

Cálculo de coeficientes de conversão (CCs) de dose de um simulador antropomórfico computacional sentado exposto a uma fonte plana

William S. Santos, Albérico B. de Carvalho Júnior, Ariana J.S. Pereira, Marcos S. Santos, Ana F. Maia,

Universidade Federal de Sergipe,
49.100-000, Brazil

Emails: williathan@yahoo.com.br, ablohem@gmail.com
ariana-jsp@hotmail.com
m_souzasantos@hotmail.com
afmaia@ufs.br

Resumo. Neste trabalho foram calculados coeficientes de conversão (CCs) de dose equivalente e efetiva em termos de kerma no ar sugerido pela ICRP de nº 74. Os CCs de dose foram calculados considerando uma fonte de radiação plana e monoenergética para um espectro de energia variando de 10 keV a 2 MeV. Os CCs foram obtidos para quatro geometrias de irradiação, ântero-posterior (AP), postero-anterior (PA), lateral direito (RLAT) e lateral esquerdo (LLAT). Foram utilizados o código de transporte de radiação, Visual Monte Carlo (VMC), e um simulador antropomórfico de voxel feminino sentado (FAX). As diferenças observadas nos valores encontrados para os CCs nos quatro cenários de irradiação são resultados diretos da disposição dos órgãos no corpo e da distâncias desses a fonte de radiação. Os CCs obtidos poderão ser utilizados para estimativas mais precisas de dose em situações nas quais o indivíduo exposto à radiação esteja sentado, uma vez que normalmente os CCs disponíveis na literatura foram calculados utilizando simuladores sempre deitados ou em pé.

1 Introdução

O método Monte Carlo é uma técnica bem estabelecida para simular processos de irradiação e estimar grandezas físicas relacionadas à proteção radiológica. No contexto do transporte de radiação, este método envolve o uso de números aleatórios e de distribuição de probabilidade para determinar a energia, posição e direção das partículas ao atravessar um meio, bem como o tipo de interação física e deposição de energia das mesmas [1], [2].

A proteção dos trabalhadores, do público e do meio ambiente aos efeitos nocivos da radiação ionizante é uma tarefa primordial de prevenção e a responsável pela limitação dos riscos à saúde da população e dos seres vivos. Uma ação pragmática de proteção radiológica é a definição de limites legais aplicados à exposição ocupacional e do público. Estes limites são dados em termos de grandezas dosimétricas, como a dose equivalente e a dose efetiva. Nesse sentido, nas últimas três décadas o uso de simuladores antropomórficos computacionais (matemáticos e voxel) para estimar dose absorvida nos órgãos de uma vítima de acidentes radiológicos, por exemplo, vem se tornando um recurso muito utilizado. Estimar a distribuição de dose em um corpo de uma vítima é um indicador relevante na avaliação dos danos biológicos de exposição em caso de acidente radiológico causado

por uma fonte externa. Quando a distribuição da dose é avaliada com um modelo antropomórfico computacional, a postura e a morfologia da vítima devem ser reproduzidas de forma tão realista quanto possível [3],[4].

Nas últimas décadas, um maior número de órgãos passou a ser considerado nas simulações computacionais e muitas alterações no tamanho, na localização e na composições química e física dos órgãos e tecidos internos dos simuladores antropomórficos computacionais foram feitas. Entretanto, os simuladores antropomórficos computacionais mais utilizados para o cálculo de dose no âmbito científico estão geralmente na posição vertical (em pé), o que, em circunstâncias nas quais o indivíduo exposto fica prioritariamente sentado, torna a estimativa de dose absorvida pelos órgãos inexata. Nessa perspectiva, o uso de simuladores com postura condizente com a situação real de exposição é importante para a correta avaliação dos danos biológicos causados [5],[6].

