (filme-ecran)

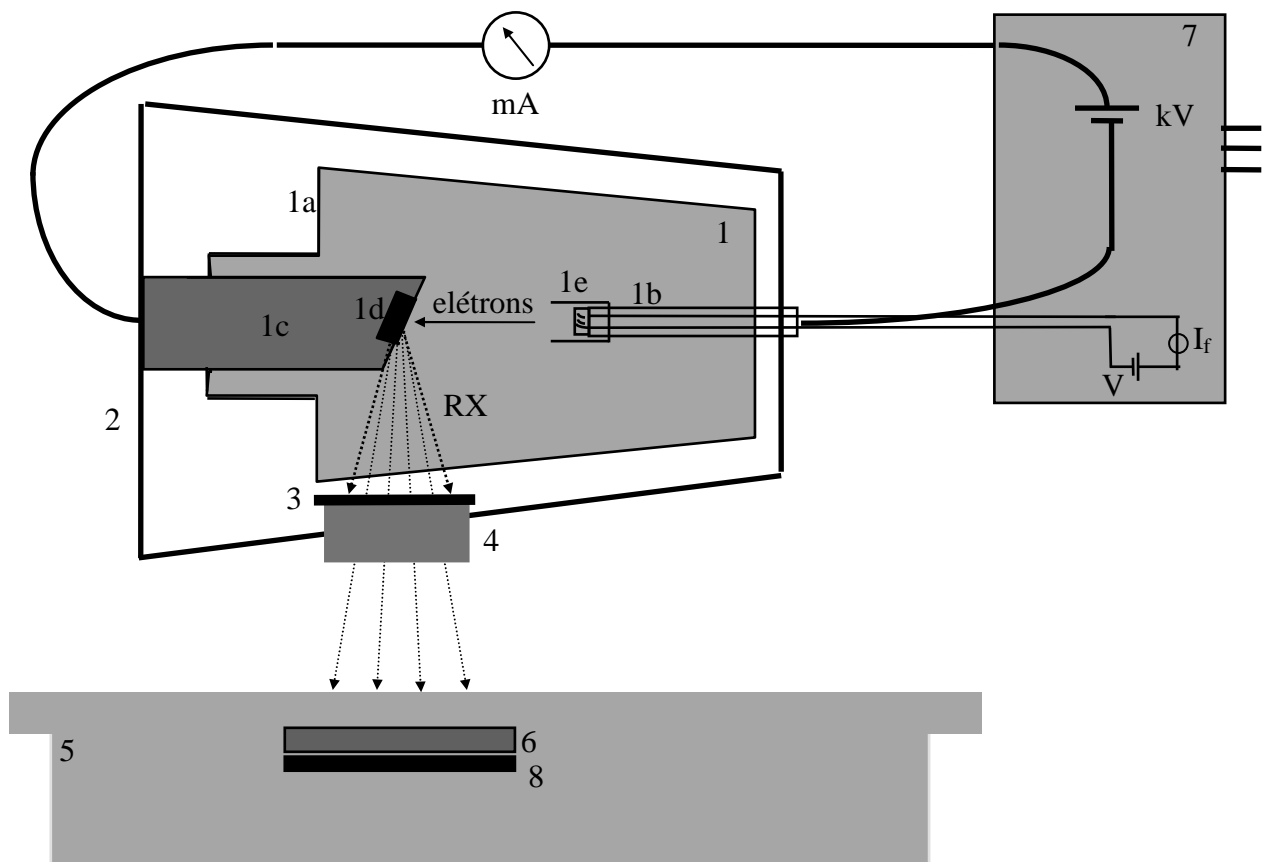


Fig.1) Esquema de um equipamento de RX: 1- tubo de RX; 2 - carçaça; 3 - filtro; 4 - colimador; 5 - mesa; 6 - grade; 7 - gerador; 8 - sistema receptor de imagem (filme-ecran); 1a - invólucro de vidro; 1b - cátodo; 1c - ânodo; 1d - alvo; 1e - capa focalizadora; kV- alta tensão aplicada entre o ânodo e o cátodo, responsável pela aceleração dos elétrons; mA - corrente elétrica através do circuito de alta tensão, controlada pela corrente ( $I_f$ ) do circuito do filamento (cátodo), de baixa tensão ( $V_f$ ).

kVp: valor máximo (de pico) da alta tensão, que determina a energia máxima dos elétrons e, conseqüentemente, a energia máxima do espectro de RX ( $E_{máx}$ ).

mAs: produto da corrente do tubo (mA) pelo tempo de exposição (s); corresponde à quantidade de elétrons que atinge o alvo e, conseqüentemente, influi na intensidade (altura) do espectro de RX.

- 1- Tubo de RX: {
- a) invólucro de vidro (pirex), dentro do qual existe vácuo.
  - b) cátodo (-) ou filamento (W), em forma de espiral, emissor de elétrons, por efeito termoiônico; o foco grosso e o foco fino correspondem a um filamento maior e outro menor, respectivamente.
  - c) ânodo (+): peça metálica (Cu), que dissipa o calor gerado no alvo.
  - d) alvo: pequena chapa metálica (materiais de Z, C e  $T_{\text{fusão}}$  altos: W, Mo, ligas W-Rh), fixa no ânodo, sobre a qual incidem os elétrons vindos do cátodo e onde são produzidos os RX.
  - e) capa focalizadora: dispositivo em forma de xícara,

Efeito termoiônico: emissão de elétrons do filamento quando ele é aquecido pela alta corrente elétrica ( $I_f$ ) do circuito do filamento (baixa voltagem).

Ponto focal: área do alvo bombardeada pelo feixe de elétrons, onde é produzido o feixe útil. Há também RX produzidos fora do ponto focal.

Ponto focal aparente ou efetivo: é a projeção do ponto focal real no plano do receptor de imagem (filme); sua maior dimensão varia de 0,2 a 2 mm, dependendo da largura do feixe de elétrons (“z”) e da angulação do ânodo ( $6$  a  $20^\circ$ ).

ponto focal maior  $\Rightarrow$  maior vida do tubo  
 ponto focal aparente menor  $\Rightarrow$  melhor imagem }  $\Rightarrow$  Ânodo giratório.  
 Princípio do foco linear.

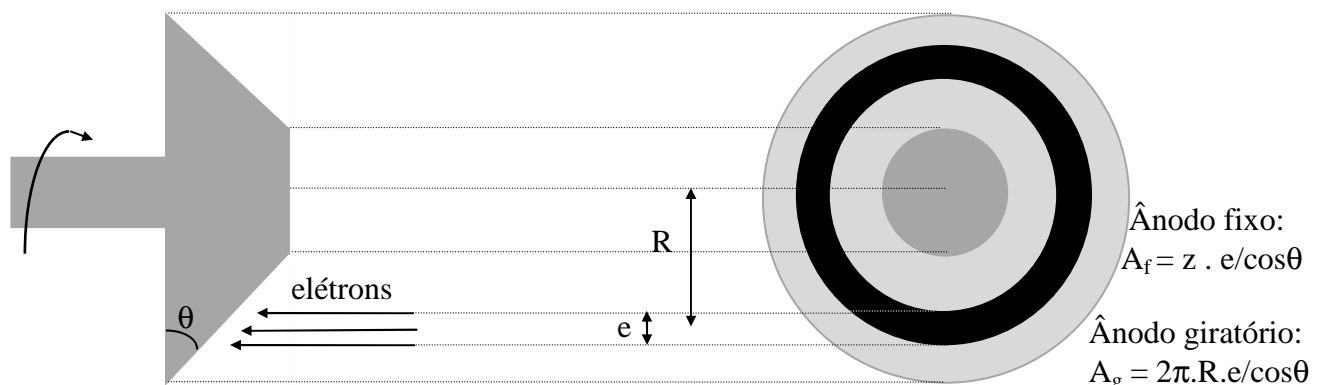


Fig. 2) Ilustração de um ânodo giratório (3000 rpm) e do correspondente aumento da área bombardeada pelos elétrons, razão porque ele suporta exposições mais longas e sua vida útil é aumentada. O feixe de elétrons possui uma seção transversal de área igual a “e.z”. A dimensão “z” refere-se à direção perpendicular ao papel.

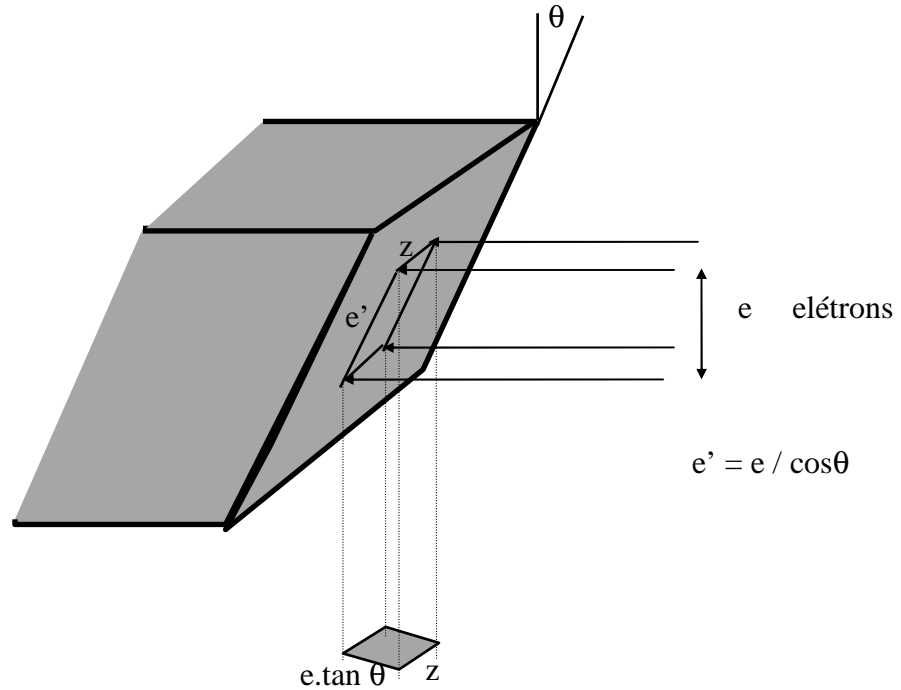


Fig. 3) Princípio do foco linear: forma de se obter, devido à angulação do ânodo, um ponto focal aparente muito pequeno (“z” x “e.tanθ”), a partir de um ponto focal real maior (“z”x “e/cosθ”). Quanto menor o ângulo de inclinação do ânodo, menor é o ponto focal aparente para um mesmo ponto focal real.

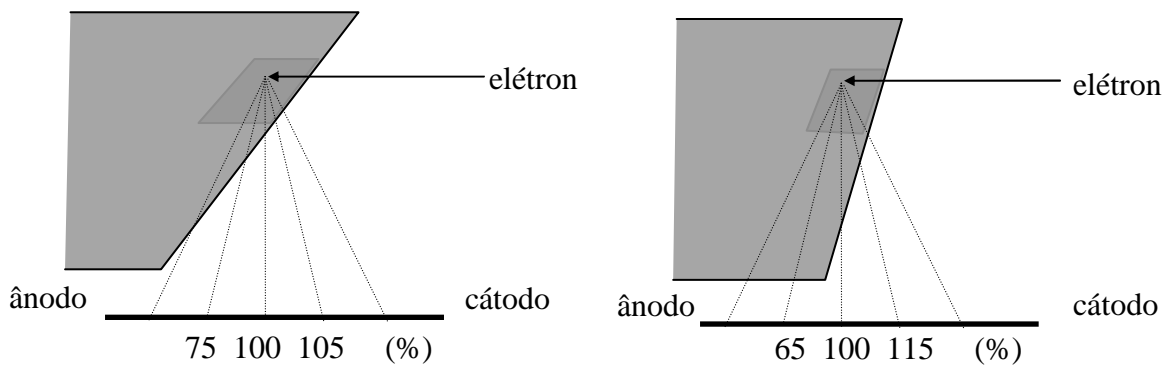


Fig. 4) Ilustração do efeito anódico, ou seja, variação da intensidade do feixe de RX na direção do eixo ânodo-cátodo. A intensidade no lado do ânodo é menor, devido à absorção dos RX pelo próprio ânodo. Quanto menor o ângulo de inclinação do ânodo, maior será o efeito anódico, o que limita a escolha de ângulos de inclinação muito pequenos, conforme seria conveniente para reduzir o ponto focal aparente. Quanto maior a distância foco-filme, menor será a influência do efeito anódico sobre a radiografia. A menor intensidade de radiação no lado do ânodo pode ser aproveitada posicionando-se o paciente de tal forma que as regiões menos espessas fiquem deste lado.

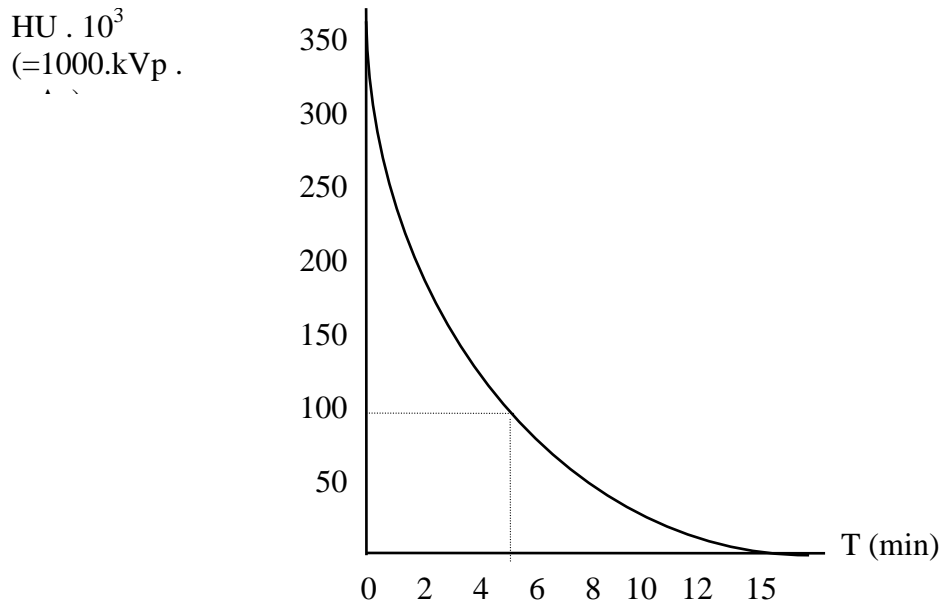


Fig. 5) Carta de resfriamento típica de um ânodo de um tubo de RX, ilustrando o tempo requerido para que o ânodo aquecido resfrie completamente. Por exemplo, se num certo exame radiográfico, são produzidos 100000 HU, são necessários 10 minutos (15 - 5) para o resfriamento total do ânodo. Há também uma carta de resfriamento para a carcaça, cuja utilização é semelhante.

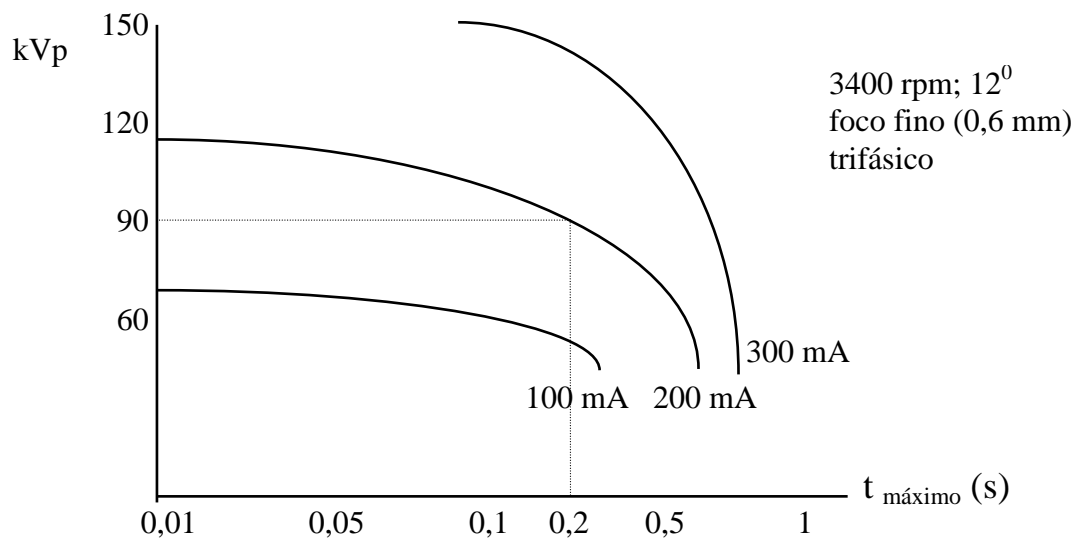


Fig. 6) Carta radiográfica típica de um tubo de RX, para uma determinada velocidade de rotação do ânodo, um tamanho de ponto focal, uma angulação do ânodo e um tipo de gerador (monofásico ou trifásico). Qualquer combinação de kVp e tempo, para uma certa mA, que se encontrar abaixo da referida curva de mA poderá ser utilizada com segurança. Por exemplo, para 200 mA e 90 kVp, o máximo tempo permitido é 0,2 s.

