

Desenvolvimento de Modelo Computacional EGSnrc/Alderson-Rando *Development of Computational Model of EGSnrc/Alderson-Rando*

Bianca Coutinho Muniz^{1,2}, Claudio José Mesquita Menezes²

¹ Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco; ² Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste

E-mail: bianca.cm95@gmail.com

Resumo: A dosimetria numérica utiliza Modelos Computacionais de Exposição (MCE) devido à necessidade de realizar estudos de dose em situações de exposições à radiação sem que indivíduos sejam expostos. Os MCE são compostos essencialmente por um algoritmo simulador da fonte radioativa, um código Monte Carlo, e um fantoma de voxels representando a anatomia humana. O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia de desenvolvimento de um modelo computacional a partir do MCE Fash Standing (FSTA) para acoplar o fantoma de voxels Alderson-Rando ao código Monte Carlo EGSnrc.

Palavras-chave: MCE, Código Monte Carlo, Fantoma.

Abstract: The numerical dosimetry uses exposure computational models (ECM) in order to evaluate the dose distribution in radiation exposure situations without exposing individuals. The ECM are composed essentially by an algorithm that simulates a radioactive source, a Monte Carlo code and a voxel phantom that represents the human anatomy. The aim of this paper is to present the methodology of development of a computer model from the ECM Fash Standing (FSTA) in order to couple the voxelized version of the Alderson-Rando phantom to the EGSnrc Monte Carlo code.

Keywords: ECM, Monte Carlo Code, Phantom.

1. INTRODUÇÃO

Modelos Computacionais de Exposição (MCE) são utilitários que simulam virtualmente situações onde indivíduos foram expostos às radiações ionizantes. Ferramentas da dosimetria numérica para estimar a distribuição de dose pelos órgãos e tecidos radiosensíveis, são compostos, fundamentalmente, por um modelo antropomórfico para simular a geometria irradiada, um algoritmo para simular a fonte radioativa e um código Monte Carlo (MC) que

simula o transporte e interação da radiação com a matéria e também estima a energia depositada no meio [VIEIRA, 2004].

Assim, a construção de modelos de exposição ocorre devido à necessidade de realizar testes e estudos de dose em exames de radiodiagnóstico sem que indivíduos sejam expostos, assim reduzindo riscos aos envolvidos.

Os tipos de fantomas existentes variam em suas geometrias e composições, mas todos representam da melhor forma possível estruturas

anatômicas e tecido humano das áreas desejadas para o estudo. Dentre os fantasmas antropomórficos existentes, o Alderson-Rando é o mais conhecido e universalmente aceito como opção para simular o corpo humano [SANTOS, 2006; OLIVEIRA, 2015]. A *International Commission on Radiological Protection* na publicação 110 [ICRP, 2009] recomenda que o simulador da geometria irradiada seja um fantoma de voxels obtido a partir de imagens de exames de tomografia computadorizada e ressonância magnética, pois criam imagens mais realistas da anatomia humana.

O código EGSnrc utilizado neste trabalho é baseado em técnicas estatísticas para simulações com elétrons e fótons de energias entre 1 keV e 10 GeV por meio de sequência de números aleatórios [KAWRAKOW e *et al*, 2015].

Este trabalho apresenta a metodologia para o desenvolvimento de um MCE formado pelo simulador de voxels Alderson-Rando, e o código Monte Carlo EGSnrc, a partir do MCE *Fash STANDING* (FSTA). O FSTA é um dos modelos completos disponibilizados pelo Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em *caldose.org* [KRAMER, e *et al*, 2004].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em um computador que tem como principais itens de configuração um processador Intel(R) Core(TM) i5-4690S CPU @ 3,20GHz 3,20GHz, 8 GB de RAM e o sistema operacional Windows 7 Professional de 64 bits.

2.1. Desenvolvimento do fantoma de voxels Alderson-Rando

O MCE FSTA, assim como outros modelos disponibilizados pelo DEN, é composto de diversos arquivos de texto. Dentre estes, a geometria do simulador que caracteriza o MCE. Neste trabalho, a geometria utilizada foi o

Alderson-Rando que simula um adulto feminino sem os membros superiores e inferiores, como pode ser observado na figura 1. Este fantoma possui três meios principais de diferentes densidades, o esqueleto, o material simulador do tecido pulmonar e o material que o envolve, semelhante quimicamente e fisicamente ao tecido mole.