Para efeito prático, muitos estudos vem sendo desenvolvidos na avaliação de grandezas relacionadas na proteção radiológica [7]. Nesse contexto, é comum fazer avaliação de dose através de coeficiente de conversão de dose (CCs) em termos de grandezas mensuráveis obtidas em condições normais de exposição. Nesse âmbito, a ICRP de nº 74 [8] fornece um conjunto de CCs de dose obtidos em fontes plana de radiação em geometrias padrão de exposição que são aplicáveis a irradiação de corpo inteiro. Sempre que um cenário de irradiação não pode ser adequadamente aproximado por uma das geometrias utilizadas, torna-se necessário calcular a dose por meio de simulação computacional específica, que descreva um cenário o mais próximo possível do real. Assim, o objetivo do presente estudo foi comparar os CCs de dose efetiva obtidos no simulador antropomórfico computacional sentado exposto a uma fonte de radiação plana e monoenergética com os valores fornecidos pela a ICRP 74. Avaliamos também as diferenças nos CCs de dose equivalente para o ovário e útero e apresentamos uma comparação com os valores obtidos pela ICRP 74 obtidos em um fantoma matemático em pé.

2 Materiais e métodos

Neste estudo, os CCs de dose equivalente e efetiva foram obtidos através do código de transporte de radiação, Visual Monte Carlo (VMC) [9], desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) e um simulador antropomórfico de voxel de uma mulher adulta, FAX (Female Adult VoXel), desenvolvida pelo grupo de dosimetria da Universidade Federal de Pernambuco [10]. A postura do fantoma, originalmente em pé, foi modificada para a posição sentada. Para simular a exposição, foi considerada 18 feixes de energia emitida por uma fonte plana de fótons monoenergéticos com energia de 10 keV até 2 MeV para as projeções antero-posterior (AP) e postero-anterior (PA), lateral esquerdo (LLAT) e lateral direito (RLAT), como é mostrado pelas Figuras 1 e 2 respectivamente.

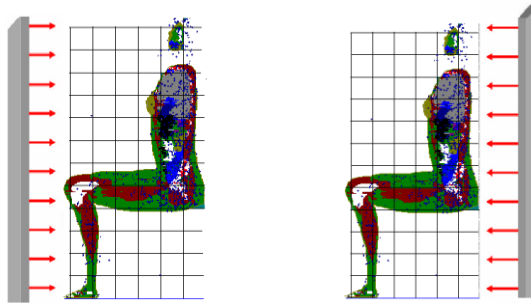


Figura 1a

Figura 1b

Figura 1. Geometrias de irradiação AP (Fig. 1a) e PA (Fig. 1b)

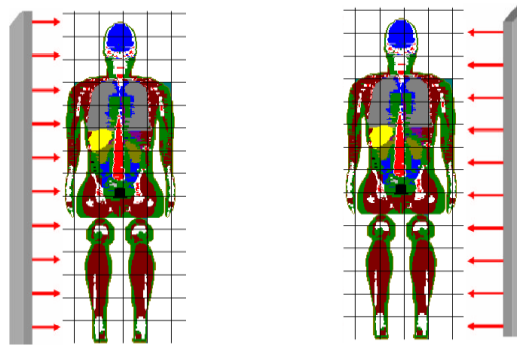


Figura 2a

Figura 2b

Figura 2. Geometrias de irradiação RLAT (Fig. 2a) e LLAT (Fig. 2b)

Com o intuito de diminuir as incertezas e de torná-las aceitáveis no processo de simulação dos CCs de dose, foram utilizados um total de 5×10^7 histórias em cada cenário de simulação. As doses equivalentes (H) e a dose efetiva (E) obtidas foram normalizadas em termos de kerma no ar (K_{ar}) seguindo a recomendação da ICRP de nº 74. Para fótons, o fator de peso da radiação é considerado igual a um ($w_r = 1$), logo a dose absorvida por kerma no ar (Gy/Gy) foi considerada por esse estudo numericamente igual à dose equivalente no órgão, como proposto pela ICRP 103 [7].

