

Verificação *End-to-End* de SRS automatizada com HyperArc™ na plataforma TrueBeam™

End-to-end Verification of Automated SRS with HyperArc on the TrueBeam Platform

Matheus F. Santos¹, Lucas D. Albino¹, Karen Pieri¹, Ueslen S. da Silva², José G. C. Calado¹, Roberta S. Oliveira¹, Jéssica L. O. Barbosa¹, Luccas M. Alves¹, Ernesto H. Roesler¹

¹Real Instituto de Radioterapia, Real Hospital Português (RHP), Recife, Brasil

²Departamento de radioterapia, Hospital de Amor de Barretos, Barretos, Brasil

Resumo

A Radiocirurgia estereotáxica (SRS) é uma técnica de tratamento extremamente complexa, pois envolve várias etapas e consiste em administrar elevadas doses de radiação em poucas aplicações. Dentre as etapas estão procedimentos de aquisição de imagens, registro de imagens, definição do volume alvo, planejamento do tratamento e cálculo de dose, posicionamento do paciente com sistema de IGRT, bem como a entrega do tratamento no equipamento. O teste de ponta a ponta (E2E) é capaz de nos fornecer a incerteza combinada de todo o processo envolvido em procedimentos complexos, como é a SRS. Este estudo consistiu em simular todo o fluxo de tratamento de um paciente em um simulador antropomórfico, e: (i) analisar a aquisição das imagens e o registro, de maneira qualitativa e quantitativa, (ii) realizar o planejamento de tratamento nesse simulador e (iii) verificar a entrega de dose de radiação por meio da medida de dose absoluta com câmara de ionização e análise da distribuição de dose planar com filme radiocrômico. Os resultados das análises quantitativas dos registros através do TRE e DSC foram consideradas satisfatórias, segundo as tolerâncias do TG-132. Os resultados das medidas com câmara de ionização para determinação da dose absoluta pontual apresentaram variações inferiores a 3% do valor calculado pelo TPS. A análise da distribuição de dose planar com filme radiocrômico mostrou que há concordância entre o perfil de dose calculado pelo TPS e o medido, com taxa de aceitação superior a 98% no critério gama de 3%/1mm. A recomendação para a frequência do teste E2E é pelo menos anual, ou após algum reparo ou substituição de equipamento com potencial impacto na integridade dos dados e a cada atualização de software de registro de imagem ou TPS.

Palavras-chave: *End-to-End*; Radiocirurgia Estereotáxica; HyperArc; TrueBeam.

Abstract

The Stereotatic radiosurgery (SRS) is an extremely complex treatment technique, as it involves several stages and consists of deliver high doses of radiation in a few applications. Among the steps involved are image acquisition procedures, image registration, definition of the target volume, treatment planning and dose calculation, patient positioning with the IGRT system, as well as the delivery of the treatment in the equipment. The end-to-end (E2E) test is the only one capable of providing us the combined uncertainty of the entire process involved in complex procedures, such as the SRS. This study involved simulating the entire treatment flow of a patient in an anthropomorphic simulator, and: (i) analyzing the acquisition of images and registration, in a qualitative and quantitative form, (ii) carrying out treatment planning in this simulator and (iii) verify the radiation dose delivery by the absolute dose measurement with an ionization chamber and analysis of the planar dose distribution with radiochromic film. The results of the quantitative analyzes through the TRE and DSC were considered satisfactory, according to the tolerances of TG-132. The results of measurements with an ionization chamber to determine the absolute point dose showed variations of less than 3% of the value calculated by TPS. The analysis of the planar dose distribution with radiochromic film showed that there is agreement between the dose profile calculated by the TPS and the measured, with an acceptance rate > 98% in the gamma criterion of 3%/1mm. The recommendation for the frequency of this test is at least annually, or after any repair or replacement of equipment with a potential impact on data integrity, and every update of image registration software or TPS.

Keywords: *End-to-End*; Stereotatic radiosurgery; HyperArc; TrueBeam.

1. Introdução

A Radiocirurgia estereotáxica (SRS, do inglês *Stereotactic Radiosurgery*) é uma técnica de irradiação usada para administrar altas doses de radiação ionizante em uma ou até cinco frações (1). Essa técnica utiliza múltiplos feixes de radiação extremamente colimados, seja através de colimadores multilâminas (MLC) ou cones estereotáticos, para o tratamento de lesões intracranianas e doenças funcionais com alta precisão geométrica, elevada conformação e acurácia dosimétrica (2).