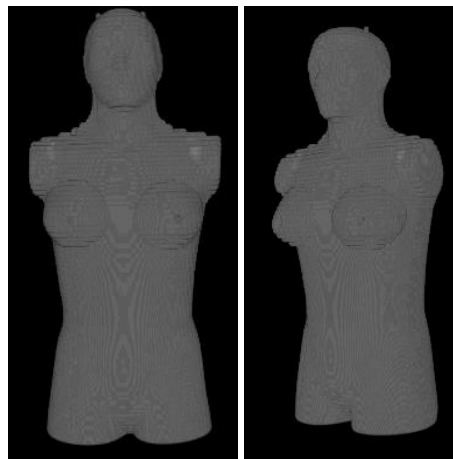


Figura 1. Imagem 3D do fantoma de voxel Alderson-Rando.

As imagens tomográficas foram obtidas inicialmente no formato *Digital Imaging and Communications in Medicine* (DICOM), e posteriormente todas as fatias foram convertidas no formato JPEG por meio do *software RadiAnt DICOM Viewer*. Para que pudessem ser agrupadas em uma pilha de imagens *.sgi.

A pilha então passou por uma série de filtros não-lineares medianas e segmentações para que cada meio fosse definido por um único identificador. A pilha foi então convertida em arquivo de texto (extensão *.data) para ser lido no EGSnrc. Todas estas etapas foram realizadas utilizando o *software Digital Image Processing* (DIP), disponibilizado pelo Grupo de Dosimetria Númerica (GDN) em *dosimetrianumerica.org/* [VIEIRA e LIMA, 2009].

2.2 Acoplamento do Fantoma Alderson-Rando ao Código EGSnrc

Conhecendo os meios presentes no fantoma Alderson-Rando foi possível preencher o menu PEGS Data da interface do EGSnrc onde as densidades de elementos e compostos químicos foram selecionados numa biblioteca já existente, assim um arquivo *.pegs4dat foi gerado. Este arquivo contém o somatório das seções de choque do ar e dos três compostos presente nos meios principais do fantoma, com seus possíveis processos físicos produzidos no intervalo de energia definido no menu PEGS Data de elétrons (AE: 512 e UE: 50000) e fótons (AP: 1 e UP: 50000).

As modificações necessárias para realizar o acoplamento do simulador ao código do usuário, escrito em linguagem mortran, são apresentadas na figura 2. Sendo no STEP 1 onde devemos definir a quantidade e meios da geometria (MEDARR), além de estabelecer as dimensões externas (\$XMAC, \$YMAC e \$ZMAC). A estas dimensões se adicionou duas camadas de voxels

nas três direções, devido à camada de ar que envolve toda a geometria.

No STEP 6b foi escolhido o algoritmo simulador de uma fonte externa pontual pósterior-anterior (PA), entre os 14 algoritmos de fontes radioativas presentes no código.

Já no STEP 8, os identificadores dos materiais presentes na geometria foram correlacionados as densidades fornecidas na seção de choque. Em seguida, o nome do arquivo contendo a geometria do simulador foi inserido assim como a quantidade de fatias a serem lidas pelo EGSnrc.

Por fim, na chamada individual de cada órgão/tecido foram informados os meios e a composição do simulador onde há um variável byte matricial 3D, sendo o IVOXMED correspondente ao meio (MEDARR) e o IVOXORG correspondente aos valores de CORG.

