

**RAZÕES ENTRE DOSES EFETIVAS PARA MODELOS TOMOGRÁFICOS E MODELOS MATEMÁTICOS DEVIDO ÀS EXPOSIÇÕES INTERNAS DE FÓTONS****F. R. A. Lima¹, R. Kramer², H. J. Khoury³, A. M. Santos⁴, W. Vieira⁵ e 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 de novos e sofisticados códigos Monte Carlo e de fantasmas humanos tomográficos ou de voxels motivaram a Comissão Internacional Proteção Radiológica (ICRP) a rever os tradicionais modelos de exposição, os quais têm sido utilizados no passado para calcular coeficientes de dose efetiva para órgãos e tecidos com base em fantasmas matemáticos conhecidos como MIRD5. Este trabalho mostra os resultados de cálculos realizados com os fantasmas tomográficos MAX (Male Adult voXel) e FAX (Female Adult voXel), recentemente desenvolvidos pelos autores, bem como com os fantasmas ADAM e EVA, de gêneros específicos, tipo MIRD5, acoplados aos códigos Monte Carlo EGS4 e MCNP4C, para exposições internas com fótons de energias entre 10 keV e 4 MeV para vários órgãos fontes. Doses efetivas para ambos os modelos de exposição, tomográfico e matemático, serão comparadas, separadamente, como função da substituição do código Monte Carlo, das composições de tecidos humanos e da anatomia reproduzida através de tomógrafos. Os resultados indicam que para exposições internas de fótons a utilização de modelos de exposição baseados em voxel acarreta um aumento nos valores das doses efetivas de até 70% para alguns órgãos fontes considerados neste estudo quando comparados com os correspondentes resultados obtidos com fantasmas do tipo MIRD-5,

1 INTRODUÇÃO

Coefficientes de Conversão (CCs) entre dose efetiva e quantidades físicas caracterizando a fonte de radiação têm sido publicados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Commission on Radiological Protection, ICRP), para exposições internas a fim de facilitar a interpretação da atividade acumulada num órgão fonte em termos da quantidade de proteção primária,

Esta quantidade de proteção primária, a dose efetiva, é a soma das doses equivalentes ponderadas em todos os órgãos e tecidos do corpo e é dada pela seguinte expressão,

$$E = \sum_T w_T H_T$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão T e w_T é o fator de peso correspondente (1).

De acordo com a Tabela 1, a ICRP recomenda fatores de peso de tecidos para 13 órgãos e tecidos selecionados, mais um único fator de peso de tecidos, chamado de “Restos”, o qual é composto de

¹ Doutor, Pesquisador, Centro Regional de Ciências Nucleares, CRCN/CNEN, Recife-PE

² Doutor, Professor, Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

³ Doutor, Professor, Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

⁴ Doutorando, Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

⁵ Doutor, Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco e Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, PE

⁶ Doutor, Professor, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, PE

outros 10 órgãos e tecidos, A quantidade H_T representa a dose equivalente média no volume de tecido T, o qual reflete a hipótese de uma relação linear dose-risco,

Tabela 1: Fatores de peso do tecido segundo a ICRP 60 [1].

| TECIDO/ÓRGÃO | w_T |
|--|-------|
| Testículos, Ovários | 0,20 |
| MOV*, Cólon, Pulmões, Estômago | 0,12 |
| Bexiga, Seios, Fígado, Esôfago, Tireóide | 0,05 |
| Pele, Superfície do Osso | 0,01 |
| Resto** | 0,05 |

*MOV: Medula Óssea Vermelha;

**Resto: Glândulas Adrenais, Cérebro, traquéia, Intestino Delgado, Músculos, Pâncreas, Rins, Baço, Timo e Útero.

Fantomas matemáticos MIRD5, representando várias idades (2), têm sido usados para cálculos de CCs entre doses efetivas e exposições internas devido a fótons e estão publicadas pela ICRP (3, 4), Para o Homem e a Mulher de Referência este artigo apresenta razões entre doses efetivas calculadas de um lado para fantomas matemáticos do tipo MIRD5,ADMA e EVA e de outro lado para fantomas baseados em voxels como o MAX e o FAX a fim de mostrar as conseqüências dosimétricas devido a substituição dos modelos matemáticos pelos modelos tomográficos,