O HyperArc™ (HA) é um sistema automatizado de planejamento e tratamento de SRS desenvolvido e dedicado para as plataformas EDGE™ e TrueBeam™ da Varian Medical Systems. A técnica de planejamento utilizada no HA é a Arcoterapia Modulada Volumetricamente (VMAT), com setup de arcos predefinidos: 1 Arco coplanar completo e até 3 semiarcos não coplanares. A proposta da ferramenta é a criação de planejamentos de tratamento para SRS rápidos com qualidade, eficiência e segurança. Todo o processo de SRS é automatizado, no contorno de estruturas auxiliares de otimização,

setup dos feixes, otimização, avaliação dos índices de qualidade do plano e entrega do tratamento.

VMAT é uma técnica de tratamento complexa que fornece distribuições de dose altamente conformes com cobertura do volume alvo adequada e preservação de tecidos normais. Sendo assim, um programa de garantia da qualidade específica do paciente (PSQA, do inglês *Patient Specific Quality Assurance*) desempenha um papel vital na precisão e segurança do processo de tratamento (3).

O TRS N° 430 (4) recomenda um teste para avaliar a entrega de dose calculada pelo software de planejamento de tratamento em radioterapia (TPS), utilizando simuladores antropomórficos com heterogeneidade nos materiais que os compõem. Segundo o documento, a tolerância para a diferença entre dose medida e calculada pelo TPS com este tipo de simulador é de $\pm 3,0\%$. Recentemente, a sociedade internacional de radiocirurgia (ISRS, do inglês *International Stereotactic Radiosurgery Society*) realizou uma revisão de literatura e publicou um consenso com Diretrizes técnicas para o tratamento de pequenas lesões com SRS (5). A recomendação desse guia para o controle de qualidade é uma acurácia dosimétrica dentro de $\pm 5,0\%$, entretanto não especifica a metodologia que deve ser empregada nesta métrica de análise (5).

O teste de ponta a ponta (E2E, do inglês *End-to-End*) é um processo necessário para avaliar a garantia da qualidade em todo o fluxo de um sistema de SRS (6). O teste E2E é o único capaz de nos fornecer a incerteza combinada de todo o processo envolvido em procedimentos complexos, como é a SRS (6). Pequenos erros na localização do alvo, por exemplo em um registro inadequado, a entrega da dose pode resultar em subtratamento significativo de regiões do volume tumoral alvo ou superdosagem de tecido vizinho sadio. É por isso que a acurácia do sistema precisa ser avaliada por meio de um teste E2E usando fantasmas com detectores e realização de imagens (7). Tal teste deve ser verificado regularmente conforme recomendação do TG101 (1) e de maneira anual pelo AAPM-RSS MPPG 9a (2).

Para a realização do teste E2E é necessário utilizar um objeto simulador que nos permita realizar todo o fluxo de tratamento tal qual um paciente real. Um simulador ideal é aquele de fácil setup, reproduzível, e se modular (com *inserts* específicos) deve apresentar precisão milimétrica e permitir ao usuário fazer um completo E2E. As soluções comerciais disponíveis atualmente apresentam simuladores antropomórficos ou em formas geométricas distintas, tais como esferas ou retângulos.

De maneira tradicional, um teste E2E é realizado com um filme/detector inserido em um objeto simulador (1). O simulador é escaneado, e um planejamento é realizado e entregue em uma configuração clínica do serviço. Medidas com detectores são obtidas para determinar as incertezas na localização, dosimetria absoluta e análise planar ou tridimensional da distribuição de dose do sistema através do método gama (8).

O objetivo deste estudo é avaliar o teste E2E do sistema de SRS automatizada com HyperArc™ utilizado na prática clínica do serviço de radioterapia do Real Hospital Português de Beneficência em Pernambuco.

2. Materiais e Métodos

2.1 Simulador

Nesse estudo, foi utilizado o simulador antropomórfico de cabeça e pescoço STEEV2™ modelo 038 da fabricante CIRS. Apresenta em seu *design* material tecido equivalente e regiões intracranianas e vertebrais com heterogeneidade tecidual, além de ser compatível com sistemas de fixação estereotáxica de pacientes. Foram utilizados dois *inserts*, sendo um com alvo regular esférico e outro de formato irregular. O *insert* para análise de distorção espacial 3D também foi utilizado, contém uma grade tridimensional (com espaçamento de 10mm x 10 mm) de fio de alto contraste (~600 HU) com diâmetro de 1mm, conforme mostra a Figura 1.

