

Avaliação de Doses Equivalentes em PET/CT com ^{18}F Utilizando o Método Monte Carlo com Código MCNPX

Walmir Belinato^{1*}, William Souza Santos², Ana Paula Perini², Lucio Pereira Neves², Linda V. E. Caldas³, L.V.E. Divanizia N. Souza⁴

^{1*}Coordenação de Núcleo Comum, IFBA-Campus de Vitória da Conquista, Bahia

²Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG

³Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), São Paulo, SP

⁴Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE

RESUMO

A técnica diagnóstica PET/CT (Positron Emission Tomography/Computer Tomography) une recursos diagnósticos da Medicina Nuclear e da Radiologia. A técnica PET produz imagens metabólicas por meio de radiofármacos emissores de pósitrons. O presente trabalho usou o método Monte Carlo (MMC), especificamente o código de Monte Carlo N-Particle – MCNPX, para simular a interação da radiação envolvendo fótons e partículas, tais como pósitrons e elétrons, com simuladores antropomórficos adultos virtuais em exames de PET/CT e determinar doses absorvidas e equivalentes em exames de pacientes adultos masculino e feminino. Para os cálculos, considerou-se os parâmetros dos feixes de tomografia computadorizada (colimação e filtração) de dois equipamentos distintos e as atividades de ^{18}F -FDG comumente empregadas em exames de rotina. Foram estimados novos valores para fatores de conversão de dose absorvida por atividade administrada (valores-S) para doses internas em órgãos de pacientes com características similares aos simuladores de voxels escolhidos. Comparando-se com as doses absorvidas em órgãos devido ao ^{18}F (doses internas), as doses absorvidas médias externas - devido ao feixe de raios X de CT - equivalem a 14,2% (equipamento GE) e 26,3% (equipamento Siemens). Essa diferença entre equipamentos pode ser relacionada principalmente com a quantidade de cortes de CT necessários para o exame de corpo inteiro (40 mm/rotação para o GE e 20 mm/rotação para o Siemens), com uso do filtro gravata borboleta (filtro *bowtie*). Considerando-se as doses absorvidas internas, os novos coeficientes por atividade administrada calculados apresentaram um acréscimo próximo de 30% em relação aos valores da ICRP 106 e podem ser associados com representação morfológica mais realista dos órgãos dos simuladores utilizados e à introdução de fatores de espalhamento para fótons, porque os simuladores foram dispostos sobre uma mesa de exames, o que não é levado em consideração na ICRP 106.

Palavras-chaves: Dosimetria interna, PET/CT, Método Monte Carlo

1. INTRODUÇÃO

O exame de Tomografia Computadorizada (do inglês *Computer Tomography-CT*) associado ao de Tomografia por Emissão de Pósitron (do inglês *Pósitron Emission Tomography-PET*) - PET/CT - tem o objetivo de fornecer informações sobre regiões internas com neoplasias e/ou

alterações metabólicas. As imagens são adquiridas a partir de dois processos distintos: feixe de raios X, externo ao paciente, que ao interagir com um conjunto de detectores possibilita o registro das imagens anatômicas e a partir da detecção dos fótons anticolineares com energia de 0,511 MeV, resultantes da aniquilação dos pósitrons, o que possibilita o mapeamento da distribuição do ^{18}F em uma determinada região do corpo (Robilotta, 2006).

A distribuição do radionuclídeo nos órgãos internos depende da biocinética de cada paciente. O padrão da distribuição pode ser modificado pela existência de neoplasias, uma vez que nas regiões neoplásicas a captação de radiofármaco é modificada (Huang *et al.*, 2015).

Este estudo faz uso do Método Monte Carlo (MMC), especificamente o código *Monte Carlo N-Particle eXtended* (MCNPX), para simular a interação de feixes de fótons e partículas, tais como pósitrons e elétrons, com simuladores antropomórficos virtuais adultos em exames de PET/CT e determinar valores de dose absorvida e equivalente devido a esse tipo de exame. Para tal, utilizou-se simuladores antropomórficos computacionais com representação dos órgãos e estruturas internas realistas de pacientes adultos. As metodologias empregadas foram idênticas às utilizadas por Stabin e Siegel (2003) e Gu *et al.* (2009).

O MMC pode ser descrito como um método estatístico que utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação. O código MCNPX é uma extensão do código de Monte Carlo MCNP, utilizado para simulação de processos nucleares em simuladores antropomórficos computacionais. A versão 2.7.0 considera o transporte e a interação de radiação composta de fótons e partículas como nêutrons, elétrons e prótons, bem como uma diversidade de nucleons e íons (Pelowitz, 2011).

As doses absorvidas em um simulador computacional adulto masculino, recomendado pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) para cálculo de dose equivalente efetiva, podem ser determinadas empregando-se uma metodologia de validação do filtro em tomografia de cabeça usando simulações de Monte Carlo (Ferreira *et al.*, 2011a). As características geométricas do filtro gravata borboleta dos tomógrafos não são informadas pelo fabricante, sendo possível simulá-lo ajustando-se as suas dimensões com auxílio de medições da grandeza *índice de dose em tomografia computadorizada* - CTDI (Ay *et al.*, 2009; Gu *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2011a). Isso possibilita comparar os valores de dose determinados para um simulador antropomórfico computacional com as doses obtidas em dosímetros MOSFET, por exemplo, inseridos num simulador antropomórfico físico (Demarco *et al.*, 2005).