- 2 - Carcaça: {
- a) suporte do tubo de RX, filtro, colimador, cabos elétricos, etc.;
  - b) blindagem da radiação não útil;
  - c) dissipação do calor produzido no tubo;
  - d) isolamento elétrico dos cabos de alta voltagem (preenchido com óleo: isolante elétrico e térmico).

- 3- Filtro: {
- a) Filtro inerente: materiais, tais como o vidro (ou berílio, em mamografia), óleo, espelhos, etc, atravessados pelo feixe primário (útil) de RX. Varia entre 0,5 e 1,0 mm de Al.
  - b) Filtro adicional: placa metálica, geralmente de Al ou Cu, colocada no caminho do feixe primário, com o objetivo de atenuar preferencialmente os fótons de baixa energia, para reduzir a dose absorvida pelo paciente.
  - c) Filtro total = inerente + adicional; possui valor mínimo recomendado por legislação (0,5 mm Al, p/  $kVp < 50$  kV; 1,5 mm Al, p/  $50 \leq kVp \leq 70$  kV; 2,5 mm Al, p/  $kVp > 70$  kV).
  - d) Filtro adicional ajustável: placas metálicas (Al ou Cu) que podem ser colocadas no caminho do feixe primário, quando for desejado.

Energia (keV)	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al
10	100	100	100
20	58	82	92
30	24	42	56
40	12	23	32
50	8	16	22

Tab. 1) Porcentagem de atenuação de radiação monoenergética para filtros de alumínio.

Filtro (mm Al)	Exposição (mR)	Redução da exposição (%)
0	2380	
0,5	1850	22
1,0	1270	47
3,0	465	80

Tab. 2) Exposição na pele em radiografias (60 kVp) de um fantom pélvico (18 cm de espessura) de densidades ópticas comparáveis, em função do filtro total.

- 4- Colimador: {
- a) dispositivo colocado na saída da carcaça para limitar o tamanho e a forma do campo de radiação.
  - b) contribui para a redução da dose absorvida pelo paciente.
  - c) contribui para a redução da radiação espalhada que atinge o filme.
  - d) Há três tipos:
    - diafragma: placa de Pb com um orifício central;
    - cone e cilindro: dispositivo de Pb em formato cônico ou cilíndrico;
    - colimador variável: 4 ou mais chapas de chumbo cujas posições são variáveis, permitindo escolher campos de radiação retangulares (e até circulares) de diversos tamanhos; possui também um campo de luz que simula o campo de radiação.

- a) Plataforma de madeira sobre a qual posiciona-se o paciente.
- b) Possui gaveta onde se coloca o chassis (tela intensificadora com filme).
- c) Serve também de suporte para a grade.
- d) Pode ser horizontal ("Dual") ou vertical (estativo).

5- Mesa: {

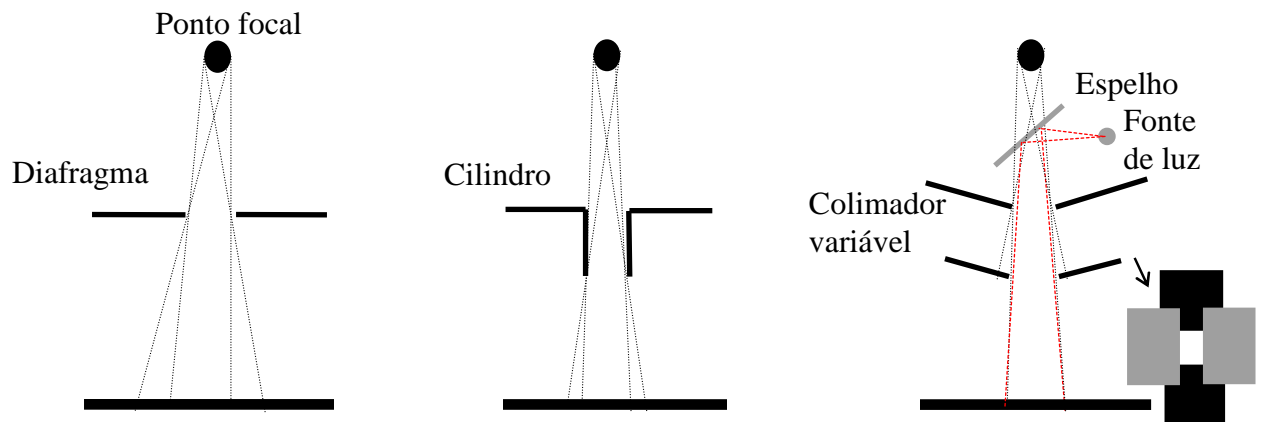


Fig. 7) Ilustração da penumbra existente para diferentes tipos de colimadores. Atualmente, é mais comum o colimador de abertura variável, o qual possui um campo de luz coincidente com o campo de radiação, além de produzir uma penumbra reduzida.

6-

- a) dispositivo constituído de folhas finas de chumbo sustentadas por um material rígido transparente aos RX, localizado entre o paciente e o sistema receptor de imagem;
- b) função: evitar que a radiação espalhada pelo paciente atinja o sistema receptor de imagem, melhorando, assim, o contraste da imagem;
- c) Desvantagens:
  - redução da intensidade do feixe primário (útil) que atinge o filme e portanto, aumento da dose absorvida pelo paciente;
  - necessidade de alinhamento do tubo de raios-X com
- d) a grade pode ser:
  - estacionária:
  - móvel: vibra durante a exposição a fim de tornar a imagem uniforme, ou melhor, sem as sombras das folhas de chumbo.
  - lineares: folhas de chumbo em apenas uma direção;
  - cruzadas: folhas de chumbo em duas direções perpendiculares (cruzadas).
  - paralela: as folhas de chumbo são paralelas;
  - focalizada: as folhas de chumbo convergem para um mesmo ponto (cruzadas) ou linha (lineares).
- e) Boa escolha:
  - abaixo de 90 kVp:  $r = 8$ ;
  - acima de 90 kVp:  $r = 12$ .

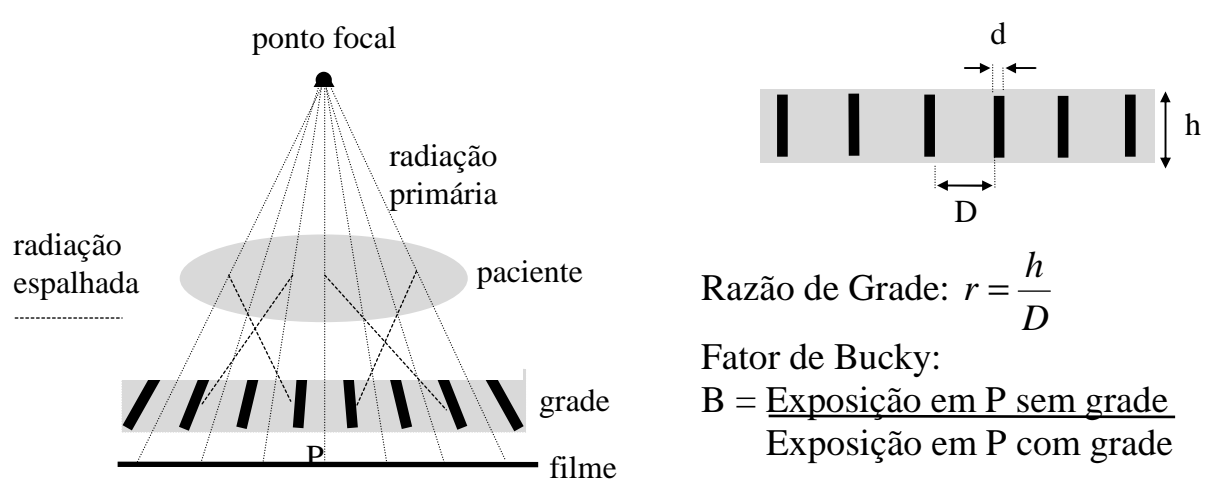


Fig. 8) Ilustração de uma grade linear focalizada e de uma grade paralela com os principais fatores que a caracterizam.

razão de grade	Fator de Bucky	Contraste	Dose
5	3	menor	meno



			r
8	3,5		
12	4	maior	maior

Tab. 3) Valores típicos do fator de Bucky (para 70 kVp) em função da razão de grade e comportamento do contraste da imagem e da dose no paciente.

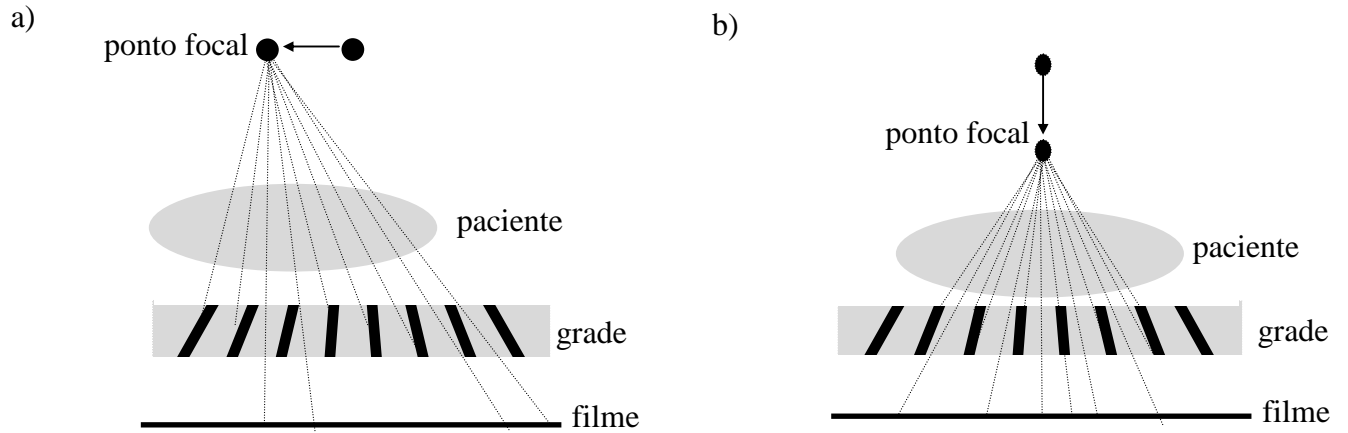


Fig. 9) Ilustração do corte de radiação primária causado por uma grade focalizada, devido ao desalinhamento lateral (a) e ao desalinhamento vertical (b) entre o ponto focal e a grade.

7 - Gerador:

- a) Painel de controle:
  - ligar e desligar o equipamento;
  - fazer girar o ânodo;
  - selecionar a kVp (autotransformador), a corrente do tubo (mA), o tempo de exposição e iniciar a exposição;
  - outras funções (técnicas programadas, foco F ou G, etc.).
  
- b) Transformadores:
  - a) dispositivo eletrônico, constituído basicamente de duas bobinas e um núcleo de ferro, utilizado para aumentar ou diminuir a voltagem em um circuito.
  - b) Transformador de baixa voltagem: fornece energia elétrica com baixa voltagem (10 V) e alta corrente (3 a 5 A) para o circuito do filamento; controla a corrente do tubo (mA).
  - c) Transformador de alta voltagem: fornece energia elétrica com alta voltagem (kVp) e baixa corrente (mA) para o circuito de alta voltagem (ânodo-cátodo); controla a kVp.
  
- c) Retificadores:
  - dispositivos eletrônicos que transformam voltagem (e corrente) alternada em voltagem (e corrente) contínua (apenas em um sentido);
  - podem ser de meia onda ou de onda completa.

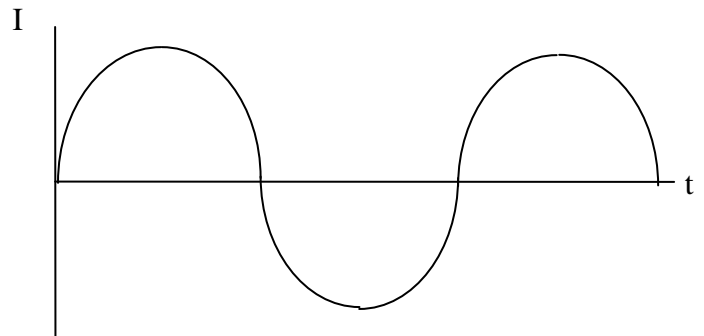
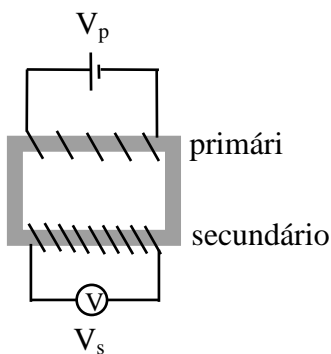


Fig. 10) Esquema básico de um transformador. A corrente alternada (variável com o tempo) através do circuito primário faz surgir um campo magnético (variável com o tempo) no núcleo, o qual induz uma corrente alternada no circuito secundário. A voltagem nos dois circuitos é proporcional ao número de voltas das duas bobinas:  $\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$ . A potência (em watts) de um transformador,  $P=I.V$ , é igual nos dois circuitos:  $P = V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$ .

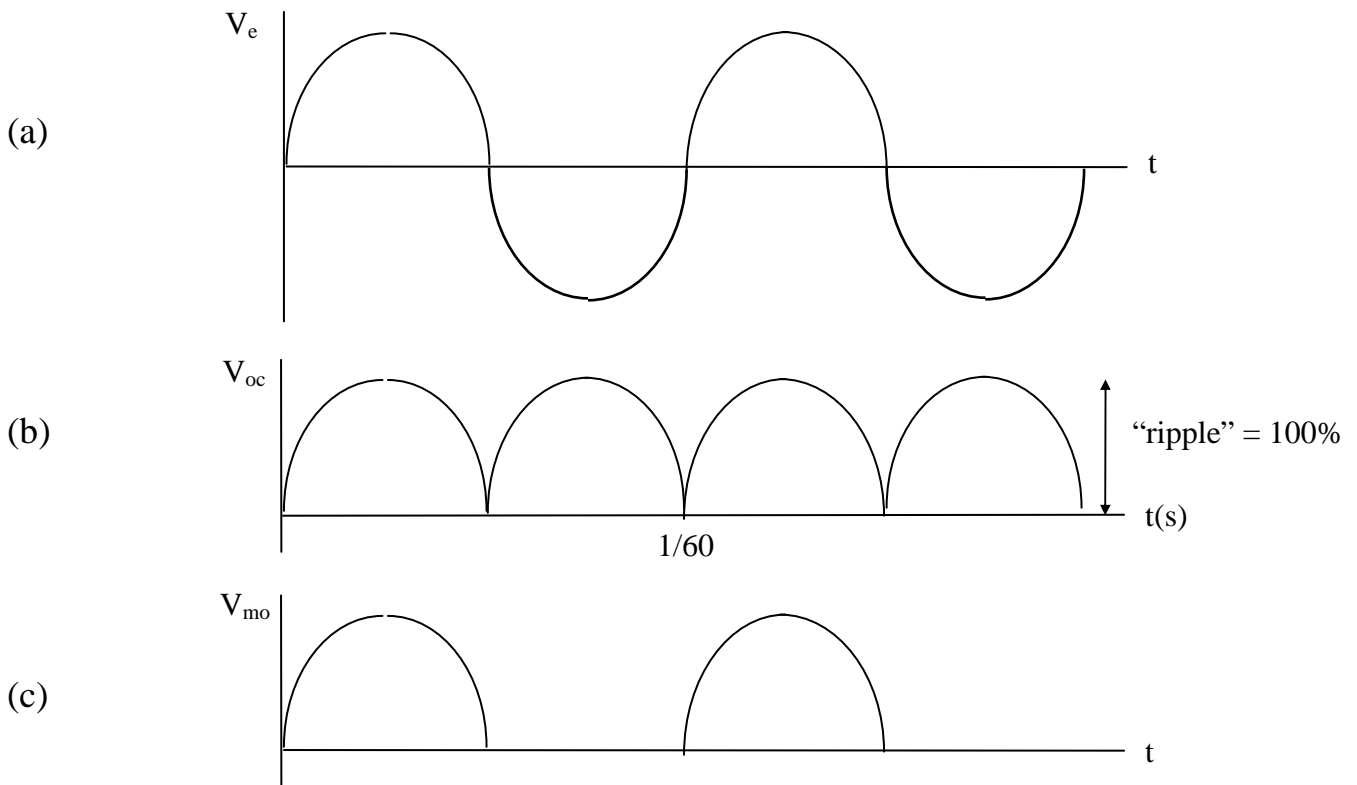


Fig. 11) Ilustração do efeito de um retificador de onda completa (curva b) e de um retificador de meia onda (curva c) sobre a voltagem de entrada (curva a). O fator de “ripple” ( $r = \frac{\Delta V}{V_{max}} \cdot 100$ ) mostrado vale para um gerador monofásico com retificação de onda completa (2 pulsos/ciclo).

