A cylindrical source of Ir-192 is shown on a scale with a red laser line. The source is a metal cylinder with a yellowish top and bottom flange. It is positioned on a yellow square base. A red laser line is directed at the source, and another red laser line is visible in the background. The scale has markings for 60, 65, 70, 75, 80, 85, and 90. The background is dark.

Recomendações para Calibração de Fontes de ^{192}Ir de Alta Taxa de Dose Usadas em Braquiterapia

2ª Edição Revisada

Ficha catalográfica

B823b Brasil. Ministério da Saúde. Instituto Nacional de Câncer.
Recomendações para calibração de fontes de ^{192}Ir de alta
taxa de dose. Rio de Janeiro: INCA, 2005. 2^a. Ed.

22p.. fig., tab. (Programa de Qualidade em Radioterapia)

Bibliografia
ISBN 85-7318-06-0

1.RADIOTERAPIA. 2.DOSIMETRIA. 3 BRAQUITERAPIA
I. Título. II. Série

CDD615.842



Recomendações para Calibração de Fontes de ^{192}Ir de Alta Taxa de Dose Usadas em Braquiterapia

© 2005 INCA

É permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.
2ª edição revisada

Coordenação Editorial

Tania Chalhub

Divulgação Científica (CEDC)

Autoria do Documento

María Helena da Hora Maréchal, D.Sc.

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

Carlos Eduardo Veloso de Almeida, D.Sc.

Laboratório de Ciências Radiológicas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - LCR/UERJ

Claudio Sibata, D.Sc.

Department of Radiation Oncology at ECU School of Medicine, Greenville, North Carolina - EUA

Revisão da 2ª Edição

María Helena da Hora Maréchal, D.Sc.

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

Roberto Salomon de Souza, M.Sc.

Programa de Qualidade em Radioterapia do Instituto Nacional de Câncer - PQRT/INCA

Equipe Operacional do Programa de Qualidade em Radioterapia

Alfredo Viamonte Marín - Físico

Anna Maria Campos de Araujo - Física / Supervisora

Claudio Castelo Branco Viegas - Físico

Paul Clivland de Oliveira - Técnico de Laboratório

Regina Celia Felipe da Silva Marinho - Secretária

Ricardo Rodrigues Villa-Forte - Administrador

Roberto Salomon de Souza - Físico

Diagramação e editoração eletrônica

Cecília Pachá

Seção de Produção de Material Educativo (CEDC)

Foto Capa

Roberto Salomon de Souza

Programa de Qualidade em Radioterapia (PQRT)

Bibliotecária responsável

Silvia Cristina Olivier Dalston

Supervisora do Sistema Integrado de Bibliotecas (CEDC)

Impressão

Gráfica do INCA

Tiragem

200 exemplares

INCA

Praça Cruz Vermelha, 23

Centro - Rio de Janeiro - RJ

Impresso no Brasil

SUMÁRIO

	Páginas
1 - Introdução	9
2 - O TECDOC-1079..	9
2.1 - Medida livre no ar com câmaras de ionização tipo dedal de 0,6cm ³ de volume .	9
2.2 - Medida com uma câmara de ionização tipo poço previamente calibrada com uma fonte de intensidade conhecida	10
3 - Descrição dos procedimentos	10
3.1 - Medidas de kerma no ar, livre no ar com câmaras de ionização tipo dedal de 0,6cm ³ de volume	10
3.1.2 - Material necessário	12
3.2 - Medidas de kerma no ar, livre no ar com câmaras de ionização tipo poço	12
3.2.2 - Material necessário	12
4 - Calibração da câmara de ionização tipo poço	13
5 - Controle de qualidade	13
Referências	14
Anexo A - Fatores de correção A_w para a parede de diferentes câmaras de ionização em feixes de raios X de 250kV e raios gama do ¹⁹² Ir e ⁶⁰ Co calculados pelo método de Monte Carlo	15
Anexo B - Determinação da intensidade de kerma no ar de uma fonte de ¹⁹² Ir de alta taxa de dose com câmara de ionização tipo Farmer (0,6cm ³)	17
Anexo C - Determinação da intensidade de kerma no ar de uma fonte de ¹⁹² Ir de alta taxa de dose com câmara de ionização tipo poço	20

APRESENTAÇÃO

Nos últimos dez anos, a braquiterapia de alta taxa de dose com pós-carregamento remoto foi largamente difundida no Brasil, que conta atualmente com cerca de 80 irradiadores de ^{192}Ir espalhados por todo o país. Hoje, a utilização desses irradiadores não está limitada somente ao tratamento de tumores ginecológicos, mas sendo expandida para o tratamento de tumores de cabeça e pescoço, mama, reto e próstata.

Paralelamente, novas técnicas de dosimetria das fontes de ^{192}Ir e novos detetores foram sendo introduzidos como, por exemplo, a câmara de ionização tipo poço, que se tornou instrumento indispensável para os físicos médicos os quais trabalham com braquiterapia de alta taxa de dose.

Preocupado em difundir conhecimentos e criar uma cultura nacional de controle de qualidade em radioterapia, em todas as suas modalidades, o Programa de Qualidade em Radioterapia do Instituto Nacional de Câncer lança a segunda edição revisada desta obra e oferece aos físicos médicos do Brasil mais essa publicação, pois acredita ser uma importante contribuição para o desenvolvimento da radioterapia no país.

Anna Maria Campos de Araujo
Programa de Qualidade em Radioterapia

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de braquiterapia de alta taxa de dose que utilizam fontes de ^{192}Ir já são amplamente utilizados nos Estados Unidos, na maioria dos países da Europa e no Brasil, onde até o presente momento existem, aproximadamente, 80 sistemas em funcionamento.