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Os fantomas MAX e FAX

Os modelos MAX e FAX foram desenvolvidos a partir de imagens de Tomografia Computadorizada, CT, de alguns pacientes (5, 6), 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 (7), Os modelos têm esqueletos heterogêneos, com composição específica em cada voxel, baseada nas massas; distribuição de percentagens e fatores de celularidade fornecidos pela ICRP 70 (8), 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 MAX e 1,2mm no FAX, e a espessura do voxel em ambos os casos é de 3,6mm, Descrições detalhadas de ambos os fantomas são dadas em Kramer et al (5, 6), As Figuras 1 e 2 mostram vistas frontais e laterais do MAX e da FAX , respectivamente,

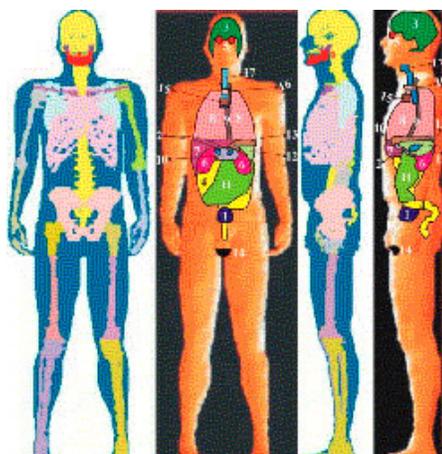


Figura 1: O fantoma MAX

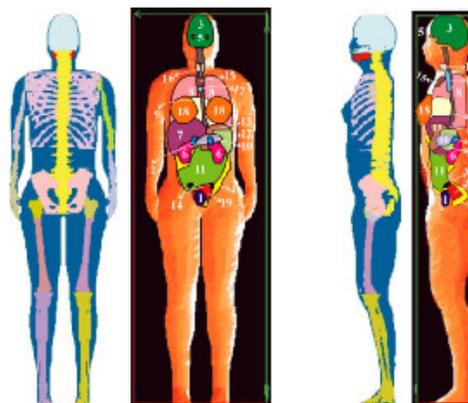


Figura 2: O fantoma FAX

2.2 Os modelos ADAM e EVA

Para os propósitos de cálculos a serem apresentados neste trabalho, os modelos MIRD5, ADAM e EVA têm sido considerados Kramer et al (9), As massas dos seus órgãos e tecidos correspondem às especificações anatômicas dadas pela ICRP em sua publicação No, 23 (10), A Figura 3 mostra vistas frontais dos modelos ADAM e EVA,

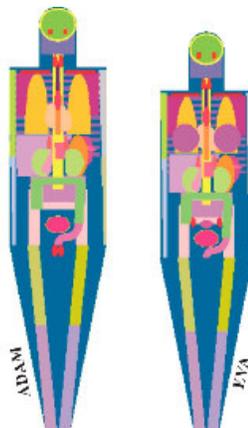


Figura 3: Os fantasmas ADAM e EVA

2.3 Os códigos Monte Carlo EGS4 e MCNP4C

O programa EGS4 (11) 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, mas os elétrons secundários não,

2.4 Modelos de Exposição

Para uma dada condição de exposição o CC para dose efetiva é, 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) O código EGS4 conectado aos modelos ADAM e EVA com composição de tecidos original (9),
- b) O código EGS4 conectado aos modelos ADAM e EVA com a composição dos tecidos baseada na ICRU44 (12),
- c) O código EGS4 conectado aos modelos MAX e FAX com a composição dos tecidos baseada na ICRU44 (12), e com a distribuição dos tecidos do esqueleto baseada na ICRP70 (8),

3 RESULTADOS

As razões de doses apresentadas nas seções seguintes foram calculadas emissores de fótons distribuídos heterogeneamente no fígado, nos pulmões, nos ossos e na tireóide para energias variando de 10 keV a 4 MeV. Elétrons secundários não foram considerados, isto é, as doses equivalentes foram calculadas os valores médios do kerma nos volumes dos órgãos e tecidos de interesse. A dose efetiva foi determinada conforme recomendado pela ICRP68 (3) e a dose equivalente dos “órgãos restantes” conforme recomendado pela ICRP60 (1), que recomenda a

média ponderada pelas massas para as contribuições dos órgãos e tecidos e também leva em conta a nota de rodapé da Tabela 2 da ICRP60, isto é, se a dose equivalente de um dos “órgãos restantes” é maior do que a dose equivalente máxima dos órgãos ou tecidos principais, então para metade dos “restantes” de ser aplicado o fator de peso para cálculo da dose equivalente enquanto que para a outra metade deve ser usada a média aritmética entre as doses equivalentes dos demais órgãos e tecidos restantes. Neste estudo se o coeficiente de variação, CV, de algum órgão ou tecido mencionado na Tabela 1 for maior do que 30%, então sua dose equivalente foi desconsiderada.