O termo *objeto simulador* também tem sido utilizado para denominar um modelo computacional "anatômico" definido, que não apresente alguns aspectos fisiológicos, tais como a respiração ou fluxo sanguíneo. As técnicas de manipulação de imagens atuais possibilitam a

aquisição de informações das estruturas internas dos simuladores humanos através de um elemento de volume cúbico (voxel), contendo informações da composição e da densidade do material em questão. Um conjunto consecutivo de imagens segmentadas de CT da cabeça aos pés representa uma matriz tridimensional de voxel, que pode ser introduzida em códigos de transporte da radiação para cálculo da dose absorvida em órgãos e tecidos.

O Método Monte Carlo (MMC) pode ser descrito como um método estatístico, onde se utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação. O código MCNPX é uma extensão do código de Monte Carlo MCNP, para simulação de processos nucleares em simuladores antropomórficos computacionais. A versão 2.7.0 considera o transporte e a interação de radiação composta de fótons e partículas como nêutrons, elétrons e prótons, bem como uma diversidade de nucleons e íons (Pelowitz, 2011).

Os simuladores antropomórficos computacionais FASH (Feminino Adulto MESH) e MASH (Masculino Adulto meSH), utilizando superfícies MESH por meio de métodos de modelagem 3D e atlas anatômico, foram desenvolvidos pelo grupo de dosimetria numérica do DEN/UFPE (Kramer *et al.*, 2010). Cassola *et al.* (2010a) realizaram ajustes nesses simuladores para adequar as suas estruturas de acordo com o posicionamento do indivíduo, em pé ou deitado, devido ao efeito da gravidade. Este aspecto produz variações nos cálculos dosimétricos para os órgãos e tecidos internos (Cassola *et al.*, 2010b). Com o auxílio do código de MMC pode-se determinar doses efetiva e equivalente em um equipamento de tomografia utilizando tais simuladores (Ferreira *et al.*, 2011b).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dois equipamentos de PET/CT investigados neste estudo foram: GE Discovery VCT, que possui detectores de cristais de BGO, e Siemens Biograph True Point 16, com cristais de LSO. A principal implicação desta característica para o equipamento Siemens é a aquisição mais rápida das imagens de PET.

Para as simulações, empregou-se os simuladores MASH e FASH desenvolvidos por Cassola *et al.*, 2010a, representando um indivíduo de referência para os gêneros masculino e feminino, respectivamente. Esses simuladores podem ser representados tanto na postura em pé quanto na deitada (Cassola *et al.*, 2010b). Para a determinação das doses devido ao feixe de CT, apenas a postura deitada, com os membros superiores excluídos, foi utilizada nas simulações deste trabalho, uma vez que o paciente permanece nessa postura durante o exame.

O processo de retirada dos braços foi realizado utilizando o software *FANTOMAS* (Vieira e Lima, 2009). Em seguida, realizou-se a recontagem do número de voxels dos órgãos internos, uma vez que regiões como pele, músculo e ossos, são alteradas, como também a massa do simulador.

Os simuladores estudados possuem mais de 100 órgãos e tecidos segmentados com significância para a dosimetria. Suas matrizes foram redimensionadas, de modo que as características fisiológicas e anatômicas fossem preservadas, evitando problemas de locação de memória pelo código MCNPX.

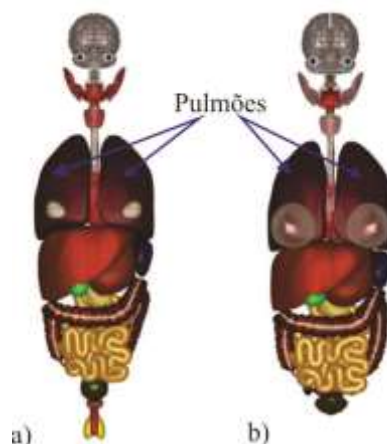
A tabela I apresenta as principais características físicas dos simuladores MASH e FASH, e essas reforçam que as estruturas internas de ambos são diferentes entre si. A distribuição dos órgãos internos deles é mostrada na figura 1. Os pulmões dos simuladores, por exemplo, possuem volumes e, conseqüentemente, massas diferentes. No MASH o pulmão tem 1300 g, enquanto que no FASH 950 g.

TABELA I. Características dos simuladores antropomórficos empregados neste estudo.

