

Avaliação dosimétrica de uma fonte radioativa didática de Am-241 por meio de simulação computacional utilizando o Método de Monte Carlo

Valter José Coutinho Júnior^{1,2}, Otávio Joaquim Tavares², Lucas Wilian Gonçalves de Souza^{1,3}, César Augusto Silva Cardoso Assis^{1,3}, Ana Paula Perini^{1,2}, William de Souza Santos², Lucio Pereira Neves^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil

² Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil

³ Faculdade do Trabalho – FATRA, Uberlândia, MG, Brasil

E-mail: valter@ufu.br

Resumo: Fontes radioativas seladas são muito utilizadas no ensino de física das radiações ionizantes, como nos cursos superiores de Física Médica e Engenharia Biomédica. Apesar de terem atividade baixa, devem ter acesso controlado e manuseio adequado. Esse artigo visa avaliar, por meio da simulação computacional, os coeficientes de conversão para dose equivalente e efetiva por dois objetos simuladores virtuais antropomórficos, FASH3 (Female Adult MeSH) e MASH3 (Male Adult MeSH), durante uma aula prática de um laboratório didático utilizando uma fonte de Am-241. Para realizar a simulação foi utilizado o código de Monte Carlo MCNP 6.2.

Palavras-chave: Proteção radiológica. Fonte de Am-241. Simulação de Monte Carlo.

Abstract: Sealed radioactive sources are used in the teaching of ionizing radiation, as in Medical Physics and Biomedical Engineering undergraduate and graduate courses. Despite having low activity, they must have controlled access and adequate handling. This article aims to verify through computer simulation the conversion coefficients for absorbed and effective doses received by two virtual anthropomorphic phantoms, FASH3 (Female Adult MeSH) and MASH3 (Male Adult MeSH) during a practical class in a didactic laboratory using an Am-241 source. To perform the simulation the MCNP 6.2 Monte Carlo code was used.

Keywords: Radiation protection. Am-241 source. Monte Carlo simulation.

1. INTRODUÇÃO

Fontes de radiação ionizante com propósitos educacionais são amplamente utilizadas em laboratórios didáticos, sejam elas fontes seladas, como Am-241 e Cs-137, geradores de raio-x ou minerais radioativos. O início do uso de materiais radioativos na educação secundária data da década de 60 (JAMIESON, 2005) e desde então, são estabelecidos protocolos de segurança para o ensino de radiação ionizante para menores de 18 anos. No caso dos estudantes do ensino superior, a ICRP determina que para estudantes das áreas de radiologia, devem ser seguidas as mesmas regras de segurança dos trabalhadores da área (ICRP, 1983).

A proteção radiológica se fundamenta nos princípios da otimização, justificção e limitação. O uso de fontes didáticas atende a estes 3 princípios, porém esforços devem ser tomados para reduzir o quanto for possível os níveis de exposição. Dessa forma a caracterização de uma fonte radioativa, juntamente com o mapeamento dos níveis de exposição na área do laboratório, pode contribuir para a garantia da segurança. Este mapeamento pode ser feito por meio de equipamentos como câmaras de ionização e dosímetros termoluminescentes (TLD) ou opticamente estimulados (OSL), além de simulações computacionais, empregando o código de Monte Carlo.

As simulações de Monte Carlo podem ser implementadas por meio de diferentes códigos computacionais que utilizam amostragem aleatória combinada com funções de probabilidade para descrever um fenômeno físico. Os códigos permitem a criação de geometrias que representam o cenário de exposição, incluindo a representação de pessoas por meio de simuladores antropomórficos virtuais. Além disso, vários tipos de radiações com diferentes energias podem ser simuladas. Assim pode se obter estimativas confiáveis dos níveis de exposição em diferentes cenários de forma prática e econômica (ROGERS, 2006).

O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos da exposição à radiação proveniente de fontes de radiação didáticas durante uma aula. Foram simulados cenários variando a distância entre o operador e a fonte radioativa, e para cada cenário foram determinados os coeficientes conversão de dose equivalente ($CC[H_T]$) e efetiva ($CC[E]$). Em alguns cenários foi avaliado o emprego de um anteparo com blindagem em chumbo para proteção do operador. Foi empregado o código de Monte Carlo MCNP 6.2 para realizar as simulações (WERNER, 2017).

