



Uso de Métodos Monte Carlo na Modelagem de uma Nuvem Radioativa Natural

G. L. S. Claudino¹; J. W. Vieira^{1,2,3}; V. Leal Neto¹; F. R. A. Lima^{2,3,4}; J. C. L. Soares¹; A. F. Silva¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, IFPE Campus Recife
CEP 50740-540, Av. Prof. Luís Freire, 500, Recife-PE, Brasil

²Escola Politécnica de Pernambuco, EPP-UPE
CEP 50750-470, Rua Benfica, 455, Recife-PE, Brasil

³Departamento de Energia Nuclear, DEN-UFPE
CEP 50740-540, Av. Prof. Luís Freire, 1000, Recife-PE, Brasil

⁴Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste, CRCN-NE/CNEN
CEP 50740-540, Av. Professor Luiz Freire, 200, Recife-PE, Brasil

E-mail: berg2020@hotmail.com

ABSTRACT

The level of natural radiation in some regions of Brazil, and the world, have become high. One of the places that have these high levels are underground mines. At these locations, the radiation may come from the ground, the walls, and the environment in the form of gases. The Group of Numerical Dosimetry (GDN), already developed, and utilizes various of Computational Models Exposure (MCE) to simulate situations where people are exposed to ionizing radiation. In one study, the GDN utilized the MCEs to to simulate the soil contamination by natural elements. This work aims to continue the study of contamination by natural elements, taking into account the energy interval range of gaseous natural elements. For this, the algorithm developed by GDN in 2004, was upgraded to simulate the irradiation of a person in the standing position, where its craniocaudal axis coincides with the axis of a cylinder circumscribing the body, where they emerge, isotropically, photons This update was done in the model MSTA (Mash Standard) To describe this situation we used a MCE composed of the font algorithm described by Vieira the phantom MASH and the MC code EGSnrc The simulation results were organized in formats absorbed dose / air Kerma. These data may be used for other situations where the user that knows the energies, and their abundances, can interpolate the data to obtain new results without the need to conduct new simulations.

Keywords: Natural Radiation, Cloud Radioactive, Exposure Computational Models.

1. INTRODUÇÃO

Um dos meios de exposição que a população está exposta diariamente é a radiação natural. Essas irradiações, em sua maioria, são em níveis que não causam, se exposto de forma moderada, danos graves a saúde da população. Porém, em alguns locais, como minas subterrâneas, existem altos níveis de radiação natural, devido à alta concentração de elementos radiativos como Urânio, Radio, Tório, Potássio, Radônio e o Torônio. Uma atenção especial deve ser dada aos elementos gasosos Radônio-222 e ao Torônio-220, que são emissores alfa e gama e que segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), são responsáveis pela segunda causa dos casos de câncer de pulmão no mundo (ANTONIAZZI, 2013).

Para estimar a distribuição de dose absorvida 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 Grupo de Dosimetria Numérica (GDN), já desenvolveu, e utiliza diversos Modelos Computacionais de Exposição (MCE) para simular situações onde pessoas são expostas a radiação ionizante. Os MCEs utilizam um algoritmo para fonte, um fantoma de voxel e o código Monte Carlo (MC) para simular o transporte da radiação, interação com os átomos do meio e avaliação da energia depositada em uma região de interesse.

O GDN 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 (*Electron Gamma Shower*), principalmente o EGSnrc (KAWRAKOW et al., 2013) para simular o transporte de fótons e elétrons através dos materiais constituintes do fantoma, as interações destes com os átomos do meio e a avaliação da energia depositada em regiões de interesse. O grupo também tem desenvolvido algoritmos simuladores de fontes radioativas emissoras de fótons como os apresentados em Vieira (2004).

Em 2004, Vieira desenvolveu um algoritmo de uma nuvem radioativa para simular a radiação gama natural advinda de uma região 2π a cima do solo, onde os fótons podem emergir de qualquer ponto da área e em qualquer direção e pode atingir uma pessoa em posição ortostática. O mesmo utilizou o código EGS, o fantoma MAX e código da fonte 2π nas simulações da nuvem radioativa.