3 Resultados e discussão

Neste estudo, foram calculados os CCs de dose equivalente e efetiva em termos do kerma no ar para 20 órgãos considerados críticos. Entretanto, apresentaremos somente os resultados para CCs de dose equivalente para o ovário e o útero, que são localizados numa região que sofreu modificações físicas consideráveis após o novo redimensionamento da postura do simulador.

A comparação dos CCs de dose equivalente obtidos neste estudo para o ovário e útero relativo aos divulgados na ICRP 74 apresentam significativas variações entre os dois modelos estudados. Neste trabalho, o cálculo das doses absorvidas para os órgãos estudados foi com o simulador sentado, já os resultados apresentados pela ICRP 74 refletem para o simulador em pé.

Uma apresentação gráfica da comparação entre os CCs de dose equivalente no ovário obtida neste estudo e os fornecidos pela ICRP 74 é apresentada na Figura 3.

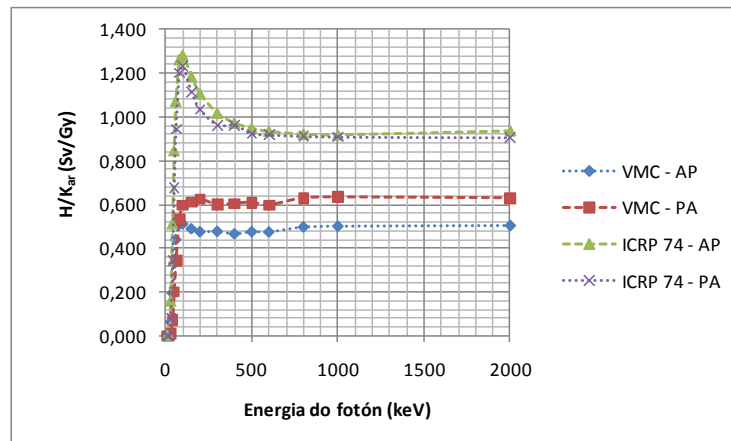


Figura 3. Comparação dos CCs de dose equivalente obtidos para o ovário para as projeções AP e PA

Como pode ser verificado pela Figura 3, os resultados obtidos para o ovário nas projeções AP/PA diferem dos apresentados pela ICRP 74. Os valores de CCs encontrados utilizando o simulador na postura sentada foram sempre menores dos que os valores encontrados utilizando a metodologia da ICRP 74. Portanto, o aumento do realismo na simulação comprova que os valores de dose equivalente para os ovários são superestimados quando a postura correta não é considerada. Observa-se uma diferença mais acentuada entre as projeções AP e PA na simulação de postura sentada devido a diferenças na distância fonte-ovário, o que pode ser observado na ilustração da Figura 1. Com o simulador em pé, como não há esta diferença de distância fonte-órgão, observa-se valores de CCs bem mais próximos, sendo os valores da projeção AP levemente maiores, devido a posição anatômica do ovário.

Outro resultado interessante é mostrado na Figura 4, na qual as doses no útero foram avaliadas. Observa-se mais uma vez diferenças muito acentuadas entre as duas posturas, comprovando a importância da correta simulação da postura. Mais uma vez, as doses encontradas com os CCs disponíveis na ICRP 74 superestimadas são superestimadas.

