



## Facilidades de códigos de Monte Carlo para obter CSR

Teixeira<sup>a,b,c</sup> G.J., Sousa<sup>a,b</sup> C.H.S., Macedo<sup>a,d</sup> E., Campos<sup>b</sup> L.T., David<sup>b</sup> M.,  
Santos<sup>a</sup> M.H., Queiroz<sup>a</sup> P.P., Gomes<sup>a</sup> R.S., Pereira<sup>a</sup> W.W, Peixoto<sup>a,b</sup> J.G.P.

<sup>a</sup>Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CNEN; <sup>b</sup>Laboratório de Ciências Radiológicas – LCR/UERJ,

<sup>c</sup>Universidade Estácio de Sá, <sup>d</sup>Laboratório de Produtos para a Saúde – Labprosaud/IFBA

[gt@ird.gov.br](mailto:gt@ird.gov.br)

---

### RESUMO

O uso da técnica de modelagem matemática pelo método de Monte Carlo (MC) utiliza funções probabilísticas e números "aleatórios" para a realização de cálculos que simulam sistemas físicos, como o transporte de partículas radioativas. A determinação das primeiras e segundas camadas semirredutoras para um espectro determinado e uma distância pré-definida testou e verificou as vantagens e desvantagens de cada código na resolução de uma tarefa comum. Os resultados foram coerentes, mas discrepantes entre si entre 2,5 e 6,0 %, concluindo que os quatro códigos são poderosos e de fácil utilização, requerendo pouco conhecimento de linguagem computacional, inicialmente.

*Palavras-chave: Simulação, Monte Carlo, modelagem, camada semirredutora*

---

### ABSTRACT

The use of the mathematical modeling technique by the Monte Carlo method (MC) uses probabilistic functions and "random" numbers to perform calculations that simulate physical systems, such as the transport of radioactive particles. The determination of the first and second half values layers (HVL) for a given spectrum and a predefined distance tested the advantages and disadvantages of each code in solving a simple task. The results were consistent but discrepant between each one about 2.5 and 6%, and conclude that the codes are powerful and user-friendly, requiring a few computer language knowledges.

*Keywords: Simulation, Monte Carlo, modeling, half value layer.*

---

## 1. INTRODUÇÃO

Simulação tem como conceito primário o ato de manipular conceitos e explorar a realidade. É considerada a terceira alternativa do estudo científico, entre a teoria e a experimentação. Pode ser entendida como a técnica de utilização de modelos com o objetivo de estudar um determinado sistema. Por possuir alta praticidade, a simulação computacional por meio do método de Monte Carlo (MC) é o tipo de simulação mais utilizado [1-2].

Na pesquisa científica, a análise experimental geralmente é um processo bastante complexo e, neste caso, a abordagem estocástica via Monte Carlo termina por ganhar espaço. Áreas como química, biologia, física, metrologia, o campo nuclear e, em específico, a física das radiações enxergam a simulação como um instrumento valioso no estudo de processos que envolvem aleatoriedade ou uma grande quantidade de estados que os sistemas podem assumir. A natureza estocástica dos processos envolvidos, tais como geração de radiação, interação com a matéria e detecção, faz do MC uma ferramenta ideal para modelagens complexas [3-6].

O uso da técnica de modelagem matemática pelo método de Monte Carlo (MC) utiliza funções probabilísticas e números "aleatórios" para a realização de cálculos que simulam sistemas físicos, como o transporte de partículas radioativas [1]. Nestas modelagens, as partículas são criadas de acordo com regras que determinam seu tipo, sua energia e sua direção inicial, projetando no modelo criado interações com o material de interesse e montando a complexa história da partícula simulada.

Todos os códigos MC tratam da criação da história da partícula, com energia e coordenadas de posição definidas de acordo com a distribuição específica da fonte. Os parâmetros das partículas produzidas são armazenados em uma matriz e recuperados se suas energias forem menores que as energias de corte, se o elétron for descartado e se a história terminar.

