



Cálculo de coeficientes de conversão de risco de câncer para exposições médicas e ocupacionais usando simulação de Monte Carlo em procedimentos cardíacos de radiologia intervencionista

W. S. Santos^a; L. P. Neves^b; A. P. Perini^b; W. Belinato^c; L. V. E. Caldas^a, A. F. Maia^c

^a Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN – SP). Av. Prof. Lineu Prestes, 2242, 05508-000 São Paulo – SP, Brasil;

williamontecarlo@gmail.com

^b Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Av. João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, 38400-902, Uberlândia - MG, Brasil.

^c Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe (UFS), 49100-000 São Cristóvão – SE, Brasil.

RESUMO

Procedimentos cardíacos estão entre os mais comuns em radiologia intervencionista (RI), e podem levar a altas exposições médicas e ocupacionais, pois na maioria dos casos, são procedimentos complexos e de longa duração. Neste trabalho, foram calculados os coeficientes de conversão (CC) para o risco de câncer, normalizados pelo produto kerma área (PKA), para o paciente, médico cardiologista e enfermeira usando simulações de Monte Carlo. O paciente e o cardiologista foram representados pelos simuladores antropomórficos MASH, e a enfermeira pelo simulador antropomórfico FASH. Os simuladores foram incorporados ao código de Monte Carlo MCNPX. Dois cenários foram criados: em I a cortina de chumbo e equipamentos de proteção suspensos não foram inseridos, e em II estes equipamentos foram inseridos. Os parâmetros radiográficos empregados nas simulações de Monte Carlo foram: tensão do tubo entre 60 kVp e 120 kVp; filtração do feixe de 3,5 mmAl e área do feixe de 10 x 10 cm². Os valores médios dos CCs para oito projeções (em 10⁻⁴/Gy.cm²) foram 1,2 para o paciente, 2,6E-03 (cenário I) e 4,9E-04 (cenário II) para o cardiologista e 5,2E-04 (cenário I) e 4,0E-04 (cenário II) para a enfermeira. Os resultados mostram uma redução significativa nos CCs para os profissionais, quando a cortina de chumbo e equipamentos de proteção suspensos são empregados. O método de avaliação empre-

gado neste trabalho pode fornecer informações importantes sobre o risco de câncer do paciente e profissionais, e desta forma, melhorar a proteção dos trabalhadores em procedimentos cardíacos de RI.

Palavras-chave: Radiologia intervencionista, simulação de Monte Carlo, risco de câncer.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um crescimento no número de procedimentos de radiologia intervencionista (RI) para diagnosticar e tratar doenças cardiovasculares em pacientes utilizando raios X [1,2]. A principal razão para este aumento foi a percepção de que a técnica é útil em várias situações complexas, nas quais é possível, portanto, evitar cirurgias. Além disso, o avanço da técnica tem possibilitado a realização de procedimentos cada vez mais complexos como angiografia e angioplastia coronária. Sendo assim, mesmo considerando o risco da radiação, a não realização de uma cirurgia pode ser uma vantagem muito relevante para pacientes críticos e também pode resultar na diminuição do tempo de internação. No entanto, não se pode desconsiderar que a dose coletiva da população e os riscos associados à saúde estão aumentando [3]. A ocorrência de efeitos determinísticos, especialmente pele (paciente) e dos olhos (médico), tem sido um assunto de grande preocupação. Além disso, a estimativa do risco para a saúde devido a efeitos estocásticos da radiação, especialmente para os pacientes mais jovens, também está sob investigação.

As doses dos profissionais em procedimentos de RI são as mais altas na área da medicina que utiliza radiação X [4]. Nesse tipo de procedimento, é necessário que o médico se posicione próximo ao paciente e ao tubo de raios X, utilizando um grande número de imagens estáticas e dinâmicas, ocasionando alto tempo de exposição dos profissionais e do paciente. Assim, a exposição prolongada destes indivíduos aos raios X tem que ser investigada, pois pode resultar no surgimento de efeitos estocásticos e, até mesmo, de efeitos determinísticos. Nesse sentido, é necessário estabelecer uma metodologia que permita estimar as doses com boa precisão e, assim, possibilitar uma melhor avaliação dos riscos.