3.1 Substituição do código Monte Carlo

Os CCs de dose efetiva para fontes de fótons internas publicados pela ICRP são baseados nas frações específicas de energias absorvidas (SAFs) calculadas por Cristy e Eckerman (13) com o código Monte Carlo ALGAMP (14) para fantasmas do tipo MIRD5 para várias energias. As SAFs para adultos do sexo masculino e feminino foram determinadas com um “Adulto masculino”, o qual representa o fantoma adulto masculino MIRD5 incluindo órgãos femininos como as mamas, os ovários e o útero.

Além de técnicas Monte Carlo, outros métodos computacionais, como o método da fonte pontual central ou o princípio da dose recíproca têm sido usados por Cristy e Eckerman a fim de se conseguir resultados seguros, especialmente quando o coeficiente de variação, CV, do cálculo Monte Carlo resulta maior que 50%.

Usando as composições de tecido do ORNL (13), as SAFs foram calculadas com o modelo de exposição ADAM-EGS4 para fontes de fótons uniformemente distribuídas no fígado e nos rins. Em contraste com o “Adulto masculino” do MIRD5 o fantoma ADAM não possui órgãos femininos, mas este fato não impede a comparação entre os dados apresentados neste trabalho.

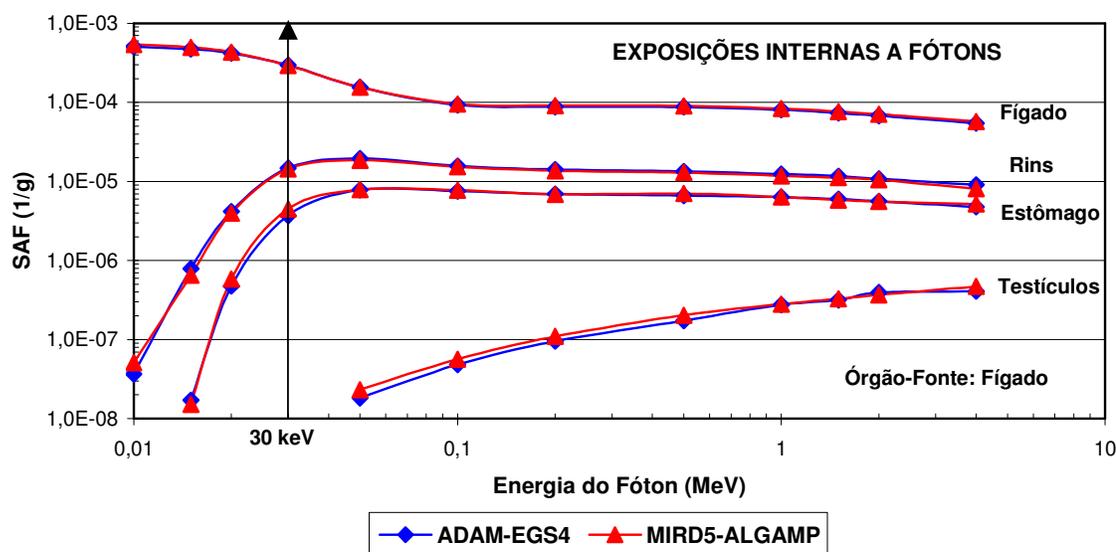


Figura 4: Substituição do código Monte Carlo

As Figuras 4 e 5 mostram as SAFs para vários órgãos, resultantes de fontes de fótons emitidos a partir do fígado e dos rins, respectivamente, para os modelos de exposição ADAM-EGS4 e “Adulto masculino”-ALGAMP. Quando o órgão fonte é também o órgão alvo, as SAFs, para ambos os modelos de exposição, estão em boa concordância com uma diferença média de 3%. Para outros órgãos alvo, diferenças entre 5% e 8% podem ser observadas para energias acima de 30 keV e de 15% para energias menores.

