



RADIO XXX

**RAZÕES ENTRE DOSES EFETIVAS PARA MODELOS
TOMOGRAFICOS E MATEMÁTICOS DEVIDO A EXPOSIÇÕES
EXTERNAS A FÓTONS**
**R. Kramer¹, H. J. Khoury², J. W. Vieira³, H. Yoriyaz⁴,
F. R. A. Lima⁵, E. C. M. Loureiro⁶**

Copyright 2005, ABENDE

Trabalho apresentado no RADIO 2005, Rio de Janeiro, 2005.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade dos autores.

SINOPSE

O desenvolvimento dos códigos Monte Carlo e de novos e sofisticados modelos humanos tomográficos, ou baseados em voxel, motivaram a ICRP a propor uma revisão dos modelos de exposição tradicionais, que vêm sendo usados para calcular doses em órgãos e tecidos utilizando fantasmas do tipo MIRD-5, matemáticos. Este artigo apresenta cálculos feitos com os fantasmas tomográficos MAX (Male Adult voXel) e FAX (Female Adult voXel), recentemente desenvolvidos e também, para efeito de comparação, com os fantasmas matemáticos ADAM e EVA. Todos os modelos foram acoplados aos códigos EGS4 e MCNP4C, para irradiações externas de corpo inteiro por fótons. Foram simuladas exposições AP, PA e rotacional para energias variando entre 10 keV e 10 MeV. As Doses Efetivas calculadas foram comparadas separadamente para avaliar: a substituição do código Monte Carlo; da composição dos tecidos e da substituição dos fantasmas matemáticos por tomográficos. Os resultados das Doses Efetivas calculadas indicam que para exposições externas por fótons a introdução dos modelos baseados em voxels pode causar uma redução de cerca de 10% para as energias consideradas neste estudo.

1 INTRODUÇÃO

Os fantasmas matemáticos ADAM e EVA têm sido usados para cálculos de coeficientes de conversão, CCs, para exposições externas a fótons recomendados pela ICRP em sua publicação No. 74 (1). Esta investigação apresenta razões entre CCs calculados, por um lado utilizando estes fantasmas matemáticos e, por outro lado, utilizando os fantasmas MAX e FAX, baseados em voxels, com o intuito de mostrar as conseqüências dosimétricas da substituição dos fantasmas matemáticos por fantasmas tomográficos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Os fantasmas MAX e FAX

Os modelos MAX e FAX foram desenvolvidos a partir de imagens de Tomografia Computadorizada, CT, de alguns pacientes (2, 3). Após a segmentação, os volumes dos órgãos e tecidos relevantes em radioproteção foram ajustados para que suas massas correspondessem às dos modelos de referência definidos pela ICRP89 (4). Os modelos têm esqueletos heterogêneos, com composição específica em cada voxel, baseada nas massas; distribuição de percentagens e fatores de

¹ Dr, Professor – Departamento de Energia Nuclear – DEN/UFPE

² Dr, Professor – Departamento de Energia Nuclear – DEN/UFPE

³ Dr, Professor – Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco, CEFET-PE

⁴ Dr, Pesquisador - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN

⁵ Dr, Pesquisador - Centro Regional de Ciências Nucleares – CRCN/CNEN

⁶ Dr, Professor - Escola Politécnica de Pernambuco - POLI/UEPE

celularidade fornecidos pela ICRP 70 (5). A separação dosimétrica, em vez de uma segmentação geométrica foi feita para permitir o cálculo da dose na pele, cujas espessuras são: 1,5mm no FAX e 1,2mm na FAX, e a espessura do voxel em ambos os casos é de 3,6mm. Descrições detalhadas de ambos os fantasmas são dadas em Kramer et al (2, 3). As Figuras 1 e 2 mostram vistas frontais e laterais do MAX e da FAX , respectivamente.