Assim, transferência de energia ao meio é contabilizada e, se não houver mais nenhuma partícula armazenada, uma nova história tem início, caso contrário, através das seções de choque, contabiliza-se a transferência de energia e a distância da nova interação da partícula, até que esta seja menor que a energia de corte. Esse processo é repetido até que o número total de histórias seja alcançado [7].

Cada código de MC possui características próprias, facilidades e dificuldades que, todavia, fornecem resultados diferentes para um mesmo sistema, conforme descrito por muitos autores [8-10].

São apresentadas as características individuais de cada código na resolução de uma tarefa comum, a determinação das primeiras e segundas camadas semirredutoras para um espectro determinado e uma distância pré-definida. Os quatro códigos MC utilizados são apresentados a seguir.

Códigos destinados à simulação do comportamento da interação da radiação com a matéria foram criados, com destaque para o EGSnrc [1], GEANT4 [11], MCNP5 [12] e PENELOPE [13]. Cada um com suas características próprias, facilidades e dificuldades que, todavia, fornecem resultados diferentes para um mesmo sistema. Tais condições são indicadas em alguns trabalhos comparativos encontrados na literatura [8 10], tabela 1.

**Tabela 1:** Códigos utilizados nesta pesquisa ordenados por ordem alfabética, apresentando o ano de criação e a instituição de pesquisa de origem.

<b>Código</b>	<b>Criação</b>	<b>Instituição</b>
EGSnrc	2000	National Research Council (NRC)
GEANT4	1994	CERN
MCNP5	1940	Laboratório de Los Alamos
PENELOPE	1995	CIEMAT

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

### 2.1. EGSnrc

O EGSnrc foi originalmente lançado em 2000, como uma revisão completa do pacote de software Electron Gamma Shower (EGS) originalmente desenvolvido no Centro de Aceleração Linear de Stanford (SLAC) na década de 1970. Ao longo dos últimos 30 anos, o sistema originalmente escrito em MORTRAN2, mostrou-se problemático devido a incompatibilidades com os compiladores FORTRAN dos novos sistemas operacionais.

Rogers e Bielajew iniciaram então uma modificação estrutural no sistema ; Merovitz reformulou os arquivos de saída resolvendo problemas com as linhas de programação e, em 1999, o sistema passou por nova atualização para a correção de pequenos erros detectados pelos pesquisadores Iwan

Kawrakow, Jan Seuntjens e Dave Rogers [7]. Em 2002, Kawrakow e Walters implementaram uma interface gráfica desenvolvida por Ernesto Mainegra-Hing, onde foi introduzida a linguagem de programação compilada multi-paradigma, C++ [14].

Ao longo do tempo foram introduzidas características como uma nova teoria de espalhamento elástico multi-angular, um algoritmo aprimorado para a trilha eletrônica, o uso de tabelas de seção de choque para distâncias entre interações discretas, uma avaliação mais precisa da perda de energia e um algoritmo exato de cruzamento de limites, além da possibilidade de redução de variância que diminui drasticamente o tempo de processamento, alcançando resultados com um número muito menor de histórias [14].

Seu design modular pode ser usado para pesquisas industriais, feixes linac, emissores de raios X, proteção radiológica entre outras aplicações, permitindo modelar a propagação de fótons, elétrons e pósitrons com energias cinéticas entre 1 keV e 10 GeV, em materiais homogêneos, utilizando refinamentos cruciais no transporte de partículas carregadas, em seções transversais de menor energia, e na biblioteca de classes egs++ para modelar geometrias elaboradas e fontes de partículas.

## 2.2. GEANT4

É um pacote computacional para simulação de passagem de partículas através da matéria, por meio do método MC e fazendo uso da linguagem de programação orientada a objeto C++. Sua denominação tem origem na expressão “GEometry ANd Tracking”, sendo um software utilizado por um grande número de pesquisadores e que pode ser aplicado em diversas áreas, como física de altas energias, experimentos nucleares, medicina e aceleradores de partículas [11 ;15 -21].

