

CÁLCULO DE COEFICIENTES DE FLUÊNCIA DE NÊUTRONS PARA EQUIVALENTE DE DOSE INDIVIDUAL UTILIZANDO O GEANT4

Rosane M. Ribeiro¹, Denison de S. Santos¹, Pedro P. de Queiroz Filho¹, Claudia L. P. Mauricio¹, Livia K. da Silva¹ e Paula R. Pessanha¹

¹ Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD)
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)
Av. Salvador Allende, s/n – Barra da Tijuca
22783-127 Rio de Janeiro, RJ
rosanemribeiro@oi.com.br

ABSTRACT

Fluence to dose equivalent conversion coefficients provide the basis for the calculation of area and personal monitors. Recently, the ICRP has started a revision of these coefficients, including new Monte Carlo codes for benchmarking. So far, little information is available about neutron transport below 10 MeV in tissue-equivalent (TE) material performed with Monte Carlo GEANT4 code. The objective of this work is to calculate neutron fluence to personal dose equivalent conversion coefficients, $H_p(10)/\phi$, with GEANT4 code. The incidence of monoenergetic neutrons was simulated as an expanded and aligned field, with energies ranging between thermal neutrons to 10 MeV on the ICRU slab of dimension 30 x 30 x 15 cm³, composed of 76.2% of oxygen, 10.1% of hydrogen, 11.1% of carbon and 2.6% of nitrogen. For all incident energy, a cylindrical sensitive volume is placed at a depth of 10 mm, in the largest surface of the slab (30 x 30 cm²). Physic process are included for neutrons, photons and charged particles, and calculations are made for neutrons and secondary particles which reach the sensitive volume. Results obtained are thus compared with values published in ICRP 74. Neutron fluence in the sensitive volume was calculated for benchmarking. The Monte Carlo GEANT4 code was found to be appropriate to calculate neutron doses at energies below 10 MeV correctly.

1. INTRODUÇÃO

Na dosimetria de nêutrons deve-se levar em consideração dois efeitos. Primeiro, os nêutrons produzem partículas secundárias carregadas pesadas as quais causam danos ao tecido, dependendo de sua densidade de ionização. Isso deve ser levado em consideração criando-se um fator de qualidade em função da transferência linear de energia (LET), o qual reflete as observações radiobiológicas. Segundo, o espectro de nêutrons e os fótons induzidos no ponto de interesse dependem do tamanho, da forma e da composição do material circundante e esse efeito precisa ser considerado quando define-se uma grandeza operacional pelo uso de fantasmas como, por exemplo, o paralelepípedo de dimensões 30 x 30 x 15 cm³ feito de tecido equivalente da ISO.

Na proteção radiológica, as chamadas grandezas operacionais (equivalente de dose ambiente, equivalente de dose direcional e equivalente de dose individual) permitem estimar as grandezas de proteção do indivíduo, por exemplo, a dose efetiva, sendo utilizadas geralmente para monitoração e controle de exposição externa. Elas podem ser medidas através de monitores individuais ou de área e foram propostas para se aproximar de uma maneira conservativa dos efeitos da radiação nos órgãos do corpo humano, e também considerar condições particulares de irradiação [1]. O equivalente de dose individual, $H_p(10)$, é a dose em tecido equivalente mole abaixo de um ponto específico sobre o corpo, em profundidade apropriada, d [2]. Para radiação fortemente penetrante, como nêutrons, a profundidade de

10 mm é frequentemente usada. Se o dosímetro individual for usado em uma posição representativa da exposição do corpo, e sob a hipótese de uma exposição uniforme do corpo inteiro, $H_p(10)$ fornece um valor que estima a dose efetiva, de forma suficiente precisa para propósitos de proteção radiológica [3].

Com o intuito de simular o tronco humano, quando se está tratando de grandezas operacionais, são utilizados os fantasmas no formato de esfera (esfera da ICRU, com 30 cm de diâmetro [4]) e de paralelepípedo (chamado comumente de *slab*, que possui dimensões de 30 x 30 x 15 cm³).

Já que algumas grandezas não são mensuráveis, ou o são somente indiretamente, os coeficientes de conversão têm um importante papel na calibração de instrumentos. Os coeficientes de conversão relacionam um par de grandezas que dependem do tipo, da energia e da direção da radiação incidente e por isso precisa-se de um grande conjunto de dados para as variadas aplicações. Muitos desses dados só podem ser determinados através de cálculos teóricos e para isso a técnica de Monte Carlo (MC) é utilizada com o objetivo principal de estimar médias de propriedades sobre um determinado conjunto. Os códigos de Monte Carlo (MCNP [5], EGS [6], Penélope [7], GEANT4 [8], etc.) simulam o transporte de radiação na matéria.

