



P

ROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÕES  
NA COMUNIDADE DOS PAÍSES  
DE LÍNGUA PORTUGUESA

Luis Neves (coord.)

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
2018

**TUTORIAL PARA ACOPLAMENTO DE UM SIMULADOR DE  
VOXELS AO CÓDIGO MONTE CARLO EGSNRC**

**TUTORIAL FOR COUPLING A VOXEL SIMULATOR TO  
EGSNRC MONTE CARLO CODE**

**B. C. MUNIZ – bianca.cm95@gmail.com (Instituto Federal de Pernambuco,  
Laboratório de Dosimetria Numérica)**

**I. V. B. LACERDA – isabelle.lacerda@ufpe.br (Universidade Federal de Pernam-  
buco, Departamento de Energia Nuclear)**

**J. W. VIEIRA – jose.wilson59@uol.com.br (Universidade de Pernambuco, Esco-  
la Politécnica de Pernambuco / Instituto Federal de Pernambuco, Laboratório  
de Dosimetria Numérica)**

**C. J. M. MENEZES – cjmm@cnen.gov.br (Comissão Nacional de Energia Nucle-  
ar, Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste)**

**F. A. LIMA – falima@cnen.gov.br (Comissão Nacional de Energia Nuclear, Cen-  
tro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste)**

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo computacional de exposição, FATTO,  
dosimetria numérica, monte carlo, EGSnrc

**RESUMO:** Para estimar a distribuição de dose nos órgãos e tecidos radiossensíveis em indivíduos sem que esses sejam expostos às radiações ionizantes, é necessário realizar simulações utilizando um Modelo Computacional de Exposição (MCE). Tais modelos são compostos por uma geometria a ser irradiada, um algoritmo simulador da fonte radioativa e um código Monte Carlo (MC). A ICRP 110 recomenda que a geometria utilizada seja um simulador de voxels. O DEN/UFPE disponibiliza MCEs completos ([www.cal](http://www.cal)

dose.org) para serem executados no código MC EGSnrc. Dentre eles, o Male STAnding (MSTA), composto por 14 algoritmos de fontes radioativas e pelo simulador de voxels Male Adult meSH (MASH). Este trabalho utiliza o MSTA para elaborar um tutorial para acoplar um simulador de voxel ao código EGSnrc, baseando-se em um estudo de caso. Essencialmente, para realizar o acoplamento são necessários quatro arquivos de texto que contêm a geometria do simulador, as seções de choque de cada material que o compõe, os parâmetros de entrada e o código de usuário. Neste trabalho, a geometria utilizada foi o Fantoma físico da região Torácica (FATTO). O desenvolvimento de MCEs como o descrito no tutorial auxilia pesquisadores e estudantes interessados em avaliações dosimétricas envolvendo fótons e/ou elétrons. A partir da metodologia apresentada modificações adicionais podem ser organizadas em arquivos de texto sem grandes alterações.

**KEYWORDS:** exposure computational model, FATTO, numeric dosimetry, monte carlo, EGSnrc

**ABSTRACT:** To estimate the dose distribution in radiosensitive organs and tissues in individuals without these being exposed to ionizing radiation, it is necessary to perform simulations using Exposure Computational Model (ECM). Such models are composed by a geometry which will be irradiated, an algorithm that simulates the radioactive source and a Monte Carlo (MC) code. The ICRP 110 recommends that the used geometry must be a voxel simulator. The DEN/UFPE offers full ECMs ([www.caldose.org](http://www.caldose.org)) to run on EGSnrc MC code. Among them, the Male STAnding (MSTA), composed by 14 algorithms of radioactive sources and by the Male Adult meSH (MASH) voxels simulator. This paper uses the MSTA to elaborate a tutorial for coupling a voxel simulator to EGSnrc code based on a study of case. Essentially, the coupling requires four text files

which contain the geometry of the simulator, the cross-sections of each material that composes the input parameters and the user code. In this paper, the used geometry was the FAnToma físico da região TORácica (FATTO). The development of ECMs as described in the tutorial helps researchers and students interested in dose estimation involving photons and/or electrons. Additional changes can be arranged in text files without major adjustments starting from the presented methodology.