Atualmente, o maior problema em relação a esses sistemas se encontra na definição de um procedimento de calibração das fontes de ^{192}Ir de alta taxa de dose em termos de intensidade de kerma no ar, que até então é a grandeza recomendada por órgãos normativos ou científicos (CFMRI, 1983; BCRU, 1984; AAPM, 1987). Essas fontes são, atualmente, fornecidas pelos fabricantes com incertezas entre 5 a 10 % na sua atividade. Este valor ainda é excessivamente alto, uma vez que a incerteza total aceita em braquiterapia para a dose liberada no ponto de interesse clínico, envolvendo todos os passos desde o diagnóstico até o tratamento, deve ser inferior a 10 %.

Para se estabelecer um procedimento para a determinação da intensidade de kerma no ar dessas fontes, é necessário definir primeiro um método para obtenção de um fator de calibração para as fontes de ^{192}Ir . Isto é complexo, em especial, devido ao seu espectro gama multi-energético, ao encapsulamento com material de alto número atômico, a curta meia-vida deste radioisótopo e a sua alta atividade. Como resultados desses fatores, ainda, não existe um padrão primário para a calibração dessas fontes em termos da grandeza de interesse, taxa de kerma no ar.

Como consequência desta indefinição, os usuários dessas fontes são obrigados a adotar um dos diversos formalismos existentes, muitos deles sem nenhum rigor ou justificativa física consistente conforme foi discutido por de Almeida *et al.* (1999).

2. O TECDOC-1079

Num esforço para estabelecer um procedimento de calibração para essas fontes, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) publicou, em 1999, o documento "*Calibration of Brachytherapy Sources - Recommendations on Standardized Procedures for the Calibrations of Brachytherapy Sources at SSDs and Hospitals*", TECDOC-1079, em que são recomendados dois procedimentos para determinação da intensidade de kerma no ar de fontes utilizadas em braquiterapia:

1. Medida livre no ar com câmaras de ionização tipo dedal de $0,6\text{cm}^3$ de volume;
2. Medida com uma câmara de ionização tipo poço previamente calibrada com uma fonte de intensidade conhecida.

2.1 - Medida livre no ar com câmaras de ionização tipo dedal de $0,6\text{cm}^3$ de volume

Dos procedimentos para determinação da intensidade das fontes com medidas livres no ar, utilizando câmaras tipo dedal, encontram-se três propostas de métodos para a obtenção do fator de calibração para o ^{192}Ir , $N_K(\text{Ir})$.

O método, descrito por Ezzel (1989), propõe a obtenção do fator de calibração para as fontes de ^{192}Ir através da média dos fatores de calibração para os feixes de raios X de 250kV e de radiação gama do ^{60}Co . Nessa proposta, o fator de calibração N_K da câmara de ionização para o feixe de ^{60}Co é determinado com a capa de equilíbrio eletrônico de $0,55\text{g/cm}^2$, sendo, entretanto, a dosimetria das fontes de ^{192}Ir feita com a câmara de ionização sem a capa de equilíbrio eletrônico. Esse método ignora a contribuição dos elétrons e fótons gerados no encapsulamento da fonte. Como resultado, o valor da intensidade do kerma no ar da fonte pode ser superestimado em cerca de 2% para as distâncias usuais de calibração.

O método, proposto por Goetsch *et al.* (1991), propõe a obtenção do fator de calibração para as fontes de ^{192}Ir através da interpolação linear entre o fator de calibração para feixes de raios X de 250kV com energia efetiva de 136keV e o fator de calibração para feixes de raios gama do ^{137}Cs . Nesse caso, é recomendado que uma mesma capa de equilíbrio eletrônico seja utilizada nas medidas em todos os feixes, incluindo aquele produzido pela fonte de ^{192}Ir . Adicionalmente, foi determinada uma capa de equilíbrio eletrônico de $0,31\text{g/cm}^2$ de grafite como suficiente para gerar o equilíbrio de partículas carregadas para as três energias dos feixes. Considera-se ainda uma correção média para atenuação e espalhamento

de fótons e elétrons na capa de equilíbrio eletrônico independente do modelo da câmara. Esse método embora recomendado pela Associação Americana de Físicos em Medicina (AAPM, 1993), é inviável de ser adotado pela maioria dos países, uma vez que os laboratórios de calibração da rede de SSDL's/IAEA não possuem fontes de ^{137}Cs a nível terapêutico para calibrar as câmaras.

O método de calibração, descrito por Maréchal, de Almeida e Sibata (Maréchal, de Almeida, Sibata, 1996; Maréchal, 1998), propõe a obtenção do fator de calibração para a fonte de ^{192}Ir através da interpolação entre o fator de calibração para um feixe de raios X de 250kV com camada semi-redutora de 2,5mm de Cu (energia efetiva de 131keV) e o fator de calibração para o ^{60}Co , ponderando-se esses fatores para a média da fluência energética dos três feixes conforme descrito detalhadamente no procedimento de calibração no ar. As calibrações dos feixes de raios X e ^{60}Co e ^{192}Ir devem ser feitas com a mesma capa de equilíbrio eletrônico de 0,555g/cm².

Esse método preserva o rigor metrológico necessário para a garantir maior exatidão na determinação da intensidade de kerma no ar das fontes, sendo viável de ser adotado pela maioria dos laboratórios de calibração padrão secundário da rede da Agência Internacional de Energia Atômica, possibilitando, assim, uma uniformização da dosimetria dessas fontes entre os diferentes serviços de radioterapia do país e do mundo.

2.2 - Medida com uma câmara de ionização tipo poço previamente calibrada com uma fonte de intensidade conhecida

A complexidade e o tempo envolvido na calibração das fontes de alta taxa de dose podem ser significativamente reduzidos com a utilização de câmaras de ionização tipo poço. Goetsch *et al.* (1992) desenvolveram uma câmara específica para calibração dessas fontes. Essa câmara utiliza um suporte para a fonte revestido com um material especial, *Styrofoam* (isopor), para evitar o aquecimento do ar dentro do volume sensível da câmara e das próprias paredes devido ao calor produzido pelo decaimento da fonte. Atualmente, modelos com características equivalentes são encontrados no mercado.

