

Determinação por Monte Carlo de fatores para dosimetria Fricke de fontes de ^{192}Ir para braquiterapia

Mariano Gazineu David ¹, Camila Salata ¹, Carlos Eduardo de Almeida ¹

¹ Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ.

E-mail: marianogd08@gmail.com

Resumo: O Laboratório de Ciências Radiológicas desenvolve metodologia para a determinação da dose absorvida na água pelo método Fricke de dosimetria química para fontes de braquiterapia de ^{192}Ir de alta taxa de dose e comparou seus resultados com o laboratório do *National Research Council Canada*. Este trabalho descreve a determinação pelo método de Monte Carlo, com o código PENELOPE, dos fatores de correção necessários. Os resultados para os fatores são apresentados, com uma diferença máxima de 0,22 % para sua obtenção de forma alternativa.

Palavras-chave: Método de Monte Carlo; PENELOPE; HDR; dosimetria Fricke.

Abstract: The Laboratório de Ciências Radiológicas develops a methodology for the determination of the absorbed dose to water by Fricke chemical dosimetry method for brachytherapy sources of ^{192}Ir high dose rate and have compared their results with the laboratory of the *National Research Council Canada*. This paper describes the determination of the correction factors by Monte Carlo method, with the PENELOPE code. Values for all factors are presented, with a maximum difference of 0.22% for their determination by an alternative way.

Keywords: Monte Carlo method; PENELOPE code; HDR; Fricke dosimetry.

1. INTRODUÇÃO

A grandeza de interesse na braquiterapia de alta taxa de dose (HDR) com fontes de ^{192}Ir é a dose absorvida na água (D_w). Pesquisas vem sendo realizadas com o intuito de estabelecer um método confiável de determinação primária desta grandeza por dosimetria química, pelo método Fricke (Austerlitz *et al*, 2008; El Gamal, 2013). Este método vem sendo desenvolvido também no Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

O LCR participou, no primeiro semestre de 2014, de uma colaboração com o *National Research Council Canada* (NRC), que desenvolve o mesmo método, em que foram comparados os resultados encontrados para D_w pelos sistemas adotados pelas instituições.

Este trabalho descreve a obtenção, pelo método de Monte Carlo (MC), dos fatores necessários para converter o valor da dose absorvida na solução Fricke em D_w na distância padrão de 1 cm. O trabalho foca-se apenas na determinação destes fatores por simulação numérica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Arranjo experimental do sistema Fricke e os fatores obtidos por simulação

Este trabalho baseia-se no arranjo experimental empregado pelo LCR no NRC para a verificação comparativa dos sistemas Fricke na determinação da D_w para fontes para braquiterapia de ^{192}Ir (HDR). O arranjo foi composto pelo irradiador *Elekta*, da *Nucletron*, para fontes *microSelectron* modelo V2, do NRC e de um frasco em forma de anel (medidas internas: 1,8 cm de altura; 0,6 cm de espessura; 2,7 cm de raio central) de PMMA para comportar a solução Fricke durante as irradiações, desenvolvido pelo LCR. O frasco foi imerso em água no centro de um becker de polietileno com 15 cm de diâmetro e de altura. O irradiador e o frasco utilizados são mostrados na figura 1.

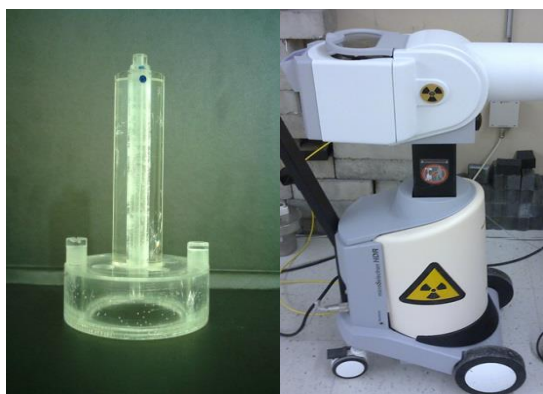


Figura 1. Arranjo experimental. A) Frasco para irradiação da solução Fricke. B) Irradiador para fontes de ^{192}Ir *microSelectron*.

A grandeza determinada pelo sistema Fricke de dosimetria química é a dose absorvida na solução Fricke (D_F). Para a determinação da grandeza de interesse na braquiterapia, D_w , é preciso empregar os fatores que aparecem na equação (1):

$$D_w = D_F \cdot f_{F,w} \cdot p_{wall} \cdot k_{dd} \cdot F_h \quad (1);$$

onde $f_{F,w}$ é o fator que converte a dose absorvida na solução Fricke para dose absorvida na água,

p_{wall} é o fator que corrige as perturbações causadas pelas paredes do frasco e pelo becker, k_{dd} é o fator que corrige as diferenças no perfil de dose ao longo do eixo vertical da solução Fricke e F_h é o fator que corrige a não homogeneidade da dose depositada na solução Fricke ao longo do eixo radial. Os dois primeiros foram descritos em outros trabalhos (Ma *et al*, 1993; Ma and Nahum, 1993), enquanto k_{dd} foi desenvolvido em trabalhos anteriores do LCR ainda não publicados e F_h foi adaptado de outra publicação (Ochoa *et al*, 2007).