Simuladores	Massa (kg)	Altura (cm)	Matriz Coluna x linha x cortes	IMC (kg/m²)
Adulto deitado-masculino (MASH_D)	72,70	175,60	263 x 118 x 731	23,58
Adulto deitado-feminino (FASH_P)	60,04	162,50	260 x 104 x 677	22,74

Para a modelagem do feixe do tomógrafo empregou-se uma metodologia experimental, utilizando o medidor de filtração total AGMS-D da Radcal, descrito na literatura (Belinato *et al*, 2015). Como o parâmetro de filtração total de feixe de CT é relevante para a determinação da dose absorvida em órgãos internos dos simuladores antropomórficos, para determinação desse parâmetro, foi utilizado o kit Accu Gold Radcal, calibrado de fábrica, com exposição do sensor AGMS-D no feixe dos tomógrafos de cada equipamento PET/CT, estando os respectivos tubos de raios X na posição 12 h.

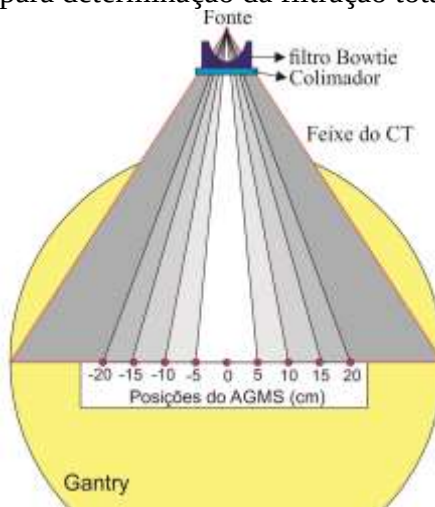
FIGURA 1: Órgãos internos dos simuladores (A) MASH e (B) FASH com pulmões indicados pelas setas (adaptado de CASSOLA *et al*, 2010a)



A figura 2 mostra nove pontos de posicionamento do sensor AGMS-D para a determinação de filtração total, a uma distância radial de 40 cm do isocentro do *gantry*. Os valores da filtração total em cada posicionamento foram determinados com o equipamento de PET/CT no modo serviço, com o tubo parado, efetuando um único disparo. Depois de processar as medições, as curvas de filtração foram traçadas levando em conta a distância radial ao isocentro do *gantry* do aparelho. Com o auxílio de um programa gráfico, considerando-se as dimensões do equipamento, foi determinada a geometria do filtro gravata borboleta para o código MCPNX.

Os espectros de energia utilizados nas simulações dos tomógrafos foram gerados pelo programa *Report 78 Spectrum Processor (SRS) 78* (Cranley *et al.*, 1997), sem adição de filtração, uma vez que a filtração total para cada equipamento de PET/CT estudado foi determinada experimentalmente.

FIGURA 2. Esquema de posicionamento do sensor AGMS-D, Radcal em relação ao *gantry* para determinação da filtração total



Para validação das simulações do feixe de CT, uma câmara de ionização foi modelada no código MCNPX como um conjunto de quatro cilindros concêntricos, com comprimentos de 10 cm, de forma a representar características geométricas idênticas ao modelo 10x6-3CT-Radcal.

As simulações dos tomógrafos de raios X no MCNPX fornecem resultados por meio do *tally* F6 (MeV/g/partícula). Os parâmetros para a determinação das doses absorvidas nas células de interesse no cenário de simulação consideram as características do feixe de raios X de cada equipamento, incluindo: espectro de energia, filtração total, forma do feixe, ângulo anódico e colimação.

Para determinar a dose absorvida em cada procedimento de CT, os valores do *tally* F6 (MeV/g/partícula) foram convertidos para dose absorvida em unidades de mGy/100 mAs por um fator de conversão (CF), proposto por GU et al. (2009), conforme a equação 1:

$$(CF)_{E,NT} = \frac{CTDI_{(100,air,medido\ por\ 100\ mAs)}E_{NT}}{CTDI_{(100,air,simulado\ por\ partícula)}E_{NT}} \quad (1)$$

As doses absorvidas nas regiões de interesse foram determinadas a partir da equação 2, em unidades de mGy/100 mAs, considerando-se ΣN como a soma das energias depositadas em MeV/g/partícula por todas as rotações durante o exame de PET/CT simulado.

$$D_{absoluta} = D_{simulada} \cdot CF \Sigma N \quad (2)$$

A fonte do feixe de tomografia foi construída com características idênticas à confeccionada por Gu *et al* (2009). A partir das especificações dos equipamentos simulados, considerou-se *gantry* com abertura de 70 cm, distância do ponto focal ao isocentro de 54 cm, distância do ponto focal aos detectores de 95 cm e abertura de feixe de 56° para ambos os equipamentos; a espessura de corte foi de 40 mm para o GE e 20 mm para o Siemens.

A metodologia utilizada na simulação das doses absorvidas pelo emissor de pósitrons ^{18}F foi idêntica à utilizada por Stabin e Siegel (2003) empregando os simuladores MIRD-5 (Adam e Eve). A taxa de dose absorvida por atividade nos órgãos alvo (r_T) devido aos órgãos fontes (r_S) é calculada por meio da equação 3:

$$\dot{D}(r_T, t) = \sum_{r_S} A_{(r_S, t)} S_{(r_T \leftarrow r_S, t)} \quad (3)$$

Nessa equação, $A_{(r_S, t)}$ representa a atividade do radionuclídeo em um órgão fonte e $S_{(r_T \leftarrow r_S, t)}$ os coeficientes de deposição de dose (Valor S), que são descritos por meio da equação 4.

$$S_{(r_T \leftarrow r_S, t)} = \sum_i \frac{\Delta_i \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_i, t)}{M(r_T, t)} \quad (4)$$

Em que Δ_i e $\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_i, t)$ são as energias depositadas pelo radionuclídeo e as frações da energia absorvida pelos órgãos alvo, respectivamente.

