



METROLOGIA EM RADIODIAGNÓSTICO

Maria da Penha Albuquerque Potiens

IPEN-CNEN/SP

mppalbu@ipen.br



Parte 1 :

- Introdução
- Produção de Raios X Diagnóstico
- Tubo de Raios X Diagnóstico
- Grandezas e Unidades
- Instrumentação utilizada (Laboratório e Clínicas)



Parte 2 :

- Normas
- Procedimentos de Calibração
- Procedimentos para Medidas Clínicas

INTRODUÇÃO

- **METROLOGIA** - Ciência da medição (2.2 do VIM)

A metrologia abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia.

- **RADIODIAGNÓSTICO**

Uso da radiação X para investigar a estrutura e as funções do corpo humano

Principal objetivo : obter a melhor imagem possível com a menor exposição ao paciente e ao trabalhador



- ***Principais fontes de radiação***

- Radiações naturais
- Aplicações na Medicina
 - Maior contribuição : radiodiagnóstico

60% da exposição da população

“Maior fonte de radiação produzida pelo homem”



INTERVALO DE UTILIZAÇÃO MÉDICA DA RADIAÇÃO X

0,1 – 20 kV	Energia baixa - radioterapia
20 – 150 kV	Radiodiagnóstico
120 – 300 kV	Ortovoltagem- radioterapia
300 kV – 1 MV	Energia intermediária- radioterapia
Acima de 1 MV	Megavoltagem - radioterapia

Técnicas utilizadas em Radiodiagnóstico:

- Radiologia convencional,
- Radiologia dental,
- Tomografia computadorizada,
- Fluoroscopia e outros procedimentos intervencionais,

50 a 150 kV

- Mamografia

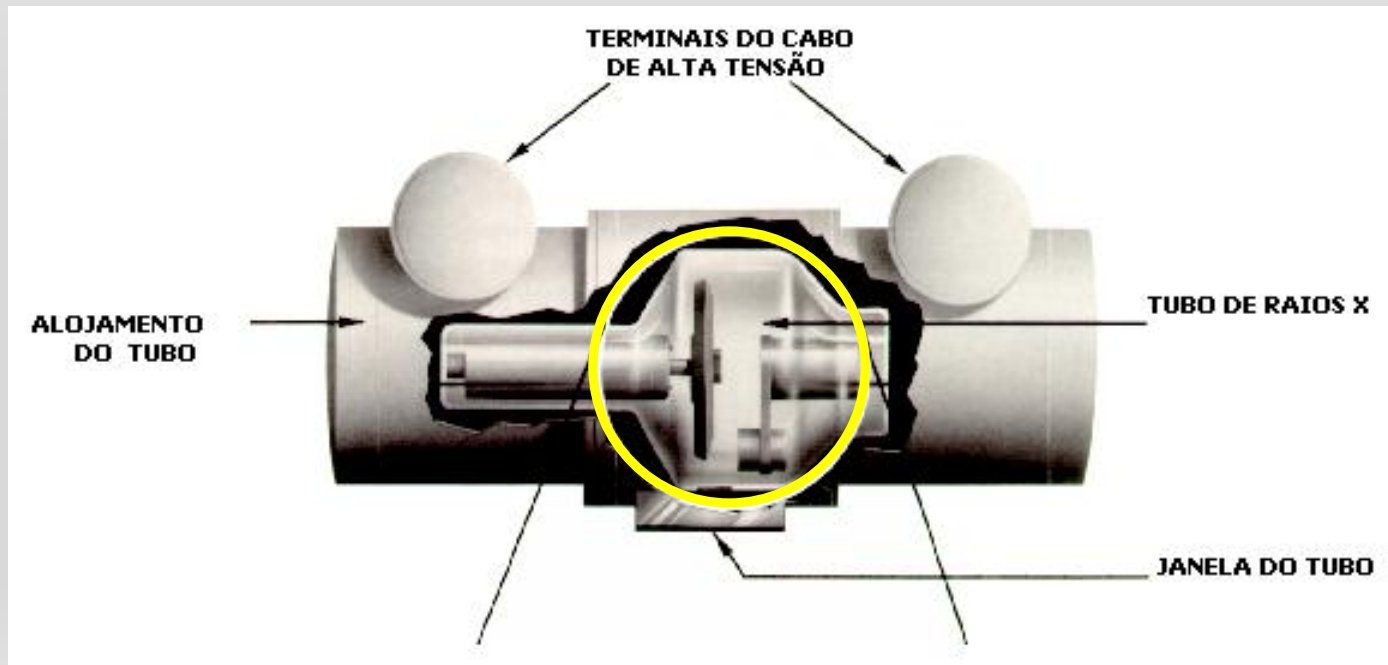
22 a 40 kV

Produção de Raios X Diagnóstico

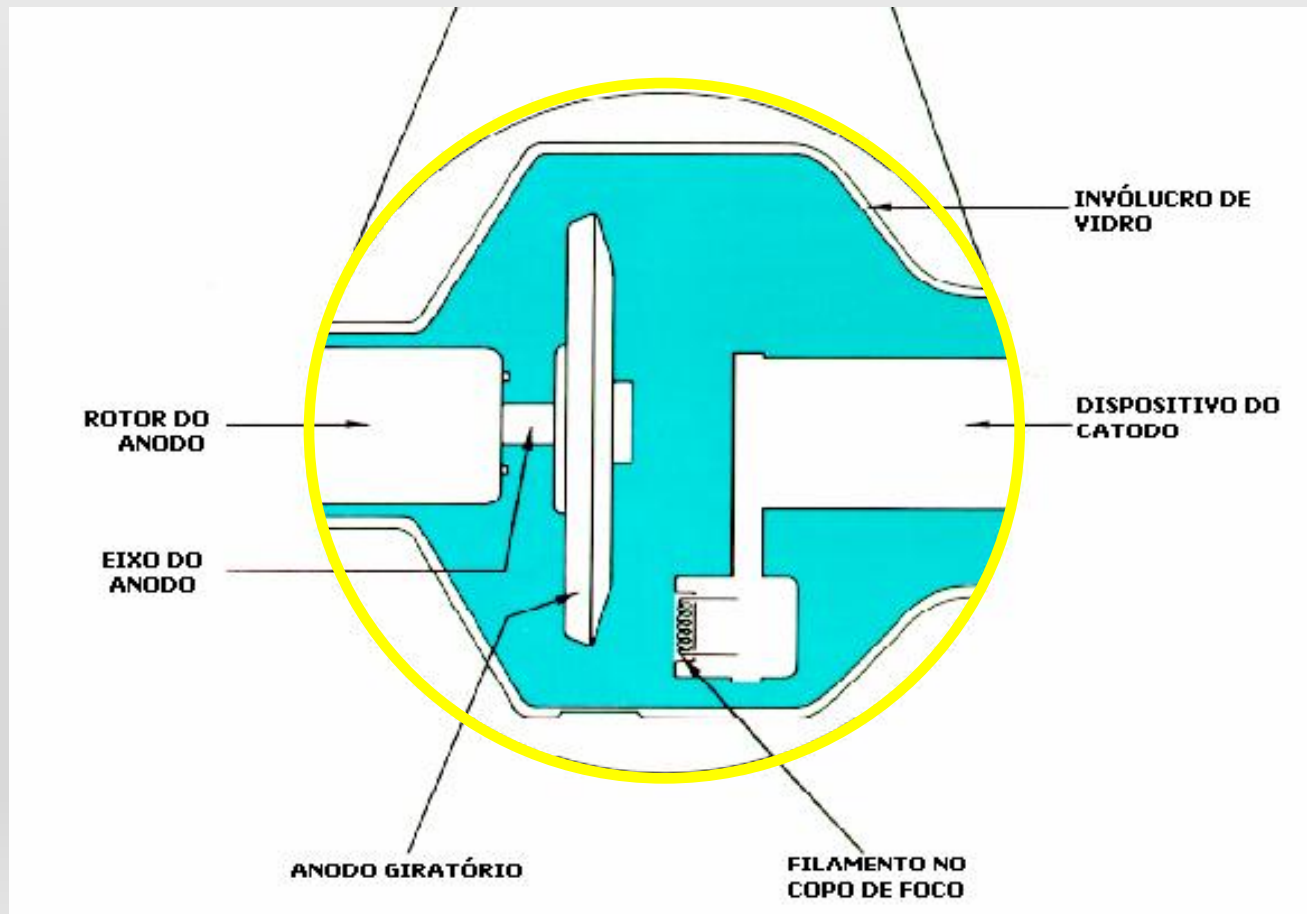
- Raios X produzidos por energia de conversão
- Um feixe de elétrons de grande velocidade é desacelerado em um anodo (alvo) de um tubo de raios X
- Constituído por uma ampola de vidro com vácuo e possui dois eletrodos