A ferramenta está disponível para os sistemas operacionais UNIX, Linux, Mac OS X e sistemas Windows. Para vincular e criar o programa, apenas dois pacotes de software subjacentes são obrigatórios: CLHEP (Class Library of High Energy Physics) e STL (Standard Template Library).

O usuário pode construir aplicativos independentes ou criados em outra estrutura orientada a objeto. Em ambos os casos, há suporte desde a definição inicial do problema até a geração de resultados. Do ponto de vista físico, o Geant4 atua como uma grande base de boa parte de tudo o que é conhecido até hoje sobre interação de partículas em uma faixa de energia entre 250 eV a 1 TeV.

### 2.3. MCNP5

O código Monte Carlo N-Particle (MCNP) pode ser utilizado para o transporte individual de nêutrons, fótons e elétrons. Fótons são simulados com energias entre 1 keV e 100 GeV; os elétrons são simulados com energias entre 1 keV a 1 GeV; e os nêutrons são simulados com energias entre 10<sup>-11</sup> a 100 MeV. O MCNP6 constitui a versão mais recente do MCNP.

O MCNP5 é uma combinação do código MCNP4C com o código LAHET (Los Alamos High-Energy Transport). O MCNP5 possui todas as características dos códigos MCNP4C e MCNP5, além de aprimoramentos como o transporte de trinta e quatro novos tipos de partículas, expansão da faixa de energia das partículas simuladas e contemplação de características relevantes para comunidades científicas e médicas em relação a códigos de modelagem computacional. Adicionalmente, o MCNP5 possui novos modelos físicos de simulação, técnicas de redução de variância e novas técnicas de análise de dados, além de atualizações das bibliotecas de seção de choque.

Os resultados de transporte de partículas fornecidos pelo MCNP5 são determinados a partir de uma distribuição de probabilidades dos eventos físicos possíveis. Todas as partículas são seguidas desde o momento em que são criadas até que seja absorvida pelo meio, saia da geometria definida ou que sua energia seja reduzida para a energia de corte. Se uma partícula interage, novas trajetórias são criadas tanto para a partícula antiga, com uma nova energia e direção, quanto para as partículas secundárias.

### 2.4. PENELOPE

O PENELOPE (acrônimo de PENetration and Energy Loss of Photons and Electrons) é um código computacional baseado no método MC, criado com o objetivo de ajudar nas simulações de sistemas de transporte de partículas neutras e carregadas, principalmente transporte elétron-fóton, utilizando métodos determinísticos e estocásticos [13].

Muitas aplicações são encontradas na literatura utilizando o PENELOPE, com destaque para metrologia, mamografia, radiologia diagnóstica, entre outros. Bastante utilizado desde geometrias simples às mais complexas, como forma de estimar o comportamento de determinado sistema a ser

estudado [22-24]. Este algoritmo de simulação pode ser aplicado para modelagens com energias iniciais entre 1 keV e 1 GeV.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

Para as simulações, o código PENELOPE utilizou um computador pessoal (PC), com processador AMD® FX-8350 Vishera, com memória RAM de 8 GB DDR 3 e sistema operacional (SO) Windows® 10, o código MCNP5 utilizou um computador HP EliteDesk, processador Intel Core i7-6700, 3,40 GHz, 8 núcleos com 16 GB de memória RAM e SO Linux, no código GEANT4 foi utilizado um computador HP EliteDesk com SO LINUX, e para o código EGSnrc, um PC Acer®, modelo Aspire 5 (A515-51-51UX) com configuração de 8 GB de memória RAM DDR4, HD de 1 TB e processador Intel® Core™ i5-7200U com turbo boost maior que 3.1 GHz, sobre um SO Windows® 10.