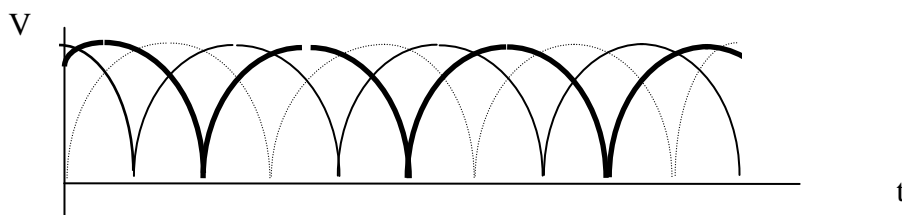


Fig. 12) Voltagem num gerador trifásico (6 pulsos/ciclo) com retificação de onda completa. A voltagem é quase constante ao longo do tempo ( $r \cong 13,5\%$ ), ao contrário dos geradores monofásicos, em que a voltagem (com retificação de onda completa) varia desde zero (0) até um valor máximo (kVp), conforme pode ser visto na figura anterior (curva b). Existem também geradores trifásicos com 12 pulsos/ciclo, em que  $r \cong 3,5\%$ , e geradores de alta frequência (convertem 60 Hz em 6500 Hz), com 13000 pulsos/seg, que produzem uma voltagem constante no tempo, portanto apresentam  $r \cong 0\%$ .

- Geradores de Potência Armazenada: encontrados geralmente em equipamentos móveis, que são utilizados onde a rede elétrica não é apropriada para equipamentos de raios-X. Eles são classificados em dois tipos: geradores com descarga de capacitores e geradores com baterias.

## Fatores que afetam o espectro de raios-X:

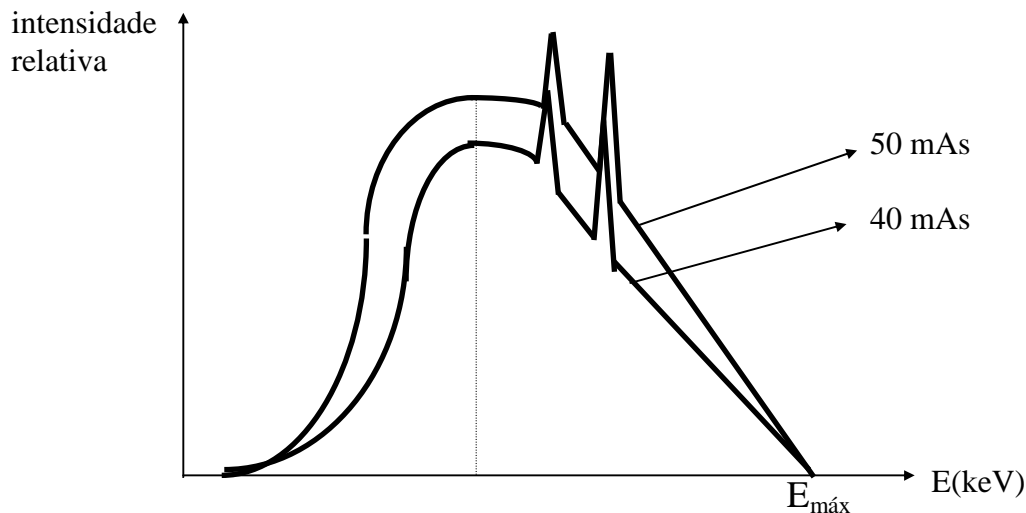


Fig. 13) Influência da mAs sobre o espectro de RX. A intensidade do espectro (ou número de fótons emitidos) é diretamente proporcional à mAs. A energia efetiva não depende da mAs.

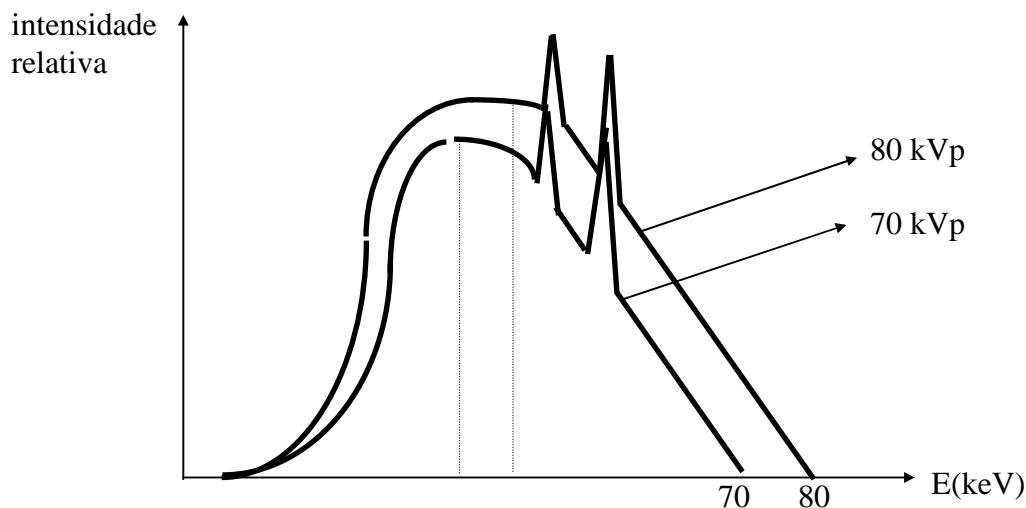


Fig.14) Influência da kVp sobre o espectro de RX. Além de determinar a energia máxima do espectro e, portanto, sua energia efetiva, a kVp influencia também a intensidade do espectro. A intensidade por mAs é (aproximadamente) diretamente proporcional ao quadrado da kVp.

Obs.: Para dobrar a intensidade do espectro, podemos dobrar a mAs ou aumentar a kVp de 41% ( $1.41^2=2$ ). No entanto, na prática, para se ter o mesmo grau de enegrecimento no filme, o equivalente a dobrar a mAs é aumentar a kVp de apenas 15%. Isto ocorre porque, aumentando a kVp, aumenta a energia do espectro, tornando o feixe mais penetrante, portanto, menos absorvido pelo paciente.

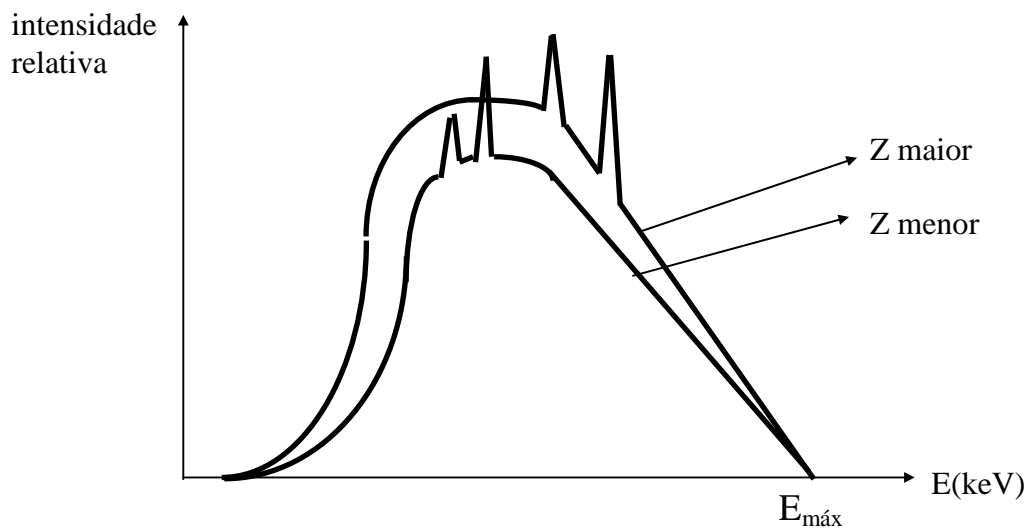


Fig.15) Influência do material do alvo sobre o espectro de RX. O espectro característico é modificado pois as energias de ligação das camadas eletrônicas envolvidas no processo dependem do material do alvo. As energias características e a intensidade do espectro total aumentam com o número atômico do material do alvo.

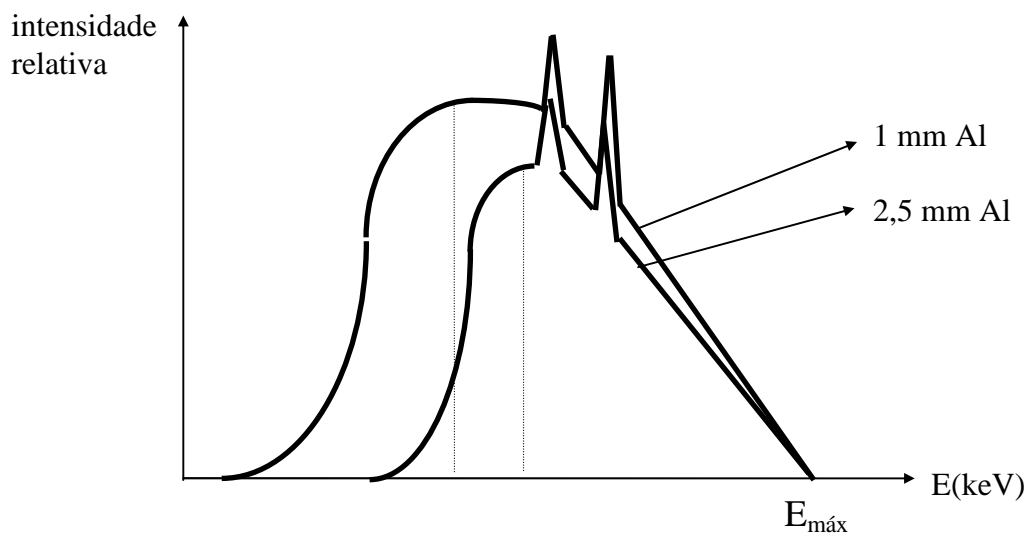


Fig.16) Influência do filtro sobre o espectro de RX. Ocorre uma redução na intensidade do espectro principalmente na região de baixa energia. Quanto maior o filtro, maior a energia efetiva do espectro.

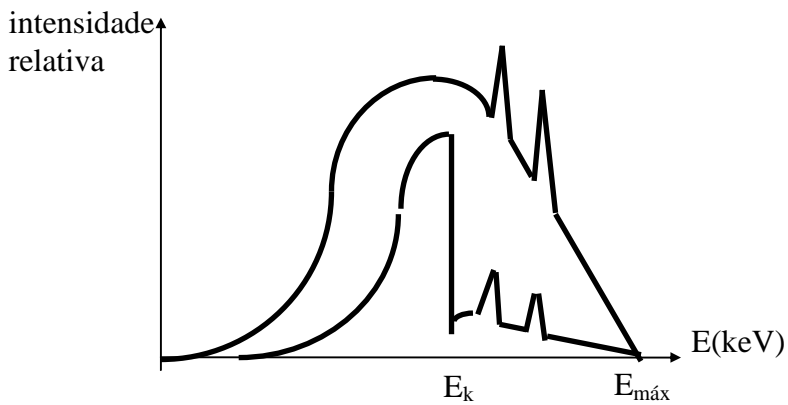


Fig. 17) Ilustração do efeito de um filtro com “K-edge” (energia  $E_k$ ) sobre um espectro de RX.

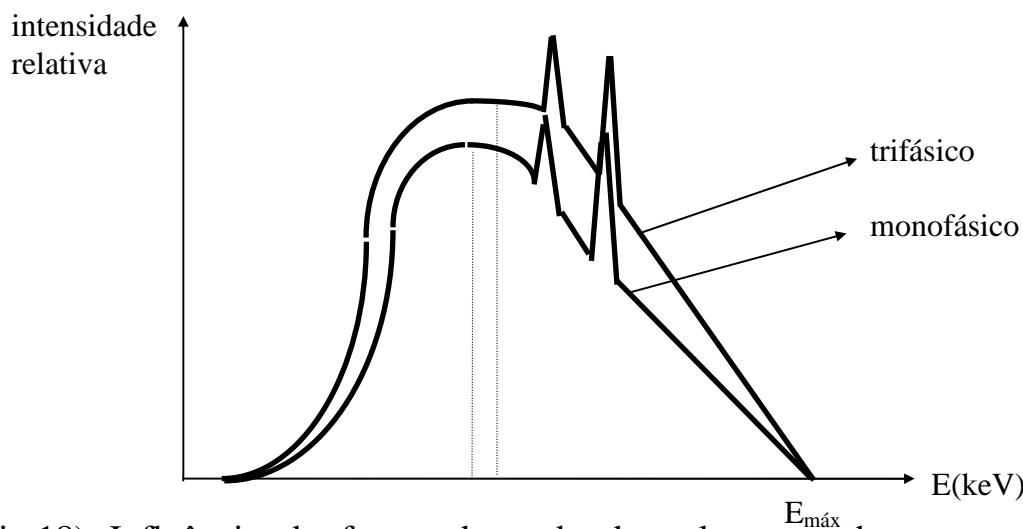


Fig.18) Influência da forma de onda da voltagem sobre espectro de RX. A intensidade do espectro e sua energia efetiva são maiores para geradores trifásicos; em sistemas monofásicos, as intensidades do espectro de raios-X variam com o tempo, desde 0 até seus valores máximos, o que não ocorre em sistemas trifásicos, em que as intensidades do espectro são praticamente constantes ao longo do tempo.

- **Controle do tempo de exposição:**

- Medidor mecânico: tempos maiores que 0,25 s;
- Medidor eletrônico: tempos maiores que 0,001 s;
- Controlador automático de exposição: evita erro humano na seleção do tempo de exposição; uma vez selecionada a kVp, há um dispositivo (câmara de ionização, detetor fotomultiplicador ou de estado sólido) que determina a quantidade de radiação necessária para se obter uma radiografia com densidade ideal.

- Carta térmica do tubo: caracterizar o tubo quanto à capacidade térmica de resistir a uma simples exposição, a uma série de exposições seguidas em um único exame e a múltiplas exposições durante horas de uso, para estabelecer o limite de segurança, dentro do qual o tubo pode operar.

A energia térmica produzida durante uma exposição é expressa em termos de unidade de calor (1 HU = mAs x kVp).

O termo kW de um tubo é definido a potência máxima (kVp x mA) que pode ser exigida do tubo para uma exposição de 0,1 s. (convenção).