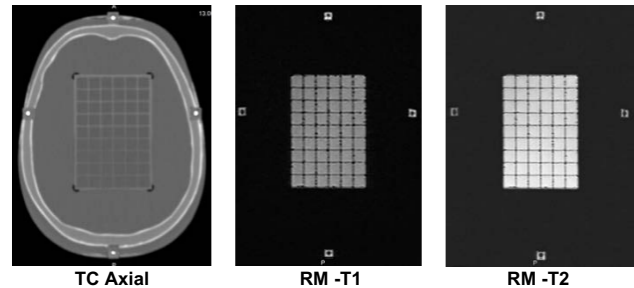


Figura 1. *Insert* com grade para análise da distorção espacial 3D

2.2 Fluxo de trabalho do teste E2E

O teste E2E compreendeu todas as etapas do procedimento de SRS, desde a tomografia computadorizada (TC) e ressonância magnética (RM) até a entrega de dose no acelerador linear. As etapas incluíram a localização e aquisição de imagens, registro, definição de volume alvo, planejamento de tratamento e cálculo de dose, posicionamento do simulador com sistema de IGRT, bem como a entrega do tratamento. O setup usado para sequência de testes é mostrado na Figura 2. Um sistema de imobilização *frameless* com máscara termoplástica face aberta, denominada *Encompass™* SRS da fabricante QFix é utilizado. Esse sistema apresenta elevada precisão na imobilização com acurácia submilimétrica, além de ser validado para o HA.

Além de proporcionar maior conforto para os pacientes, a máscara face aberta permite a verificação do posicionamento intrafração utilizando o sistema de monitoração óptica por superfície (SGRT, do inglês *Surface Guided Radiation Therapy*).

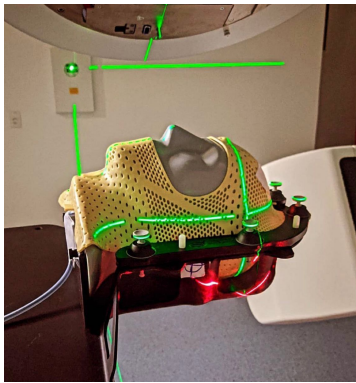


Figura 2. Simulador antropomórfico STEEV2 e sistema de imobilização *frameless* utilizado na rotina clínica do HyperArc™.

As imagens de TC foram realizadas de acordo com o protocolo clínico institucional para tratamentos de SRS usando um tomógrafo Siemens modelo SOMATOM™ Definition AS. As imagens de TC foram reconstruídas com espessura de corte de 1 mm. Já as imagens de RM foram adquiridas no equipamento Siemens modelo MAGNETOM™ Verio de 3T, com as ponderações T1 e T2 do protocolo de radiocirurgia estereotáxica do departamento e sequência volumétrica de 1mm³. As aquisições dessas duas sequências foram fundamentais para avaliar a distorção geométrica das imagens de RM como uma fonte potencial de erro do fluxo de trabalho em SRS.

No departamento é utilizado o Software *Elements™* da *BrainLab* para as etapas de fusão com registro rígido e deformável, além do uso de atlas anatômico para delineamento de estruturas em planejamentos de SRS. O módulo Cranial desse software dispõe da ferramenta denominada *Distortion correction Cranial™* para o registro deformável, que é um algoritmo de correção da distorção geométrica sofrida por imagens de RM, e o aplica para haver uma melhor correlação entre a RM e a TC de referência utilizada como imagem primária para cálculo de dose.

Foram delineados dois alvos para planejamento: um volume esférico com 30 mm de diâmetro e um alvo irregular. O alvo irregular foi delineado em ambas as modalidades de imagens (TC e RM) e avaliado o volume contornado, utilizando como valor de referência o volume obtido na TC, pois não sofre distorção geométrica. Ambos os alvos são mostrados na Figura 3.

