

VOXELIZAÇÃO DE UM FANTOMA MESH PARA ACOPLAMENTO AO EGSnrc

Cabral, M.O.M.¹, Vieira, J.W.^{1,2,3}, Leal Neto, V.¹, Lima, V.J.M.⁴, Lima Filho, J.M.² e
Lima, F.R.A.^{1,3,5}

¹ Departamento de Energia Nuclear, DEN-UFPE
Av. Prof. Luís Freire, 1000, Recife/PE, 50740-540,

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, IFPE Campus Recife
Av. Prof. Luís Freire, 500, Recife/PE, 50740-540

³ Escola Politécnica de Pernambuco, EPP-UPE
Rua Benfica, 455, Recife/PE, 50750-470

⁴ Universidade Federal de Pernambuco, DA-UFPE
Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife/PE, 50670-901

⁵ Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste, CRCN-NE/CNEN
Av. Professor Luiz Freire, 200, Recife/PE, 50740-540

RESUMO

Os Modelos Computacionais de Exposição (MCEs) são utilitários que estimam valores de dose absorvida pelos órgãos e tecidos radiosensíveis de indivíduos expostos às radiações ionizantes, por meio de simulações Monte Carlo (MC). Para a caracterização de um MCE com resultados dosimétricos satisfatórios, o Grupo de Dosimetria Numérica (GDN) (localizado em Recife/Pernambuco, Brasil) tem utilizado fantasmas de voxels acoplados a códigos MC bem referenciados e simuladores de fontes emissoras de fótons. Nestes MCEs, os fantasmas foram predominantemente construídos a partir de imagens de ressonância magnética ou de tomografia computadorizada, ou a partir de técnicas de modelagem 3D. Para o desenvolvimento do fantoma mais recente do GDN, denominado MARIA (Modelo Antropomórfico para dosimetria das Radiações Ionizantes em Adultas), foram utilizadas técnicas de modelagem poligonal (*mesh*). Para o acoplamento do fantoma MARIA na versão *mesh* ao código MC EGSnrc, foi necessária a conversão dos objetos poligonais 3D (superficiais) em objetos do tipo voxels (volumétricos). Para isto, foi utilizado o software Binvox e os órgãos/tecidos mais extensos (pele, músculos, ossos e tecido adiposo), os radiosensíveis da região abdominal (fígado, estômago, bexiga e ovários) e os anexos embrionários (placenta e bolsa amniótica), foram voxelizados. Os resultados são promissores e o fantoma MARIA na versão *mesh* terá todos os órgãos e tecidos radiosensíveis voxelizados, listados na publicação 103 da *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), para simular os principais exames de radiodiagnóstico em mulheres grávidas nos próximos trabalhos do GDN.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos Monte Carlo (MC) utilizam números aleatórios, por meio de sistemas estocásticos naturais ou por equações integrais e diferenciais, para calcular quantidades de interesse. Em uma simulação, não há solução exata do problema, mas o que se espera é uma boa estimativa do valor exato à medida que um número suficientemente grande de amostragens é processado. Em alguns trabalhos que envolvem radiações ionizantes e suas interações com o corpo humano, os métodos MC estão associados ao desenvolvimento e/ou uso de três componentes principais: fantasmas antropomórficos, códigos de transporte de radiações ionizantes e algoritmos simuladores de fontes radioativas para obtenção de resultados dosimétricos.

