

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO MONTE CARLO NÃO PARAMÉTRICO PARA SIMULAR FONTES RADIATIVAS PLANARES EM MODELOS COMPUTACIONAIS DE EXPOSIÇÃO

DEVELOPMENT OF A NONPARAMETRIC MONTE CARLO METHOD FOR SIMULATION OF PLANE SOURCES OF RADIATION IN EXPOSURE COMPUTER MODELS

José Wilson Vieira¹; Viriato Leal Neto²; José de Melo Lima Filho³; Fernando Roberto de Andrade Lima⁴

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE – Recife/PE – Brasil

Escola Politécnica de Pernambuco/Universidade de Pernambuco – EPP/UPE – Recife/PE – Brasil

Departamento de Energia Nuclear/Universidade Federal de Pernambuco – DEN/UFPE – Recife/PE – Brasil

jose.wilson59@uol.com.br

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE – Recife/PE – Brasil

viriatoleal@yahoo.com.br

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE – Recife/PE – Brasil

Departamento de Energia Nuclear/Universidade Federal de Pernambuco – DEN/UFPE – Recife/PE – Brasil

josedemelo@gmail.com

⁴Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste/Comissão Nacional de Energia Nuclear – CRCN-NE/CNEN – Recife/PE – Brasil

Escola Politécnica de Pernambuco/Universidade de Pernambuco – EPP/UPE – Recife/PE – Brasil

Departamento de Energia Nuclear/Universidade Federal de Pernambuco – DEN/UFPE – Recife/PE – Brasil

falima@cnen.gov.br

Resumo

Nos modelos computacionais de exposição (MCEs) do DEN/UFPE, um fantoma (simulador antropomórfico) é acoplado ao código Monte Carlo (MC) EGSnrc para avaliações dosimétricas. Os modelos também precisam de um simulador da fonte emissora de radiação. Este trabalho apresenta um algoritmo MC não paramétrico de uma fonte radioativa planar, isotrópica por rotação, dependente da variável radial e da função de distribuição acumulada (FDA) do problema, conhecida, mas não inversível. O algoritmo escolhe N valores da variável radial e calcula os correspondentes valores da função densidade de probabilidade (FDP) e da FDA do problema. A suposição usada é que, se os valores da FDA fossem discretos, corresponderiam a frequências de raio (FR) em intervalos consecutivos do domínio. Usando um gerador de números aleatórios (GNA) uniformes normalizados em [0, 1), a técnica MC da inversão generalizada e interpolações lineares, foi possível obter amostras de r. Para comparações dosimétricas, foi reutilizado o MCE MSTA (Mash STANDING = fantoma MASH + EGSnrc + algoritmo baseado na FDP exponencial) e montado o MSTA_FR. As implementações foram adicionadas ao software MonteCarlo, desenvolvido pelos autores e atualizado sempre que necessário. Os resultados apresentados e comentados estabelecem um novo algoritmo para uma fonte radioativa planar.

Palavras-chave: Modelo computacional de exposição, fonte radioativa planar, métodos Monte Carlo não paramétricos.

Abstract

In exposure computational models (ECMs) of DEN/UFPE an anthropomorphic phantom is coupled to EGSnrc Monte Carlo (MC) Code to perform dosimetric estimates. The models also need a simulator of the emission source of ionizing radiation. This paper presents a nonparametric MC algorithm of a plane source of radiation, isotropic for rotation, dependent on the radial variable and the cumulative distribution function (CDF) of the problem, known but not invertible. The algorithm chooses the N values of the variable radial and calculates the corresponding values of the probability density function (PDF) and FDA of the problem. It is supposed that, if the CDF values were discrete, they correspond to radius frequencies (RF) in consecutive intervals of the domain. Using a random number generator (RNG) uniform normalized in $[0, 1)$, the MC technique of generalized inversion, and linear interpolation it was possible to obtain samples of r . For dosimetric comparisons, MSTA (Mash STANDING = MASH phantom + EGSnrc + algorithm based on exponential PDF) ECM was reused and MSTA_RF ECM was built. The implementations were added to the MonteCarlo software, developed by the authors and updated whenever necessary. The results presented and commented establish a new algorithm for a plane source of radiation.

Key-words: Exposure computational models, plane sources of radiation, nonparametric Monte Carlo methods.

1. Introdução

Para estimar a distribuição de dose pelos órgãos e tecidos radiosensíveis de pessoas submetidas às radiações ionizantes, é necessário realizar simulações utilizando um MCE. Tais modelos são compostos, fundamentalmente, por um simulador antropomórfico (fantoma, neologismo da palavra inglesa *phantom*), um código MC e um algoritmo da fonte radioativa (VIEIRA, 2004).

O GDN (estudantes e pesquisadores pertencentes ao Grupo de Pesquisa em Dosimetria Numérica e/ou ao Grupo de Pesquisa em Dosimetria Computacional e Sistemas Embarcados, ambos cadastrados no CNPq) tem contribuído significativamente para o desenvolvimento e utilização de fantasmas de voxels (*volume pixels*), desde o MAX (*Male Adult voXel*) (KRAMER *et al.*, 2003) até MASH (*Male Adult meSH*) (CASSOLA, 2011). Os códigos MC estão bem estabelecidos na comunidade científica e o GDN tem utilizado o sistema EGS, principalmente o EGSnrc (KAWRAKOW *et al.*, 2011). Também tem desenvolvido algoritmos simuladores de fontes radioativas emissoras de fótons como os apresentados em Vieira (2004).

Contudo, um problema ainda não estava completamente resolvido pelo GDN: o algoritmo de uma fonte planar, para simular, por exemplo, a radiação natural terrestre atuando sobre uma pessoa em posição ortostática. Em 2006, Leal Neto e colaboradores apresentaram uma solução para o problema baseada em amostragens por técnicas de rejeição com a FDP exponencial. No presente

artigo foram usadas duas versões do MCE MSTA: uma com o algoritmo da fonte de 2006 (MSTA_EXP) e outra usando um novo algoritmo para geração de amostras baseado em um método MC não paramétrico, fundamentado em distribuições de frequência de uma variável aleatória discreta, adaptado para a variável contínua r (MSTA_FR).