## 1. INTRODUÇÃO

As radiações ionizantes podem ser aplicadas em diversos setores da atividade humana como saúde, indústria, agricultura, pesquisa e outras. Entretanto, efeitos prejudiciais como mutações genéticas e câncer devido ao seu uso podem surgir em indivíduos expostos (Moreira, 2011) Para estimar a distribuição de dose pelos órgãos e tecidos radiosensíveis em indivíduos, sem que esses sejam expostos às radiações ionizantes, é necessário realizar simulações utilizando um Modelo Computacional de Exposição (MCE) (Vieira, 2004). Tais modelos são compostos por uma geometria a ser irradiada, um algoritmo simulador da 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 (Vieira, 2004). O Electron Gamma Shower National Research Council (EGSnc) (Kawrakow, 2015) é um código MC 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.

Para utilização em dosimetria numérica é necessário que um simulador de voxels seja acoplado a um código MC. De acordo com a Publicação 110 (ICRP, 2009) da International Commission on Radiological Protection (ICRP), imagens obtidas por meio de exames de tomografia computadorizada e ressonância magnética são mais adequadas para a

construção de simuladores de voxels, pois retratam a anatomia humana fidedignamente. O Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em [caldose.org](http://caldose.org) (CALDose) disponibiliza MCEs completos contendo os simuladores de voxels Male Adult meSH (MASH) ou Female Adult meSH (FASH). Esses modelos estão disponíveis nas posições ortostática (Mash/Fash STANDING - MSTA/FSTA) e em decúbito dorsal (Mash/Fash SUPINE – MSUP/FSUP). Este trabalho parte do MSTA para elaborar um tutorial para acoplamento de um simulador de voxel ao código EGSnrc, baseando-se em estudo de caso.

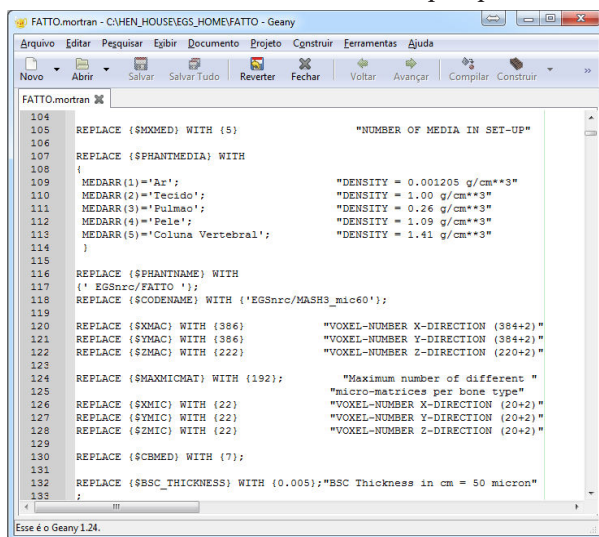
## 2. MÉTODOS E RESULTADOS

Este trabalho foi desenvolvido pelo Grupo de Dosimetria Numérica (GDN) no Laboratório de Dosimetria Numérica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Campus Recife, em um computador que tem como principais itens de configuração um processador Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q9550 @ 2,83GHz, 8 GB de RAM e o sistema operacional Windows 7 Ultimate de 64 bits. Para o desenvolvimento deste tutorial foi utilizado o EGSnrc (V4 2.4.0), lançado em 31 de março de 2013. Este código pode ser executado em sistemas GNU/Linux e Windows, entretanto em ambos os casos é necessário que seja criado o diretório “C:\HEN\_HOUSE/EGS\_HOME” para inserir o MCE. Os modelos disponibilizados pelo DEN são compostos de diversos arquivos de texto. Dentre estes, a geometria do simulador que caracteriza o MCE. Neste trabalho, a geometria utilizada foi o FAnToma físico da região TORácica (FATTO) (Barbosa, 2012) que simula a geometria e densidade irradiada de um tórax, composto de pulmões, ar, coluna torácica, músculos e pele.

Obtido a partir de imagens tomográficas no formato Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), o FATTO inicialmente foi convertido em imagens no formato JPEG por meio do software RadiAnt

DICOM Viewer (RadiAnt DICOM Viewer). Utilizando-se o software Digital Image Processing (DIP) (Vieira, 2009), as imagens são agrupadas em uma pilha de extensão \*.sgi que em seguida é convertida em arquivo de texto (extensão \*.data) para ser lido no EGSnrc. Por meio do preenchimento do menu PEGS Data da interface do EGSnrc com os dados de interesse da biblioteca de densidades de elementos e compostos químicos, um arquivo \*.pegs4dat é gerado. Este contém o somatório das seções de choque dos compostos já catalogados e seus possíveis processos físicos produzidos no intervalo de energia definido pelo usuário.