A estimativa de risco de câncer em órgãos e tecidos é complicada pois, requer a determinação direta de doses em órgãos e tecidos, na maioria das vezes, impossível de ser realizada. Uma alternativa para resolver o problema é a utilização de simulação computacional para estimar as doses em órgãos e tecidos, cuja técnica mais empregada é o método Monte Carlo (MC), que utiliza simuladores antropomórficos virtuais para representar o indivíduo exposto [5,6]. O objetivo deste trabalho foi criar um modelo computacional de exposição para procedimentos de angiografia e angioplastia coronária em RI que permitisse a avaliação dos riscos de câncer associados a estas doses de radiação. Para alcançar os objetivos, foram calculados coeficientes de conversão (CC) para riscos de câncer em órgãos/tecidos e risco efetivo para um paciente, um médico cardiologista e uma enfermeira em uma configuração típica de RI.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar a dose absorvida nos órgãos e tecidos do paciente, médico cardiologista e enfermeira, foi utilizada simulação de Monte Carlo com o código de transporte de radiação MCNPX [7]. Este código pode lidar com o transporte e interações de fótons, elétrons, nêutrons e outras partículas para uma ampla faixa de energia em geometrias tridimensionais. Para representar o paciente e o cardiologista foi utilizado o simulador antropomórfico adulto masculino denominado de MASH e para a enfermeira foi utilizado o simulador antropomórfico adulto feminino denominado de FASH [8]. Estes simuladores foram construídos com base em superfícies *mesh* e suas características atendem as recomendações dos dados anatômicos e fisiológicos do homem e da mulher de referência da ICRP 89 [9]. Estes simuladores possuem mais de 100 órgãos e tecidos segmentados com significância para a dosimetria.

Para evitar problemas de locação de memória pelo código MCNPX, as matrizes originais dos simuladores foram redimensionadas, mas de modo que as características fisiológicas e anatômicas fossem preservadas. O redimensionamento das matrizes foi realizado por meio do software de processamento de imagens digitais FANTOMAS [10]. Por meio deste software foi possível aumentar as dimensões dos voxels de 0,12 para 0,24 cm de aresta. Com a redução destas matrizes, foi possível incorporá-las ao código MCNPX instalado num computador de 16 GB de

memória RAM com um processador Intel Core i7. A matriz original da FASH na postura em pé tem dimensão de 442 x 256 x 1354 voxels, as matrizes do simulador MASH na postura em pé (cardiologista) e deitado (paciente) têm dimensões, respectivamente, de 478 x 258 x 1462 e 526 x 236 x 1462 voxels. As novas matrizes passaram a ter dimensões: 221 x 128 x 677 voxels (enfermeira), 239 x 129 x 731 voxels (cardiologista) e 263 x 118 x 731 voxels (paciente).

Todos os componentes de um ambiente onde são realizados os procedimentos de RI foram modelados em âmbito computacional para simulação de transporte de radiação. As características químicas e físicas da maioria dos materiais utilizados nos cenários de irradiação foram extraídas da literatura [11]. Neste sentido, foi construída uma sala com dimensões de 6,5 m (comprimento), 3 m (largura) e 2,65 m (altura) preenchidas de ar atmosférico e com paredes de concreto de 22 cm de espessura. No interior desta sala, além dos profissionais e do paciente, foram inseridos os principais componentes do equipamento de raios X, como o intensificador de imagem e o tubo de raios X. Foi modelada uma mesa cirúrgica de fibra de carbono com base metálica para receber o paciente que é colocado em decúbito dorsal. A mesa tem uma largura de 66 cm, espessura de 15 cm e comprimento de 185 cm e está posicionada a altura de 90 cm em relação ao piso da sala. O cardiologista e a enfermeira foram posicionados do lado esquerdo da cama, no nível da virilha do paciente. As distâncias relativas ao centro do tórax do paciente, considerando o limite mais próximo do cardiologista e da enfermeira (lado direito do corpo desses profissionais), foram respectivamente de 60,5 cm e 145,5 cm. No cenário montado, o tubo de raios X e a base metálica móvel podem ser movimentados para simular as projeções anguladas usuais nos procedimentos de RI. A Figura 1 mostra o modelo de exposição computacional com o trio de simuladores representando o paciente, o cardiologista e a enfermeira, em uma configuração típica de RI.