Uma descrição dos algoritmos supracitados é apresentada na sequência e, posteriormente, são apresentados e discutidos alguns resultados dosimétricos. As implementações necessárias, tanto na preparação de arquivos de entrada em formatos adequados para leitura pelo EGSnrc, quanto na análise gráfica e numérica dos dados gerados nas simulações MC, foram realizadas no ambiente de desenvolvimento integrado do Microsoft Visual Studio 2010 (MVS 2010), usando a linguagem de programação C# e a de marcação XAML no tipo de projeto chamado *WPF Application* (XU, 2009). A Figura 1a mostra a janela principal do *software* MonteCarlo (VIEIRA *et al.*, 2012A; 2012B; 2012C; 2013), destacando o menu **Arquivos**, onde foram alocadas as implementações para arquivos de entrada; A Figura 1b destaca o item de menu modificado especialmente para este trabalho.

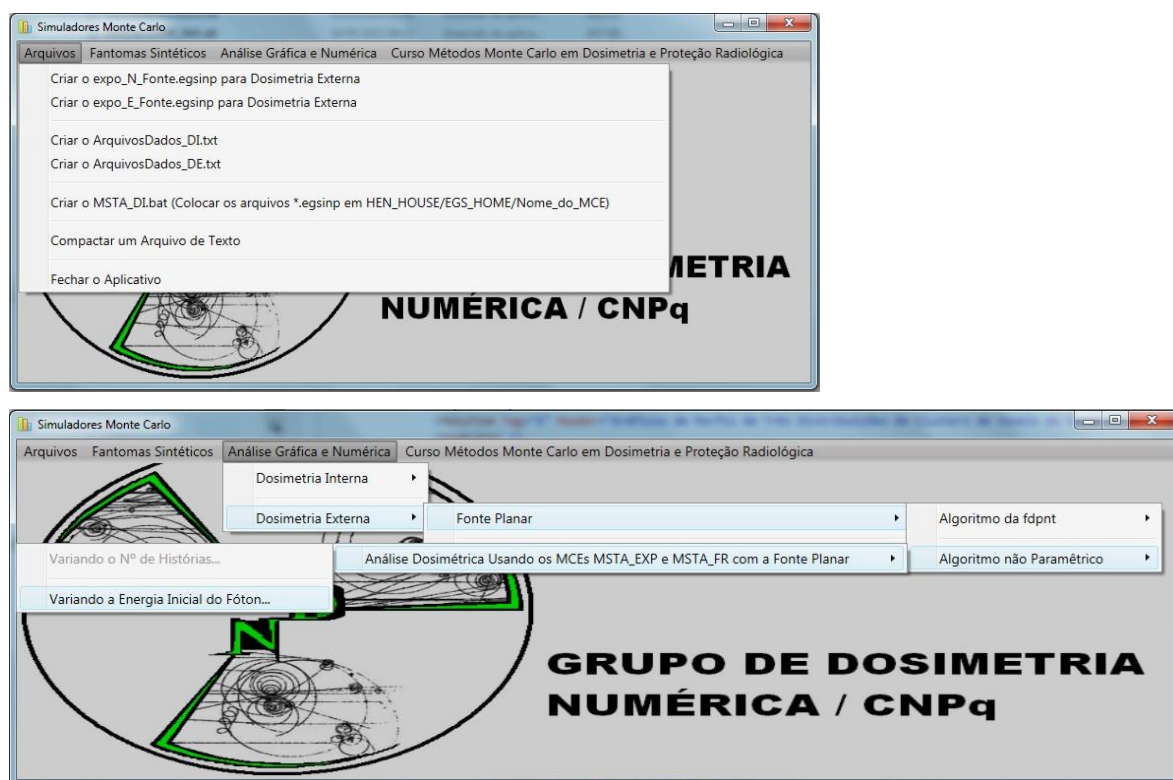


Figura 1 – Janela principal do *software* MonteCarlo exibindo (a) o conteúdo do menu **Arquivos** e (b) o item de menu **Variando a Energia Inicial do Fóton**.

Este artigo é a quinta publicação envolvendo o *software* MonteCarlo, que já se constitui uma das principais inovações tecnológicas completamente desenvolvida pelo GDN. A versão atual do *software* está disponível em <http://dosimetrianumerica.org/software>.

2. Materiais e métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Dosimetria Numérica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Campus Recife, em computadores que têm como principais itens de configuração um processador Intel(R) Core(TM) i7 CPU X990 @ 3,47GHz, 24 GB de RAM e o sistema operacional Windows 7 Ultimate de 64 bits. Nestes computadores estão instalados os *softwares* aqui utilizados: o EGSnrc, o MVS 2010 Ultimate, o Excel 2007 e o MonteCarlo. O fantoma MASH foi obtido em <http://www.caldose.org/>, bem como os arquivos que compõem o MCE MSTA_EXP. A interface para análise gráfica e numérica dos resultados dosimétricos, cujo caminho de acesso no MonteCarlo é mostrado na Figura 1b, foi construída com o auxílio da versão livre da biblioteca de vínculo dinâmico **AmCharts.Windows.dll** (nos gráficos apresentados nos resultados há um *hiperlink* para a página *web* de onde foi obtida a versão usada).

A Figura 2 ilustra a situação-problema modelada: fótons que emergem, isotropicamente, de uma região circular e podem atingir uma pessoa em pé no centro do círculo.

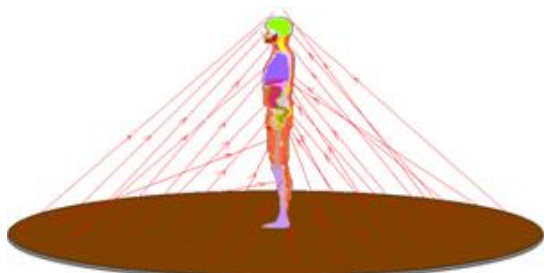


Figura 2: Ilustração usada no desenvolvimento do algoritmo da fonte planar.

Fonte: Leal Neto e colaboradores (2006).

O modelo desenvolvido consiste em considerar uma área preenchida uniformemente com fontes pontuais que, isotropicamente, emitem fótons no espaço 2π superior. Dependendo do modo de propagação do material radioativo e da constituição do meio, fontes deste tipo podem ter formas e tamanhos bem diferentes. Mas, mesmo se o tamanho de uma região circular considerada tender a infinito, por exemplo, para simular a radiação natural terrestre, é razoável supor que existe um raio limiar, $r = r_{max}$, de tal maneira que uma pessoa em pé não seria atingida pela radiação emergente da área onde $r > r_{max}$ de modo significativo. A Figura 3 mostra um esboço da geometria a ser usada para deduzir uma expressão matemática para a distribuição de fótons em uma superfície cilíndrica envolvendo o fantoma irradiado.

