

## Análise da resposta de uma câmara de extrapolação pelo método de Monte Carlo

**Ivón Oramas Polo, Patrícia de Lara Antonio e Linda V.E. Caldas**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN-CNEN/SP)

E-mail: ivonoramas67@gmail.com, patrilan@ipen.br, lcaldas@ipen.br

**Resumo:** São apresentados os resultados da simulação de uma câmara de extrapolação com duas janelas de entrada diferentes usando o método de Monte Carlo MCNP. Foi analisada a variação da resposta da câmara, em função da distância fonte-detector em feixes de radiação beta. Foram determinados o fluxo de partículas que passaram através de cada janela, a fluência de partículas na cavidade e a taxa de dose absorvida no tecido para a distância fonte-detector de 30 cm. Os resultados das simulações estão dentro dos intervalos das incertezas associadas e em concordância com os valores experimentais e os valores do certificado de calibração.

**Palavras-chave:** câmara de extrapolação, Monte Carlo, fonte de radiação beta.

**Abstract:** The results of a simulation of an extrapolation chamber with two different entrance windows using the MCNP Monte Carlo method are presented. The variation of the chamber response was analysed as a function of source-detector distance of beta radiation. The particle flow that passed through each window, the fluence in the the cavity and the absorbed dose rate in the tissue for the source-detector distance of 30 cm were determined. The results of the simulations are within the ranges of the associated uncertainties, and they are in agreement with the experimental values and the values of the calibration certificate.

**Keywords:** extrapolation chamber, Monte Carlo, beta radiation source.

### 1. INTRODUÇÃO

A câmara de extrapolação é o instrumento primário estabelecido para a medição de radiação beta (BÖHM, 1986; CALDAS, 1986; NIST, 2010). A câmara é fundamentada pela teoria de Bragg-Gray e permite determinar de forma absoluta a dose absorvida ou a taxa de dose absorvida de radionuclídeos beta e de outras fontes de radiação de pequeno poder de penetração a diferentes profundidades. Assim, as principais imposições da teoria cavitária, que são pequena

superfície coletora e pequeno volume de ar, são satisfeitas (CALDAS, 1980).

O desenho típico de uma câmara de extrapolação é de uma câmara de ionização com dois eletrodos paralelos, onde um deles é um eletrodo coletor circular e um anel de guarda separados por um material isolante e o outro eletrodo é de alta tensão e é a janela de entrada. Para variar a massa de ar do volume sensível geralmente deve ser alterada a distância entre os eletrodos, ou seja, deve ser mudada a profundidade da câmara (ICRU, 1997). A câmara de extrapolação PTW modelo 23392 é

1

recomendada para medições absolutas de dose absorvida de radiação beta e raios-X de energias baixas (ANTONIO, 2013; FARIA e col., 2015).

O desenvolvimento da eletrônica e da introdução dos computadores com processamento multicore e os clusters computacionais revolucionaram os métodos de Monte Carlo para transporte de partículas. Os tempos de cálculo foram reduzidos consideravelmente, o que permite simulações com geometrias cada vez mais semelhantes à geometria real do problema.

A simulação correta pelo método de Monte Carlo de um problema de transporte de radiação é conseguida considerando que todos os possíveis caminhos aleatórios que contribuem para a resposta são suficientemente amostrados (GUALDRINI e FERRARI, 2011). As regiões na geometria do problema que enxergam relativamente poucos eventos na vida real também poderiam enxergar poucos eventos na simulação, levando a uma estimativa pobre por Monte Carlo nessas regiões (VAN WIJK, 2011). Uma maneira de aumentar o número de eventos e a precisão do cálculo nessas regiões é a utilização das chamadas técnicas de redução de variância (TRV).

Nos últimos anos, alguns fatores de correção de detecção de radiação vêm sendo determinados para os padrões primários, utilizando a técnica de Monte Carlo, que permite que os resultados sejam mais precisos do que os obtidos por abordagens experimentais (BEHRENS, 2013). Além disso, é possível, por meio desta técnica, obter um melhor conhecimento sobre os aspectos físicos de cada um dos fatores utilizados nas medições experimentais (NEVES e col., 2012). O National Research Council of Canada (NRC) desenvolveu um modelo de uma fonte beta de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  e uma câmara de extrapolação (SELVAM e col., 2005). Além disso, uma câmara de extrapolação foi caracterizada utilizando o método de Monte Carlo (FARIA et al., 2015) e foram obtidos os fatores de transmissão, bem como a taxa de dose absorvida

no tecido para campos de radiação beta das fontes de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  e  $^{85}\text{Kr}$ .

No Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), uma câmara de extrapolação foi caracterizada em feixes de radiação beta de fontes de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  com os sistemas padrões secundários BSS1 e BSS2 (ANTONIO e col., 2012; ANTONIO, 2013; ANTONIO e col., 2014). Alguns dos resultados desse trabalho são apresentados neste artigo e são comparados com os resultados das simulações pelo método de Monte Carlo.

O objetivo do presente estudo foi realizar uma análise comparativa da resposta de uma câmara de extrapolação com duas janelas de entrada diferentes: uma janela de Mylar aluminizado e uma janela de Hostaphan grafitado.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma câmara de extrapolação PTW modelo 23392. Uma vista da seção transversal do mecanismo básico da câmara de extrapolação pode ser observada na figura 1.

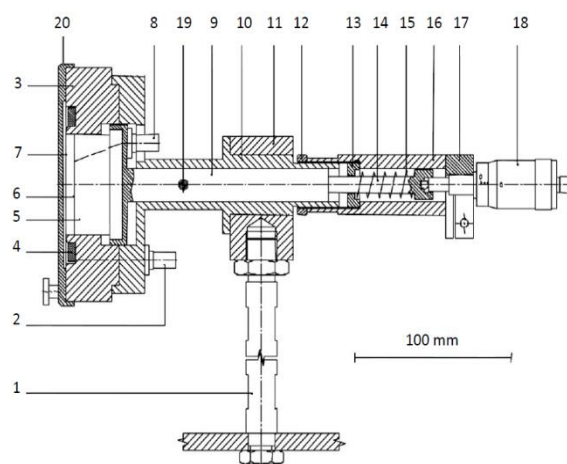


Figura 1. Seção transversal da câmara de extrapolação PTW modelo 23392: (1) haste de fixação; (2) conector para tensão de polarização; (3) encaixe de acrílico; (4) anel de fixação; (5) bloco de acrílico; (6) superfície grafitada; (7) janela de entrada; (8) conector de eletrodo de

coleção; (9) êmbolo de ajuste; (10) estrutura central; (11) suporte; (12) porca do parafuso; (13) anel roscado; (14) parafuso; (15) mola; (16) tubo; (17) base de fixação; (18) parafuso micrométrico; (19) parafuso de fixação do pistão (PTW-Freiburg, 2002; ANTONIO, 2013).

Os componentes básicos da câmara são o eletrodo coletor, o anel de guarda, o pistão móvel de acrílico e a janela de entrada muito fina. O pistão, os arranjos estruturais e a janela de entrada são selecionados a partir de materiais cujas propriedades são equivalentes ao tecido considerando os poderes de freamento mássicos da radiação do elétrons de várias energias.

O MCNP é um código de propósito geral para o transporte de partículas baseado no método de Monte Carlo. Particularmente, a versão 5 do MCNP (MCNP5, 2008) pode ser usada para o transporte de nêutrons, fótons e elétrons e para o transporte acoplado de nêutrons/fótons/elétrons. As faixas de energia de nêutrons são de  $10^{-11}$  MeV até 20 MeV para todos os isótopos e até 150 MeV para alguns isótopos; as faixas de energia de fótons são de 1 keV até 100 GeV e as faixas de energia de elétrons são de 1 keV até 1 GeV. O código MCNP5 tem um amplo intervalo de aplicações incluindo radioproteção e dosimetria, cálculo de blindagem, criticidade, física médica e outras. O código fornece as informações necessárias pelo usuário por meio de cartões específicos (*tallies*). Os *tallies* são normalizados por partículas iniciais. O transporte de elétrons é diferente do transporte de fótons e nêutrons. O transporte de elétrons é caracterizado por numerosas colisões que aumentam o tempo computacional desse método. É por isso que o caminho dos elétrons é dividido em muitos passos com muitas colisões (método de histórias condensadas). O transporte de elétrons em MCNP baseia-se neste método (MCNP5, 2008).