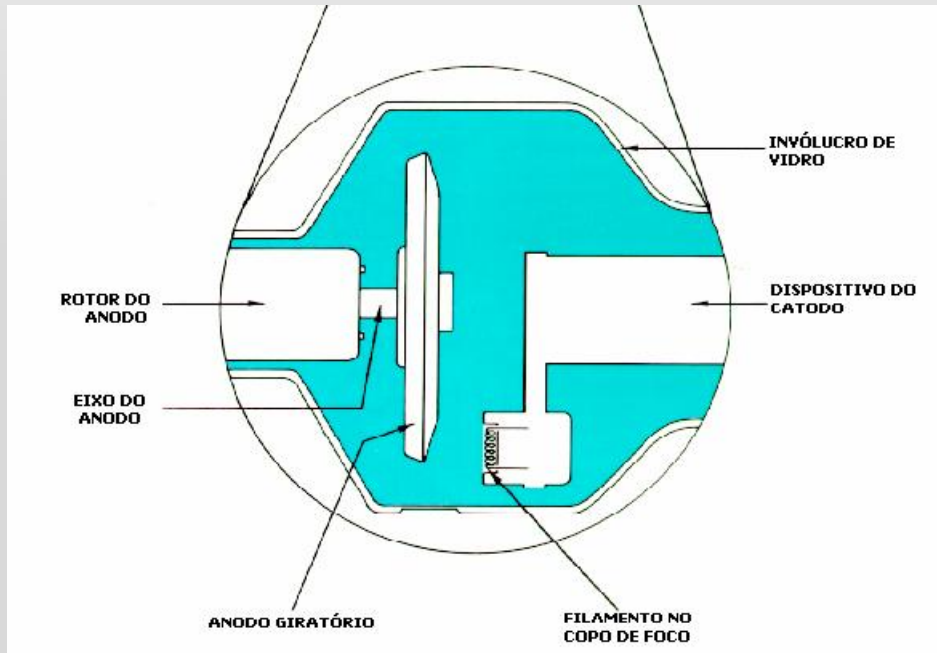
Tubo de Raios X Diagnóstico

Elementos Básicos

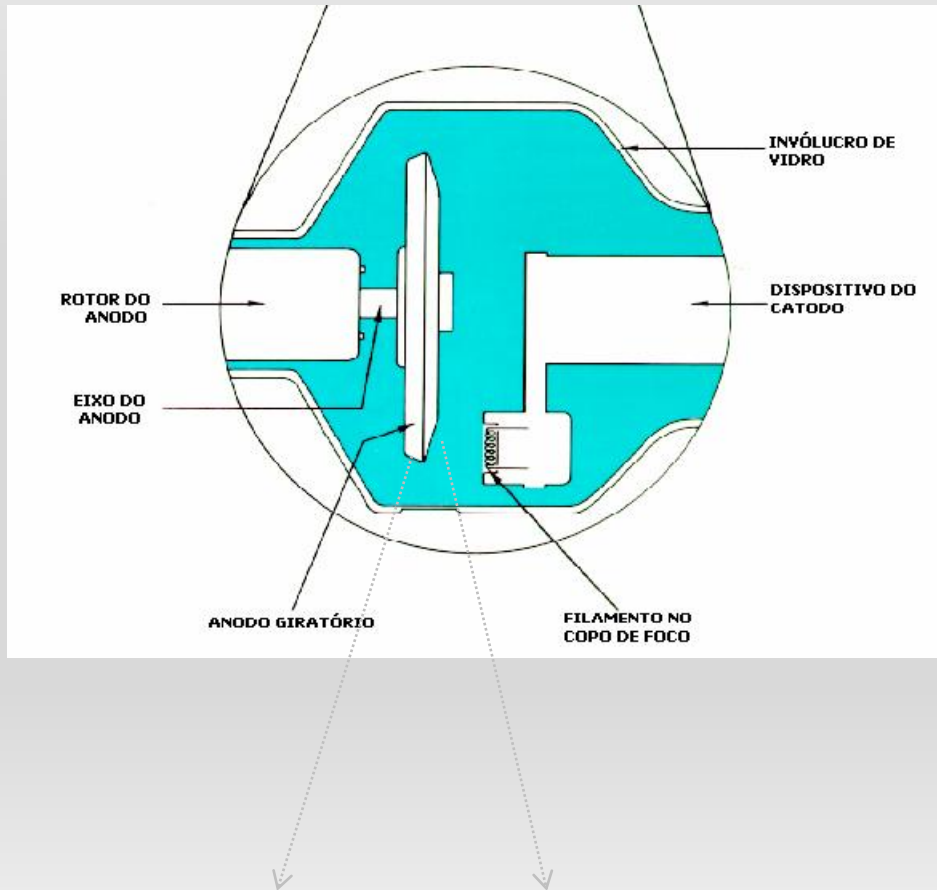


Publicação Kodak M1-18





- Os eletrodos são projetados para que os elétrons produzidos no catodo (eletrodo negativo ou filamento) possam ser acelerados por uma diferença de potencial alta em direção ao anodo (eletrodo positivo ou alvo).



- Os elétrons são produzidos pelo aquecimento do filamento de tungstênio (emissão termoiônica) e acelerados através do tubo para alcançar o alvo de tungstênio, onde os raios X são por sua vez produzidos

- O ponto focal = área do alvo de tungstênio que é bombardeada pelos elétrons do catodo (filamento)
- A maior parte da energia = convertida em calor
- Menos de 1% é convertida em raios X

Propriedades Básicas de um Feixe de Raios X Diagnóstico

- Aparelhos de raios X = classificados de acordo com a sua potência e com as aplicações para as quais são projetados
- Os sistemas de radiodiagnóstico geram raios X, aplicando-se potenciais entre 20 e 150 kVp e com a corrente aplicada ao tubo variando de 25 a 1200 mA
- Sistemas de radioterapia operam com potenciais mais altos, porém a corrente do tubo não ultrapassa 20 mA



A intensidade e a qualidade da radiação – função :

- da corrente do tubo
 - do tempo de exposição,
 - do potencial aplicado
 - da filtração
-
- O número de fótons emitidos por unidade de tempo = controlado pela corrente do tubo (mA)
 - A distribuição espectral - determinada : pelo potencial aplicado (kVp), pelo material do anodo e pela composição do material da filtração tanto inerente como adicional

A energia dos fótons em um feixe de raios X pode ser especificada em termos de fluência de energia,

$$\Psi = dR/da$$

dR = energia da radiação incidente em uma esfera de área seccional da

Os fótons irão ionizar o ar que eles estão atravessando (por meio dos efeitos fotoelétrico e Compton), resultando em valores mensuráveis de kerma no ar e dose absorvida no ar em qualquer ponto do feixe de raios X



- A filtração inerente e adicional eliminam as energias baixas que podem ser absorvidas pelo paciente.
- A quantidade de raios X gerados é proporcional ao número atômico (Z) do material do alvo, ao quadrado do valor da tensão $(kVp)^2$, e à corrente aplicada ao tubo (mA).
- A energia dos raios X gerados depende portanto principalmente do potencial (kVp) aplicado ao tubo.

Escolha da Tensão Aplicada ao Tubo e da Filtração

Tensão aplicada ao tubo e a filtração :
produção um espectro de energia, que ao atravessar o
paciente resultará em uma imagem radiográfica contendo as
informações diagnósticas desejadas

De um modo geral, a tensão aplicada ao tubo, a corrente
que passa pelo anodo e a filtração total definem o espectro e
são utilizados para a escolha da técnica radiológica.

Grandezas e Unidades utilizadas em Radiodiagnóstico -Básicas-

Kerma

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

- dE_{tr} : é a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas não carregadas num material de massa dm
- A unidade de kerma é J/kg.
- O nome especial para a unidade de kerma é gray (Gy).