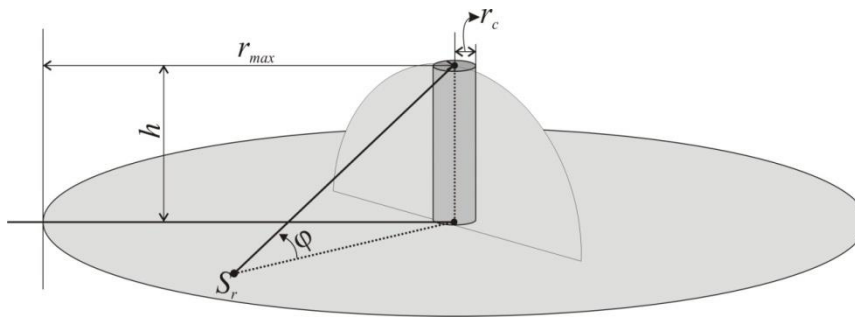


Figura 3: Esboço da geometria da fonte planar.

A função densidade de probabilidade do problema

O GNA pretendido deve sortear fótons emergentes de dentro de um círculo de raio r_{max} e fora de um círculo de raio r_c , que atinjam a superfície cilíndrica de altura h e raio r_c . Se a distribuição dos fótons que chegam ao semicírculo de raio h da Figura 3 em função da distância r for conhecida, pode-se, a partir do ponto S_r da figura, obter a FDP que descreve a fonte planar. Cada fóton emergente do ponto S_r , obtido a partir de um r dependente da FDP a ser deduzida e de um ângulo θ , uniformemente distribuído entre 0 e 2π , poderá atingir a área lateral do cilindro de raio r_c . Seguindo o vetor diretor do voo deste fóton, pode-se avaliar se ele irá atingir o fantoma. Caso não atinja, será descartado e novo ponto S_r será amostrado.

A Figura 4 mostra o esquema para um fóton útil, que emerge de S_r e voa sob um ângulo $0 \leq \varphi(r) < \pi/2$. Para descrever matematicamente esta situação, o círculo foi separado nas regiões $0 \leq r \leq r_c$ e $r_c < r \leq r_{max}$. Em $0 \leq r \leq r_c$, região sob o fantoma, r é uniformemente amostrado em $[0, r_c]$. Resta deduzir a FDP a ser usada em $r_c < r \leq r_{max}$.

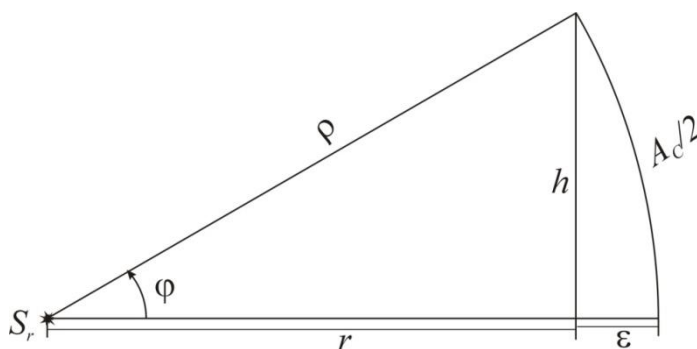


Figura 4: Variáveis usadas na dedução da fórmula da FDP do problema.

A área da calota cuja metade do seu contorno é mostrada na Figura 4 pode ser calculada

usando a proporção $\frac{A_c}{4\pi\rho^2} = \frac{\epsilon}{2\rho}$.

Isolando A_C : $A_C = 2\pi\rho\varepsilon = 2\pi\rho(\rho - \sqrt{\rho^2 - h^2}) \Rightarrow$

$$A_C = 2\pi\rho^2 \left(1 - \frac{\sqrt{\rho^2 - h^2}}{\rho} \right). \quad (1)$$

Da Figura 4:

$$\cos \varphi(r) = \frac{\sqrt{\rho^2 - h^2}}{\rho} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}}. \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1):

$$A_C(r) = 2\pi(r^2 + h^2)[1 - \cos \varphi(r)]. \quad (3)$$

O ângulo sólido da calota completa é: $\Omega(r) = \frac{A_C}{r^2 + h^2} = 2\pi[1 - \cos \varphi(r)]$.

Para a meia calota mostrada na Figura 4:

$$\Omega_{mc}(r) = \pi[1 - \cos \varphi(r)]. \quad (4)$$

Fótons que emergem de uma fonte pontual em Sr para o semiespaço acima do círculo, voam sob um ângulo sólido total de $\Omega_{total} = 2\pi \text{srad}$.

Assim, a probabilidade $W(r)$ de um fóton sair de Sr e atingir a meia calota da Figura 4 é

$$W(r) = \frac{\Omega_{mc}(r)}{\Omega_{total}} = \frac{1}{2}[1 - \cos \varphi(r)]. \quad (5)$$

O número de fótons que emerge com isotropia azimutal de um anel com largura dr é

$$dN_{iso} = \frac{2\pi r dr}{\pi r_{max}^2} N = \frac{2r dr}{r_{max}^2} N, \quad (6)$$

onde N é o número total de fótons simulados. Consequentemente o número de fótons que sai do anel circular no plano e chega à meia calota é, usando (5) e (6):

$$dN = dN_{iso} W(r) = \frac{2r dr}{r_{max}^2} N \frac{[1 - \cos \varphi(r)]}{2} \Rightarrow$$

$$dN = N \frac{r}{r_{max}^2} [1 - \cos(\varphi(r))] dr. \quad (7)$$

Assim, a função de distribuição acumulada (FDA), que dá a probabilidade de que fótons emergentes da região $r_c < r \leq r_{max}$ atinjam a meia calota da Figura 4, é dada por:

$$F(r) = \frac{\int_{r_c}^r r' [1 - \cos \varphi(r')] dr'}{\int_{r_c}^{r_{max}} r [1 - \cos \varphi(r)] dr} = \frac{\int_{r_c}^r \left(r' - \frac{r'^2}{\sqrt{r'^2 + h^2}} \right) dr'}{\int_{r_c}^{r_{max}} \left(r - \frac{r^2}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) dr}. \quad (8)$$