Exemplos:

- Qual é a mA máxima que pode ser usada por um tubo de 35 kW a 70 kV?

$$70 \cdot \text{mA} = 35000 \Rightarrow \text{mA} = 500$$

- Podemos fazer um exame angiográfico (10 exposições em 10 s., cada uma utilizando 100 kVp, 500 mA e 0,1 s.) com determinado tubo?

$$\text{HU} = 500 \cdot 100 \cdot 0,1 = 5000 \Rightarrow \text{HU (10 expos.)} = 50000 \text{ (em 10 s.)}$$

Da curva de 100 kVp (ou outra qualquer): mA máxima em 10 s. é 100 mA. Portanto: HU máximo permitido (em 10 s.) =  $100 \cdot 100 \cdot 10 = 100000$ . Portanto, o exame pode ser feito.

- **Capacidade térmica de ânodo:**

Exemplos:

- Com um ânodo cuja capacidade térmica é 110000 HU (figura), um exame de fluoroscopia, utilizando 100 kVp e 5 mA (500 HU/s.), só pode durar 7 minutos, pois nesse tempo a capacidade térmica (110000) é atingida.

- Com o mesmo ânodo, um exame de fluoroscopia, utilizando 90 kVp e 3,8 mA (340 HU/s), pode ser realizado continuamente, sem danificar o ânodo.

## Equipamento de Raios-X e Acessórios

- Equipamento de RX:  
(convencional)
- 1-Tubo de raios-X
  - 2-Carçaça ('housing')
  - 3-Filtro
  - 4-Colimador
  - 5-Mesa ("Bucky" ou estativa)
  - 6-Grade
  - 7-Gerador
  - 8-Sistema receptor de imagem (filme-ecran)

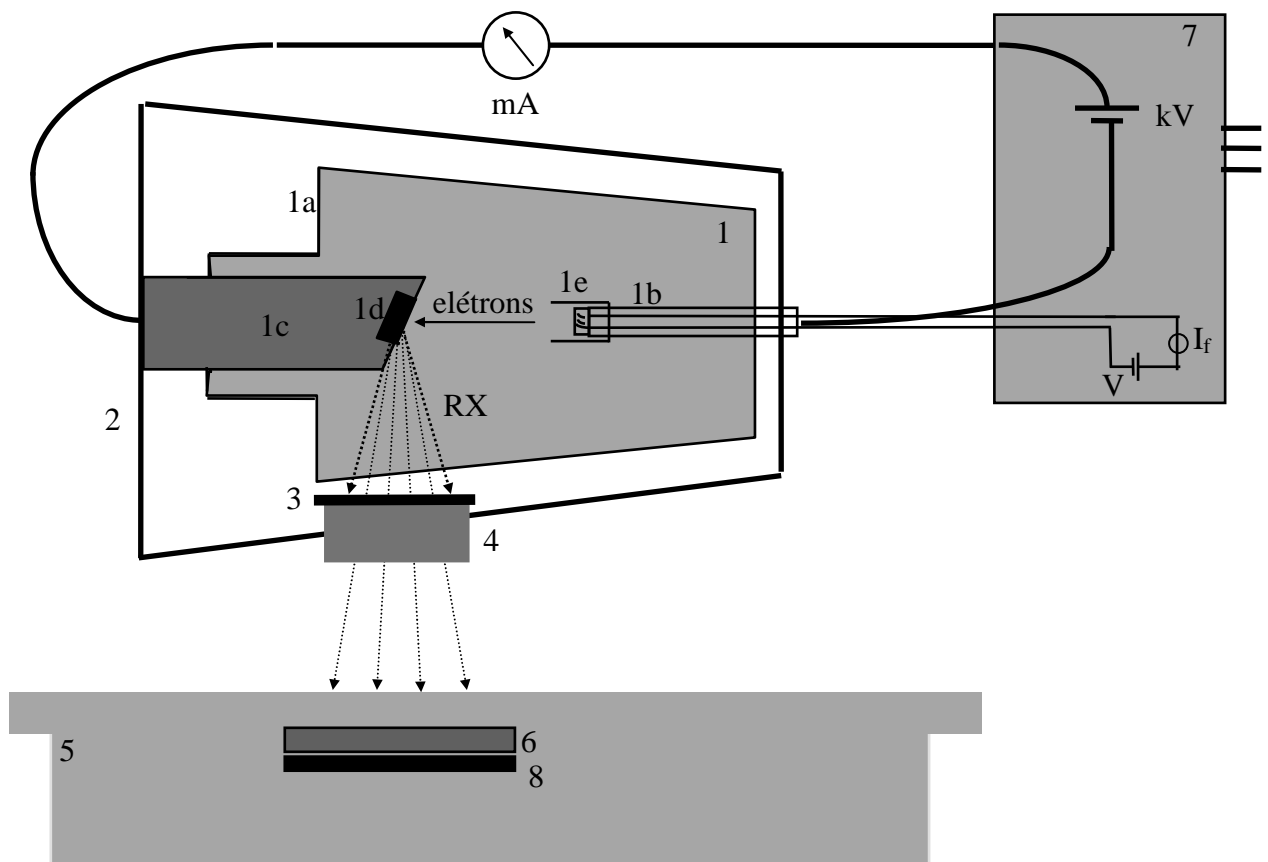


Fig.1) Esquema de um equipamento de RX: 1- tubo de RX; 2 - carcaça; 3 - filtro; 4 - colimador; 5 - mesa; 6 - grade; 7 - gerador; 8 - sistema receptor de imagem (filme-ecran); 1a - invólucro de vidro; 1b - cátodo; 1c - ânodo; 1d - alvo; 1e - capa focalizadora; kV- alta tensão aplicada entre o ânodo e o cátodo, responsável pela aceleração dos elétrons; mA - corrente elétrica através do circuito de alta tensão, controlada pela corrente ( $I_f$ ) do circuito do filamento (cátodo), de baixa tensão ( $V_f$ ).

kVp: valor máximo (de pico) da alta tensão, que determina a energia máxima dos elétrons e, conseqüentemente, a energia máxima do espectro de RX ( $E_{máx}$ ).

mAs: produto da corrente do tubo (mA) pelo tempo de exposição (s); corresponde à quantidade de elétrons que atinge o alvo e, conseqüentemente, influi na intensidade (altura) do espectro de RX.



- 1- Tubo de RX: {
- a) invólucro de vidro (pirex), dentro do qual existe vácuo.
  - b) cátodo (-) ou filamento (W), em forma de espiral, emissor de elétrons, por efeito termoiônico; o foco grosso e o foco fino correspondem a um filamento maior e outro menor, respectivamente.
  - c) ânodo (+): peça metálica (Cu), que dissipa o calor gerado no alvo.
  - d) alvo: pequena chapa metálica (materiais de Z, C e  $T_{\text{fusão}}$  altos: W, Mo, ligas W-Rh), fixa no ânodo, sobre a qual incidem os elétrons vindos do cátodo e onde são produzidos os RX.
  - e) capa focalizadora: dispositivo em forma de xícara,

Efeito termoiônico: emissão de elétrons do filamento quando ele é aquecido pela alta corrente elétrica ( $I_f$ ) do circuito do filamento (baixa voltagem).

Ponto focal: área do alvo bombardeada pelo feixe de elétrons, onde é produzido o feixe útil. Há também RX produzidos fora do ponto focal.

Ponto focal aparente ou efetivo: é a projeção do ponto focal real no plano do receptor de imagem (filme); sua maior dimensão varia de 0,2 a 2 mm, dependendo da largura do feixe de elétrons (“z”) e da angulação do ânodo ( $6$  a  $20^\circ$ ).

ponto focal maior  $\Rightarrow$  maior vida do tubo  
 ponto focal aparente menor  $\Rightarrow$  melhor imagem

}  $\Rightarrow$  **Ânodo giratório.**  
**Princípio do foco linear.**

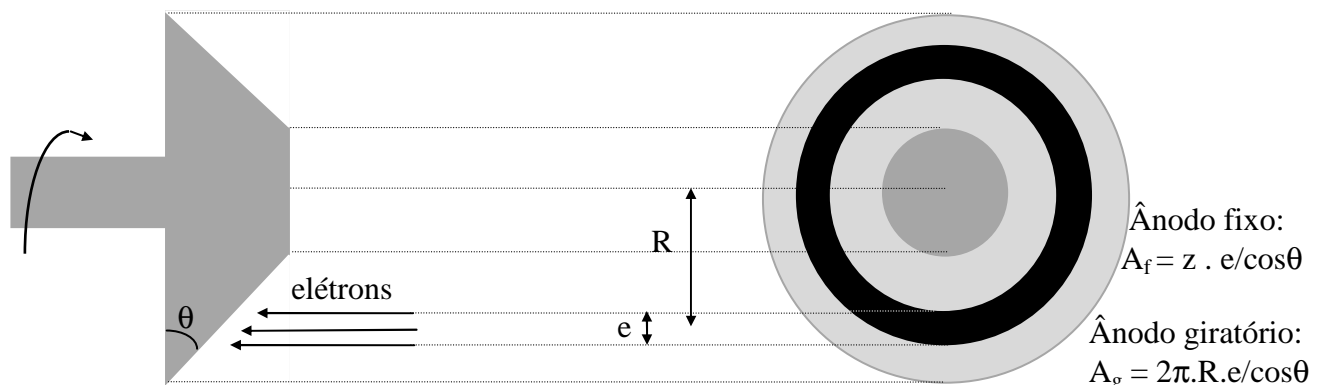


Fig. 2) Ilustração de um ânodo giratório (3000 rpm) e do correspondente aumento da área bombardeada pelos elétrons, razão porque ele suporta exposições mais longas e sua vida útil é aumentada. O feixe de elétrons possui uma seção transversal de área igual a “e.z”. A dimensão “z” refere-se à direção perpendicular ao papel.

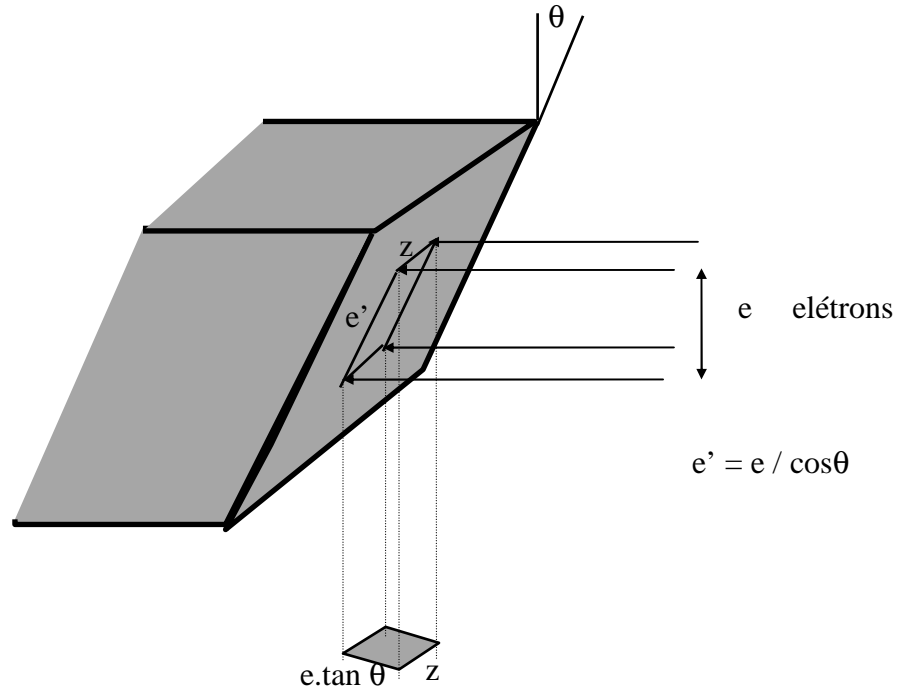


Fig. 3) Princípio do foco linear: forma de se obter, devido à angulação do ânodo, um ponto focal aparente muito pequeno (“z” x “e.tanθ”), a partir de um ponto focal real maior (“z”x “e/cosθ”). Quanto menor o ângulo de inclinação do ânodo, menor é o ponto focal aparente para um mesmo ponto focal real.

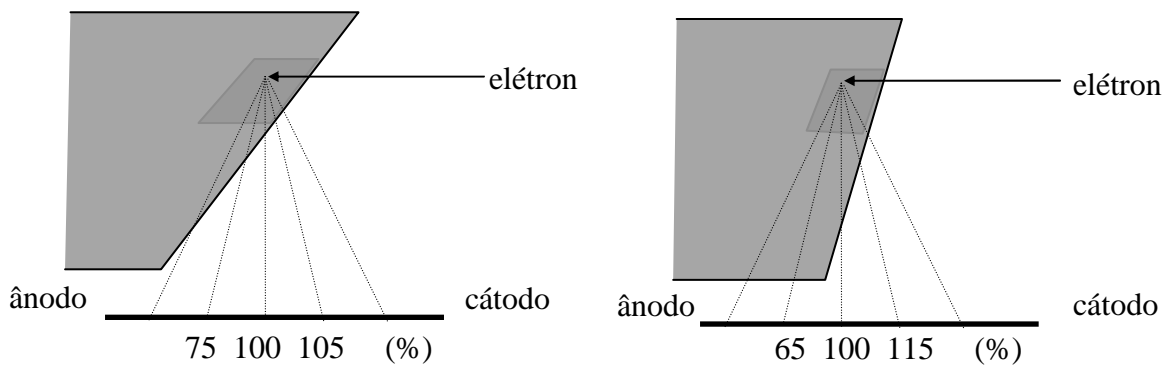


Fig. 4) Ilustração do efeito anódico, ou seja, variação da intensidade do feixe de RX na direção do eixo ânodo-cátodo. A intensidade no lado do ânodo é menor, devido à absorção dos RX pelo próprio ânodo. Quanto menor o ângulo de inclinação do ânodo, maior será o efeito anódico, o que limita a escolha de ângulos de inclinação muito pequenos, conforme seria conveniente para reduzir o ponto focal aparente. Quanto maior a distância foco-filme, menor será a influência do efeito anódico sobre a radiografia. A menor intensidade de radiação no lado do ânodo pode ser aproveitada posicionando-se o paciente de tal forma que as regiões menos espessas fiquem deste lado.

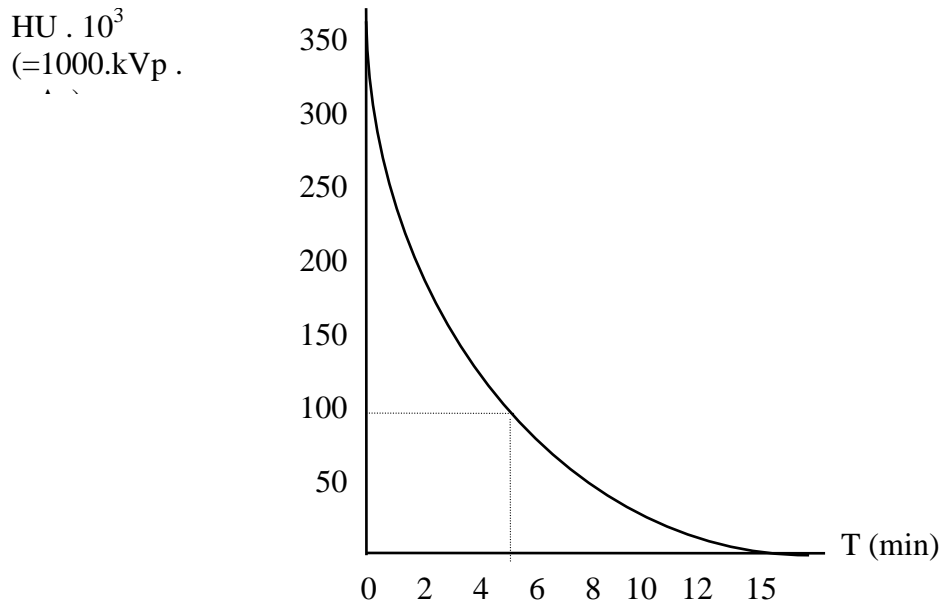


Fig. 5) Carta de resfriamento típica de um ânodo de um tubo de RX, ilustrando o tempo requerido para que o ânodo aquecido resfrie completamente. Por exemplo, se num certo exame radiográfico, são produzidos 100000 HU, são necessários 10 minutos (15 - 5) para o resfriamento total do ânodo. Há também uma carta de resfriamento para a carcaça, cuja utilização é semelhante.