Taxa de Kerma

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt}$$

- dK : é o incremento da kerma no intervalo de tempo dt
- A unidade da taxa de kerma é $J/(kg.s)$
- O nome especial para a unidade de taxa de kerma é gray por segundos
(Gy/s).

Energia depositada

- Energia depositada pela radiação ionizante na matéria em um dado volume
 - Grandeza estocástica - seus valores variam descontinuamente no espaço e tempo

$$E = \sum R_{\text{incidente}} - \sum R_{\text{emergente}} + \sum Q$$

- $\sum R_{\text{incidente}}$ = soma das energias de todas as partículas ionizantes carregadas ou não carregadas que entram no volume;
- $\sum R_{\text{emergente}}$ = soma das energias de todas as partículas ionizantes carregadas ou não carregadas que saem do volume;
- $\sum Q$ = soma de todas as alterações da energia de repouso do núcleo e das partículas elementares em qualquer transformação nuclear que ocorra no volume.

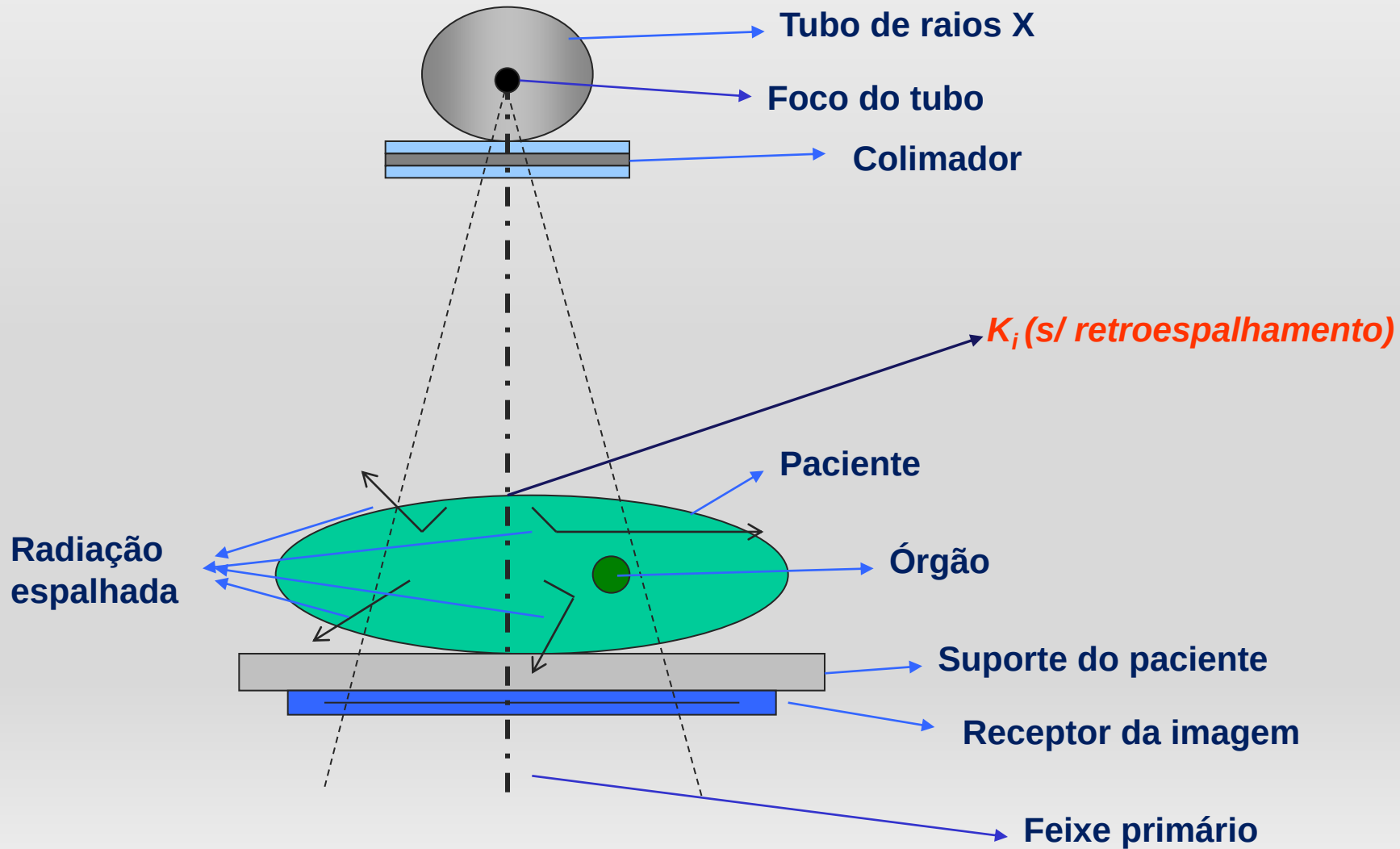
Grandezas e Unidades utilizadas em Radiodiagnóstico -Específicas-

Kerma

- grandeza primária dosimétrica no intervalo de radiodiagnóstico
- Laboratórios Nacionais
- facilmente medido

Kerma no ar incidente

- $K_i = K$ incidente medido no eixo central do feixe de raios X na posição do paciente ou superfície do phantom (s/ retroespalhamento)
- Unidade : J/kg $\rightarrow$ Gy

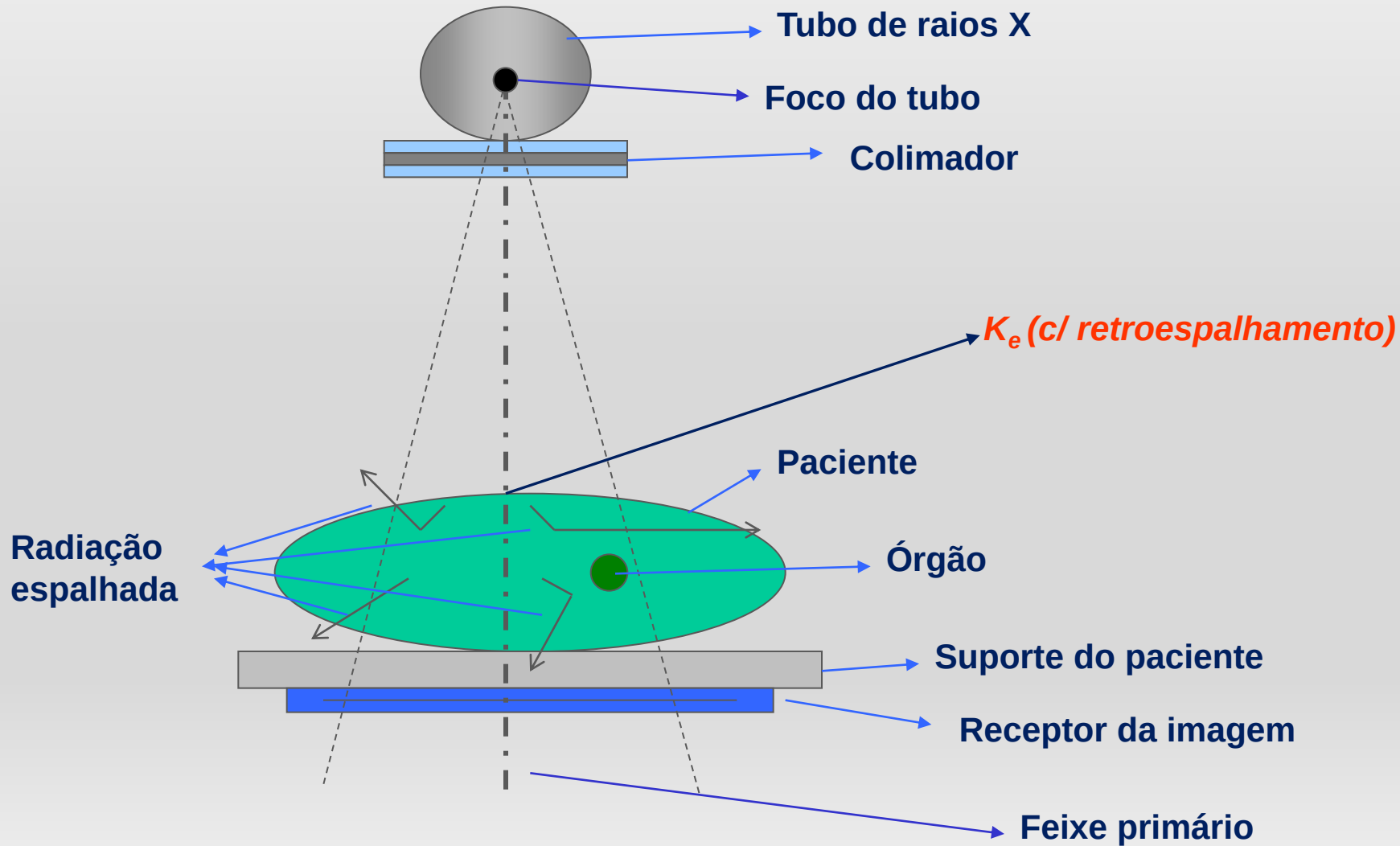


Kerma na superfície de entrada

- $K_e = K$ medido no eixo central do feixe de raios X na posição do paciente ou superfície do phantom (c/ retroespalhamento e radiação incidente)
- Unidade : J/kg $\rightarrow$ Gy

