

SIMULAÇÃO DO ACELERADOR MEDICO TRUEBEAM UTILIZANDO ESPAÇOS DE FASES EM FORMATO IAEA

Êmico Ferreira Santana¹ – efsantana@uesc.br

Felix Mas Milian¹ – f.mas.milian@gmail.com

Paulo Oliveira Paixão¹ – popaixao@uesc.br

Raranna Alves da Costa¹ – racosta@uesc.br

Fermin Garcia Velasco¹ – fermingv@gmail.com

¹ Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade - Ilhéus, BA, Brasil

Resumo. Neste trabalho é utilizado um código computacional de simulação do transporte de radiações baseado na técnica de Monte Carlo para modelar um acelerador linear de tratamento por Radioterapia. Este trabalho é o passo inicial de trabalhos futuros que visam estudar diversos tratamentos de pacientes por radioterapia utilizando a modelagem computacional em colaboração com a UESC, IPEN, UFRJ e COI. O código de simulação escolhido é o GATE/Geant4. O acelerador médico é o TrueBeam da empresa Varian. A modelagem geométrica foi baseada nos manuais técnicos e, as fontes de radiação nos espaços de fases para fótons, disponibilizado pelos fabricantes no formato IAEA (International Atomic Energy Agency). As simulações foram realizadas em condições iguais as medições experimentais. Foram estudados feixes de fótons de 6MV com campo de 10x10 cm, incidindo em um fantoma de água. Para a validação foi comparadas as curvas de doses em profundidade, os perfis laterais em diferentes profundidades dos resultados simulados e os dados experimentais. A modelagem final deste acelerador será utilizada em trabalhos futuros envolvendo tratamentos e pacientes reais.

Palavras-chave: Monte Carlo , Acelerador, Gate/Geant4

1. INTRODUÇÃO

Nas clínicas oncológicas uma vez que um paciente é diagnosticado com câncer, em dependência das características do tumor, um dos tratamentos a ser utilizado pode ser a radioterapia. Nesse caso, o médico determina a dose de radiação a ser subministrada no tumor seguindo protocolos clínicos, assim como restrições de dose máxima que podem receber os órgãos e tecidos próximos ao tumor. Utilizando programas de computador denominados TPS (Treatment Planning Systems) é papel do físico médico encontrar a posição e direção dos campos de tratamentos emitidos pelo acelerador linear para ministrar a dose prescrita no tumor e minimizar a dose nos órgãos de risco afetados pela radiação. Neste sentido, o papel do TPS é fundamental para se obter um tratamento de qualidade.

No TPS são realizados complexos cálculos matemáticos que envolvem planejamento inverso do tratamento, que devem ser otimizados para encontrar a solução ótima a problemas como: tipo de partícula a utilizar, energia a utilizar, forma e tamanho do campo, distância

fonte isocentro, tempo de irradiação, entre outras. Tudo isto faz com que o processo de planejamento utilize muitos recursos computacionais, tornando o processo demorado.

No contexto cotidiano, onde muitos pacientes devem ser tratados diariamente, não é possível dispor de muito tempo para que o TPS faça os cálculos para cada paciente. Nesse sentido, as empresas desenvolvedoras de TPS ficam restringidas pelas limitações computacionais e são obrigadas a criar programas de computadores que levam em conta muitas aproximações na hora de fazer os cálculos. Em muitos casos os problemas são simplificados a problemas analíticos aproximados a equações matemáticas. Tudo isto faz com que sempre existam incertezas nos planejamentos de radioterapia.

Por outro lado, Monte Carlo é uma ferramenta excelente para simular o processo de transporte de radiações, obtendo-se resultados mais precisos que nos métodos analíticos. Porém, sua principal desvantagem é que os cálculos são muito demorados. Isto fez descartar durante muitos anos a utilização do Monte Carlo dentro de programas do tipo TPS. No entanto, nos últimos anos os avanços na tecnologia têm permitido criar computadores e clusters de cálculos cada vez mais rápidos, fazendo viável a utilização da simulação por Monte Carlo para a comprovação de planejamentos de tratamentos calculada de forma analítica.

