

# FRAÇÕES ABSORVIDAS EM ESFERAS DISCRETIZADAS DE VÁRIOS TAMANHOS

Hélio Yoriyaz

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Caixa Postal 11049  
05422-970, São Paulo, Brasil

## RESUMO

Em dosimetria interna a radiação é emitida por fontes internas distribuídas no volume de um órgão ou região do corpo humano. As estimativas de dose são determinadas através da simulação do transporte de radiação usando modelos matemáticos para a deposição de energia na matéria. Existem muitos métodos usados para o cálculo de frações absorvidas para fótons, sendo que, o Método de Monte Carlo é uma das técnicas mais utilizadas. Com recentes avanços na medicina nuclear e imagens médicas, tais como, CT (Computerized Tomography) e SPECT (Single Photon Emission Computerized Tomography), novos desafios tem surgido em dosimetria interna. Imagens obtidas via CT, por exemplo, fornecem informações anatômicas detalhadas dos órgãos, mas de forma discretizada e que podem introduzir erros causados por aproximações geométricas. O presente trabalho apresenta as frações absorvidas em esferas discretizadas de vários tamanhos obtidos pela simulação do transporte de radiação pelo uso do código de Monte Carlo MCNP-4B. Os resultados foram comparados com os dados publicados pelo MIRD (MIRD pamphlet 03 e 08). É demonstrado que, em geral, os erros introduzidos pela discretização na modelagem geométrica são pequenos, mas crescem a medida que aumentam as aproximações geométricas. Comparações com resultados obtidos com esferas normais mostraram discrepâncias de 4 % e 16 % respectivamente para duas esferas com níveis de discretização distintas.

## I. INTRODUÇÃO

Na dosimetria interna, a radiação é emitida por fontes internas distribuídas no volume ou em parte do volume de um determinado órgão ou região do corpo humano. Uma vez que a atividade acumulada é conhecida, pode-se determinar a dose absorvida a partir da determinação das frações absorvidas nos volumes de interesse.

Modelos matemáticos que simulam o transporte de radiação no meio são usados para determinar a deposição de energia na matéria e, portanto, utilizados para o cálculo das frações absorvidas. Um comitê do MIRD (Medical Internal Radiation Dose) [1] tem publicado vários resultados de simulação por Monte Carlo com valores de frações absorvidas para várias configurações geométricas que tradicionalmente representam os órgãos internos do organismo, tais como, esferas, cilindros e elipsóides, cobrindo uma faixa de energia de fonte desde 0.03 MeV até 2.75 MeV para fótons [2,3].

Com o surgimento e avanço de técnicas em imagens médicas, tais como, CT (Computerized Tomography) e o SPECT (Single Photon Emission Computerized Tomography) [4,5], surgiram novos desafios e possibilidades nas estimativas de doses internas de radiação. Dados anatômicos detalhados são obtidos via CT,

e que podem ser utilizados para a construção geométrica de órgãos, enquanto que, dados fornecidos via SPECT, podem ser usados para a obtenção da distribuição espacial de fontes de radiação e de suas atividades. Estes recursos, no entanto, fornecem informações de forma discretizada da anatomia dos órgãos, e que portanto, introduzem aproximações geométricas, que eventualmente podem introduzir erros na estimativa de dose.

Tendo em vista estes aspectos, o presente trabalho tem como objetivo simular o transporte de radiação para cálculo de frações absorvidas em esferas discretizadas de vários tamanhos. Estas esferas discretizadas são construídas através de um programa computacional, GEOM, e representam os modelos geométricos de diversos órgãos do corpo humano que seriam construídos a partir de imagens tomográficas. Neste trabalho foram calculadas as frações absorvidas para esferas normais e discretizadas e comparadas com as apresentadas em literatura por Brownell et al. [2] e Ellet e Humes [3], para esferas normais.

## II. METODOLOGIA

A discretização em pequenos elementos de volume foi realizada com o auxílio de um programa computacional

desenvolvido para este fim chamado GEOM. Com isto, pôde-se verificar as qualidades dos resultados obtidos, a partir de geometrias discretizadas representativas de um volume qualquer.