Neste trabalho, é apresentado um estudo complementar sobre a exposição a fontes de radiação natural gasosas na forma de uma nuvem radioativa. O estudo consistiu em investigar a exposição por uma nuvem radioativa, para o principal intervalo de energias emitidas por elementos naturais, utilizando o MSTA, que é composto pelo código MC EGSnrc, o fantoma MASH e o algoritmo da fonte 2π , a partir das grandezas de saída das simulações MC: o tempo computacional e os valores estimados para o coeficiente de conversão $E/INAK$, onde E é a dose efetiva e $INAK$ (*INcident Air Kerma*) é a grandeza de normalização $KERMA$ (*Kinetic Energy Released per unit MAss*) incidente no ar. Para fins da proteção radiológica, os valores anuais de E não devem ultrapassar limites estabelecidos por entidades regulamentadoras como a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) e a ICRP (*International Commission on Radiological Protection*, Comissão Internacional de Proteção Radiológica). Assim, obtendo os coeficientes $E/INAK$ e medindo $INAK$ em um tempo t , nas mesmas condições simuladas, pode-se avaliar a taxa de dose efetiva no fantoma causada pela fonte planar. Esta taxa pode ser extrapolada para um ano e comparada com limites estabelecidos. A melhoria dos algoritmos nos MCEs utilizados reflete em avaliações dosimétricas mais exatas, fundamentais para a proteção radiológica de trabalhadores e pessoas do público.

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 @

International Joint Conference RADIO 2014

Gramado, RS, Brazil, August 26-29, 2014

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - SBPR

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, Geany e o Excel 2007. O fantoma MASH foi obtido em <http://www.caldose.org/>, bem como os arquivos originais que compõem o MCE MSTA.

2.1. Fontes Isotrópicas

Uma fonte radioativa completamente isotrópica pode ser imaginada como uma superfície esférica com centro no centro do paralelepípedo e raio maior do que a diagonal deste, de onde emergiriam partículas de qualquer ponto com qualquer direção de vôo. Para simular tal fonte seria preciso apenas a posição inicial da partícula (X_s, Y_s, Z_s) e a sua direção de vôo ($\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$), escrever as equações paramétricas como em (11) e selecionar apenas as partículas que atingissem o paralelepípedo. Evidentemente a sub-rotina seria muito simples, mas o custo computacional seria muito grande. Para desenvolver sub-rotinas mais factíveis, do ponto de vista da operacionalização, é preciso saber para que se destinam. Nesta seção são descritas fontes isotrópicas desenvolvidas para simular nuvens radioativas em torno do paralelepípedo, considerando o espaço completo ou apenas o semi-espaço superior.

2.2 Nuvem Radioativa No Espaço Completo

A geometria imaginada para esta fonte é um cilindro cujo eixo e o centro coincidem com o eixo e o centro do paralelepípedo, e tem raio e altura iguais a

$$\begin{cases} R_{Cl} = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} + \Delta R \\ H_{Cl} = Z_{MAX} + DH \times ZL \end{cases}, \quad (1)$$

onde $\Delta R = 2 \text{ cm}$ no modelo MAX/EGS4 e DH é a quantidade de voxels a mais ao longo da altura do cilindro.