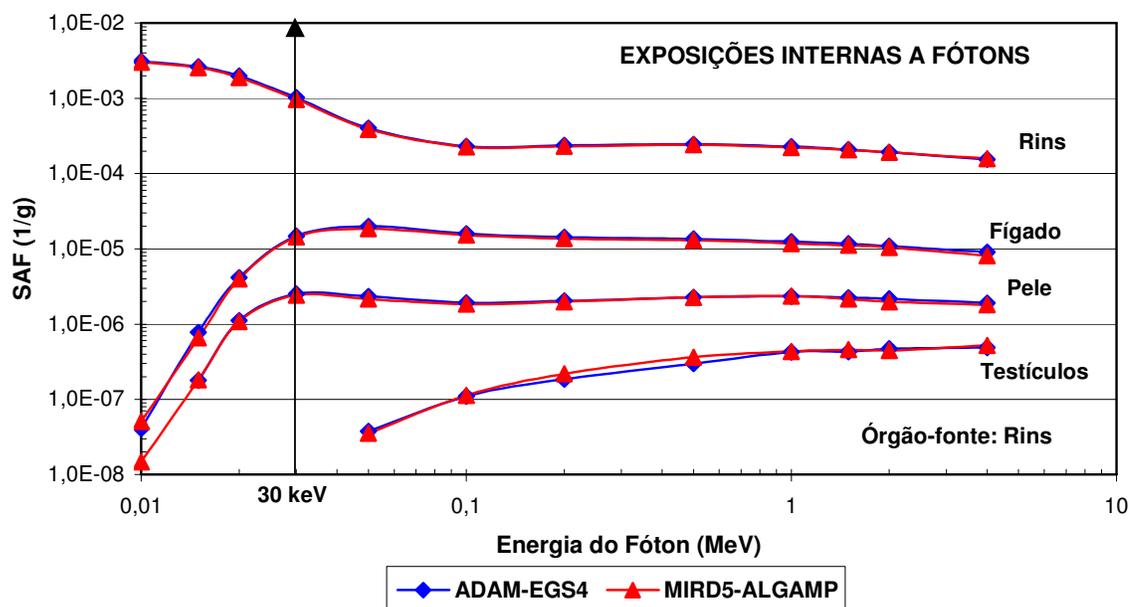


Figura 5: Substituição do código Monte Carlo

3.2 Substituição da composição dos tecidos

Para o estudo da substituição das composições dos tecidos e da anatomia humana, ao invés do “Adulto masculino” com órgãos femininos, decidimos iniciar com os fantasmas do tipo MIRD5, ADAM e EVA, porque este procedimento corresponde melhor ao conceito de dose efetiva. A composição inicial do tecido foi aquela considerada por Kramer et al (9), a fim de ser consistente com a metodologia aplicada a mesma investigação para fontes externas (15).

As composições iniciais dos tecidos são mostradas nas colunas 2-5 (ADEV) da Tabela 2, exceto para algumas frações pequenas de elementos mais pesados. Nos fantasmas ADAM e EVA a composição do tecido mole não foi usada apenas para órgãos como fígado, estômago, pâncreas, etc., mas também para regiões não especificadas em torno dos órgãos, pulmões e ossos, os quais em humanos reais são comumente preenchidos com adipose e músculo. As novas composições do tecido são mostradas nas colunas 6-11 (ADEV44) da Tabela 2 e são baseadas em dados da ICRRU44 (12); adicionalmente a mistura do esqueleto foi projetada para conter 11,3% de cálcio, conforme recomendação da ICRP70 (8). Como os fantasmas ADM e EVA não possuem regiões segmentadas separadamente para a adipose e os músculos, misturas homogêneas ADIMUSM e ADIMUSF de dois tecidos foram definidas baseadas nas suas razões de massa nos fantasmas MAX e FAX, respectivamente. As massas da medula ativa baseadas na ICRP23, frações de massa da medula ativa e modelos de cálculos da medula ativa do fantasma ADEV (9) não foram alterados neste estágio.