¹ E-mail do Autor. manuela.omc@gmail.com

Os fantasmas computacionais têm suas estruturas anatômicas construídas a partir de técnicas de modelagens baseadas em mapa de bits e/ou vetores. Os primeiros trabalhos desenvolvidos para fins dosimétricos utilizaram representações matemáticas simplificadas. Posteriormente, imagens médicas segmentadas, obtidas da varredura de pacientes ou cadáveres, como ressonância magnética (IRM) ou tomografia computadorizada (TC), serviram de dados primários para a construção de fantasmas do tipo voxels. Com o desenvolvimento de programas gráficos com foco no ambiente tridimensional, o método de modelagem Representação por Fronteira (BREP - *Boundary REpresentation Phantom*) passou a ser utilizado por associar imagens médicas a fantasmas matemáticos e/ou a fantasmas de malhas 3D, proporcionando mais realismo e flexibilidade em representar variações anatômicas. Atualmente tem se intensificado a produção de fantasmas de malhas poligonais (*mesh*), desenvolvidos em softwares de modelagem 3D, por não necessitar do uso de imagens médicas e/ou formas geométricas para a criação de um fantoma. Exemplos de fantasmas gestacionais do tipo matemático^[1], de voxels^[2], híbrido^[3] e *mesh*^[4], respectivamente, podem ser vistos na Figura 1.

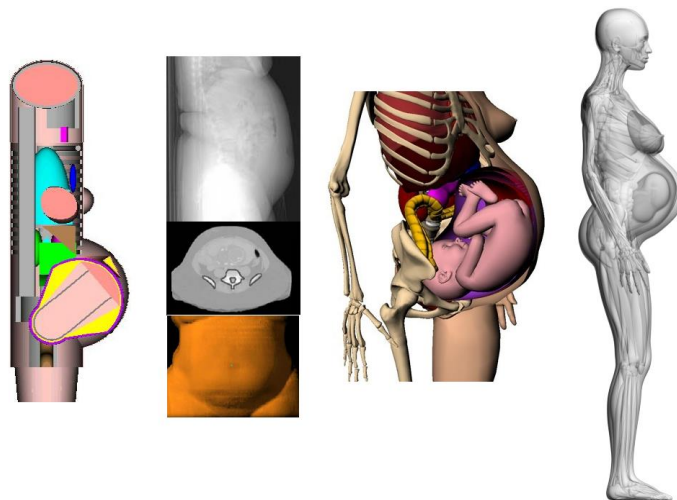


Figura 1. Na sequência, fantasmas do tipo matemático, tomográfico, híbrido e *mesh*.

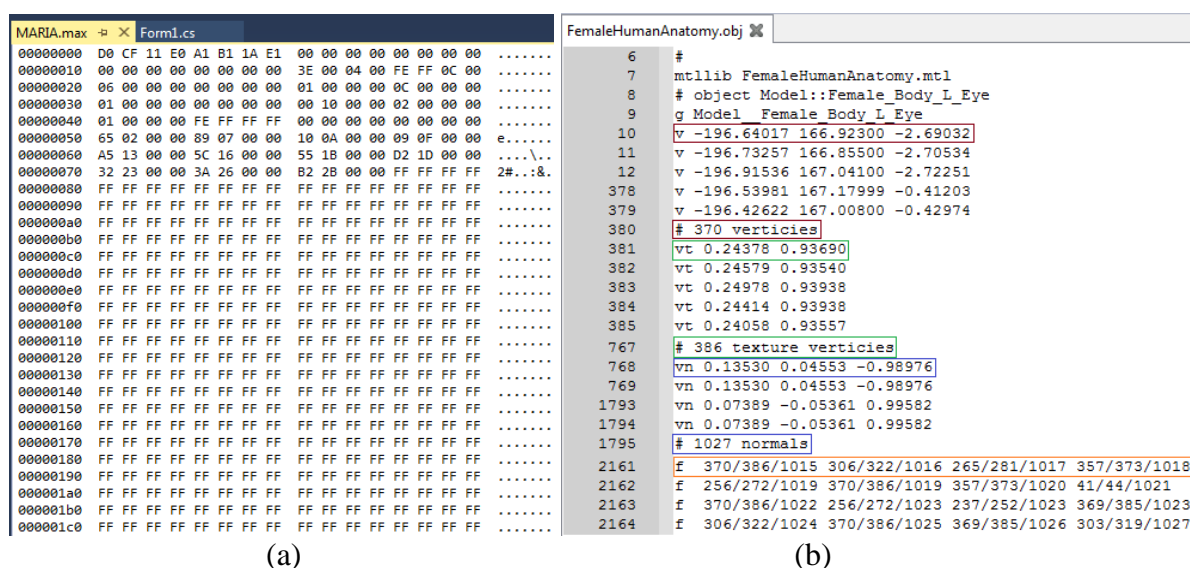
Para o uso de fantasmas computacionais em dosimetria numérica é fundamental o acoplamento destes a um código MC bem referenciado que simule o transporte da radiação e sua interação com a matéria. Pesquisadores do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE) e do Grupo de Dosimetria Numérica (GDN) (ambos localizados na cidade de Recife/Pernambuco, Brasil) têm comumente utilizado fantasmas de voxels acoplados ao código MC EGSnrc, quando se trata de simulações envolvendo fótons. Portanto, o objetivo principal deste trabalho consistiu, em converter para voxels o fantoma *mesh* MARIA (Modelo Antropomórfico para dosimetria das Radiações Ionizantes em Adultas), utilizando o software Binvox^[5] para, um posterior acoplamento deste ao código MC EGSnrc^[6].