Uma partícula pode emergir de três regiões da área do cilindro: da base superior, com probabilidade, $PROB_{BSC}$; da base inferior, com $PROB_{BIC}$; ou da superfície cilíndrica, com $PROB_{SC}$. Os valores destas probabilidades são:

$$\left\{ \begin{array}{l} PROB_{BSC} = \frac{A_{BSC}}{A_{total}} = \frac{\pi R_{CI}^2}{2\pi R_{CI}^2 + 2\pi R_{CI} H_{CI}} = \frac{R_{CI}}{2(R_{CI} + H_{CI})} \\ PROB_{BIC} = PROB_{BSC} \\ PROB_{SC} = 1 - 2 \times PROB_{BSC} \end{array} \right. \quad (2)$$

As coordenadas cilíndricas iniciais da partícula são (R_{TEMP}, θ, z_E) . Usando um número aleatório, $randTeta$, pode-se calcular θ :

$$\theta = 2\pi \times randTeta. \quad (3)$$

O sorteio de outro número aleatório, $randP$, decide de qual região do cilindro a partícula emerge. Se $randP \leq PROB_{BSC}$, sorteia-se mais um número aleatório, $randRZ$, e tem-se, usando $DHH = 0,5 \times DH$:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_E = -DHH \times ZL \\ R_{TEMP} = R_{CI} \times randRZ \end{array} \right. \quad (4)$$

Se $PROB_{BSC} < randP \leq 2 \times PROB_{BSC}$, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_E = ZMAX + DHH \times ZL \\ R_{TEMP} = R_{CI} \times randRZ \end{array} \right. \quad (5)$$

E se $randP > 2 \times PROB_{BSC}$, sorteia-se um número aleatório, $randZ$, e tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_E = (ZMAX + DH) \times randRZ - DHH \times ZL \\ R_{TEMP} = R_{CI} \end{array} \right. \quad (6)$$

As outras duas coordenadas cartesianas iniciais da partícula são:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_E = x_C + R_{TEMP} \cos \theta \\ y_E = y_C + R_{TEMP} \sin \theta \end{array} \right. \quad (7)$$

Para obter uma direção de vôo isotrópica, a partir do ponto $P_E(x_E, y_E, z_E)$, são necessários apenas dois números aleatórios, $randCD1$ e $randCD2$, já que os cossenos diretores não são independentes. A relação entre eles é

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \quad (8)$$

Fazendo

$$\begin{cases} \varphi = 2\pi \times randCD2 \\ A = \sqrt{1 - \cos^2 \beta} = \sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \gamma} \end{cases}, \quad (9)$$

tem-se:

$$\begin{cases} \cos \alpha = A \sin \varphi \\ \cos \beta = A \cos \varphi \\ \cos \gamma = 2 \times randCD1 - 1 \end{cases}. \quad (10)$$

Usando as equações paramétricas (11):

$$\begin{cases} x_E \leftarrow x_E + X_L \cos \alpha \\ y_E \leftarrow y_E + X_L \cos \beta \\ z_E \leftarrow z_E + X_L \cos \gamma \end{cases} \quad (11)$$

em um laço que funciona enquanto o ponto P_E sobre a reta diretora estiver fora do paralelepípedo, são obtidas as coordenadas do ponto de entrada.

Para cálculo dos CCs entre dose absorvida nos órgãos e tecidos e kerma no ar, é preciso contar as partículas que atravessariam uma esfera de raio $R = 10 \text{ cm}$ e centro em $z = ZMAX - 100$, isto é, a 100 cm do solo, com posição inicial (x_E, y_E, z_E) .

2.3 Distância Entre um Ponto e uma Reta no Espaço

A Figura 1 mostra a geometria necessária para calcular a distância mínima, d_{min} , entre o ponto I da reta r e o ponto C . São dados o ponto $P_0 = (x_0, y_0, z_0) = (x_E, y_E, z_E)$, o vetor unitário diretor, $\mathbf{v} = a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k} = \cos\alpha\mathbf{i} + \cos\beta\mathbf{j} + \cos\gamma\mathbf{k}$, o ponto central da seção transversal do paralelepípedo, $C = (x_C, y_C, z = ZMAX - 100)$, e o raio da esfera, $R = 10\text{ cm}$.