A técnica de Monte Carlo é relativamente nova e está disponível somente em alguns aceleradores clínicos, e com códigos fechados e totalmente controlados pelo fabricante. Uma parte da comunidade de pesquisadores tem se esforçado em criar ferramentas que permitam utilizar a simulação por Monte Carlo para estudar melhor os efeitos e incertezas associadas aos TPS comerciais e que podem estar sendo introduzidas dentro dos tratamentos dos pacientes. O presente projeto encontra-se dentro deste objetivo.

No futuro, com esta modelagem será possível também estudar mediante simulação, novas modificações e propostas dadas pelos oncólogos e físicos médicos para cada tipo de tumor, que segundo eles podem melhorar a eficácia da radioterapia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Construção da geometria

As neoplasias ou câncer representam uma doença caracterizada pelo crescimento desordenado de células que se dividem rapidamente de forma incontrolada e agressiva, originando a formação de tumores. Estes representam a segunda causa de morte na população brasileira, perdendo somente para as doenças de coração. Os números de novos casos estimados pelo Instituto Nacional do Câncer (INCA) chegam a mais de 390 mil para o ano de 2014. Entre eles, 68800 casos de câncer de próstata, 57120 de mama, 32600 de reto, 27330 de pulmão, 20390 de estômago, 9790 câncer não Hodgkin, 9370 de leucemia, 9200 de tireóide, 9090 do sistema nervoso central, 8940 de bexiga, 7640 de laringe, 5900 de corpo do útero e 2180 de linfoma de Hodgkin, entre outros (INCA, 2014).

2.2 Formas de tratamento

Entre as principais formas de tratamento do câncer encontra-se a radioterapia, a qual utiliza radiações ionizantes para destruir as células tumorais. O principal objetivo neste caso é realizar a maior deposição de energia da radiação nas células cancerígenas, mantendo os níveis o menor possível nos tecidos sadios circunvizinhos e órgãos vitais dentro do campo de irradiação. Entre as modalidades de radioterapia temos a braquiterapia, onde as fontes de radiação são pequenas e seladas, permitindo que sejam inseridas diretamente na lesão no interior do paciente, e a outra modalidade é a teleterapia, onde a fonte de radiação está externamente posicionada a uma distância do volume alvo de tratamento (Podgorsak, 2005).

Hoje contamos com equipamentos totalmente computadorizados capazes de realizar de uma forma muito eficiente todos os cálculos necessários para proporcionar a dose no tumor prescrita pelos médicos. Dentre as técnicas presente nos equipamentos de radioterapia comerciais pode-se destacar: a 2D, a 3D-conformacional, o IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy), o IGRT (Image Guided Radiation Therapy), a Radioterapia Estereotaxica, a Hadronterapia, o BNCT (BoronNeutron Capture Therapy) entre outras. Todas estas técnicas visam aprimorar a qualidade do tratamento e dos resultados, a fim de diminuir a dose recebida pelos órgãos de risco que podem provocar o aparecimento de câncer secundário. O planejamento do tratamento do paciente utilizando a radioterapia é um processo complexo e longo (Bentel, 1996).

O programa deve ser capaz de determinar a energia, direção, forma do campo, distância, entre outros parâmetros de forma tal que cumpra com as restrições de doses propostas pelo médico. O trabalho de otimização é tão complexo que a solução para ser feito em tempos razoáveis é realizar aproximações e resolver o problema com equações analíticas (Bentel, 1996). Desta forma, os resultados são obtidos em tempos razoáveis para a prática clínica de hospitais com incertezas razoáveis menores aos 5%. Porém, os pesquisadores continuam na busca por diminuir estas incertezas e neste sentido, uma ferramenta que vem sendo cada vez mais popular na radioterapia é a simulação pelo método de Monte Carlo.

2.3 Monte Carlo

Nos últimos anos, diversos grupos de pesquisa e empresas têm investido no desenvolvimento de programas e equipamentos que utilizam códigos de simulação por Monte Carlo para o planejamento ou comprovação dos planejamentos (Verhaegen, 2003; Ma, 98; Spiga et al, 2007; Martinez-Rovira, 2010; Sempau, 2011; Jia et al, 2003).

Os métodos de Monte Carlo são algoritmos numéricos que utilizam a geração de números aleatórios. Quaisquer situações que envolvam processos aleatórios, como a simulação de amostras aleatórias, ou mesmo aqueles que não têm caráter probabilístico, como uma simples integração numérica, podem utilizar métodos como o de Monte Carlo.