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

2.1. Voxelização de fantasmas *mesh*

Para voxelizar o fantoma *mesh* MARIA foram feitas duas transformações: 1) conversão de arquivos binários do tipo *.max em arquivos de texto do tipo *.obj, contendo estruturas 3D; 2) conversão de arquivos *.obj para arquivos de dados brutos de 8 bits do tipo *.raw, contendo estruturas de voxels.

O fantoma MARIA é um arquivo binário (*.max) composto por vértices, faces, texturas, normais, e outras informações como sombreado e iluminação, por exemplo, e que precisam de softwares de edição especiais para sua leitura e manipulação (Figura 2a). Foi utilizado um menu, disponível no Autodesk 3ds Max^[7], para a exportação dos objetos 3D (*.max) para o formato *.obj, cujas informações podem ser lidas por meio de coordenadas representadas por texto e números (Figura 2b). O intuito desta transformação é tornar possível a leitura dos objetos 3D em programas alternativos, como também permitir que o arquivo seja compatível com o software Binvox, que possui tipos de arquivos limitados aceitos para voxelização.

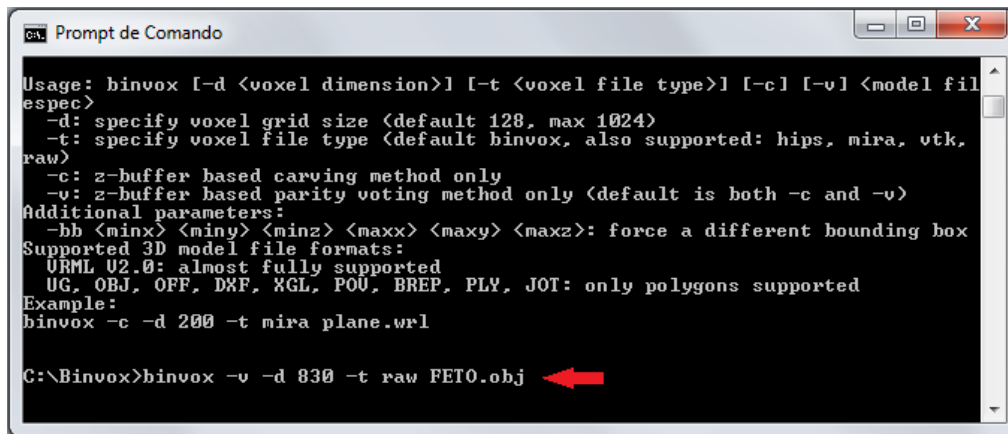


```
MARIA.max Form1.cs FemaleHumanAnatomy.obj
00000000 D0 CF 11 E0 A1 B1 1A E1 00 00 00 00 00 00 00 00 .....
00000010 00 00 00 00 00 00 00 3E 00 04 00 FE FF 0C 00 .....
00000020 06 00 00 00 00 00 00 01 00 00 00 0C 00 00 00 .....
00000030 01 00 00 00 00 00 00 00 10 00 00 02 00 00 00 .....
00000040 01 00 00 00 FE FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 .....
00000050 65 02 00 00 89 07 00 00 10 0A 00 00 09 0F 00 .....
00000060 A5 13 00 00 5C 16 00 00 55 18 00 00 D2 1D 00 00 .....
00000070 32 23 00 00 3A 26 00 00 B2 28 00 00 FF FF FF FF 2#...&
00000080 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000090 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000000a0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000000b0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000000c0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000000d0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000000e0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000000f0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000100 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000110 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000120 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000130 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000140 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000150 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000160 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000170 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000180 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