De acordo com a Figura 29,

$$d_{min} = \overline{CI} = \sqrt{(x_C - x_I)^2 + (y_C - y_I)^2 + (z_C - z_I)^2}. \quad (12)$$

As equações paramétricas da reta r são,

$$r : \begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt, \\ z = z_0 + ct \end{cases} \quad (13)$$

onde (x, y, z) são as coordenadas de um ponto qualquer P sobre a reta r .

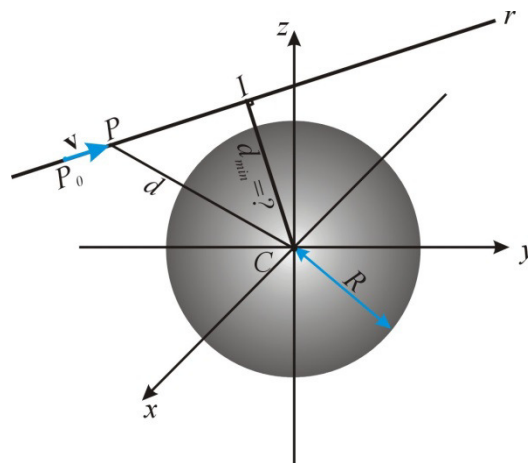


Figura 1: Arranjo para cálculo da distância entre a reta r e o centro da esfera (C) de raio

Da Figura 1: $d^2 = (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 \Rightarrow$

$$d^2 = [(x_0 - x_C) + at]^2 + [(y_0 - y_C) + bt]^2 + [(z_0 - z_C) + ct]^2.$$

A distância entre I e C é mínima quando $\frac{d(d^2)}{dt} = 0$:

$$(a^2 + b^2 + c^2)t = -[(x_0 - x_C)a + (y_0 - y_C)b + (z_0 - z_C)c] \therefore$$

Como $a^2 + b^2 + c^2 = \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$:

$$t = (x_C - x_0)\cos\alpha + (y_C - y_0)\cos\beta + (z_C - z_0)\cos\gamma.$$

Assim, as coordenadas do ponto I são:

$$\begin{cases} (x_I, y_I, z_I) = (x_0 + \cos\alpha t, y_0 + \cos\beta t, z_0 + \cos\gamma t) \\ R_I = \sqrt{x_I^2 + y_I^2 + z_I^2} \\ t = (x_C - x_0)\cos\alpha + (y_C - y_0)\cos\beta + (z_C - z_0)\cos\gamma \end{cases} \quad (14)$$

Para cálculo da fluência são computados os fótons tais que $R_I \leq R$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi utilizado o MSTA, composto pelo EGSnrc, o fantoma MASH e o algoritmo da fonte para realizar simulações para estabelecer o melhor número de eventos (N)[4], para as simulações com as energias. O N variou de 1E5 a 6E8, com energia fixa em 100 KeV e raio em 2000 cm. Para análise dos resultados foi levado em consideração as variáveis: tempo computacional, coeficiente de variância, fator de qualidade (produto do tempo computacional pelo coeficiente de variância) e Dose/Kerma. Foram verificados os resultados para os órgãos: Pele, Pulmão e Tireoide, além da Dose efetiva. Os resultados são apresentados nas Figuras a seguir:

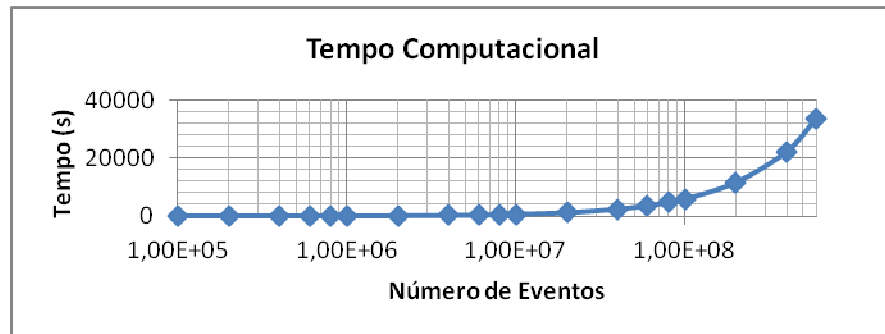


Figura 2: Tempo Computacional

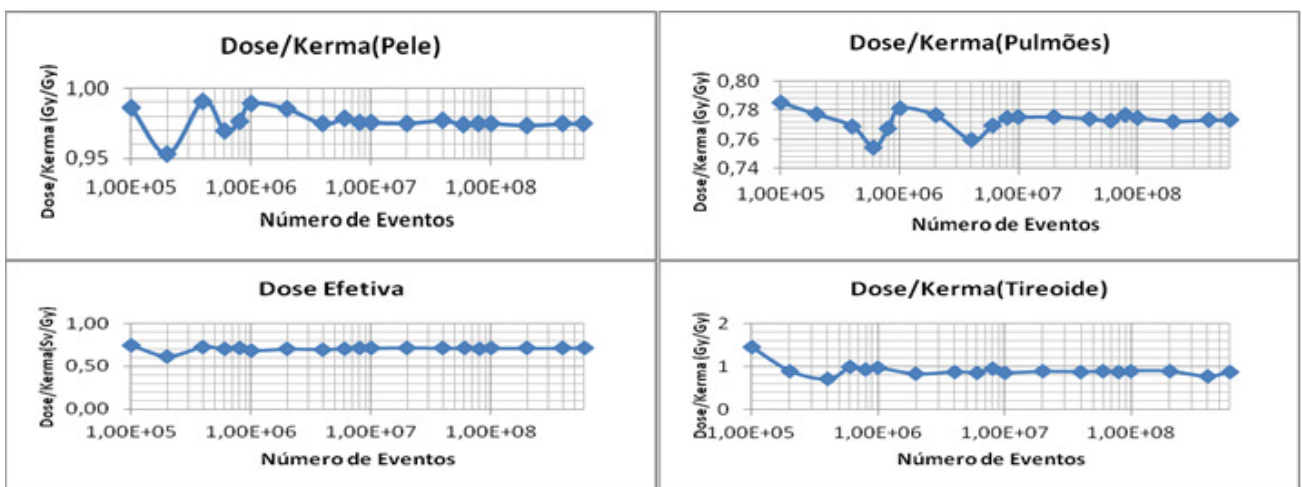


Figura 3: Dose/Kerma(Gy/Gy) nos órgãos e Dose Efetiva (Sy/Gy)