Os fatores foram calculados, a partir de simulações por MC, da seguinte forma:

- $f_{F,w}$ foi obtido pela razão da dose absorvida na água com a dose absorvida na solução Fricke, ambas determinadas sem as paredes, para o mesmo volume;
- p_{wall} foi obtido pela razão entre a dose absorvida na solução Fricke sem as paredes do frasco e sem o becker e a dose absorvida na solução Fricke com as paredes;
- k_{dd} foi obtido pela razão entre a dose absorvida na camada central da solução e a dose absorvida em todo volume da solução Fricke, ambas determinadas sem as paredes;
- F_h foi obtido pela razão entre a dose absorvida no anel central da solução e a dose absorvida em todo o volume da solução Fricke, ambas determinadas sem as paredes.

A dose determinada pela equação (1) refere-se à distância do eixo axial da fonte até o ponto central do anel de solução Fricke no frasco de irradiação, que corresponde a 2,7 cm. Assim, foi preciso também calcular por MC um fator de distância (f_d) para transferir a dose obtida para a distância padrão adotada na braquiterapia (1 cm). Tal fator foi calculado da seguinte forma:

- f_d foi obtido pela razão entre a dose absorvida na água a 1 cm e a dose absorvida na água a 2,7 cm, com a mesma fonte e a mesmo

volume de água utilizado nas irradiações, ambas determinadas sem as paredes.

Para avaliar a consistência dos valores obtidos, foram determinados fatores que corrigem dois ou mais dos fenômenos corrigidos pelos fatores acima mencionados, possibilitando a comparação com os produtos dos fatores parciais. Para a correção da diferença na dose nos eixos vertical e radial da solução Fricke, foi determinado um único fator de correção da homogeneidade da dose (f_h). Foi obtido também um fator único que corrige todos os fenômenos envolvidos no sistema (f_i). Estes fatores foram calculados da seguinte forma:

- f_h foi obtido pela razão entre a dose absorvida em um pequeno anel central da solução e a dose absorvida em todo o volume da solução Fricke, ambas determinadas sem as paredes;
- f_i foi obtido pela razão entre a dose absorvida na água a 1 cm sem as paredes e a dose absorvida na solução Fricke com as paredes.

2.2. Código, parâmetros, validação e hardware

O código de MC empregado foi o PENELOPE, em sua versão de 2008, tendo sido utilizada a interface de entrada de dados *penmain* (Salvat *et al*, 2008). Para todas as simulações foram usados os seguintes parâmetros do código: energias de corte de 10 keV para elétrons e de 1 keV para fótons; $C_1 = C_2 = 0,05$; $W_{CC} = W_{CR} = 1$ keV.

Os processos foram rodados no cluster de computadores do LCR utilizando o sistema de paralelização *clonEasy* (Badal, A. e Sempau, J, 2006). O número de partículas primárias foi de 10^9 fótons (pp) (100 processos rodando em paralelo com 10^7 pp cada). Tais processos em rodaram em menos de 5 h nos processadores Intel Core i7 980X do cluster do LCR.

O espectro original da fonte de ^{192}Ir empregado neste trabalho foi o obtido em publicação (Borg, J. e Rogers, D., 1999) que reproduz dados previamente publicados.

Buscou-se validar o emprego do código e dos parâmetros usados através da comparação com resultados publicados, tanto no que se refere ao espectro de fótons detectado após o encapsulamento da fonte de ^{192}Ir , quanto no que se refere aos cálculos de fatores $f_{F,w}$ e p_{wall} . Com relação ao espectro, comparou-se a energia média ponderada do espectro obtido no ar a 5 cm com a mesma grandeza calculada de espectro publicado (Borg e Rogers, 1999). Os fatores determinados para fins de validação foram obtidos com o espectro de um irradiador de ^{60}Co para frascos desenvolvidos para a dosimetria Fricke (Ma *et al*, 1993).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A energia média ponderada do espectro da fonte *microSelectron* modelo V2 obtido no ar a 5 cm foi de 356,3 keV, apenas 0,12 % menor que o valor calculado de espectro publicado (Borg e Rogers, 1999). Os valores dos fatores determinados com fins de validação apresentaram diferenças inferiores a 0,2 % em relação aos valores publicados (Ma *et al*, 1993). Com estes resultados, o emprego do código e dos parâmetros foi considerado satisfatório para a determinação dos fatores de correção.