00000190 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000001a0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000001b0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
000001c0 FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF FF .....
6 #
7 mtllib FemaleHumanAnatomy.mtl
8 # object Model::Female_Body_L_Eye
9 g Model_Female_Body_L_Eye
10 v -196.64017 166.92300 -2.69032
11 v -196.73257 166.85500 -2.70534
12 v -196.91536 167.04100 -2.72251
378 v -196.53981 167.17999 -0.41203
379 v -196.42622 167.00800 -0.42974
380 # 370 vertices
381 vt 0.24378 0.93690
382 vt 0.24579 0.93540
383 vt 0.24978 0.93938
384 vt 0.24414 0.93938
385 vt 0.24058 0.93557
767 # 386 texture vertices
768 vn 0.13530 0.04553 -0.98976
769 vn 0.13530 0.04553 -0.98976
1793 vn 0.07389 -0.05361 0.99582
1794 vn 0.07389 -0.05361 0.99582
1795 # 1027 normals
2161 f 370/386/1015 306/322/1016 265/281/1017 357/373/1018
2162 f 256/272/1019 370/386/1019 357/373/1020 41/44/1021
2163 f 370/386/1022 256/272/1023 237/252/1023 369/385/1023
2164 f 306/322/1024 370/386/1025 369/385/1026 303/319/1027
```

Figura 2. Parte do arquivo binário *.max (a) e do arquivo de texto *.obj (b) que compõe o fantoma MARIA.

Para a voxelização, foi utilizado o programa Binvox, um sistema executável em prompt de comando que, por meio de informações fornecidas previamente pelo usuário, cria uma estrutura de voxels com atribuição de números identificadores diferentes para uma estrutura voxelizada e para o universo que contém a estrutura.

De acordo com informações requeridas, cuja forma de utilização é fornecida no prompt de comando do Binvox, conforme Figura 3, é possível realizar a voxelização órgão a órgão. Foi necessário escolher alguns parâmetros importantes, como as dimensões (-d) do voxel, que podem variar de 128 à 1024, determinando o número de linhas, colunas e fatias do modelo final.



```
Usage: binvox [-d <voxel dimension>] [-t <voxel file type>] [-c] [-v] <model file
espec>
-d: specify voxel grid size <default 128, max 1024>
-t: specify voxel file type <default binvox, also supported: hips, mira, vtk,
raw>
-c: z-buffer based carving method only
-v: z-buffer based parity voting method only <default is both -c and -v>
Additional parameters:
-bb <minx> <miny> <minz> <maxx> <maxy> <maxz>: force a different bounding box
Supported 3D model file formats:
URML U2.0: almost fully supported
UG, OBJ, OFF, DXF, XGL, POU, BREP, PLY, JOT: only polygons supported
Example:
binvox -c -d 200 -t mira plane.wrl

C:\Binvox>binvox -v -d 830 -t raw FET0.obj
```

Figura 3. Prompt de comando com informações fornecidas pelo usuário que antecedem a voxelização.