Schuhmacher e Siebert calculam coeficientes de fluência de nêutrons para equivalente de dose individual e ambiente, utilizando o MCNP [9,10]. Estes trabalhos tem como ponto central o cálculo dos fatores de qualidade de acordo com as novas recomendações da ICRP e, num segundo momento, baseados nos novos dados de *stopping power* da ICRU. A ICRP, em sua publicação 74 [11], faz uma compilação dos coeficientes de conversão para fótons, nêutrons e elétrons, obtidos por meio de diferentes códigos de MC.

Para demonstrar a possibilidade de uso de um código de Monte Carlo na simulação do transporte de partículas, em uma dada faixa de energias, é necessário validá-lo, seja comparando suas previsões com valores experimentais, seja comparando seus resultados com os de outros códigos de MC já validados e aceitos como adequados. No caso do GEANT4, não há resultados publicados que demonstrem sua aplicabilidade na simulação de nêutrons na faixa de energias de interesse à proteção radiológica. O GEANT4 (GEometry ANd Tracking) [8, 12] é um pacote de software distribuído pelo CERN (Centro Europeu de Pesquisas Nucleares) gratuitamente, que simula as interações da radiação com a matéria. Foi escrito em linguagem C++ e explora técnicas avançadas da engenharia de *software* e tecnologia computacional mais recente. O uso do GEANT4 em uma simulação implica no desenvolvimento de um bloco de programas e subprogramas, onde cada um é responsável por uma parte da simulação. Esses programas e subprogramas se comunicam através de estruturas denominadas classes, pelas quais se define tudo o que é necessário à simulação. Nessas estruturas, também podemos colher os dados produzidos a cada evento rodado, tais como, informações sobre trajetórias, partículas envolvidas, energias depositadas, processos físicos de interação da radiação com a matéria, entre outros. O GEANT4 reúne grande parte do conhecimento mundial de física de interações de partículas subatômicas com a matéria.

O objetivo do trabalho é determinar os coeficientes de conversão de fluência de nêutrons para equivalente de dose individual, $H_p(10)/\phi$, em uma profundidade de 10 mm, para uma faixa de energias que vai de 10^{-9} MeV a 10 MeV usando o código de Monte Carlo GEANT4. A extensão da energia que deve ser coberta envolve diferentes processos físicos de interação dos nêutrons com os materiais envolvidos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Geometria de Simulação

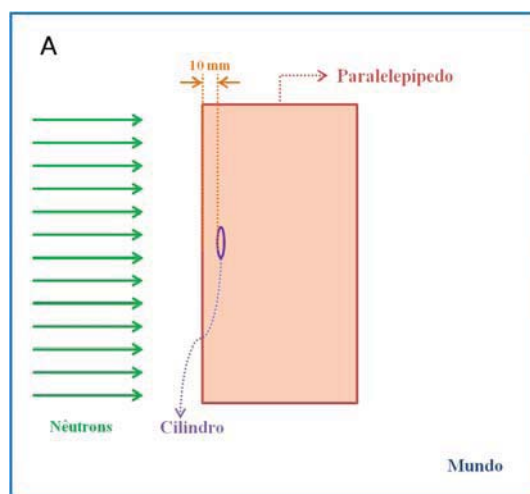
Para os cálculos do $H_p(10)$ foi implementado no GEANT4 (versão 9.6 [8]) um paralelepípedo de tecido equivalente de 15 x 30 x 30 cm³. Sua composição e parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química.

Composição Química	Grandezas Físicas
72,2% O	Temperatura = 300 K
11,1% C	Estado de agregação = sólido
10,1% H	Densidade = 1,0 g/cm ³
2,6% N	

Para fazer a contagem do equivalente de dose individual foi utilizado um volume sensível cilíndrico de 10 mm de diâmetro e 2 mm de altura colocado a 10 mm de profundidade, na face de maior área do paralelepípedo (30 x 30 cm²). Ele foi posicionado com a base circular voltada para o feixe primário de nêutrons. Esse volume é constituído do mesmo tecido equivalente do paralelepípedo no qual ele está inserido. Todo o paralelepípedo foi irradiado com um feixe de nêutrons que o atinge por completo de forma homogênea e paralela, como apresentado na Fig. 1 (A e B).