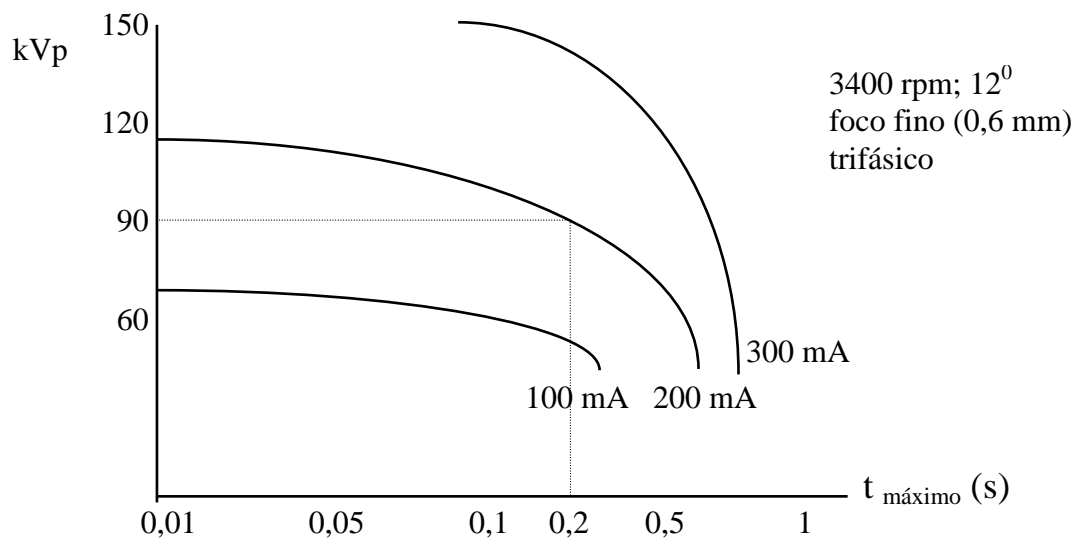


Fig. 6) Carta radiográfica típica de um tubo de RX, para uma determinada velocidade de rotação do ânodo, um tamanho de ponto focal, uma angulação do ânodo e um tipo de gerador (monofásico ou trifásico). Qualquer combinação de kVp e tempo, para uma certa mA, que se encontrar abaixo da referida curva de mA poderá ser utilizada com segurança. Por exemplo, para 200 mA e 90 kVp, o máximo tempo permitido é 0,2 s.

- 2 - Carcaça: {
- a) suporte do tubo de RX, filtro, colimador, cabos elétricos, etc.;
  - b) blindagem da radiação não útil;
  - c) dissipação do calor produzido no tubo;
  - d) isolamento elétrico dos cabos de alta voltagem (preenchido com óleo: isolante elétrico e térmico).

- 3- Filtro: {
- a) Filtro inerente: materiais, tais como o vidro (ou berílio, em mamografia), óleo, espelhos, etc, atravessados pelo feixe primário (útil) de RX. Varia entre 0,5 e 1,0 mm de Al.
  - b) Filtro adicional: placa metálica, geralmente de Al ou Cu, colocada no caminho do feixe primário, com o objetivo de atenuar preferencialmente os fótons de baixa energia, para reduzir a dose absorvida pelo paciente.
  - c) Filtro total = inerente + adicional; possui valor mínimo recomendado por legislação (0,5 mm Al, p/  $kVp < 50$  kV; 1,5 mm Al, p/  $50 \leq kVp \leq 70$  kV; 2,5 mm Al, p/  $kVp > 70$  kV).
  - d) Filtro adicional ajustável: placas metálicas (Al ou Cu) que podem ser colocadas no caminho do feixe primário, quando for desejado.

Energia (keV)	1 mm Al	2 mm Al	3 mm Al
10	100	100	100
20	58	82	92
30	24	42	56
40	12	23	32
50	8	16	22

Tab. 1) Porcentagem de atenuação de radiação monoenergética para filtros de alumínio.

Filtro (mm Al)	Exposição (mR)	Redução da exposição (%)
0	2380	
0,5	1850	22
1,0	1270	47
3,0	465	80

Tab. 2) Exposição na pele em radiografias (60 kVp) de um fantom pélvico (18 cm de espessura) de densidades ópticas comparáveis, em função do filtro total.

- 4- Colimador: {
- a) dispositivo colocado na saída da carcaça para limitar o tamanho e a forma do campo de radiação.
  - b) contribui para a redução da dose absorvida pelo paciente.
  - c) contribui para a redução da radiação espalhada que atinge o filme.
  - d) Há três tipos:
    - diafragma: placa de Pb com um orifício central;
    - cone e cilindro: dispositivo de Pb em formato cônico ou cilíndrico;
    - colimador variável: 4 ou mais chapas de chumbo cujas posições são variáveis, permitindo escolher campos de radiação retangulares (e até circulares) de diversos tamanhos; possui também um campo de luz que simula o campo de radiação.

- a) Plataforma de madeira sobre a qual posiciona-se o paciente.
- b) Possui gaveta onde se coloca o chassis (tela intensificadora com filme).
- c) Serve também de suporte para a grade.
- d) Pode ser horizontal ("Dual") ou vertical (estativo).

5- Mesa: {

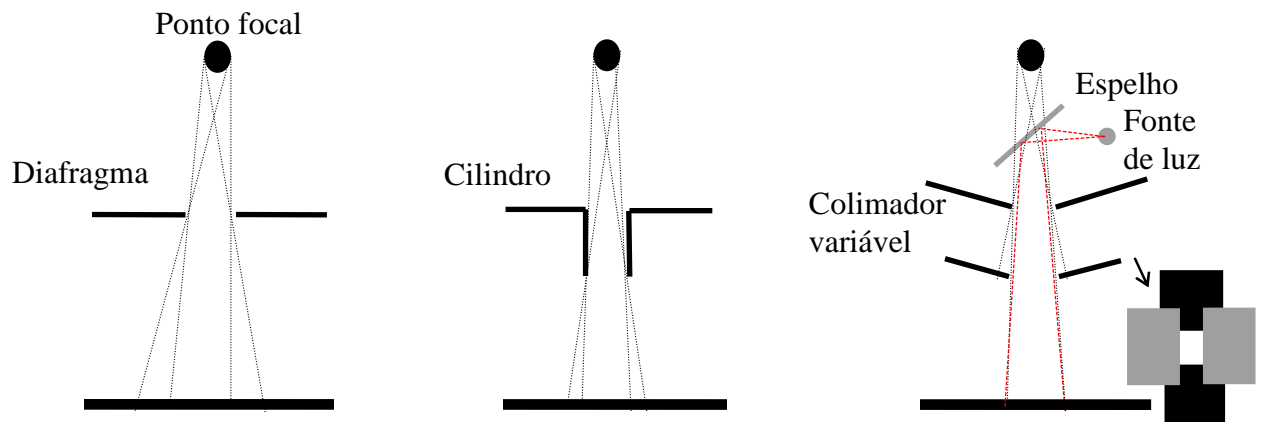


Fig. 7) Ilustração da penumbra existente para diferentes tipos de colimadores. Atualmente, é mais comum o colimador de abertura variável, o qual possui um campo de luz coincidente com o campo de radiação, além de produzir uma penumbra reduzida.

6-

- a) dispositivo constituído de folhas finas de chumbo sustentadas por um material rígido transparente aos RX, localizado entre o paciente e o sistema receptor de imagem;
- b) função: evitar que a radiação espalhada pelo paciente atinja o sistema receptor de imagem, melhorando, assim, o contraste da imagem;
- c) Desvantagens:
  - redução da intensidade do feixe primário (útil) que atinge o filme e portanto, aumento da dose absorvida pelo paciente;
  - necessidade de alinhamento do tubo de raios-X com
- d) a grade pode ser:
  - estacionária:
  - móvel: vibra durante a exposição a fim de tornar a imagem uniforme, ou melhor, sem as sombras das folhas de chumbo.
  - lineares: folhas de chumbo em apenas uma direção;
  - cruzadas: folhas de chumbo em duas direções perpendiculares (cruzadas).
  - paralela: as folhas de chumbo são paralelas;
  - focalizada: as folhas de chumbo convergem para um mesmo ponto (cruzadas) ou linha (lineares).
- e) Boa escolha:
  - abaixo de 90 kVp:  $r = 8$ ;
  - acima de 90 kVp:  $r = 12$ .

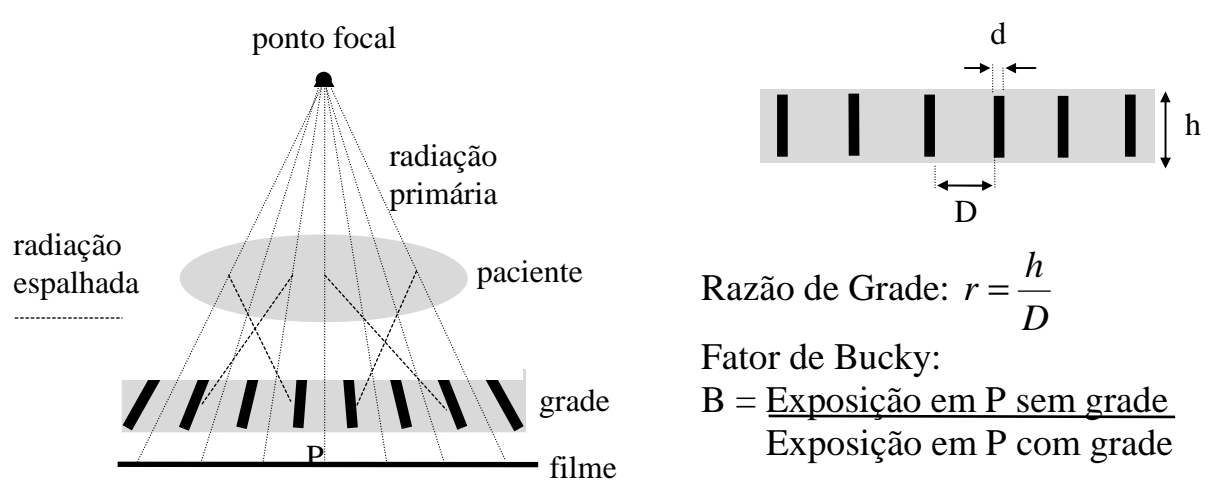


Fig. 8) Ilustração de uma grade linear focalizada e de uma grade paralela com os principais fatores que a caracterizam.

razão de grade	Fator de Bucky	Contraste	Dose
5	3	menor	meno

			r
8	3,5		
12	4	maior	maior

Tab. 3) Valores típicos do fator de Bucky (para 70 kVp) em função da razão de grade e comportamento do contraste da imagem e da dose no paciente.

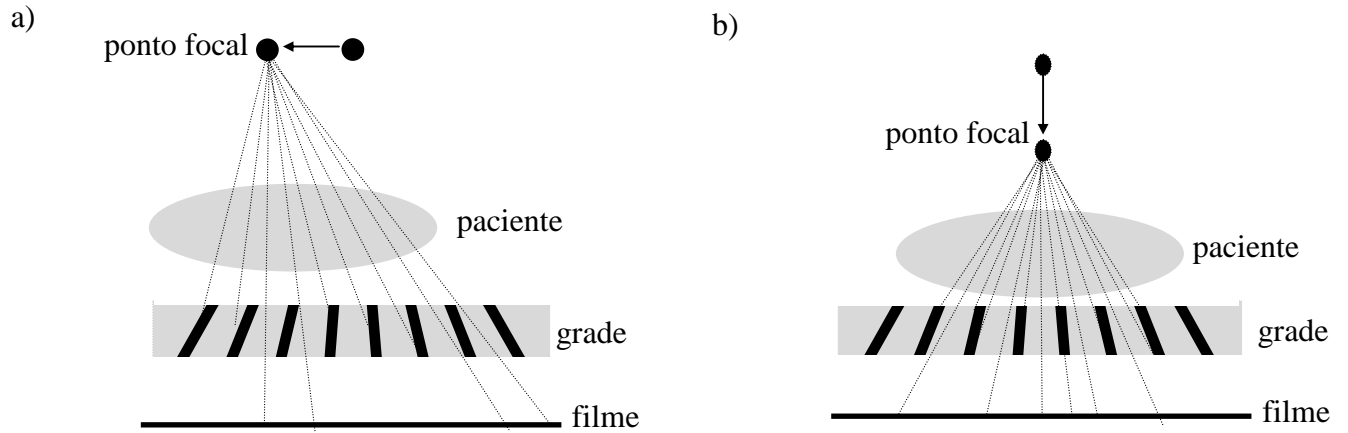


Fig. 9) Ilustração do corte de radiação primária causado por uma grade focalizada, devido ao desalinhamento lateral (a) e ao desalinhamento vertical (b) entre o ponto focal e a grade.

7 - Gerador:

- a) Painel de controle:
  - ligar e desligar o equipamento;
  - fazer girar o ânodo;
  - selecionar a kVp (autotransformador), a corrente do tubo (mA), o tempo de exposição e iniciar a exposição;
  - outras funções (técnicas programadas, foco F ou G, etc.).
- b) Transformadores:
  - a) dispositivo eletrônico, constituído basicamente de duas bobinas e um núcleo de ferro, utilizado para aumentar ou diminuir a voltagem em um circuito.
  - b) Transformador de baixa voltagem: fornece energia elétrica com baixa voltagem (10 V) e alta corrente (3 a 5 A) para o circuito do filamento; controla a corrente do tubo (mA).
  - c) Transformador de alta voltagem: fornece energia elétrica com alta voltagem (kVp) e baixa corrente (mA) para o circuito de alta voltagem (ânodo-cátodo); controla a kVp.
- c) Retificadores:
  - dispositivos eletrônicos que transformam voltagem (e corrente) alternada em voltagem (e corrente) contínua (apenas em um sentido);
  - podem ser de meia onda ou de onda completa.

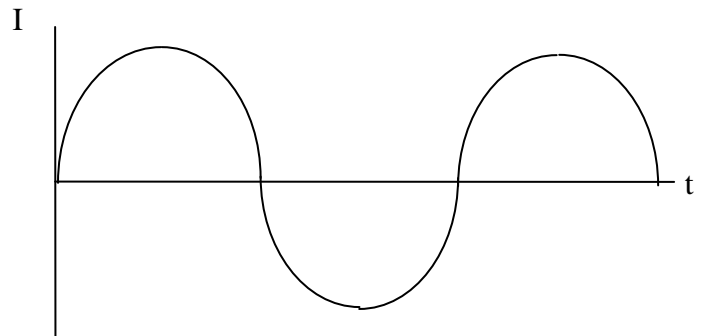
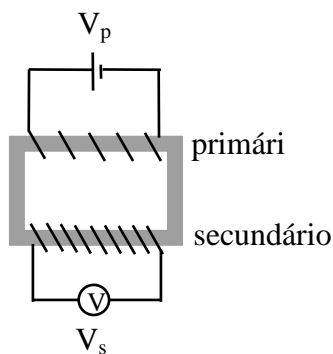


Fig. 10) Esquema básico de um transformador. A corrente alternada (variável com o tempo) através do circuito primário faz surgir um campo magnético (variável com o tempo) no núcleo, o qual induz uma corrente alternada no circuito secundário. A voltagem nos dois circuitos é proporcional ao número de voltas das duas bobinas:

$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$ . A potência (em watts) de um transformador,  $P=I.V$ , é igual nos dois circuitos:  $P = V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$ .