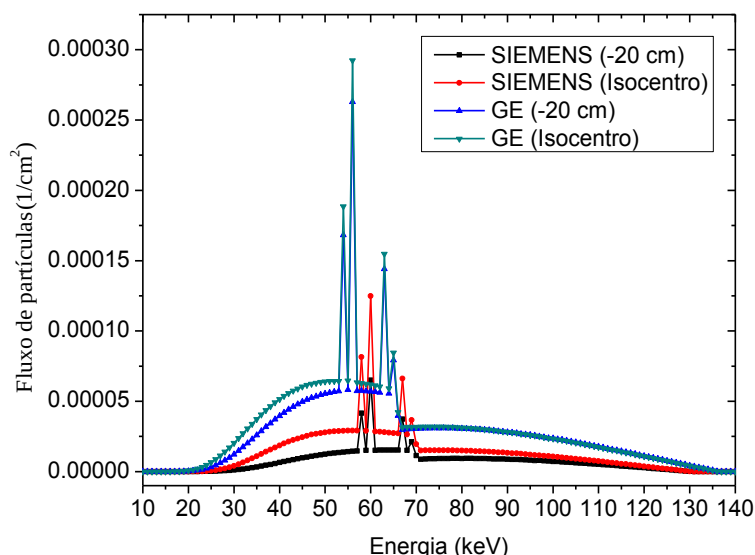
Os radionuclídeos foram distribuídos em 22 órgãos e no corpo inteiro de cada simulador. O *tally* *F8 foi utilizado para determinação da energia depositada nos órgãos internos por unidade de massa, uma vez que esse *tally* considera que a deposição de energia pode ocorrer fora do volume do voxel quando fótons e elétrons de energia maiores que 200 keV interagem com os tecidos.

Nos anexos A1 a A5, são apresentados dados que foram empregados neste estudo, incluindo coeficientes de conversão de dose, valores S nos órgãos-fonte nos simuladores adultos para o ^{18}F , doses equivalentes por atividade administrada nos simuladores adultos para ^{18}F -FDG, considerando-se os dois equipamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 apresenta os espectros dos feixes de raios X gerados para os tomógrafos no MCNPX, considerando o filtro *bowtie* de cada um dos equipamentos de PET/CT e quilovoltagens pico de 130 kVp (Siemens) e 140 kVp (GE), uma vez que essas são as normalmente empregadas em protocolos de PET/CT de corpo inteiro. De acordo com a figura 3, a geometria construída para o filtro *bowtie* do equipamento da Siemens aumenta a energia do efetiva do feixe.

FIGURA 3. Espectros dos feixes de raios X simulados em MCNPX por equipamentos PET/CT (GE e Siemens)