A Figura 6 apresenta as razões entre as doses efetivas calculadas com as composições dos tecidos da Tabela 2 para emissores de fótons homogêneamente distribuídos no fígado, nos pulmões, nos ossos e na tireóide dos fantasmas ADEV e ADEV44 em função da energia dos fótons. Para energias até 20-30 keV, dependendo da dimensão do órgão, basicamente a maioria da energia emitida será absorvida pelo próprio órgão fonte. Se ao mesmo tempo o órgão fonte pertence ao grupo de órgãos e tecidos mencionados na lista da Tabela 1, então a dose efetiva é mais ou menos igual a dose equivalente do órgão fonte multiplicada pelos respectivos fatores de peso. Esta observação aplica-se as curvas para o fígado, os pulmões e a tireóide na Figura 6. Entretanto se o esqueleto é o órgão

fonte as principais contribuições para a dose efetiva são da medula ativa, da superfície do osso, dos pulmões e do fígado, para baixas energias.

Tabela 2, Composição dos tecidos dos fantasmas 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 | | |
| Fé | 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%) MÚSCULO.

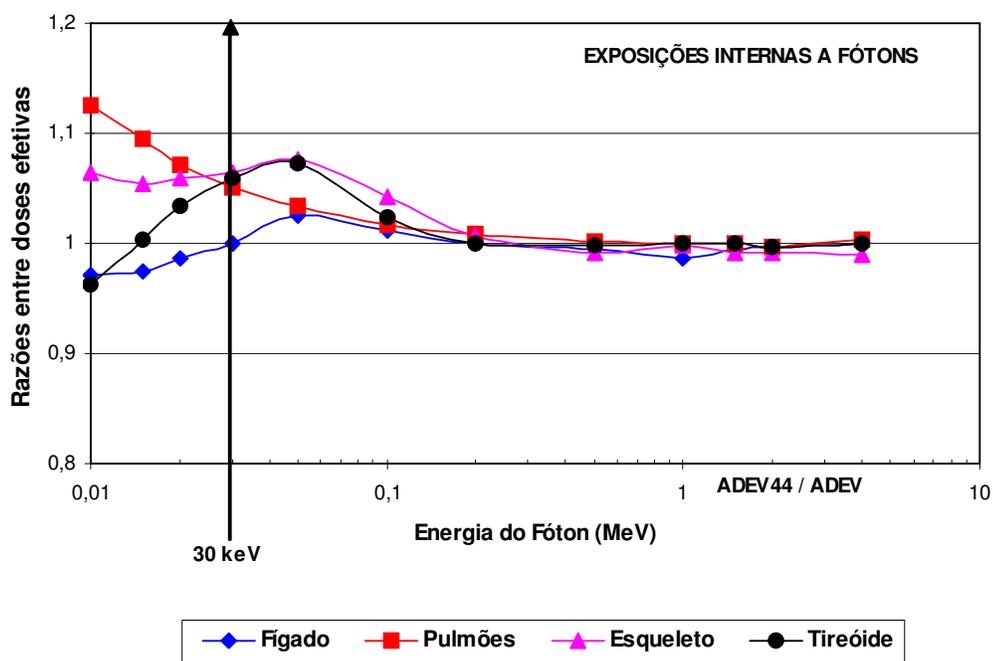


Figura 6: Substituição da composição dos tecidos

De acordo com a Figura 6, para os órgãos fontes aqui considerados, a dose efetiva pode aumentar de até 7,5% para energias acima de 30 keV como resultado da mudança na composição dos tecidos. Para energias abaixo de 30 keV, órgãos fonte de tecido mole, como tireóide ou fígado, apresentam

redução da dose efetiva de até 5%, enquanto que um aumento de mais de 10% pode ser observado nos pulmões. Quando o esqueleto é o órgão fonte, a dose efetiva para os fantasmas ADEV40 é de aproximadamente 5% maiores do que a dose efetiva para os fantasmas ADEV para o intervalo de energia entre 10 e 30 keV. Embora para energias abaixo de 30 keV as razões, certamente, reflitam as propriedades dosimétricas dos tecidos envolvidos, deve-se interpretar estes resultados com precaução devido aos grandes valores dos CVs para pequenos órgãos como os testículos, ovários ou tireóide e aos efeitos dos erros randômicos para pequenos valores da dose efetiva (15).

3.3 Substituição da anatomia

A substituição dos modelos matemáticos MIRD5 pelos modelos reais do corpo humano foi realizada 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 Tabela 2 e, utilizando o modelo de medula ativa da ICRP23. Em termos da composição dos tecidos e 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, às diferenças de volume, forma e localização dos órgãos e tecidos.