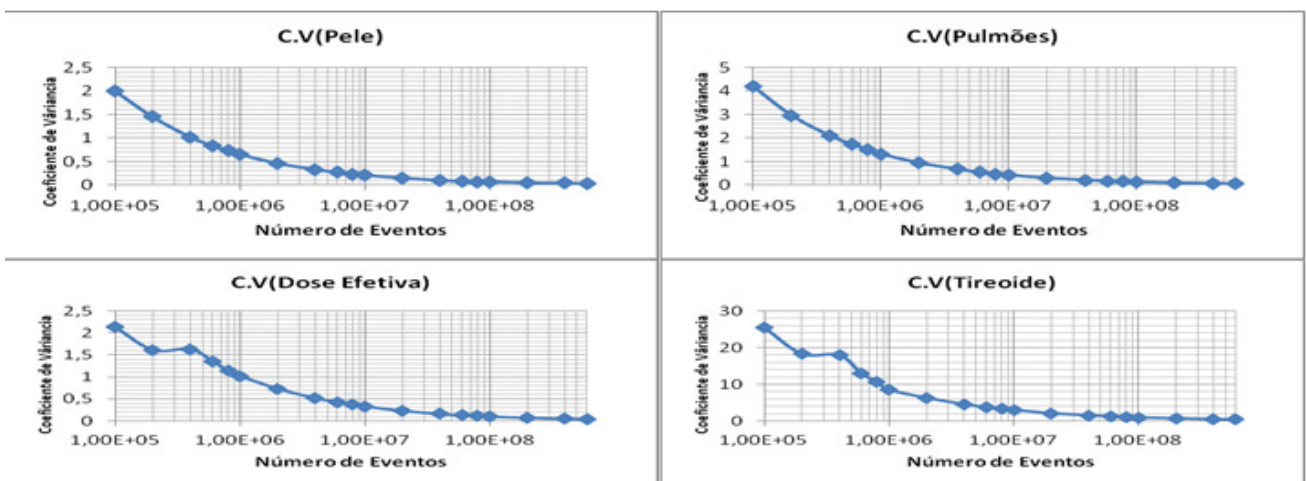


Figura 4: Coeficiente de Variância dos órgãos e Dose Efetiva

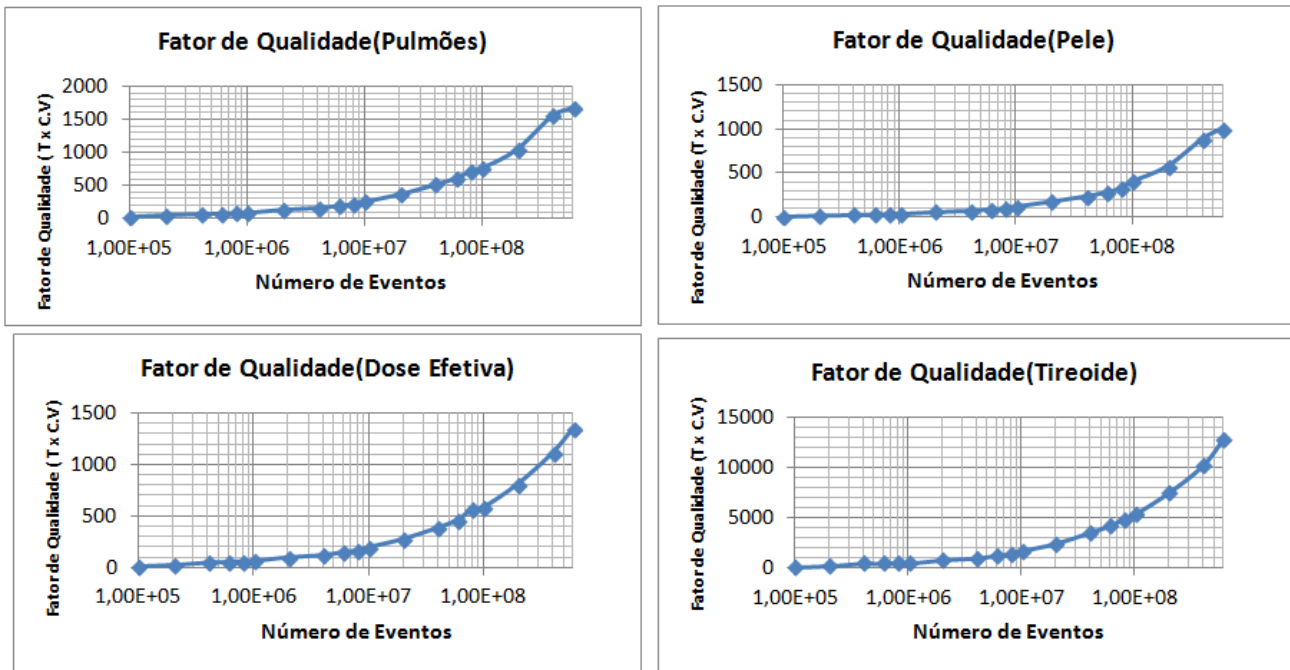


Figura 5: Fator de Qualidade dos órgãos e Dose Efetiva

Foram utilizados como referência a pele, pois é o maior órgão do corpo e o mais exposto aos fótons; os pulmões por suas dimensões e por a fonte se tratar de uma nuvem radioativa; tireoide pelas suas dimensões, localização e por sua radiosensibilidade. A partir dos resultados das simulações de N, apresentados na figura 2, 3, 4, 5, verifica-se que a partir do valor de $N = 1E7$, o tempo computacional aumenta significativamente; as Dose/Kerma estão praticamente estáveis; os coeficientes de variância estão com valores aceitáveis (abaixo de 5%); e os fatores de qualidade aumentam significativamente devido ao aumento do tempo computacional. A partir dos resultados foi estabelecido $1E7$ eventos para realizar as simulações com o intervalo de energia.