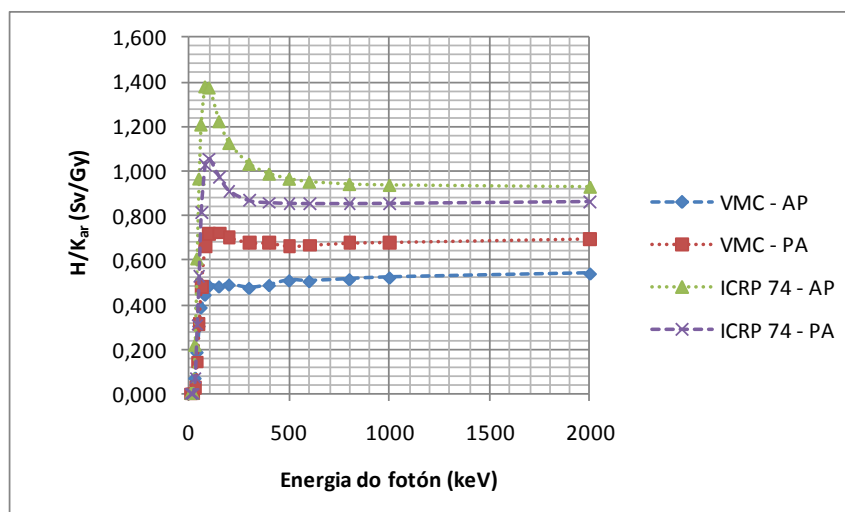


Figura 4. Comparação dos CCs de dose equivalente obtidos neste estudo com os valores sugeridos pela ICRP 74 para o útero na projeção AP e PA.

Devido às diferenças anatômicas nos modelos de exposição estudados e das distâncias dos simuladores a fonte de radiação, verifica-se que os valores dos CCs de dose efetiva obtidos neste estudo modificam consideravelmente comparados com os da ICRP 74, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1. CCs de dose efetiva por kerma no ar (Sv/Gy) em função da energia do fóton incidente

E/Kar (Sv/Gy)								
VMC					ICRP 74			
E (KeV)	AP	PA	RLAT	LLAT	AP	PA	RLAT	LLAT
10	0,003	0,002	0,001	0,030	0,007	0,002	0,002	0,002
15	0,023	0,005	0,004	0,004	0,040	0,006	0,005	0,005
20	0,064	0,013	0,013	0,012	0,122	0,018	0,015	0,016
30	0,241	0,078	0,066	0,050	0,416	0,128	0,078	0,090
40	0,453	0,211	0,177	0,111	0,788	0,370	0,205	0,241
50	0,646	0,363	0,158	0,173	1,106	0,640	0,345	0,405
60	0,767	0,491	0,202	0,220	1,308	0,846	0,455	0,528
80	0,847	0,626	0,244	0,265	1,433	1,019	0,554	0,628
100	0,833	0,663	0,255	0,276	1,394	1,030	0,571	0,641
150	0,793	0,659	0,254	0,273	1,256	0,959	0,551	0,620
200	0,762	0,649	0,254	0,269	1,173	0,915	0,549	0,615
300	0,730	0,642	0,258	0,274	1,093	0,880	0,557	0,615
400	0,717	0,645	0,265	0,278	1,056	0,871	0,570	0,623
500	0,712	0,647	0,271	0,282	1,036	0,869	0,585	0,635
600	0,706	0,651	0,274	0,284	1,024	0,870	0,600	0,647
800	0,708	0,661	0,282	0,297	1,010	0,875	0,628	0,670
1000	0,707	0,664	0,294	0,316	1,003	0,880	0,651	0,691
2000	0,717	0,690	0,323	0,331	0,992	0,901	0,728	0,757

A Tabela 1 apresenta os valores dos CCs de efetiva em termos de kerma no ar obtidos por este estudo (VMC) e pela ICRP 74. Uma apresentação gráfica dos dados da Tabela 1 nas projeções de irradiação AP/PA e RLAT e LLAT é fornecida na Figura 5 e 6 respectivamente.