Com base na metodologia descrita por Cassola e colaboradores^[8], não foi realizada a voxelização de dois fantasmas de corpo inteiro em uma única etapa, tampouco com a mesma dimensão nos três eixos. A separação em sete regiões foi realizada para reproduzir o valor físico de arestas dos fantasmas de referência da ICRP, cuja resolução é de 1,2 mm. Assim, foi escolhido o cubo máximo dos limites das dimensões possíveis (830 x 830 x 830) para que o ajuste fino das coordenadas físicas pudesse ser feito na versão voxelizada final. O fantoma MARIA precisou ser modificado na versão *mesh* e parte dos membros inferiores foi removida para atender somente às regiões de interesse, como mostra a Figura 4.

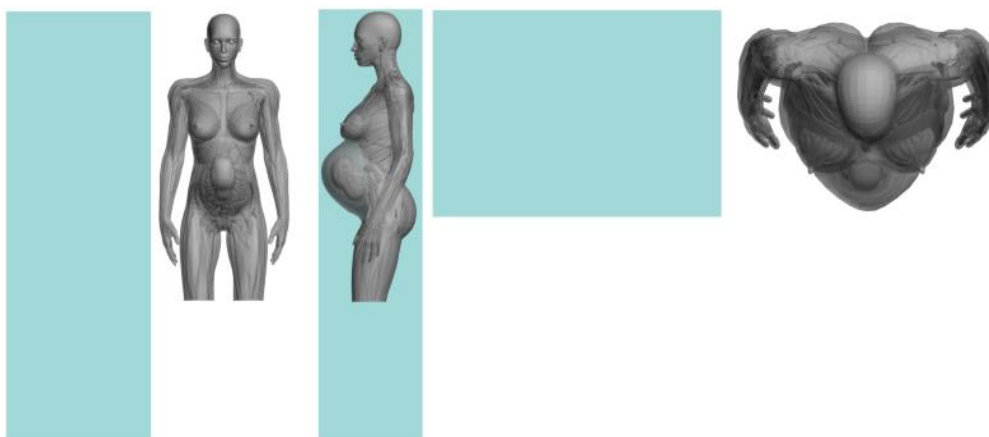


Figura 4. Fantoma MARIA com parte dos membros inferiores removidos para voxelização com o Binvox.

Após o ajuste da geometria, um paralelepípedo foi criado ao lado do fantoma MARIA com dimensões maiores nos eixos x, y e z para representar um referencial e, assim, preservar o tamanho original de cada estrutura no momento da voxelização. Posteriormente, todos os objetos 3D do fantoma foram exportados individualmente no formato *.obj (um dos formatos lidos pelo Binvox) para criação de uma biblioteca de órgãos.

Outro parâmetro importante a ser definido no prompt de comando é o tipo de formato (-t) em que o arquivo de saída será salvo. Dentre os formatos de arquivos reconhecidos pelo Binvox, a escolha do tipo *.raw se deu devido à utilização deste tipo de arquivo no software *Digital Image Processing* (DIP)^[9]. O DIP realiza processamentos de imagens diversos que antecedem o acoplamento do fantoma voxelizado ao código MC EGSnrc. Após inseridas as informações necessárias no *prompt* de comando, foi realizada a voxelização das seguintes estruturas: feto, bolsa amniótica, placenta, útero, ovários, músculos, fígado, pulmões, ossos, bexiga, intestinos, estômago e tecido adiposo. A visualização das estruturas voxelizadas pode ser feita diretamente na *viewvox* do Binvox ou em softwares alternativos de processamentos de imagens.

O software ImageJ/FIJI^[10] foi utilizado para acessar informações como, números de fatias, linhas, colunas, números identificadores de cada estrutura, bem como para utilizar os menus de exibição, edição, análise, processamento e para salvar e imprimir imagens de 8, 16 e de 32 bits. Ajustes das estruturas voxelizadas também foram realizados e incluem desde a atribuição de cores (RGB), para diferenciação visual de cada estrutura, a junção de todas em um único arquivo. Este processo de união das estruturas deve ser feito cautelosamente para que estruturas pequenas, como ovários, por exemplo, não percam informações. A Figura 5 mostra um exemplo de uma estrutura única (a) e o resultado da junção de todas as estruturas em um único arquivo (b).