As TRV em cálculos de Monte Carlo podem muitas vezes reduzir os tempos computacionais necessários para obter resultados com uma

precisão suficiente. Essas técnicas representam um modo de acelerar a convergência dos resultados a uma solução confiável (melhoria da variância), mas preservando a física do problema (GUALDRINI e FERRARI, 2011). A TRV chamada de “Divisão/Roleta Russa” (Splitting/Russian Roulette) da geometria é uma das mais antigas e mais amplamente usadas técnicas de redução de variância. Tal como acontece com a maioria das técnicas de polarização, o objetivo dessa técnica é passar mais tempo amostrando as células mais importantes e amostrar durante menos tempo as células sem importância (MCNP5, 2008).

O modelo de Monte Carlo da câmara de extrapolação é mostrado na figura 2.

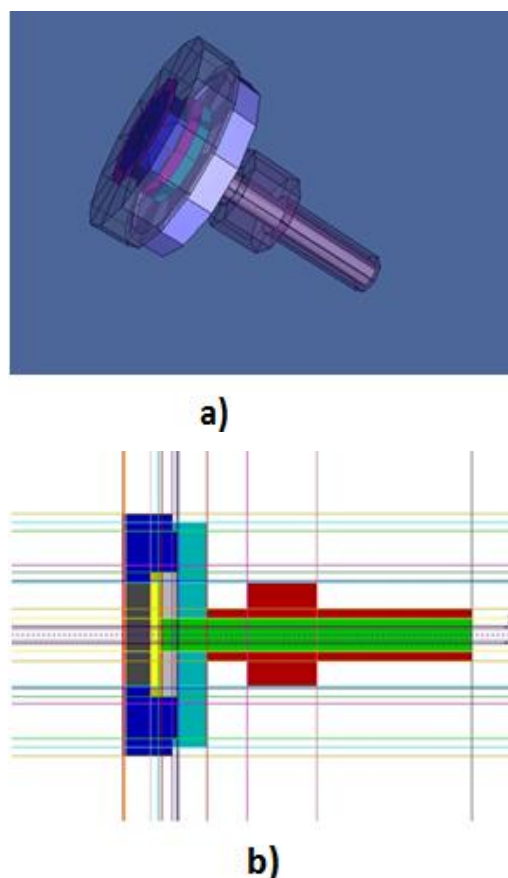


Figura 2. Modelo de Monte Carlo da câmara de extrapolação PTW modelo 23392: a) perspectiva 3D; b) geometria e componentes.

A geometria da câmara foi simulada de acordo com as suas dimensões reais. Todos os componentes, as dimensões e as densidades foram levados em conta de acordo com o manual do fabricante (PTW-Freiburg, 2002) e medições realizadas no laboratório. Para a simulação com cada uma das janelas de entrada levou-se em conta a profundidade nula real da câmara calculada na parte experimental. Esta profundidade define-se como a distância mínima entre os dois eletrodos para que eles não encostem um no outro, o que poderia causar danos à janela de entrada da câmara (ANTONIO, 2013). As profundidades nulas reais consideradas foram: 0,1255 mm no caso da janela de Mylar aluminizado e 0,1184 mm, no caso da janela de Hostaphan grafitado (ANTONIO, 2013).

Para o desenvolvimento da análise foi utilizada uma fonte de radiação beta do padrão secundário BSS1 de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  com uma atividade nominal de 1850 MBq.

Nas simulações da fonte de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  tomou-se em consideração as dimensões reais dela. O  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  é distribuído sob a forma de carbonato num substrato de prata. Supõe-se que a região ativa da fonte é de 100% de prata ativa, porque a quantidade de material radioativo é muito inferior à quantidade de substrato. O espectro de energia desta fonte usado na simulação foi tomado com base no relatório ICRU No. 56 (ICRU, 1997).

As densidades dos materiais adotados nas simulações para grafite, Mylar, acrílico, alumínio, aço, prata e ar são 1,70; 1,38; 1,19; 2,85; 8,06; 10,5 e 0,001205 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

As simulações pelo método de Monte Carlo foram realizadas tomando em conta o procedimento seguido por Antonio (2013) na parte experimental. Para verificar a lei do inverso do quadrado da distância e avaliar a possibilidade de calibração de outros detectores de radiação beta a distâncias diferentes, foi realizado um estudo da variação da resposta em função da distância fonte-detector. Na simulação pelo método de Monte Carlo, foram consideradas as seguintes condições

experimentais: a profundidade da câmara foi mantida a 1 mm para todas as distâncias; as distâncias fonte-detector que foram tomadas para a simulação foram 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm e 55 cm e a câmara foi exposta à fonte de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  (1850 MBq) do padrão beta BSS1. As simulações foram feitas para ambas janelas de entrada.