Além dos equipamentos de proteção, como avental de chumbo, protetor de tireoide e óculos plumbíferos, foram construídos a cortina de chumbo e protetores suspensos de vidro com espessura equivalente em chumbo de 0,5 mm. Estes equipamentos são frequentemente utilizados para a proteção dos profissionais médicos que são expostos à radiação primária e, sobretudo, à radiação espalhada do paciente e mesa cirúrgica. Estes novos dispositivos de proteção são mostrados na Figura 2.

Figura 1: Cenário I: Principais componentes de uma sala de RI: (1) cardiologista, (2) enfermeira, (3) paciente, (4) óculos plumbíferos, (5) protetor de tireóide, (6) avental de chumbo, (7) PKA, (8) mesa cirúrgica, (9) tubo de raios X e (10) intensificador de imagem.

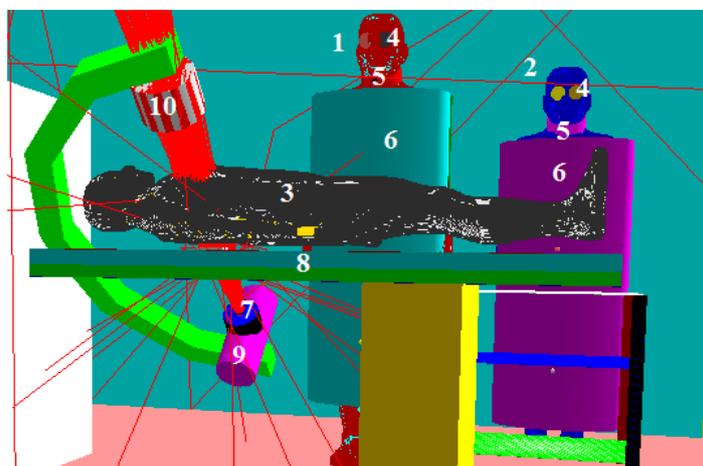
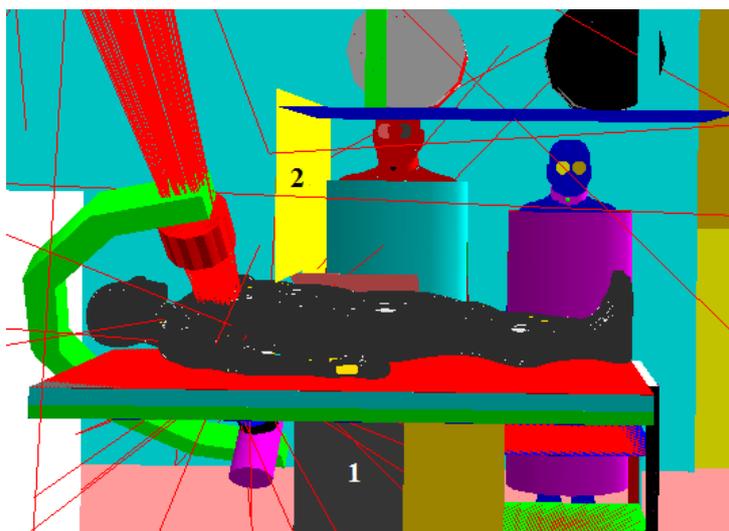


Figura 2: Cenário II: Neste cenário foram acrescentadas: (1) Cortina de chumbo e (2) protetores de vidro plumbífero suspensos.