O volume mundo, de dimensões 1 x 1 x 1 m³, no qual o paralelepípedo foi colocado, estava preenchido por ar com densidade muito baixa (10⁻²⁵ g/cm³), pois não é possível definir, no GEANT4, ar com densidade igual a zero (vácuo).



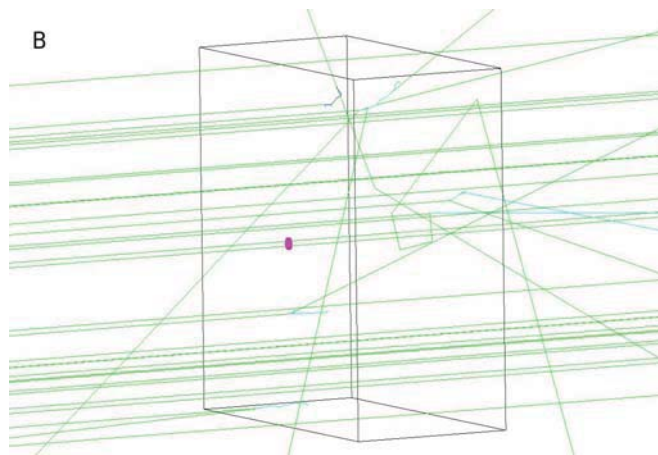


Figura 1. Esquema da geometria para o cálculo de $H_p(10)/\phi$ implementada no GEANT4 (figura A) e simulação da irradiação no GEANT4 (figura B).

Executou-se o programa com 10^7 histórias para nêutrons monoenergéticos, com energias escolhidas aleatoriamente no intervalo de 10^{-9} a 10 MeV. Foram escolhidas 15 energias desse intervalo (ver Tabela 4). Para cada energia foram rodados quatro processos ($n = 4$), mudando somente a semente do gerador de números aleatórios. Uma média desses quatro valores (\bar{x}) foi feita. A incerteza dessa média foi calculada como sendo o desvio padrão (σ) destes 4 valores.

2.2. Processo Físicos

Os processos físicos descrevem como as partículas interagem com um material e são colocados na classe *PhysicsList* do GEANT4. Sete grandes categorias de processos são fornecidas pelo GEANT4, como por exemplo, eletromagnético, hadrônico, óptico, entre outros.

Os processos físicos para nêutrons que foram implementados no código de Monte Carlo GEANT4 foram colocados na Tabela 2. Foi usada a física de nêutrons de alta precisão que o código possui (HP, do inglês *high precision*) e que cobre a faixa de energia até 20 MeV.

Tabela 2. Processos físicos de nêutrons utilizados e seus modelos no GEANT4.

Processos Hadrônicos	Energia	Modelo no GEANT4
Elástico	< 4 eV	G4NeutronHPThermalScattering
	< 20 MeV	G4NeutronHPElastic
Inelástico	< 20 MeV	G4NeutronHPInelastic
Fissão	< 20 MeV	G4NeutronHPFission
Captura	< 20 MeV	G4NeutronHPCapture

Para todos os íons foram utilizados G4hIonisation (ionização), G4hMultipleScattering (espalhamento múltiplo) e G4HadronElasticProcess (espalhamento elástico). Alguns processos especiais para alguns íons são colocados na Tabela 3.

Tabela 3. Processos físicos para íons.

Íon	Processo no GEANT4	Modelo no GEANT4
Alpha	G4AlphaInelasticProcess	G4LEAlphaInelastic
Deuteron	G4DeuteronInelasticProcess	G4LEDeuteronInelastic
Trítio	G4TritonInelasticProcess	G4LETritonInelastic
Próton	G4ProtonInelasticProcess	G4BinaryCascade

Como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3, os processos usam classes do modelo de física que podem ser combinados de acordo com a energia das partículas. Por exemplo, para interações inelásticas de partículas alfas existe o processo G4AlphaInelasticProcess. Neste processo há dois modelos disponíveis: o G4LEAlphaInelastic que atua em uma faixa de 0 a 100 MeV, e o G4BinaryLightIonReaction que atua em uma faixa de energia de 80 MeV a 10 GeV. Nos processos físicos para os íons genéricos foram utilizados o G4hMultipleScattering, para o espalhamento múltiplo, G4ionIonisation, para a ionização, e para espalhamento inelástico, G4HadronInelasticProcess.