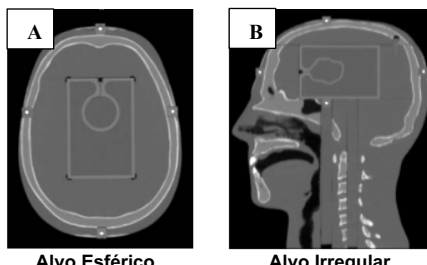


Figura 3. Alvos em objeto simulador: (A) Alvo com volume esférico e (B) alvo de volume irregular.

Após os registros e delineamento as imagens e o conjunto de estruturas foram enviados para o TPS Eclipse™ versão 16.0 (Varian Medical Systems), que faz o cálculo da dose. O algoritmo de cálculo utilizado é o Acuros XB™, e grade de cálculo de 1,0 mm. Com

o HA, não é necessário criar qualquer estrutura auxiliar de otimização, apenas inserir os acessórios de imobilização, como a base *Encompass™*, o suporte de cabeça e adicionar a máscara ao corpo.

A etapa do planejamento consistiu na elaboração de um plano de HyperArc™ para cada alvo com dose única de 18 Gy, normalizados volumetricamente para que 99% da estrutura alvo receba a dose de prescrição e sem restrição de ponto quente. A energia do feixe utilizada como padrão em todos os planos de HA é 6 MV-FFF (*Flattening Filter Free*) com taxa de dose de 1400 UM/min. Foram habilitados os quatro arcos possíveis, sendo 1 arco completo coplanar e 3 semiarcos não coplanares com ângulos de mesa padronizados (45°, 315° e 270° ou 90°), e escolha do ângulo de colimador automática pelo algoritmo do HA. Essa configuração é mostrada na Figura 4.

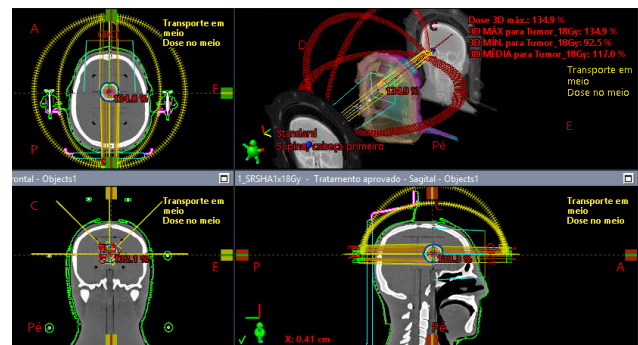


Figura 4. Planejamento com configuração do HyperArc.

Foram analisadas métricas de qualidade dos planos (9, 10, 11), como: índice de conformidade do RTOG (IC_{RTOG}), índice de conformidade de Paddick (IC_{Paddick}), índice de gradiente (IG), medida de gradiente (MG) e comparados com valores médios dos planejamentos da instituição para os casos de SRS com HA.

A verificação da entrega da dose no Acelerador Linear (AL) TrueBeam™ STx V2.7 com MLC HD120 seguiu o protocolo institucional para PSQA em planejamentos de SRS com a técnica HA-VMAT, com o uso de dois métodos: medida de dose absoluta pontual com câmara de ionização (CI) *NanoChamber* de volume 0,003 cm³ da IBA e análise planar de distribuição de dose com filme radiocrômico EBT3™, da fabricante Gafchromic. A dose média no volume da câmara obtida no TPS através do histograma dose volume foi comparada com a dose medida na CI. O filme radiocrômico foi posicionado no isocentro do planejamento de tratamento e avaliado no plano coronal do simulador.

A CI e o filme inseridos no simulador são mostrados na Figura 5, com as linhas de isodoses de 100% (vermelho) e 50% (azul) obtidas no plano de verificação. Para o alinhamento do simulador com a CI inserida na cavidade para determinação da dose absoluta é realizada uma imagem de *Cone Beam CT* (CBCT) prévia à irradiação (12). É realizado o registro da imagem no AL para o correto alinhamento da CI no ponto de medida. Para a irradiação no filme radiocrômico os pontos externos do simulador são alinhados com os lasers da sala de tratamento.

A análise das distribuições de dose calculada e medida foi realizada com filme, utilizando o método de índice gama (13) com 3%/1mm e limite de dose inferior de 10%, conforme recomendação do TG-218 (14). Para essa análise foi utilizado o software *OmniPro ImRT™* da IBA.