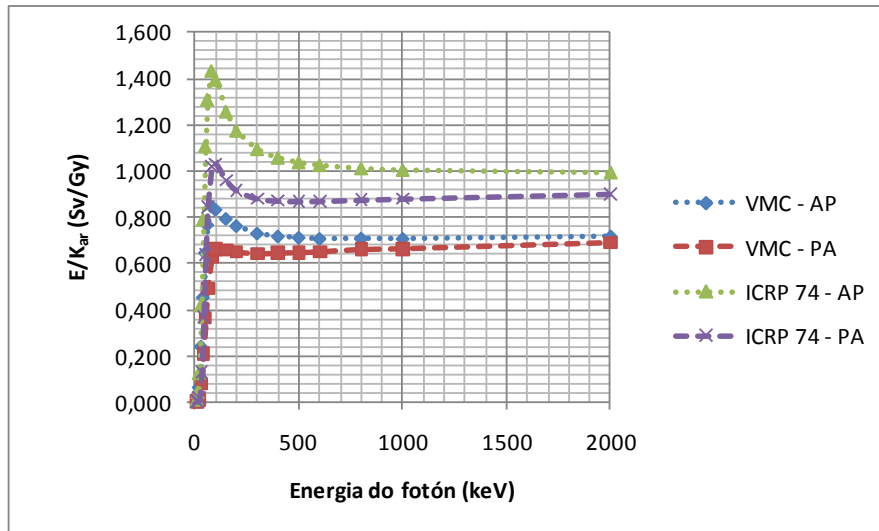


Figura 5. CCs de dose efetiva por kerma no ar (Sv/Gy) em função da energia do fóton incidente nas geometrias de irradiação AP e PA..

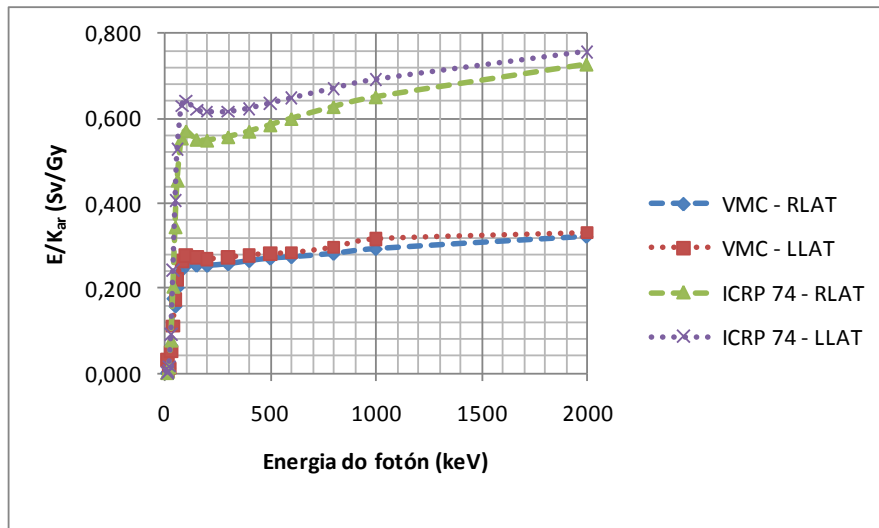


Figura 6. CCs de dose efetiva por kerma no ar (Sv/Gy) em função da energia do fóton incidente nas geometrias de irradiação RLAT e LLAT

A Figura 5 e 6 mostra uma relação direta entre os CCs de dose efetiva e a energia do fóton incidente para as projeções estudadas. Os resultados encontrados para os CCs de dose efetiva têm comportamento semelhante ao já discutido para os CCs de dose equivalente de ovário e útero: os valores para a postura sentada são muito inferiores aos valores para a postura em pé, comprovando que os valores não são corretamente estimados pela metodologia da ICRP 74. O gráfico da Figura 5 e 6 mostra um resultado importante. Em todos os cenários estudados, os valores dos CCs de dose efetiva obtidos por este estudo foram menores do que os apresentados pela ICRP 74, obtidos em com um fantoma matemático. A diminuição na dose efetiva, pode ser atribuída às diferenças dos modelos de exposição como localização, profundidade e distribuição dos órgãos e, sobretudo, nas distâncias da fonte ao simulador.

Outro aspecto importante e que deve ser levado em consideração é a disposição da estrutura óssea no corpo como forma de blindagem. A estrutura anatômica do esqueleto do fantoma de voxel proporciona maior blindagem estrutural para muitos órgãos internos em comparação ao esqueleto do modelo matemático. Os órgãos mais radiosensíveis, estão dispostos no tronco do simulador e estão protegidos pela estrutura óssea do mesmo, como por exemplo, nos cenários de irradiação RLAT e LLAT, a disposição dos ossos dos braços do simulador de voxel blindam a passagem de fótons impedindo que parte desses fótons atinja os órgãos de maiores fatores de ponderação.