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização do ambiente de simulação: sua geometria e materiais

As informações para a elaboração da fonte de Am-241 virtual, empregada nas simulações, foram baseadas em uma fonte selada da marca Phywe/Isotrak, que é comercializada com equipamentos didáticos para laboratórios de ensino.

O aparato figura 1.a da fonte radioativa é composto de duas partes: um recipiente feito de alumínio com um orifício no meio e o suporte. O suporte da fonte foi fabricado de aço inoxidável, com 85 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. Dentro de um sulco se encontra o Am-241, depositado em uma fina lâmina metálica coberto por uma liga de ouro e paládio com aproximadamente 2 μm de espessura,

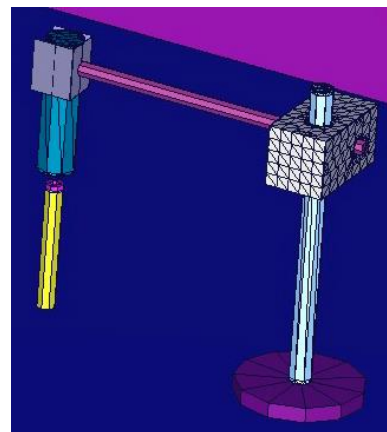
reduzindo assim, a energia das partículas α para aproximadamente 4,5 MeV. Adicionalmente, fótons (radiação γ) e elétrons (produzidos por conversão interna) são emitidos (KUTHE; TIMMERMANN, 1985).

Na figura 1.b é apresentado o experimento completo montado a ser simulado, que inclui um tubo Geiger-Müller sustentado por um tripé, direcionado para a fonte de forma a realizar as medidas. Para avaliar o efeito da blindagem, foi adicionado na simulação um anteparo com blindagem em chumbo (escudo) para melhor entender seu efeito como equipamento de proteção (figura 1.c). Este escudo é constituído de duas placas de chumbo, sendo uma de 10 mm na vertical e outra de 5 mm, inclinada.

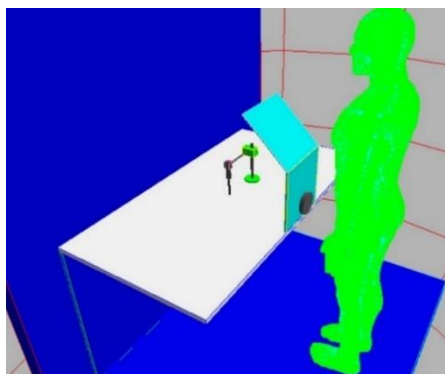
Entre o objeto simulador virtual antropomórfico e o aparato foi adicionada uma estrutura, correspondente a uma câmara de ionização, que tem por finalidade calcular o KERMA no ar. Assim, será possível calcular os valores de $CC[H_T]$ e $CC[E]$ do objeto simulador antropomórfico virtual. A câmara de ionização de referência é da marca Radcal, modelo 10x6-180. Por fim, a bancada de aço inoxidável fixada em uma parede constituída de argamassa baritada, assim como o chão.



(a)



(b)



(c)

Figura 1. (A) Fonte de Am-241 (EZAG, 2017), (B) geometria da fonte de Am-241 e contador Geiger-Müller, (C) visão geral do ambiente a ser simulado.

2.3. Especificações da fonte

Dentre as informações relevantes da fonte radioativa estão suas probabilidades de decaimento e as energias emitidas nesse processo. A partir de informações do radioisótopo Am-241, provenientes na literatura (FIRESTONE; EKSTROM; CHU, 1999), foram colocadas no cartão de entrada os decaimentos com maior probabilidade de ocorrência e maior energia liberada, apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Especificação da fonte de Am-241 empregada no código MCNP 6.2, sendo E_γ a energia emitida no decaimento gama e I_γ a probabilidade de emissão gama

E_γ (keV)	I_γ (%)
26,3448	2,400
33,1964	0,126
59,5412	35,90

2.3. Especificação dos tallys

Os *tallys* são utilizados para especificar quais dados devem ser extraídos da simulação de Monte Carlo. Eles são identificados pelo tipo de registro a ser feito e pela partícula (WERNER, 2017). Neste trabalho foi empregado o *tally* F6 (*MeV/g/source-particle*), de forma a calcular quantidade de energia depositada nos órgãos/tecidos do objeto simulador virtual antropomórfico.

