



AValiação de Dose em Radioterapia Utilizando Feixes de Cone Beam e 6 MV em Fantoma de Crânio Usando Detectores MTS-N

Pedro H. D. Vieira¹, André E. L de Abreu², Ângela M. M. dos Santos², Telma C. F. Fonseca², Luiz C. Meira-Belo¹

¹CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 30270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil

²Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG, 30270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil

pedro.vieira@cdtn.br

Palavras-Chave: dosimetria, radioterapia, termoluminescente

RESUMO

Este estudo visa validar a dose absorvida por dosímetros termoluminescentes (TLDs) irradiados por feixes de cone beam e 6 MV utilizando o acelerador linear Versa HD da Elekta, em um serviço de radioterapia em Belo Horizonte, MG, Brasil. Foram utilizados 30 TLDs do tipo MTS-N, distribuídos em um fantoma de crânio com objetivo de avaliar as doses depositadas em um protocolo de planejamento radioterápico, em diferentes regiões do fantoma. O fantoma de crânio foi impresso em impressora 3D pelo grupo de pesquisa Monte Carlo Modelling Expert Group (MCMEG) no Laboratório de Dosimetria Interna do LDI/CDTN e é composto por duas principais estruturas, a calota craniana construída em ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e o cérebro que é oco é construído em PLA (ácido polilático) e preenchido com dosímetro Fricke gel. Externamente ao cérebro foram posicionados 18 TLDs nas regiões face frontal superior, faces laterais esquerda e direita e face posterior. Na superfície externa da calota craniana, foram posicionados 12 TLDs. Um protocolo de rotina de radioterapia foi aplicado, sendo primeiramente a verificação do posicionamento com o Cone Beam e em sequência com o feixe de 6MV. Foi aplicada uma dose total de 2 Gy em todo o cérebro, em 2 campos opostos. Os TLDs foram enumerados e as leituras foram realizadas no laboratório de dosimetria luminescente. Os resultados são apresentados e discutidos neste trabalho. Futuras pesquisas podem expandir este estudo para incluir diferentes tipos de fantasmas e condições de irradiação, visando a otimização contínua da dosimetria. Conclui-se que a abordagem proposta é uma ferramenta valiosa para garantir a precisão das doses em estudos de radioterapia, contribuindo para a segurança e eficácia dos tratamentos radioterápicos.

1. INTRODUÇÃO

Os dosímetros termoluminescentes (TLDs) ou dosímetros TL são dispositivos amplamente utilizados para medir a quantidade de radiação ionizante absorvida ao longo do tempo, sendo fundamentais em contextos de monitoração e controle de doses em radioterapia [1]. Esses dispositivos operam com base no princípio da termoluminescência, onde certos materiais, após a exposição à radiação, retêm energia em defeitos da sua estrutura cristalina. Posteriormente, quando esses materiais são aquecidos, a energia armazenada é liberada na forma de luz, cuja intensidade é diretamente proporcional à dose de radiação absorvida [2]. A precisão e confiabilidade dos dosímetros TL fazem deles uma escolha ideal para a dosimetria em radioterapia, onde é crucial que as doses prescritas sejam administradas com alta exatidão nos tecidos-alvo, ao mesmo tempo em que a exposição dos tecidos saudáveis é minimizada [1]. Neste estudo, investigamos a distribuição de dose em diferentes regiões de um fantoma de crânio, empregando dosímetros TL MTS-N, que é composto de fluoreto de lítio dopado com



magnésio e titânio e fabricado e comercializado pela Mirion Technologies Inc. O objetivo principal foi validar os protocolos de planejamento radioterápico, assegurando que as doses previstas pelo planejamento fossem efetivamente entregues às amostras de tecido simulado, conforme calculado. Esta abordagem é essencial para garantir a eficácia e a segurança dos tratamentos radioterápicos, especialmente em procedimentos de alta complexidade [1].

2. METODOLOGIA

Dois experimentos foram realizados no serviço de radioterapia. O primeiro para validar a dose absorvida em um planejamento de cone beam para próstata. Nesse caso, três dosímetros TL foram posicionados ao lado de frascos a fim de formar o volume alvo e foram submetidos a um protocolo de cone beam de 120 kVp.