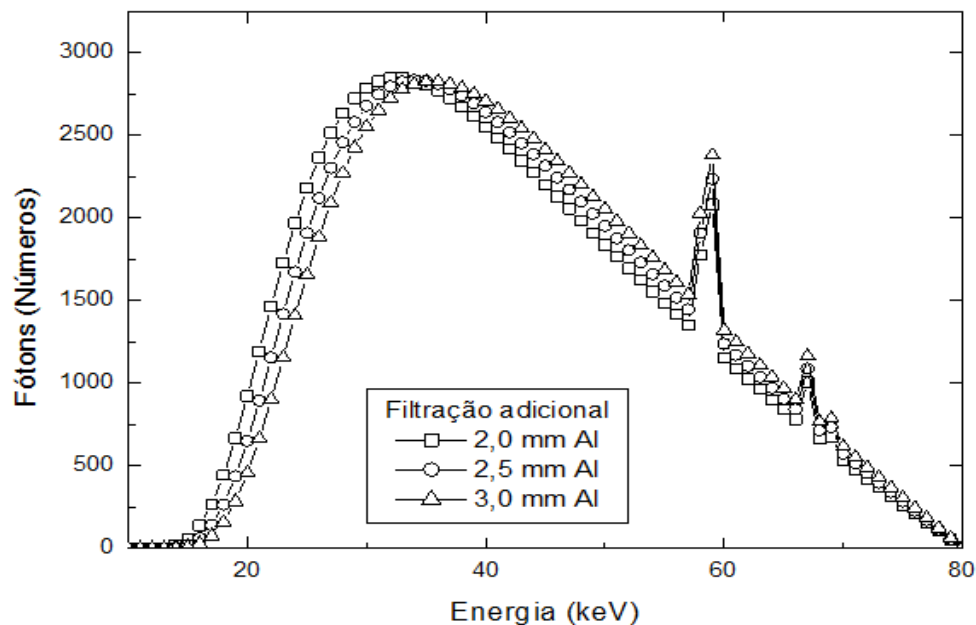
Os sistemas foram instalados em computadores pessoais, sendo os códigos com licença livre instalados nos laptops dos pesquisadores e os com permissão de uso controlado instalados nos computadores do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN).

#### 3.2. Métodos

Foram fornecidos 3 espectros de raios X (figura 1), tensão de pico de 80 kV (potencial constante) e angulação anódica de 17°. Os espectros foram gerados com intervalos de energia de 1 keV e filtrações totais de 2,0, 2,5 e 3,0 milímetros de alumínio (Al), sendo suas energias mínimas de 13, 13 e 14 keV, respectivamente e, energias máximas de 80 keV. A utilização dos códigos de MC utilizados nestas simulações tem o objetivo de apresentar as facilidades e características na utilização de cada um para a obtenção da 1ª e 2ª CSR, modelando uma geometria preenchida com ar, com dimensões sugeridas de 100 cm de comprimento na direção Z e raio 10 cm, sendo que a fonte emissora de raios X deveria estar posicionada no ponto 0,0,0 (x,y,z) e o detector na posição 0,0,100 (x,y,z).

A camada semirredutora, de material definido como alumínio, deveria ser posicionada e centralizada no eixo z entre a fonte e o detector na posição 0,0,50 (x,y,z).

**Figura 1:** Espectros com tensão de pico de 80 kV (potencial constante) e angulação anódica de 17o, gerados com intervalos de energia de 1 keV e filtrações totais de 2,0, 2,5, e 3,0 mm Al, sendo suas energias máximas de 80 keV e mínimas de 13, 13 e 14 keV, respectivamente (Birch et al. 1979).



Os números de histórias, bem como a grandeza a ser simulada, não foram definidos para dar liberdade no tempo de execução das simulações, no entanto, os resultados deveriam ser apresentados com incertezas menores ou iguais a 0,1.