2.3. Objetos simuladores virtuais antropomórficos

Os objetos simuladores virtuais antropomórficos utilizados nesse trabalho foram desenvolvidos pelo Grupo de Dosimetria e Instrumentação Nuclear do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE) (SOARES *et al.*, 2019). Trata-se de um homem adulto meSH (MASH3) e uma mulher adulta meSH (FASH3) (CASSOLA *et al.*, 2011). Eles representam de forma bem detalhada os órgãos internos de um homem e uma mulher e suas características fisiológicas e anatômicas satisfazem as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) (CASSOLA *et al.*, 2010).

2.4. Determinação da dose absorvida e dose efetiva

Com os valores simulados foi possível determinar os coeficientes de conversões de dose equivalente $CC[H_T]$ e efetiva $CC[E]$, conforme descrito na literatura (NEVES *et al.*, 2020; SOARES *et al.*, 2019; ICRP, 2007).

$$CC[H_T]_{\text{Masculino}} = w_R \times D_{\text{simulada}} / K_{MC, \text{simulação}} \quad (1)$$

$$CC[H_T]_{\text{Feminino}} = w_R \times D_{\text{simulada}} / K_{MC, \text{simulação}} \quad (2)$$

$$CC[E]_{\text{Masculino}} = \sum_T w_T CC[H_T] \quad (3)$$

$$CC[E]_{Feminino} = \sum_T w_T CC[H_T] \quad (4)$$

$$CC[E] = \frac{CC[E]_{Masculino} + CC[H_T]_{Feminino}}{2} \quad (5)$$

Sendo w_R é o fator de ponderação de radiação utilizada, e w_T fator de ponderação tecidual, $K_{MC,simulação}$ o valor de KERMA obtido com a câmara de ionização simulada, empregando o Método Monte Carlo, com as mesmas variáveis do cenário experimental. $D_{simulada}$ é dose absorvida nos órgãos e tecidos do simulador antropomórfico virtual, por meio do *tally* F6. $CC[H_T]_{Masculino}$ e $CC[H_T]_{Feminino}$ são os coeficientes de dose equivalente nos simuladores antropomórficos virtuais MASH3 e FASH3.

3. RESULTADOS

As estimativas de $CC[H_T]$ e $CC[E]$ para a FASH e o MASH são apresentadas nas tabelas 2 e 3, respectivamente. Pode-se observar que os valores mais altos correspondem aos órgãos mais radiosensíveis sendo a mama a principal contribuinte para os valores $CC[H_T]$ em ambos os gêneros. Tanto a radiosensibilidade quanto a maior massa da mama contribuem para que os valores de $CC[H_T]$ da FASH sejam superiores aos do MASH em todos os cenários simulados. A menor contribuição (80%) da mama para o $CC[E]$ da FASH ocorreu no cenário 4, no qual a FASH se posiciona a 50 cm da fonte com proteção plumbífera. Para todos os demais cenários a mama contribui com aproximadamente 90% do valor do $CC[E]$. Para o MASH, a contribuição mínima da mama foi de 31% no cenário 2 e máxima de 55% no cenário 4.

Os dados apresentados na tabela 4 mostram ainda que o aumento da distância em relação à fonte reduz significativamente os $CC[E]$. Este é um resultado esperado, pois a intensidade da radiação ionizante reduz com inverso do quadrado da distância (ATTIX, 2008). Esse efeito é observado para todas as distâncias simuladas, contudo, a maior redução (77%) ocorre para o aumento de 50 a 100 cm, sem a proteção de chumbo.