O segundo experimento foi realizado utilizando um protocolo de radioterapia de irradiação do cérebro. Para o ensaio foram dispostos 27 dosímetros TL e um fantoma de crânio. O crânio foi impresso em impressora 3D pelo grupo de pesquisa Monte Carlo Modelling Expert Group (MCMEG) no Laboratório de Dosimetria Interna do LDI/CDTN e é composto por duas principais estruturas, a calota craniana construída em ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e o cérebro que é oco é construído em PLA (ácido polilático) [5]. O cérebro do fantoma foi preenchido com dosímetro Fricke gel e dois feixes bilaterais foram aplicados com dose total de 2Gy, porém a leitura do dosímetro Fricke gel não será realizada neste trabalho. 18 dosímetros TL foram posicionados internamente no crânio em contato com a superfície do cérebro, 9 dosímetros TL na superfície externa do crânio. Antes da aplicação do protocolo de tratamento com o feixe de 6MV, o crânio foi submetido ao processo normal de tratamento, o de verificação do posicionamento do crânio, desta forma o protocolo de cone beam, nesse caso em particular, utilizando feixe com tensão de 100 kVp, com dose calculada no TPS (*treatment plan system*) do serviço de radioterapia, de 0,5 mGy. Figura 1 apresenta as regiões onde foram posicionados os dosímetros TL no crânio na parte interna e a Figura 2 os pontos onde foram colocados os dosímetros TL na parte externa do fantoma. Figura 3 apresenta o posicionamento do fantoma na mesa do acelerador de partículas modelo Versa HD da Elekta de 6MV do serviço de radioterapia.

A configuração dos experimentos foram as seguintes:

Procedimentos de irradiação no planejamento para próstata:

1. Irradiação com cone beam de 120 kVp:
 - a. Três dosímetros TL (F1, F2, F3) foram utilizados na mesma configuração experimental anterior, com as amostras de Fricke Gel e irradiados com cone beam a 120 kVp para obter a imagem das amostras.

A configuração do experimento com o fantoma de cérebro foi a seguinte:

1. Distribuição Interna dos dosímetros TL:
 - a. Face Superior Interna: Três dosímetros TL foram posicionados no ponto medial, denominados A1, B1, e C1.
 - b. Face Lateral Direita Interna: Três dosímetros TL foram posicionados, denominados A2, B2, e C2.
 - c. Face Lateral Esquerda Interna: Três dosímetros TL foram posicionados, denominados A3, B3, e C3.
 - d. Face Posterior Interna: Três dosímetros TL foram posicionados no ponto central, denominados A4, B4, e C4.



- e. Face Anterior Interna: Três dosímetros TL foram posicionados no ponto médio, denominados A5, B5, e C5.
 - f. Face Inferior Interna: Três dosímetros TL foram posicionados no ponto médio, denominados A6, B6, e C6.
2. No total, 18 dosímetros TL foram fixados internamente (em contato com o cérebro) e permaneceram no lugar até o final dos experimentos de irradiação por cone beam e feixe de 6 MV.

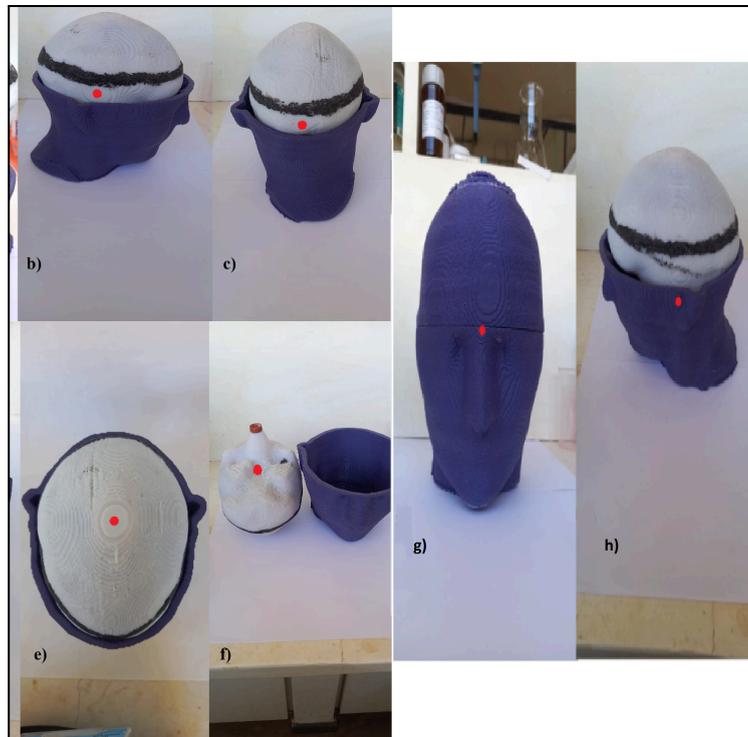


Figura 1. Pontos vermelhos indicam a posição dos dosímetros TL internos, sendo a) a face lateral direita, b) a face lateral esquerda, c) face posterior, d) face anterior, e) face superior e f) face inferior.