No código do usuário, escrito em linguagem mortran, modificações são necessárias para o acoplamento do simulador. Conforme Figura 1, no passo 1 são definidas a quantidade e meios da geometria (MEDARR). Além disso, são estabelecidas as suas dimensões externas (\$XMAC, \$YMAC e \$ZMAC), nas quais são adicionadas duas camadas de voxels nas três direções devido à camada de ar que envolve toda a geometria. No passo 6b são apresentados os 13 algoritmos de fontes radioativas para dosimetria externa e um para dosimetria interna que podem ser modificados de acordo com necessidade do pesquisador.



```
FATTO.mortran
104 REPLACE {$MOMED} WITH {5} "NUMBER OF MEDIA IN SET-UP"
105
106 REPLACE {$PHANTMEDIA} WITH
107 {
108 MEDARR (1)='Ar'; "DENSITY = 0.001205 g/cm**3"
109 MEDARR (2)='Tecido'; "DENSITY = 1.00 g/cm**3"
110 MEDARR (3)='Pulmao'; "DENSITY = 0.26 g/cm**3"
111 MEDARR (4)='Pele'; "DENSITY = 1.09 g/cm**3"
112 MEDARR (5)='Coluna Vertebral'; "DENSITY = 1.41 g/cm**3"
113 }
114
115
116 REPLACE {$PHANTNAME} WITH
117 {' EGSnrc/FATTO '};
118 REPLACE {$CODENAME} WITH {'EGSnrc/MASH3_mic60'};
119
120 REPLACE {$XMAC} WITH {386} "VOXEL-NUMBER X-DIRECTION (384+2)"
121 REPLACE {$YMAC} WITH {386} "VOXEL-NUMBER Y-DIRECTION (384+2)"
122 REPLACE {$ZMAC} WITH {222} "VOXEL-NUMBER Z-DIRECTION (220+2)"
123
124 REPLACE {$MAXMICMAT} WITH {192}; "Maximum number of different "
125 "micro-matrices per bone type"
126 REPLACE {$XMIC} WITH {22} "VOXEL-NUMBER X-DIRECTION (20+2)"
127 REPLACE {$YMIC} WITH {22} "VOXEL-NUMBER Y-DIRECTION (20+2)"
128 REPLACE {$ZMIC} WITH {22} "VOXEL-NUMBER Z-DIRECTION (20+2)"
129
130 REPLACE {$CBMED} WITH {7};
131
132 REPLACE {$BSC_THICKNESS} WITH {0.005};"BSC Thickness in cm = 50 micron"
133 ;
```

Figura 1. Modificações realizadas no step 1 do arquivo FATTO mortran

As informações descritas no arquivo de saída podem ser alteradas no passo 8. Neste passo, os identificadores dos materiais presentes na geometria (RHOORG) são correlacionados as densidades fornecidas na seção de choque (RHO), enumerando os órgãos presentes no simulador de voxels (CORG). Em seguida, o nome do arquivo que contém a geometria do simulador deve ser inserido e a quantidade de fatias a serem lidas pelo EGSncrc informada. As modificações no step 8 são apresentadas na Figura 2. Por fim, na chamada individual de cada órgão/tecido (CASE) está presente uma variável byte matricial 3D que contém os meios e a composição do simulador, sendo o IVOXMED correspondente ao meio (MEDARR) e o IVOXORG correspondente aos valores de CORG.

```

FATTO.mortran
3970 .....
3971 *ICRP 70/71/79 ORGANS ..... ISSUE COMPOSITION ICRU 46/ICRP 110 *
3972 .....
3973 CORG(1)="TECIDO" ; RHOORG(1)=RHO(3);
3974 CORG(2)="FELDADO" ; RHOORG(2)=RHO(3);
3975 CORG(3)="FELIE" ; RHOORG(3)=RHO(4);
3976 CORG(4)="COLUNA" ; RHOORG(4)=RHO(4);

4100 tmp_file_name = $string(egs_home) // $string(user_code) // $file_sep //
4101 'FATTO.data';

4107 WRITE (*,/,A55)'Reading 220 slices from FATTO.data';
4108
4109 DO ISLICE=1,$MAC-2 [

4124 CASE(0): "Vacuum"
4125
4126 CASE(1): "Tecido"
4127 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,ISLICE+1)=2;
4128 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,NONSL+1)=1;
4129 CASE(2): "Feldado"
4130 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,ISLICE+1)=3;
4131 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,NONSL+1)=2;
4132 CASE(3): "Feldie"
4133 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,ISLICE+1)=4;
4134 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,NONSL+1)=3;
4135 CASE(4): "Coluna Vertebra"
4136 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,ISLICE+1)=5;
4137 IVOXORG(IPXEL+1,IRON+1,NONSL+1)=4;