Tabela 2. CC[HT] e CC[E] para o objeto simulador antropomórfico feminino

Órgãos	CC[Ht] ($\mu\text{Sv/Gy}$)											
	Modelo - 1	Incerteza	Modelo - 2	Incerteza	Modelo - 3	Incerteza	Modelo - 4	Incerteza	Modelo - 5	Incerteza	Modelo - 6	Incerteza
Medula óssea	2,54E+00	0,61%	7,46E-01	1,10%	3,28E-01	1,67%	1,39E+00	0,86%	1,64E-01	2,40%	7,52E-02	3,59%
Cólon	6,61E+00	1,85%	1,28E+00	4,30%	4,56E-01	7,43%	4,96E-01	6,94%	3,21E-01	9,82%	1,96E-01	11,32%
Pulmão	6,55E+00	1,15%	2,05E+00	2,08%	9,00E-01	3,07%	1,56E+00	2,37%	2,97E-01	5,80%	1,72E-01	7,66%
Estômago	1,24E+01	2,13%	2,17E+00	4,94%	6,74E-01	9,01%	5,43E-01	10,60%	3,97E-01	12,76%	2,24E-01	16,40%
Seios	4,63E+02	1,14%	1,03E+02	2,33%	4,10E+01	3,64%	4,59E+01	4,05%	1,80E+01	6,32%	1,08E+01	8,07%
Demais Tecidos*	1,93E-02	0,48%	6,47E-03	0,88%	2,90E-03	1,33%	5,53E-03	0,86%	1,16E-03	2,03%	6,49E-04	2,71%
Gônadas	1,89E+00	8,80%	6,55E-02	42,27%	6,72E-02	46,32%	8,42E-02	54,10%	0,00E+00	0,05%	3,84E-02	60,84%
Bexiga	4,82E+00	5,81%	8,19E-01	14,82%	2,02E-01	32,79%	1,81E-01	38,54%	2,00E-01	35,63%	1,13E-01	50,98%
Esôfago	5,65E+00	4,55%	2,06E+00	8,43%	8,76E-01	11,53%	2,04E+00	7,32%	2,32E-01	29,59%	1,07E-01	29,31%
Fígado	9,88E+00	1,37%	2,22E+00	2,78%	6,94E-01	5,01%	8,38E-01	4,96%	3,36E-01	7,70%	1,62E-01	10,72%
Tireoide	1,82E+01	4,11%	6,38E+00	7,22%	2,67E+00	10,42%	1,53E+01	4,37%	9,79E-01	19,08%	4,39E-01	29,09%
Superfície óssea	2,32E+00	0,62%	6,91E-01	1,13%	3,06E-01	1,70%	1,26E+00	0,87%	1,60E-01	2,42%	7,59E-02	3,61%
Cérebro	4,73E+00	2,09%	1,22E+00	4,25%	5,84E-01	5,98%	4,67E+00	2,11%	4,51E-01	7,31%	6,35E-02	18,38%
Glândulas salivares	5,04E+00	2,36%	1,25E+00	5,02%	4,53E-01	7,84%	4,78E+00	2,43%	1,67E-01	14,79%	7,49E-02	21,97%
Pele	5,60E+00	0,42%	1,74E+00	0,76%	8,08E-01	1,13%	2,47E+00	0,65%	4,73E-01	1,55%	2,52E-01	2,20%
Olhos	1,75E+01	11,16%	3,58E+00	19,21%	1,19E+00	32,51%	1,75E+01	11,16%	5,56E-01	50,18%	2,06E-01	76,77%
Lente dos olhos	2,89E+01	3,90%	6,90E+00	7,91%	3,15E+00	10,84%	2,87E+01	3,92%	1,57E+00	17,78%	4,97E-01	28,83%
CC[E] (μSv)	6,08E+01	0,88%	1,37E+01	3,58%	5,41E+00	4,27%	6,86E+00	4,89%	2,39E+00	3,01%	1,41E+00	6,22%

* Glândulas suprarrenais, região extratorácica, parede da vesícula biliar, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, parede do intestino delgado, baço, timo, útero e coração.