A fim de normalizar os resultados da simulação com os resultados da medição, a abordagem apresentada em simulações para caracterizar câmaras de extrapolação foi adotada (NEVES e col.; 2012; FARIA e col., 2015). Os resultados foram normalizados para a distância fonte-detector de 30 cm.

Os *tallies* que foram usados na simulação foram F1: fluxo de partículas que atravessam uma superfície dada; F4: fluxo de partículas numa célula dada e F8: energia depositada numa célula específica.

A taxa de dose absorvida a uma distância de 30 cm foi calculada para ambas janelas e foi comparada com as taxas de dose determinadas experimentalmente e com as taxas de dose dos certificados de calibração da fonte (ANTONIO, 2013). A taxa de dose absorvida por grama no tecido calcula-se de acordo com (MIT) pela seguinte expressão:

$$\dot{D} = A * \bar{E} * \left(\frac{\text{MeV}}{\text{g.s}}\right) * 1,60 * 10^{-13} * \left(\frac{\text{J}}{\text{MeV}}\right) * 10^3 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}}\right) = 1,60 * 10^{-10} * A * \bar{E} \left(\frac{\text{Gy}}{\text{s}}\right)$$

onde  $A$  é a atividade da fonte em Bq/g;  $\bar{E}$  é a energia média em MeV por desintegração.

De acordo com (ISO 6980-2, 2004) a taxa de dose absorvida no tecido dentro do volume sensível da câmara de extrapolação calcula-se pela expressão:

$$\dot{D} = \dot{D} * s_{t,a}$$

onde  $s_{t,a}$  é a razão entre os poderes de freamento médios do tecido e do ar (1,110)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O transporte de radiação nas simulações foi calculado de acordo com as histórias individuais de elétrons e fótons que atravessam todo o material. Um tratamento do transporte dos elétrons, incluindo todas as interações na criação de elétrons foi considerado.

O número de partículas iniciais (nps) para as simulações foi de  $50 \times 10^6$  e, em cada caso, foram cumpridos todos os testes estatísticos. Cada *tallie* é apresentado com a incerteza associada segundo o MCNP. As simulações foram executadas até que este erro associado ao resultado de cada *tallie* alcançou um valor inferior a 2,50% (MCNP5, 2008). A figura 3 mostra uma simulação com a fonte e as colisões das partículas na câmara de extrapolação a uma distância de 30 cm.

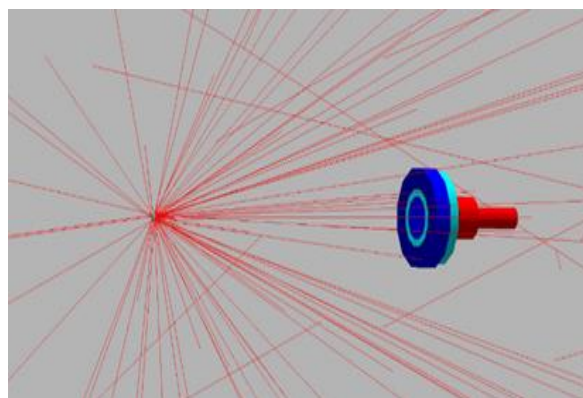


Figura 3. Simulação da fonte e as colisões das partículas na câmara de extrapolação.

O valor do número de partículas que atravessam a superfície da fonte foi  $(2,8400 \pm 0,0006) \times 10^{-1}$  para ambas janelas. Esse valor está normalizado por cada partícula da fonte. A tabela 1 mostra os resultados obtidos pelo MCNP do número de partículas que atravessam as superfícies atrás de cada janela e na lateral delas, considerando a distância fonte-detector.