Além dos processos físicos, o *PhysicsList* também possui a informação sobre o corte das partículas. Para elétrons e pósitrons o corte estabelecido foi de 1 mm. Já para prótons foi fixado como sendo 0,1 picômetros. Esse corte funciona da seguinte maneira: se a partícula secundária tem energia suficiente para andar esse comprimento de passo ela será produzida e seguida no material, até depositar toda sua energia ou até sair do volume de interesse. Se a partícula não possuir energia suficiente para andar esse passo, ela depositará toda sua energia no local de origem. Por isso, partículas secundárias com energia abaixo desse corte não são produzidas e sua energia é depositada localmente. A energia com que a partícula terá seus passos seguidos ou não, dependerá do meio em que se encontra.

2.3. Aferição de Resultados (*Benchmarking*): Cálculo de Distribuição de Fluência

A fluência, ϕ , em função da energia dos nêutrons dentro do volume sensível, é uma grandeza básica para ser comparada entre dois cálculos de transporte de nêutrons. Na intenção de testar os cálculos da versão do GEANT4 utilizada neste trabalho, a fluência de nêutrons na esfera da ICRU foi calculada e comparada com resultados de Garny et al. [13]. A esfera da ICRU foi implementada no GEANT4 com o mesmo material do paralelepípedo e foi usado o mesmo volume sensível, como mostra a Fig. 2 (A e B). Isso foi feito para detectar-se possíveis diferenças em relação a geometria, composição do material ou física.

Para este cálculo foi utilizado um gerenciador de detector sensível (G4SDManager) que coleta dados de interações físicas. Um objeto dessa classe registrado a um volume lógico define em que parte da geometria os dados devem ser coletados (neste caso é o volume sensível). Para coletar a fluência foi utilizado o G4PSCellFlux juntamente com o filtro de

partícula e energia G4SDParticleWithEnergyFilter para obter-se somente a fluência de nêutrons primários de 1 keV.

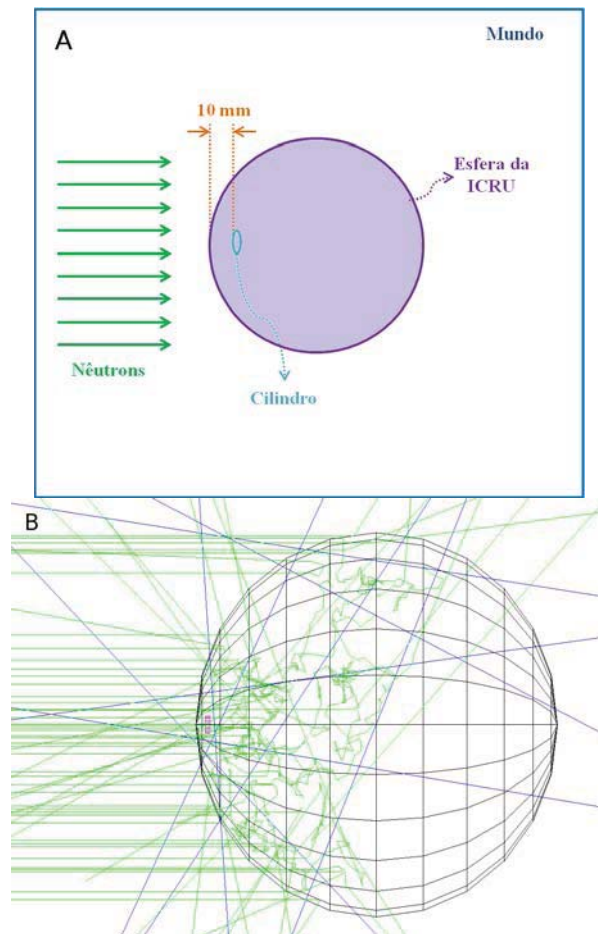


Figura 2. Esquema da geometria implementada no GEANT4 para o cálculo da fluência, ϕ , de nêutrons no volume sensível (figura A) e simulação da irradiação no GEANT4 (figura B).

2.4 Cálculo do Fator de Qualidade

No espalhamento múltiplo do GEANT4 em energias abaixo de 15 MeV, toda a energia dos íons ou prótons é depositada em um único passo, ao invés de ser depositada em muitos pequenos passos. Isso faz com que o LET varie fortemente durante a desaceleração dessas partículas e com isso o fator de qualidade Q dependente do LET, que é dado pela ICRU 57 [13], não pode ser pontual [14]. Então um fator de qualidade médio ($Q_{\text{médio}}$) deve ser calculado e para isso foram utilizados os valores de *stopping power* da ICRU 49 (prótons e alfas) [15] e ICRU 73 (íon pesados: C, N e O) [16].