Com algum esforço, as integrais acima podem ser resolvidas e obtém-se:

$$F(r) = \frac{1}{C_{\max} - C_{\min}} \left[r^2 - r\sqrt{r^2 + h^2} + h^2 \ln\left(r + \sqrt{r^2 + h^2}\right) - C_{\min} \right], \quad (9)$$

onde

$$\begin{cases} C_{\min} = r_c^2 - r_c\sqrt{r_c^2 + h^2} + h^2 \ln\left(r_c + \sqrt{r_c^2 + h^2}\right) \\ C_{\max} = r_{\max}^2 - r_{\max}\sqrt{r_{\max}^2 + h^2} + h^2 \ln\left(r_{\max} + \sqrt{r_{\max}^2 + h^2}\right) \end{cases}. \quad (10)$$

A FDP correspondente é determinada por $f(r) = \frac{dF(r)}{dr}$:

$$f(r) = \frac{2}{C_{\max} - C_{\min}} \left(r - \frac{r^2}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) = A \left(r - \frac{r^2}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right). \quad (11)$$

O método de rejeição

Na FDP do problema, (11), h é a altura do fantoma e A é uma constante de normalização que depende de h , de r_c e de r_{\max} . A FDA correspondente, (9), não é inversível o que inviabiliza a amostragem de r por técnicas MC diretas (KALOS e WHITLOCK, 1986). Para distribuições univariantes, há uma técnica de inversão generalizada que pode ser usada para obtenção de um GNA transformados a partir da FDA uniforme.

Supondo que x seja uma variável aleatória com FDA $F(x)$ e FDP obtida por $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$, e que $r = r(x)$ seja uma função contínua não decrescente de x , o que significaria a função $F(r)$? Com base na suposição acima, uma propriedade geral entre a variável x e a função $r(x)$ pode ser expressa por

$$r(X) \leq r(x) \text{ se } X \leq x. \quad (12)$$

Consequentemente, tem-se para as probabilidades,

$$P\{r(X) \leq r(x)\} = P\{X \leq x\}, \quad (13)$$

ou para as FDAs,

$$\begin{cases} F(r) = F(x) \\ r = r(x) \end{cases}. \quad (14)$$

A relação entre as FDPs pode ser determinada diferenciando (14):

$$\begin{aligned} \frac{dF(r)}{dx} = \frac{dF(x)}{dx} &\Rightarrow \frac{dF(r)}{dr} \frac{dr}{dx} = f(x) \Rightarrow \\ f(r) \frac{dr}{dx} &= f(x). \end{aligned} \quad (15)$$

Como probabilidades são números positivos,

$$f(r) = f(x) \left| \frac{dr}{dx} \right|^{-1}. \quad (16)$$

Se x é uma variável uniforme, sua FDA é

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & 0 \leq x \leq 1. \\ 1, & x > 1 \end{cases} \quad (17)$$

Portanto, no intervalo $[0, 1]$, a FDA para r é determinada pela solução da equação,

$$F(r) = \int_{-\infty}^r f(r') dr' = x, \quad (18)$$

para r .

Como exemplo, o GNA exponenciais pode ser obtido a partir da FDP

$$f(r) = \lambda e^{-\lambda r}, \quad 0 < r < \infty. \quad (19)$$

Substituindo (19) em (18): $F(r) = \int_0^r \lambda e^{-\lambda r'} dr' = 1 - e^{-\lambda r} = x$.

Resolvendo a equação acima em r e substituindo $1 - x$ por x , tem-se o GNA exponenciais,

$$r = -\frac{1}{\lambda} \ln x, \quad 0 < x \leq 1. \quad (20)$$

Este GNA foi utilizado para obter amostras de r no MCE MSTA_EXP, composto pelo fantoma de voxels MASH (CASSOLA, 2011) e pelo código MC EGSnrc (KAWRAKOW *et al.*, 2011). O parâmetro real e positivo λ , de (20), foi ajustado para que a FDP exponencial se sobrepusesse à FDP do problema na parte mais importante do domínio, como mostrado na Figura 5. A Tabela 1 mostra os parâmetros obtidos no ajuste.

Um dado r obtido com (20) é aceito para a sequência do código MC se o valor de $f(r)$, calculado por (19), resultar em um ponto $(r, f(r))$ pertencente à área limitada pela FDP do problema; caso contrário r é rejeitado e novo valor é sorteado.

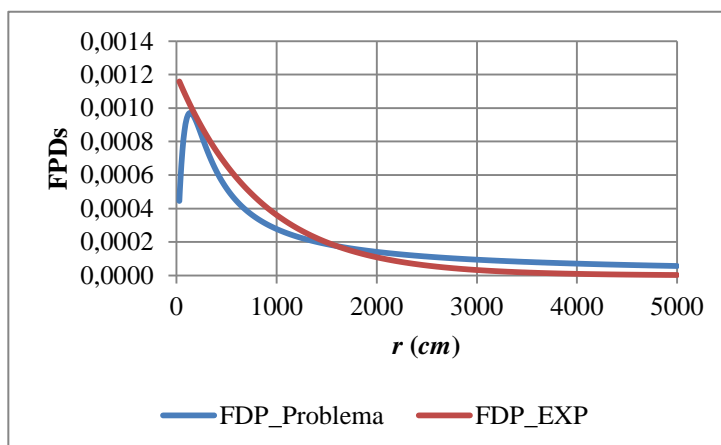


Figura 5: Ajuste da FDP do problema a uma FDP Exponencial.

Tabela 1: Parâmetros da fonte planar para o MCE MSTA_EXP.

Constante	Valor
$r_c (cm)$	28,80
$r_{max} (cm)$	5000,00
$h (cm)$	175,56
$A (cm^{-2})$	1,84408E-05
$\lambda (cm^{-1})$	0,00120

O método Monte Carlo não paramétrico

O novo algoritmo simulador da fonte planar apresentado neste trabalho foi derivado diretamente da FDP do problema, (11), e não requer a técnica de rejeição. Com a FDP do problema e seus parâmetros mostrados da Tabela 1 foram calculados $N = 499$ pontos (r, FDP) , $r_c \leq r \leq r_{max}$, mostrados, parcialmente, na Tabela 2. Os valores da FDP foram somados, cumulativamente (terceira coluna da Tabela 2), e normalizados (quarta coluna) para 1. Os valores de r e da FDA foram salvos em um arquivo de texto para ser lido no MCE MSTA_FR. Os valores de r foram escolhidos com intervalo de $\Delta r = 10 \text{ cm}$ (com exceção do primeiro), como se esta variável radial fosse discreta e os valores da FDA na quarta coluna da Tabela 2 fossem frequências de raios contados entre um valor de r e o próximo. Assim, a curva da FDP do problema, mostrada na Figura 5, foi substituída por segmentos de reta representando classes da variável radial. Com um GNA uniformes em $[0, 1]$, valores de x foram sorteados e valores de r foram obtidos, usando a interpolação linear,

$$r = \left(\frac{x - FDA_l}{FDA_F - FDA_l} \right) (r_F - r_l) + r_l. \quad (21)$$

Tabela 2: Dados (parciais) usados no algoritmo da fonte planar.