Tabela 3. CC[HT] e CC[E] para o para o objeto simulador antropomórfico masculino

Órgãos	CC[HT] ($\mu\text{Sv/Gy}$)											
	Modelo - 1	Incerteza	Modelo - 2	Incerteza	Modelo - 3	Incerteza	Modelo - 4	Incerteza	Modelo - 5	Incerteza	Modelo - 6	Incerteza
Medula óssea	3,26E+00	0,56%	9,87E-01	0,99%	4,43E-01	1,48%	2,19E+00	0,69%	3,36E-01	1,80%	9,16E-02	3,27%
Cólon	8,82E+00	1,59%	2,01E+00	3,44%	6,31E-01	6,26%	6,96E-01	6,29%	3,55E-01	8,44%	1,98E-01	10,97%
Pulmão	8,15E+00	1,10%	2,73E+00	1,90%	1,18E+00	2,87%	5,21E+00	1,39%	3,19E-01	5,86%	1,86E-01	7,82%
Estômago	1,56E+01	1,89%	3,70E+00	3,85%	1,28E+00	6,43%	9,76E-01	7,97%	4,65E-01	12,43%	2,22E-01	17,64%
Seios	2,64E+01	2,72%	7,20E+00	5,34%	2,88E+00	9,00%	2,18E+01	2,95%	1,39E+00	12,61%	7,41E-01	19,34%
Demais Tecidos*	3,41E-02	0,40%	1,13E-02	0,71%	4,96E-03	1,05%	1,56E-02	0,57%	2,15E-03	1,54%	1,12E-03	2,20%
Gônadas	8,68E+00	5,31%	3,21E+00	8,13%	4,74E-01	20,53%	7,74E-01	18,81%	3,06E-01	28,68%	1,88E-01	30,34%
Bexiga	4,81E+00	5,18%	4,58E-01	17,45%	1,03E-01	28,57%	2,46E-01	26,70%	7,57E-02	35,43%	3,66E-02	51,15%
Esôfago	5,09E+00	5,36%	1,61E+00	8,42%	1,02E+00	11,75%	3,08E+00	6,53%	2,02E-01	25,38%	1,87E-01	31,32%
Fígado	1,34E+01	1,20%	3,57E+00	2,33%	1,58E+00	3,62%	2,00E+00	3,17%	4,85E-01	6,61%	3,23E-01	8,52%
Tireoide	1,51E+01	4,85%	5,55E+00	7,84%	2,78E+00	11,17%	1,46E+01	4,89%	9,27E-01	21,40%	2,84E-01	35,33%
Superfície óssea	2,96E+00	0,56%	9,11E-01	1,01%	4,12E-01	1,50%	1,97E+00	0,70%	3,13E-01	1,80%	9,17E-02	3,28%
Cérebro	4,14E+00	2,29%	1,33E+00	4,13%	6,71E-01	6,11%	4,12E+00	2,29%	1,13E+00	4,52%	9,24E-02	16,10%
Glândulas salivares	7,75E+00	1,91%	1,61E+00	4,35%	7,04E-01	6,85%	7,66E+00	1,91%	7,37E-01	6,24%	1,46E-01	18,28%
Pele	7,90E+00	0,37%	2,39E+00	0,67%	1,09E+00	1,01%	4,42E+00	0,49%	7,12E-01	1,30%	3,31E-01	2,01%
Olhos	2,85E+01	8,24%	8,51E+00	15,28%	4,83E+00	21,79%	2,81E+01	8,29%	6,79E+00	16,18%	6,27E-01	63,39%
Lente dos olhos	2,18E+01	3,94%	6,57E+00	7,20%	3,42E+00	11,73%	2,18E+01	3,94%	5,17E+00	8,12%	7,37E-01	28,13%
CC[E] (μSv)	9,92E+00	0,73%	2,76E+00	1,42%	1,06E+00	2,64%	4,75E+00	2,28%	4,65E-01	3,90%	2,28E-01	5,15%

* Glândulas suprarrenais, região extratorácica, parede da vesícula biliar, rins, linfonodos, músculo, mucosa oral, pâncreas, parede do intestino delgado, baço, timo, testículo e coração.

Tabela 4. Valores de CC[E] para cada cenário e a uma determinada distância (D) em relação à fonte de Am-241

Cenários simulados		D (cm)	CC[E] ($\mu\text{Sv}/\text{Gy}$)	Incerteza (%)
Cenário 1	Sem anteparo	50	35,36	1
Cenário 2	Sem anteparo	100	8,23	2,5
Cenário 3	Sem anteparo	150	3,23	3,5
Cenário 4	Com anteparo	50	5,80	3,5
Cenário 5	Com anteparo	100	1,43	3,5
Cenário 6	Com anteparo	150	0.82	5,5

Ainda sobre a tabela 4, observa-se que a maior redução das doses ocorre para o aumento de distâncias de 50 para 100 cm, redução de 75 e 77%, respectivamente. A menor redução para o cenário com anteparo é uma consequência da absorção dos fótons menos energéticos, uma vez que a seção de choque para o efeito fotoelétrico é maior para energias mais baixas.