```

Figura 2. Modificações realizadas no step 8 do arquivo FATTO.mortran.

Para gerenciar os diversos arquivos modificados durante o acoplamento, é utilizado um arquivo \*.make que compila todas as partes do código do usuário. Caso seja apresentado algum erro de compilação, somente as partes corrigidas serão recompiladas, uma vez que \*.make distingue as alterações. Para que isso ocorra, o nome do arquivo deve ser o do MCE e também deve ser informado internamente. A mesma modificação interna deve ser realizada no

makefile, arquivo de texto responsável por direcionar o arquivo \*.make durante a compilação, definindo a relação entre os arquivos fonte, objeto e executáveis. Após a compilação são criadas na pasta do código do usuário três arquivos responsáveis pela transcodificação do código principal que está em linguagem mortran para a linguagem fortran.

Para iniciar as simulações para avaliação de dose, é necessário que o arquivo que contém a seção de choque (\*.pegs4dat) e o arquivo que contém os parâmetros de entrada (\*.egsinp) sejam vinculados ao arquivo executável. O arquivo \*.egsinp contém informações adicionais 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 é definida em NTIM. O número de histórias simuladas deve ser escolhido após análise de um número suficientemente grande de amostragens, tendo em vista o tempo computacional e incertezas estatísticas associadas. As informações contidas no arquivo \*.egsinp são apresentadas na Figura 3.

```

FATTO.mortran - C:\HEN_HOUSE\EGS_HOME\FATTO - Geany
Arquivo Editar Pesquisar Exibir Documento Projeto Cnstruir Ferramentas Ajuda
Novo Abrir Salvar Salvar Tudo Reverter Fechar Voltar Avançar Compilar Construir Executar Seletor de Cores
FATTO.mortran 38
3970 *****
3971 *ICRP 70/71/59 ORGANS          TISSUE COMPOSITION ICRU 46/ICRP 110 *
3972 *****
3973 CORG(1)=*PELIDO              * JRHOORG(1)=RHO(3);
3974 CORG(2)=*FELDADO            * JRHOORG(2)=RHO(3);
3975 CORG(3)=*FELIC              * JRHOORG(3)=RHO(4);
3976 CORG(4)=*COLUNA             * JRHOORG(4)=RHO(3);

4100 tmp_file_name = $osting(egs_home) // $osting(user_code) // $file_sep //
4101 'FATTO.data';

4107 WRITE (*,/,AS5) 'Reading 220 slices from FATTO.data';
4108
4109 DO ISLICE=1,$ZMAC-2 [

4124 CASE(0): "Vacuum"
4125
4126 CASE(1): "Tecido"
4127 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,ISLICE=1)=2;
4128 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,NTMSL=1)=1;
4129 CASE(2): "Fujisao"
4130 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,ISLICE=1)=3;
4131 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,NTMSL=1)=2;
4132 CASE(3): "Fela"
4133 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,ISLICE=1)=4;
4134 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,NTMSL=1)=3;
4135 CASE(4): "Coluna Vertebral"
4136 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,ISLICE=1)=5;
4137 IVOXORG(IPXEL=1,IRON=1,NTMSL=1)=4;

```

Figura 3. Informações contidas no arquivo \*.egsinp.



O comportamento do feixe originado na fonte radioativa é apresentado em um espectro que descreve o número de contagem por segundo versus energia. Na criação de espectros deve ser considerada tensão máxima, corrente máxima, tipo de material do anodo e filtração inerente do equipamento. O espectro utilizado neste trabalho está declarado em NSPEC e foi um dos fornecidos no arquivo mspectra.data. Outra forma de obter espectros é por meio de softwares geradores de espectros tais como Specgen (Tucker, 1991) e Spekcalc (Poludniowski, 2009). Em casos de avaliação de dose interna, o NSPEC deve ser declarado como zero. As demais siglas que representam um conjunto de variáveis são modificadas apenas quando há interesse em avaliar a dose no esqueleto. Além disso, neste arquivo deve ser definida a quantidade de arquivos de saída e, posteriormente, nomeá-los.