Os resultados apresentados no presente trabalho foram obtidos para quatro diferentes tamanhos de esferas com densidade de  $1 \text{ g/cm}^3$ , e cuja composição se encontra na Tabela 1. As respectivas massas de cada esfera são: 1, 60, 300 e 500 gramas.

Para as esferas discretizadas foram considerados dois arranjos distintos. A primeira consiste de um arranjo cúbico de  $11 \times 11 \times 11$  elementos de volume, contendo uma esfera composta por 222 elementos de volume. O segundo consiste de um arranjo cúbico de  $24 \times 24 \times 24$  contendo uma esfera composta por 4356 elementos de volume. O volume da esfera é determinada pelo tamanho de cada elemento de volume que a compõe. A Tabela 2 mostra o raio de cada esfera e as correspondentes dimensões dos elementos de volume.

TABELA 1. Composição química das esferas

Elemento	% em massa
Oxigênio	71,39
Carbono	14,89
Hidrogênio	10,00
Nitrogênio	3,47
Cloro	0,10
Sódio	0,15

TABELA 2. Raios das esferas e dimensões dos elementos de volume para dois diferentes arranjos.

Massa (g)	Raio das Esferas Normais (cm)	Arranjo Cúbico ( $11 \times 11 \times 11$ ) Dimensão do elemento de volume (cm)	Arranjo Cúbico ( $24 \times 24 \times 24$ ) Dimensão do elemento de volume (cm)
1	0.62035	0.16515	0.061231
60	2.42859	0.64650	0.239710
300	4.15283	1.105578	0.409990
500	4.923725	1.310808	0.485990

Na presente análise considerou-se que a fonte de radiação esteja distribuída de forma uniforme em todo o volume da esfera, que se encontra num meio espalhador de mesma composição química.

A saída do programa GEOM foi adaptado para servir de dados de entrada para o código de Monte Carlo MCNP-4B [6], que por sua vez, foi utilizado para a simulação do transporte de fótons e deposição de energia. Para tanto, foi utilizado o recurso geométrico denominado *Estruturas Repetidas* do código MCNP-4B, afim de se obter a representação geométrica discretizada das esferas, de

forma adequada para o código. Na figura 1 está mostrado um exemplo de discretização de uma esfera dividida em 9 planos axiais, sendo que, cada plano é composto de um conjunto de elementos de volume cúbicos de mesmo tamanho.

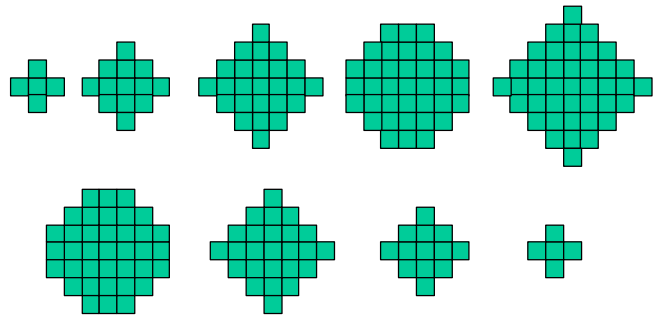


Figura 1. Exemplo de uma esfera discretizada.

### III. RESULTADOS

Nas figuras 2 e 3 estão mostradas as curvas de frações absorvidas, FA, versus energia para os diferentes casos estudados. Para energias abaixo de um determinado valor, há um rápido decréscimo nos valores, o que corresponde a região em que, a mudança na energia de fonte, altera sensivelmente a fuga de partículas. Após este valor de energia, os valores de FA atingem um patamar aproximadamente constante. Este comportamento indica que, para energias mais altas, a maior parte da energia é depositada fora da esfera, sendo que, a fração de energia depositada dentro da esfera é quase que independente do valor da energia da fonte.

Observa-se discrepâncias de até 35 % entre os resultados obtidos neste trabalho comparados com os fornecidos em literatura para esferas normais de até 100g, sendo que, os resultados obtidos no presente cálculo, via código MCNP-4B, são maiores que os fornecidos em literatura em toda a faixa de energia desde 0.03 MeV até 2.75 MeV. A principal razão destas discrepâncias, entretanto, podem ser atribuídas as diferentes metodologias empregadas nos dois casos. Na figura 2 estão mostradas as curvas de fração absorvida com a energia para esferas de 1g e 60g.