Para estudos de problemas que envolvem apenas uma dimensão, não necessita-se utilizar os métodos de Monte Carlo. Mas se o problema a ser analisado envolver mais dimensões (três ou mais), com uso do Monte Carlo irá se obter um melhor resultado, uma vez que, nesses casos a precisão dos métodos numéricos mais simples é $N^{-2/d}$, no qual “d” é o número de

dimensões do problema e N é a quantidade de simulações, e no Monte Carlo a precisão é sempre contínua, sendo proporcional a $N^{-1/2}$. O erro estatístico do método de Monte Carlo depende do tamanho do conjunto da amostragem para os quais a função é avaliada. O caminho mais simples para diminuir o erro é aumentar o N , pois como visto anteriormente, o erro é proporcional a $\frac{1}{\sqrt{N}}$, mas esse caminho é limitado pelo tempo de computação que torna o cálculo cada vez mais proibitivo com o aumento de N .

Existem muitos outros caminhos para decrescer a variância, como mudar a distribuição dos números aleatórios para uma distribuição quase-aleatória. Neste caso, certos intervalos de números são gerados com mais frequência que outros, de maneira que favorecem o cálculo da função a ser estimada. Uma maneira de diminuir o tempo de computação, é ter arquivos conjuntos de números aleatórios gerados conforme uma distribuição estabelecida, assim, evita-se gerar números que não favorecem o cálculo da função a ser estimada, diminuindo o tempo de processamento do mesmo.

Na simulação do transporte de radiação utilizando o método de Monte Carlo, a história de uma partícula é definida como uma sequência de caminhos que terminam com um evento de interação, no qual a partícula pode mudar sua direção de movimento, perder energia e, ocasionalmente, produzir partículas secundárias. A simulação de Monte Carlo de um dado arranjo experimental consiste de uma geração numérica de histórias. Para simular essas histórias, é preciso de modelos de interações, que geralmente são baseados em um conjunto de seções de choque diferenciais para os mecanismos de interação relevantes. As seções de choque determinam as funções densidade de probabilidade das variáveis aleatórias que caracterizam a trajetória, tais como: livre caminho entre os eventos de interação sucessivos; tipo de interação que ocorre; energia perdida e deflexão angular de um evento particular.

Uma vez conhecidas essas funções densidades de probabilidade, as histórias podem ser geradas como uso de métodos apropriados de amostragem. Se o número de histórias geradas for grande o suficiente, informações quantitativas do processo de transporte podem ser obtidas pela simples média das histórias simuladas. Todos os resultados são influenciados por incertezas estatísticas que podem ser reduzidas com o aumento do número de histórias simuladas, e conseqüentemente, do tempo computacional. Existem ainda as incertezas com origem nas imprecisões dos valores das seções de choque.

2.1 Gate/Geant4

O código Geant4 (GEometryANdTracking) é um conjunto de ferramentas computacionais de distribuição livre que pode ser utilizado para simular a interação de partículas com a matéria (CERN, 2014). De acordo com seus desenvolvedores, suas áreas de aplicação compreendem experimentos em física nuclear, física médica, física de partículas, aceleradores, estudos em pesquisas espaciais, astrofísica e astronomia. A faixa de energia para as simulações pode ir de 250 eV se estendendo até a ordem de 1 TeV, em algumas situações.

O código do programa é escrito em linguagem de programação C++ e é o primeiro em sua categoria a explorar técnicas de engenharia de software e tecnologia orientada a objetos.

Tais conceitos são importantes para a implementação de novos modelos físicos e a compreensão dos já existentes são facilitadas, pois com esses conceitos pouca ou nenhuma modificação no código original é necessária, adaptado de (Giuliano, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Documentação técnica do acelerador TrueBeam

A informação dos aceleradores é considerada segredo industrial, porém, graças ao contrato de compra das Clínicas Oncológicas Integradas de Rio de Janeiro, os dados técnicos podem ser consultados pelos seus pesquisadores e colaboradores. Em nosso caso, temos acesso a estes dados, que serão utilizados para realizar a planificação da modelagem. Temos disponíveis dados como formas, materiais e dimensões das principais peças que conformam os aceleradores.