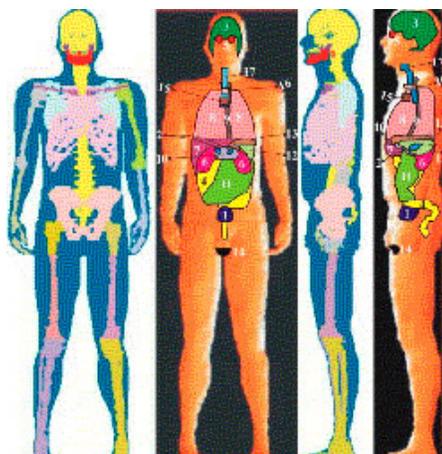


Figura 1: O modelo MAX

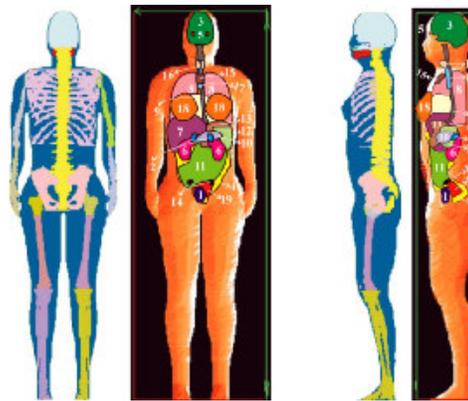


Figura 2: O modelo FAX

2.2 Os modelos ADAM e EVA

Os modelos ADAM e EVA foram construídos por Kramer et al (6). As massas dos seus órgãos e tecidos correspondem às especificações anatômicas dadas pela ICRP em sua publicação No. 23 (7). A Figura 3 mostra vistas frontais destes dois modelos.

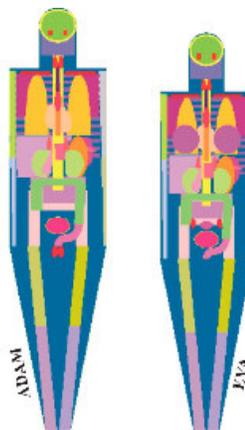


Figura 3: Os modelos ADAM e EVA

2.3 Os códigos Monte Carlo EGS4 e MCNP4C

O programa EGS4 (8) simula o transporte de elétrons e fótons através de um meio arbitrário. A versão do EGS4, usada no presente trabalho, aplica um método de Monte Carlo análogo, o espalhamento Rayleigh foi considerado, bem como os elétrons secundários, exceto quando foram usados os fantasmas matemáticos para comparações com dados já publicados pela ICRP.

O código MCNP-4C (9) é um programa Monte Carlo que simula o transporte de nêutrons, fótons e elétrons. Geometrias tridimensionais podem ser definidas usando equações que definem superfícies. A opção *Repeated Structure* permite modelar geometrias segmentadas com grande flexibilidade. Para o transporte de fótons o programa MCNP-4C considera espalhamento coerente e incoerente, emissão fluorescente e produção de pares.

2.4 Modelos de Exposição

Para uma dada condição de exposição os CCs para Dose Efetiva são, primariamente, função da anatomia do modelo, da composição dos tecidos e do código Monte Carlo utilizado. Para estudar os efeitos dosimétricos destes três componentes separadamente, os seguintes modelos de exposição foram utilizados:

a) Os códigos EGS4 e MCNP4C conectados aos modelos ADAM e EVA com composição de tecidos original (6).

b) O código EGS4 conectado aos modelos ADAM e EVA com a composição dos tecidos baseada na ICRU44 (10).

c) Os códigos EGS4 e MCNP4C conectados aos modelos MAX e FAX com a composição baseada na ICRU44 (10), e com a distribuição dos tecidos do esqueleto baseada na ICRP70 (5).

3 RESULTADOS

A Publicação ICRP 74 (1) apresenta CCs para doses equivalentes em órgãos e tecidos relevantes em termos de radioproteção, bem como para Dose Efetiva (11) e kerma livre no ar calculados pelo código Monte Carlo do GSF (12) conectado aos modelos ADAM e EVA para exposições externas por fótons em função da energia da radiação e para diferentes direções de incidência.

Neste estudo, os mesmos coeficientes foram calculados com os códigos MCNP4C e EGS4, com feixes paralelos incidindo no corpo inteiro para incidências Antero-Posterior (AP), Pósterio-Anterior (PA) e com o feixe paralelo rotacionando 360° em torno do eixo vertical dos modelos (ROT). Elétrons secundários foram acompanhados apenas para o modelo de exposição MAX-FAX/EGS4. A Dose Efetiva foi determinada conforme recomendado pela ICRP (11). A dose equivalente dos 'órgãos restantes' foi calculada como a média aritmética das contribuições de cada um destes órgãos. Se o coeficiente de variação, CV, de algum órgão foi maior do que 30%, então sua dose equivalente foi desconsiderada.