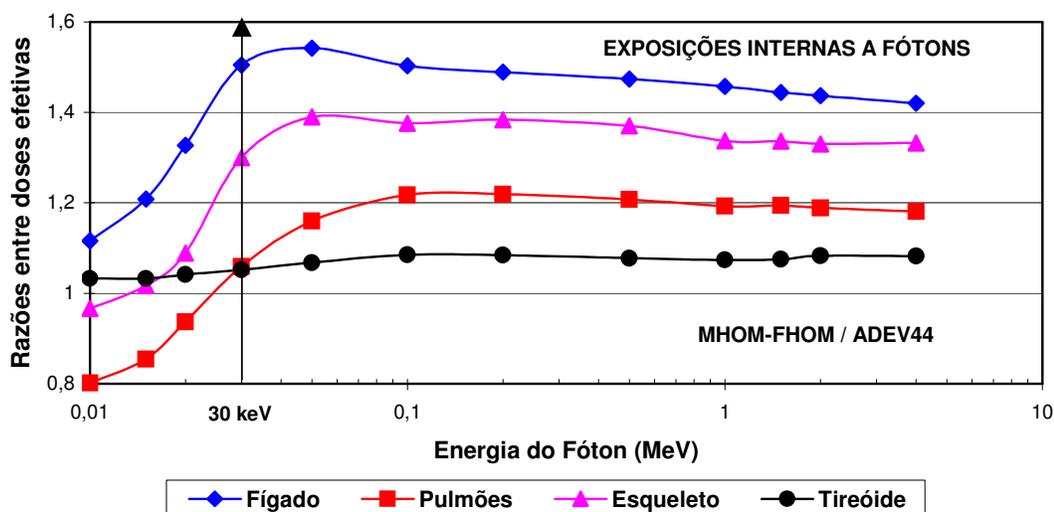


Figura 7: Substituição da anatomia

A Figura 7 apresenta as razões entre doses efetivas para os dois pares de modelos de tecidos equivalentes, MAXHOM-FAXHOM e ADAM-EVA, com emissores de fótons distribuídos homogeneamente no fígado, nos pulmões, no esqueleto e na tireóide, para energias de fótons no intervalo de 10 keV a 4 MeV, e com composições de tecido baseadas na ICRU44 e modelos da medula ativa baseados na ICRP23 aplicados a todas elas. “ADEV44” representa os fantasmas ADAM44 e EVA44, enquanto “MHOM-FHOM” representa os fantasmas MAXHOM e FAXHOM. Em contraste com os resultados encontrados para exposições externas (15), para exposições internas de fótons, pelo menos para os órgãos fontes aqui considerados, a introdução da anatomia real do homem aumenta a dose efetiva para energias acima de 30 keV em mais de 50%. As principais razões para isto são as distâncias mais próximas entre órgãos no corpo humano real comparadas com as distâncias entre órgãos nos fantasmas do tipo MIRD5.

Estas observações têm sido feitas por outros autores. Jones (16), por exemplo, comparou as SAFs dos dois modelos de exposição. Os cálculos de Jones demonstraram que a mudança da composição do tecido tem apenas pequenos efeitos nos resultados e concluíram que as diferentes distâncias entre órgãos nos dois modelos foram as principais causas das grandes discrepâncias entre os valores da SAF. Diferenças de massas nos órgãos e tecidos não poderiam ter sido a causa destas diferenças porque ambas concordavam relativamente bem com as massas de referência da ICRP23 (10).

O segundo passo da transição das anatomias dos fantasmas tipo MIRD5, ADAM e EVA para os fantasmas de voxels MAX e FAX representa a introdução de:

- Massas, frações de massas e fatores de celularidade baseadas na ICRP70,
- Fatores de correção revisados para foto-elétrons,
- Distribuição heterogênea dos tecidos do esqueleto entre os voxels do osso e
- Segmentação separada da adipose e do músculo.