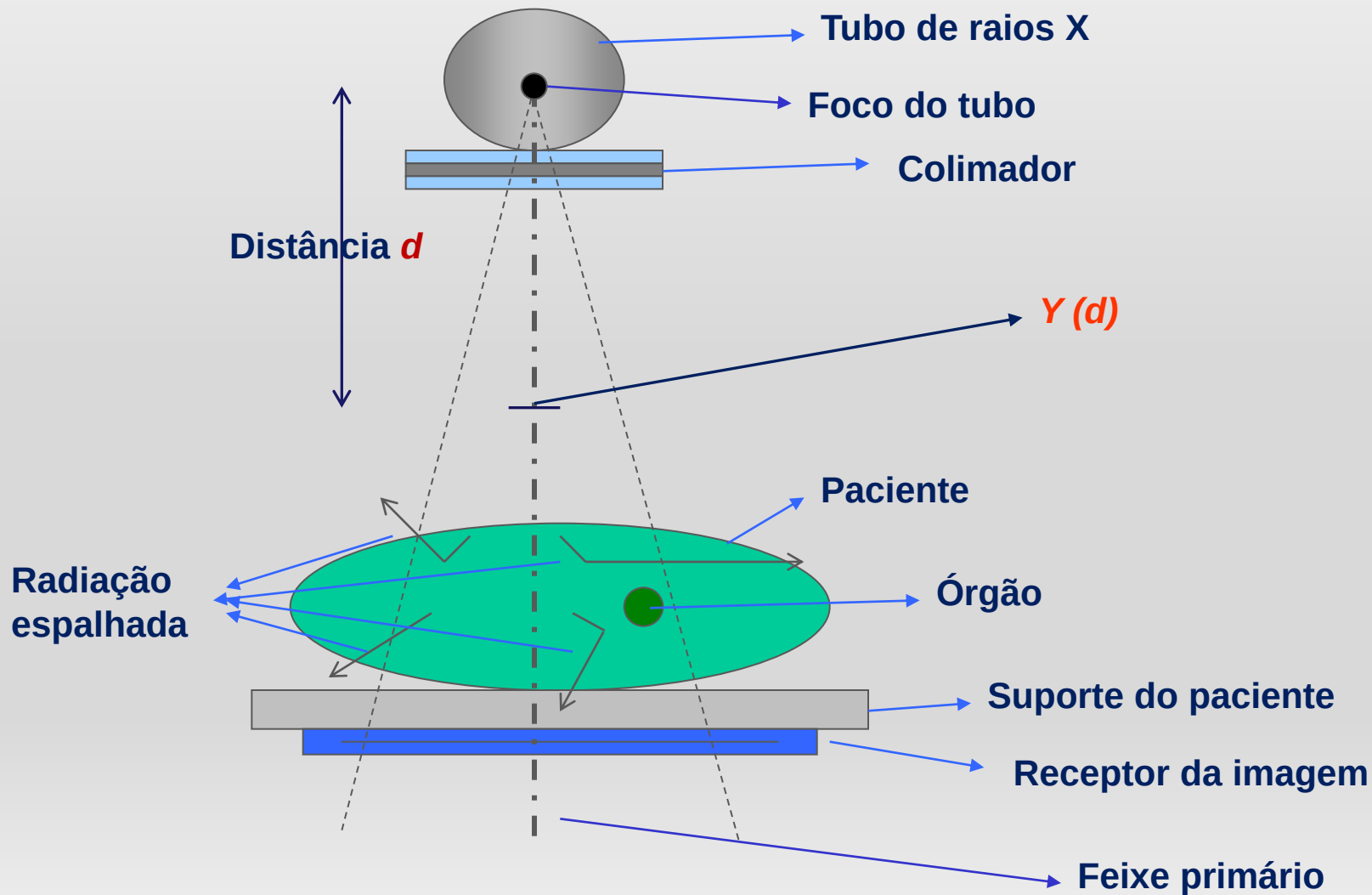
$$K_e = K_i \cdot B$$

B – Fator de retroespalhamento



Rendimento do tubo de raios X

- $Y(d)$ = quociente do kerma no ar em uma distância d pelo produto corrente-tempo (mAs)
- Unidade : Gy/mAs

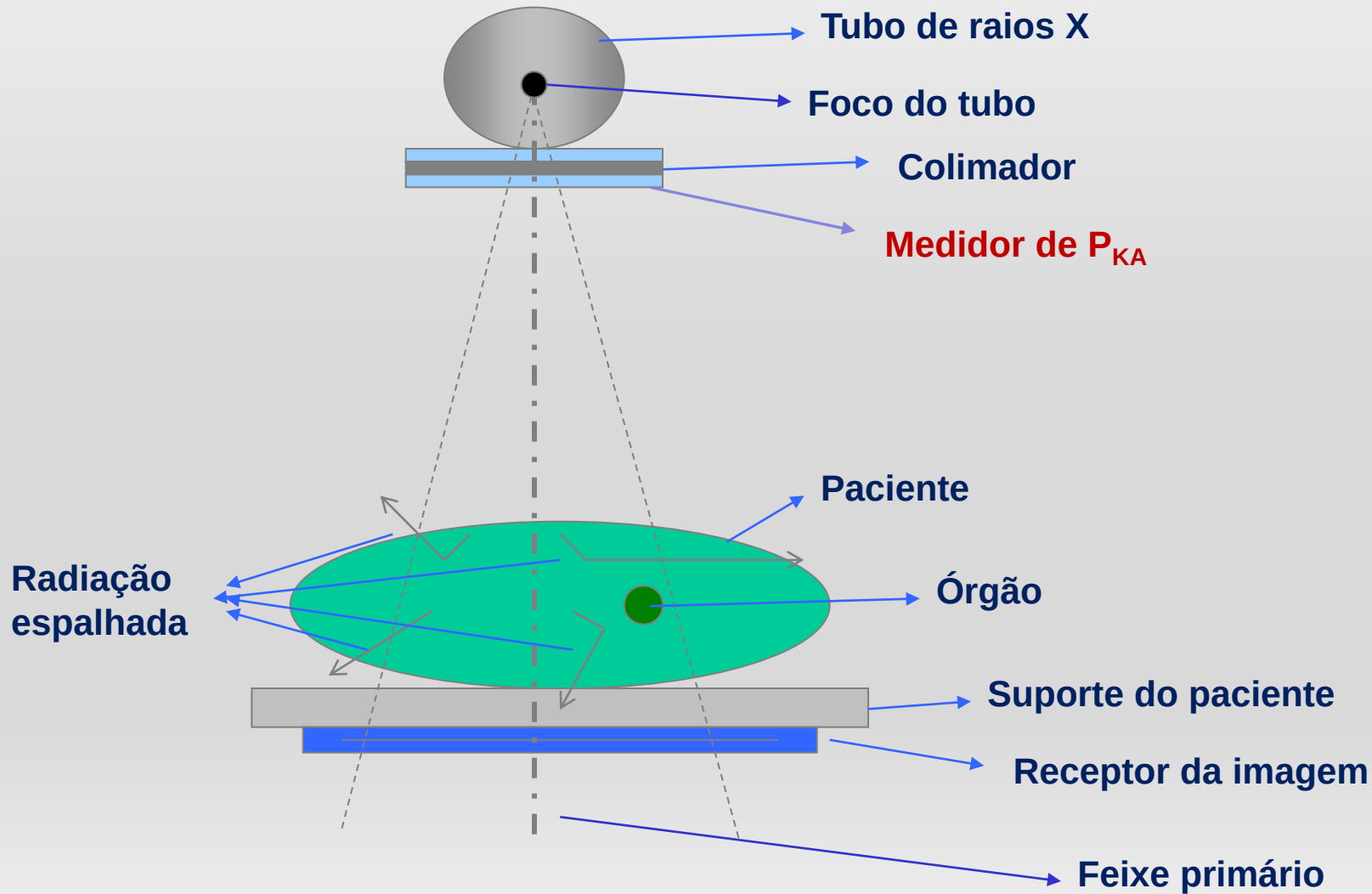


Produto Kerma no ar-área

- P_{KA} = integral do kerma no ar sobre a área do feixe de raios X no plano perpendicular ao eixo do feixe