Além desses arquivos, o arquivo *.make,

(a)

```

108 REPLACE {$MXMED} WITH {4} "NUMBER OF MEDIA IN SET-UP"
109
110 REPLACE {$PHANTMEDIA} WITH
111 {
112 MEDARR(1)='AR'; "DENSITY = 0.001205 g/cm**3"
113 MEDARR(2)='TECIDO'; "DENSITY = 1.05 g/cm**3"
114 MEDARR(3)='PULMAO'; "DENSITY = 0.26 g/cm**3"
115 MEDARR(4)='ESQUELETO'; "DENSITY = 1.18 g/cm**3"
116 }
117
118
119 REPLACE {$PHANTNAME} WITH
120 {' EGSnrc/FASH3_supine_mic60 R0160 ICRP09/ICRU46/ICRP110 '};
121 REPLACE {$CODENAME} WITH {'EGSnrc/FSUP3_mic60'};
122
123 REPLACE {$XMAC} WITH {480} "VOXEL-NUMBER X-DIRECTION (478+2)"
124 REPLACE {$YMAC} WITH {318} "VOXEL-NUMBER Y-DIRECTION (316+2)"
125 REPLACE {$ZMAC} WITH {890} "VOXEL-NUMBER Z-DIRECTION (888+2)"
126
127 REPLACE {$MAXMICMAT} WITH {192}; "Maximum number of different "
128 "micro-materials per bone type"
129 REPLACE {$XMIC} WITH {22} "VOXEL-NUMBER X-DIRECTION (20+2)"
130 REPLACE {$YMIC} WITH {22} "VOXEL-NUMBER Y-DIRECTION (20+2)"
131 REPLACE {$ZMIC} WITH {22} "VOXEL-NUMBER Z-DIRECTION (20+2)"
132
133 REPLACE {$CBMED} WITH {7};
134
135 REPLACE {$BSC_THICKNESS} WITH {0.005}; "BSC Thickness in cm = 50 micron"
136 ;
137 "-----"
138 REPLACE {$MXREG} WITH {21} "VOXEL-MEDIA regions = $MXMED+1"
139 REPLACE {$MXSTACK} WITH {500} "up to 500 particles on stack"
140 REPLACE {$MXMDSH} WITH {200}

```

(b)

```

4002 "-----"
4003 "ICRP 70/71/89 ORGANS TISSUE COMPOSITION ICRU 46/ICRP 110 "
4004 "-----"
4005 CORG(1)='TECIDO' ; RHOORG(1)='RHO(2)'
4006 CORG(2)='PULMAO' ; RHOORG(2)='RHO(3)'
4007 CORG(3)='ESQUELETO' ; RHOORG(3)='RHO(4)'
4008
4009 tmp_file_name = $cstring(egs_home) // $cstring(user_code) // $file_sep //
4010 "ALDERSON.data";
4011 iou = egs_get_unit(37);
4012 OPEN(UNIT=iou,file=tmp_file_name,STATUS='OLD');
4013
4014 WRITE (*,('/',A55)) 'Reading 734 slices from FSUP_PET.data';
4015
4016 DO ISLICE=1,$ZMAC-2 [
4017 READ(iou, :SLICEFORM, END=:EOF); NUMSLI,NFIRST,NLASTR;
4018 DO IROW=NFIRST,NLASTR [
4019
4020
4021 SELECT CASE (NUMBER(I));
4022
4023 CASE(0): "Vacuum"
4024
4025 CASE(1): "TECIDO"
4026 IVOXMED(IPIXEL+1,IROW+1,ISLICE+1)=$2;
4027 IVOXORG(IPIXEL+1,IROW+1,NUMSLI+1)=$1;
4028 CASE(2): "PULMAO"
4029 IVOXMED(IPIXEL+1,IROW+1,ISLICE+1)=$3;
4030 IVOXORG(IPIXEL+1,IROW+1,NUMSLI+1)=$2;
4031 CASE(3): "ESQUELETO"
4032 IVOXMED(IPIXEL+1,IROW+1,ISLICE+1)=$4;
4033 IVOXORG(IPIXEL+1,IROW+1,NUMSLI+1)=$3;
4034

```

Figura 2. Modificações realizadas no código de usuário (*.mortran), com (a) apresentando trechos do STEP 1 e (b) modificações do STEP8.

responsável por gerenciar os demais arquivos modificados durante o acoplamento, teve seu nome externo alterado, assim como o nome do MCE informado internamente. A mesma modificação interna foi realizada no arquivo de texto makefile, responsável por direcionar o arquivo *.make durante a compilação, como demonstrado na Figura 3.

Após as modificações nos arquivos, foi descrito os parâmetros de entrada no arquivo *.egsinp onde foram informados dados que caracterizam as dimensões dos voxels do simulador, posição da fonte (XS, YS e ZS), a largura e a altura do campo a ser irradiado (FW e FH), o tipo da fonte (IGE), a energia inicial (EIN) e tipo de partícula que está sendo emitido pela fonte (IQ).

A quantidade de fótons ou elétrons que é emitida pela fonte foi definida em NTIM. O número de histórias/fótons foi escolhido após uma análise de amostras, tendo em vista o menor tempo computacional e incertezas estatísticas

associadas.