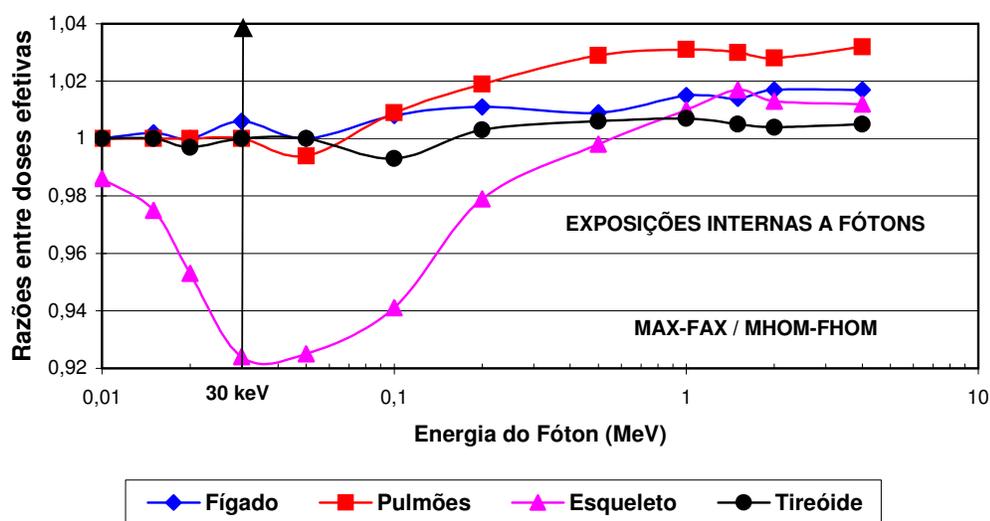


Figura 8: Introdução da heterogeneidade distribuída nos tecidos do esqueleto, adipose e músculo.

Os primeiros três itens afetam a dose equivalente da superfície do osso (esqueleto) e da medula ativa. Quando o fígado, os pulmões ou a tireóide são órgãos fontes, a dose efetiva cresce com o crescimento da energia porque, primariamente, a dose equivalente para o esqueleto e para a medula ativa foi encontrada sempre maior com os fantasmas MAX-FAX do que com os fantasmas MHOM-FHOM. Isto se traduz num pequeno acréscimo de até 3% na dose efetiva, conforme mostrado na Figura 8. Decréscimos nas doses equivalentes para a superfície do osso e para a medula ativa de até 3,1% e 25,5%, respectivamente, em torno de 40 keV, têm sido observados na comparação dos resultados calculados para os fantasmas MAX-FAX e MHOM-FHOM, quando o esqueleto é o órgão fonte. Conseqüentemente, a razão de dose efetiva decresce de até 8% no intervalo de energia, refletindo particularmente o fato de que para este órgão fonte a dose equivalente ponderada para a medula ativa representa, aproximadamente, 30% da dose efetiva.