A estabilidade e exatidão dessas câmaras estão baseadas principalmente em três características:

- 1 - Produção de um grande sinal, uma vez que o volume de coleção de íons em torno da fonte é grande, embora com uma recombinação iônica quase desprezível. Alguns modelos de câmara poço tentam compensar esse problema, utilizando uma tensão de alimentação muito alta. De qualquer forma, é recomendado que o usuário determine a eficiência de coleção de íons periodicamente.
- 2 - As câmaras têm suportes que guiam a fonte para a posição correta. Entretanto, pequenos erros no posicionamento ao longo do tubo, ou mesmo no próprio tubo dentro da câmara, poderão produzir pequenas diferenças no sinal medido.
- 3 - A resposta ao longo do eixo, em geral, permanece dentro de 1% do sinal máximo sobre todo comprimento do tubo.

Antes de se iniciar a dosimetria da fonte com esse tipo de câmara, deve-se determinar a curva de resposta da câmara poço em função da posição da fonte ao longo do seu eixo, para se obter a posição de leitura máxima na qual devem ser realizadas as medidas.

3. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

3.1 - Medidas de kerma no ar, livre no ar com câmaras de ionização tipo dedal de 0,6cm³ de volume

O Programa de Qualidade em Radioterapia (PQRT), visando estabelecer e promover a uniformização de procedimentos entre os usuários de sistema de alta taxa de dose em braquiterapia, propõe neste documento, para as medidas de kerma livre no ar, a adoção do método proposto por Maréchal e de Almeida, já endossado pelo TECDOC-1079, para aqueles usuários que ainda não possuem uma câmara tipo poço.

A utilização desse método requer o conhecimento das correções para atenuação e o espalhamento de cada um dos três feixes de radiação, através de cálculos ou da determinação experimental para cada modelo de câmara e material da capa de equilíbrio eletrônico.

Estes fatores foram calculados pelo método de Monte Carlo usando os códigos EGS IV e ITS 3.0 para alguns modelos de câmaras tipo dedal utilizadas em dosimetria clínica e validados experimentalmente (Maréchal *et al.*, 1996).

Posteriormente, os valores necessários para as demais câmaras disponíveis no mercado foram calculados por Ferreira *et al.* (1999) utilizando o Método de Monte Carlo com o Código EGS IV, empre-

gando uma capa de equilíbrio eletrônico de $0,45\text{g/cm}^2$ universalmente recomendada para os feixes de raios gama do ^{60}Co cujos resultados são apresentados na tabela 1 (Anexo A).

A expressão para obtenção do fator de calibração para energia do ^{192}Ir , $(N_K)_{\text{Ir}}$, é dada por:

$$(A_W N_K)_{\text{Ir}} = (k \cdot A_W \cdot N_K)_{\text{raios-X}} + (k \cdot A_W \cdot N_K)_{\text{Co}} \quad (1)$$

em que $(A_W)_{\text{raios-X}}$, $(A_W)_{\text{Co}}$ e $(A_W)_{\text{Ir}}$ são os fatores de correção para atenuação na capa de equilíbrio eletrônico nos respectivos feixes.

Os fatores de ponderação para fluência média de energia emitida pelos três feixes, $k_{\text{raios-X}}$ e k_{Co} , são obtidos através das relações:

$$k_{\text{raios-X}} = \frac{|\bar{E}_{\text{Ir}} - \bar{E}_{\text{Co}}|}{|\bar{E}_{\text{Co}} - \bar{E}_{\text{raios-X}}|} = 0,80 \quad (2)$$

e

$$k_{\text{Co}} = \frac{|\bar{E}_{\text{Ir}} - \bar{E}_{\text{raios-X}}|}{|\bar{E}_{\text{Co}} - \bar{E}_{\text{raios-X}}|} = 0,20 \quad (3)$$

Os valores de energia média ou efetiva utilizados para obtenção desses fatores foram:

$$\bar{E}_{\text{Ir}} = 397 \text{ keV}, \quad \bar{E}_{\text{Co}} = 1250 \text{ keV} \text{ e } \bar{E}_{\text{raios-X}} = 131 \text{ keV}$$

Os valores de A_W dependem da espessura e do material da capa de equilíbrio eletrônico utilizada nas calibrações das câmaras de ionização. É recomendada portanto, a utilização da capa para ^{60}Co de $0,55\text{g/cm}^2$ para estabelecer o equilíbrio eletrônico dos três feixes utilizados.

A fim de atender às necessidades específicas deste procedimento, o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI/IRD) implantou uma qualidade de feixe identificada com o código E07 para raios X, possibilitando o usuário obter o $(N_K)_{\text{Ir}}$ para sua câmara a partir da equação 1, visto que a calibração para a qualidade de raios gama de ^{60}Co já é disponível rotineiramente.

A taxa de kerma no ar pode ser determinada pelas medidas feitas no ar, usando a seguinte equação:

$$\dot{K}_R = N_K \cdot \left(\frac{M_u}{t} \right) \cdot k_{\text{air}} \cdot k_{\text{scatt}} \cdot k_n \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{ref}}} \right)^2 \quad (4)$$

em que:

- \dot{K}_R é a taxa de kerma no ar a 1 metro;
- N_K é o fator de calibração em kerma no ar da câmara de ionização para o espectro de energia de fótons da fonte;
- M_u é a carga coletada durante um tempo t e corrigida para as condições de referência de temperatura e pressão, além da recombinação iônica e efeito de trânsito da fonte;
- k_{air} é a correção para atenuação no ar dos fótons primários entre a fonte e a câmara;
- k_{scatt} é a correção para radiação espalhada nas paredes, piso, arranjo experimental, ar, etc;
- k_n é a correção para não uniformidade da fluência de fótons na câmara;
- d é a distância entre o centro da fonte e o centro da câmara de ionização;
- d_{ref} é a distância de referência de 1 metro.