$r(cm)$	FDP	FDA Não Normalizada	FDA
28,8	0,000445	0,000445	0,00442
30	0,000460	0,000905	0,00899
40	0,000574	0,001479	0,01470
50	0,000669	0,002148	0,02135
...
4960	0,000057	0,100411	0,99774
4970	0,000057	0,100468	0,99830
4980	0,000057	0,100525	0,99887
4990	0,000057	0,100582	0,99944
5000	0,000057	0,100639	1,00000

Por exemplo, se em um dado ciclo o valor de x sorteado fosse 0,015, então, de acordo com a Tabela 2, $FDA_F = 0,02135$, $FDA_I = 0,01470$, $r_F = 50$ e $r_I = 40$. Como resultado este ciclo forneceria

$$r = \left(\frac{0,01500 - 0,01470}{0,02135 - 0,01470} \right) (50 - 40) + 40, r = 40,45 \text{ cm.}$$

O GNA FR foi implementado em MORTRAN (KAWRAKOW *et al.*, 2011) no MSTA_FR, como mostrado no fragmento de código abaixo, onde $ZZOR$ é a variável aleatória uniforme sorteada em $[0, 1]$ e $RTEMP$ é a variável radial obtida com (21):

```

“...”
I=1;
WHILE(I<NAMOSTRAS_PLANAR)[
IF(VTFDA_PLANAR(I+1).EQ.VTFDA_PLANAR(I))[RTEMP=VTR_PLANAR(I);
I=NAMOSTRAS_PLANAR;]
ELSE IF((ZZOR.GE.VTFDA_PLANAR(I)).AND.(ZZOR.LE.VTFDA_PLANAR(I+1)))[
RTEMP=((ZZOR-VTFDA_PLANAR(I))/(VTFDA_PLANAR(I+1)-
VTFDA_PLANAR(I)))*
(VTR_PLANAR(I+1)-VTR_PLANAR(I))+VTR_PLANAR(I);
I=NAMOSTRAS_PLANAR;]
ELSE[I=I+1;]
]
“...”

```

O GNA FR utiliza apenas o GNA uniformes do EGSnrc e a definição normalizada da FDP do problema para obter amostras de r . Assim, o método descrito é não paramétrico, isto é, não requer outra FDP e alguma técnica de rejeição (LEAL NETO *et al.*, 2006) ou de substituição

(VIEIRA *et al.*, 2012B) para transformar a variável aleatória uniforme na variável radial do problema.

3. Resultados e discussão

Além dos parâmetros mostrados na Tabela 1 e dos 499 valores de r e da FDA do problema, salvos em um arquivo de texto, adicionado aos dados de entrada do MCE MSTA_FR, os seguintes parâmetros foram usados nos dois MCEs: N° de histórias, 5E7; energia de corte para fótons, 2 keV; e para elétrons, 20 keV. A grandeza de normalização usada nos dados de saída, INAK (*INcident Air Kerma*, KERMA incidente no ar), foi obtida nas simulações a partir da fluência através de uma esfera de raio 10 cm colocada a 1 m do solo, com centro pertencente ao eixo axial do fantoma (Figuras 2 e 3).

Para o MCE MSTA_FR, um arquivo de texto especial foi obtido com os $N = 50000$ primeiros valores de r sorteados na simulação, com o objetivo de verificar se o GNA FR estava funcionando apropriadamente, isto é, se o gráfico da distribuição de frequências destas amostras coletadas reproduzia o perfil mostrado na Figura 5 para a FDP do problema.

A Figura 6 mostra o gráfico da distribuição de frequências de raios, contados em classes fechadas à esquerda e abertas à direita com intervalo $\Delta r = 50$ cm.

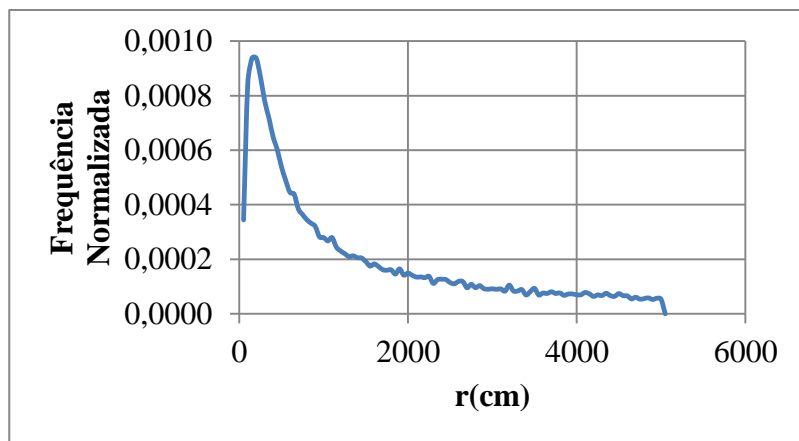


Figura 6: Perfil da distribuição dos 50000 primeiros raios amostrados com o GNA FR.

Cada contagem obtida (f_i) nas N_C classes foi dividida por $N \cdot \Delta r$ para se obter a frequência normalizada (fn_i). Aqui foi usada a versão discreta da equação (8),

$$fn_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{N_C} f_j \Delta r_j} = \frac{f_i}{\Delta r \sum_{j=1}^{N_C} f_j} = \frac{f_i}{N \cdot \Delta r}. \quad (22)$$

A curva da Figura 6 reproduz satisfatoriamente o perfil da FDP do problema mostrado na Figura 5. Aumentando o número de amostras coletadas na simulação do MCE MSTA_FR, os dois perfis se aproximam ainda mais.

Os MCEs MSTA_EXP e MSTA_FR foram executados e os seus resultados foram organizados, via o *software* MonteCarlo, em um arquivo de texto que, compactado, foi adicionado como recurso ao *software*. Então foram construídas interfaces em uma janela secundária para, a partir de opções selecionadas pelo usuário, o *software* mostrar resultados gráficos e numéricos.