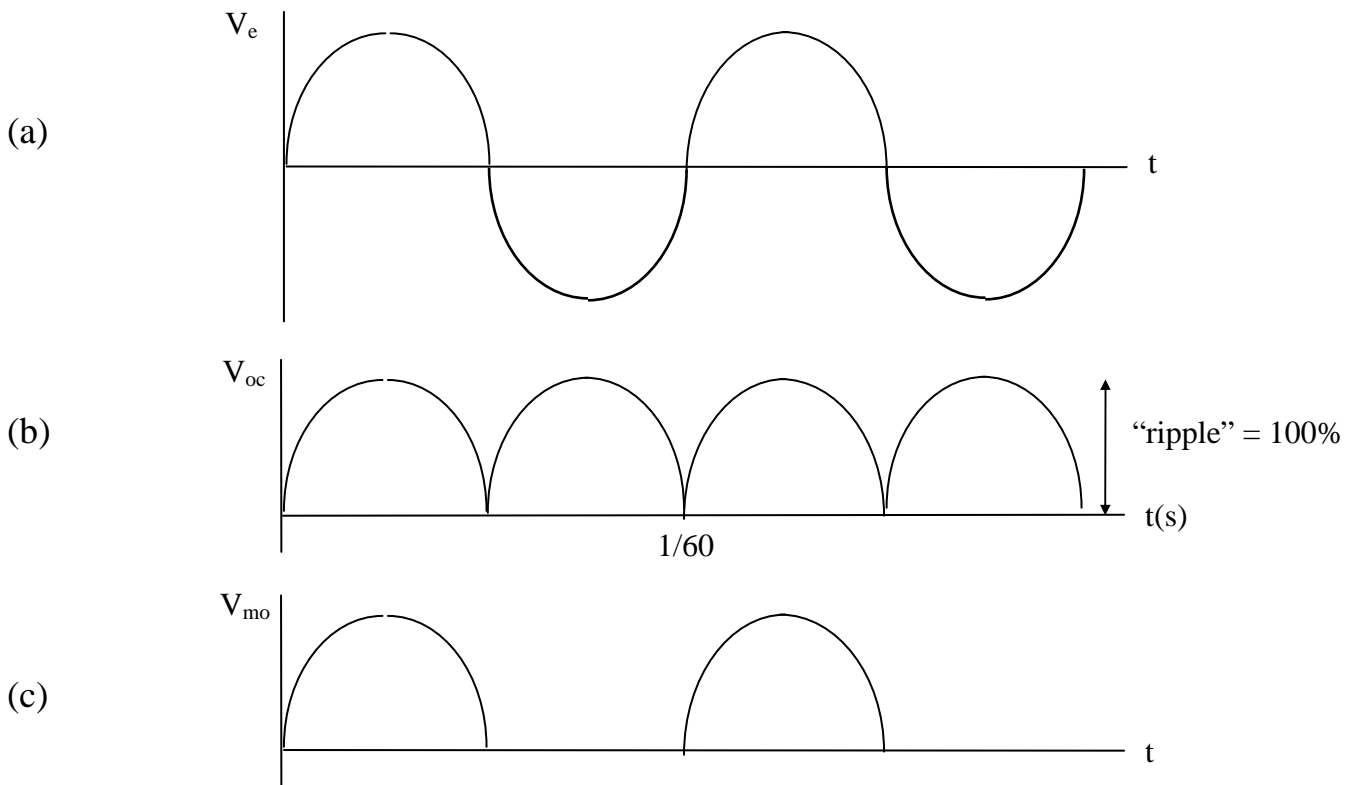


Fig. 11) Ilustração do efeito de um retificador de onda completa (curva b) e de um retificador de meia onda (curva c) sobre a voltagem de entrada (curva a). O fator de “ripple” ( $r = \frac{\Delta V}{V_{max}} \cdot 100$ ) mostrado vale para um gerador monofásico com retificação de onda completa (2 pulsos/ciclo).

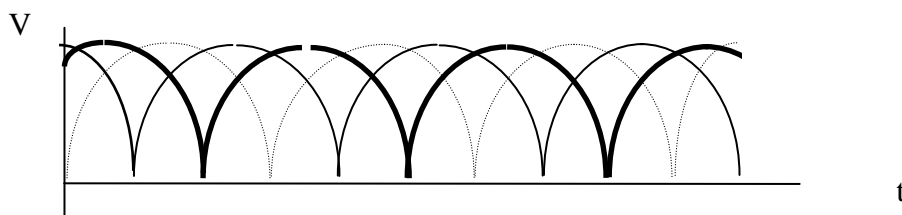


Fig. 12) Voltagem num gerador trifásico (6 pulsos/ciclo) com retificação de onda completa. A voltagem é quase constante ao longo do tempo ( $r \cong 13,5\%$ ), ao contrário dos geradores monofásicos, em que a voltagem (com retificação de onda completa) varia desde zero (0) até um valor máximo (kVp), conforme pode ser visto na figura anterior (curva b). Existem também geradores trifásicos com 12 pulsos/ciclo, em que  $r \cong 3,5\%$ , e geradores de alta frequência (convertem 60 Hz em 6500 Hz), com 13000 pulsos/seg, que produzem uma voltagem constante no tempo, portanto apresentam  $r \cong 0\%$ .

- Geradores de Potência Armazenada: encontrados geralmente em equipamentos móveis, que são utilizados onde a rede elétrica não é apropriada para equipamentos de raios-X. Eles são classificados em dois tipos: geradores com descarga de capacitores e geradores com baterias.

## Fatores que afetam o espectro de raios-X:

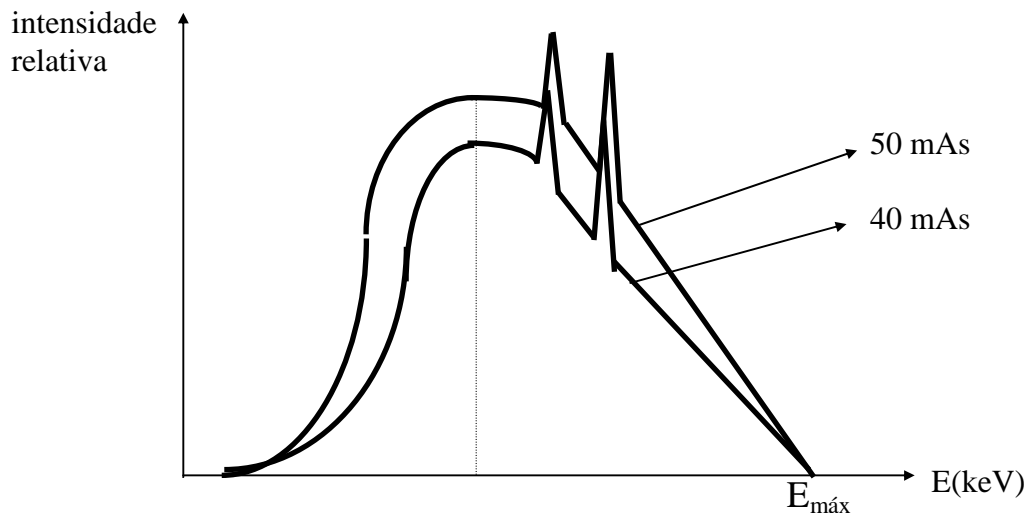


Fig. 13) Influência da mAs sobre o espectro de RX. A intensidade do espectro (ou número de fótons emitidos) é diretamente proporcional à mAs. A energia efetiva não depende da mAs.

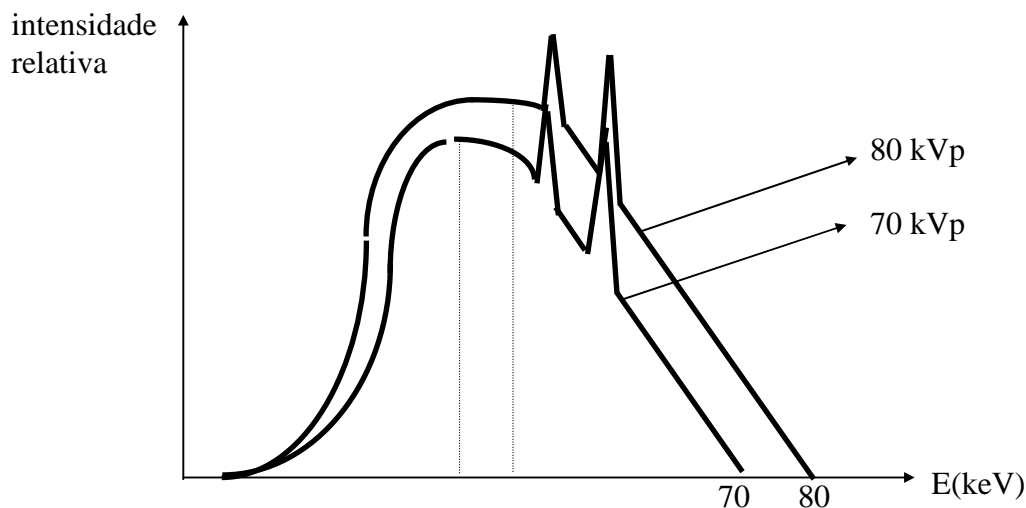


Fig.14) Influência da kVp sobre o espectro de RX. Além de determinar a energia máxima do espectro e, portanto, sua energia efetiva, a kVp influencia também a intensidade do espectro. A intensidade por mAs é (aproximadamente) diretamente proporcional ao quadrado da kVp.

Obs.: Para dobrar a intensidade do espectro, podemos dobrar a mAs ou aumentar a kVp de 41% ( $1.41^2=2$ ). No entanto, na prática, para se ter o mesmo grau de enegrecimento no filme, o equivalente a dobrar a mAs é aumentar a kVp de apenas 15%. Isto ocorre porque, aumentando a kVp, aumenta a energia do espectro, tornando o feixe mais penetrante, portanto, menos absorvido pelo paciente.

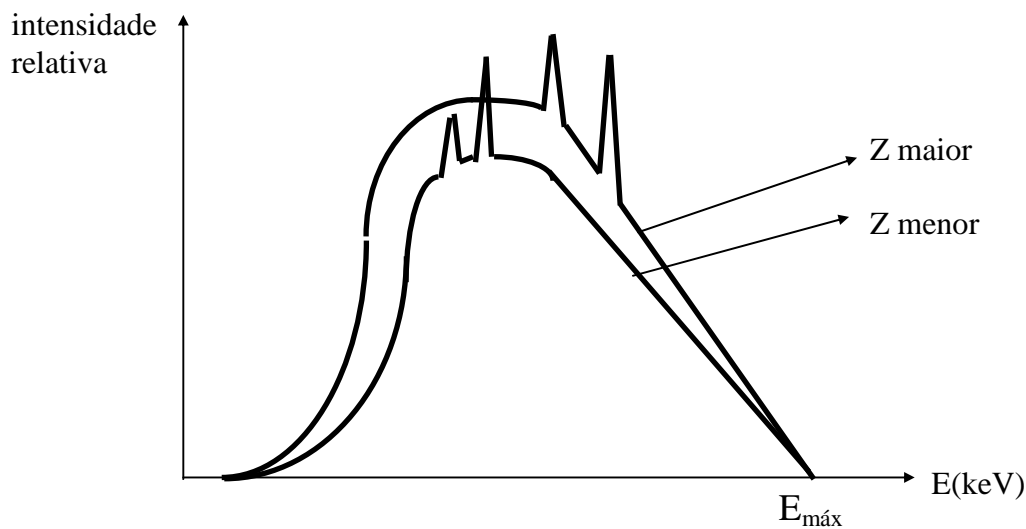


Fig.15) Influência do material do alvo sobre o espectro de RX. O espectro característico é modificado pois as energias de ligação das camadas eletrônicas envolvidas no processo dependem do material do alvo. As energias características e a intensidade do espectro total aumentam com o número atômico do material do alvo.

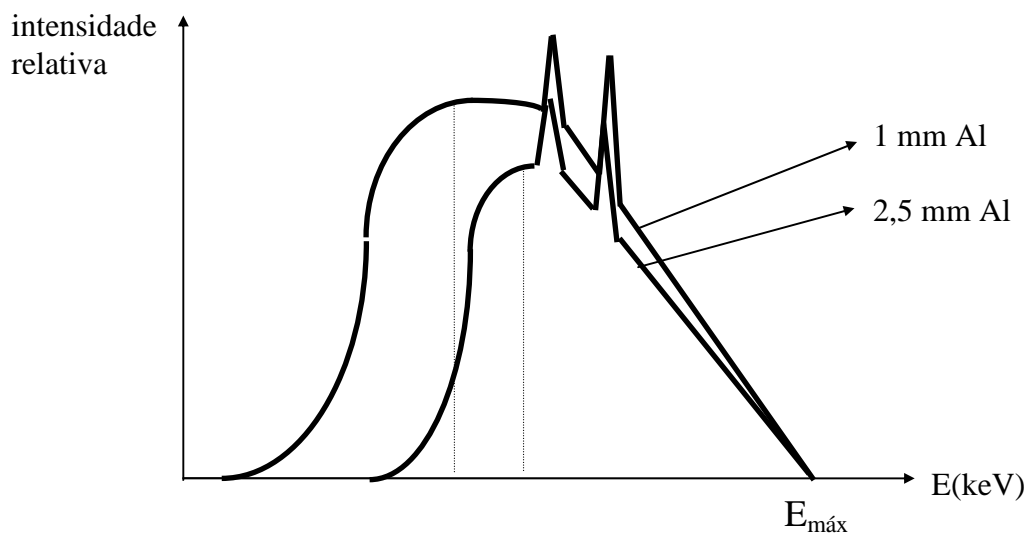


Fig.16) Influência do filtro sobre o espectro de RX. Ocorre uma redução na intensidade do espectro principalmente na região de baixa energia. Quanto maior o filtro, maior a energia efetiva do espectro.

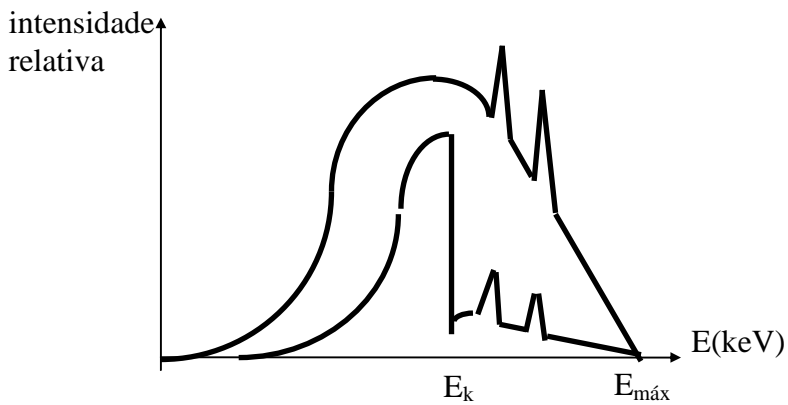


Fig. 17) Ilustração do efeito de um filtro com "K-edge" (energia  $E_k$ ) sobre um espectro de RX.

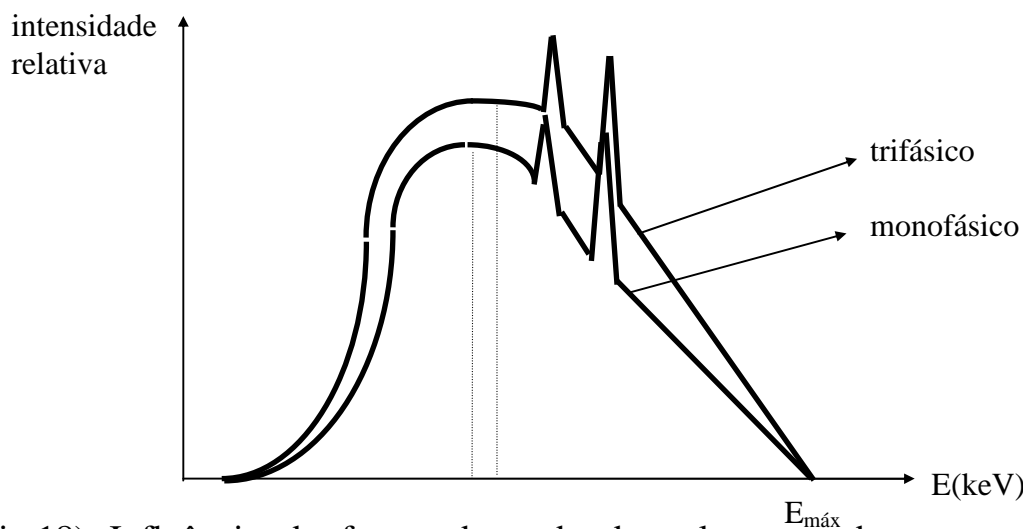


Fig.18) Influência da forma de onda da voltagem sobre espectro de RX. A intensidade do espectro e sua energia efetiva são maiores para geradores trifásicos; em sistemas monofásicos, as intensidades do espectro de raios-X variam com o tempo, desde 0 até seus valores máximos, o que não ocorre em sistemas trifásicos, em que as intensidades do espectro são praticamente constantes ao longo do tempo.