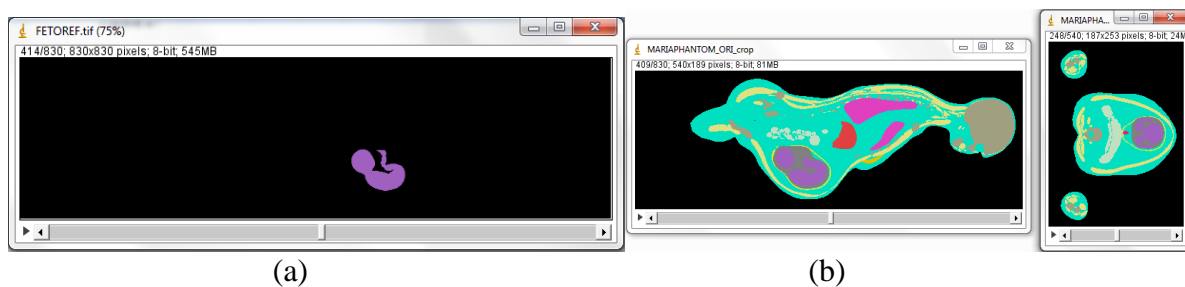


Figura 5. Exemplo de uma estrutura voxelizada individualmente (a) e união de todas as estruturas em um único arquivo (b) *.raw, utilizando o software FIJI/ImageJ.

O GDN adota em suas pesquisas, como geometria padrão, fantasmas voxelizados compostos de arquivos de dados referenciados como *.sgi (Simulações Gráficas Interativas), arquivos de dados similar ao tipo *.raw, porém com um cabeçalho adicional. Após a junção de todas as estruturas em um único arquivo *.raw, foi utilizado o software DIP para a realização de processamentos diversos como: conversão de arquivos do tipo *.raw de 8 bits em uma pilha *.sgi; conversão em um arquivo de texto lido nos MCEs com o EGSnrc; cortes de volume de uma pilha *.sgi de imagens; trocas de IDs; reamostragens sem deformações; exclusão/adição

de fatias, linhas e colunas; construção de volumes a partir de voxels-sementes em posições pré-definidas e técnicas MC para posicionar voxels em torno das sementes.

Todas as etapas foram realizadas para que o fantoma MARIA possuísse informações similares ao fantoma adulto feminino *mesh FASH (Female Adult meSH)*^[8] quanto aos IDs das estruturas e número de fatias. O número de linhas e colunas não foi considerado para comparação, uma vez que o fantoma FASH não possui estruturas fetais.

A visualização 2D (a) e 3D (b) do fantoma MARIA voxelizado pôde ser realizada por meio dos softwares DIP e ImageJ/FIJI, respectivamente, conforme mostra a Figura 6.