As simulações com o sistema EGSnrc foram realizadas a partir do tutorial PIRS-898 (2018), da classe C++, utilizando o código CAVITY, que permite o cálculo direto da CSR. A geometria foi definida como um paralelogramo de ar com 25 cm nos eixos x e y e 100 cm no eixo z (figura 2-a). O atenuador foi definido como uma lâmina de alumínio variando de espessura a cada simulação. Os meios, ar e alumínio (Ar, Al), foram definidos através da montagem da biblioteca de secção de choque, com as correções de densidade da International Commission on Radiation Units & Measurements (ICRU).

O sistema simulado com o GEANT4 consistiu de um universo em forma de cubo com 2,0 m de aresta e preenchido de ar. Em seu interior foram criados uma fonte de radiação, um atenuador e um detector. A fonte é um emissor dos espectros definidos na metodologia. Cada espectro vai de 1 a 80 keV em passos de 1 keV, gerando assim três conjuntos de 80 contagens fotônicas, das quais foram

extraídas as contagens acumuladas e relativas. Cada feixe em questão possui uma face quadrada de 8,0 cm de lado [25].

O atenuador foi alinhado e centralizado com a fonte e definida como uma placa de alumínio, cujo ponto central está a 50,0 cm da saída da fonte e possui uma face quadrada de 10,0 cm de lado voltada para esta saída. O detector foi modelado como uma casca cilíndrica, cujo ponto central está a 101,0 cm da saída da fonte e alinhado e centralizado com a saída. Suas dimensões são raio da base e altura internos de 0,9 cm e 2,4 cm, respectivamente, e raio da base e altura externos de 1,0 cm e 2,5 cm, respectivamente. O detector é constituído por uma capa de policarbonato com densidade igual a 1,19 g/cm<sup>3</sup> e preenchido de ar (figura 2-b).

A geometria construída com o MCNP5 foi limitada por um cilindro preenchido com ar de dimensões 102,0 cm na direção do eixo z e raio 10,0 cm. Dentro foi posicionada, no ponto (x,y,z) 0,0,0, uma fonte emissora de raios X definida como isotrópica. O atenuador de alumínio foi posicionado em z = 50,0 cm, em forma de paralelepípedo com 10,0 centímetros de lado e espessura variando de acordo com as simulações. O detector foi posicionado em z = 101,0 cm, consistindo de um cilindro de policarbonato com raio de 1,0 cm e 2,5 cm de altura. A resposta (tally) definida foi a F6 energia depositada na célula referente ao detector para fótons.

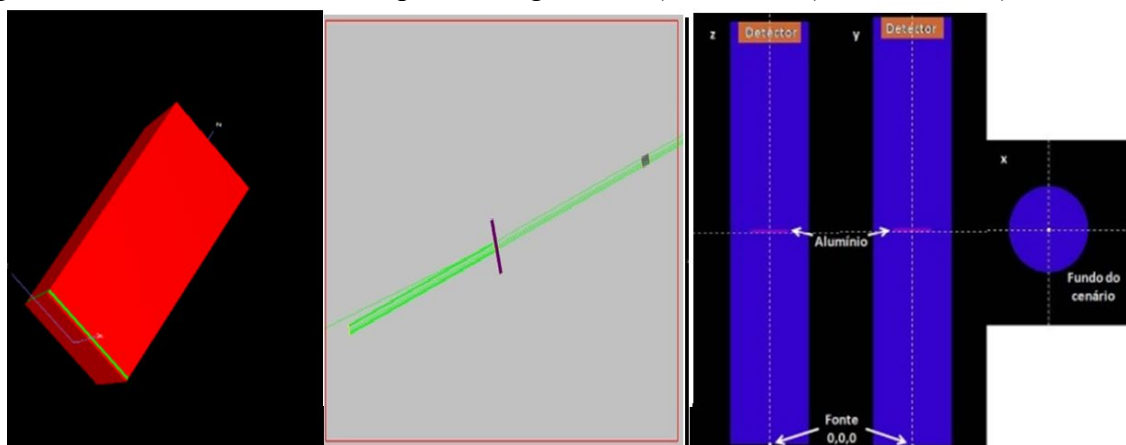
No código PENELOPE foi definida uma fonte de radiação pontual emitindo os fótons no espectro máximo, definido em feixe cônico na direção +z, com ângulo de 5,71°. Foram usadas as variáveis EABS (1:3), C1, C2, WCC, WCR onde as partículas assumidas foram efetivamente paradas e totalmente absorvidas no meio. Foram consideradas as ionizações das partículas com a energia de ionização das camadas K, L e M maiores que a energia de absorção da variável EABS. As demais variáveis citadas consideram as interações suaves e dos caminhos livres de média rígida e tiveram influência muito fraca sobre os resultados. O arquivo de materiais foi gerado valendo-se do banco de dados do PENELOPE, sendo definidos os materiais "AIR, DRY (NEAR SEA LEVEL), nº 104" e "ALUMINUM, nº 13".