Como exemplo, para distâncias típicas de calibração (TECDOC-1079), temos as seguintes medidas:

$k_{\text{air}} = 1,001$ para $d = 10 \text{ cm}$ e energia dos fótons do ^{192}Ir ;

$k_n = 1,009$ para câmara tipo Farmer e $d = 10 \text{ cm}$;

k_{scatt} : deve ser determinado na sala de medidas, entretanto quando as medidas são realizadas a distâncias maiores que 1 metro do piso e das paredes, essa correção não deve ultrapassar 2% (Goetsch *et al.*, 1992).

Recomenda-se o uso de uma distância maior ou igual a 10cm entre o centro e o volume da câmara para otimização do valor da carga coletada, quando comparada à contribuição devido ao espalhamento da sala.

3.1.2 - Material necessário

Para a realização das medidas, sugere-se a utilização de um arranjo experimental que possibilite o posicionamento da câmara de ionização cilíndrica a 10cm da fonte. A estrutura desse sistema de posicionamento deve ser de material plástico, por exemplo, acrílico para minimizar a contribuição no sinal coletado devido ao espalhamento.

São necessários, também, um conjunto dosimétrico composto por uma câmara de ionização cilíndrica de 0,6cm³ de volume e um eletrômetro com escala de três casas decimais.

3.2 - Medidas de kerma no ar, livre no ar com câmaras de ionização tipo poço

A calibração da fonte de ¹⁹²Ir deve ser realizada com uma câmara de ionização tipo poço previamente calibrada em termos de kerma no ar em um laboratório de referência.

Para o procedimento experimental, a câmara deverá ser posicionada a, pelo menos, um metro de distância do solo e das paredes da sala para minimizar a contribuição no sinal coletado devido ao espalhamento.

A fonte deverá ser localizada na posição de resposta máxima ao longo do eixo longitudinal da câmara poço. Para isto, devem ser realizadas diversas leituras em diferentes posições ao longo desse eixo.

A taxa de kerma no ar de referência *equivalente* em Gy.m².h⁻¹ é, então, determinada pela expressão:

$$\dot{K}_R = N_{KR} \cdot \left(\frac{M_u}{t} \right) \cdot k_{elet} \cdot k_{TP} \cdot k_s \quad (5)$$

em que:

- N_{KR} é o fator de calibração da câmara poço em termos de taxa de kerma no ar de referência;
- M_u é a leitura média do eletrômetro da carga coletada pela câmara poço num tempo t em unidades de escala;
- t é o tempo de medida;
- corrigida para as condições de referência de temperatura e pressão ambiente, perdas por recombinação iônica e efeito trânsito da fonte no caso de medidas de carga;
- k_{elet} é o fator de calibração do eletrômetro (nC/u.e);
- k_{TP} é o fator de correção da massa de ar para temperatura e pressão para as condições de referência dado pela expressão:

$$k_{TP} = \frac{273,15 + T}{293,15} \cdot \frac{1013,25}{P} \quad (6)$$

- k_s é o fator de correção para recombinação iônica dado pela expressão:

$$k_s = (A_{ion})^{-1} = \left[\frac{4}{3} - \left(\frac{M_1}{3M_2} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

em que M_1 é a leitura com $V = 300V$ e M_2 é a leitura com $V = 150V$.

3.2.2 - Material necessário

Para a realização das medidas, é necessário um conjunto dosimétrico composto por uma câmara de ionização tipo poço, específica para calibração de fontes de ¹⁹²Ir de alta taxa de dose, e um eletrômetro com escala de três casas decimais.

4. CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO TIPO POÇO

O fator de calibração para câmaras tipo poço é obtido com uma fonte de ^{192}Ir previamente calibrada no ar com uma câmara cilíndrica, utilizando o procedimento de medidas de kerma livre no ar com câmara de ionização cilíndrica, conforme descrito no item 2.1. Essa fonte é, então, utilizada como referência para calibração da câmara poço. As medidas devem ser realizadas com a fonte localizada na posição de resposta máxima ao longo do eixo longitudinal da câmara poço.

O fator de calibração da câmara poço, em termos de taxa de kerma de referência no ar, N_{K_r} , expresso em $\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} / \text{nC}$ ou $u.e.$, é obtido pela relação:

$$N_{K_r} = \frac{\dot{K}_R \cdot t}{M_u \cdot k_{elet} \cdot k_{TP} \cdot k_S} \quad (8)$$

em que \dot{K}_R é a taxa de kerma no ar da fonte de ^{192}Ir de alta taxa de dose determinada com a câmara de ionização cilíndrica.

Os demais fatores de correção são aqueles definidos na equação (5).

5. CONTROLE DE QUALIDADE

Para o controle de qualidade as seguintes recomendações são propostas:

1. Devem ser realizados testes periódicos mensais de estabilidade com fontes de meia vida longa como, por exemplo, fonte de ^{137}Cs de baixa taxa de dose;
2. A resposta da câmara não deve variar mais que $\pm 0,5\%$ ao longo de 1 ano;
3. As câmaras devem ser recalibradas a cada 2 anos;
4. O fator de calibração da câmara pressupõe que a fonte será posicionada na mesma posição usada durante a calibração. Essa posição é usualmente o pico de resposta máxima ou o centro do platô de resposta, onde deverá ficar localizada a fonte durante a realização das medidas;
5. Recomenda-se a realização de teste de redundância, fazendo-se uma dosimetria da fonte a cada 30 dias, de forma a assegurar a confiabilidade do sistema dosimétrico e garantir que não existe radioelementos com meia vida curta;
6. Quando não for possível realizar os testes periódicos com uma fonte de meia-vida longa, pode-se, como método alternativo, irradiar a câmara num feixe de raios X produzidos por um acelerador linear ou um feixe de raios gama produzidos por uma unidade de teleterapia de ^{60}Co . A superfície superior da câmara deve ser colocada na direção do feixe na distância de 100 cm da fonte. O tamanho de campo deve ser maior que o diâmetro da câmara, por exemplo, um campo de 15cm x 15cm e a dose deve ser de 1Gy na superfície da câmara. Um diagrama esquemático do arranjo experimental recomendado para a irradiação da câmara de ionização tipo poço pode ser visto na figura 1.