O tubo de raios X foi simplificado para uma fonte puntiforme de fótons que emite partículas isotropicamente em um ângulo sólido especificado pelo tamanho de campo e pela distância focal. Para simular a câmara de ionização que é acoplada na saída da maioria dos equipamentos de raios X, foi modelado um objeto de dimensão de 5 x 5 cm e espessura de 1 cm, preenchido com ar atmosférico para calcular o produto kerma área (PKA). Este objeto foi posicionado na saída do tubo de raios X, como mostra a Figura 1. O PKA foi calculado por meio do produto do kerma no ar (K_{ar}) (obtido pelo *tally F6*) pela área irradiada do objeto, que é equivalente a área examinada do paciente. Neste trabalho, o PKA foi calculado em todas as projeções estudadas. A dose absorvida nos órgãos e tecidos dos simuladores antropomórficos foi calculada usando a energia depositada obtida com o código MCNP (*tally *F8*) em MeV e, posteriormente foi convertida para as unidades de $J.kg^{-1}$ ou Gy.

Os coeficientes de conversão para o risco de câncer por PKA para os órgãos e tecidos foram calculados utilizando tensões no tubo variando de 60 a 120 kVp, filtração do feixe de 3,6 mmAl e ângulo anódico de 12°. Outros parâmetros utilizados nas simulações foram: área de campo de radiação de 10 cm x 10 cm; distância foco-pele de 55 cm ântero-posterior (AP), 50 cm pósterio-anterior (PA), 40 cm oblíquo anterior esquerdo (LAO90°), 40 cm oblíquo anterior direito (RAO90°), 45 cm cranial (CRAN30°), 43,5 cm caudal (CAUD30°), 40 cm oblíquo anterior direito (RAO45°) e 56,5 cm oblíquo anterior esquerdo (LAO45°). Com o intuito de reduzir as incertezas estatísticas associadas à dose absorvida, foi utilizado em cada cenário um total de $1,0 \times 10^9$ histórias.

Os coeficientes de conversão (CC) para risco de câncer por PKA em um determinado órgão/tecido após procedimento cardíaco de angiografia e angioplastia coronária foram calculados utilizando a equação 1.

$$CC = r_T \times H_T / PKA \quad (1)$$

Onde r_T é o fator de risco de câncer atribuível a um órgão/tecido específico definido pela BEIR VII [12] e H_T é a dose equivalente no órgão/tecido T.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os riscos de incidência de câncer dependem da dose absorvida no órgão, do tipo de órgão irradiado, idade e sexo dos indivíduos expostos. Por meio do conhecimento das doses equivalentes de cada órgão/tecido estudado e de seus respectivos fatores de riscos apresentado pelo comitê BEIR VII [12], que leva em consideração a idade e o sexo dos indivíduos expostos, foi possível calcular os CCs para riscos de indução de câncer em termos do PKA para os principais órgãos do paciente, do cardiologista e da enfermeira. Os principais resultados dos CCs para risco de câncer foram calculados para os seguintes órgãos e tecidos: cólon, pulmão, bexiga, fígado, próstata (paciente e médico cardiologista), mama (enfermeira), outros (esôfago, cérebro, superfície óssea, pele, glândulas salivares, adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, intestino delgado, baço, timus), e gônadas para o paciente e médico cardiologista, leucemia (trata-se câncer na medula óssea vermelha), tireoide e câncer sólido (estômago, cólon, fígado, pulmão, próstata, bexiga e outros). Para o cardiologista e a enfermeira, os resultados são apresentados para duas situações de exposição: a primeira sem cortina de chumbo na mesa cirúrgica e sem barreira suspensa feita de vidro plumbífero, denominado de cenário I, e a segunda com estes dispositivos de proteção, denominado de cenário II. A média dos CCs para todas as projeções de feixe e espectros estudados para o paciente, cardiologista e enfermeira são listados na Tabela 1.

Tabela 1: Risco de câncer normalizado (em $10^{-4}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) para órgãos e tecidos do paciente, cardiologista e enfermeira em procedimentos cardíacos de RI.