Foi definida uma geometria cilíndrica de 15,0 cm de raio e 100,0 cm de comprimento, com a fonte posicionada em uma extremidade e o detector, com raio de 5,0 cm na outra. O atenuador de



alumínio foi de 10,0 cm x 10,0 cm de superfície e espessura variável, de acordo com a espessura da CSR declarada (figura 2-c).

**Figura 2 :** Geometrias simuladas pelos códigos MC. a) EGSnrc, b) GEANT4 e c) PENELOPE.

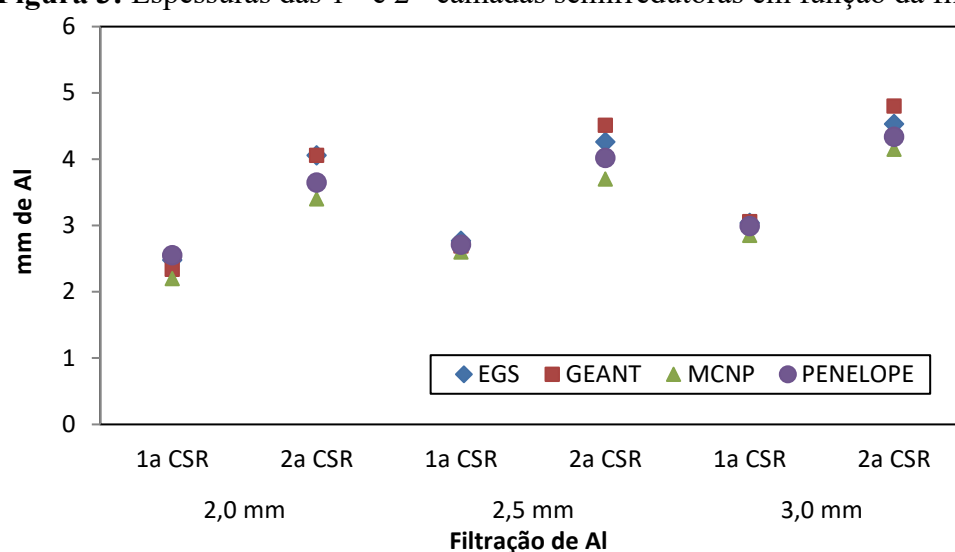


#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados nas simulações dos quatro códigos MC foram comparados, mesmo não sendo este um dos objetivos da pesquisa. Embora as modelagens não tenham sido tabuladas, os valores obtidos para a 1ª e 2ª CSR (figura 3) foram bastante coerentes entre si, variando em média de 3,0% a 6,0%, respectivamente, permitindo determinar incertezas menores ou iguais a 0,1, conforme determinado para objetivo da pesquisa (tabela 2).

**Tabela 2 :** Valores em milímetros para as 1ª e 2ª camadas semirredutoras (CSR), para um espectro de 80 keV e filtrações de 2,0, 2,5 e 3,0 milímetros de alumínio.