Os espectros utilizados neste trabalho estão declarados em NSPEC e foram selecionados dentre os fornecidos no arquivo *mspectra.data*. No espectro são consideradas tensão máxima, corrente máxima, tipo de material do anodo e filtração inerente do equipamento, de forma a apresentar o comportamento do feixe originado na fonte radioativa descrito pelo número de contagem por segundo versus energia. Além disso, neste arquivo foram definidas a quantidade de arquivos de saída e, seus nomes.

As demais siglas não foram modificadas, pois são as variáveis que representam são para aplicações diferentes das simuladas neste trabalho. As informações contidas no arquivo *.egsinp são apresentadas na Figura 4.

Com todos os arquivos modificados, uma nova pasta foi criada no diretório “C:\HEN_HOUSE\EGS_HOME\ALDERSON”, onde os arquivos necessários para simular com MCE foram colados para serem encontrados pelo

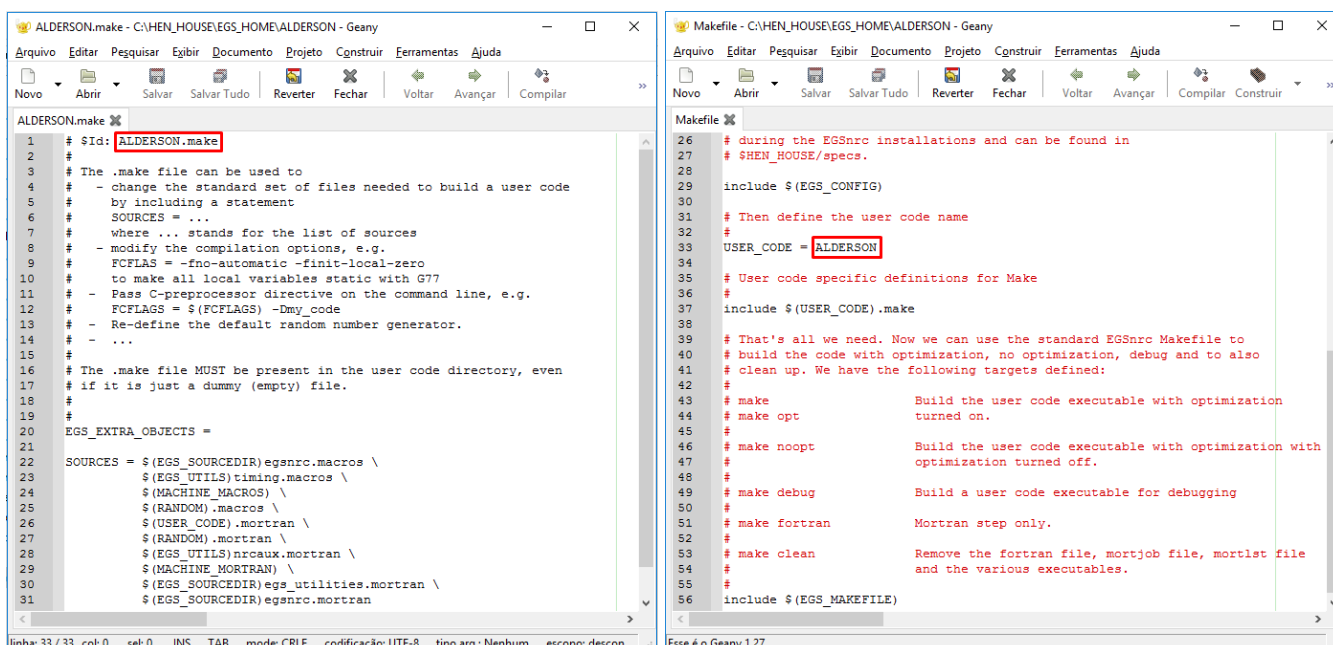
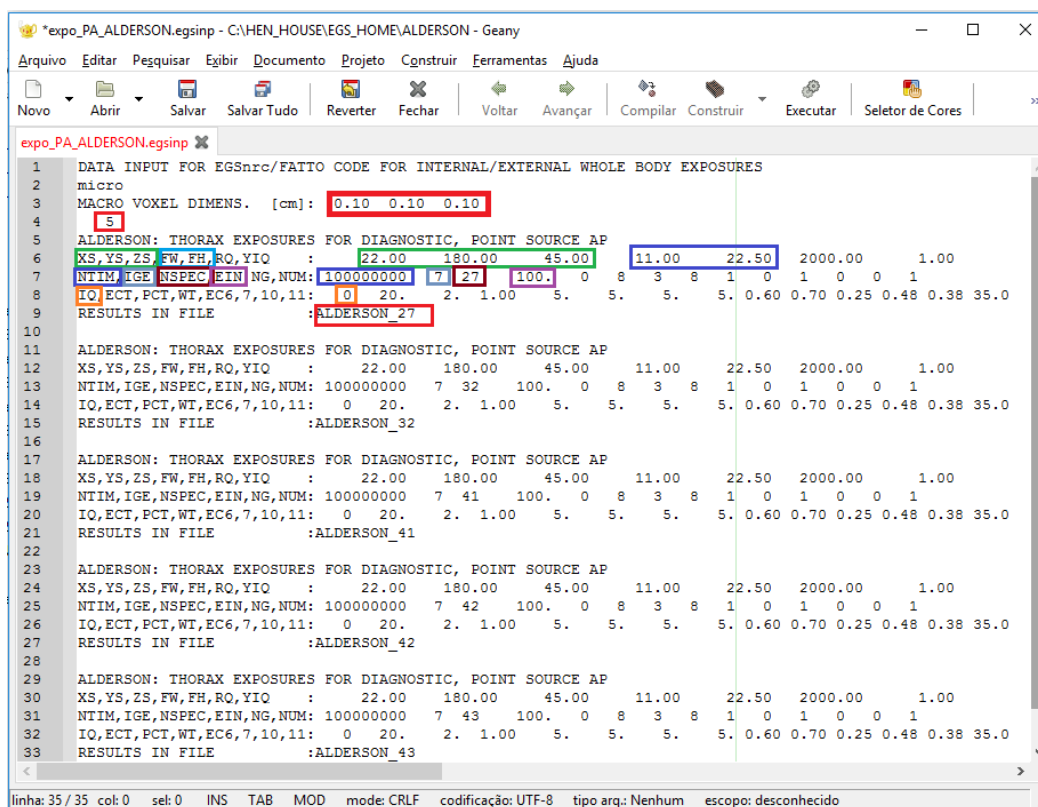