Órgãos	Paciente	Cardiologista		Enfermeira	
		Cenário I	Cenário II	Cenário I	Cenário II
Cólon	3,7E-03	5,0E-05	1,2E-05	7,7E-07	5,2E-08
Pulmão	2,0E-02	4,7E-06	1,2E-06	3,9E-06	2,5E-06
Estômago	4,1E-03	1,9E-06	4,6E-07	7,0E-08	4,7E-08
Bexiga	5,9E-05	1,8E-06	4,9E-07	--	--
Fígado	2,5E-03	6,0E-07	1,4E-07	1,6E-08	9,4E-09
Próstata	1,5E-05	6,3E-07	1,5E-07	--	--
Mama	--	--	--	5,4E-06	3,5E-06
Outros	3,0E-01	7,7E-04	1,0E-04	9,3E-05	6,3E-05

Tireoide	3,6E-04	1,0E-06	3,0E-07	3,0E-06	1,8E-06
Leucemia	8,7E-03	4,8E-05	4,8E-06	3,3E-06	2,5E-06
Câncer sólido	1,2E+00	2,6E-03	4,8E-04	5,3E-04	3,9E-04

Como esperado, os maiores CCs de dose equivalente foram obtidos para o paciente, resultando em uma maior probabilidade para o aparecimento de câncer para este indivíduo. O aumento de dose no paciente foi acompanhado também de um aumento de dose nos profissionais. Dentre os órgãos avaliados do paciente, observa-se que os riscos de ocorrência de câncer na medula óssea vermelha (leucemia), dos pulmões, em “outros” e “cânceres sólidos” foram os que obtiveram maiores valores de CCs, e o risco calculado para “outros” foi dominado pelo câncer do baço.

Diferenças significativas foram observadas entre os órgãos dos indivíduos avaliados. Para maioria dos órgãos radiosensíveis localizados na região alvo do feixe primário de radiação, como os pulmões, foram obtidos CCs bem superiores do que os dos órgãos localizados longe do feixe primário, como a próstata, bexiga e tireoide. Além disso, as variações nos valores dos CCs de risco de câncer estão relacionadas com a dose absorvida e com o grau de radiosensibilidade dos órgãos e tecidos. Em geral, os CCs para risco de câncer podem ser reduzidos significativamente com a diminuição da tensão aplicada ao tubo. Para o paciente, o risco é menor quando as projeções PA, LAO45° e RAO45° são utilizadas. Os CCs para risco de câncer para o cardiologista e a enfermeira diminuem quando é utilizada a mesa cirúrgica com cortina de chumbo e barreira de proteção de vidro plumbífero são adotados.

A média dos CCs de risco efetivo de câncer para procedimento cardíaco do paciente, cardiologista e enfermeira são listados na Tabela 2.

Tabela 2: Média dos CCs de risco efetivo para procedimento cardíaco do paciente, cardiologista e enfermeira.

	Média dos CCs ($10^{-4}/\text{Gy.cm}^2$)		
	Cenário I	Cenário II	Variação entre I e II
Paciente	1,2	--	--
Cardiologista	2,6E-03	4,9E-04	81%
Enfermeira	5,2E-04	4,0E-04	24%

Como mostrado neste estudo, os coeficientes de risco de câncer foram em todas as situações mais baixos para os profissionais. Entretanto, os riscos aumentam com o aumento do número de exames e, dessa forma, cuidados adicionais de proteção radiológica devem ser seguidos por todos os profissionais que se expõem ocupacionalmente.

Os valores apresentados neste trabalho mostraram que para um procedimento cardíaco típico, a média do risco de incidência de câncer para o cardiologista do cenário I é cinco vezes maior do que a da enfermeira. As razões disso são que, dentre os indivíduos estudados, a enfermeira é o indivíduo que se posiciona mais distante do centro do campo de radiação e, além disso, parte do seu corpo está parcialmente protegido pelo corpo do cardiologista. Entretanto, cabe notar que as mulheres são mais sensíveis à radiação do que os homens [14]. Para as mesmas condições de exposição, em um procedimento típico de angiografia ou angioplastia coronária, o risco para a mulher é maior do que para um homem com a mesma idade. Esta diferença é principalmente devido ao risco de câncer de mama e do pulmão.

