APLICAÇÃO DE SIMULAÇÕES MONTE CARLO NO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS COMPUTACIONAIS PARA RADIOTERAPIA

Fernando Guimarães Santos Filho (PIC/UEM), Juliana Campos de Freitas (Orientador). E-mail: jcfreitas@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Goioerê, PR.

Área e subárea do conhecimento: Física/Física Nuclear.

Palavras-chave: Método de Monte Carlo; Acelerador Linear; Simulação Computacional.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de uma prova de conceito computacional baseada em simulação Monte Carlo para a modelagem geométrica do cabeçote de um acelerador linear de 6 MV no ambiente GATE/Geant4, com perspectiva de aplicação futura em sistemas de verificação independente de dose. A estrutura física de um Varian TrueBeam foi modelada incluindo alvo de tungstênio, filtro aplanador de cobre, colimadores primários, secundários e colimador multilâminas. Para o registro das partículas na saída do sistema de colimação, utilizou-se o recurso 'PhaseSpaceActor'. As distribuições dosimétricas foram simuladas em fantoma de água e analisadas em Python por meio de parâmetros de dose profunda, perfis laterais, largura a meia altura, erro quadrático médio e índice gama (3%/3 mm), com comparação frente a dados reais de comissionamento. Os resultados demonstraram estabilidade geométrica do modelo, com FWHM de 106,00 mm em todas as configurações avaliadas. O aumento do número de histórias primárias de 1 milhão para 5 milhões elevou a taxa de aprovação gama de 25% para 51,67%, indicando redução das flutuações estatísticas. O menor erro quadrático médio, de 6,29%, foi obtido com fator de biasing igual a 500. Embora a concordância dosimétrica ainda esteja abaixo do critério clínico de 95%, o pipeline computacional foi implementado com sucesso e mostrou-se funcional como prova de conceito em ambiente laboratorial computacional. Os resultados indicam a necessidade de aumento da estatística, refinamento dos parâmetros físicos e otimização computacional antes de sua validação para aplicações clínicas em etapas futuras de desenvolvimento e avaliação da metodologia.

INTRODUÇÃO

A radioterapia exige alta precisão no cálculo de dose absorvida para garantir a eficácia do tratamento oncológico e a segurança dos tecidos sadios adjacentes. Métodos de simulação baseados no algoritmo de Monte Carlo (MC) representam o padrão-ouro na dosimetria de física médica (ANDREO, 2018), pois são capazes de

modelar detalhadamente o transporte e as interações físicas das partículas de radiação com os componentes geométricos do acelerador e o tecido do paciente. Dentre as ferramentas de código aberto mais utilizadas, destaca-se o GATE, uma interface amigável do Geant4 otimizada para simulações de sistemas de física médica com elevado realismo (CANCINO, 2016).
A validação de sistemas de cálculo de dose ainda depende de procedimentos experimentais complexos, motivando o desenvolvimento de ferramentas computacionais independentes baseadas em Monte Carlo.
Nesse contexto, o presente trabalho propõe a modelagem tridimensional do cabeçote de um acelerador linear TrueBeam e o desenvolvimento de uma metodologia computacional para geração de espaços de fase e comparação dosimétrica com dados reais de comissionamento. A longo prazo, uma metodologia desse tipo pode servir de base para sistemas independentes de verificação de dose em radioterapia (VERHAEGEN, 2003).

MATERIAIS E MÉTODOS

A infraestrutura de simulação foi configurada em ambiente computacional Linux (Ubuntu) sob o subsistema Windows para Linux (WSL), gerenciado pelo empacotamento Miniconda. No ambiente virtual, estruturou-se o toolkit GATE/Geant4 acoplado à linguagem Python.
A primeira etapa metodológica consistiu na modelagem tridimensional detalhada do cabeçote do acelerador linear (LINAC) baseado no padrão Varian TrueBeam. Os parâmetros geométricos e materiais definidos foram: 1. Alvo (Target): Disco cilíndrico de Tungstênio (W) de espessura variando de 0,89 mm a 1,0 mm acoplado a um bloco de Cobre (Cu) para dissipação térmica; 2. Filtro Aplanador (Flattening Filter): Geometria cônica de Cobre (Cu) responsável pela homogeneização transversal do feixe primário de fótons de 6 MV; 3. Colimadores Secundários (Jaws X e Y): Blocos maciços de Tungstênio (W) de 7,8 cm de espessura configurados angularmente para delimitar o feixe secundário; 4. Colimador Multilâminas (MLC Millennium 120 HD): Posicionado abaixo das jaws, o colimador é composto por lâminas de liga de Tungstênio com espessura de atenuação longitudinal entre 6 e 7 cm. As lâminas centrais possuem projeção física de 2,5 mm de largura no isocentro, e as periféricas possuem 5,0 mm. O MLC foi programado para reproduzir um campo de radiação estático de 10 cm x 10 cm no isocentro (SSD = 100 cm).
Para registrar o feixe, utilizou-se o recurso ‘PhaseSpaceActor’ posicionado imediatamente abaixo do MLC. A simulação foi disparada por um feixe primário de elétrons monoenergéticos de 6 MeV incidentes no alvo de tungstênio, gerando as partículas secundárias registradas no espaço de fase em formato de arquivo ROOT. Dados de comissionamento clínico do acelerador TrueBeam real foram estruturados em formato CSV utilizando a biblioteca pandas. O script em Python procedeu com a leitura dos dados simulados e calculou parâmetros físicos fundamentais como a profundidade de dose máxima (Dmax), percentual de dose profunda (PDD), largura a meia altura (FWHM) e penumbra do feixe.