Os valores de *stopping power*, com suas respectivas energias em MeV, tabulados na ICRU têm como material alvo a água líquida, tanto para C, N e O quanto para alfas e prótons. Multiplicando os valores de *stopping power* médio pela densidade da água (1 g/cm³) e fazendo os ajustes de unidade, obtemos o LET com a unidade keV/mm para substituir em (1) para a obtenção do fator de qualidade. Q é obtido a partir da relação que foi recomendada na ICRP 60 [17] :

$$\begin{cases} 1 & L < 10 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 0,32 - 2,2 & 10 \leq L \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L} & L \geq 100 \text{ keV}/\mu\text{m} . \end{cases} \quad (1)$$

De posse desses valores de Q, o seguinte cálculo para encontrar o Q_{médio} é feito:

$$Q_{\text{médio}} (E_{\text{inicial}}) = \frac{\int_{E_{\text{inicial}}}^0 Q (L (E)) dE}{\int_{E_{\text{inicial}}}^0 dE} \quad (2)$$

O fator de qualidade médio foi calculado para partículas alfa, prótons, ¹²C, ¹⁴N e ¹⁶O. Na Fig. 3 é apresentada a diferença entre os valores de Q, pontual e médio, para alfas e prótons.

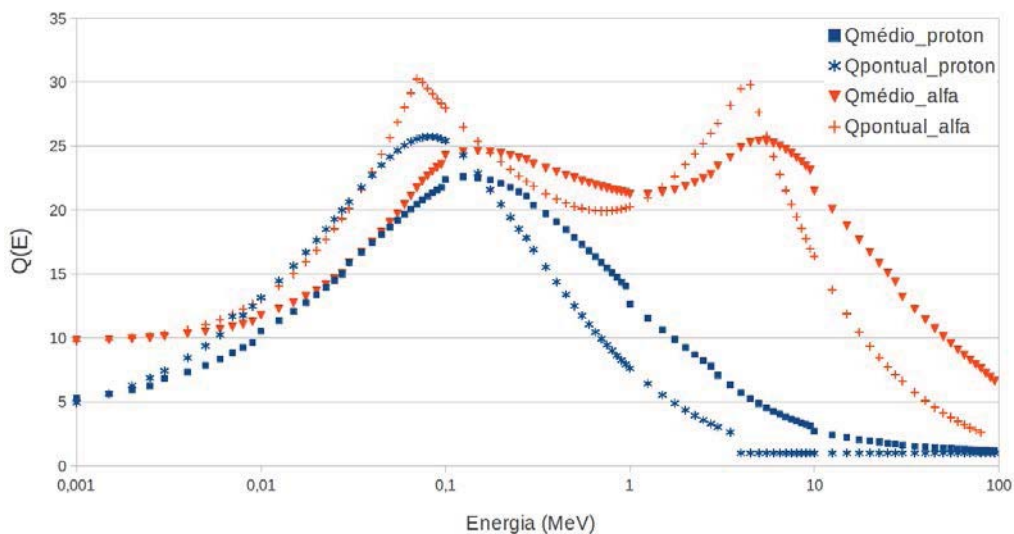


Figura 3. Valores pontuais e médios de Q para prótons e alfas.

2.5 Cálculo do Coeficiente de Conversão de Fluência para Equivalente de Dose Individual, H_p(10)/φ

Colocando esses valores médios de Q calculados e suas energias correspondentes no GEANT4, o H_p(10) foi calculado através da equação 3, onde a dose D é a dose absorvida depositada pelas partículas, $D = E_{\text{inicial}}/m$ (m é a massa do volume sensível calculada através

das grandezas conhecidas do mesmo: densidade e volume). Essa dose no GEANT4 é calculada por:

$$H_p(10) = \sum_{partículas} \sum_{passos} Q_{médio}(E_{inicial}).D \quad (3)$$

Se a partícula não possuir exatamente a energia tabelada uma simples interpolação linear para os pontos não presentes é feita e seu $Q_{médio}$, calculado. A fluência de nêutrons incidentes no paralelepípedo foi calculada e os coeficientes $H_p(10)/\phi$ para as energias de nêutrons monoenergéticos incidentes foram encontrados.