Figura 3. Modificações no arquivo *.make e makefile.

Figura 4. Informações contidas no arquivo *.egsinp.



EGSnrc durante sua compilação. É durante esse processo que erros do código principal podem ser encontrados. Após a compilação três arquivos responsáveis pela transcodificação do código principal que está em linguagem Mortran para a linguagem Fortran foram gerados na pasta do MCE, sendo possível então iniciar as simulações para avaliação de dose, onde o arquivo que contém a seção de choque (*.pegs4dat) e o arquivo que contém os parâmetros de entrada (*.egsinp) foram vinculados ao arquivo executável.

3. RESULTADOS

Resultados preliminares obtidos nas simulações são apresentados para cada espectro utilizado, onde a distribuição de dose das simulações é demonstrada, para uma radiografia de tórax AP. Como retratado anteriormente, o espectro descreve o comportamento do feixe ao considerar uma série de parâmetros do

equipamento. Cinco dos listados no arquivo *mspectra.data* foram selecionados para simulações numa faixa de tensão utilizada para radiografias de tórax. Os espectros apresentam filtração de 2,5mmAl e material do ânodo de tungstênio variando a tensão máxima em intervalos regulares entre 80 e 120 kVcp. De acordo com a numeração presente no arquivo de texto dos espectros os selecionados foram o de número 17 (80 kVcp), o espectro 22 (90 kVcp), o espectro 27 (100 kVcp), o espectro 32 (110 kVcp) e o espectro de número 37 (120 kVcp).

As tabelas a seguir descrevem uma comparação entre as distribuições de dose absorvida/kerma incidente no ar (D/INAK) nos meios presente no MCE Alderson-rando com as estruturas similares do já validado MCE FSTA, bem como os coeficientes de variância para tais estruturas.

Tabela 1. Resultados obtidos em simulações com o espectro 17 (80 kVcp).