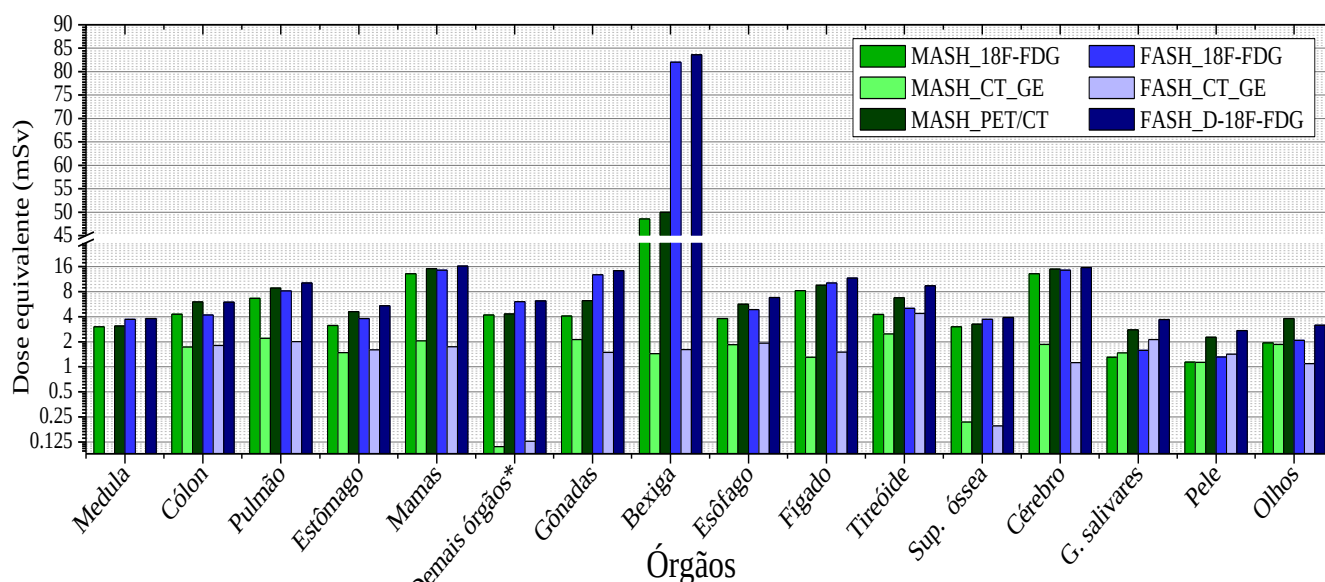


O crescimento da energia efetiva do feixe contribui para o aumento da dose absorvida pelo paciente, embora no equipamento da Siemens a energia de pico do feixe seja reduzida em 10 keV

(Belinato *et al.*, 2015). Este resultado está de acordo com estudos publicados por Ay *et al* (2009) e Gu *et al* (2009).

Para exame de PET/CT cardíaco em pacientes adultos, recomenda-se atividades entre 185 MBq (5 mCi) e 370 MBq (10 mCi). Considerando-se a maior atividade (370 MBq) e os parâmetros 140 kVp-140 mAs para o tomógrafo GE e 130 kVp-120 mAs para o Siemens, foram determinadas as doses equivalentes para o MASH e o FASH na postura deitada (Figuras 4 e 5). Essas doses variaram com a atividade de ^{18}F (^{18}F -FDG) injetada no paciente e os parâmetros utilizados na tomografia.

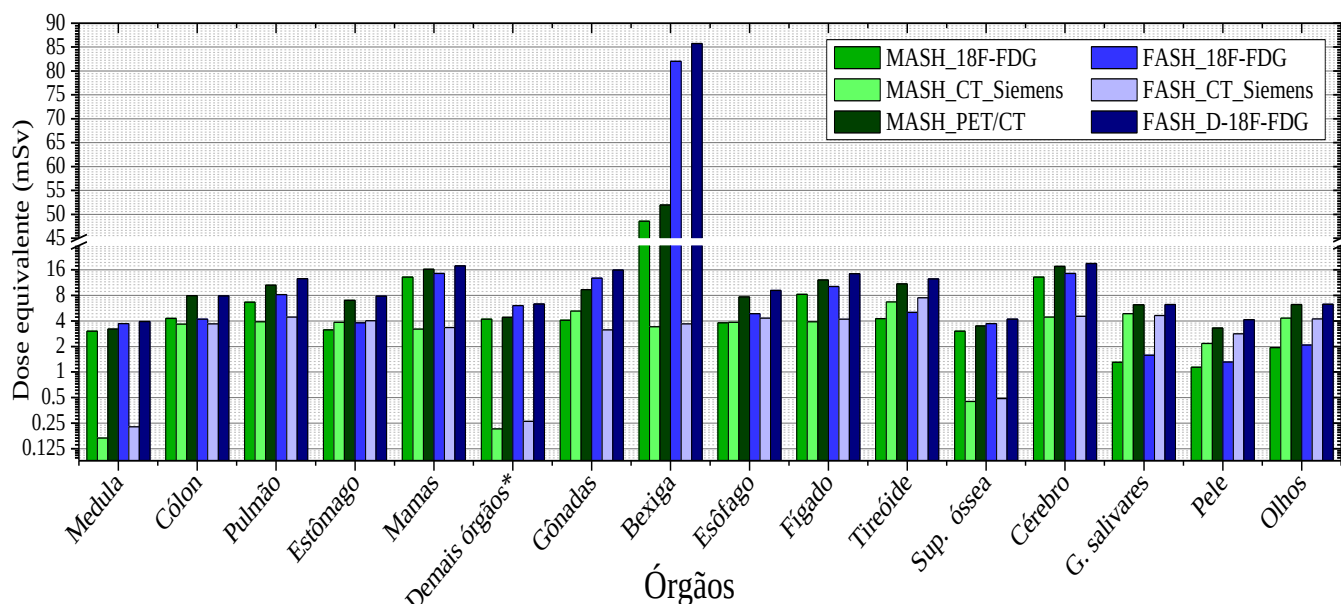
FIGURA 4. Doses equivalentes para exame PET/CT com tomógrafo GE (140 mAs) e atividade 370 MBq



* Adrenais, Região Extratorácica(ET), Vesícula biliar, Coração, Rins, Nódulos linfáticos, Músculos, Mucosa oral, Pâncreas, Ovários, Intestino delgado, Baço, Timus, Útero.

Para exames PET/CT de corpo inteiro em simuladores de adultos masculino e feminino, os feixes de tomografia da GE apresentaram 16,2% e 12,2% (média de 14,2%), respectivamente, comparados com 29,4% e 23,1% (média de 26,3%) para equipamentos Siemens. As doses equivalentes totais, somando-se doses internas devido às emissões do ^{18}F e doses externas com raios X, foram 8,73 mSv e 11,69 mSv (GE) e 10,37 e 13,34 mSv (Siemens) para os simuladores masculino e feminino, respectivamente.