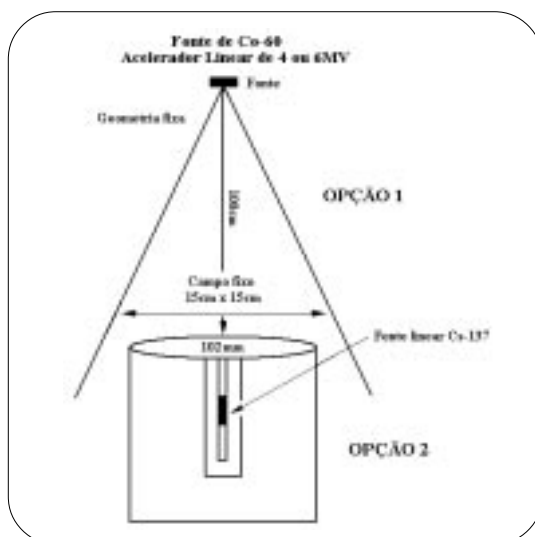


Figura 1. Diagrama esquemático do arranjo experimental recomendado para a irradiação da câmara de ionização tipo poço. Opção 1: Acelerador linear ou fonte de ^{60}Co e opção 2: fonte linear de baixa taxa de dose de ^{137}Cs .

Ao final deste documento, são apresentados formulários de dados para documentação das medidas com câmaras de ionização cilíndricas e para as medidas com câmaras de ionização tipo poço (Anexos B e C).

REFERÊNCIAS

American Association of Physicists in Medicine. Specification of brachytherapy source strength. New York: AAPM; 1987. Report No.: 21.

American Association of Physicists in Medicine. Remote afterloading technology. New York: AAPM; 1993. Report No.: 41.

British Committee on Radiation Units and Measurements. Specification of brachytherapy sources. Brit. J. Radiol. 1984;57: 941-2.

Comité Français Mesure des Rayonnements Ionisants. Recomendations pour la détermination des doses absorbées en curietherapie. Paris: CFMRI; 1983. Report No.: 1.

de Almeida CE, Pereira AJ, Marechal MH, Pereira G, Cruz JC, Ferraz JC, et al. Intercomparison of calibration procedures for 192Ir HDR sources in Brazil. Phys Med Biol. 1999; 44(3): N31-8.

Ezzel G. Evaluation of calibration techniques for the microselectron HDR in Brachytherapy. Proceedings of the 5th International Selectron Users Meeting; 1989; Hague, Netherlands. Nucletron International BV: Leersum, NE; 1989. p. 61-69.

Goetsch SJ, Attix FH, Dewerd LA, Thomadsen BR. A new re-entrant ionization chamber for the calibration of Iridium192 high dose rate sources. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1992; 24:167-70.

Goetsch SJ, Attix FH, Pearson DW, Thomadsen BR. Calibration of 192Ir high dose rate afterloading systems. Med Phys. 1991; 18(3):462-7.

Ferreira IF, de Almeida CE, Marre D, Bridier A, Maréchal MH, Bridier IA, et al. Monte-Carlo calculations of the ionization chamber wall correction factors for 192Ir and 60Co gamma rays and 250 kV x-rays for use in calibration of 192Ir HDR brachytherapy sources. Phys Med Biol. 1999; 44:1897-1904.

International Atomic Energy Agency. Calibration of 192Ir high dose rate brachytherapy sources: Radiation dose in radiotherapy from prescription to delivery. Vienna: IAEA; 1996. TECDOC No. 896.

Marechal MH. Desenvolvimento de uma metodologia de calibração de fontes de 192Ir de alta taxa de dose usadas em Braquiterapia [Tese]. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Rio de Janeiro; 1998.

ANEXO A

Fatores de correção A_w para a parede de diferentes câmaras de ionização em feixes de raios X de 250kV e raios gama do ^{192}Ir e ^{60}Co calculados pelo método de Monte Carlo. Traduzido de Ferreira et al., 1999. As incertezas associadas são menores que 0,1% para 1σ , t_{wall} é a espessura da parede e t_{cap} é a espessura total da capa de build-up e da parede da câmara.