A utilização do anteparo de chumbo reduziu significativamente os valores de CC[E] do operador. Esse efeito é observado para todas as distâncias simuladas entre a fonte e o operador. Contudo, a maior redução (84%) ocorre quando o estudante está situado a 50 cm da fonte. Essa diferença provém do efeito sinérgico da filtração dos fótons de baixa energia promovida pelo anteparo de chumbo e pela maior distância em relação à fonte. Assim, o operador interage com uma menor quantidade de fótons que também possuem maior energia, e, portanto, menor seção de choque para efeito fotoelétrico. Dessa forma, os fótons transferem menor energia aos tecidos do estudante.

Considerando o efeito do aumento da distância para os cenários com e sem anteparo de chumbo, nota-se que a blindagem tem um grande efeito positivo na redução dos CC. Com o uso da proteção, as doses são 84, 83 e 75% inferiores às doses sem proteção para distâncias de 50, 100 e 150 cm da fonte, respectivamente. Este resultado evidencia a importância da blindagem e distância como fatores de radioproteção.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi utilizada simulação de Monte Carlo para a avaliação de estratégias que podem ser utilizadas em um laboratório didático com utilização de radiação ionizante. Foram simulados cenários de exposição nos quais operadores manipulam uma fonte didática de Am-241. Foi observado que o aumento da distância, e o emprego de uma blindagem de chumbo, quando empregados em conjunto, reduzem consideravelmente o nível de exposição.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Dr. Richard Kramer por ceder os objetos simuladores virtuais antropomórficos e ao apoio financeiro: FAPEMIG (Projetos nº APQ-02934-15 e APQ-03049-15) e CNPq (Projetos nº 420699/2016-3 e 421603/2016-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATTIX, F. H. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. [s. l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- CASSOLA, V. F.; KRAMER, R.; BRAYNER, C.; KHOURY, H. J. Posture-specific phantoms representing female and male adults in Monte Carlo-based simulations for radiological protection. **Physics in Medicine and Biology**, [s.l.], v. 55, n. 15, p. 4399-4430, 2010.
- CASSOLA, V. F.; MILIAN, F. M.; KRAMER, R.; LIRA, C. A. B. de O.; KHOURY, H. J. Standing adult human phantoms based on 10th, 50th and 90th mass and height percentiles of male and female Caucasian populations. **Phys. Med. Biol.**, [s.l.], v. 56, n. 1, p. 3749–3772, 2011. DOI 10.1088/0031-9155/56/13/002.
- EZAG. Education and Training. **Eckert & Ziegler Strahlen- und Medizintechnik AG**, 21 set. 2017. Disponível em: https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/education_training/. Acesso em: 8 jul. 2020.
- FIRESTONE, R. B.; EKSTROM, L. P.; CHU, S. Y. F. WWW Table of radioactive isotopes. **APS**, [s. l.], p. CE–13, 1999.
- ICRP. Protection against ionizing radiation in the teaching of science. **ICRP Publication**, [s.l.], n. 13, v. 10, 1983.
- ICRP, 103., 2007, [s.l.]. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. [s.l.]: The International Commission on Radiological Protection, 2007.
- JAMIESON, J. H. The radioactive legacy in schools: Replacing old stock with new: Part 2: Finding new stuff to replace the old. **CARDIFF 2005**, [s. l.], p. 490, 2005.
- KUTHE, W.; TIMMERMANN, K. **Radioaktivität im Unterricht: kernphysikal. Experimente**. [s. l.]: Amersham-Buchler-GmbH-&-Company KG, 1985.
- NEVES, L. P.; FRANCO, A. B.; FRANÇA, M.; SOARES, M. R.; BELINATO, W.; SANTOS, W. S. CALDAS, L. V. E.; PERINI, A. P. Computational dosimetry in a pediatric i-CAT procedure using virtual anthropomorphic phantoms. **Radiation Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 167, 2020.
- ROGERS, D. W. O. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics. **Physics in Medicine & Biology**, [s. l.], v. 51, n. 13, p. R287, 2006.
- SOARES, M. R.; SANTOS, W. S.; NEVES, L. P.; PERINI, A. P.; BATISTA, W. O. G; BELINATO, W.; MAIA, A. F.; CALDAS, L. V. E. Dose estimate for cone beam CT equipment protocols using Monte Carlo simulation in computational adult anthropomorphic phantoms. **Radiation Physics and Chemistry**, [s. l.], v. 155, p. 252–259, 2019.
- WERNER, C. J. Mcnp users manual-code version 6.2. **Los Alamos National Laboratory**, [s. l.], 2017.