3.1 Substituição do código Monte Carlo

Para o modelo ADEV (ADAM e EVA) a Figura 4 apresenta razões entre doses efetivas calculadas com os códigos EGS4 e GSF, e os calculados pelos códigos MCNP4 e GSF, respectivamente, em função da energia dos fótons para incidências AP e PA. Os CVs das doses efetivas foram 2-3% para os dados da ICRP74, menores que 1% para o código EGS4, bem como para o código MCNP4 para fótons com energias acima de 30 keV. A Figura 4 mostra que nesta faixa de energias a diferença média entre os CCs da ICRP74 e os CCs do EGS4 é de cerca de 1% para ambas as direções de incidência, e cerca de 5,3% e 3,8% entre os CCs da ICRP74 e os CCs do MCNP4 para as incidências AP e PA, respectivamente. Para energias incidentes variando entre 10 e 30 keV a diferença média aumenta para cerca de 10% para as razões EGS4/ICRP74, e para cerca de 20-38% para as razões MCNP4/GSF, o que é causado pelas flutuações da dose equivalente devido ao baixo número de interações, especialmente em órgãos pequenos, como os testículos, ovários, e também devido a erros de arredondamento.

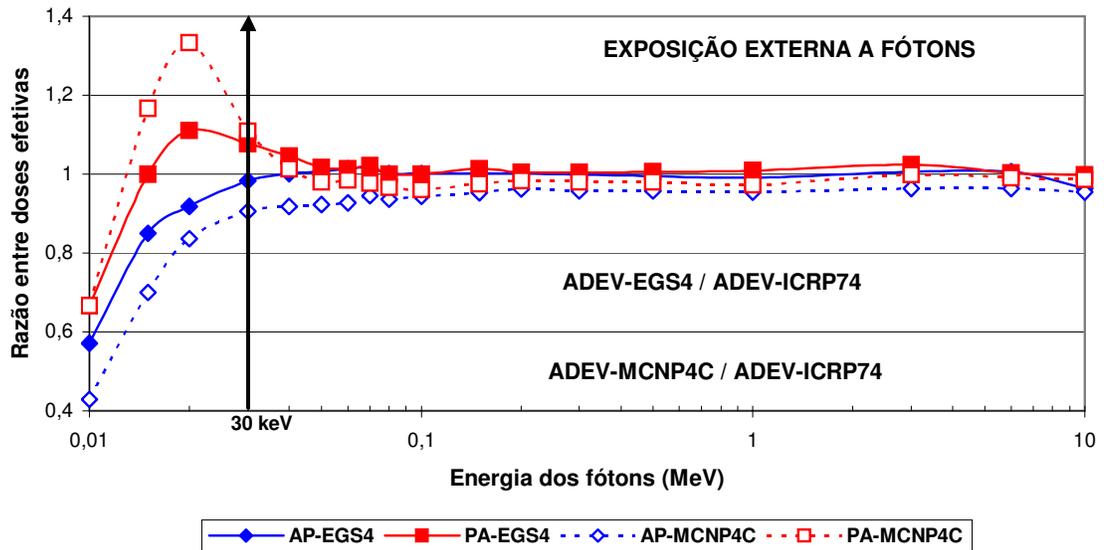


Figura 4: Substituição do código Monte Carlo

3.2 Substituição da composição dos tecidos

As composições dos tecidos usadas para calcular os CCs da ICRP74 (ADEV) são mostrados nas colunas 2 a 5 da Tabela 2, exceto para pequenas frações de elementos pesados. Nos modelos ADAM e EVA a composição do tecido mole não foi apenas usada para órgãos como o fígado, o estômago, o pâncreas, e outros, mas também para as regiões não especificadas que envolvem estes órgãos, que no corpo humano são principalmente preenchidas com tecido adiposo e músculos. As novas composições dos tecidos mostradas nas colunas 6-11 (ADEV) da Tabela 2 são baseadas nos dados fornecidos pela ICRU44 (10) e, adicionalmente, a mistura do esqueleto foi contemplada com 11.3% de cálcio como recomendado pela ICRP70 (5). Como os modelos ADAM e EVA não apresentam regiões separadamente segmentadas como tecido adiposo, as misturas homogêneas ADIMUSM e ADIMUSF dos dois tecidos foram definidas baseadas nas suas razões de massas nos modelos MAX e FAX, respectivamente. As massas de medula ativa da ICRP23, suas frações de massa, e o modelo de cálculo para a dose na medula ativa dos modelos ADEV não sofreram mudanças neste estágio.