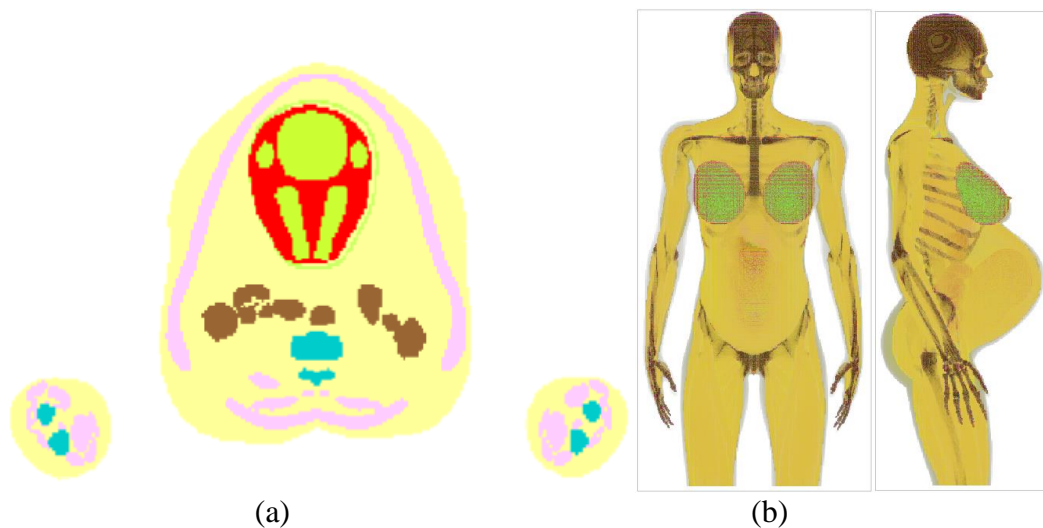


Figura 6. Visualização 2D (a) e 3D (b) da versão voxelizada e simplificada do fantoma MARIA.

A versão voxelizada do fantoma MARIA é composta por 16 estruturas, cuja densidade e número de voxels são descritos na Tabela 1. O acoplamento do fantoma MARIA ao EGSnrc depende da realização de três etapas: 1) definição da geometria, que se concluiu quando os dados primários e informações adicionais foram salvos em um arquivo de texto (que pôde ser lido pelo código MC e associado aos fantasmas através dos IDs dos órgãos e tecidos); 2) definição da fonte radioativa a ser utilizada; 3) modificação interna do código principal, bem como outros arquivos, lidos durante a compilação e execução da simulação.

Para a realização de simulações, o MCE aqui mostrado necessitou de informações adicionais que incluem, por exemplo, as variáveis que controlam a posição da fonte, largura e altura do campo a ser irradiado, a energia inicial e o número de histórias simuladas. Após realizadas as modificações necessárias, foi essencial o compilamento e execução do MCE MARIA para verificação e solução de eventuais erros. Este MCE foi utilizado para validação do acoplamento ao código MC EGSnrc, isto é, os arquivos de saída contendo dados referentes às simulações realizadas foram obtidos para comparar relativamente aos valores simulados com o MCE FSTA (*FASH STanding*).

Tabela 1. Visualização 2D (a) e 3D (b) da versão voxelizada e simplificada do fantoma MARIA.

Fantoma MARIA – Versão voxelizada			
ID	Órgão	Nº de voxels	Densidade (g/cm ³)
1	Bolsa Amniótica	280224	1,0300
2	Placenta	2912	1,0300
4	Cérebro	563645	1,0500
5	Feto	318675	1,0300
8	Intestinos	377895	1,0400
9	Fígado	202976	1,0500
10	Pulmões	2012665	0,2600
11	Músculos	6246648	1,0500
13	Ovários	1096	1,0400
17	Pele	942251	1,0900
19	Estômago	89085	1,0400
24	Útero	124780	1,0300
25	Tecido adipose	15626751	0,9500
29	Esqueleto, Média	1970706	1,3700
30	Ossos Corticais, Corpo Inteiro	1970706	1,9200
114	Corpo inteiro, Média	28760309	0,9630

Embora simplificado, o MCE MARIA contém todos os itens necessários para avaliações dosimétricas envolvendo gestantes submetidas às radiações ionizantes.

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi mostrada a voxelização da versão *mesh* do fantoma MARIA utilizando o Binvox. O fantoma foi voxelizado com uma quantidade reduzida de órgãos/tecidos e acoplado ao código MC EGSnrc. Simulações já foram realizadas utilizando algoritmos de fontes externas teóricas nas projeções AP e PA, desenvolvidos pelo GDN, para verificar gráfica e numericamente os resultados dosimétricos nos órgãos/tecidos presentes e validar o acoplamento. Os resultados foram promissores e um próximo artigo será desenvolvido para um maior detalhamento acerca dos resultados dosimétricos obtidos e comparações realizadas com fantasmas femininos padrões presentes na literatura.