4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, podemos comprovar e quantificar o aumento dos CCs em decorrência do aumento da dose absorvida nos órgãos e tecidos dos indivíduos estudados em consequência da não utilização da cortina de chumbo na mesa cirúrgica e da barreira suspensa feita de vidro plumbífero. Doses maiores em órgãos e tecidos implicam no aumento dos CCs do risco de desenvolver câncer. Os resultados mostram claramente a importância do uso da cortina de chumbo e dos protetores suspensos de vidros plumbíferos. Estes dispositivos de proteção com espessura equivalente a 0,5 mm de Pb reduziram, em média, os CCs de risco de câncer em 81% e 24% para o cardiologista e enfermeira, respectivamente. É importante destacar que a redução desses CCs, entre outros fatores, depende da angulação do feixe.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho receberam apoio das seguintes agências de fomento brasileiras: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, Projetos No. 2013/15669-3 e 2013/21741-9), CAPES (Projeto Pró-Estratégia 1999/2012), CNPq (Projeto Universal 470753/2013-7), MCT: Projeto INCT Metrologia das Radiações em Medicina.

Ao professor Dr. Richard Kramer da Universidade Federal de Pernambuco por ceder uma versão dos simuladores antropomórficos computacionais MASH e FASH.

REFERÊNCIAS

1. SAMARA, E.T.; AROUA, A.; BOCHUD, F. O.; OTT, B.; THEILER, T. Exposure of the Swiss population by medical x-rays: 2008 review. **Health Phys.** vol. 102: pp. 263-270, 2012.
2. UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **UNSCEAR 2008 Report. Sources of Ionizing Radiation**, New York, United Nations, 2010.
3. ICRP 120. International Commission on Radiological Protection. **Radiological Protection in Cardiology. ICRP Publication 120**. Ann. ICRP 42, 2013.
4. FALKNER, K and VANO, E. Deterministic effects in interventional radiology. **Rad. Prot. Dosim.** vol. 94, pp. 95–98, 2001.
5. BOZKURT, A and BOR, D. Simultaneous determination of equivalent dose to organs and tissues of the patient and of the physician in interventional radiology using the Monte Carlo method. **Phys. Med. Biol.** vol. 52, pp.317 – 330, 2007.
6. SANTOS, W. S.; CARVALHO JR, A. B.; HUNT, J. G and MAIA, A. F. Using the Monte Carlo technique to calculate dose conversion coefficients for medical professionals in interventional radiology. **Radiat. Phys. Chem.** vol. 95, pp.177–180, 2014.
7. PELOWITZ, D. B. **MCNPX User's Manual (version 2.7.0). Report LA-CP-11-00438**. Los Alamos National Laboratory, USA, 2011.

*International Joint Conference RADIO 2014
Gramado, RS, Brazil, August 26-29, 2014*

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA - SBPR

8. CASSOLA, V. F.; LIMA, V. J.; KRAMER, R and KHOURY, H. J. FASH and MASH: Female and male Adult human phantoms based on polygon *meSH* surfaces. Part II. Dosimetric calculations. **Phys. Med. Biol.** vol. 55, pp. 163-189, 2010.
9. ICRP 89. International Commission on Radiological Protection. **Basic anatomical and physics data for use in radiological protection: reference values.** Pergamon Press. Oxford, 2003.
10. VIEIRA, J. W and LIMA, F. R. A. Software to digital image processing to be used in the voxel phantom development. **Cell. Mol. Biol.** vol. 55, pp. 16-22, 2009.
11. MCCONN, R. J.; GESG, C. J.; PAGH, T. T.; RUCKER, R. A and WILLIAMS, R. G. **Compendium of material composition data for radiation transport modeling.** Pacific Northwest National Laboratory, USA, 2011.
12. NCR. National Research Council. **Health effects of exposure to low Levels of ionizing radiation (BEIR VII-Phase 2).** DC: National Academy Press. Washington, USA, 2007.
13. SAMARA, E. T.; AROUA, A.; BOCHUD, F. O.; DELABAYS, A.; LAEDERMANN, J.P and VERDUN, F.R. Patient Radiation Risk in Interventional Cardiology. **OMICS J Radiology.** vol. 1, pp. 1- 9, 2012.
14. ICRP 103. International Commission on Radiological Protection. **Recommendations of the ICRP publication 103.** Elsevier. vol. 37, pp. 61-62, 2007.