A Figura 7 mostra, na coluna à esquerda, gráficos monolog nas abscissas dos **coeficientes de conversão** (CC) Dose Absorvida/INAK em função da **Energia do Fóton** para os olhos, os testículos, a pele e a tireoide do fantoma MASH. Também mostra, na coluna de gráficos à direita, a evolução em gráfico dilog do **coeficiente de variância** (CV), a função usada pelo GDN para avaliar incertezas estatísticas nos seus MCEs (VIEIRA, 2004). Estes são órgãos (ou tecidos) radiosensíveis que estão praticamente em contato direto com a radiação incidente, na superfície do fantoma. Por isso os CVs são baixos (< 2%) e não variam significativamente com a energia, com exceção do ponto com energia de 10 keV para a tireoide, que, além de ser um órgão relativamente pequeno (20 g), está a uma profundidade de pelo menos 12 mm no MASH. Apenas a pele tem CC diferente de 0 para 10 keV, o que significa que, praticamente, todos os fótons que atingiram o fantoma com esta energia não penetraram além deste tecido. Em geral, as curvas em ambos os MCEs, concordam muito bem. Para tireoide e olhos, por serem órgãos pequenos, ocorrem algumas flutuações para valores altos de energia. O aumento do número de fótons simulados resolveria este problema.

A Figura 8 mostra os gráficos dos CCs Dose Absorvida/INAK e dos respectivos CVs em função da Energia do Fóton para órgãos internos do fantoma: pulmões, fígado, esôfago e próstata. Os gráficos dos CVs mostram que fótons com energia de 10 keV (CVs > 10%) não penetram significativamente além da pele. Os formatos das curvas dos dois MCEs concordam muito bem e pode-se ver neles uma tendência importante: Apenas as curvas dos CCs do MCE MSTA_EXP para órgãos ou tecidos que recebem mais intensidade de energia da região circular de raio r_c sob o fantoma (cujo algoritmo é o mesmo nos dois MCEs. Exemplos: testículos (Figura 7, linha 2) e próstata (Figura 8, linha 3)) se sobrepõem levemente às respectivas curvas dos CCs do MCE MSTA_FR. Isto significa que os CCs obtidos com o MSTA_EXP estavam subestimados. A Figura 5, que mostra o perfil da FDP exponencial em relação à FDP do problema, confirma esta tendência: A curva da FDP exponencial fica abaixo da FDP do problema a partir de $r = 1500$ cm, deixando uma significativa fração da região entre este valor e $r = 5000$ cm sem possibilidade de emitir fótons.

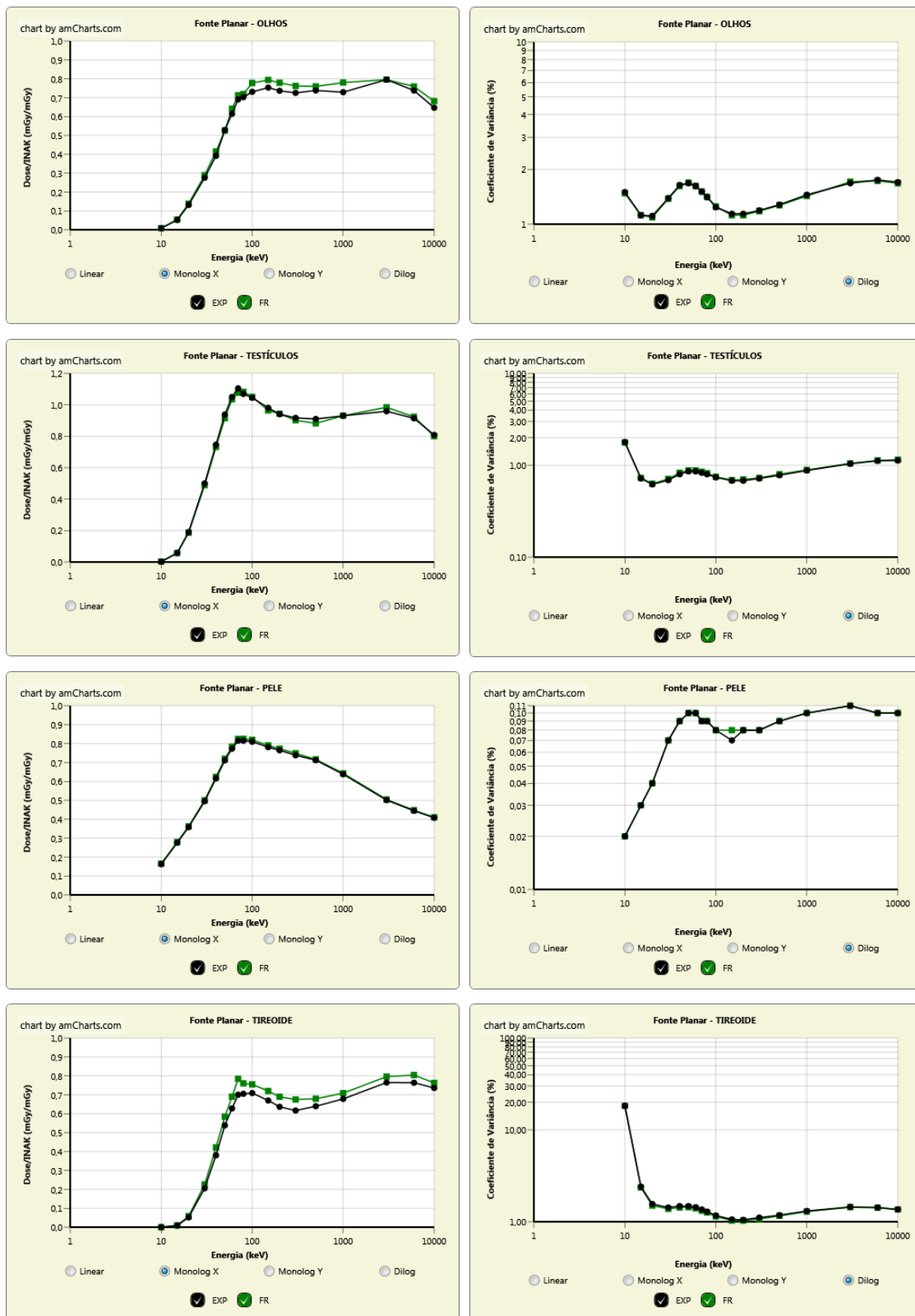


Figura 7: Primeira coluna: CC Dose Absorvida/INAK x Energia do Fóton para órgãos ou tecidos radiosensíveis na (ou próximos à) superfície do MASH. Segunda coluna: CV x Energia do Fóton.