Na pasta do MCE também estão presentes as 5 micromatrizes (micro10x.data, micro12x.data, micro15x.data, micro20x.data e micro55x.data) para avaliação do transporte da radiação em ossos já vinculados ao \*.mortran. Estes arquivos são obtidos a partir de imagens micro-CT de amostras de cinco regiões diferentes (esterno, coluna vertebral lombar, fêmur, pelve e osso frontal do crânio) de osso trabecular real. Além das micromatrizes, está presente também um arquivo utilizado exclusivamente para dosimetria interna. Este arquivo contém uma lista com os principais órgãos-fontes utilizados na prática de exames em medicina nuclear, seu respectivo número identificador e localizações de x, y e z (mínimo e máximo). Para a realização da avaliação da dose interna, é necessário informar o identificador do órgão-fonte ao \*.mortran e ao \*.egsinp. A nomenclatura desta lista é baseada na geometria do objeto simulador a ser acoplado ao código MC (MASH ou FASH) e no seu posicionamento (supino ou ortostático), sendo obtida nos MCEs disponibilizados em [caldose.org](http://caldose.org).

### 3. CONCLUSÕES

Por meio de um correto acoplamento do simulador de voxels ao código MC, é possível criar um MCE para avaliações dosimétricas das estruturas da geometria. O desenvolvimento de MCEs como o descrito no tutorial auxilia pesquisadores e estudantes interessados em avaliações dosimétricas envolvendo fótons e/ou elétrons. As modificações apresentadas neste tutorial servem como base para acoplamento de novas geometrias ao código MC, de modo que novos MCEs podem ser criados dependendo do problema do usuário. Neste tutorial foi apresentado o acoplamento do FATTO ao código EGSnrc para avaliação da dose externa. As modificações necessárias para acoplamento de outros simuladores podem ser realizadas nos arquivos de texto sem grandes alterações na metodologia apresentada. A inclusão de novos algoritmos de fontes radioativas ao código de usuário, por exemplo, pode ser realizada por meio da adição de variáveis do novo algoritmo ou da modificação das existentes no arquivo de entrada, desde que se preserve sua formatação original. Os MCEs completos desenvolvidos pelo GDN estarão em breve disponíveis em [dosimetrianumerica.org](http://dosimetrianumerica.org) (Grupo de Dosimetria Numérica).

#### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE/CNEN), ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Universidade de Pernambuco (UPE), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e a Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica (SBPR).

## Referências

- Barbosa, J. L. O. (2012). Construção de um Objeto Simulador para Exames de Radiodiagnóstico do Tórax. Anal do VIII Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Biociências Nucleares.
- Caldose.org. (n.d.). Retirado a 19 de janeiro de 2016, de <http://www.caldose.org/>
- Grupo de Dosimetria Numérica. (n.d.). Retirado a 16 de janeiro de 2016, de <http://www.dosimetrianumerica.org/>
- ICRP (2009). Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 (2).
- Kawrakow, I. (2015). The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport. NRCC Report PIRS-701, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
- Moreira, J. V. D. A. (2011). Radiobiologia: efeito das radiações ionizantes na célula e formas de protecção das radiações ionizantes. Dissertação (Mestrado em Medicina), Universidade da Beira Interior.
- Poludniowski, G., Landry, G., DeBlois, F., Evans, P. M., & Verhaegen, F. (2009). SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes. *Physics in medicine and biology*, 54(19), N433.
- RadiAnt DICOM Viewer. (n.d.). Retirado a 19 de janeiro de 2016, de <http://www.radiantviewer.com/>
- Tucker, D. M., Barnes, G. T., & Chakraborty, D. P. (1991). Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra. *Medical physics*, 18(2), 211-218.
- Vieira, J. W. (2004). Construção de um modelo computacional de exposição para cálculos dosimétricos utilizando o código Monte Carlo EGS4 e fantasmas de voxels. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares)–Universidade Federal de Pernambuco. Recife.
- Vieira, J. W., & Lima, F. R. A. (2009). A software to digital image processing to be used in the voxel phantom development. *Cellular and Molecular Biology*, 55(3), 16-22.