3.2 Levantamento do campo de radiação (espaço de fase)

A O espaço de fase é uma ferramenta muito utilizada pelos fabricantes de aceleradores para facilitar o trabalho das pessoas que utilizam simulação por Monte Carlo. Nestes arquivos são guardadas todas as informações das partículas ionizantes que são emitidas desde o cabeçote do acelerador, antes de passar pelos filtros e colimadores. Isto reduz o trabalho de modelagem. No caso do TrueBeam, os espaços de fases são públicos e estão disponíveis no site web do Organismo Internacional de Energia Atômica (IAEA). Para testar a nossa implementação utilizamos os seis espaços de fase do TrueBeam de 6MV. A geometria utilizada no artigo somente incluiu os JAWS em X e Y, sem o Multi Leaf Collimator. Esses espaços de fases são armazenados num cilindro próximo do JAW Y para posterior utilização nas simulações, conforme ilustrado na Fig. 1.

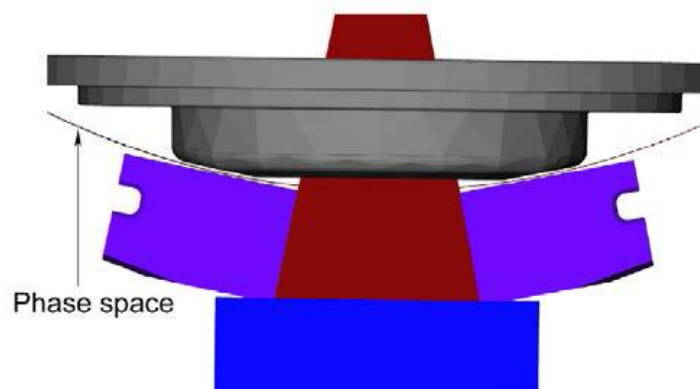


Figura 1 - Representação de onde são armazenados os espaços de fases.

3.3 Levantamento de dados experimentais

Para validar a modelagem do acelerador, os resultados das simulações foram comparados com medições experimentais realizadas em fantasmas de água e câmaras de ionização. Essas medições experimentais foram realizadas no acelerador TrueBeam das Clínicas Oncológicas Integradas sediada na Barra da Tijuca no Rio de Janeiro.

3.4 Modelagem do acelerador no GATE/GEANT4

Uma vez que todos os dados técnicos e as condições experimentais de irradiação estejam definidas, foi realizado o trabalho de modelagem. Nesta etapa, foram desenvolvidos os códigos e scripts para GATE que reproduzirão a geometria do acelerador, seus materiais, as fontes de radiações, e os detectores de radiação utilizados.

Para reproduzir a geometria do acelerador foram utilizadas para o JAW em Y, duas seções cilíndricas, e para o JAW em X dois trapézios, conforme ilustrado na Fig. 2.