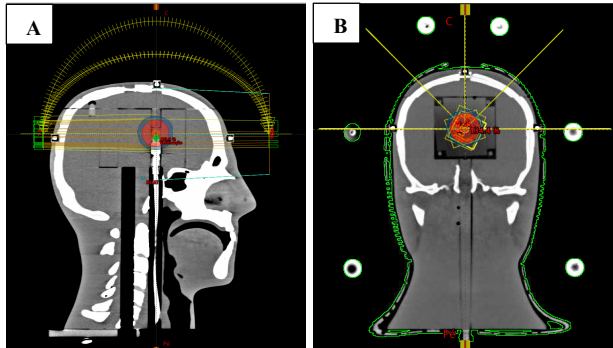


Figura 5. Planos de verificação do PSQA: (A) visualização sagital da CI inserida na cavidade do simulador e no centro do alvo, (B) visualização coronal do plano de verificação com filme inserido no STEEV2.

3. Resultados e Discussões

3.1 Análise do registro e correção da distorção espacial 3D

Para a verificação do software de registro de imagem, uma análise quantitativa é requerida. No entanto, na prática clínica em avaliação específica do registro de imagem de cada paciente, a verificação qualitativa do registro da imagem pode ser suficiente para garantir a aceitabilidade do registro. Essa verificação pode ser realizada através de uma boa inspeção visual com ferramentas de visualização adequadas.

O software *Elements™* dispõe como ferramenta para avaliação qualitativa do registro uma janela móvel, denominada *Spy Glass*, onde é possível mover essa janela ao longo de toda a imagem. É uma ferramenta efetiva para identificar as sobreposições de estruturas com interfaces de tecidos de alto contraste (vasos, bordas de órgãos em risco). Outra ferramenta disponível é a visualização de imagens sobrepostas, denominada no software como *Blending*. Apresenta uma escala de cores distintas para cada conjunto de imagens: Azul = TC e Laranja = RM. Fornece uma avaliação mais ampla do registro, com melhor percepção de distorção (Campo de visão amplo). A Figura 6 mostra essas ferramentas de visualização do registro de imagens.

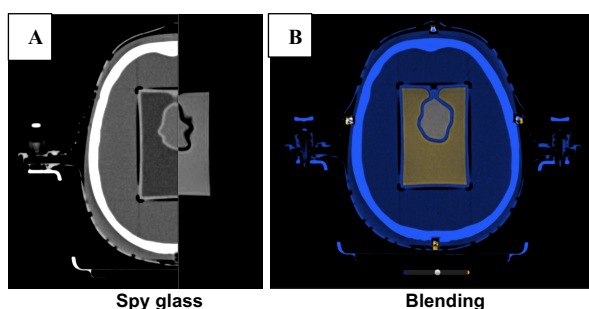


Figura 6. Ferramentas de visualização para inspeção visual do registro de imagens.

A seguir são apresentadas medidas quantitativas da acurácia do registro. Os critérios e tolerâncias das análises seguiram as recomendações do TG-132 (7).

O resultado do registro deformável após a aplicação da matriz de correção de distorção do software *Elements* na imagem do *insert* com grade tridimensional é mostrado na Figura 7 (A), além do registro da imagem do alvo irregular (Figura 7-B). A grade de deformação indica regiões de maior distorção entre os dois conjuntos de imagem.

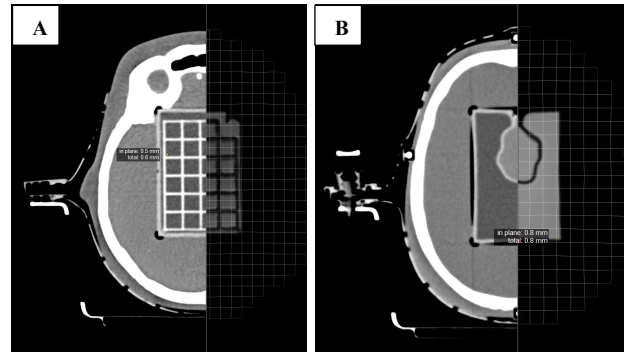


Figura 7. Cálculo automático do TER fornecido pelo *Elements*: (A) grade tridimensional e (B) alvo irregular.