FIGURA 5. Doses equivalentes para exame PET/CT com tomógrafo Siemens (120 mAs) e atividade de 370 MBq



* Adrenais, Região Extratorácica(ET), Vesícula biliar, Coração, Rins, Nódulos Infáticos, Músculos, Mucosa oral, Pâncreas, Ovarios, Intestino delgado, Baço, Timus, Útero.

O produto corrente-tempo utilizado nos protocolos de PET/CT de corpo inteiro em adultos é de 140 mAs no equipamento GE e 120 mAs para o Siemens. Levando-se em conta esse aspecto, seriam esperadas menores doses absorvidas pelos órgãos para exames com o GE. O fabricante desse equipamento afirma que o emprego do sistema CARE Dose 4D, que faz o ajuste do mAs de acordo com a região do corpo a ser irradiada durante a tomografia, reduz as doses em até 66% (Siemens, 2007). Nossos resultados apontam para a necessidade de ativação do sistema CARE Dose 4D no equipamento da Siemens com intuito de minimizar a exposição do paciente durante o exame.

O documento ICRP n°106 (2008) apresenta coeficientes de dose por atividade administrada para radiofármacos utilizados em PET/CT. As doses devido à tomografia computadorizada são normalmente menosprezadas, mas podem ter valores consideráveis em pacientes pediátricos, conforme Yang *et al.* (2014), principalmente se protocolos de CT para baixas doses não forem utilizados. Considerando os resultados apresentados aqui, tem-se que essa contribuição pode chegar até quase 30% em adultos.

Outro aspecto importante que diferencia os dois equipamentos de PET/CT é o material do conjunto de detectores em PET. A Siemens utiliza o LSO e a GE o BGO. Essa característica do equipamento Siemens faz com que o exame seja realizado com tempo de aquisição 50% menor, embora Freedenberg *et al.* (2014) relatem que a aquisição de imagens em regiões de baixa atividade por LSO tenha menor qualidade.

4. CONCLUSÕES

Foi demonstrada a importância da correta simulação da filtração do feixe de raios X para determinação das doses em CT empregando-se o código MCNPX.

As doses estimadas em adultos devido ao feixe de raios X são responsáveis por 14,2% e 26,3% da dose total em exames realizados nos equipamentos PET/CT GE e Siemens, respectivamente. Considerando as doses devido ao ^{18}F -FDG, os coeficientes de dose absorvida por atividade administrada apresentaram um acréscimo de 30% em relação aos valores da ICRP (2008). As variações encontradas nas doses devido ao ^{18}F -FDG estão associadas a uma melhor representação morfológica dos órgãos internos dos simuladores utilizados neste estudo e ao espalhamento de fótons devido os simuladores estarem dispostos sobre uma mesa de exames, o que não é levado em consideração no cálculo dos coeficientes obtidos pela ICRP (2008).

Considerando que pacientes podem ter massas corporais muito distintas das dos simuladores empregados aqui, estudos semelhantes podem ser realizados para casos particulares em simuladores com variações nessas massas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CNPq e CAPES pelo apoio financeiro e aos serviços de medicina nuclear da CLIMEDI (Aracaju, SE) e do Hospital São Rafael (Salvador, BA) pela disponibilidade no uso dos equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AY, M. R. et al. The influence of x-ray spectra filtration on image quality and patient dose in the GE VCT 64-Slice cardiac CT scanner. **IEEE: Bioinf. and Biom. Eng.**, 2009. ICBBE 2009. Readings of the 3rd International Conference on, p. 1-4, 2009.
- BELINATO, W. et al. Monte Carlo simulations in multi-detector CT (MDCT) for two PET/CT scanner models using MASH and FASH adult phantoms. **Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A.** v. 784, p. 524–530, 2015.
- CRANLEY, K. et al. Catalog of diagnostic x-ray spectra and other data. **The Institute of Physics and Engineering in Medicine**, Report No. 78, 1997.
- CASSOLA, V. F. et al. FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon meSH surfaces: part I. Development of the anatomy. **Physics in Medicine and Biology**, v. 55, p. 133–162, 2010a.