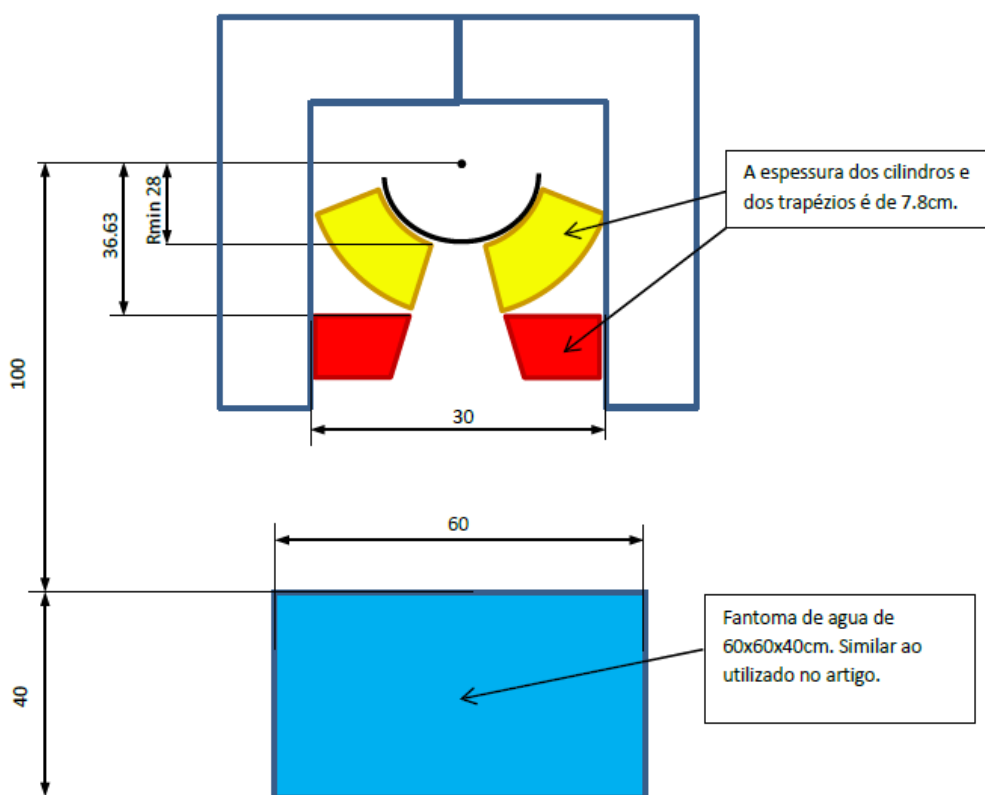


Figura 2 - Representação técnica do acelerador.

A Figura 3 ilustra a modelagem do acelerador no GATE/Geant4.

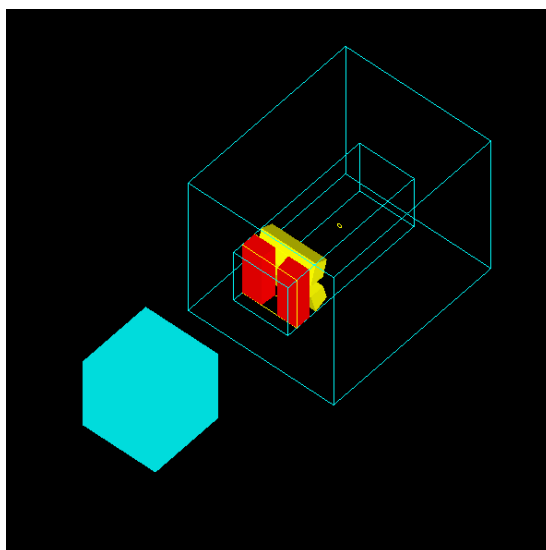


Figura 3 - Representação do acelerador no GATE/Geant4.

1.5 Simulações de irradiação do fantoma

Foi realizada a simulação das medições experimentais de condicionamento do acelerador. Comumente, isto inclui a medição da dose utilizando câmaras de ionização em profundidade, com espaçamento de 2 a 4mm no eixo central do fantoma de água. A distância fonte-superfície da água é de 100cm. As simulações foram realizadas com fótons nas energias de 6MV. Para armazenar os resultados das doses, GATE utiliza o conceito de Actors. Nesse sentido, as doses são armazenadas em forma de matriz tridimensional numa imagem binária, cujo número de elementos e tamanho são facilmente modificados no código. Estas imagens podem ser abertas e analisadas posteriormente em programas como o VV ou Matlab.

1.6 Análise e processamento dos resultados e validações

Para realizar a comparação dos resultados das simulações com as medições experimentais, utilizou-se o programa Matlab. Dado o grande número de dados a serem processados, a melhor opção foi automatizar todos utilizando Macros especialmente criadas no Matlab por este trabalho. Foi realizada a comparação dos resultados de todas as simulações, assim como revisão e ajustes das modelagens quando encontrado alguma discrepância muito significativa.

4. RESULTADOS

Para os resultados obtidos, a dose no fantoma foi registrada em voxels de 1x1x1mm, em todo o volume do mesmo (600x600x400). Os resultados foram armazenados em formato binário MHD/RAW, que foram posteriormente processados em Matlab para criar os perfis de dose em profundidade e os perfis laterais a profundidade de 2,5, 5,10, 20 e 30 cm.

O perfil de dose em profundidade mostra a energia depositada no fantoma de água ao passo que altera a profundidade (eixo Z). A Fig. 4 ilustra os perfis de dose em profundidade da simulação deste projeto (legendado na Fig. 4 como Gate) e do dado experimental (legendado na Fig. 4 como Tables).