O alinhamento de pontos anatômicos no mesmo espaço tridimensional é uma maneira simples e direta de quantificar a acurácia do registro em uma localização específica. A técnica consiste em identificar as mesmas referências anatômicas nos dois conjuntos de imagens e inserir pontos nessas localizações. A distância entre a localização dos pontos correspondentes na imagem da TC e RM é computada após a transformação da correção ser aplicada a imagem da RM. Essa técnica é conhecida como Erro de Registro-Alvo (TRE, do inglês *Target Registration Error*), que é o erro residual médio entre pontos identificados no estudo B (RM) e os pontos identificados no estudo A (TC), mapeado no estudo A tomado como imagem de referência (7). A figura 7 ilustra o cálculo do TRE realizado de maneira automática pelo *Elements*. O maior valor encontrado para essa métrica de análise foi 0,6 mm para a grade tridimensional, e para o alvo irregular foi de 0,8 mm, não excedendo a dimensão máxima do *voxel* (1 mm³) de nenhuma das séries. Dessa forma, o resultado foi considerado satisfatório, segundo as tolerâncias de TG-132 (7).

Outra métrica de análise quantitativa da acurácia do registro foi através do coeficiente de similaridade DICE (DSC, do inglês *DICE Similarity coeficiente*) (7). Essa informação foi obtida por meio do alinhamento das estruturas alvos delineadas no estudo B (RM) e sobrepostas as do estudo A (TC). O DSC verifica o volume de intersecção de 2 delineamentos em imagens registradas. O valor ideal para o DSC é 1, onde representa a completa sobreposição dos dois volumes delineados. O valor obtido do DSC para o alvo irregular delineado em ambos os estudos foi de 0,97 para o registro entre TC/RM-T1 e 0,95 para o registro TC/RM-T2, demonstrando boa similaridade.

A tolerância sugerida para esse parâmetro é o valor do DSC maior que 0,80, de acordo com o TG-132 (7).

A comparação de volume do alvo irregular delineado em cada modalidade de imagem é mostrada na Tabela 1, com a diferença percentual em relação ao volume real. O volume real do alvo tomado do manual do fabricante do simulador foi utilizado como valor de referência para análise.

Tabela 1. Comparação de volume alvo na TC vs RM

Volume Real (cm ³)	Volume na TC (cm ³)	Volume na RMT1 (cm ³)	Volume na RMT2 (cm ³)
12,5	12,2 (-2,4%)	12,6 (+0,8 %)	12,7 (+1,6 %)

Fonte: O autor (2023).

3.2 Planejamento com HA

As métricas de avaliação dos planejamentos são mostradas na Tabela 2, para o alvo esférico e o alvo irregular. O critério de aprovação do planejamento foi o alcance dos valores médios da instituição para cada parâmetro. Os valores da média institucional e desvios padrões considera todos os planejamentos de HA, não separando através do formato ou volume da lesão.

Tabela 2. Métricas de avaliação dos planejamentos

Índice	Alvo Esférico	Alvo Irregular	Média e desvio padrão Institucional
IC _{RTOG}	1,002	1,024	1,016 ± 0,114
IC _{Paddick}	0,977	0,956	0,950 ± 0,088
IG	2,278	2,612	2,765 ± 0,099
MG (cm)	0,460	0,540	0,561 ± 0,038

Fonte: O autor (2023).

3.2 Medidas

Os resultados das medidas com câmara de ionização para determinação da dose absoluta apresentaram uma variação de 2,6% para o planejamento do alvo esférico e 1,9% para o alvo irregular. Ambas as medidas apresentaram diferenças inferiores a 3% do valor calculado pelo TPS.

Os resultados para análise da distribuição de dose planar com filme radiocrômico mostraram que há concordância entre o perfil de dose calculado pelo TPS e o medido, dentro do critério gama de 3%/1mm e limite de dose inferior em 10%. Esse limite inferior exclui pontos de dose abaixo de um valor especificado para cálculo do índice gama. O resultado dessa comparação é a taxa de passagem gama (%PG), que representa a proporção de pontos que passam nos critérios de aceitação do índice gama. Para o planejamento do alvo esférico a %PG foi de 99,14 % e para o alvo irregular foi de 98,8%. Os dois planejamentos passaram na métrica de aceitação do índice gama com %PG superior a 95 %.

Furnari e colaboradores, trazem uma série de recomendações de frequência e tolerâncias para testes relacionados à softwares de registro, cálculo de dose e controle de qualidade de acelerador linear (15).