Nas simulações das energias foi utilizado o MSTA, também composto pelo código EGSnrc, o fantoma MASH e algoritmo da fonte. Nessas simulações foi fixado o N em $1E7$, raio em 2000 cm e energias variando de 10 KeV a 10 MeV. Os Resultados são apresentados a seguir:

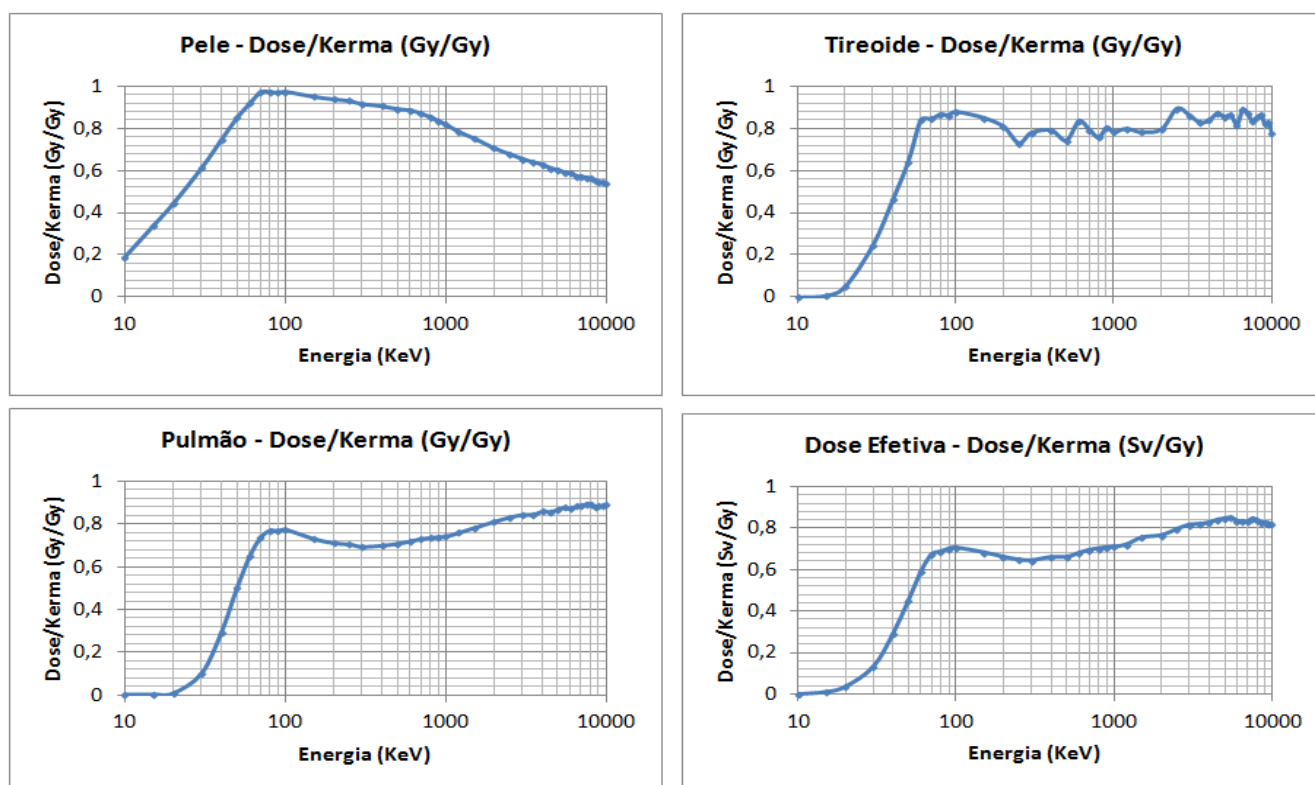


Figura 6: Resultados das simulações para intervalo de Energia para alguns órgãos e Dose Efetiva

4. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações mostram de maneira eficaz como otimizar as simulações para fontes em forma de nuvem radioativa, e outras situações similares, usando o algoritmo, teórico, descrito por Vieira (2004). O grupo não conhece na literatura outros algoritmos que descrevam a mesma fonte, ou similares, para realizar comparações.

Como parte dos primeiros trabalhos grupo sobre o tema, este trabalho procurou otimizar algumas variáveis que afetam a precisão do problema como a variável radial e o número de história (N). Em síntese, trata-se de um trabalho de otimização de um algoritmo teórico.

Com o resultado da simulação da nuvem radioativa, é possível outros pesquisadores, que conheçam valores de concentrações e energias de elementos com distribuição similar, após ponderação das concentrações, obter os valores de dose/kerma sem a necessidade de realizar novas simulações, através da interpolação dos valores.

O GDN usará os resultados das simulações da nuvem radioativa com as simulações de fonte de solo para elementos radioativos naturais (CLAUDINO, 2013), desenvolvidos pelo grupo, para obter resultados mais completos e realísticos da exposição a elementos naturais.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao IFPE, a FACEPE, a UPE, ao CNPq e ao CRCN-NE pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. ANTONIAZZI, B. N.; SILVA, N. C.; CUNHA, T. N.; OTERO, U. B., *Projeto Planalto Poços de Caldas: pesquisa câncer e radiação natural: incidência e comportamento de risco*, Secretaria de Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, ESP-MG, 2013.
2. 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.
3. CLAUDINO, G. L. S.; VIEIRA, J. W.; LEAL NETO, V.; LIMA, F. R. A., **Uso De Métodos Monte Carlo Na Modelagem De Fontes Radioativas Naturais**, Simpósio Latinoamericano sobre Radón e II Seminário de Radón em Brasil, Poços de Caldas - MG, Brasil, de 19 a 23 de Maio, 2014.
4. CLAUDINO, G. L. S.; VIEIRA, J. W.; LEAL NETO, V.; LIMA, F. R. A., **Desenvolvimento de um algoritmo simulador de fonte radioativa planar para avaliações dosimétricas em acidentes envolvendo radiofármacos usados em medicina nuclear**, CIENTEC, **5**, nº 2, 24-31, 2013.
5. IAEA, **Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data**, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1363, Vienna, 2003.
6. JOHNSON, N. L., **Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation**, *Biometrika*, **36**, No. 1/2, 149-176, 1949.
7. KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A., **Monte Carlo Methods**, John Wiley & Sons, Inc, 1986.
8. 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, 2013.
9. KRAMER R.; **Ermittlung von Konversionsfaktoren Zwischen Koerperdosen und Relevanten Strahlungskenngrößen bei Externer Roentgen-und Gamma-Bestrahlung**, Gesellschaft fuer Strahlen-und Umweltforschung, Muenchen-Neuherberg, GSF-Bericht-S-556, 1979.
10. 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.

International Joint Conference RADIO 2014

Gramado, RS, Brazil, August 26-29, 2014

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - SBPR

11. 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.
12. RAMASAMY, V.; SUNDARRAJAN, M.; PARAMASIVAM, K.; MEENAKSHISUNDARAM, V.; SURESH, G., **Assessment of spatial distribution and radiological hazardous nature of radionuclides in high background radiation area, Kerala, India**, ELSEVIER, *Applied Radiation and Isotopes*, **73**, 21-31, 2013.
13. 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.
14. 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, 2012.