$$P_{KA} = \int_A K(x,y) dx dy$$

- Unidade : Gy/m²



Produto Kerma no ar-comprimento

- P_{KL} = integral do kerma no ar sobre uma linha L

$$P_{KL} = \int_L K(z) dz$$

- Unidade : Gy/m
- Aplicação : dosimetria em TC e radiologia dental panorâmica

Índice de kerma em Tomografia Computadorizada

- C_{100} = É o quociente da integral do kerma no ar ao longo de uma linha paralela ao eixo de rotação de um scanner de TC sobre um comprimento de 100 mm e o produto do número de seções tomográficas, n , pela espessura nominal de corte T

$$C_{100} = (1/nT) \int_{-50}^{+50} K(z) dz$$

- Pode ser medido livre no ar (ao longo do eixo de rotação do scanner) ou no *phantom* de PMMA
- Outros nomes: índice de dose em TC (CTDI).
- Unidade : Gy

Instrumentação

Medidores de radiação em Radiodiagnóstico

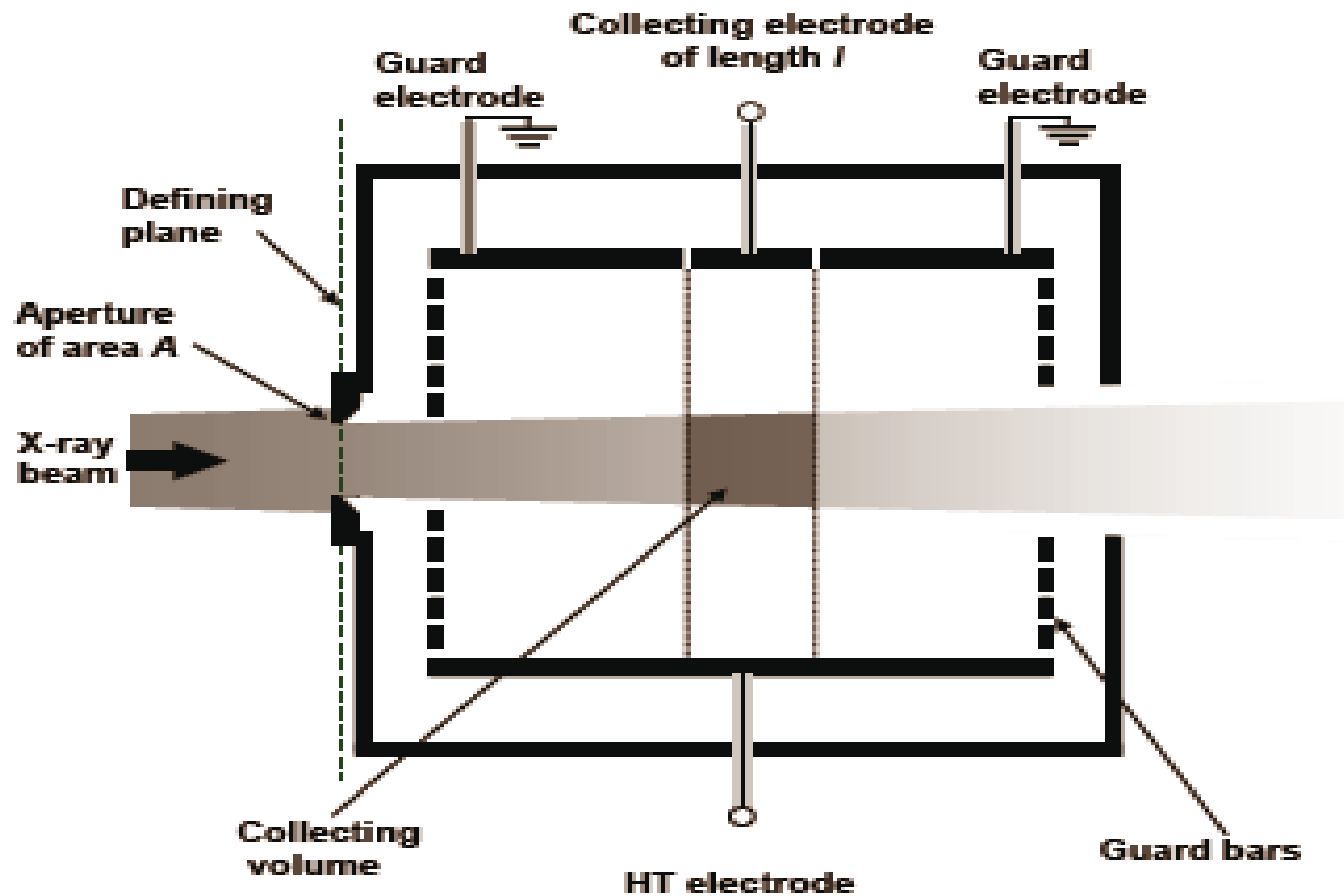
- Medidas de kerma e taxa de kerma
- Radiação de fuga
- Medidas ambientais

Dosímetros especiais são necessários com projeto e desempenho adequados para a sua utilização clínica.

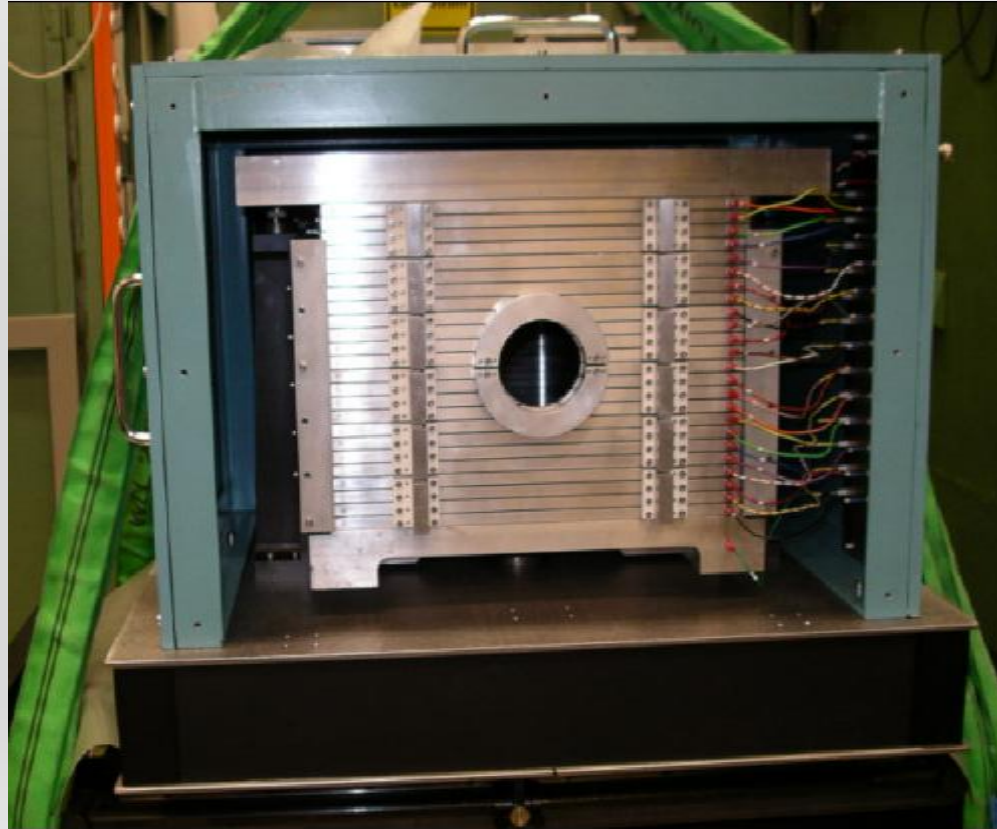
Câmaras de ionização

- **Câmaras de ar-livre**
- Padrão primário para a grandeza kerma no ar (mede a grandeza pela sua definição)
- Laboratórios de padronização primária e alguns secundários
- Depois de estabelecida a grandeza (kerma ou taxa de kerma)
– instrumentos de referência são calibrados por substituição