4 Conclusão

As variações dos valores de CCs de dose efetiva e dose equivalente, ambos em termos de kerma no ar obtidos neste estudo para as projeções AP/PA e RLAT/LLAT comparado com os valores apresentados pela ICRP 74 são bastante divergentes. Essas divergências nos CCs de dose efetiva e equivalente podem ser atribuídas às diferenças anatômicas dos simuladores como na localização, tamanho, distribuição e profundidade dos órgãos no corpo com a postura dos mesmos. A distância dos órgãos a fonte e a geometria de irradiação são dois fatores importantes nas variações de CCs de dose. Quanto mais próximo o órgão tiver da fonte, maior será o CCs de dose equivalente. A Figura 5 mostra um resultado previsível deste estudo. Na projeção AP, o fantoma obteve os maiores CCs de dose efetiva. A principal razão disso é que órgãos de maiores fatores de peso estão localizados superficialmente na parte frontal do simulador. Assim, doses mais altas nesses órgãos resultarão em maiores CCs de dose efetiva nessa projeção.

Procurando se avaliar um real processo de atenuação e espalhamento da radiação de uma determinada situação de exposição, como por exemplo, um acidente nuclear, neste trabalho forneceu os coeficientes de conversão de dose equivalente e efetiva para situações em que um indivíduo estava sentado, quando exposto numa fonte de radiação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UFS, CAPES, CNPq e "INCT em Metrologia das Radiações em Medicina" (CNPq/FAPESP), pelo apoio financeiro parcial.

Referências

1. CHAO, T.C; BOZKURT, A; XU, X.G. Conversion coefficients based on the Vip-Man anatomical model and EGS4-VLSI code for external monoenergetic photons from 10 keV to 10 MeV. *Health Phys.* (2001), 163-183.
2. BOZKURT, A; CHAO, T.C XU, X.G. Fluence-to-dose conversion coefficients from monoenergetic neutrons below 20 MeV based on the VIP-man anatomical model. *Phys. Med. Biol.* (2000), 3059-3079.
3. A. FERRARI, M PELLICIONI and PILLON. Fluence to effective dose conversion coefficients for protons from 5 MeV to 10 TeV. *Rad. Prot. Dosimetry*, (1997), 85-91.
4. J. CHEN. Fluence-to-absorbed dose conversion coefficients for use in radiological protection of embryo and foetus against external exposure to protons from 100 MeV to 100 GeV. *Rad. Prot. Dosimetry*, (2006), 378 – 383.
5. D. C. KAUL, S. et al.. *Organ Dosimetry, in Reassessment of Atomic Bomb Radiation Dosimetry*, Ed., W.C. Roesch (Hiroshima, Radiation Effects Research Foundation), 1987.
6. H. AKKURT, K. F., ECKERMAN, and J.C. WAGNER, S. SHERBINI, “ PIMBAL: Phantom with Moving Arms and legs.” *Trans. Amer. Nucl. Soc.* (2007), 396- 397.
7. ICRP 103. Recommendations of the international commission on radiological protection. Elsevier, (2007), 37, 2-4.
8. ICRP 74. Conversion Coefficients for use in Radiological protection Against External Radiation, International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford. (1996), 45-65.
9. Hunt JG, Da Silva FCA, Dos Santos DS, et al. Visual Monte Carlo and its application to internal and external dosimetry. In: Kling A, Barao F, Nakagawa M, Tavora L, Vaz P, eds. *Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications. Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference.* Berlin, Germany: Springer-Verlag; 345–350; 2000.
10. KRAMER, R.; KHOURY, H.; VIEIRA, J.; et al. All about FAX: a female adult voxel phantom for Monte Carlo calculation in radiation protection dosimetry. *Phy. Med. Biol.* (2004), 203-216