4. Conclusões

A realização deste trabalho possibilitou a verificação de todas as etapas do fluxo de trabalho de SRS na instituição. O teste de ponta a ponta com objetos simuladores é uma etapa importante que assegura a acurácia geral da aquisição de imagem, do registro, do procedimento de planejamento e entrega de dose. Os resultados mostraram-se satisfatórios para as métricas de análises qualitativas e quantitativas do processo de registro de imagens utilizando as ferramentas do software *Elements*. As medidas para a determinação da dose absoluta pontual com a câmara de ionização e análise da distribuição de dose planar apresentaram concordância dentro do critério estabelecido, de diferença de dose medida inferior a 3% do valor calculado pelo TPS e aceitação do índice gama superior a 95% para a condição de 3%/1mm. A recomendação para a frequência de realização desse teste é no comissionamento, anualmente, após um reparo ou substituição de equipamento com potencial impacto na integridade dos dados e a cada atualização de software de registro de imagem ou TPS. Como perspectivas futuras para este trabalho buscaremos replicar o estudo utilizando o método de dosimetria por Ressonância Magnética Eletrônica (RME) com a Alanina, pois nos possibilita expandir a análise para múltiplos alvos tratados com isocentro único.

Referências

- Benedict SH, Yenice KM, Followill D, Galvin JM, Willian H, Kavanagh B, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101. *Med. Phys.* 2010;37(8): 4078-101.
- Halvorsen PH, Cirino E, Das IJ, Garrett JA, Yang J, Yin FF, et al. AAPM-RSS medical physics practice guideline 9.a. for SRS-SBRT. *J. Applied Clinical Med. Phys.* 2017;18(5): 10-21.
- Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. *Med. Phys.* 2008;35(1):311-17.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Reports Series No. 430: Commissioning and Quality Assurance of Computerized Planning Systems for Radiation Treatment of Cancer. IAEA, Vienna. 2006.
- Grishchuk D, Dimitriadis A, Sahgal A, De Salles A, Fariselli L, Kotecha R, et al. ISRS Technical Guidelines for Stereotactic Radiosurgery: Treatment of Small Brain Metastases (≤1 cm in Diameter). *Prac. Rad. Onc.* 2022;1-12.
- Lim SB, Kuo L, Li T, Li X, Ballangrud AM, Lovelock M, et al. Comparative study of SRS end-to-end QA processes of a diode array device and an anthropomorphic phantom loaded with GafChromic XD film. *J. Applied Clinical Med. Phys.* 2022; 23(9):10-21.
- American Association of Physicists in Medicine (AAPM). Radiation Therapy Committee Task Group 132: Use of image registration and fusion algorithms and techniques in radiotherapy. *Med. Phys.* 2017;44(7):43-76.
- Low C, Toye W, Phung P, Huston C. Patient-Specific Quality Assurance Protocol for Volumetric Modulated Arc Therapy using Dose Volume Histogram. *Journal Med. Phys.* 2018;43(25):112-118.
- Shaw E, Kline R, Gillin M, Souhami L, Hirschfeld A, Dinapoli R et al. Radiation Therapy Oncology Group: radiosurgery quality assurance guidelines. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 1993; 27:1231-39.
- Paddick I. A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans. *J. Neurosurg.* 2000;93(3):219-222.
- Desai DD, Johnson EL, Cordrey IL. An analytical expression for R50% dependent on PTV surface area and volume: A cranial

- SRS comparison. J. Applied Clinical Med. Phys. 2021; 22(2):203-10.
12. American Association of Physicists in Medicine (AAPM). Radiation Therapy Committee Task Group 119: Commissioning Tests Instructions for Planning, Measurement, and analysis. 2009.
 13. Low DA, Harms WB, Mutic S, Purdy, JA. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. Med. Phys. 1998; 25:656-61.
 14. Miften M, Olch A, Mihailidis D, Moran J, Pawlicki T, Molineu A, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group 218. Med. Phys. 2018;45(4):53-83.
 15. Furnari, L. e Colaboradores. Controle da qualidade em radioterapia. 2ª Ed. São Paulo, Brasil 2021.

Contato:

Matheus Fernando dos Santos
Real Hospital Português de Beneficência
Av. Gov. Agamenon Magalhães, 4760, Recife-PE
matheusfernando778@gmail.com