

Determinação do rendimento químico na dosimetria Fricke para fontes de ^{192}Ir usadas em braquiterapia

Determination of the chemical yield on the Fricke dosimetry for ^{192}Ir sources used in brachytherapy

M G David¹, C Salata^{1,2}, P H Rosado³, M A G Albuquerque¹, C E deAlmeida¹

¹ Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR) da UERJ; ² Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); ³ Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD)

E-mail: marianogd08@gmail.com

Resumo: Com o objetivo de desenvolver um padrão primário de dose absorvida na água para fontes de ^{192}Ir usadas em braquiterapia de alta taxa de dose, este trabalho enfoca a determinação do rendimento químico, $G(\text{Fe}^{+3})$, na dosimetria Fricke para a energia desta fonte. Foram determinados os valores de $G(\text{Fe}^{+3})$ para três qualidades de feixes de raios-x (150, 250 e 300 kV) e para o ^{60}Co . O valor de $G(\text{Fe}^{+3})$ para a energia média do ^{192}Ir foi obtido por ajuste linear, resultando em $1,555 \pm 0,015 \mu\text{mol/J}$.

Palavras-chave: rendimento químico, dosimetria Fricke, braquiterapia.

Abstract: With the aim of developing a primary standard for the absorbed dose to water, for the ^{192}Ir sources used in high dose rate brachytherapy, this work focuses on the determination of the chemical yield, $G(\text{Fe}^{+3})$, using Fricke dosimetry, for the energy of those sources. The $G(\text{Fe}^{+3})$ were determined for three qualities of x-ray beams (150, 250 and 300 kV) and for ^{60}Co energy. The $G(\text{Fe}^{+3})$ value for the average energy of ^{192}Ir was obtained by linear fit, the found value was $1,555 \pm 0,015 \mu\text{mol/J}$.

Keywords: chemical yield, Fricke dosimetry, brachytherapy.

1. INTRODUÇÃO

A Braquiterapia de Alta Taxa de Dose (HDR) com fontes de ^{192}Ir é bem reconhecida como uma importante opção de tratamento para pacientes com câncer. A grandeza usada na prática médica, a dose absorvida na água (D_w), não possui padrão primário internacionalmente reconhecido para estas fontes [1], sendo seu valor calculado através do protocolo TG-43 da American Association of Physicist in Medicine (AAPM) [2] a partir da

intensidade de kerma no ar, S_K , (*air kerma strength*) da fonte.

O Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) vem desenvolvendo pesquisa com a finalidade de estabelecer um padrão primário de D_w com dosimetria química Fricke para as fontes de ^{192}Ir [3]. Tendo em vista que o rendimento químico da conversão de íons ferrosos em férricos pela radiação ionizante, $G(\text{Fe}^{+3})$, varia de

acordo com a energia da radiação, é necessário conhecer o valor desta grandeza para a energia das fontes de ^{192}Ir . A determinação do $G(\text{Fe}^{+3})$ é de suma importância dado que a literatura carece de um valor consensual estabelecido e com baixa incerteza [3, 4].

Para realizar esta determinação, o LCR empregou um método implantado pelo laboratório nacional canadense de metrologia das radiações ionizantes, *National Research Council* (NRC), que utiliza saquinhos plásticos como suporte para a solução Fricke e obtém o valor de $G(\text{Fe}^{+3})$ para o ^{192}Ir a partir dos valores desta grandeza para as energias do ^{60}Co e de um feixe de raios-x de 250 kV [4]. Com a finalidade de melhorar a precisão no método, o LCR introduziu a determinação do $G(\text{Fe}^{+3})$ também para feixes de 150 e 300 kV.

Este trabalho enfoca a determinação do valor de $G(\text{Fe}^{+3})$ para o ^{192}Ir através de ajuste linear entre os valores obtidos para 3 feixes de raios-x e para o ^{60}Co . As irradiações foram realizadas no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD). Os fatores de conversão de kerma no ar para dose absorvida na solução Fricke, necessários para a determinação de $G(\text{Fe}^{+3})$ para os feixes de raios-x, foram calculados pelo método de Monte Carlo (MC).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Método para obter $G(\text{Fe}^{+3})$ para o ^{192}Ir

O valor de $G(\text{Fe}^{+3})$ pode ser obtido através da resposta do sistema Fricke e da determinação da dose absorvida na solução (D_F) por outros meios que não a dosimetria Fricke. Da equação básica do sistema Fricke chega-se à equação (1).

$$G(\text{Fe}^{+3}) = \frac{\Delta OD}{D_F \cdot \epsilon \cdot \rho \cdot L} \quad (1)$$