2.6 Teste Estatístico

A concordância entre os resultados simulados pelo código de Monte Carlo GEANT4 e os dados de referência apresentados na ICRP 74 foi avaliada através do *Goodness-of-Fit Test* [18]. Esses testes medem a compatibilidade de uma amostra aleatória com uma função de distribuição de probabilidade teórica ou entre distribuições empíricas de duas populações diferentes que vêm de uma mesma distribuição teórica. O objetivo pode consistir também em testar se as distribuições de duas variáveis aleatórias são idênticas contra a alternativa de que eles diferem de alguma maneira.

Duas hipóteses foram formuladas para definir o teste em termos estatísticos:

1. $H_0 \rightarrow$ Hipótese nula: Os dois conjuntos de dados vêm da mesma distribuição;
2. $H_A \rightarrow$ Hipótese alternativa: Os dois conjuntos de dados vêm de distribuições diferentes.

O teste Kolmogorov-Smirnov (KS) [19] foi selecionado entre os testes disponíveis no conjunto de ferramentas da análise estatística *Goodness-of-Fit*. A hipótese H_0 é rejeitada quando o *p-value* for menor do que 0,05. O resultado da estatística D (desvio máximo na vertical entre as duas curvas) e do *p-value* são apresentados. As energias dos nêutrons para as quais o GEANT4 foi rodado foram escolhidas ao acaso, porém dentro das energias dadas pela referência utilizadas para comparação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fluência de Nêutrons

Na Fig. 4 observa-se o gráfico referente ao cálculo de fluência com GEANT4 no presente trabalho e na Fig. 5 observa-se o gráfico do trabalho utilizado como referência [20]. A referência compara o GEANT4 na versão 8.2 com dados de fluência de nêutrons calculados no MCNP.

Foram calculadas equações para uma curva que ajustasse os dados encontrados, como mostram as Figs. 4 e 5. Essa equação tem o formato: $h(x) = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$. Os coeficientes foram ajustados para valores em que a curva ficasse em maior conformidade com o pico, que é o ponto de interesse.

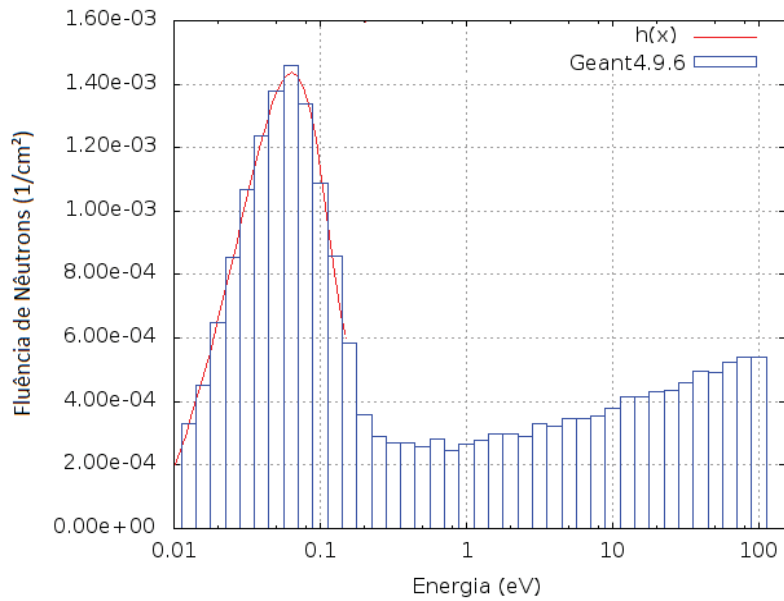


Figura 4. Cálculo da distribuição de fluência feita com o código GEANT4 na versão que foi utilizada no presente trabalho (versão 9.6).