As razões entre as doses efetivas para ADEV44 e ADEV são apresentadas na Figura 5, que mostra um aumento da dose efetiva causado pela substituição da composição dos tecidos até de cerca de 9% para todas as direções de incidência, e para energias acima de 30 keV. Abaixo deste valor de energia os dados não são muito acurados. Pelos mesmos motivos explicados no item anterior.

Tabela 3. Composição dos tecidos dos modelos ADEV e ADEV44.

ELEM	TM	PELE	PULMÃO	OSSOS	TM	PELE	PULMÃO	OSSOS	ADIMUSM	ADIMUSF
	ADEV	ADEV	ADEV	ADEV	ADEV44	ADEV44	ADEV44	ADEV44	ADAM44	EVA44
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
H	10	10.2	10	7	10.5	10	10.3	7.2	10.6	10.8
C	23	26.9	10	23	12.5	20.4	10.5	31.3	30.8	37.1
N	2.3	4.3	2.8	3.9	2.6	4.2	3.1	3.2	2.4	2.1
O	63	58	76	49	73.5	64.5	74.9	41.1	55.4	49.4
Na	0.13	0.01	0.2	0.32	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Mg	0.015	0.005	0.007	0.11				0.1		
P	0.24	0.3	0.08	6.9	0.2	0.1	0.2	5.3	0.128	0.1
S	0.22	0.15	0.23	0.17	0.18	0.2	0.3	0.25	0.227	0.2
Cl	0.14	0.25	0.27	0.14	0.22	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
K	0.21	0.1	0.2	0.15	0.21	0.1	0.2	0.05	0.245	0.2
Ca		0.14	0.007	9.9	0.01			11.3		
Fe	0.006	0.002	0.04	0.008	0.01					
[gcm ⁻³]	0.98	1.105	0.296	1.486	1.05	1.09	0.26	1.469	1.012	1.00

TM = TECIDO MOLE, ADIMUSM (F) = 36.2% (50.7%) ADIPOSE + 63.8% (49.3%) MUSCULO

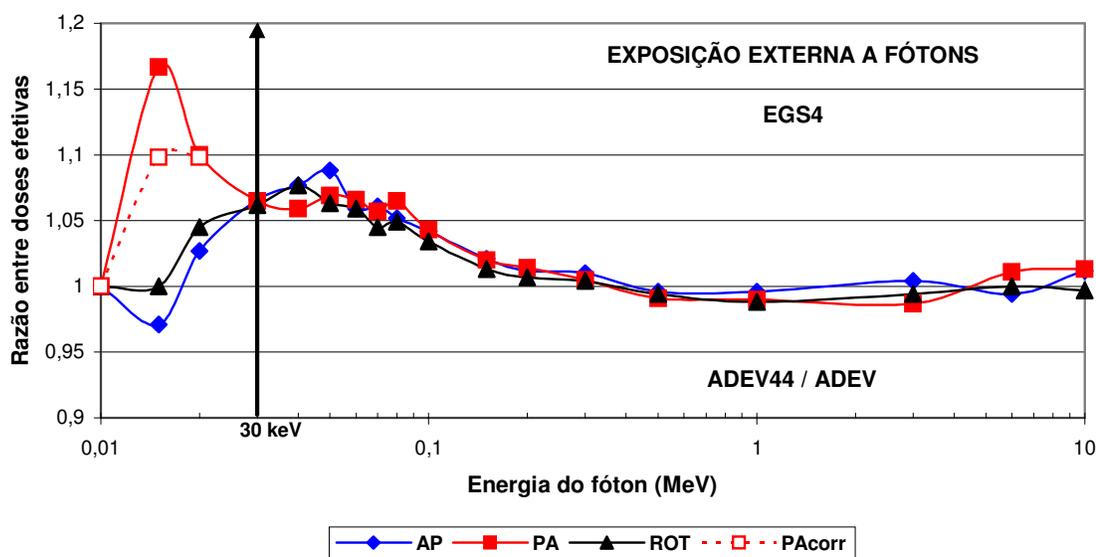


Figura 5: Substituição da composição dos tecidos

3.3 Substituição dos fantomas

A substituição dos modelos matemáticos pelos tomográficos foi feita em dois passos:

Primeiro, versões homogêneas dos modelos MAX e FAX, chamadas MAXHOM e FAXHOM, foram obtidas, cada uma contendo um esqueleto homogêneo e misturas homogêneas de gordura e músculo, com composições mostradas nas colunas 6 – 11 da Tabela2 e, utilizando o modelo de medula ativa da ICRP23. Em termos da composição dos tecidos ou de sua distribuição ao longo do corpo, e do modelo de medula ativa, os modelos ADAM44 e MAXHOM, EVA44 e FAXHOM são equivalentes e conseqüentemente todas as diferenças de doses equivalentes entre os dois pares de modelos podem ser atribuídas à diferença anatômica, isto é diferenças de volume, forma e localização dos órgãos e tecidos.

A Figura 6 apresenta as razões entre doses efetivas para os dois pares de modelos equivalentes para incidências AP, PA, e ROT, e em função da energia dos fótons. O modelo “ADEV44” representa os resultados obtidos com o ADAM44 e a EVA44, enquanto “MHOM-FHOM” os dados com MAXHOM e FAXHOM. As curvas mostram que a introdução da anatomia humana real leva a um decréscimo da dose efetiva em mais de 30% para energias acima de 30 keV.

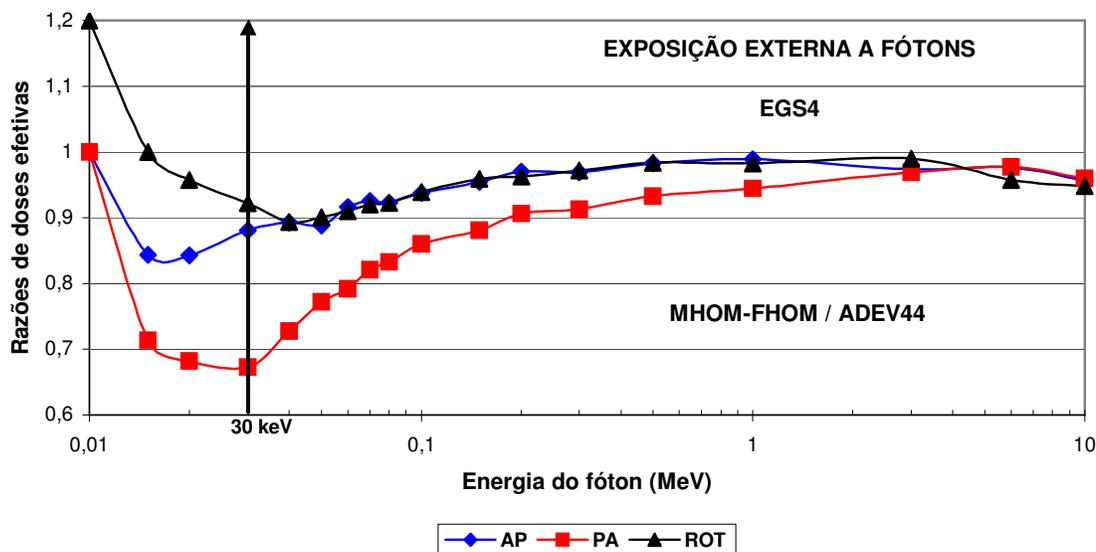


Figura 6: Substituição dos Fantomas

Para entender a diminuição da dose efetiva mostrada na Figura 6 deve-se observar algumas diferenças anatômicas gerais entre os dois tipos de modelos (matemáticos x tomográficos) utilizando as Figuras 1, 2 e 3:

Os troncos dos modelos ADAM44 (EVA44) são cilindros elípticos com braços integrados e espessura constante de 20cm (18.8cm) sagital, e 40cm (37.6cm) lateral, enquanto que os modelos MAXHOM (FAXHOM) apresentam espessuras variando entre 20-24cm (19.5-22cm) sagital, 50-52cm (43-45cm) lateral nas regiões dos ombros, e 30-33cm (29-31cm) nas regiões abdominais, e também com braços e mãos separados do tronco.