Tabela 1. Número de partículas que atravessam as janelas e as superfícies laterais delas (D: Distância fonte-detector)

D cm	Mylar		Hostaphan	
	Janela	Lateral de janela	Janela	Lateral de janela
10	$(6,940 \pm 0,012) \times 10^{-3}$	$(9,830 \pm 0,005) \times 10^{-2}$	$(6,890 \pm 0,012) \times 10^{-3}$	$(9,790 \pm 0,005) \times 10^{-2}$
20	$(1,690 \pm 0,006) \times 10^{-3}$	$(3,130 \pm 0,003) \times 10^{-2}$	$(1,680 \pm 0,006) \times 10^{-3}$	$(3,120 \pm 0,003) \times 10^{-2}$
30	$(7,19 \pm 0,04) \times 10^{-4}$	$(7,410 \pm 0,010) \times 10^{-2}$	$(7,08 \pm 0,04) \times 10^{-4}$	$(7,401 \pm 0,010) \times 10^{-2}$
40	$(3,80 \pm 0,03) \times 10^{-4}$	$(7,710 \pm 0,013) \times 10^{-3}$	$(3,770 \pm 0,029) \times 10^{-4}$	$(7,700 \pm 0,013) \times 10^{-3}$
55	$(1,920 \pm 0,021) \times 10^{-4}$	$(3,840 \pm 0,010) \times 10^{-3}$	$(1,91 \pm 0,021) \times 10^{-4}$	$(3,840 \pm 0,010) \times 10^{-3}$

Pelos resultados da simulação observa-se que com o aumento da distância fonte-detector, o número de partículas que atravessam as superfícies diminui para cada janela e esse número é maior para a janela de Mylar que tem uma espessura menor que a de Hostaphan.

A fluência de partículas na célula correspondente ao volume sensível da câmara de extrapolação (cavidade) foi de  $(1,1100 \pm 0,0023) \times 10^{-3}$  para a janela de Mylar e  $(1,09 \pm 0,0024) \times 10^{-3}$  para a janela de Hostaphan.

A figura 4 mostra os gráficos da fluência de partículas no volume sensível para ambas janelas da câmara.

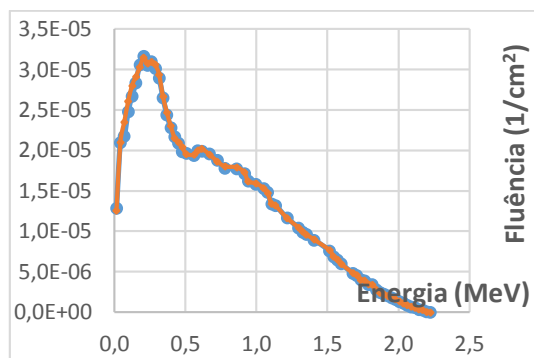


Figura 4. Fluência de partículas no volume sensível da câmara de extrapolação para as janelas de Mylar e Hostaphan.

Não se observa muita diferença nos gráficos para cada janela e os valores do fluxo praticamente são os mesmos. A janela de Mylar não perturba o espectro de partículas da fonte.

A tabela 2 mostra os valores da energia depositada no volume sensível da câmara de extrapolação obtidos pelo MCNP para ambas janelas, considerando a distância fonte-detector. No caso da janela de Hostaphan foi preciso usar uma TRV porque os erros relativos para as distâncias de 30 e 55 cm foram maiores que 5%.

Os valores da simulação foram comparados com os valores experimentais em termos de resposta relativa normalizando todos os valores para a resposta da distância fonte-detector de 30 cm. A figura 5 mostra as curvas dos dados experimentais e da simulação da resposta relativa para a janela de Hostaphan (os valores estão em escala logarítmica). Os resultados das inclinações de cada curva são similares. A tabela 3 mostra esses valores com os erros associados.

Tabela 2. Energia depositada no volume sensível da câmara de extrapolação para as janelas de Mylar e Hostaphan.

Distância fonte-detector (cm)	Energia depositada Mylar (MeV)
10	$(2,140 \pm 0,025) \times 10^{-6}$
20	$(5,40 \pm 0,10) \times 10^{-7}$
30	$(2,42 \pm 0,06) \times 10^{-7}$
40	$(1,31 \pm 0,04) \times 10^{-7}$
55	$(6,13 \pm 0,19) \times 10^{-8}$
Distância fonte-detector (cm)	Energia depositada Hostaphan (MeV)
10	$(2,030 \pm 0,028) \times 10^{-6}$
20	$(5,12 \pm 0,11) \times 10^{-7}$
30	$(2,30 \pm 0,03) \times 10^{-7}$
40	$(1,30 \pm 0,04) \times 10^{-7}$
55	$(5,88 \pm 0,22) \times 10^{-8}$