No código MCNP-4B, as frações absorvidas são obtidas pelo cálculo de deposição de energia no meio, diretamente da simulação das interações dos fótons com o meio. No método usado na literatura, os valores de FA são obtidos a partir destas mesmas interações, mas para fontes pontuais, e então, integrados em todo o volume da esfera para se obter o valor médio de FA no volume da esfera.

Para esferas acima de 100g também se verifica a mesma tendência para energias de até 700 keV, sendo que, os valores fornecidos em literatura são menores que os obtidos no presente trabalho. Entretanto, para energias maiores que 700 keV há uma inversão nos resultados, e os valores fornecidos em literatura passam a ser maiores que os obtidos com o código MCNP-4B, embora as diferenças nestes casos não ultrapassem 10%. Na figura 3 estão

mostradas as curvas de fração absorvida com a energia para esferas de 300g e 500g.

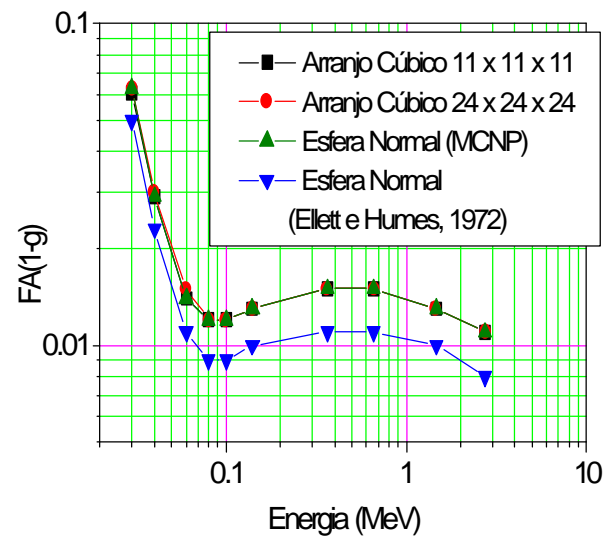
Na faixa de energia até 700 keV, o valor subestimado fornecido em literatura pode ser explicado pelo fato de que, neste caso, não se considerou o retroespalhamento dos fótons. Ou seja, não se considerou a possibilidade dos fótons, que saem da esfera, serem espalhados novamente para dentro da esfera, depositando sua energia. Para energias maiores, este efeito torna-se menos importante diminuindo-se a diferença entre os resultados.

Outros fatores que podem contribuir para as diferenças entre os dois resultados, e que devem ser considerados na presente análise são as incertezas nos dados nucleares em ambas as metodologias, tanto naquelas utilizadas em literatura como naquelas utilizadas pelo código MCNP-4B.

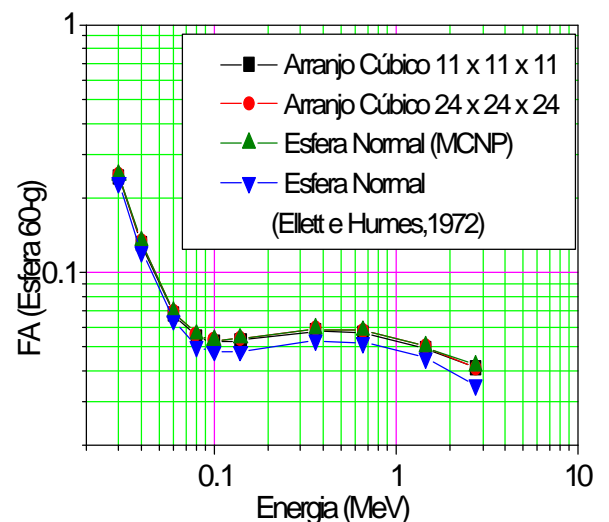
Os resultados obtidos no presente trabalho também foram comparados com os resultados obtidos pelo código EGS4 [7,8], amplamente utilizado na literatura em cálculos de dosimetria de fótons e elétrons. Em geral, verifica-se que os valores obtidos entre os dois códigos concordam dentro de uma discrepância menor que 10%, entretanto, estas diferenças chegam a 15% numa faixa específica de energia entre 0.06 MeV e 0.16 MeV. Uma vez que a metodologia para a simulação do transporte de fótons não difere significativamente entre um código e o outro e que justifique esta discrepância, verifica-se que a provável causa destas diferenças tenha origem na diferença entre as bases de dados nucleares utilizadas em cada código.