Comparado com o esqueleto matemático dos modelos ADEV44, os modelos MAXHOM e FAXHOM têm esqueletos com esterno, forma da pélvis bastante diferenciada, e a estrutura natural das costelas aparentemente provêm mais blindagem aos órgãos internos.

Frequentemente o esqueleto e órgãos internos dos modelos MAXHOM e FAXHOM são envolvidos por grossas camadas de tecido adiposo e músculos, comparados com os modelos ADEV44.

O segundo passo da transição dos modelos do tipo MIRD5 para os modelos baseados em voxels representa a introdução de:

- Fatores de correção revisados para foto-elétrons
- Esqueleto heterogêneo
- Regiões segmentadas separadamente como gordura e músculo
- Transporte de elétrons secundários.

A Figura 7 mostra razões entre as doses efetivas para os modelos MAX-FAX e MAXHOM-FAXHOM para energia dos fótons variando entre 10 keV to 10 MeV para incidências AP, PA, e ROT. Para energias acima de 30 keV as diferenças entre as duas doses efetivas estão na faixa de +2% a - 4% dependendo da energia considerada. Embora o modelo de distribuição da medula ativa baseado na ICRP70 possa causar maiores doses efetivas para incidências AP e ROT, os valores das razões para estas direções de incidência para energias abaixo de 30 keV devem ser considerados com precaução pelas razões já explicadas acima. Para os modelos MAX-FAX os elétrons secundários foram seguidos até possuírem uma energia de corte de 200 keV, cujo efeito torna-se observável especialmente para órgãos superficiais como testículos e pele para fótons com energia acima de 3 MeV,mas não na dose efetiva.

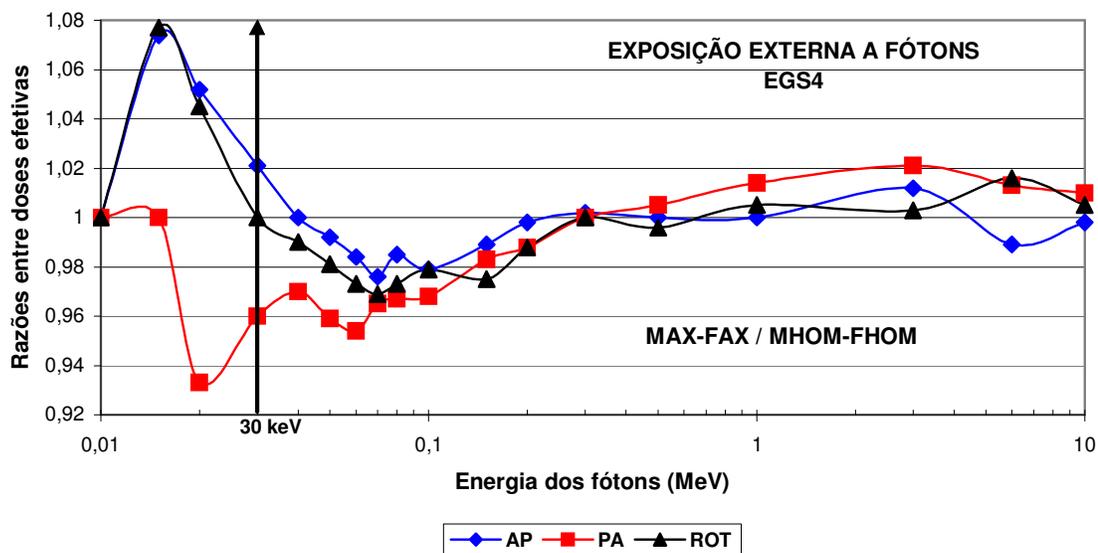


Figura 7: Introdução de esqueletos heterogêneos, tecido adiposo e músculo.