A concordância estatística quantitativa foi estimada por meio do Erro Quadrático Médio (RMSE) e do Índice Gama (γ), que pondera simultaneamente a diferença percentual de dose (ΔD = 3%) e a distância de concordância espacial (Δd = 3 mm). Conforme critérios radioterápicos padrão, pontos com γ <= 1 são aprovados, estabelecendo-se uma taxa mínima aceitável de aprovação de 95% para validação clínica (VERHAEGEN, 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando otimizar a relação entre o tempo computacional e o ruído físico do método Monte Carlo, avaliou-se o comportamento do cabeçote sob diferentes condições de histórias primárias (source.n) e fatores de multiplicação de fótons no código (*biasing factor*). Os resultados quantitativos estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de validação das simulações do LINAC 6 MV frente aos dados clínicos do TrueBeam.

Configuração	Tempo (horas)	Dose máxima (mm)	R80 (mm)	R50 (mm)	FWHM (mm)	RMSE (%)	Gama (%)
Source.n = 1M Biasing = 100	1,63	10	28	122	106	9,02	28,33
Source.n = 1M Biasing = 200	2,26	10	42	108	106	10,13	25
Source.n = 1M Biasing = 500	7,77	10	44	116	106	6,29	33,33
Source.n = 2M Biasing = 200	5,18	10	42	114	106	7,07	50
Source.n = 5M Biasing = 200	17,55	10	42	118	106	7,69	51,67

Os resultados demonstraram estabilidade da geometria do campo, com FWHM de 106 mm em todas as configurações avaliadas. Entretanto, as diferenças observadas nos parâmetros de profundidade e a taxa de aprovação gama indicam que o modelo ainda necessita de refinamento dos parâmetros físicos e aumento da estatística de simulação. O Dmax permaneceu em 10,00 mm nas configurações avaliadas, enquanto o valor de referência clínica é de aproximadamente 15,00 mm, indicando a necessidade de refinamento dos parâmetros responsáveis pela distribuição de dose em profundidade.

O ruído estatístico mostrou-se um dos fatores limitantes da concordância dosimétrica. Para a simulação com 1M partículas primárias e fator de bias igual a 200, a taxa gama de pontos aceitáveis foi de apenas 25,00%, associada a um RMSE elevado de 10,13%. Com o incremento da estatística para 5M histórias primárias sob o mesmo fator de bias, a taxa de aprovação gama ascendeu significativamente para 51,67% (RMSE de 7,69%). Este comportamento é compatível com a redução esperada das flutuações estatísticas com o aumento do número de histórias, indicando que a maior densidade de partículas no espaço de fase reduz o ruído e favorece a aproximação da curva simulada aos dados de referência (ANDREO, 2018).

A utilização do fator de biasing também influenciou a concordância dosimétrica. Ao simular 1M histórias primárias com um fator de bias elevado para 500, alcançou-se o menor erro quadrático médio de todo o estudo (RMSE de 6,29%) e um aumento imediato na aprovação gama para 33,33%, superando os fatores de bias inferiores na mesma estatística. Todavia, essa otimização física demanda um alto custo de processamento, elevando o tempo de execução de 2,26 horas (biasing = 200) para 7,77 horas (biasing = 500) para a mesma quantidade de partículas base. A simulação mais robusta de 5 milhões de histórias consumiu 17,55 horas computacionais, reforçando a necessidade de otimizações de código e recursos de processamento paralelo para viabilizar clinicamente o sistema de verificação.

CONCLUSÕES

A transição para a modelagem geométrica completa do cabeçote do acelerador linear de 6 MV Varian TrueBeam e a correspondente extração automatizada de métricas em ambiente Python foram executadas com êxito. Os resultados evidenciaram estabilidade geométrica do campo. Embora a taxa máxima de aprovação do índice gama, de 51,67%, permaneça abaixo do critério clínico de 95%, observou-se melhora da concordância dosimétrica com o aumento da estatística de simulação. Esses resultados demonstram a funcionalidade do pipeline computacional como prova de conceito, ao mesmo tempo em que indicam a necessidade de refinamento dos parâmetros físicos e de otimização computacional antes de sua aplicação clínica.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), pelo apoio institucional.

REFERÊNCIAS

ANDREO, Pedro. Monte Carlo simulations in radiotherapy dosimetry. **Radiation Oncology**, London, v. 13, n. 1, art. 121, 2018. DOI: 10.1186/s13014-018-1065-3. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s13014-018-1065-3.

CANCINO, Jorge Luis Batista. **Modelamento de um acelerador linear Varian 600 C/D para estudo dosimétrico usando método de Monte Carlo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-ABDGWZ.

VERHAEGEN, Frank; SEUNTJENS, Jan. Monte Carlo modelling of external radiotherapy photon beams. **Physics in Medicine & Biology**, Bristol, v. 48, n. 21, p. R107–R164, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/21/R01.