ESTRUTURA	ALDERSON		FSTA	
	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA
Tecido mole	3,1908E-02	0.02%	3,1773E-02	0.26%
Pulmão	4,8946E-02	0.13%	4,6188E-02	0.07%
Esqueleto	1,3575E-01	0.04%	1,4402E-01	0.06%

Tabela 2. Resultados obtidos em simulações com o espectro 22 (90 kVcp).

ESTRUTURA	ALDERSON		FSTA	
	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA
Tecido mole	3,5692E-02	0.02%	2,6709E-02	0.29%
Pulmão	5,7726E-02	0.13%	5,0166E-02	0.07%
Esqueleto	1,5530E-01	0.04%	1,5967E-01	0.06%

Tabela 3. Resultados obtidos em simulações com o espectro 27 (100 kVcp).

ESTRUTURA	ALDERSON		FSTA	
	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA
Tecido mole	3,9191E-02	0.02%	2,9942E-02	0.28%
Pulmão	6,5394E-02	0.12%	5,3733E-02	0.07%
Esqueleto	1,7190E-01	0.04%	1,7252E-01	0.06%

Tabela 4. Resultados obtidos em simulações com o espectro 32 (110 kVcp).

ESTRUTURA	ALDERSON		FSTA	
	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA
Tecido mole	4,2405E-02	0.02%	3,3163E-02	0.27%
Pulmão	7,2869E-02	0.12%	6,6806E-02	0.07%
Esqueleto	1,8571E-01	0.04%	1,8336E-01	0.06%

Tabela 5. Resultados obtidos em simulações com o espectro 37 (120 kVcp).

ESTRUTURA	ALDERSON		FSTA	
	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA	D/INAK	COEF. DE VARIÂNCIA
Tecido mole	4,5314E-02	0.02%	3,6033E-02	0.26%
Pulmão	7,9211E-02	0.12%	5,9487E-02	0.07%
Esqueleto	1,9689E-01	0.04%	1,9214E-01	0.06%

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com as simulações realizadas demonstraram que este MCE pode ser utilizado em simulações de aplicações médicas, podendo contribuir no desenvolvimento de novos métodos de construção de fantasmas, uma vez que os resultados preliminares se mostraram satisfatórios quando comparados aos obtidos com mesmos parâmetros por meio de simulações com o MCE FSTA.

Em uma próxima etapa, o MCE desenvolvido terá as doses comparadas com medições experimentais realizadas com câmara de ionização para validação do modelo.

REFERÊNCIAS

CALDose. Disponível em: <<http://www.caldose.org>>. Acesso em: 19 de jan. 2016.

ICRP, 2009. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 (2).

KAWRAKOW, I.; MAINEGRA-HING, E.; ROGERS, D. W. O. TESSIER, F., WALTERS, B. R. B., **The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, NRCC Report PIRS-701**, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2015.

KRAMER, R.; VIEIRA, J. W.; KHOURY, H. J.; LIMA, F. R. A.; LOUREIRO, E. C. M.; LIMA,

V. J. M.; HOFF, G. **All about FAX: a Female Adult voXel Phantom for Monte Carlo Calculation in Radiation Protection Dosimetry**, *Phys. Med. Biol.*, v. 49, 5203-5216, 2004.

OLIVEIRA, F. L. de. **Avaliação dosimétrica de propostas de planejamento radioterápico para tratamento de mama e próstata**. 2015.84 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

RadiAnt DICOM Viewer. Disponível em: <www.radiantviewer.com>. Acesso em: 19 de jan. 2016.

SANTOS, A. M. **Desenvolvimento de um modelo computacional para cálculos de dose absorvida em órgãos e tecidos do corpo humano nas situações de exposições acidentais**, Tese de Doutorado, DEN-UFPE, Recife-PE, Brasil, 2006.

VIEIRA, J. W. **Construção de um Modelo Computacional de Exposição para Cálculos Dosimétricos Utilizando o Código Monte Carlo EGS4 e Fantasmas de Voxels**. 2004.101 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

VIEIRA, J. W.; LIMA, F. R. A. A software to digital image processing to be used in the voxel phantom development. *Cellular and Molecular Biology*, v. 55, n. 3, p. 16-22, 2009.

AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho só foi possível devido ao apoio financeiro (bolsa de Iniciação Científica)

concedido pelo CNPq/CNEN e o apoio técnico do CRCN-NE/CNEN e IFPE, Campus Recife.