3. Distribuição externa dos dosímetros TL:
- a. Primeira Irradiação: Dois dosímetros TL, denominados D1 e D2, foram posicionados na face esquerda externa do crânio e irradiados com um feixe cone beam de 100 kVp. Após a irradiação, esses dosímetros TL foram removidos com o objetivo de obter a dose devido a radiação com cone beam.
 - b. Segunda Irradiação: Sete dosímetros TL foram posicionados externamente, nesse caso para obter a dose devido a irradiação com o feixe de 6MV:
 - i. Três na face direita externa (D3, D4, D5)
 - ii. Três na face esquerda externa (D6, D7, D8)



- iii. Um na face anterior externa (E8)

Procedimentos de irradiação:

1. Primeira irradiação:

- a. O conjunto do fantoma com os dosímetros TL internos e D1 e D2 foi submetido a irradiação com cone beam utilizando uma tensão de 100 kVp em um planejamento para imagem de cabeça e pescoço. São retirados do conjunto os dosímetros TL D1 e D2 após a irradiação.

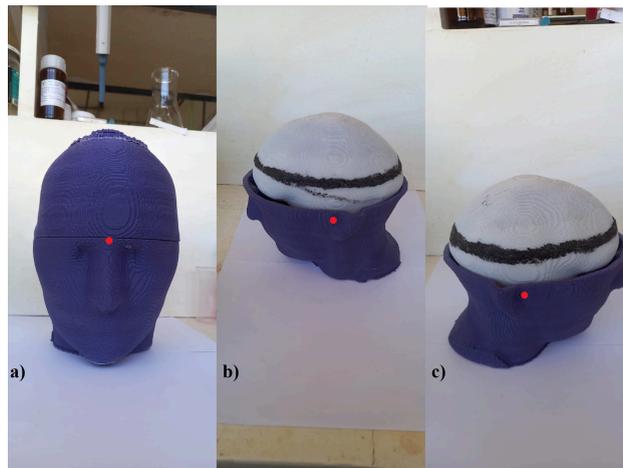


Figura 2. Ponto vermelho indicando a posição dos dosímetros externos sendo a) a face anterior, b) a face lateral direita e c) a face lateral esquerda.

2. Segunda irradiação:

- a. O conjunto do fantoma e dos dosímetros TL internos são irradiados após a adição dos dosímetros TL D3 a D8 e E8 em suas posições. A irradiação foi realizada pelo acelerador com uma energia de 6MV, entrada de campo pelas laterais direita e esquerda, com uma dose de 2 Gy (2000 mGy) cujo o alvo foi o cérebro preenchido com Fricke.

Após cada etapa de irradiação, os dosímetros TL foram removidos cuidadosamente e separados em um arranjo onde é possível associar a posição dos dosímetros TL a região na qual estes foram posicionados no fantoma.

Os dosímetros TL foram lidos utilizando técnicas de leitura no laboratório de dosimetria luminescente no SECDOS/CDTN. Foi utilizado o leitor RISO TL/OSL DA-20, os parâmetros para a leitura foram taxa de aquecimento de 5°C/s, faixa de leitura de 20 a 360°C, sob fluxo de nitrogênio hiperpuro. Após a leitura, os dados foram analisados e os resultados de contagens obtidos na leitora foram convertidos em dose e comparados com as doses aplicadas em cada experimento. A conversão das contagens obtidas nos dosímetros TL são realizadas em procedimento padrão do LDL do CDTN, utilizando uma curva de calibração.



Figura 3. Parte externa do fantoma de crânio no qual foi fixado os dosímetros TL. Seta preta indicando posição dos dosímetros TL D1, D2, D6, D7, D8. Seta vermelha indicando posição do dosímetro TL E8. dosímetros TL D3, D4, D5 no lado oposto à seta preta.

3. RESULTADOS

Tab. 1. Valores de dose absorvida e sua respectiva incerteza em cada posição, em parênteses as exposições que foram realizadas nos dosímetros TL da posição.