A outra finalidade dos cálculos e comparações realizadas nestas esferas foi de verificar a adequação da discretização geométrica e do recurso de estruturas repetidas no cálculo de dose através do código MCNP-4B.

As comparações dos resultados de fração absorvida para esferas discretizadas no arranjo cúbico de 24x24x24, em relação as esferas normais, mostram ótima concordância em toda a faixa de energia e para todos os tamanhos de esferas, como pode ser observada através das Figuras 2 e 3. A máxima discrepância encontrada nestes casos foi de 4 %. Por outro lado, para esferas discretizadas no arranjo cúbico de 11x11x11, os resultados demonstraram discrepâncias de até 16 %. Isto demonstra que a representação geométrica, em forma de elementos de volume, de forma refinada, é adequada para o cálculo de doses absorvidas, sem acarretar grandes deteriorações nos resultados, mas representações mais grosseiras podem introduzir erros razoáveis. Desta forma, geometrias irregulares discretizadas, como as obtidas através de imagens tomográficas, poderão ser adequadamente representadas por elementos de volume, através do recurso de *estruturas repetidas*, sem que isso acarrete no comprometimento da qualidade dos resultados.



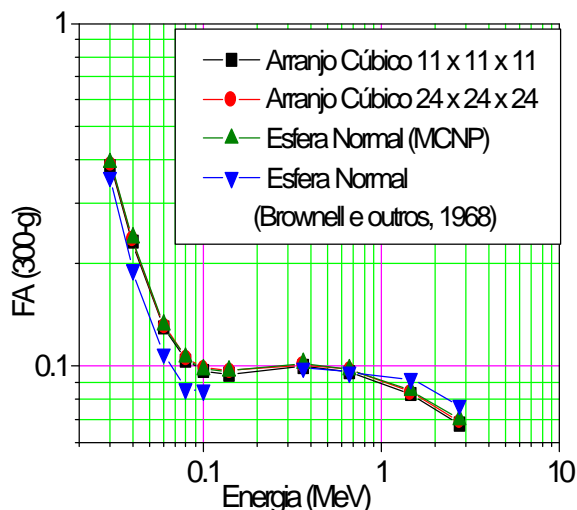
(a)



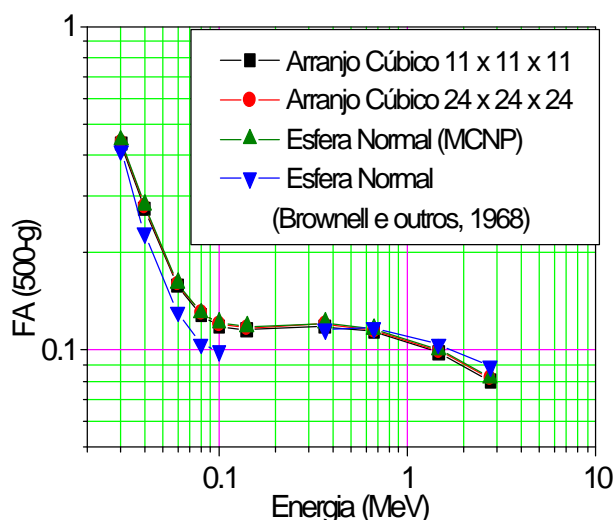
(b)

Figura 2. Curva de fração absorvida com a energia para esferas de 1g (a) e 60g (b). Comparação entre dados fornecidos em literatura e os obtidos com o código MCNP-4B para os vários casos analisados.