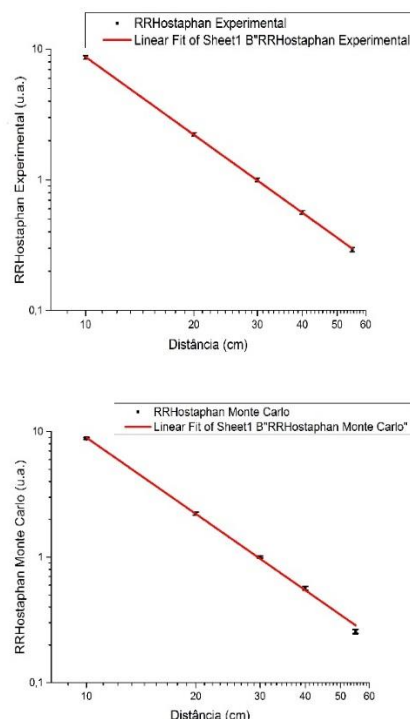


Figura 5. Dados experimentais e da simulação da resposta relativa para a janela de Hostaphan.

Tabela 3. Resultados das inclinações das curvas da resposta relativa para cada janela.

Janela	Experimental (u.a./cm)	Simulação (u.a./cm)
Mylar	$-1,976 \pm 0,019$	$-2,050 \pm 0,040$
Hostaphan	$-1,980 \pm 0,010$	$-2,018 \pm 0,038$

A diferença entre os dados experimentais e das simulações é 3,74% e 1,92% para as janelas de Mylar e Hostaphan respectivamente. Os dados experimentais e de simulação são compatíveis e estão dentro dos intervalos das incertezas associadas. A resposta da câmara de extrapolação segue a lei do inverso do quadrado da distância fonte-detector para ambas janelas

A figura 6 mostra uma comparação da distribuição das partículas com e sem TRV. No caso da janela de Hostaphan foi usada a TRV “Divisão/Roleta Russa”. Pode-se observar que no caso do uso da TRV (na direita da figura) a quantidade de partículas que chega à região de interesse (cavidade) é maior do que sem o uso da TRV.

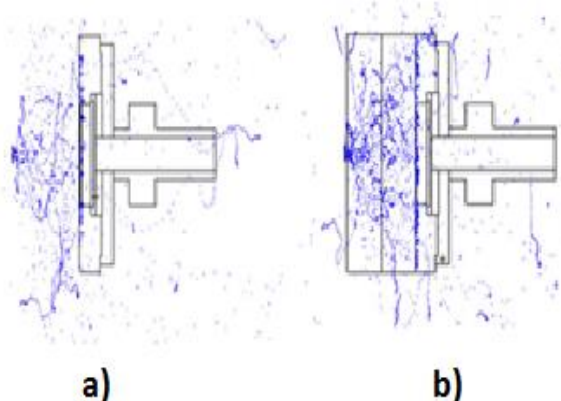


Figura 6. Comparação da distribuição das partículas: a) sem TRV; b) com TRV.

A tabela 4 mostra o resultado do cálculo da taxa de dose absorvida no tecido para a distância fonte-detector de 30 cm a partir dos dados obtidos na simulação para cada janela. A taxa de dose absorvida foi comparada com as taxas calculadas

a partir dos dados experimentais e as taxas do certificado de calibração das fontes (ANTONIO, 2013).

Tabela 4. Taxa de dose absorvida no tecido para as janelas de Mylar e Hostaphan para a distância fonte-detector de 30 cm.

Mylar	Hostaphan
Experimental	
$(38,91 \pm 2,19) \mu\text{Gy/s}$	$(35,24 \pm 2,01) \mu\text{Gy/s}$
Certificado	
$(38,52 \pm 1,30) \mu\text{Gy/s}$	$(34,67 \pm 0,65) \mu\text{Gy/s}$
Simulação	
$(35,6 \pm 1,8) \mu\text{Gy/s}$	$(33,9 \pm 0,4) \mu\text{Gy/s}$

A diferença entre os dados experimentais e da simulação e os dados do certificado de calibração para a janela de Mylar é 1,66% e 2,68% respectivamente. A diferença entre os dados experimentais e da simulação e os dados do certificado de calibração para a janela de Hostaphan é 2,7% e 2,25% respectivamente. Os resultados da simulação são compatíveis e estão dentro dos intervalos das incertezas associadas.