Posição	Dose absorvida (mGy)	Incerteza (mGy)
dosímetros TL posicionados no Cérebro		
Superior do Cérebro (cone beam e 6 MV)	845,92	7,87
Inferior do Cérebro (cone beam e 6 MV)	867,49	8,07
Lateral Direita do Cérebro (cone beam e 6 MV)	914,80	8,51
Lateral Esquerda do Cérebro (cone beam e 6 MV)	935,05	8,69
Posterior do Cérebro (cone beam e 6 MV)	1041,58	9,69
Anterior do Cérebro (cone beam e 6 MV)	898,03	8,31



dosímetros TL posicionados no Crânio		
Esquerda Externa do Crânio (cone beam)	1,12	2,55
Esquerda Externa do Crânio (cone beam e 6MV)	557,36	5,47
Direita Externa do Crânio (cone beam e 6MV)	549,67	5,36
Frontal Externa do Crânio (cone beam e 6MV)	206,46	4,97
dosímetros TL para planejamento de cone beam de próstata		
dosímetros TL (cone beam de 120 kVp)	44,00	2,17

As incertezas foram obtidas a partir da combinação por propagação de incerteza da média entre os dosímetros TL e as incertezas, de cada dosímetro, obtidas após a calibração, garantindo maior segurança no intervalo encontrado.

3.1 Irradiação do cérebro no feixe de 6MV com dose de 2 Gy

A dose calculada pelo TPS do serviço de radioterapia, para o feixe de 6MV no cérebro (órgão alvo) foi de 2 Gy (2000 mGy) ou 1 Gy para cada lateral. Os resultados das doses absorvidas nos dosímetros TL, posicionados no interior do crânio e no exterior do cérebro, indicaram que a dose medida foi inferior, entre 40 e 55% (entre 845,92 mGy \pm 7,87 mGy e 1041,58 mGy \pm 9,69 mGy), do valor planejado para o alvo. Estes valores eram esperados visto que o cérebro foi o órgão alvo e a dose total deveria estar neste órgão. As maiores doses na irradiação do fantoma foram registradas na região posterior do cérebro, mesmo que a entrada de campo tenha sido pelas laterais, a face posterior obteve valores próximos a 55% (1041,58 mGy \pm 9,69 mGy) da dose planejada para o alvo no cérebro. Os dosímetros TL externos, posicionados nas laterais direita e esquerda, no protocolo de radioterapia com alvo no cérebro, receberam doses variando entre 25% a 40% da dose no alvo. A entrada de campo foi realizada pelas laterais direita e esquerda. As doses medidas nos dosímetros TL externos corresponderam a aproximadamente 60% das doses nos dosímetros TL internos localizados nas mesmas faces laterais (549,67 mGy \pm 5,36 mGy e 557,36 mGy \pm 5,37 mGy), devido à maior contribuição de dose pela entrada de campo do mesmo lado.

3.2 Cone beam

A primeira irradiação com cone beam no crânio resultou em doses de aproximadamente 1,12 mGy \pm 2,55 mGy, já a dose calculada pelo TPS é de 0,5 mGy, indicando uma baixa dose entregue durante a obtenção de imagens cone beam para a região de cabeça e pescoço. A Figura 5 apresenta a imagem obtida do fantoma de crânio no cone beam.

A segunda irradiação com cone beam foi planejada para as amostras de Fricke gel. A dose planejada pelo TPS indica um valor de 24,2 mGy, devido à maior duração do procedimento. A



dose obtida nas leituras dos dosímetros TL foi significativamente maior, registrando aproximadamente $44,00 \text{ mGy} \pm 2,17 \text{ mGy}$, este aumento representa uma dose absorvida 82% maior do que a dose planejada.