- Câmaras de ar-livre

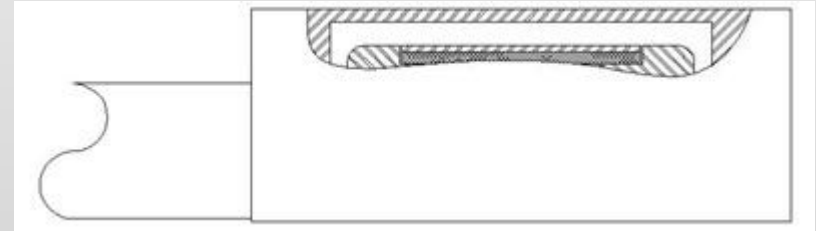


- **Câmaras de ar-livre**

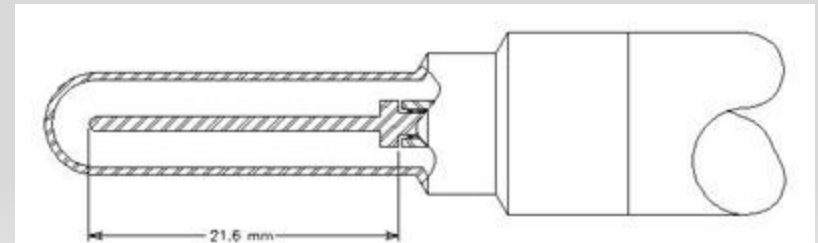


- **Câmaras de placas paralelas e cilíndricas**
- Placas paralelas - mais comuns e utilizadas em radiodiagnóstico
- Calibradas com as placas orientados perpendicularmente na direção do feixe de raios X
- Cilíndricas – Resposta simétrica
- Devem ser abertas

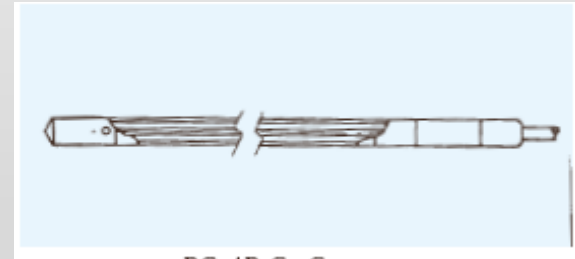
Janela de entrada



Eletrodo central



- **Câmaras para TC**
- Cilíndrica – tipo lápis
- Volume ativo – 100 mm de comprimento
- Projetada para exposições não uniformes
- Usadas dentro do phantom cilíndrico



- **Dosímetros de estado sólido**
- Alternativa : dosímetros termoluminescentes (TL) e semicondutores
- Vantagens : pequeno tamanho – intercomparações postais e uso rotineiro em hospitais
- Desvantagens : dependência energética - não podem ser usados na calibração de outros dosímetros
- Devem ser calibrados usando câmaras de ionização

Padrão de Referência



PTW



Campo ou referência



RADCAL

GAMMEX





Inovision



Unfors



- **Requisitos para instrumentos de campo (usuários)**

- Devem seguir as recomendações da IEC 61674 :

Aplica-se a dosímetros equipados com câmaras de ionização e detectores semicondutores para radiodiagnóstico

- Considerar o tipo de instrumento mais adequado para o uso pretendido



- **Requisitos para instrumentos de referência
(Laboratórios de calibração)**
- Câmaras de ionização – pouca dependência energética
boa estabilidade ao longo do tempo
- Devem seguir as recomendações da IEC 61674

- Especificações para instrumentos de referência**

Aplicação	Tipo da câmara	Intervalo de tensão kV	Incerteza intrínseca (k=2) %	Max. Variação na resposta %
Radiologia geral	Cilíndrica ou placas paralelas	60-150	3,2	$\pm 2,6$
Fluoroscopia	Cilíndrica ou <u>placas paralelas</u>	50-100	3,2	$\pm 2,6$
Mamografia	Placas paralelas	22-40	3,2	$\pm 2,6$
Tomografia computadorizada	Tipo lápis (cilíndrica)	100-150	3,2	$\pm 2,6$
Radiologia dental	Cilíndrica ou <u>placas paralelas</u>	50-90	3,2	$\pm 2,6$



Parte 2 :

- Normas
- Procedimentos de Calibração
- Procedimentos para Medidas Clínicas

NORMAS E PROCEDIMENTOS

- Início dos anos 90 - preocupação crescente :
- Controle de qualidade
- Proteção radiológica

Três fatores importantes :

- Qualidade diagnóstica da imagem radiográfica
- Seleção da técnica radiográfica
- Dose de radiação para o paciente



IEC 1267 – 1994 : Medical diagnostic X-ray equipment – Radiations conditions for use in the determination of characteristics

Estabeleceu algumas séries de qualidades de radiação para medidas de feixes diretos e atenuados - filtração adicional (de 4 a 45 mmAl) - Medidas no plano do receptor da imagem



Revisão em 2005 – IEC 61267

Qualidades	Origem	Simulador	Possível aplicação
RQR	Feixe direto	---	Radiologia geral e fluoroscopia (no ar)
RQA	Feixe atenuado	Aluminio	Medidas depois do paciente
RQT	Feixe atenuado	Cobre	TC (medidas livre no ar)
RQR-M	Feixe direto	--	Mamografia (medidas livre no ar)
RQA-M	Feixe atenuado	Alumínio	Medidas depois do paciente



- IAEA- ICRU Grupo formado em novembro de 2000
- Desenvolvimento de um protocolo internacional para dosimetria em radiodiagnóstico (IEC 61267)
- Dosimetry in diagnostic radiology - An international practice code - Technical Report Series 457 - 2007

Portaria 453 do Min.da Saúde (1998)

Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica em
Radiodiagnóstico Médico e Odontológico
Calibração de instrumentos : cada 2 anos

RE 64 - 2003

Guia de Procedimentos para Segurança e Qualidade de
Imagem em Radiodiagnóstico Médico
Instrumentos adequados e devidamente calibrados



NBR ISO/IEC 17025 - 2005

Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração

ISO GUM - 2003

Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição
Terceira Edição Brasileira

VIM - 1995 Portaria INMETRO n 29 de 10/03/1995 (rev. 2000)

Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (em revisão, sob a coordenação do “Bureau International des Poids et Mesures”-BIPM)

PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

-Laboratório de Metrologia-

Calibração :
(VIM-2000)

Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

DIAGNÓSTICO

APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

MÉDIA PRECISÃO
RADIOPROTEÇÃO



RADIOTERAPIA

RADIOBIOLOGIA



ALTA PRECISÃO

"NECESSIDADE DE INSTRUMENTOS CALIBRADOS"



Cuidados importantes no uso de um instrumento :

- ↳ Calibração antes do uso
- ↳ Inspeções mecânicas e elétricas
- ↳ Controle das condições ambientais
- ↳ Baterias removíveis ou a prova de vazamentos
- ↳ Calibrações regulares

A calibração de um instrumento pode ser identificada em quatro testes.