	2,0 (mm Al)		2,5 (mm Al)		3,0 (mm Al)	
	1ª CSR	2ª CSR	1ª CSR	2ª CSR	1ª CSR	2ª CSR
EGSnrc	2,20 ± 0,01	3,40 ± 0,01	2,60 ± 0,01	3,70 ± 0,01	2,85 ± 0,01	4,15 ± 0,01
GEANT4	2,34 ± 0,03	4,06 ± 0,08	2,69 ± 0,04	4,51 ± 0,09	3,06 ± 0,05	4,80 ± 0,10
MCNP5	2,55 ± 0,93	3,65 ± 0,92	2,71 ± 0,11	4,02 ± 0,92	2,99 ± 0,91	4,34 ± 0,01
PENELOPE	2,48 ± 0,03	4,06 ± 0,04	2,77 ± 0,03	4,26 ± 0,04	3,04 ± 0,02	4,53 ± 0,02

**Figura 3:** Espessuras das 1<sup>as</sup> e 2<sup>as</sup> camadas semirredutoras em função da filtração.

A verificação dos resultados demonstra que o simples ajuste de parâmetros como as geometrias dos feixes e das fontes, os posicionamentos dos anteparos atenuadores e as características dos detectores, diminuirá ainda mais a diferença percentual entre os resultados. No entanto, os resultados permitiram determinar algumas das vantagens e desvantagens dos métodos encontradas pelos pesquisadores, conforme descrito na tabela 3.

**Tabela 3:** Facilidades evidenciadas nas simulações dos quatro códigos de Monte Carlo.

Facilidades	EGSnrc	GEANT4	MCNP5	PENELOPE
Código livre e aberto	✓	✓	✗	✓
Conhecimento de linguagem de programação para uso inicial	✗	✗	✗	✗
Rápido e eficiente	✓	✓	✓	✓
Permite o processamento em paralelo	✓	✓	✓	✓
Documentação de referência	✓	✓	✓	✓
Simula o transporte de fótons e elétrons	✓	✓	✓	✓
Simula radioterapia e radiodiagnóstico	✓	✓	✓	✓
Simula o transporte de nêutrons	✗	✓	✓	✗
Visualização da geometria modelada	✓	✓	✓	✓
Interface atrativa e intuitiva	✓	✓	✗	✗
Avaliação acadêmica	✓	✓	✓	✓
Conhecimento programação para modificação do código fonte	✓	✓	✓	✓

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados nas simulações dos quatro códigos MC diferiram entre si e não valem para uma comparação entre os métodos, porém, este fato não foi fundamental para o resultado da pesquisa. As simulações para fótons, independente da coincidência dos números de histórias utilizados em cada código e exatidão nas geometrias, demonstraram facilidade de utilização dos métodos, respostas coerentes nas determinações dos valores das 1as e 2as CSR para as três filtrações do espectro estudado, ficando evidente ao fim da pesquisa, a facilidade e o benefício dos códigos e das simulações de MC em pesquisas e validações em metrologia e radiodiagnóstico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o suporte técnico e disponibilidade do Laboratório de Ciências Radiológicas da UERJ (LCR/UERJ) e do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN).

## REFERÊNCIAS

- [1] ROGERS DWO. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics. **Phys Med Biol.** 2006;51(13):287.
- [2] SOKOLOWSKI J, BANKS C. Principles of modeling and simulation: a multidisciplinary approach. Hoboken; 2009.
- [3] ARNOLD FJ, PELÁ CA. Simulação computacional de campos ultrassônicos. **Rev Bras Ensino Física.** 2004;26(3):223–31.
- [4] BIRDSALL CK, LANGDON AB. Plasma physics via computer simulation. New York CRC Press. 2004;504.
- [5] RADINSCHI I, ET. AL. Computer simulations of physics phenomena using flash. **Int J Hands-on Sci.** 2008;1(1):27–32.
- [6] SANTOS MH. Desenvolvimento de um simulador para espectrometria por fluorescência de raios X usando computação distribuída. UERJ; 2011.
- [7] KAWRAKOW I, ROGERS DWO. The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. **Technical Report PIRS-701.** Ottawa, Canadá; 2000.