Câmara de ionização	Comprimento da cavidade (mm) / raio da cavidade (mm)	Material da parede / t_{wall} (g/cm ²)	Material da capa de build-up / t_{cap} (g/cm ²)	A_w , 250kV raios X	A_w , ^{192}Ir	A_w , ^{60}Co
Capintec 0,07 cm ³ PR-05P mini	5,5 / 2,0	C552 / 0,220	polystyrene / 0,598	0,986	0,980	0,989
Capintec 0,14 cm ³ PR-05 mini	11,5 / 2,0	C552 / 0,220	polystyrene / 0,598	0,988	0,983	0,989
Capintec 0,65 cm ³ PR-06C Farmer	22,3 / 3,2	C552 / 0,050	C552 / 0,924	0,998	0,980	0,984
Capintec 0,65 cm ³ PR-06C Farmer	22,3 / 3,2	C552 / 0,050	polystyrene / 0,537	0,997	0,986	0,990
Capintec 0,65 cm ³ PR-06C Farmer	22,3 / 3,2	C552 / 0,050	PMMA / 0,547	0,992	0,984	0,989
Capintec 0,6 cm ³ PR-05P AAPM	23,8 / 3,3	graphite / 0,046	PMMA / 0,625	0,995	0,986	0,986
Exradin 0,003 cm ³ A14 (2mm cap)	4,0 / 2	C 552 / 0,176	C 552 / 0,352	1,000	0,993	0,993
Exradin 0,003 cm ³ T14 (4mm cap)	4,0 / 2	A 150 / 0,113	A 150 / 0,455	0,993	0,991	0,980
Exradin 0,05 cm ³ A1 (2mm cap)	5,7 / 2	C 552 / 0,176	C 552 / 0,352	0,987	0,988	0,990
Exradin 0,05 cm ³ A1 (4mm cap)	5,7 / 2	C 552 / 0,176	C 552 / 0,712	0,997	0,977	0,982
Exradin 0,05 cm ³ T1 (4mm cap)	5,7 / 2	A 150 / 0,113	A 150 / 0,455	0,985	0,988	0,990
Exradin 0,5 cm ³ A2 (2mm cap)	11,4 / 4,8	C 552 / 0,176	C 552 / 0,352	0,986	0,978	0,984
Exradin 0,5 cm ³ A2 (4mm cap)	11,4 / 4,8	C 552 / 0,176	C 552 / 0,712	0,989	0,973	0,976
Exradin 0,5 cm ³ P2 (4mm cap)	11,4 / 4,8	polystyrene / 0,105	polystyrene / 0,420	0,986	0,982	0,988
Exradin 0,5 cm ³ T2 (4mm cap)	11,4 / 4,8	A 150 / 0,113	A 150 / 0,455	0,983	0,979	0,985
Exradin 0,65 cm ³ Farmer A 12	24,2 / 3,1	C 552 / 0,088	C 552 / 0,493	0,999	0,988	0,991
Far West tech 0,1 cm ³ IC-18	9,5 / 2,3	A 150 / 0,183	A 150 / 0,386	0,993	0,983	0,990
FZK 0,4 cm ³ TK 01 waterproof	12 / 3,5	Delrin / 0,071	Delrin / 0,430	0,988	0,982	0,989
NE 0,2 cm ³ Farmer 2515	7 / 3,0	Tufnol / 0,074	PMMA / 0,543	0,993	0,980	0,987
NE 0,2 cm ³ Farmer 2515/3	7 / 3,2	graphite / 0,066	PMMA / 0,543	0,994	0,982	0,986
NE 0,2 cm ³ Farmer 2577	8,3 / 3,2	graphite / 0,066	Delrin / 0,552	0,988	0,981	0,986
NE 0,6 cm ³ Farmer 2505	24 / 3,0	Tufnol / 0,075	PMMA / 0,545	0,997	0,989	0,990
NE 0,6 cm ³ Farmer 2505/A	24 / 3,0	nylon 66 / 0,063	PMMA / 0,545	0,996	0,984	0,989

Câmara de ionização	Comprimento da cavidade (mm) / raio da cavidade (mm)	Material da parede / t_{wall} (g/cm ²)	Material da capa de build-up / t_{cap} (g/cm ²)	$A_{w, 250kV}$ raios X	$A_{w, 192Ir}$	$A_{w, 60Co}$
NE 0,6 cm ³ Farmer 2505/3A	24 / 3,2	graphite / 0,065	PMMA / 0,551	0,998	0,989	0,989
NE 0,6 cm ³ Farmer 2505/3B	24 / 3,2	nylon 66 / 0,041	PMMA / 0,551	0,995	0,990	0,989
NE 0,6 cm ³ Farmer 2571	24 / 3,15	graphite / 0,065	Delrin / 0,551	0,999	0,989	0,988
NE 0,6 cm ³ Farmer 2571	24 / 3,15	graphite / 0,065	PMMA / 0,550	0,996	0,983	0,981
NE 0,6 cm ³ Farmer 2581	24 / 3,2	A 150 / 0,040	PMMA / 0,584	0,986	0,988	0,987
NE 0,6 cm ³ Farmer 2581	24 / 3,2	A 150 / 0,041	polystyrene / 0,584	0,991	0,990	0,991
NE 0,325 cm ³ 2561	9,2 / 3,7	graphite / 0,09	Delrin / 0,600	0,987	0,984	0,984
PTW 0,1 cm ³ 23 323 micro	12 / 1,75	PMMA / 0,208	PMMA / 0,357	0,999	0,991	0,991
PTW 1,0 cm ³ 23 331 rigid	22 / 3,95	PMMA / 0,060	PMMA / 0,345	0,997	0,992	0,993
PTW 0,3 cm ³ 23 332 rigid	18 / 2,5	PMMA / 0,054	PMMA / 0,357	1,000	0,993	0,994
PTW 0,6 cm ³ Farmer 30 001	23 / 3,05	PMMA / 0,045	PMMA / 0,541	0,998	0,990	0,991
PTW 0,6 cm ³ Farmer 30 002	23 / 3,05	graphite / 0,079	PMMA / 0,541	0,993	0,989	0,989
PTW 0,6 cm ³ Farmer 30 004	23 / 3,05	graphite / 0,079	PMMA / 0,541	0,997	0,990	0,990
PTW 0,125 cm ³ 31 002 flexible	6,5 / 2,75	PMMA / 0,079	PMMA / 0,357	0,990	0,992	0,992
PTW 0,3 cm ³ 31 003 flexible	16,3 / 2,75	PMMA / 0,079	PMMA / 0,357	1,000	0,993	0,993
Victoreen 0,3 cm ³ Radocon III 550	23 / 2,4	polystyrene / 0,117	PMMA / 0,481	0,997	0,991	0,991
Victoreen 0,3 cm ³ 30-348	18 / 2,5	PMMA / 0,06	PMMA / 0,360	0,994	0,993	0,994
Victoreen 0,6 cm ³ 30-351	23 / 3,1	PMMA / 0,06	PMMA / 0,360	0,995	0,993	0,994
Victoreen 1,0 cm ³ 30-349	22 / 4,0	PMMA / 0,06	PMMA / 0,360	0,996	0,992	0,992
Victoreen 0,4 cm ³ 30-361	22,3 / 2,4	PMMA / 0,144	PMMA / 0,360	1,000	0,992	0,992
SSI graphite	17,9 / 4,0	graphite / 0,084	graphite / 0,384	0,990	0,990	0,990
SSI A150	17,9 / 4,0	A 150 / 0,056	A 150 / 0,373	0,993	0,991	0,991
Wellhöfer 0,03 cm ³ IC-04	3,6 / 2,0	C552 / 0,068	PMMA / 0,354	0,996	0,991	0,991
Wellhöfer 0,08 cm ³ IC-06	4 / 3,0	C552 / 0,068	PMMA / 0,354	0,995	0,990	0,990
Wellhöfer 0,13 cm ³ IC-15	5,8 / 3,0	C552 / 0,068	PMMA / 0,354	0,993	0,990	0,990
Wellhöfer 0,3 cm ³ Farmer IC 28	9 / 3,1	C552 / 0,070	POM / 0,560	0,993	0,988	0,988
Wellhöfer 0,6 cm ³ Farmer IC 69	23 / 3,1	Delrin / 0,070	POM / 0,560	1,000	0,990	0,990
Wellhöfer 0,6 cm ³ Farmer IC 70	23 / 3,1	graphite / 0,068	POM / 0,560	1,000	0,990	0,990