Outro aspecto relevante deste recurso geométrico é a possibilidade de se obter não apenas doses médias no volume alvo, mas também a distribuição espacial de dose dentro do volume de interesse, possibilitando uma análise dosimétrica bem mais detalhada, e que por isso, torna-se de grande importância na elaboração de um plano de tratamento em certas modalidades de tratamento de câncer por radiação, principalmente em casos onde se utiliza fontes internas de radiação como na radioimunoterapia.



(a)



(b)

Figura 3. Curva de fração absorvida com a energia para esferas de 300g (a) e 500g (b). Comparação entre dados fornecidos em literatura e os obtidos com o código MCNP-4B para os vários casos analisados.

#### IV. CONCLUSÕES

Valores de frações absorvidas em esferas discretizadas foram comparados com os obtidos em simulação com esferas normais e com os fornecidos em literatura. As discrepâncias máximas encontradas são da ordem de 16 % para esferas discretizadas com formas geométricas mais aproximadas e em torno de 4 % para esferas com geometria mais refinada.

Os resultados das comparações indicam, em geral, que para a faixa de volume de esfera considerada neste trabalho, os erros introduzidos pela discretização da forma geométrica não afetam significativamente na obtenção de frações absorvidas, mas que para representações muito grosseiras da geometria real, podem acarretar diferenças razoáveis.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço ao ORISE (Oak Ridge Institute for Science and Education) e ao IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) pelo apoio técnico, científico e recursos computacionais recebidos durante a execução deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- [1] LOEVINGER, R., BUDINGER, T., WATSON, E., **MIRD Primer for Absorbed Dose Calculations**, Society of Nuclear Medicine, 1988.
- [2] BROWNELL, G.L., ELLET, W..H., e REDDY, A. L., **Absorbed Fractions for Photon Dosimetry**, Society of Nuclear Medicine, MIRD Pamphlet Nr. 3, 1968.
- [3] ELLET, W..H., e HUMES, R. M., **Absorbed Fractions for Small Volumes Containing Photon-Emitting Radioactivity**, Society of Nuclear Medicine, MIRD Pamphlet Nr. 8, 1972.
- [4] SORENSON, J. A.; PHELPS, M. E., **Physics in Nuclear Medicine**, 2<sup>nd</sup> ed., Philadelphia, Saunders, 1987.
- [5] AKABANI, G. e outros, **Patient-Specific Dosimetry Using Quantitative SPECT Imaging and Three-Dimensional Discrete Fourier Transform Convolution**, Journal of Nuclear Medicine, 38:308-314, 1997.
- [6] BRIEMEISTER J. F., **MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transporte Code (Version 4B)**, Los Alamos National Laboratory. (LA-12625-M), 1997.
- [7] NELSON, W. R. e outros, **The EGS-4 Code System**, Stanford Linear Accelerator Publication 265, 1985.
- [8] STABIN, M. G. e KONIJNENBERG M. W., **Re-evaluation of absorbed fractions for photons and electrons in spheres of various sizes** Journal of Nuclear Medicine, 41:149-160, 2000.

#### ABSTRACT

In internal dosimetry, radiation is emitted by internal sources distributed in the volume of an organ or region of the human body. Doses estimates are determined through the simulation of the radiation transport using mathematical models for the energy deposition in matter. Several methods are used to calculate the absorbed fractions for photons and perhaps the Monte Carlo method is the most useful technique. With the recent advances in nuclear medicine and medical images, such as, CT (Computerized Tomography) and SPECT (Single Photon Emission Computerized Tomography) have made possible new challenges in internal dosimetry. Images taken from CT, for instance, give detailed anatomic information for organs but in a discretized form which can introduce errors caused by some geometrical errors. This present work shows the Monte Carlo simulation of radiation transport, using the MCNP-4B code, for the calculation of absorbed fractions in discretized spheres of various sizes. The results are compared with the MIRD publication (MIRD pamphlet 03 and 08). It has been shown that, in general, the errors introduced by the discretization in geometrical modeling have small influences in the results, but increase as the geometric errors increase. Comparisons with results obtained in normal spheres show maximum discrepancies of 4 % and 16 % respectively for two spheres discretization levels studied.