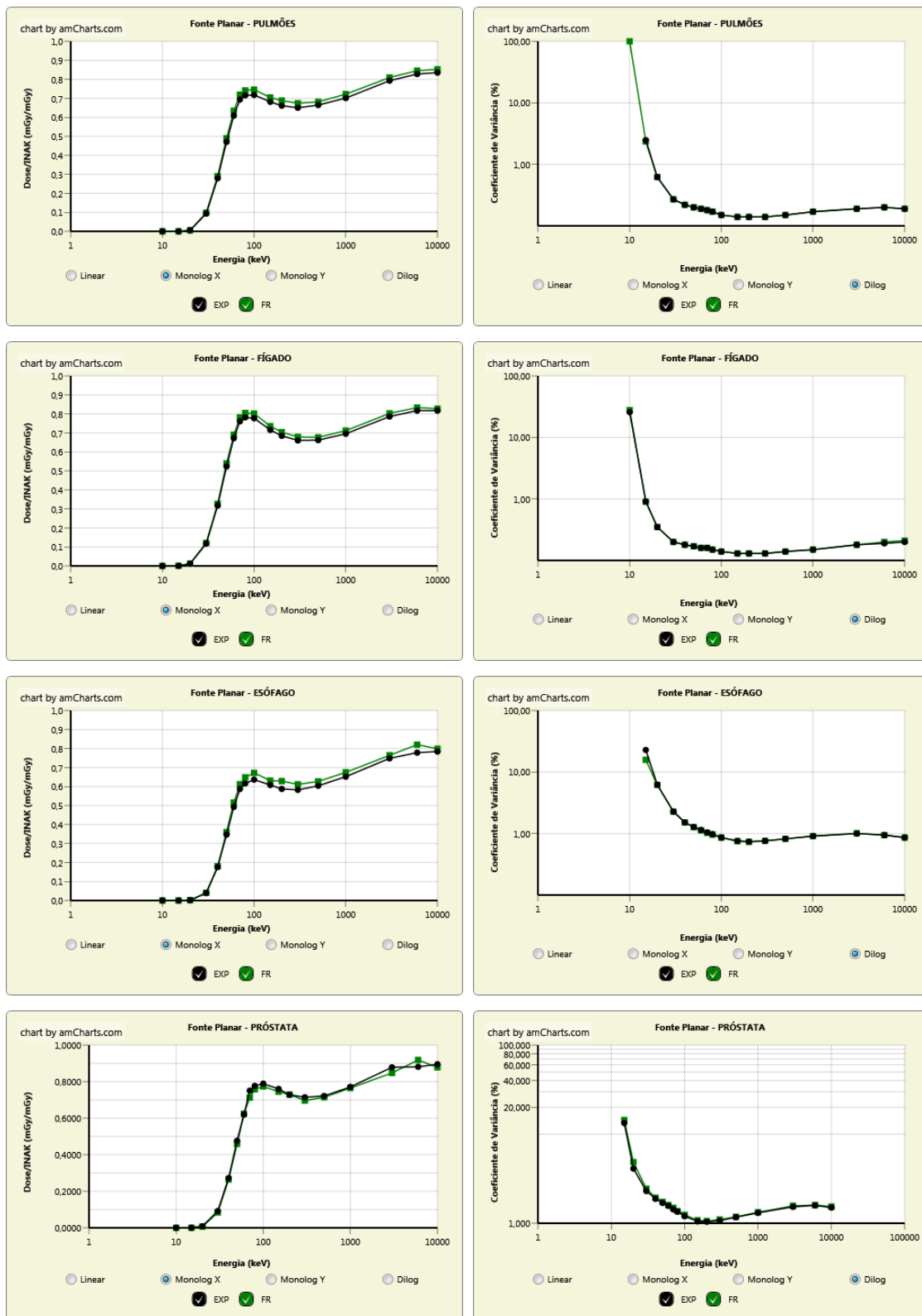


Figura 8: Primeira coluna: CC Dose Absorvida/INAK x Energia do Fóton para órgãos radiosensíveis no interior do MASH. Segunda coluna: CV x Energia do Fóton.

A Tabela 3 e a Figura 9 mostram resultados para a dose efetiva masculina. A última coluna da Tabela 3 mostra o erro relativo (ER) entre os valores dos CCs obtidos com o MSTA_EXP (CC_{exp}) e os obtidos com o MSTA_FR (CC_{fr}), definido como:

$$ER = \frac{|CC_{ex} - CC_{fr}|}{CC_{ex}} \times 100. \quad (23)$$

A última célula da última coluna da Tabela 3 contém o erro relativo médio para os MCEs e as energias utilizados. Este valor e o gráfico da Dose Efetiva/INAK x Energia do Fóton mostrado na primeira coluna da Figura 8 confirmam que os CCs obtidos com o algoritmo da FDP exponencial de fato estavam subestimados, principalmente para valores altos de energia.

Tabela 3: CCs Dose Efetiva/INAK para o MASH.

Energia (keV)	MSTA_EXP		MSTA_FR		
	E/INAK (mSv/mGy)	CV (%)	E/INAK (mSv/mGy)	CV (%)	ER (%)
10	2,40E-03	0,74	2,47E-03	1,00	2,86106
15	1,69E-02	0,84	1,71E-02	0,78	1,18596
20	4,84E-02	0,52	4,86E-02	0,54	0,24154
30	1,63E-01	0,20	1,66E-01	0,20	1,54374
40	3,38E-01	0,16	3,45E-01	0,16	2,14649
50	5,16E-01	0,15	5,28E-01	0,15	2,47503
60	6,47E-01	0,14	6,65E-01	0,14	2,69159
70	7,32E-01	0,13	7,53E-01	0,13	2,83985
80	7,59E-01	0,12	7,78E-01	0,12	2,50738
100	7,68E-01	0,11	7,91E-01	0,11	2,92287
150	7,31E-01	0,10	7,47E-01	0,10	2,17061
200	7,08E-01	0,10	7,30E-01	0,10	3,13723
300	6,90E-01	0,10	7,07E-01	0,10	2,49272
500	7,00E-01	0,11	7,10E-01	0,11	1,44323
1000	7,33E-01	0,12	7,48E-01	0,12	2,03325
3000	8,14E-01	0,13	8,31E-01	0,13	2,09250
6000	8,22E-01	0,13	8,35E-01	0,13	1,62148
10000	7,90E-01	0,13	8,05E-01	0,13	1,88906
			<i>ER Médio</i>		2,13