 **Testes de desempenho:** Características de um tipo ou modelo de instrumento.

- ↳ Dependência energética
- ↳ Dependência angular
- ↳ Condições ambientais
- ↳ Outros

-  ***Testes de aceitação*** Antes do primeiro uso → confirma as especificações do fabricante

-  ***Testes de rotina*** : Comparação entre ocasiões precedentes e subsequentes

 Recalibração :

- Periódica regular
- Após conserto
- Pedido do usuário

INTERCOMPARAÇÃO : Instrumentos de mesma classificação
Comparação de comportamentos

INSTRUMENTAÇÃO

📁 **Padrão** : Definir, representar fisicamente, conservar ou reproduzir a unidade para transferência

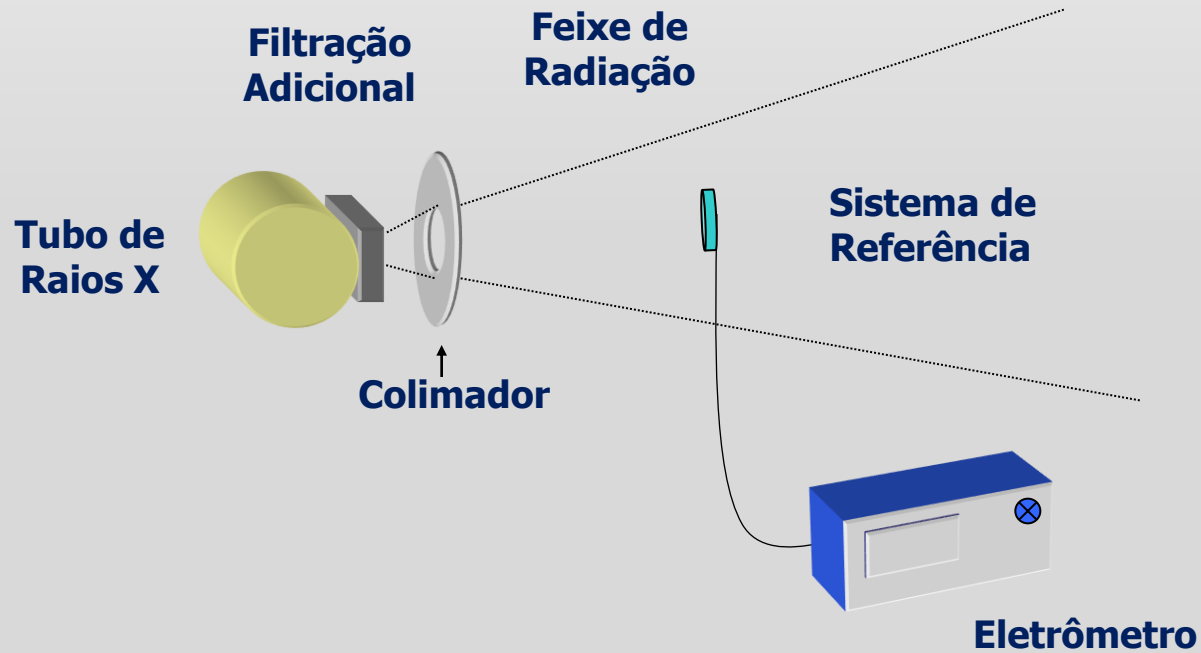
📁 **Padrão primário** Mais alta qualidade metrológica

📁 **Padrão secundário** : Calibrado por meio de um padrão primário

📁 **Instrumento de referência** : Desempenho e estabilidade altos
Calibração de outros instrumentos

TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO

- 📁 Uso de campos de radiação com propriedades bem conhecidas
- 📁 Técnica da substituição



Arranjo de calibração



Etapas :

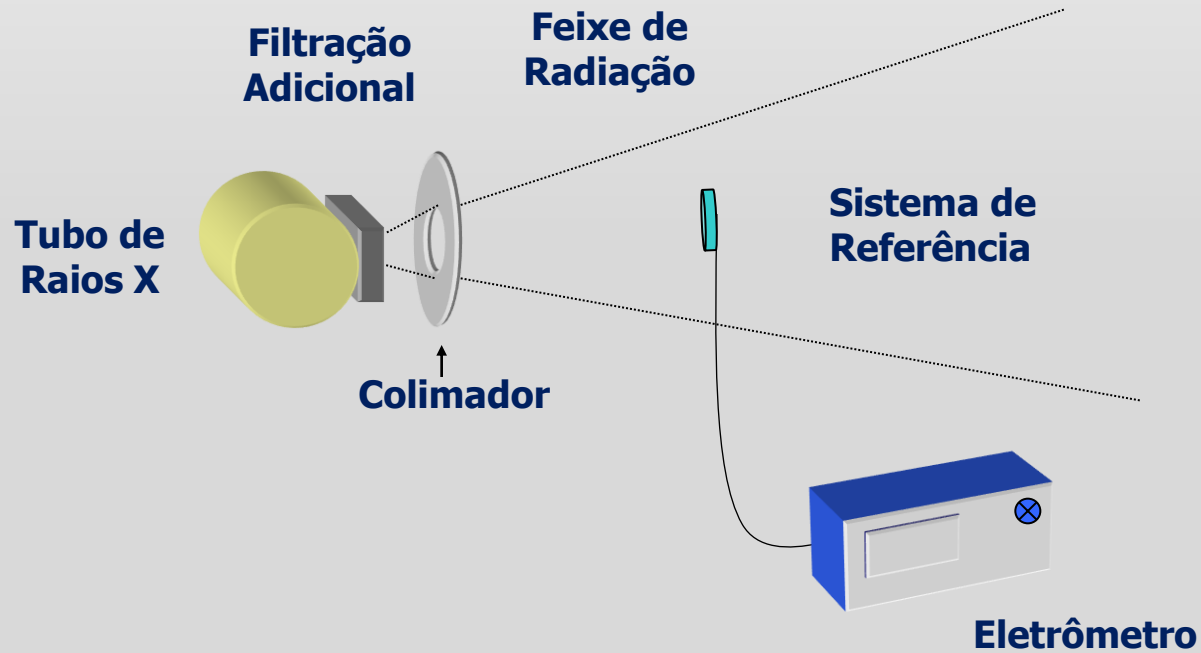
1. Verificação das condições físicas do instrumentos a serem calibrados e acondicionamento no laboratório
 - condições das baterias
 - os cabos
 - dano físico aparente
 - colocado em ambiente com baixa umidade



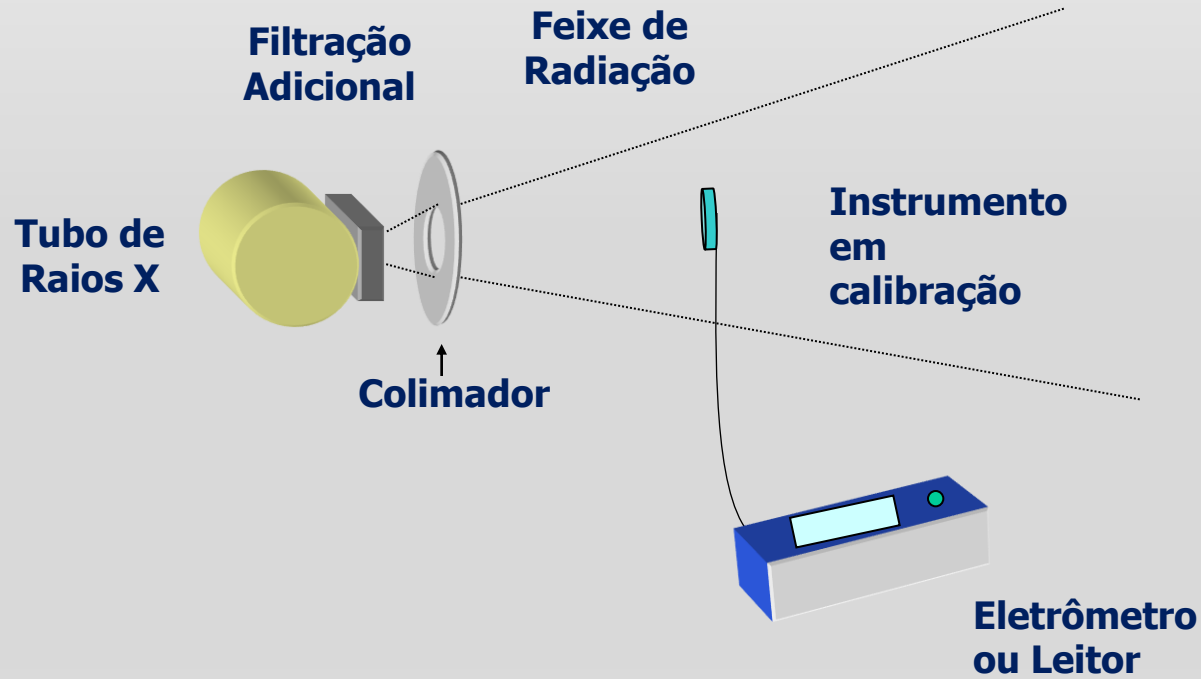
2. Preparação da sala de radiação X

- condições ambientais :
 - temperatura entre 18 e 24 °C
 - umidade : 50 a 65%
- arranjos para posicionamento dos instrumentos

Arranjo de calibração – Sistema de Referência



Arranjo de calibração – Instrumento a ser calibrado



3. Preparação das planilhas a serem utilizadas

Excel

- Determinação das taxas de kerma no ar
 - Condições ambientais e determinação do fator de correção :

$$F(T, p) = \left(\frac{1013,25}{p}\right) \times \left(\frac{273,15 + T}{273,15 + 22}\right)$$

4. Medidas da taxa de kerma no ar real com o instrumento de referência
5. Medidas com o instrumento a ser calibrado
6. Análise dos resultados obtidos
7. Preparação do certificado de calibração
 - ISO 17025



Incertezas associadas à calibração

ISO GUM - 2003 (revisão em 2008)

Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição Terceira Edição Brasileira

VIM (3.9)

A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais, **Tipo A**.