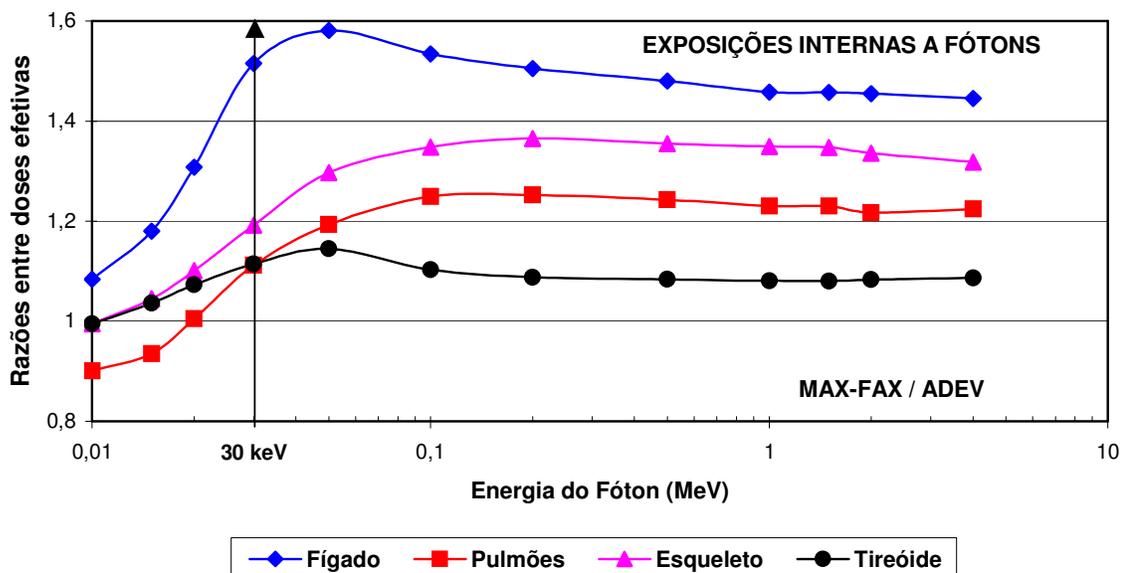


Figura 9: Substituição do modelo de exposição ADAM-EVA pelo MAX-FAX

A Figura 9 resume as substituições das composições do tecido, da anatomia, da distribuição heterogênea dos tecidos do esqueleto, adipose e músculo, e do modelo da medula ativa. Para os órgãos fontes considerados, as várias alterações acarretaram um acréscimo da dose efetiva, exceto para a distribuição do tecido do esqueleto e do modelo da medula ativa quando o esqueleto é o órgão fonte. O aumento líquido da dose efetiva pode alcançar 60% pelo menos para os órgãos fontes mostrados na Figura 9. Para a substituição do código Monte Carlo pode-se considerar mais 10% de variação na dose efetiva.

4 CONCLUSÕES

O propósito deste artigo foi investigar as conseqüências dosimétricas na dose efetiva para irradiação interna com fótons, quando o modelo de exposição do tipo MIRD-5, ADAM-EVA, é substituído pelo modelo baseado em voxels MAX-FAX. A análise foi feita separadamente substituindo-se o código Monte Carlo utilizado, a composição elementar dos órgãos e tecidos e a anatomia. Os resultados foram apresentados como razões entre doses efetivas em função da energia para quatro diferentes órgãos fontes. Para energias dos fótons incidentes entre 30 keV e 10 MeV, os resultados mostraram que a substituição do código Monte Carlo ALGAMP pelo EGS4 acarretam diferenças de, pelo menos, 10% na dose efetiva. A introdução da composição dos tecidos baseada na ICRU44 causou um aumento de até 7,5% na dose efetiva, enquanto que a substituição do MIRD5 pela anatomia de voxels pode aumentar a dose efetiva de 1 até 50% dependendo do órgão fonte. Para os órgãos fontes considerados neste trabalho o efeito líquido da transição dos modelos de exposição do tipo MIRD5 para aqueles baseados em voxels é de um acréscimo de 50-70% na dose efetiva.

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 60, “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 60, International Commission On Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1991),
2. CRISTY M, “Mathematical Phantoms Representing Children at Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose”, Report ORNL/NUREG/TM-367, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA, (1980),
3. ICRP 68, “Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers”, ICRP Publication No,68, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1995),
4. ICRP 72, “Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients”, ICRP Publication No,72, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1996),
5. 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),
6. 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),
7. 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),
8. 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),
9. 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, Reprint July 1999, Institut für Strahlenschutz, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg-Muenchen, (1982),
10. ICRP 23, “Report of the Task Group on Reference Man”, ICRP publication 23, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1975),
11. 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),
12. ICRU 44, “Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement”, ICRU Report 44, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, (1989),
13. CRISTY M and ECKERMAN K F, “Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources”, Report ORNL/TM-8381/ V1-7, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA, (1987),
14. RYMAN J C, WARNER G G and ECKERMAN K F, “ALGAMP – a Monte Carlo Radiation Transport Code for Calculating Specific Absorbed Fractions from Internal and External Sources”, Oak Ridge National Laboratory Rep, ORNL/TM-8377, (1987),
15. KRAMER R, KHOURY H J, VIEIRA J W, YORIYAZ H and LIMA F R A, “Effective Dose Ratios for Tomographic and Stylized Models from External Exposure to Photons”, Paper submitted to the MC2005 conference, (2005),

16. JONES D, G,, “A realistic Anthropomorphic Phantom for Calculating Specific Absorbed Fractions of Energy from Internal Gamma Emitters”, *Rad, Prot, Dos.*, **79**, Nos,1-4, pp, 411-414, (1998),
17. DIMBYLOW P, J,, “The Development of Realistic Voxel Phantoms For Electromagnetic Field Dosimetry”, In: Proceedings of an International Workshop on Voxel Phantom Development held at the National Radiological Protection Board, Chilton, UK, 6-7 July, (1995),ICRP 74, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation”, ICRP Publication 74, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1996),