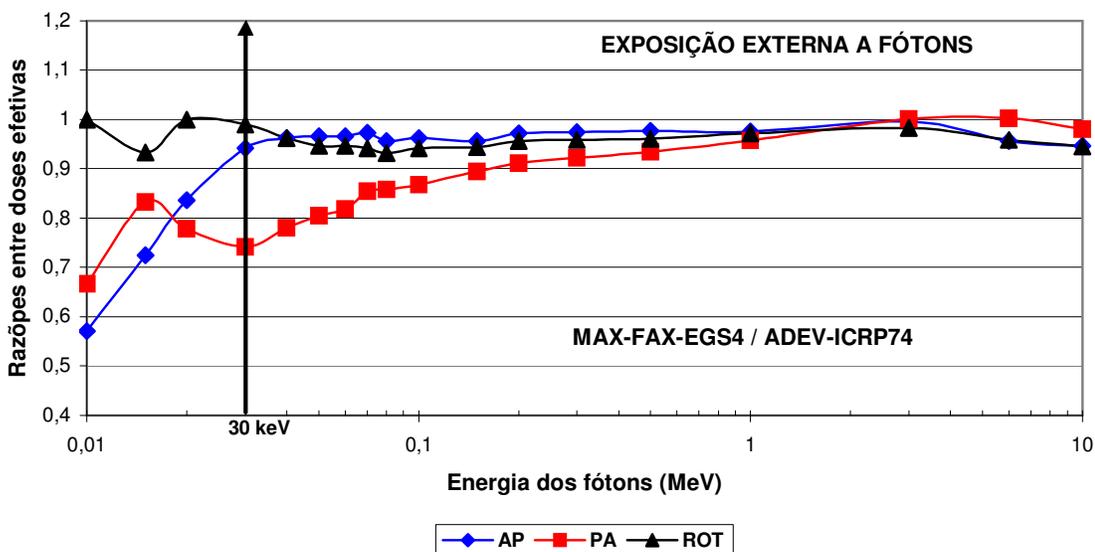


Figura 8: Substituição dos modelos de exposição ADAM-EVA pelos MAX-FAX.

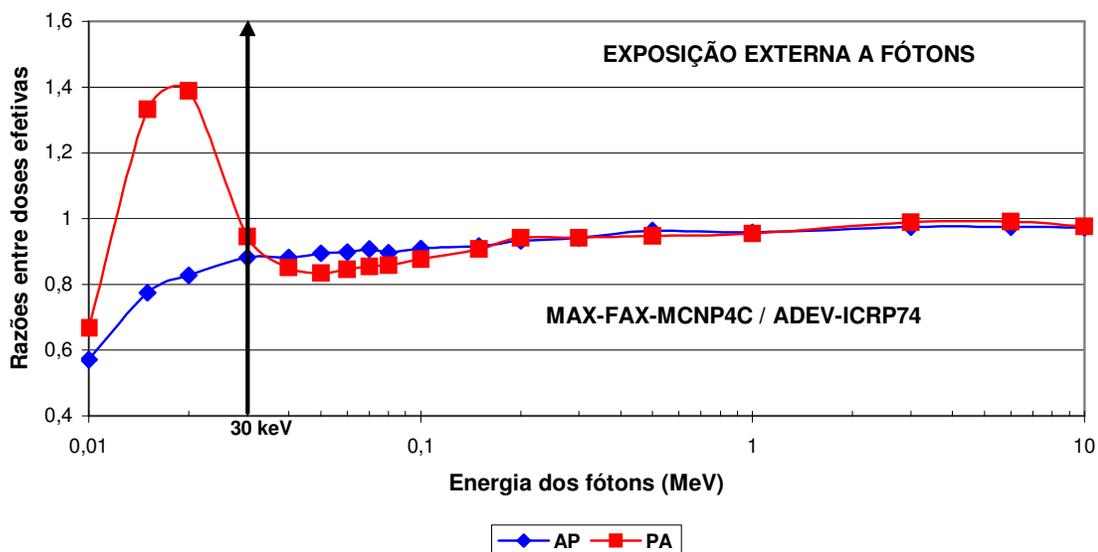


Figura 9: Substituição dos modelos de exposição ADAM-EVA pelos MAX-FAX.

As conseqüências de todas as substituições juntas são mostradas na Figura 8 para exposições externas a radiação em função da energia dos fótons incidentes variando entre 10 keV e 10 MeV, para incidências AP, PA, e ROT. Devido às diferenças entre os modelos de exposição ADEV/GSF e MAX-FAX/EGS4 discutidas acima, os valores obtidos pelo código EGS4 para a dose efetiva diminuíram para energias acima de 30 keV, até o limite de 10% para incidências AP, e ROT, e até 25% para a incidência PA. Abaixo de 30 keV, uma diminuição na dose efetiva de até 43% parece possível, de acordo com a Figura 8, entretanto, a discussão prévia a respeito de flutuações estatísticas e erros de aproximação leva à consideração destes dados com cautela. Em situações práticas de proteção radiológica a distribuição de energia dos campos de radiação estão, frequentemente, em uma faixa superior a 30 keV, o que leva a conclusão final que, em situações práticas, para exposições externas a fótons, a redução da dose efetiva devido à introdução de modelos baseados em voxels é de cerca de 10%.