- **Controle do tempo de exposição:**

- Medidor mecânico: tempos maiores que 0,25 s;
- Medidor eletrônico: tempos maiores que 0,001 s;
- Controlador automático de exposição: evita erro humano na seleção do tempo de exposição; uma vez selecionada a kVp, há um dispositivo (câmara de ionização, detetor fotomultiplicador ou de estado sólido) que determina a quantidade de radiação necessária para se obter uma radiografia com densidade ideal.

- Carta térmica do tubo: caracterizar o tubo quanto à capacidade térmica de resistir a uma simples exposição, a uma série de exposições seguidas em um único exame e a múltiplas exposições durante horas de uso, para estabelecer o limite de segurança, dentro do qual o tubo pode operar.

A energia térmica produzida durante uma exposição é expressa em termos de unidade de calor (1 HU = mAs x kVp).

O termo kW de um tubo é definido a potência máxima (kVp x mA) que pode ser exigida do tubo para uma exposição de 0,1 s. (convenção).

Exemplos:

- Qual é a mA máxima que pode ser usada por um tubo de 35 kW a 70 kV?

$$70 \cdot \text{mA} = 35000 \Rightarrow \text{mA} = 500$$

- Podemos fazer um exame angiográfico (10 exposições em 10 s., cada uma utilizando 100 kVp, 500 mA e 0,1 s.) com determinado tubo?

$$\text{HU} = 500 \cdot 100 \cdot 0,1 = 5000 \Rightarrow \text{HU (10 expos.)} = 50000 \text{ (em 10 s.)}$$

Da curva de 100 kVp (ou outra qualquer): mA máxima em 10 s. é 100 mA. Portanto: HU máximo permitido (em 10 s.) =  $100 \cdot 100 \cdot 10 = 100000$ . Portanto, o exame pode ser feito.

- **Capacidade térmica de ânodo:**

Exemplos:

- Com um ânodo cuja capacidade térmica é 110000 HU (figura), um exame de fluoroscopia, utilizando 100 kVp e 5 mA (500 HU/s.), só pode durar 7 minutos, pois nesse tempo a capacidade térmica (110000) é atingida.

- Com o mesmo ânodo, um exame de fluoroscopia, utilizando 90 kVp e 3,8 mA (340 HU/s), pode ser realizado continuamente, sem danificar o ânodo.

Unidades de energia: - S.I.:  $1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ C}$   
 - mais usada:  $1 \text{ eV} = 1 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
 $1 \text{ MeV} = 10^3 \text{ keV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

Frequência( $s^{-1}$ )	compr. de onda(m)	energia (eV)	Tipo e características
de $1 \cdot 10^5$ a $3 \cdot 10^{10}$	de $3 \cdot 10^3$ a $1 \cdot 10^{-2}$	de $4 \cdot 10^{-10}$ a $1,2 \cdot 10^{-4}$	ondas de rádio, TV, microondas, radar: produzidas por oscilações elétricas; detectadas por equipamentos eletrônicos; refletidas por condutores elétricos; transmitidas através de não condutores.
De $3 \cdot 10^{12}$ a $3 \cdot 10^{14}$	de $1 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-6}$	de 0,0124 a 1,24	Infravermelha: produzida por vibrações moleculares e excitação de elétrons mais externos dos átomos, pela incidência de calor; detectada por dispositivos sensíveis ao calor e filmes; não transmitida através da maior parte dos sólidos.
De $4,3 \cdot 10^{14}$ a $7,5 \cdot 10^{14}$	de $7 \cdot 10^{-7}$ a $4 \cdot 10^{-7}$	de 1,77 a 3,1	Luz visível: produzida pela excitação de elétrons mais externos dos átomos, através de descarga elétrica; detectada pelos olhos e filmes; transmitida por alguns sólidos, tais como o vidro.
De $7,5 \cdot 10^{14}$ a $3 \cdot 10^{16}$	de $4 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-8}$	de 3,1 a 124	Ultravioleta: produzida pela excitação de elétrons mais externos dos átomos; detectada por filmes, câmaras de ionização, contadores Geiger; prejudicial à pele; mata bactérias e contribui na produção da vitamina D.
de $3 \cdot 10^{16}$ em diante	de $1 \cdot 10^{-8}$ em diante	de 124 em diante	Raios-X e raios- $\gamma$ .

Tab. 1) O espectro eletromagnético e algumas características.

redor  
 Matéria  $\rightarrow$  átomos  $\rightarrow$  elétrons ( $q = -e$  ;  $m = m_e$ ) em órbitas com energias bem definidas ao  
 do núcleo (força de atração elétrica);  $r \cong 10^{-8} \text{ m}$ .  
 núcleo ( $r \cong 10^{-12} \text{ m}$ )  $\rightarrow$  nêutrons ( $q = 0$  ;  $m = 1850 m_e$ ) e  
 prótons ( $q = e$  ;  $m = 1850 m_e$ ) unidos por forças  
 nucleares (intensas e de pequeno alcance), dis-  
 tribuídos em níveis de energia discretos.

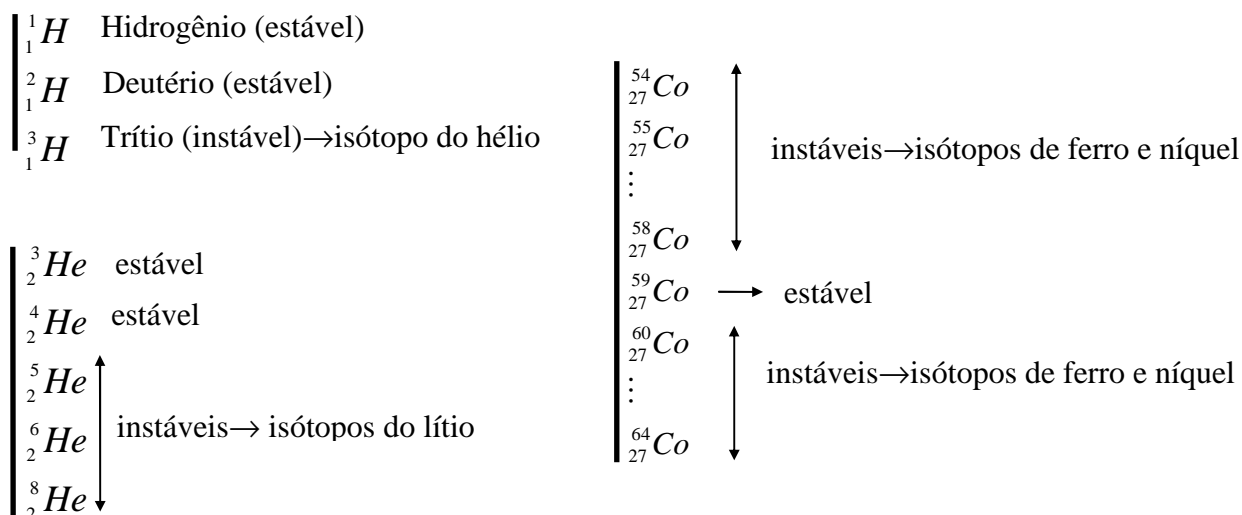
**Número atômico** (Z): número de prótons no núcleo =  $n^{\circ}$  de elétrons orbitais (átomo neutro).

**Número de massa** (A): soma do número de prótons e nêutrons no núcleo.

**Isótopos**: átomos cujos núcleos têm Z iguais e A diferentes.

**Isótopos instáveis:** são átomos em cujos núcleos há um excesso de prótons e nêutrons, ou mesmo um desequilíbrio entre o número de prótons e de nêutrons, e que, por isso, podem emitir partículas ou radiação (desintegração radioativa) até se transformarem em átomos cujos núcleos sejam estáveis. Todos os elementos com  $Z > 83$  são radioativos.

Exemplos:



### Radioatividade Natural:

Elementos com  $Z \leq 92$  (urânio) existem na natureza, podendo ser divididos em 3 famílias de materiais radioativos:

- urânio 238 (termina no Pb 206 estável);
- tório 232 (termina no Pb 208 estável);
- actínio (começa no U 235, termina no Pb 207 estável).

Outros materiais encontrados na natureza: potássio 40 (presente no corpo humano);  
 carbono 14 (resultante do N 14 após ser bombardeado por raios cósmicos).

### Radioatividade Artificial:

Elementos radioativos com  $Z > 92$  são produzidos artificialmente, através de bombardeamento de materiais estáveis por nêutrons ou prótons:

- Co 59 estável se transforma em Co 60 radioativo;
- P 31 estável se transforma em P 32 radioativo;
- núcleo de U 235 se divide em núcleos radioativos de Cs 137, Sr 90, I 131.

**Raios- $\alpha$**  (núcleo do  ${}^4_2\text{He}$ ): partículas carregadas (+2) e pesadas emitidas por núcleos instáveis com  $Z > 83$ . Exemplo:

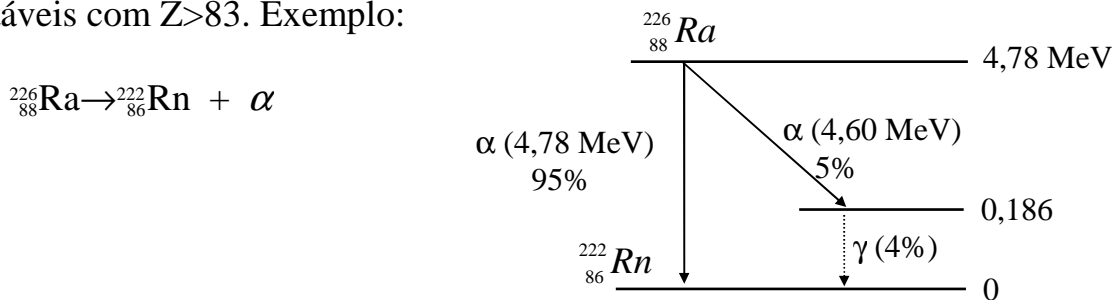


Fig. 1) Esquema simplificado de desintegração do  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ . A probabilidade de emissão do raio  $\gamma$  é de 4% e não de 5%, pois há uma probabilidade de emissão de um elétron proveniente de conversão interna (processo em que a energia de um núcleo excitado é transferida a um elétron atômico de camada K ou L) igual a 1%.

Raios- $\alpha$ , ao penetrarem num meio material, interagem com os elétrons do meio produzindo:

- excitação (elétrons de camadas internas pulam para camadas mais externas) e
- ionização (elétrons são expulsos do átomo).

Alta taxa de ionização (praticamente toda a energia da partícula é absorvida).  
Baixo poder de penetração.

Energia (MeV)	Alcance (cm)	
	na água	no ar
1	0,0006	0,6
10	0,01	10
100	0,6	700

Tab. 2) Alcance (distância percorrida até parar) aproximado de raios- $\alpha$  na água e no ar.

**Raios- $\beta$** : elétrons ( ${}^0_{-1}\text{e}$ ) ou pósitrons ( ${}^0_{+1}\text{e}$ , "elétrons +") em alta velocidade, emitidos por núcleos instáveis que possuem excesso de nêutrons ou de prótons, respectivamente. Uma segunda partícula, chamada neutrino ( $\nu$ ), sem carga e de massa desprezível, responsável pelo balanço de energia, é emitida. Exemplos:

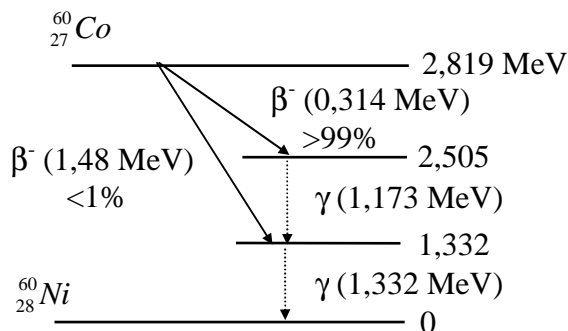
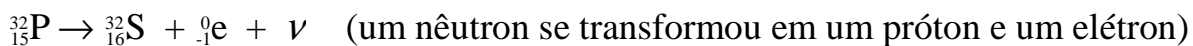


Fig. 2) Esquema simplificado de desintegração do cobalto 60.



Raios- $\beta$ , ao penetrarem num meio, interagem com: elétrons do meio (excitação, ionização); núcleos dos átomos do meio (raios-X).

Alta taxa de ionização (menor que dos raios- $\alpha$ ) e maior poder de penetração que os raios- $\alpha$ .

Energia (MeV)	Alcance (cm)	
	na água	no ar
0,1	0,014	11
1,0	0,43	500
10	4,9	6000

Tab. 3) Alcance aproximado de raios- $\beta$  na água e no ar.

**Raios- $\gamma$ :** algumas vezes, após a emissão  $\alpha$  ou  $\beta$ , o núcleo filho ainda permanece com um excesso de energia (estado excitado), o qual é emitido como radiação  $\gamma$  (eletromagnética) no retorno ao estado fundamental. Exemplos:

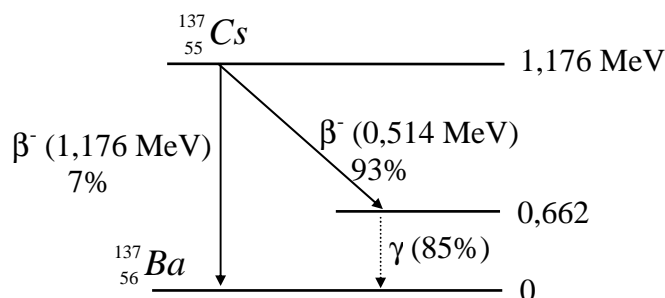
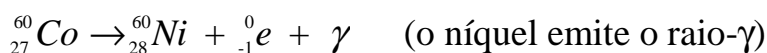


Fig. 3) Esquema simplificado de desintegração do Cs 137. O processo de conversão interna tem uma probabilidade de ocorrência de 8%.

Os raios- $\gamma$  são mais penetrantes que os raios- $\alpha$  e  $\beta$ , porém, menos ionizantes (indiretamente ionizantes).

**Decaimento Radioativo:** a taxa de emissão de radiação por um material, assim como a quantidade de núcleos radioativos do mesmo, decai com o passar do tempo segundo a relação:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{decaimento exponencial})$$

onde:  $N_0$  é o número de átomos radioativos no instante inicial ( $t=0$ );

$N$  é o número presente num instante posterior  $t$ .

$\lambda$  é a constante de desintegração do átomo (característica do elemento), que se refere à probabilidade de um átomo sofrer desintegração em um segundo.

**Atividade (A):** é o número de átomos que se desintegram por unidade de tempo.

$$A = N \cdot \lambda$$

Unidade: 1 "curie" (Ci) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegrações/s.

1 "becquerel" (Bq) = 1 des./s.

Lei do decaimento exponencial:  $A = A_0 e^{-\lambda t}$

**Meia-Vida:** é o tempo necessário para que a quantidade de núcleos radioativos (ou a atividade) seja reduzida à metade, ou:

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Elemento	meia-vida	radiação
fósforo 32	14,3 dias	$\beta$
cobalto 60	5,26 anos	$\beta, \gamma$
estrôncio 90	27,7 anos	$\beta$
iodo 131	8,05 dias	$\beta, \gamma$
césio 137	30,0 anos	$\beta, \gamma$
ouro 198	2,70 dias	$\beta, \gamma$
radônio 222	3,82 dias	$\alpha, \gamma$
rádio 226	1620 anos	$\alpha, \gamma$
urânio 238	$4,91 \cdot 10^9$ anos	$\alpha, \gamma$

Tab. 4) Radiação emitida e meia-vida de alguns elementos radioativos.