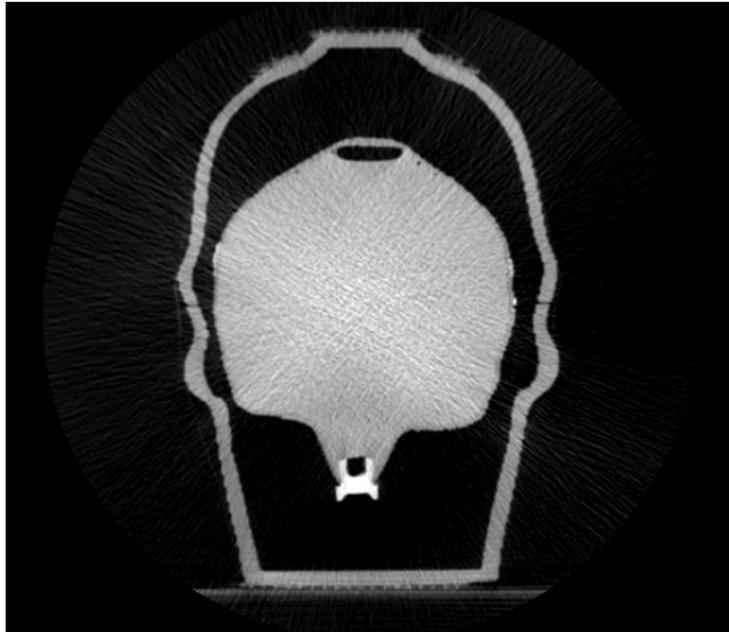


Figura 4: Imagem gerada no cone beam do fantoma em um plano frontal.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, um protocolo de radioterapia de cérebro com feixe de 6MV com dose de 2 Gy foi realizado em um fantoma, a fim de avaliar as doses depositadas no dosímetros TL. Os resultados indicam que as doses medidas pelos dosímetros TL foram em grande parte consistentes com as doses planejadas, embora algumas variações tenham sido observadas. A metodologia utilizada demonstrou não apenas a importância do uso de dosímetros TL nas medidas de dose, mas também a utilidade do uso de fantasmas impressos em 3D como ferramenta de validação dos protocolos de radioterapia. As irradiações com cone beam ainda são temas para pesquisas devido ao baixo valor de dose entregue. A dose registrada durante o planejamento de imagem com o cone beam deve ser sublinhada a necessidade de protocolos rigorosos para garantir a qualidade e segurança das imagens obtidas.

AGRADECIMENTOS

As seguintes instituições brasileiras apoiam este projeto de pesquisa: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O Prof. T. C. F. Fonseca agradece o apoio financeiro fornecido pelo CNPq (424734/2018-4 e 302990/2021-6) e pela FAPEMIG (Projeto APQ-01388-21). Agradecemos também ao Projeto FAPEMIG: Rede Mineira de Pesquisa Translational em Oncologia RED00059-23, ao INCT.INAIS: Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde, ao Hospital Mater Dei por disponibilizar o serviço de radioterapia para a realização do trabalho e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GIBBONS, J. P. *Khans the physics of radiation therapy*. [s.l.] Lippincott Williams And Wilkin, 2014.
- [2] Horowitz, Y. S. (1990). Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry. *Nuclear Technology*, 90(1), 75-93. doi:10.13182/NT90-A34428
- [3] ANDREO, P. AND BURNS, D.T. AND NAHUM, A.E. AND SEUNTJENS, J. AND ATTIX, F.H. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*. John Wiley & Sons, 2017.
- [4] FRANK HERBERT ATTIX. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Weinheim: Wiley-Vch, 2004.
- [5] AKINTAYO DANIEL OMOJOLA et al. Calibration of MTS-N (LiF: Mg, Ti) chips using cesium-137 source at low doses for personnel dosimetry in diagnostic radiology. *Radiation Protection and Environment/Radiation protection and environment*, v. 43, n. 2, p. 108–108, 1 jan. 2020.
- [6] Gallo S; Arosio P; Locarno S; Orsini F; Brambilla MG; Gambarini G; Lizio D; Monti AF; Torresin A; Lenardi C; Veronese I. (2021). Characterization of PVA-GTA Fricke gels dosimeters using MRI and optical techniques in X-rays external radiation therapy. *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C* 44: 4-5.
- [7] Hvid, C. A., Elstrøm, U. V., Jensen, K., & Grau, C. (2017). Cone-beam computed tomography (CBCT) for adaptive image guided head and neck radiation therapy. *Acta Oncologica*, 57(4), 552–556. <https://doi.org/10.1080/0284186X.2017.1398414>
- [8] International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). (2010). Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. ICRU Publications
- [9] J Buckley et al 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* 777 012003
- [10] LIOSI, G. M. et al. Fricke-gel dosimeter: overview of Xylenol Orange chemical behavior. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 140, p. 74–77, nov. 2017.
- [11] Macchione MA; Lechón Páez S; Strumia MC; Valente M; Mattea F. (2022). Chemical Overview of Gel Dosimetry Systems: A Comprehensive Review. *Gels* 8: 663.
- [12] McKeever, S. W. S. (1985). *Thermoluminescence of Solids*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511564991
- [13] SADEK, A. M. et al. Similarities and differences between two different types of the thermoluminescence dosimeters belonging to the LiF family. *physica status solidi (c)*, 30 nov. 2016.
- [14] SITAH FAHAD ALANAZI et al. Response evaluation of two commercial thermoluminescence dosimeters (TLDs) against different parameters. 19 abr. 2023.
- [15] VITAL, K. D., MENDES, B. M., DE SOUSA LACERDA, M. A., DA SILVA, T. A., & FONSECA, T. C. F. (2019). Development of a physical head phantom using of a solid brain equivalent tissue for the calibration of the 18F-FDG internal monitoring system. *Radiation Physics and Chemistry*, 155, 56-61.