ANEXO B

DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE KERMA NO AR DE UMA FONTE DE ^{192}Ir DE ALTA TAXA DE DOSE COM CÂMARA DE IONIZAÇÃO TIPO FARMER ($0,6\text{cm}^3$)

DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO

HOSPITAL:

ENDEREÇO:

DATA:

FÍSICO RESPONSÁVEL:

I - Descrição do Aparelho:

Unidade: Modelo: Fabricante:

II - Descrição da Fonte:Radionuclídeo: Irídio-192 (^{192}Ir) Fabricante:Intensidade de Kerma no Ar*: ----- $\pm 5\%$ Gy . m^2 . h^{-1} em ----/----/----

*(Fornecida pelo fabricante no certificado de calibração da fonte)

Intensidade de Kerma no Ar: ----- Gy . m^2 . h^{-1} em ----/----/----

Diâmetro:.....mm

Comprimento (máximo:.....mm. ativo:.....mm)

Meia-vida:

III - Câmara de Ionização	IV - Eletrômetro
Fabricante:	Fabricante:
Tipo:	Tipo:
Modelo:	Modelo:
Série:	Série:
Material da parede:	Tensão de polarização:
Material da capa de Equilíbrio eletrônico:	
Distância fonte-câmara:	

Teste de corrente de fuga:

Leitura inicial (L_i)	Leitura final (L_f)	Δt	Fuga ($L_f - L_i$) / Δt

Determinação da posição de leitura máxima da fonte : $h_{\text{máx}}$

Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()

Posição de leitura máxima ($h_{\text{máx}}$) =

DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE KERMA NO AR (K_R)

1. Cálculo da intensidade da fonte

A intensidade da fonte K_R , em termos de kerma no ar, a 1 metro de distância da fonte, em Gy . m^2 . h^{-1} , é dada pela seguinte expressão:

em que :

$$K_R = N_K \cdot (M_U / t) \cdot k_{\text{air}} \cdot k_{\text{scatt}} \cdot k_n \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{ref}}} \right)^2 \cdot 3600$$

K_R = intensidade de kerma no ar em Gy. $m^2 \cdot h^{-1}$

N_K (^{192}Ir) = fator de calibração em termos de kerma no ar da câmara de ionização para energia média do ^{192}Ir ;

M_U/t = carga coletada dividida pelo tempo de medida corrigida para temperatura ambiente e pressão, recombinação iônica e efeito trânsito da fonte;

k_{air} = correção para atenuação no ar entre a fonte e a câmara dos fótons primários;

k_{scatt} = correção para radiação espalhada nas paredes, piso, arranjo experimental etc.;

k_n = correção para não uniformidade;

d = distância entre o centro da fonte e o centro da câmara;

d_{ref} = distância de referência de 1 metro.

sendo:

$k_{\text{air}} = 1,001$ para $d = 10$ cm e energia dos fótons primários do ^{192}Ir ;

$k_n = 1,009$ para câmara tipo Farmer e $d = 10$ cm;

k_{scatt} = Deve ser determinado na sala de medidas.

1.1. Determinação da leitura média efetuada com a câmara de ionização cilíndrica

Medida do lado esquerdo da câmara de ionização:

M_{UE} ()	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)	M_{UE} / t corrigida para K_{TP}

$$M_{UE \text{ média}} / t = \pm (1\sigma)$$

Medida do lado direito da câmara de ionização:

M_{UD} ()	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)	M_{UD} / t Corrigida para K_{TP}

$$M_{UD \text{ média}} / t = \pm (1\sigma)$$

$$M_U \text{ média final} / t = [(M_{UE} / t + M_{UD} / t) / 2] \Rightarrow M_U / t = \pm (1\sigma)$$

1.2. Determinação do fator de calibração N_k para câmaras de ionização cilíndricas

O fator de calibração N_k para câmaras de ionização cilíndricas, em termos de intensidade de kerma no ar, para a energia média da fonte de ^{192}Ir é dado pela expressão:

$$(N_k)_{Ir} = \frac{0.8 \cdot (A_w \cdot N_k)_{250kV} + 0.2 \cdot (A_w \cdot N_k)_{Co}}{(A_w)_{Ir}}$$

sendo N_{k250kV} e N_{kCo} os fatores da calibração em kerma no ar da câmara de ionização para as energias dos raios X de 250kV e raios gama do ^{60}Co , e $(A_w)_{250kV}$, $(A_w)_{Ir}$ e $(A_w)_{60}$ os fatores de correção para atenuação e espalhamento na espessura da parede mais a capa de equilíbrio eletrônico da câmara de ionização para as energias dos três feixes, respectivamente.