**Raios-X:** radiação eletromagnética produzida quando elétrons (e) em alta velocidade colidem com um alvo metálico (geralmente de tungstênio). Dois processos distintos ocorrem:

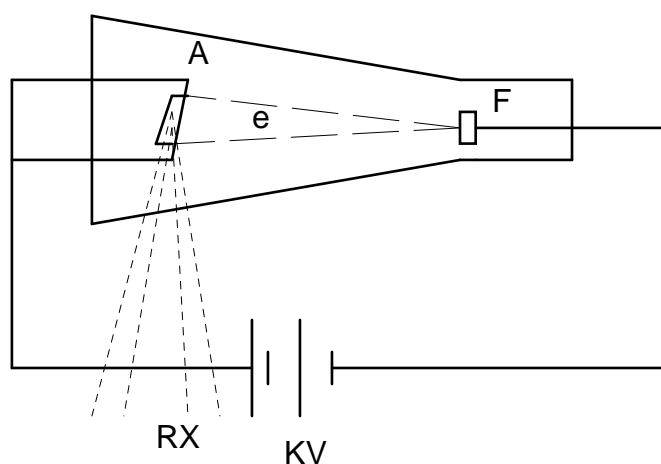


Fig. 4) Esquema simplificado de um filamento (F) de tungstênio (fonte de elétrons) e um alvo (A), também de tungstênio, colocados dentro de um tubo de vidro a vácuo, onde são produzidos os raios-X. Para acelerar os elétrons, é necessária a aplicação de uma alta tensão (kV) entre o filamento e o alvo. Dessa forma, há emissão de raios-X somente quando o equipamento emissor é acionado (ligado à força elétrica), em distinção aos raios  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , que são emitidos continuamente. Os raios-X e os raios- $\gamma$  diferem somente na sua origem.

- raios-X "Bremsstrahlung": os elétrons passam muito próximos dos núcleos dos átomos do alvo, interagem com estes (atração elétrica), sendo desviados de sua trajetória e fortemente desacelerados. Parte da energia perdida (1%) aparece na forma de raios-X; o restante (99%) é convertido em calor.

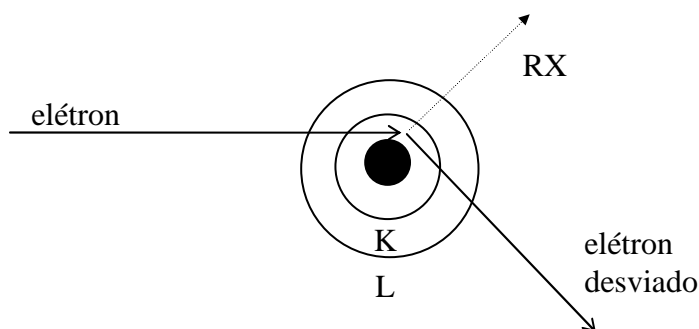


Fig. 5) Ilustração da produção de RX "bremsstrahlung".

- raios-X característicos: os elétrons podem também remover elétrons de camadas eletrônicas dos átomos do alvo, deixando lacunas que são imediatamente preenchidas por elétrons de camadas mais externas. Acompanhando esse rearranjo, surge a emissão de raios-X característicos. A energia dos RX característicos correspondem à diferença entre as energias de ligação das camadas envolvidas no processo.

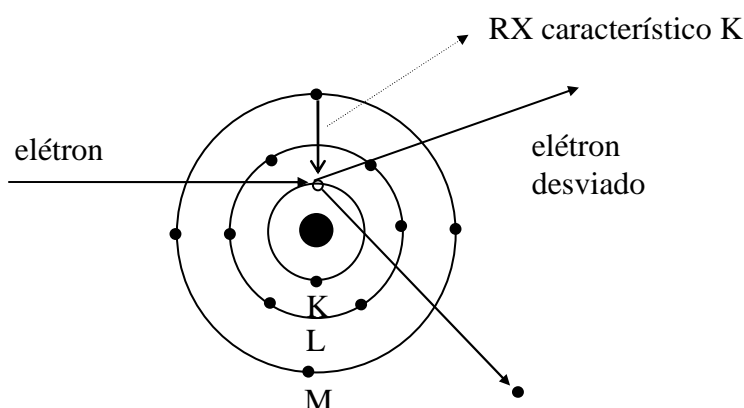


Fig. 6) Ilustração da produção de RX característico.

Aparelhos que utilizam RX: convencionais para diagnóstico, tomografia computadorizada, acelerador linear (radioterapia), fluoroscopia, angiografia digital, etc.

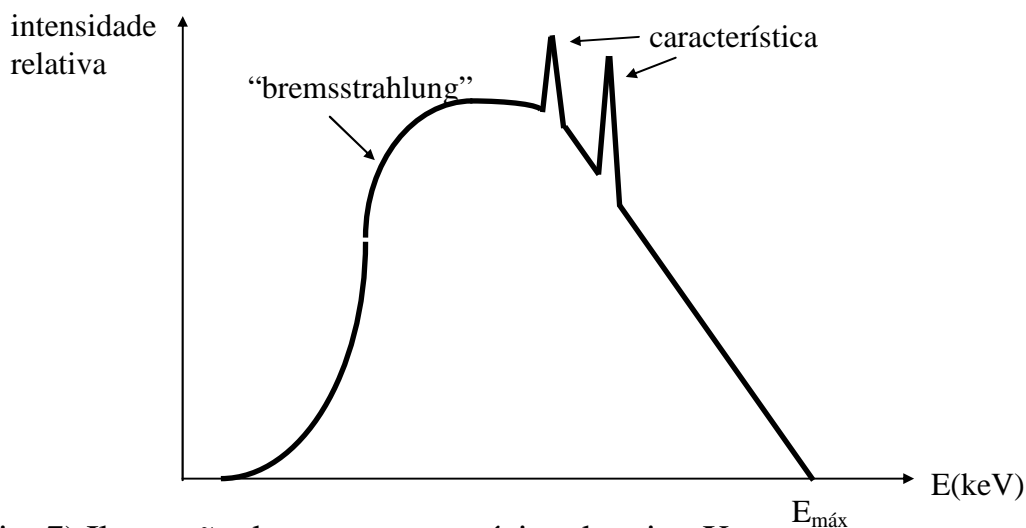


Fig. 7) Ilustração de um espectro típico de raios-X.

**Massa atômica (A):** massa de um átomo em comparação com a massa do átomo de carbono ( $^{12}_6\text{C}$ ), padronizada em 12,0000 u (unidade unificada de massa atômica).

$$A < \sum_i m_i, \text{ onde } m_i \text{ é a massa da } i\text{-ésima partícula presente.}$$

$$\left( \sum_i m_i - A \right) \uparrow \Rightarrow \uparrow \text{ a estabilidade do núcleo.}$$

$$Z \uparrow \Rightarrow \uparrow \text{ n}^\circ \text{ de isótopos e } \uparrow \text{ n}^\circ \text{ de isótopos estáveis.}$$

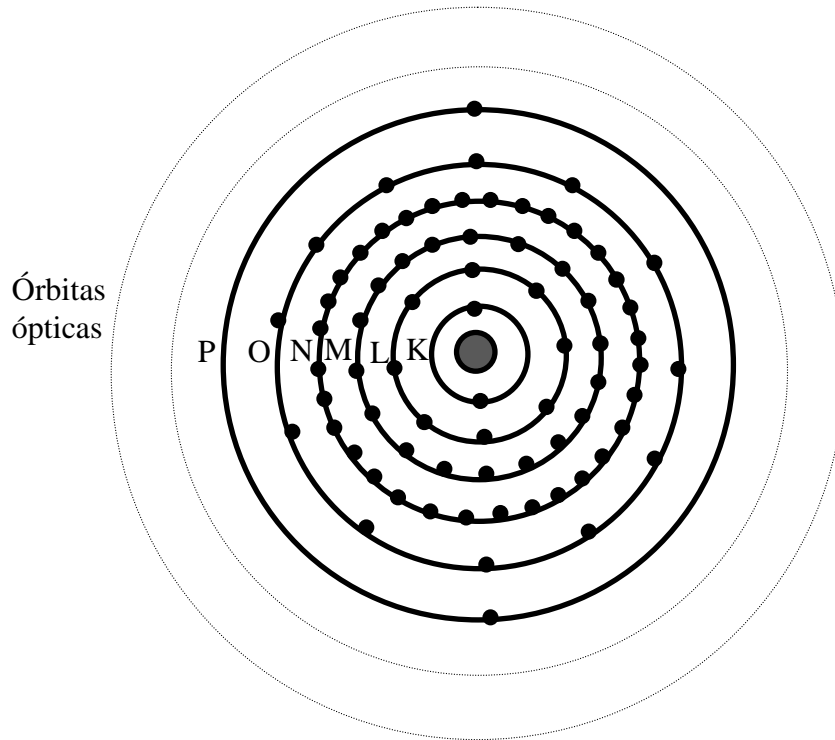


Fig. 1) Esquema representativo do átomo de tungstênio (W):  $Z=74$ ;  $A=183$ . Os elétrons distribuem-se em camadas (K, L, M, etc) segundo o princípio de exclusão de Pauli (mecânica quântica). À cada camada está associada uma órbita mais provável onde os elétrons movem-se com energia bem definida (energia de ligação). No núcleo (esfera escura central), prótons e nêutrons também movem-se com energias bem definidas.

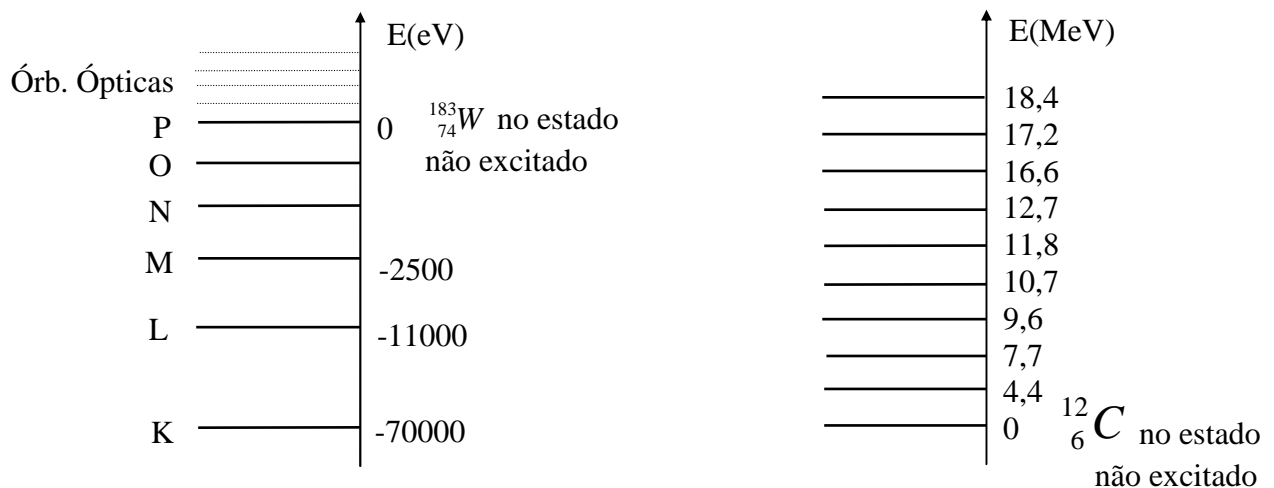


Fig. 2) Ilustração dos níveis de energia dos elétrons orbitais do átomo de tungstênio (W) e dos níveis de energia nucleares do carbono ( $^{12}_6C$ ). Quando o átomo ou núcleo recebe energia, ele salta para algum estado excitado e, em seguida, retorna para o estado fundamental, liberando energia (na forma de radiação) igual à diferença de energia entre os estados inicial e final.

## Medidas de Radiação

**Exposição (X):** é a soma das cargas elétricas ( $Q$ ) de todos os íons de mesmo sinal produzidos num volume de ar (massa  $m$ ) quando todos os elétrons liberados pelos fótons são completamente absorvidos.

$$X = \frac{Q}{m} \quad \text{Unidade: 1R (Roentgen)} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/Kg}$$

**Dose absorvida (D):** é a razão entre a energia absorvida ( $E_{abs.}$ ) por um volume do meio e a massa  $m$  desse volume. Pode ser calculada a partir da medida da exposição ( $X$ ).

$$D = \frac{E_{abs.}}{m} = f X (R) \quad \text{Unidades: 1 rad} = 100 \text{ ergs/g}$$

$$1 \text{ Gy (gray)} = 1 \text{ J/Kg} = 100 \text{ rad}$$

Energia	fator f para o músculo	fator f para o osso
20 keV	0,917	4,23
100 keV	0,949	1,46
1 MeV	0,957	0,919
2 MeV	0,955	0,929

**Dose Equivalente num órgão ou tecido ( $H_t$ ):** é a somatória (sobre todos os tipos de radiação recebida) dos produtos de dose absorvida pelo órgão por um fator de peso ( $w_r$ ) para cada tipo de radiação, o qual leva em conta os diferentes efeitos biológicos causados pelos diferentes tipos de radiação para uma mesma dose absorvida:

$$H_t = \sum_r D_r w_r \quad \text{Unidades: 1 rem} = 100 \text{ ergs/g}$$

$$1 \text{ Sv (Sievert)} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rem}$$

Radiação	Energia (MeV)	$w_r$
próton	> 2	5
$\alpha$	qualquer	20
$\beta$	0,001	2
$\beta$	$\geq 0,01$	1
X ou $\gamma$	qualquer	1

**Dose Efetiva (E):** é a somatória (sobre todos os órgãos ou tecidos) dos produtos de dose equivalente no órgão por um fator de peso de cada órgão ou tecido ( $w_t$ ) irradiado. Esse fator ( $w_t$ ) representa a contribuição do órgão ou tecido para o dano biológico do corpo inteiro.

$$E = \sum_t H_t w_t \quad \text{Unidade: 1 Sv} = 100 \text{ rem} = 10^4 \text{ ergs/g.}$$

Tecido ou órgão	$w_t$
gônadas	0,20
medula óssea, cólon, pulmão, estômago	0,12
pele e superfície óssea	0,01
restante	0,05

**Detetores de Radiações  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e X :**

- **Câmara de Ionização**: medida da ionização do ar, contido em um recipiente eletricamente carregado, causada pela radiação incidente. Usada para monitoração de área (câmaras maiores, do tipo Cutie-Pie ("Babyline")) e dosimetria de feixes de radiação (câmaras menores, do tipo dedal ou de placas paralelas). Muito precisa, mas pouco sensível.

- **Geiger-Muller**: medida da ionização de um gás, contido em um recipiente muito carregado eletricamente, causada pela radiação incidente. Usado somente para "detectar" a presença de radiação em áreas ocupadas por trabalhadores. Muito sensível, mas pouco preciso.

- **Detetor de Cintilação**: medida da intensidade de luz emitida por material, sólido ou líquido (radiação  $\beta$  de baixa energia), devido à absorção da radiação. Muito sensível e preciso.

- **Detetor de Semicondutor**: medida da ionização do semicondutor (Ge, Si) causada pela radiação ionizante. Bastante sensível e preciso.

- **Filmes**: medida do enegrecimento (ou densidade óptica) do filme, que é proporcional à quantidade de radiação recebida. Usado para dosimetria pessoal. É sensível, mas pouco preciso, devido à dependência com a energia da radiação e com as condições de processamento (revelação), às diferenças entre emulsões fotográficas e à sensibilidade à umidade e ao calor.

- **Dosímetro Termoluminescente**: material cuja estrutura atômica, ao ser irradiada, permanece em um estado excitado (elétrons em "armadilhas") por um longo tempo. Quando aquecido, volta ao seu estado natural, emitindo luz, cuja intensidade é proporcional à quantidade de radiação recebida. Detecta radiações  $\alpha$ ,  $\beta$  (desde que atinjam o material, interno ao porta-dosímetro),  $\gamma$  e X. Usado para dosimetria pessoal. Muito sensível e razoavelmente preciso.