Como perspectiva, pretende-se aperfeiçoar o fantoma MARIA para que todos os órgãos e tecidos radiossensíveis estejam presentes na versão *mesh*. O fantoma completo será voxelizado e acoplado ao código MC EGSnrc para realizar simulações de exames de radiodiagnóstico mais frequentemente realizados em gestantes. Serão realizados ajustes das massas dos órgãos e tecidos presentes no fantoma MARIA completo de acordo com os valores padrões fornecidos pelas publicações 89, 90 e 110 da ICRP^[11, 12, 13]. Um menu adicional no software DIP está sendo desenvolvido para voxelização direta de fantasmas *mesh* sem redução da resolução do valor físico de arestas dos fantasmas.

4. REFERÊNCIAS

1. Stabin, M. G.; Watson, E. E.; Cristy, M.; Ryman, J. C.; Eckerman, K. F.; Davis, J. L.; Marshall, D.; Gehlen, M. K. “Mathematical Models and Specific Absorbed Fractions of Photon Energy in the Non pregnant Adult Females and at the End of Each Trimester of Pregnancy”. Springfield. Oak Ridge National Laboratory, National Technical Information Service, 156 p, 1995.
2. Shi, C. Y.; Xu, X. G. “Development of a 30-Week-Pregnant Female Tomographic Model from CT-images for Monte Carlo Organ Dose Calculations”. *Journal of Medical Physics*, vol. 31, No. 2, 2491-2497, 2004.
3. Xu, X. G., Taranenko, V.; Zhang, J.; Shi, C. “A boundary representation method for designing wholebody radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods-P3,-P6 and-P9”. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 52, No. 23, 2007.
4. Cabral, M. O. M. “Desenvolvimento de um Modelo Computacional de Exposição para uso em avaliações dosimétricas em gestantes”. *Dissertação de Mestrado*, PROTEN, UFPE, Recife, Pernambuco, 2015.
5. Min, P. “BINVOX voxel file format specification”. 2012. Disponível em: <<http://www.cs.princeton.edu/~min/binvox/binvox.html>> Acesso em: 12 out. 2014.
6. Kawrakow, I.; Rogers D. W. O. “The EGSnrc code system: Monte carlo simulation of electron and photon transport”. NRCC Report PIRS-701. National Research Council of Canada, Ottawa, K1A OR6, 289 p, 2003.
7. AUTODESK. 3DS MAX 2014 | HELP. Autodesk Creative Commons FAQ. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2015/ENU/>>. Acesso em: 11 out. 2014.
8. Cassola, V. F.; Lima, V. J.; Kramer, R.; Houry, H. J. “FASH and MASH: female and male adult human phantoms based on polygon mesh surfaces: I. Development of the anatomy”. *Physics in Medicine and Biology*, vol. 55, No. 1, 2010.
9. Vieira, J. W. “Construção de um Modelo Computacional de exposição para cálculos dosimétricos utilizando o código Monte Carlo EGS4 e fantasmas de voxels”. *Tese de Doutorado*, PROTEN, UFPE, Recife, Pernambuco, 101 p, 2004.
10. Ferreira, T.; Rasband, W. “ImageJ User Guide – Image J/Fiji 1.46r. Revised edition”, 198 p , 2012. Disponível em: <imagej.nih.gov/ij/docs/guide/>. Acesso em: 21 set 2014.
11. ICRP 89. International Commission on Radiological Protection. “Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection reference values”. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32 (3-4), 279 p, 2002.
12. ICRP 90. International Commission on Radiological Protection. “Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus)”. ICRP Publication 90. Ann. ICRP 33 (1-2), 206 p, 2003.
13. ICRP 110. International Commission on Radiological Protection. “Adult Reference Computational Phantoms”. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 (2), 166 p, 2009.