$$N_{k250kV} = \underline{\hspace{2cm}} \quad N_{kCo} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$A_{w250kV} = \underline{\hspace{2cm}} \quad A_{wIr} = \underline{\hspace{2cm}} \quad A_{wCo} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$N_k (^{192}\text{Ir}) = \quad \text{mGy/ue}$$

Uma vez determinado o fator de calibração N_k para a energia do ^{192}Ir , substituir na expressão para cálculo da intensidade de kerma no ar:

$$K_R = \quad \text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \pm \quad (1\sigma)$$

DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE APARENTE DA FONTE (A)*

A intensidade da fonte em atividade aparente é igual a:

$$A = K_R / \Gamma_{\delta}$$

em que Γ_{δ} é a constante de taxa de kerma no ar para fontes de ^{192}Ir de alta taxa de dose, sendo igual a $0,108 \times 10^{-6} \text{ Gy} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$, valor recomendado pelo ICRU Report nº 58 (1997). Essa constante varia com a energia, material e espessura do encapsulamento da fonte.

$$A = \quad \text{Bq} \pm \quad (1\sigma)$$

* O conceito de atividade aparente pode ser útil para confirmar os valores utilizados nos sistemas de planejamento.

ANEXO C

**DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE KERMA NO AR DE UMA FONTE DE ^{192}Ir
DE ALTA TAXA DE DOSE COM CÂMARA DE IONIZAÇÃO TIPO POÇO**

DESCRIÇÃO GERAL DO EQUIPAMENTO

HOSPITAL:

ENDEREÇO:

FÍSICO RESPONSÁVEL:

DATA:

I - Descrição do Aparelho:

Unidade: Modelo: Fabricante:

II - Descrição da Fonte:Radionuclídeo: Irídio-192 (^{192}Ir) Fabricante:Intensidade de Kerma no Ar*: ----- $\pm 5\%$ Gy . m² . h⁻¹ em ----/----/----

*(Fornecida pelo fabricante no certificado de calibração da fonte)

Intensidade de Kerma no Ar: ----- Gy . m² . h⁻¹ em ----/----/----

Diâmetro:.....mm

Comprimento (máximo:.....mm. ativo:.....mm)

Meia-vida:

III - Câmara de Ionização	IV - Eletrômetro
Fabricante:	Fabricante:
Tipo:	Tipo:
Modelo:	Modelo:
Série:	Série:

Teste de corrente de fuga:

Leitura inicial (L _I)	Leitura final (L _F)	Δt	Fuga (L _F - L _I) / Δt

Determinação da posição de leitura máxima da fonte : h_{máx}

Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()	Posição ()

Posição de leitura máxima (h_{máx}) =

DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DE KERMA NO AR (K_R)

1. Cálculo da intensidade da fonteA intensidade da fonte em termos de kerma no ar, K_R, é dada pela expressão:

$$K_R = M_U / t \cdot N_{KR} \cdot k_{elect} \cdot k_{TP} \cdot k_S$$

em que:

K_R = intensidade de kerma no ar em Gy . m² . h⁻¹N_{KR} = fator de calibração da câmara de ionização em termos de intensidade de kerma no ar:

N_{KR} =	Gy . m² . h⁻¹ ±	(a 1m)*
-------------------------	--	----------------

(*) já é considerada no fator de calibração a correção para distância de 1 metro;

M_U/t = carga coletada dividida pelo tempo de medida e corrigida para efeito trânsito da fonte;

k_{elect} = fator de calibração do eletrômetro;

k_{TP} = correção para temperatura e pressão no momento da medida dada pela expressão:

$$k_{TP} = \frac{273,15 + T}{293,15} \cdot \frac{1013,25}{P}$$

k_S = correção para perdas devido à recombinação iônica.

1.1. Determinação da leituras médias efetuadas com a câmara de ionização tipo poço

Leituras para V = 300V:

M_{U1} ()	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)	M_{U1} corrigida para K_{TP}

$$M_{U1 \text{ média}} = \quad \pm \quad (1\sigma)$$

Leituras para V = 150V:

M_{U2} ()	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)	M_{U2} corrigida para K_{TP}

$$M_{U2 \text{ média}} = \quad \pm \quad (1\sigma)$$

1.2. Determinação do fator de recombinação iônica (A_{ion}):

$$A_{ion} = \frac{4}{3} - \left(\frac{M_{U1}}{3M_{U2}} \right)$$

em que M_{U1} é a média das leituras com V = 300V e M_{U2} a média das leituras com V = 150V.

M_{U1} (300V) =	M_{U2} (150V) =	$A_{ion} = \frac{4}{3} - \left(\frac{\quad}{3x} \right) =$
$A_{ion} =$		

Fator para correção devido à recombinação iônica:

$$k_S = (A_{ion})^{-1} = \quad \pm \quad (1\sigma)$$

Uma vez determinados todos os fatores de correção, substituir na expressão para cálculo da intensidade de kerma no ar:

$$K_R = \quad Gy \cdot m^2 \cdot h^{-1} \quad \pm \quad (1\sigma)$$

DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE APARENTE DA FONTE (A)*

A atividade da fonte é dada pela seguinte expressão:

$$A = M_U / t \cdot N_A \cdot k_{elect} \cdot k_{TP} \cdot k_S$$

em que N_A é o fator de calibração da câmara em atividade aparente e sendo os outros fatores os mesmos utilizados para determinação da intensidade de kerma no ar.

$$A = \quad \quad \quad \text{Bq} \pm \quad \quad \quad (1\sigma)$$

* O conceito de atividade aparente pode ser útil para confirmar os valores utilizados nos sistemas de planejamento.

**Instituto Nacional
de Câncer** **Ministério
da Saúde**