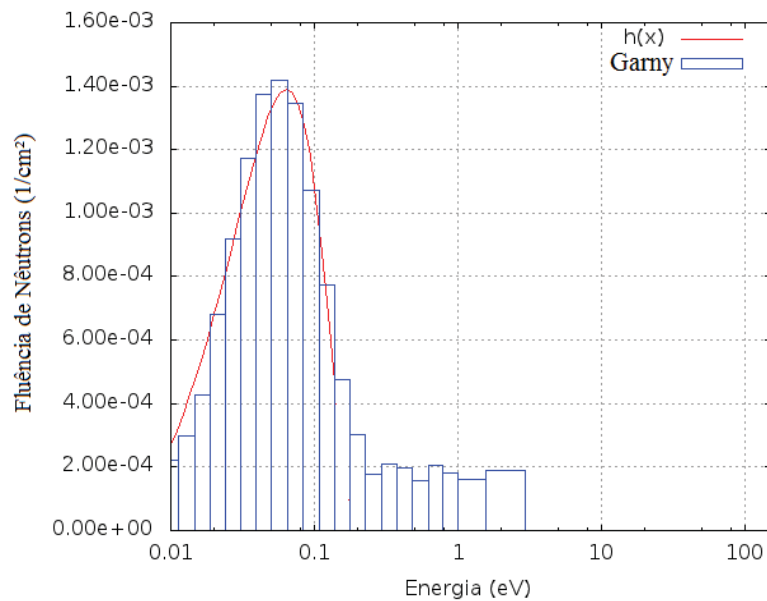


Figura 5. Ajuste para os resultados encontrados por Garmy [20].

O valor de energia para o pico foi de 0,0638 eV e o valor de fluência nesse pico foi de 0,001437 cm^{-2} . Esse valores de energia e fluência no pico também foram calculados para Garmy [17] e seus resultados foram, respectivamente de 0,0640 eV e 0,001392 cm^{-2} . A diferença entre o valor de pico de energia de referência para o presente trabalho foi de 0,3%.

Com respeito a valores de fluência temos uma diferença de 3,2%. Isso mostra que a física utilizada para o problema foi a mesma em ambos os trabalhos, assim como a composição e a geometria.

3.2 Coeficiente de Fluência de Nêutrons para Equivalente de Dose Individual, $H_p(10)/\phi$

São apresentados, na Fig. 6, os valores encontrados para os coeficientes de equivalente de dose individual por fluência de nêutrons para energias entre 10^{-9} a 10 MeV, em uma profundidade de 10 mm no paralelepípedo da ICRU.

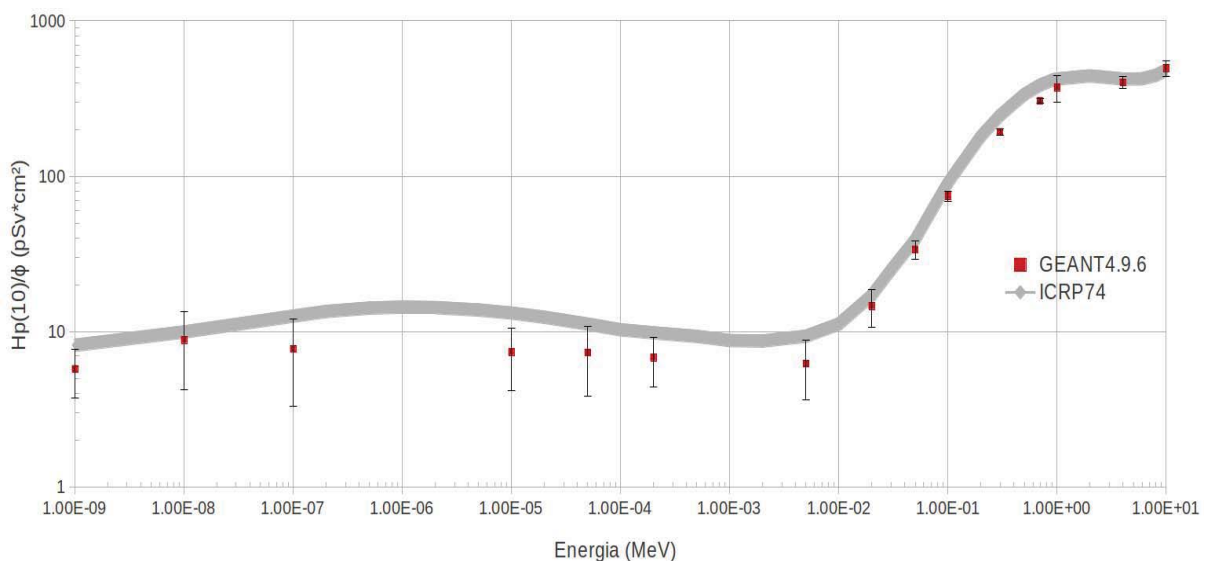


Figura 6. Coeficientes de fluência de nêutrons para equivalente de dose individual, $H_p(10)/\phi$. Valores da ICRP 74 com $\pm 10\%$ de margem de incerteza.

Considerando suas respectivas incertezas, os resultados encontrados demonstram um bom acordo com a ICRP 74. A avaliação dos dados pelo teste de KS foi positiva. A hipótese nula foi aceita com p -value de 0,136 e $D = 0,4$. Os resultados deste trabalho para os coeficientes e os valores que são encontrados na ICRP 74 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de coeficientes de fluência de nêutrons para equivalente de dose individual, $H_p(10)/\phi$ (pSv*cm²).