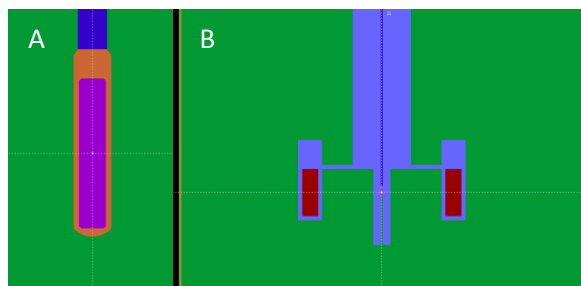


Figura 2. Cortes 2D do arranjo experimental simulado. 1A) Fonte *microSelectron* V2; 2B) Frasco de PMMA para irradiação da solução Fricke.

Visualizações 2D das geometrias contruídas para o código PENELOPE da fonte e do frasco para irradiação são mostradas na figura 2. Os

valores obtidos para os fatores que aparecem na equação (1) são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Valores calculados para os fatores da eq. (1), com as respectivas incert. estatís. ($k=1$).

Fator	Valor
$f_{F,w}$	$1,0004 \pm 0,0004$
p_{wall}	$0,9989 \pm 0,0004$
k_{dd}	$1,0391 \pm 0,0008$
F_h	$0,9969 \pm 0,0006$

O produto de todos estes fatores indica que o valor da dose absorvida na solução Fricke tem que ser acrescido em 3,5 % para fornecer o valor de D_w no ponto central do frasco. O fator obtido para corrigir o valor de D_w para a distância padrão de 1 cm (f_d) foi de $7,1932 \pm 0,0065$. Este valor é 0,22 % menor que o o valor obtido pelo inverso do quadrado da distância.

A comparação com os fatores que corrigem mais de um dos fenômenos envolvidos é apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Valores calculados para os fatores que corrigem mais de um dos fenômenos envolvidos, com as incert. estatís. ($k=1$), e para os produtos dos fatores correspondentes.

Fator	Valor	Produto	Dif.(%)
f_h	$1,0342 \pm 0,0012$	1,0359*	0,16
f_t	$7,4296 \pm 0,0042$	7,4461**	0,22

* produto dos fatores k_{dd} e F_h ; ** produto de todos os fatores da equação (1) com f_d .

Os resultados mostram que há consistência entre os valores obtidos por simulação. Em função das dimensões do frasco de irradiação, o fator de distância representa a maior correção a ser aplicada nesta medida pelo método Fricke.

3.3. Agradecimentos

Os autores agradecem o auxílio fundamental dos físicos Dr. Ricardo Ochoa, Dr. Mario A. Bernal e Dr. Ernesto Mainegra-Hing.

4. REFERÊNCIAS

- AUSTERLITZ, C.; MOTA, H. C.; SEMP AU, J.; BENHABIB, S. M.; CAMPOS, D.; ALLISON, R.; DEALMEIDA, C. E.; ZHU, D.; SIBATA, C. H. Determination of absorbed dose in water at the reference point $d(r_0, \theta_0)$ for an ^{192}Ir HDR brachytherapy source using a Fricke system. *Med Phys*, v. 35, n. 12, p. 5360-5, Dec. 2008.
- BORG, J.; ROGERS, D. W. O. Monte Carlo calculations of photon spectra in air from ^{192}Ir sources. PIRS-629r, IRS/NRC, Ottawa, Mar. 1999.
- BADAL, A.; SEMP AU, J. A package of Linux scripts for the parallelization of Monte Carlo simulations. *Comp. Phys. Commun.*, v. 175, p. 440-450, July 2006
- EL-GAMAL, I. M. M. **An Absorbed Dose to Water Primary Standard for Ir-192 Brachytherapy**. 2013. 89 (Master od Science). Department of Physics, Carleton University, Ottawa.
- MA, C.; ROGERS, D. W. O.; SHORTT, K. R.; ROSS, C. K.; NAHUM, A. E.; BIELAJEW, A. F. Wall-correction and absorbed-dose conversion factors for Fricke dosimetry: Monte Carlo calculations and measurements. *Med. Phys.*, v. 20, n. 2, p. 283-291, Mar/Apr 1993.
- MA, C.; NAHUM, A. E. Dose conversion and wall correction factors for Fricke dosimetry in high-energy photon beams: analytical model and Monte Carlo calculations. *Phys. Med. Biol.*, v. 38, p. 93-114, May 1993.
- OCHOA, R.; GÓMEZ, F.; FERREIRA, I. H.; GUTT, F.; DEALMEIDA, C. E. Design of a phantom for the quality control of high dose rate ^{192}Ir source used in brachytherapy. *Radiother. Oncol*, v. 82, p. 222-228, 2007.
- SALVAT, F.; FERENANDEZ-VAREA, J. M. AND SEMP AU, J. **PENELOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. Workshop preceedings**. Nuclear Energy Agency nº 6416 OECD, Barcelona, 2009.