- CASSOLA, V. F. et al. Posture-specific phantoms representing female and male adults in Monte Carlo-based simulations for radiological protection. **Physics in Medicine and Biology**, v. 55, p. 4399–4430, 2010b.
- DEMARCO, J. J. et al. A Monte Carlo based method to estimate radiation dose from multidetector CT (MDCT): cylindrical and anthropomorphic phantoms. **Physics in Medicine and Biology**, v. 50, p. 3989–4004, 2005.
- FERREIRA, C. C. et al. A way forward for the development of an exposure computational model to computed tomography dosimetry. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B**, v. 269, p. 778-785, 2011a.
- FERREIRA, C. C. et al. Effective and equivalent doses for CT head examinations calculated using the voxelized phantoms MASH and FASH. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B**, v. 269, p. 1867–1870, 2011b.
- FREEDENBERG, M. I. et al. Performance and limitations of positron emission tomography (PET) scanners for imaging very low activity sources. **Medical Physics**, v. 30, p. 104-110, 2014.
- GU, J. et al. The development, validation and application of a multi-detector CT (MDCT) scanner model for assessing organ doses to the pregnant patient and the fetus using Monte Carlo simulations. **Physics in Medicine and Biology**, v. 54, p. 2699–2717, 2009.
- HUANG, B. et al. Patient-specific dosimetry using pretherapy [124I]m-iodobenzylguanidine ([124I]mIBG) dynamic PET/CT imaging before [131I]mIBG targeted radionuclide therapy for neuroblastoma. **Molecular Imaging and Biology**, v. 17, p. 284-294, 2015.
- KRAMER, R. et al. MAX06 and FAX06: update of two adult human phantoms for radiation protection dosimetry. **Physics in Medicine and Biology**, v. 51, p. 3331-3346, 2006.
- ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. **ICRP publication 106**. Addendum 3 to ICRP Publication 53. Ann. ICRP 38, n. 38, 2008.
- PELOWITZ, D. B. MCNPX user's manual version 2.7.0. **Los Alamos, LANL**, 2011.
- ROBILOTTA, C. C. A tomografia por emissão de pósitrons: uma nova modalidade na medicina nuclear brasileira. **Revista Panamericana de Salud Publica**, v. 20, p. 134-142, 2006.
- SIEMENS. Biograph™ TruePoint PET•CT System Specifications. Knoxville: **Siemens**, 2007.
- STABIN, M. G.; SIEGEL, J. A. Physical models and dose factors for use in internal dose assessment. **Health Phys**, v. 85, n. 3, p. 294-310, 2003.
- VIEIRA, J. W.; LIMA, F. R. A. Software to digital image processing to be used in the voxel phantom development. **Cellular and Molecular Biology**, v. 55, p. 16-22, 2009.

ANEXOS

TABELA A1. Coeficientes de conversão de dose em CT para os simuladores antropomórficos FASH e MASH (mGy/100 mAs)

Órgãos	GE				Siemens			
	FASH-140 kVp		MASH-140 kVp		FASH-130 kVp		MASH-130 kVp	
	Dose	Incert.	Dose	Incert.	Dose	Incert.	Dose	Incert.
Medula vermelha	0,060	0,006	0,046	0,001	0,188	0,023	0,139	0,016
Cólon	1,292	0,214	1,237	0,031	3,089	0,369	3,049	0,328
Pulmão	1,439	0,212	1,575	0,045	3,708	0,423	3,248	0,370
Estômago	1,147	0,234	1,058	0,039	3,363	0,374	3,210	0,379
Mamas	1,248	0,180	1,464	0,022	2,783	0,314	2,678	0,285
Demais órgãos*	0,091	0,003	0,078	0,001	0,218	0,006	0,178	0,004
Gônadas	1,067	0,186	1,523	0,035	2,619	0,290	4,360	0,353
Bexiga	1,149	0,128	1,029	0,033	3,075	0,323	2,841	0,255
Esôfago	1,374	0,181	1,322	0,043	3,587	0,418	3,209	0,326
Fígado	1,072	0,172	0,933	0,032	3,488	0,446	3,262	0,401
Tireóide	3,129	0,422	1,769	0,041	6,241	0,716	5,577	0,622
Superfície óssea	0,139	0,002	0,155	0,002	0,405	0,007	0,374	0,006
Cérebro	0,805	0,100	1,327	0,034	3,771	0,377	3,697	0,339
Glândulas salivares	1,521	0,256	1,049	0,015	3,874	0,389	4,067	0,410
Pele	1,013	0,030	0,807	0,007	2,356	0,027	1,811	0,020
Olhos	0,779	0,149	1,330	0,031	3,525	0,300	3,609	0,299
Dose equivalente	1,022	0,057	1,012	0,009	2,571	0,101	2,544	0,093

TABELA A2. Valores S para ^{18}F (mGy/MBq.s) para órgãos-fonte de simuladores adultos

Órgãos	Fash_D	Mash_D
Supra-Renais	3,25E-03	2,96E-03
Cérebro	5,04E-05	4,57E-05
Mamas	1,53E-04	2,69E-03
Intestino grosso	1,21E-04	1,18E-04
Vesícula biliar	8,28E-04	6,70E-04
Intestino delgado	8,15E-05	7,45E-05
Estômago	3,65E-05	3,40E-05
Coração	1,93E-04	1,64E-04
Rins	1,86E-04	1,68E-04
Fígado	4,62E-05	3,73E-05
Pulmões	4,90E-05	3,96E-05
Músculos	3,67E-06	2,40E-06
Ovários/Testículos	3,84E-03	1,30E-03
Pâncreas	4,12E-04	3,58E-04
Medula*	1,40E-05	8,78E-06
Superfícies ósseas	1,37E-05	1,04E-05
Pele	1,59E-05	1,14E-05
Baço	3,93E-04	3,46E-04
Timo	2,11E-03	1,70E-03
Tireóide	2,50E-03	2,14E-03
Bexiga**	1,49E-04	7,37E-05
Útero/Próstata	6,08E-04	2,63E-03
Corpo inteiro	1,64E-06	1,44E-06