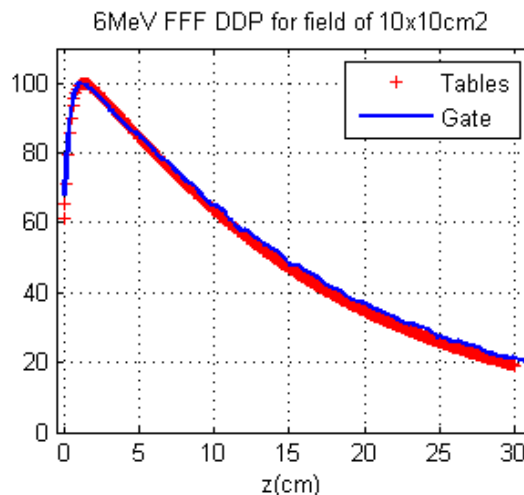


Figura 4 – Dose depositadas para o campo de 10x10 cm para fótons de 6MV em fantoma de água de 60x60x40cm e a distancia fonte superfície de 100 cm.

O perfil lateral mostra a energia depositada em todo o eixo X ou Y em determinada profundidade. Como os perfis laterais em X e Y são muito similares decidiu-se trabalhar somente com o perfil lateral em X. Nas Fig. 5 e 6 são ilustrados os perfis laterais em X à profundidades de 2,5, 5,10, 20 e 30 cm da nossa simulação (legendado nas Fig. 5 e 6 como Gate) e do dado experimental (legendado nas Fig. 5 e 6 como Tables).

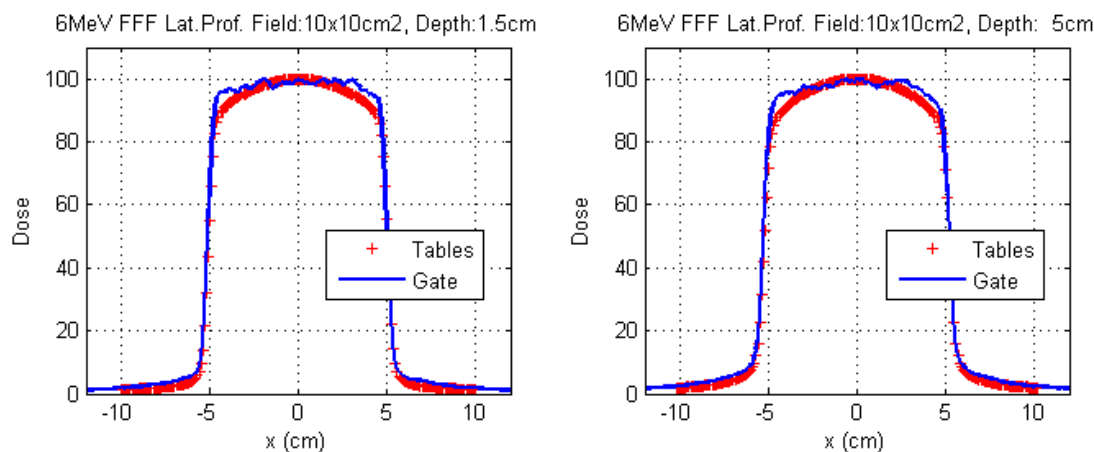


Figura 5 - Perfis laterais em X para campo de 10x10 para fótons de 6MV a 2.5 e 5cm de profundidade.

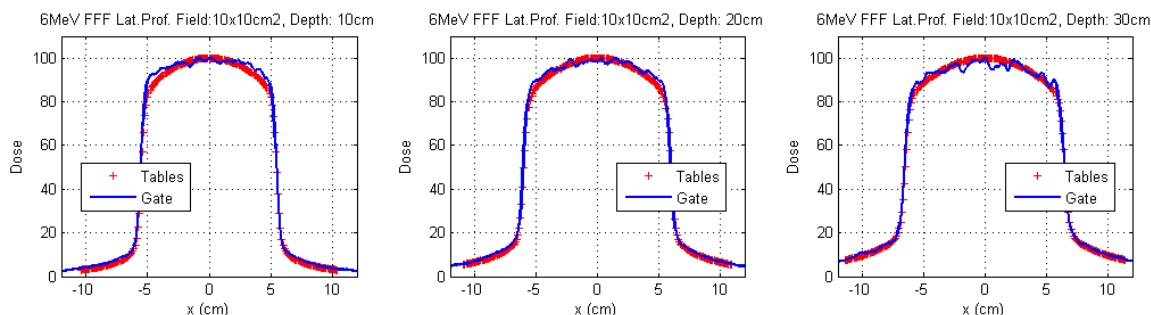


Figura 6 - Perfis laterais em X para campo de 10x10 para fótons de 6MV a 10, 20 e 30cm de profundidade.