Os resultados estão em concordância com os resultados experimentais e com os valores da taxa de dose absorvida do certificado de calibração.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados foram apresentados a partir da simulação de uma análise comparativa da resposta de uma câmara de extrapolação modelo 23392 com duas janelas de entrada diferentes: uma janela de Mylar aluminizado e uma janela de Hostaphan grafitado. Foi analisada a variação da resposta relativa da câmara de extrapolação, em função da distância fonte-detector. A resposta da câmara de extrapolação segue a lei do inverso do quadrado da distância fonte-detector para ambas janelas.

O fluxo de partículas que passaram através de cada janela de entrada da câmara de extrapolação é

maior para a janela de Mylar e a fluência das partículas no volume da cavidade é ligeiramente maior no caso dessa janela também.

Os valores das taxas de dose absorvida determinados pela simulação estão em concordância com os valores experimentais e os valores do certificado de calibração.

## 5. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o auxílio financeiro parcial das agências de fomento CAPES, CNPq, FAPESP e MCTI (Projeto INCT de Metrologia das Radiações na Medicina 573659/2008-7).

## 6. REFERÊNCIAS

ANTONIO, P.L.; CARVALHO, V.S.; CALDAS, L.V.E. Comparison of calibration results for an extrapolation chamber obtained with different  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  secondary standard sources. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 70, p. 388-391, 2012.

ANTONIO, P.L. Estabelecimento de Padronização Primária e de Métodos Relativos com o Uso de Técnicas Luminescentes em Dosimetria da Radiação Beta. São Paulo. Tese (Doutoramento) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Universidade de São Paulo, 2013.

ANTONIO, P.L.; XAVIER M.; CALDAS, L.V.E. Böhm extrapolation chamber: Study of its behaviour in beta radiation fields at the Calibration Laboratory of IPEN. *Radiat. Phys. Chem.*, v.104, p. 310–315, 2014.

BEHRENS, R. Simulation of the radiation fields of the Beta Secondary Standard BSS2. *J.Instrum, JINST*, v. 8, P02019, 2013.

BÖHM, J. The National Primary Standard of the PTB for Realizing the Unit of the Absorbed Dose Rate to Tissue for Beta Radiation. Braunschweig, Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB-Dos-13: 1986.

CALDAS, L.V.E. Alguns Métodos de Calibração e de Dosimetria de Radiação Beta. Tese

(Doutoramento) - Instituto de Física/Universidade de São Paulo, 1980.

CALDAS, L.V.E. Performance characteristics of an extrapolation chamber for beta radiation detection. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 37, n. 9, p. 988-990, 1986.

FARIA F.P.; REYNALDO, S.; FONSECA, T.C.F.; LACERDA, M.A.S.; DA SILVA, T.A. Monte Carlo simulation applied to the characterization of an extrapolation chamber for beta radiation dosimetry *Radiat. Phys. Chem.*, v. 116, p. 226-230, 2015.

GUALDRINI, G.; FERRARI P. Monte Carlo variance reduction techniques: an overview with some practical examples. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 146, p. 425–433, 2011.

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection. Report 56. ISBN 0-913394-55-6. USA, 1997

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation fields. Genève: ISO, 2004 (ISO/FDIS 6980-2:2004).

MIT, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. No site: <http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering>. MIT Open Course Ware. Massachusetts of Technology. Acesso em 2016.

MNCP5. MCNP, A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. LA-UR-03-1987. Los Alamos National Laboratory, 2008.

NEVES, L.P.; SILVA, E.A.B.; PERINI, A.P.; MAIDANA, N.L.; CALDAS, L.V.E. Characterization of an extrapolation chamber for low-energy X-rays: Experimental and Monte



Carlo preliminary results. *Appl. Radiat. Isot.*, v.70, p.1388–1391, 2012.

NIST, NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Ionizing Radiation Division: Protection-level Beta Particle Source & Instrument Calibrations. IRD-P-10, p. 1-39, 2010.

PTW-Freiburg, PHYSIKALISCH TECHNISCHE WERKSTATTEN-FREIBURG. Instruction Manual Extrapolation Chamber according to Böhm Type 23392, Freiburg, Germany, 2002.

SELVAM, P.T.; SAULL, P.R.B.; ROGERS, D. W. O. Monte Carlo modelling of the response of NRC's  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  primary beta standard. *Med. Phys.*, v. 32, p. 3084-3094, 2005.

VAN WIJK, A.J.; VAN DEN EYNDE, B.; HOOGENBOOM, J.E. An easy to implement global variance reduction procedure for MCNP. *Annals of Nuclear Energy*, v. 38, p. 2496–2503, 2011.