* Valores determinados em frações dos ossos esponjosos do esqueleto-RBM

** Conteúdo da bexiga como órgão fonte

TABELA A3. Dose absorvida (Gy/MBq) por órgãos para ^{18}F -FDG em simuladores adultos

Órgãos	MASH	FASH	Média
Medula	1,25E-02	1,87E-02	1,56E-02
Cólon	1,16E-02	1,13E-02	1,15E-02
Pulmão	1,79E-02	2,20E-02	2,00E-02
Estômago	8,48E-03	1,03E-02	9,38E-03
Mamas	3,54E-02	3,92E-02	3,73E-02
Demais órgãos*	1,14E-02	1,64E-02	1,39E-02
Gônadas	1,11E-02	3,46E-02	2,28E-02
Bexiga	1,31E-01	2,22E-01	1,76E-01
Esôfago	1,03E-02	1,32E-02	1,17E-02
Fígado	2,23E-02	2,75E-02	2,49E-02
Tireóide	1,15E-02	1,37E-02	1,26E-02
Superfície óssea	8,19E-03	1,01E-02	9,12E-03
Cérebro	3,54E-02	3,92E-02	3,73E-02
Glândulas salivares	3,53E-03	4,25E-03	3,89E-03
Pele	3,07E-03	3,55E-03	3,31E-03
Olhos	5,22E-03	5,61E-03	5,41E-03
Dose equivalente	1,98E-02	2,77E-02	2,37E-02

* Adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, ovários, intestino delgado, baço, timo, útero

TABELA A4. Dose absorvida (mGy) para exame PET/CT em simulador adulto com equipamento *GE-Discovery VCT* (140 mAs e 370 MBq ^{18}F -FDG)

Órgãos	MASH ^{18}F -FDG	MASH CT	MASH PET/CT	FASH ^{18}F -FDG	FASH CT	FASH PET/CT
Medula	3,03	0,06	3,10	3,72	0,08	3,80
Cólon	4,30	1,73	6,03	4,19	1,81	5,99
Pulmão	6,64	2,20	8,84	8,16	2,01	10,17
Estômago	3,14	1,48	4,62	3,81	1,61	5,41
Mamas	13,11	2,05	15,15	14,51	1,75	16,26
Demais órgãos*	4,21	0,11	4,32	6,07	0,13	6,20
Gônadas	4,09	2,13	6,22	12,80	1,49	14,29
Bexiga	48,56	1,44	50,00	82,02	1,61	83,63
Esôfago	3,80	1,85	5,65	4,87	1,92	6,79
Fígado	8,26	1,31	9,56	10,18	1,50	11,69
Tireóide	4,26	2,48	6,73	5,06	4,38	9,44
Superfície óssea	3,03	0,22	3,25	3,72	0,19	3,91
Cérebro	13,11	1,86	14,96	14,51	1,13	15,64
Glândulas salivares	1,31	1,47	2,78	1,57	2,13	3,70
Pele	1,14	1,13	2,27	1,31	1,42	2,73
Olhos	1,93	1,86	3,79	2,07	1,09	3,17
Dose equivalente	7,32	1,42	8,73	10,26	1,43	11,69

* Adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, ovários, intestino delgado, baço, timo, útero

TABELA A5. Dose absorvida (mGy) para exame PET/CT em adulto com equipamento SIEMENS *Biograph 16* (120mAs e 370 MBq ^{18}F -FDG)

Órgãos	MASH ^{18}F -FDG	MASH CT	MASH PET/CT	FASH ^{18}F -FDG	FASH CT	FASH PET/CT
Medula	3,03	0,17	3,20	3,72	0,23	3,94
Cólon	4,30	3,66	7,96	4,19	3,71	7,89
Pulmão	6,64	3,90	10,54	8,16	4,45	12,61
Estômago	3,14	3,85	6,99	3,81	4,04	7,84
Mamas	13,11	3,21	16,32	14,51	3,34	17,85
Demais órgãos*	4,21	0,21	4,43	6,07	0,26	6,34
Gônadas	4,09	5,23	9,32	12,80	3,14	15,94
Bexiga	48,56	3,41	51,97	82,02	3,69	85,71
Esôfago	3,80	3,85	7,65	4,87	4,30	9,17
Fígado	8,26	3,91	12,17	10,18	4,19	14,37
Tireóide	4,26	6,69	10,95	5,06	7,49	12,55
Superfície óssea	3,03	0,45	3,48	3,72	0,49	4,20
Cérebro	13,11	4,44	17,54	14,51	4,53	19,04
Glândulas salivares	1,31	4,88	6,19	1,57	4,65	6,22
Pele	1,14	2,17	3,31	1,31	2,83	4,14
Olhos	1,93	4,33	6,26	2,07	4,23	6,30
Dose equivalente (mSv)	7,32	3,05	10,37	10,26	3,09	13,34

* Adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, ovários, intestino delgado, baço, timo, útero