Através dos resultados ilustrados nas figuras supracitadas, pode-se observar que as simulações atingiram o esperado, se aproximando muito dos dados experimentais. Como esses resultados para esse campo são satisfatórios, pode-se agora, validar a modelagem para simulações com campos de tamanhos diferentes.

Futuramente, dada a validação para demais campos, essa modelagem estará pronta para inserir novos elementos, como o Multi Leaf Collimator (apropriado para realizar cortes no feixe para gerar formas aleatórias desejadas) e fantasmas que representam um paciente, podendo assim ser utilizada para tratamentos com pacientes reais.

REFERÊNCIAS

- Bentel, G. C. (1996), "Radiation the ropy planning", 2 ed. The McGraw-Hill Companies.
- CERN, (2014), "Geant 4 Users Support". Disponível em: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/>, Acesso em: 29/05/2014.
- Giuliano Demarco, G. (2009), "Simula ao Monte Carlo em terapia de câncer por Captura de neutrons pelo Boro(BNCT) utilizando a plataforma GEANT4". Dissertação de Mestrado. PROMEC/UFRGS.
- INCA - Instituto Nacional do Câncer. (2014), "incidência de câncer no Brasil". Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.inca.gov.br/estimativa/2014/>. Acesso em: 29/05/2014.
- Jia, X., Gu, X., Graves, Y. J., Folkerts, M., and Jiang, S. B., (2011), "GPU-based fast Monte Carlo simulation for radiotherapy dose calculation" Phys. Med. Biol. 56, 7017-7030.
- Ma, M. (1998), "Characterization of computer simulated radiotherapy beams for Monte Carlo treatment planning" Radiat. Phys. Chem. 53, 328-344.
- Martinez-Rovira, I., Sempau, J., Fernandez-Varea, J. M., Bravin, A. and Prezado Y. (2010), "Monte Carlo do simetry for forthcoming clinical trials in x-raymicrobeam radiation therapy" Phys. Med. Biol. 55, 4375-4388 (2010).
- Podgorsak, E. B. (2005), "Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students". Technical Editor [et al.]. International Atomic Energy Agency.
- Sempau, J., Badal, A., and Brualla, L. (2011), "A PENELOPE based system for the automated Monte Carlo simulation of clinacs and voxelized geometries Application to far from axis fields" Med. Phys. 38, 3887-3895.
- Spiga, J., E. Siegbahn, A., Brauer-Krisch, E., Randaccio, P., and Bravin, A. (2007) "The GEANT4 toolkit for micro do simetry calculations: Application to micro beam radiation therapy MRT" Med. Phys. 34, 4322-4330.
- Verhaegen F. and Seuntjens, J. (2003), "Monte Carlo modelling of external radiotherapy photon beams" Phys. Med. Biol. 48, R107-R164.

APÊNDICE A

AVERAGE ACCELERATOR SIMULATION TRUEBEAM USING PHASE SPACE IN IAEA FORMAT

Abstract. *In this paper is used a computational code of radiation transport simulation based on Monte Carlo technique, in order to model a linear accelerator of treatment by Radiotherapy. This work is the initial step of future proposals which aim to study several treatment of patient by Radiotherapy, employing computational modeling in cooperation with the institutions UESC, IPEN, UFRJ e COI. The Chosen simulation code is GATE/Geant4. The average accelerator is TrueBeam of Varian Company. The geometric modeling was based in technical manuals, and radiation sources on the phase space for photons, provided by manufacturer in the IAEA (International Atomic Energy Agency) format. The simulations were carried out in equal conditions to experimental measurements. Were studied photons beams of 6MV, with 10 per 10 cm of field, focusing on a water phantom. For validation were compared dose curves in depth, lateral profiles in different depths of the simulated results and experimental data. The final modeling of this accelerator will be used in future works involving treatments and real patients.*

Keywords: Monte Carlo, Accelerator, Gate/Geant4