Energia (MeV)	Este trabalho (GEANT4.9.6)	ICRP74
1,00E-09	5,8	8,19
1,00E-08	8,9	9,97
1,00E-07	7,7	12,6

1,00E-05	7,4	13,2
5,00E-05	7,4	11,2
2,00E-04	6,8	9,84
5,00E-03	6,2	9,36
2,00E-02	14,6	17,1
5,00E-02	33,9	39
1,00E-01	74,7	90,6
3,00E-01	192,9	246
7,00E-01	305,8	386
1,00E+00	372,6	422
4,00E+00	401,7	422
1,00E+01	495,4	480

4. CONCLUSÕES

Cálculos para nêutrons monoenergéticos foram realizados no GEANT4, para nêutrons com energias que variavam de 10^{-9} MeV a 10 MeV. A fluência de nêutrons foi calculada para fins de *benchmarking* e os resultados do GEANT4 se mostraram de acordo com os resultados da referência, já que a posição do pico de energia difere por menos de 1 % quando comparados e a valor de fluência difere em 3,2 %. Então se pode afirmar que a física utilizada no presente trabalho e no trabalho citado são equivalentes. Os coeficientes de fluência de nêutrons para equivalente de dose individual calculados com o código de Monte Carlo GEANT4 se mostraram de acordo com a ICRP 74. Isso pode ser visto através da análise estatística que permitiu estimar a compatibilidade das distribuições. Isso demonstra que o GEANT4 pode ser aplicado para cálculos de coeficiente de fluência em equivalente de dose individual para nêutrons de energias até 10 MeV.

REFERÊNCIAS

1. G. Leuthold, V. Mares, Schraube, H., “Calculation of the neutron ambient dose equivalent on the basis of the ICRP revised quality factors”, *Radiation Protection Dosimetry*, **Vol. 40**, n 2, pp. 77-84 (1992).
2. ICRU, “Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations”, ICRU Report 47. Bethesda, Maryland (1992a).
3. ICRP, “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103”. Ann. ICRP 37 (2-4) (2007).
4. ICRU, “Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources”, ICRU Report 39. Bethesda, Maryland (1985).
5. “A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code”, <http://mcnp.lanl.gov/> (2013).
6. “National Research Council Canada. EGSnrc: software tool to model radiation transport”, http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/egsnrc_index.html (2013).
7. “PENELOPE 2011, A Code System for Monte-Carlo Simulation of Electron and Photon Transport”, <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1525> (2013).
8. “GEANT4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter”, <http://geant4.cern.ch/> (2013).

9. H. Schuhmacher, B. R. L. Siebert, “Quality factors and ambient dose equivalent for neutrons based on the new ICRP recommendations”, *Radiation Protection Dosimetry*, **Vol.40**, n 2, pp. 85-89 (1992).
10. B. R. L. Siebert, H. Schuhmacher, “Quality factors, ambient and personal dose equivalent for neutrons, based on the new ICRU stopping power data for protons and alpha particles”, *Radiation Protection Dosimetry*, **Vol. 58**, n 3, pp. 177-183 (1995).
11. ICRP, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation”, ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4) (1996).
12. S. Agostinelli et al., “GEANT4 - a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research”, *Elsevier Science*, **Vol. 506**, pp. 250-303 (2003).
13. ICRU. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRU Report 57 (1998).
14. S. Garny, et al., “GEANT4 Transport Calculations for Neutrons and Photons below 15 MeV”, *IEEE Transactions On Nuclear Science*, **Vol. 56**, n 4, pp. 2392-2396 (2009).
15. ICRU, “Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles”, ICRU Report 49 (1993).
16. ICRU, “Stopping of Ions Heavier Than Helium”, ICRU Report 73 (2005).
17. ICRP, “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
18. G. A. P. Cirrone et al., “A Goodness-of-fit Statistical Toolkit, *IEEE Transactions On Nuclear Science*”, **Vol. 51**, n 5, pp. 2056-2063 (2004).
19. D. A. Darling, “The Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises tests. *Ann. Math. Statist*”, **Vol. 28**, pp. 823-838 (1957).
20. S. Garny, “Development of biophysical treatment planning system for the FRM II neutron therapy beamline”, 189 f. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Munique (TUM), Munique (2009).