Em (1), ΔOD é a diferença entre a densidade óptica (absorbância) da solução irradiada e não

irradiada, ϵ é o coeficiente de extinção molar de íons férricos para a faixa 304 nm, ρ é a densidade da solução e L é o comprimento do caminho ótico dentro da cubeta. O valor de D_F é obtido medindo-se o kerma no ar (K_{air}) no ponto de referência e calculando-se por MC um fator de conversão ($f_{K,F}$), conforme a equação (2).

$$D_F = K_{air} \cdot f_{K,F} \quad (2)$$

Na metodologia desenvolvida pelo NRC, a solução Fricke é acondicionada em saquinhos plásticos de polietileno (PE) que são posicionados na distância de irradiação através de suporte de polimetilmetacrilato (PMMA) desenhado e construído para este fim [4]. O LCR empregou saquinhos de polipropileno (PP) ao invés de PE, uma vez que estes se mostraram tão resistentes à solução Fricke quanto os de PE.

2.2. Sistema de dosimetria Fricke do LCR

A solução Fricke padrão é preparada de modo a obter as concentrações finais de 10^{-3} M em sulfato ferroso amoniacal; 0,4 M em ácido sulfúrico e 10^{-3} M em cloreto de sódio. A mistura do ácido sulfúrico concentrado com aproximadamente 500 ml de água MilliQ em um balão volumétrico de 1 L é irradiada com 10 Gy em feixe de raios-x para eliminar possíveis agentes redutores presentes no ácido. Após uma hora, os sais são adicionados e o volume do balão é completado com água MilliQ, agitando-se bastante durante o preparo para garantir a saturação em O_2 [5]. A solução resultante é armazenada ao abrigo da luz e empregada somente 24 h após o seu preparo.

Para cada saquinho com solução Fricke irradiado, foi preparado outro saquinho com solução que não foi irradiado (branco) e permaneceu nas mesmas condições ambientais.

Para as leituras de absorbância, foi empregado um espectrofotômetro Varian Cary 50 Bio na faixa de 304 nm com controle térmico Peltier ajustado para 25°C e cubeta de quartzo com caminho óptico de 1 cm. A limpeza da cubeta é

garantida pela leitura da absorvência da água MilliQ antes de cada leitura de branco ou de solução irradiada. A resposta do sistema é controlada por filtros padrão de absorvência rastreados ao National Institute of Standard and Technology (NIST-USA).

2.3. Qualidades de radiação e procedimentos de irradiação

As características das qualidades de feixes de raios-x implantadas no arranjo experimental do IRD, em termos de tensão aplicada ao tubo, filtração adicional, camada semi-redutora (CSR) e energia efetiva (E_{ef}) dos feixes, encontram-se na tabela (1). O tempo de irradiação com raios-x a 80 cm do ponto focal foi de 90 minutos para as 3 qualidades, fornecendo valores de K_{air} no intervalo de 11 a 18 Gy. As medidas de K_{air} foram realizadas com câmaras de ionização tipo dedal (NE, 2571) e tipo esférica (Standard Imaging, Exradin A3), calibradas para as faixas de energia empregadas.

Tabela 1. Qualidades de feixes de raios-x empregados para determinação de $G(Fe^{+3})$.

Qualidades de raios-x (kV e filtração adicional)	CSR (mm Cu)	E_{ef} (MeV)
150 kV com 0,32 mm Cu + 1,75 mm Al	0,66	0,068
250kV com 1,96 mm Cu + 1,0 mm Al	2,75	0,132
300 kV com 2,96 mm Cu + 1,0 mm Al	3,75	0,159

As irradiações com ^{60}Co foram realizadas nas condições para determinação de dose absorvida na água, à profundidade de 5 cm, com tempo de irradiação de 120 min. A mesma câmara de ionização dedal foi usada para a dosimetria do feixe de ^{60}Co .

2.4. Fatores obtidos por Monte Carlo

Na determinação do $G(Fe^{+3})$ para raios-x, é necessário o cálculo através do método de Monte Carlo (MC) de um fator de conversão de K_{air} para D_F . Da equação (2), vê-se que $f_{K,D}$ pode ser obtido pela razão de D_F / K_{air} .

O código computacional PENELOPE foi empregado em sua versão de 2008 [6]. As energias de corte (E_{abs}) para elétrons foram iguais à energia máxima do espectro na determinação de K_{air} , com a finalidade de fazer a aproximação kerma/dose, e de 10 keV na determinação de D_F . Para fótons, E_{abs} foi sempre igual a 1 keV.

Na determinação do valor de $G(Fe^{+3})$ para a energia do ^{60}Co , foi empregado o fator de conversão de dose absorvida na água para dose absorvida na solução Fricke determinado pelo NRC ($f_{w,F} = 0,9995$) [4].