- [8] VILCHES M, GARCÍA-PAREJA S, GUERRERO R, ANGUIANO M, LALLENA AM. Monte Carlo simulation of the electron transport through thin slabs: A comparative study of PENELOPE, GEANT3, GEANT4, EGSnrc and MCNPX. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms*. 2007;254(2):219–30.
- [9] KOIVUNORO H, SIISKONEN T, KOTILUOTO P, AUTERINEN I, HIPPELÄINEN E, SAVOLAINEN S. Accuracy of the electron transport in MCNP5 and its suitability for ionization chamber response simulations: A comparison with the EGSnrc and PENELOPE codes. *Med Phys*. 2012;39(3):1335–44.
- [10] ARCHAMBAULT JP, MAINEGRA-HING E. Comparison between EGSnrc, GEANT4, MCNP5 and PENELOPE for mono-energetic electron beams. *Phys Med Biol*. 2015;60(13):4951–62.
- [11] GEANT4. **GEANT4: a simulation toolkit**. 2017.
- [12] REED AL. **a Primer;Medical physics calculations with MCNP: 2007**.
- [13] SALVAT F, FERNÁNDEZ-VAREA J, SEMPAU J. PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. **Workshop Proceedings**. 2008.
- [14] MAINEGRA-HING E, KAWRAKOW I. Variance reduction techniques for fast Monte Carlo CBCT scatter correction calculations. *Phys Med Biol*. 2010;55:4495–4507.
- [15] ALLISON J, AL E. Recent developments in GEANT4. *Nucl Instruments Methods Phys Res A*. 2016;835:186–225.
- [16] BERNAL MA, AL. E. Track structure modeling in liquid water: A review of the Geant4-DNA very low energy extension of the GEANT4 Monte Carlo simulation toolkit. *Phys Medica*. 2015;31:861–874.
- [17] KYRIAKOU I, INCERTI S, FRANCIS Z. Technical Note: Improvements in GEANT4 energy-loss model and the effect on low-energy electron transport in liquid water. *MedPhys*. 2016;42(7):3870–3876.
- [18] MARTINS MC. **Simulações por Monte Carlo de tratamentos de braquiterapia utilizando simuladores antropomórficos em voxel**. UFRJ; 2014.
- [19] OKADA S, ALCHEN, Y. W.; TORRO, C.; TANAKA, S.; HOWLETT, R.; C. JAIN, L.. E. GPU Acceleration of Monte Carlo Simulation at the Cellular and DNA Levels. *In.Innov Med Healthc Smart InnovSyst Technol*. 2016;45.

- [20] PANDOLA L, ANDENNA C, CACCIA B. Validation of the GEANT4 simulation of bremsstrahlung from thick targets below 3 MeV. **Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms.** 2015;350:41–8.
- [21] WRIGHT DH, KELSEY MH. The GEANT4 Bertini Cascade. **Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A Accel Spectrometers, Detect Assoc Equip.** 2015;804:175–88.
- [22] DAVID MG, PIRES EJ, BERNAL M A., PEIXOTO JG, DEALMEIDA CE. Experimental and Monte Carlo simulated spectra of standard mammography-quality beams. **Br J Radiol.** 2012;85(1013):629–35.
- [23] POZUELO F, GALLARDO S, QUEROL A, VERDU G, RODENAS J. **X-ray simulation with the Monte Carlo code PENELOPE.** Application to Quality Control. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2012;2012:5777–80.
- [24] AGUIRRE E, DAVID M, DEALMEIDA CE, BERNAL MA. **Impact of photon cross section uncertainties on Monte Carlo-determined depth-dose distributions.** Phys Medica. 2016;32(9):1065–71.
- [25] BIRCH R, MARCHALL M, ARDRAN GM, ANDRAN GM. **Catalogue of spectral data for diagnostic X-rays.** London; 1979.