Os outros componentes são avaliados por meio de distribuição de probabilidades assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações, **Tipo B**.

PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Simuladores -

- Utilização de simuladores de paciente (phantom) : controle de parâmetros técnicos
 - Comparação do mesmo sistema em tempos diferentes
 - Comparação de diferentes sistemas
 - Otimização
- Medida depende : modelo e tamanho
- Aplicações : medidas de kerma ou taxa de kerma no ar incidente, kerma ou taxa de kerma de entrada na superfície, medidas em geometrias específicas em condições clínicas



- Projeto e construção : atenuação primária e espalhamento equivalente ao paciente ou parte representativa no intervalo de energia de raios X adequado
- Materiais : ICRU 44 (resinas de acrílico – equivalente ao tecido, PMMA, poliestireno e água)

- Radiologia Convencional
- Exemplos



Tórax



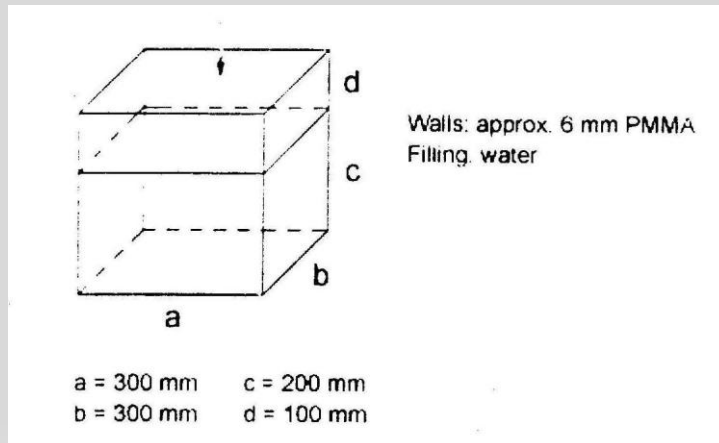
Tórax c/ C.I.



**Abdomen
c/C.I.**

- Fluoroscopia

- Sugestão AIEA – phantom de água com espessura de 200 mm, área de 300 mm x 300 mm- medida de kerma no nar na superfície de entrada



**Alternativa : 185 mm
PMMA**

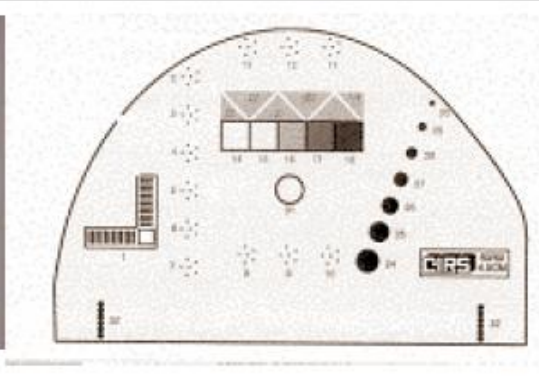


- **Mamografia**
- Duas grandezas – kerma no ar incidente e dose glandular média (aplicações de fatores de conversão)
- Dependem :
 - da qualidade do feixe,
 - espessura da mama e
 - glandularidade da mama

- **Mamografia**
- Exemplos : simuladores usados em protocolos nacionais ou serviços de mamografia

Application or protocol	Phantom construction
United Kingdom: Survey by Fitzgerald <i>et al.</i> (1981)	40 mm BR12
Germany: DGMP protocol (DGMP, 1986)	50 mm PMMA
United Kingdom: IPSM (now IPEM) protocol (IPSM, 1989; IPEM, 1994 and 2005)	40 mm PMMA (up to 2003), 45 mm PMMA (from 2004)
Sweden: SSI protocol (SSI, 1989)	45 mm PMMA
USA: ACR protocol (ACR, 1999)	e.g. 44 mm. PMMA with 7 mm dental wax layer containing embedded test objects
Europe: European protocol (EC, 1996)	45 mm PMMA

- **Mamografia**
- Exemplos : utilizados o Brasil

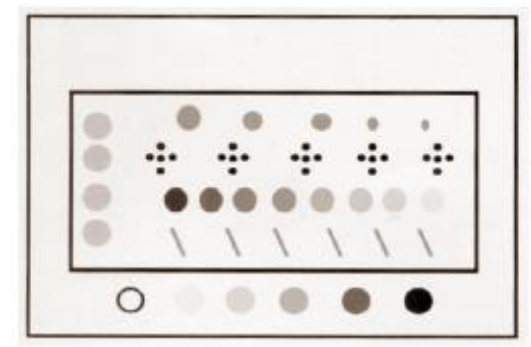


Simulador de mama CIRS - Modelo 11A.

**Resina equivalente ao
tecido mamário**

Simulador CD-MAMA.

**Acrílico – 3 placas
homogêneas**



- Tomografia computadorizada
- Grandezas devem ser expressas em produto kerma no ar-comprimento : medidas livre no ar, dentro ou na superfície do simulador. Utilizando uma câmara de 100 mm de comprimento.
- Somente dois simuladores são adequados : de cabeça e de corpo (PMMA)



- Radiologia dental
- Tipos de exames : intraoral e panorâmicos, cefalometria e tomografia computadorizada.
- Cefalometria e TC : mesmo já citados
- Intraoral e panorâmicos : simuladores Alderson-Rando
- Determinação de dose efetiva (inserção de TL)





PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Paciente -

- Medidas nos pacientes – estimativa direta da dose média para uma população e variações na dose para os diferentes tamanhos e composição do paciente e da técnica radiográfica
- Importante – complementar as medidas realizadas com simuladores com medidas feitas nos pacientes.
- Resultados – estabelecimento de níveis de referência

PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Paciente -

- Radiologia geral – TL
- Fluoroscopia – produto kerma-área (medidores)
- Procedimentos intervencionais – TL dispostos retangularmente na pele do paciente e medidores de produto kerma-área
- Mamografia – cálculo da dose angular média (rendimento do tubo de raios X)

PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Paciente -

- Tomografia computadorizada – parâmetros da exposição em conjunto com cálculos de Monte Carlo e o índice de kerma em TC – estimativa de dose nos órgãos
- Radiologia dental – não realizadas – utiliza-se parâmetros fixos de exposição e medidas livres no ar – grandezas específicas, como kerma incidente no ar
 - Panorâmicas – medidor de produto kerma-área

PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Controle de qualidade -

Requisitos : adequado diagnóstico, menor custo e menor exposição possível do paciente à radiação

- Tensão aplicada ao tubo
- Camada semi-redutora (e filtração)
- Rendimento do tubo, tempo de exposição, corrente do tubo e produto corrente-tempo
- Reprodutibilidade do rendimento do tubo

PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Controle de qualidade -

- Desempenho dos sistema automático de controle do tempo:
 - reprodutibilidade, dependência da qualidade do feixe, sensibilidade e seleção automática da voltagem do tubo e filtração
- Desempenho do sistema de brilho automático para intensificadores da imagem :
 - Reprodutibilidade, taxa de dose de saída, dependência da qualidade do feixe e seleção automática da voltagem do tubo e filtração



PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Código de prática para cada técnica-

- Escolha de grandezas dosimétricas
- Medidas utilizando simuladores :
 - Lista de equipamentos
 - Métodos de medidas
 - Cálculos
 - Estimativa de incertezas



PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS CLÍNICAS

- Código de prática para cada técnica -

- Medidas nos pacientes
 - Lista de equipamentos
 - Métodos de medidas
 - Cálculos
 - Estimativa de incertezas



OBRIGADA !!