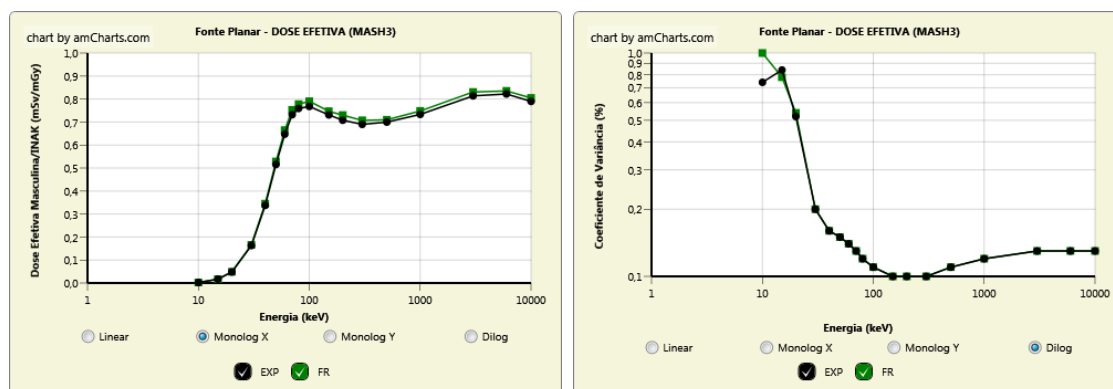


Figura 9: Primeira coluna: CCs Dose Efetiva/INAK x Energia do Fóton para o MASH. Segunda coluna: CV x Energia do Fóton.

4. Conclusões e perspectivas

Os gráficos das Figuras 7, 8 e 9, bem como os valores numéricos de CCs, CVs e erros relativos da Tabela 3, ilustram os resultados obtidos nas execuções dos MCEs MSTA_EXP e MSTA_FR, organizados e apresentados através do *software* MonteCarlo. Estes resultados mostraram que os valores dos CCs Dose Absorvida/INAK e também Dose Efetiva/INAK são maiores quando estimados com o MCE MSTA_FR, principalmente para fótons de altas energias oriundos da região fora do círculo base do cilindro de raio r_c que envolve o fantoma (Figura 3). O uso do GNA FR resultou em estimativas mais precisas da dose absorvida pelos órgãos e tecidos radiosensíveis do fantoma.

O GNA FR, apresentado na equação (21), já está sendo usado em diversos trabalhos de mestrado e doutorado no DEN/UFPE como simulador de uma fonte planar em substituição aos GNAs até então utilizados. Por ser de implementação independente de uma FDP adicional, o método pode ser caracterizado como MC não paramétrico. Seu algoritmo é geral, podendo ser adaptado para outros tipos de simulações MC.

Referências

- CASSOLA, V. F. **Desenvolvimento de Fantomas Humanos Computacionais Usando Malhas Poligonais em Função da Postura, Massa e Altura**, Tese Doutorado em Tecnologias Energéticas Nucleares, DEN-UFPE, Recife-PE, Brasil, 2011.
- KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A. **Monte Carlo Methods**, John Wiley & Sons, Inc, 1986.
- KAWRAKOW, I.; MAINEGRA-HING, E.; ROGERS, D. W. O. TESSIER, F., WALTERS, B. R. B., **The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport**, NRCC Report PIRS-701, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2011.
- KRAMER, R.; VIEIRA, J. W.; KHOURY, H. J.; LIMA, F. R. A.; FUELLE, D. All About Max: A Male Adult Voxel Phantom for Monte Carlo Calculations in the Area of Radiation Protection Dosimetry, *Phys. Med. Biol.*, 48, 1239-1262, 2003.
- LEAL NETO, V.; VEIRA, J. W.; STOSIC B.; LIMA, F. R. A. **Desenvolvimento Computacional de uma Fonte Radioativa Isotrópica no Solo Utilizando Técnicas Monte Carlo de Amostragem por Rejeição**, Primeiro Congresso Americano do IRPA 2006, XXIV Reunião Anual da SMSR e XVII Congresso Anual da SNM, Acapulco, México, de 3 a 8 de setembro, 2006.
- VIEIRA, J. W. **Construção de um Modelo Computacional de Exposição para Cálculos Dosimétricos Utilizando o Código Monte Carlo EGS4 e Fantomas de Voxels**, Tese de Doutorado em Tecnologias Energéticas Nucleares, DEN-UFPE, Recife-PE, Brasil, 2004.
- VIEIRA, J. W.; LEAL NETO, V.; LIMA FILHO, J. M.; LIMA, F. R. A. **Transformation of the Normal Distribution for Monte Carlo Modeling of Regions of Adult Trabecular Bones for Use in Computational Models of Exposure**, 13th International Congress of the International Radiation Protection Association, Glasgow, Scotland, 13-18 May, 2012A.
- VIEIRA, J. W.; LEAL NETO, V.; LIMA FILHO, J. M.; LIMA, L. F.; LOPES FILHO, F. J.; ROCHA, E. A.; LIMA, F. R. A. **Estimate of Dose Distribution in Voxel Phantom Irradiated by**

a Planar Source Modeled by Translational Normal Probability Density Functions, 2012 International Symposium on radiation Physics, Rio de Janeiro, Brazil, 7-12 October, 2012B.

VIEIRA, J. W.; LEAL NETO, V.; LIMA FILHO, J. M.; LIMA, L. F.; LIMA, F. R. A. **Modelagem Monte Carlo de Regiões dos Ossos Trabeculares de Adultos para Uso em Modelos Computacionais de Exposição**, Terceiro Congresso de Proteção Contra Radiações dos Países e Comunidades de Língua Portuguesa, 20 a 23 de novembro, 2012C.

VIEIRA, J. W.; LEAL NETO, V.; LIMA FILHO, J. M.; CAVALCANTI, J. R. S.; LIMA, F. R. A. **Desenvolvimento de um Método Monte Carlo Não Paramétrico para Gerar Imagens Sintéticas de Ossos Trabeculares**, IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety, Rio de Janeiro, Brazil, 15-19 April, 2013.

XU, J. **Practical WPF Charts and Graphics**, APRESS, USA, 2009.

Recebido: 10/10/2013

Aprovado: 04/12/2013