A Figura 9 mostra as razões entre doses efetivas MAX-FAX/ADEV calculadas pelo código Monte Carlo MCNP4C para incidências AP e PA. Para energias dos fótons superiores a 30 keV os dados confirmam os resultados obtidos pelo código EGS4 apresentados na Figura 8.

4 CONCLUSÕES

O propósito deste artigo foi investigar, no caso de irradiação externa por fótons, as conseqüências dosimétricas para a dose efetiva quando os modelos do tipo MIRD-5, ADAM e EVA são substituídos pelos modelos baseados em voxels MAX e FAX. A análise foi feita separadamente, primeiro substituindo apenas o código Monte Carlo utilizado, em seguida foi substituída a composição elementar dos órgãos e tecidos e depois os modelos anatômicos. Os resultados foram apresentados como razões entre doses efetivas em função da energia dos fótons e da direção de incidência. Para energias entre 30 keV e 10 MeV os resultados mostraram que a substituição do código Monte Carlo usado na ICRP74 pelo programa EGS4 proporcionou diferenças de cerca de 1% na dose efetiva, muito menores que a faixa dos Coeficientes de Variação combinados. Já a substituição do código ICRP74 pelo programa MCNP4C levou a uma diminuição na dose efetiva de 5% em média para incidências AP e PA. A introdução da composição dos tecidos baseada na ICRU44 causou um aumento de até 9%, enquanto que a introdução dos modelos tomográficos, mais

próximos da real anatomia humana, levou a um decréscimo de cerca de até 30% nas doses efetivas. Finalmente, a combinação de todas as substituições sugere que as doses efetivas nos modelos baseados em voxel MAX-FAX diminui cerca de 10% para energias incidentes entre 30 keV e 10 MeV.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Fundação de Amparo à Ciência do Estado de Pernambuco - FACEPE pelo suporte financeiro.

6 REFERÊNCIAS

1. ICRP 74, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", ICRP Publication 74. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1996).
2. KRAMER R, VIEIRA J W, KHOURY H J, LIMA F R A and FUELLE D, "All About MAX: a Male Adult voXel Phantom for Monte Carlo Calculations in Radiation Protection Dosimetry", *Phys. Med. Biol.*, **48**, no. 10, 1239-1262, (2003).
3. KRAMER R., VIEIRA J. W., KHOURY H. J., LIMA F. R. A., LOUREIRO E. C. M., LIMA V. J. M. and HOFF G., "All about FAX: a Female Adult voXel Phantom for Monte Carlo Calculation in Radiation Protection Dosimetry", *Phys. Med. Biol.* **49**, 5203-5216, (2004).
4. ICRP 89, "Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values". ICRP Publication 89, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (2003).
5. ICRP 70, "Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: The Skeleton". ICRP Publication 70. International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1995).
6. KRAMER R, ZANKL M, WILLIAMS G and DREXLER G, "The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part I: The Male (Adam) and Female (Eva) Adult Mathematical Phantoms". GSF-Report S-885. Institut für Strahlenschutz, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg-Muenchen, (1982).
7. ICRP 23, "Report of the Task Group on Reference Man", ICRP publication 23, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1975).
8. NELSON W R, HIRAYAMA H and ROGERS D W O, "The EGS4 Code System". SLAC-265 Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California, (1985).
9. BRIESMEISTER J F *et al*, "MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", Version 4C. Edited by J F BRIESMEISTER, Report No. LA-13709-M, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM, (2000).
10. ICRU 44, "Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement". ICRU Report 44. International Commission On Radiation Units And Measurements, Bethesda, MD, (1989).
11. ICRP 60, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60, International Commission On Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1991).
12. ZANKL M, DREXLER G, PETOUSSI-HENSS N and SAITO K, "The Calculation of Dose from External Photon Exposures Using Reference Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part VII: Organ Doses Due to Parallel and Environmental Exposure Geometries". GSF-Report 8/97. Institut für Strahlenschutz, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, München-Neuherberg, (1997).