3. RESULTADOS

Os valores de $f_{K,D}$ para 150, 250 e 300 kV calculados por MC foram, respectivamente, de 1,1986; 1,1551; e 1,1471, com incertezas estatísticas inferiores a 0,1 %.

Tabela 2. Resultados das medidas de $G(Fe^{+3})$, com as respectivas incertezas combinadas estimadas para as medições ($k = 1$).

Qualidade de radiação	$G(Fe^{+3})$ ($\mu\text{mol/J}$)	u_c (%)
150 kV	1,447	0,8
250 kV	1,480	0,7
300 kV	1,508	0,7
^{60}Co	1,615	0,9

Os valores de $G(Fe^{+3})$ obtidos para as energias dos feixes de raios-x e do ^{60}Co são mostrados na tabela (2), juntamente com as incertezas combinadas levando-se em conta as incertezas padrão de todas as grandezas envolvidas e a incerteza estimada no

posicionamento. O maior valor de incerteza referente à repetibilidade na medida do ΔOD (tipo A) foi de 0,54 %, encontrado nas irradiações com ^{60}Co .

No gráfico da figura (3), os valores obtidos para $G(\text{Fe}^{+3})$ foram plotados *versus* a energia de cada feixe (energia efetiva para os feixes raios-x e energia média para o ^{60}Co) em escala logarítmica. Observa-se um aumento aproximadamente linear do rendimento químico com a energia da radiação. Neste gráfico, o $G(\text{Fe}^{+3})$ para a energia média do ^{192}Ir (0,380 MeV) é determinado por ajuste linear, obtendo-se o valor de 1,555 $\mu\text{mol/J}$. A incerteza para esta medida foi estimada em 1 % ($k=1$) somando-se quadraticamente a incerteza para o $G(\text{Fe}^{+3})$ do ^{60}Co (a mais alta) e a incerteza devida ao ajuste.

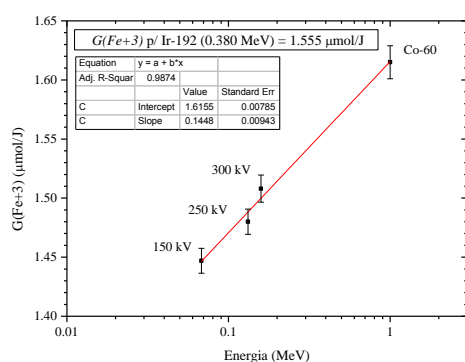


Figura 3. Gráfico semi-log com os valores de $G(\text{Fe}^{+3})$ obtidos para os feixes de raios-x e para ^{60}Co , com o ajuste linear para determinar o valor do rendimento químico para fontes de ^{192}Ir .

O resultado é 2,1 % menor que o valor de $G(\text{Fe}^{+3})$ encontrado pelo NRC com metodologia semelhante [4], mas idêntico ao valor encontrado pela interpolação de valores previamente publicados [3]. Com a finalidade de confirmar o valor obtido, o LCR fará uma nova determinação do $G(\text{Fe}^{+3})$ pelo método descrito em [7], onde o valor de $G(\text{Fe}^{+3})$ é obtido diretamente na energia do ^{192}Ir , fazendo a interpolação apenas para a obtenção do coeficiente de calibração da câmara de ionização.

4. REFERÊNCIAS

- [1] El Gamal I, Cojocarú C, Mainegra-Hing e McEwen M 2015 *Phys. Med. Biol.* **60**: 4481-4495
- [2] Rivard M J, Cousey B M, DeWerd L A, Hanson W F e Huq M S 2004 *J. Med. Phys.* **31**:633-674
- [3] DeAlmeida C E, Ochoa R, Lima M C, David M G, Pires E J, Peixoto J G, Salata C e Bernal M A 2014 *PLoS ONE* **9**(12): e115155
- [4] McEwen M, El Gamal I, Mainegra-Hing E e Cojocarú C 2014 *Report NRC PIRS-1980*
- [5] Olszanski A, Klassen N V, Rosso C K e Shortt K R 2002 *Report NRC PIRS-0815*
- [6] Salvat F, Fernández-Varea J M e Sempau J 2008 *PENELOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. NEA n° 6416 OECD, Barcelona
- [7] Franco L, Gavazzi S e DeAlmeida C E 2011 *Standards, applications and quality assurance in medical radiation dosimetry (IDOS): proceedings of an international symposium*, IAEA, Vienna, Vol. 1: 111-119

Agradecimentos

Agradecemos ao pessoal do laboratório de radiações ionizantes do NRC pelas dicas, conversas e suporte científico, especialmente a Islam El Gamal, Claudiu Cojocarú, Malcolm McEwen e Ernesto Mainegra-Hing. Agradecemos também o apoio recebido pelo LNMRI / IRD, principalmente por Aninha e Karla C. Patrão.