

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
INSTITUTO DE FÍSICA - INFIS

BEATRIZ HELLEN APARECIDA PEREIRA

**Caracterização de uma leitora por luminescência opticamente
estimulada utilizando dosímetros de BeO**

UBERLÂNDIA

2023

BEATRIZ HELLEN APARECIDA PEREIRA

**Caracterização de uma leitora por luminescência opticamente
estimulada utilizando dosímetros de BeO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Física Médica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

UBERLÂNDIA

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Curso de Graduação em Física Médica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1A, Sala 1A207B - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP
 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4418 - www.infis.ufu.br - cfmed@infis.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Física Médica				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - INFIS39029				
Data:	27/01/2023	Hora de início:	10:30	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	11911FMD003				
Nome do Discente:	Beatriz Hellen Aparecida Pereira				
Título do Trabalho:	Caracterização de uma leitora por luminescência opticamente estimulada utilizando dosímetros de BeO				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	(X) Sim () Não				

Reuniu-se no Auditório 1X, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Física Médica, assim composta: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves - INFIS/UFU - orientador(a) do(a) candidato(a); Me. Monique França e Silva - PPGEB/UFU e Prof Dr. José Roberto Tozoni - INFIS/UFU.

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, Dr. Lucio Pereira Neves, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao/à discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado - Nota: 90

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Lucio Pereira Neves, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/01/2023, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Tozoni, Membro de Comissão**, em 27/01/2023, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Monique Franca e Silva, Usuário Externo**, em 27/01/2023, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4195294** e o código CRC **BF273C51**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me manter perseverante e por Sua luz que me indicou o caminho desde o começo de tudo.

À minha família, por todo apoio, incentivo, presença e amor incondicional na minha vida.

Aos meus amigos e colegas, que dividiram comigo essa jornada.

Às minhas colegas de apartamento, que estiveram presentes nas adversidades e nas alegrias.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucio Pereira Neves e a sua esposa, Prof. Dra. Ana Paula Perini, por todos os conselhos, colaboração e dedicação durante toda a minha graduação.

A todos os professores e membros do Instituto de Física - INFIS, que de alguma forma colaboraram com esta caminhada.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da UFU e das agências de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio das bolsas de Produtividade em Pesquisa 314520/2020-1 (Lucio Pereira Neves), 312124/2021-0 (Ana Paula Perini), pelo Programa MAI DAI 403556/2020-1, pelo Projeto UNIVERSAL 407493/2021-2 e pelo Projeto INCT 406303/2022-3; e FAPEMIG, pelos projetos APQ-02934-15, APQ-03049-15 e APQ-04215-22.

“Passamos toda a vida nos preocupando com o futuro. Fazendo planos para o futuro. Tentando prever o futuro. Como se desvendá-lo fosse aliviar o impacto. Mas o futuro está sempre mudando. O futuro é o lar dos nossos medos mais profundos e das nossas maiores esperanças. Mas uma coisa é certa: quando ele finalmente se revela, o futuro nunca é como imaginamos.”

- Grey's Anatomy

RESUMO

A dosimetria por luminescência opticamente estimulada (LOE) consiste em uma técnica onde cristais que, após irradiados e estimulados opticamente, emitem luz. Tal propriedade vem sendo bastante estudada e se mostrou muito promissora para dosimetria pessoal. O óxido de berílio (BeO) é um material que possui as propriedades necessárias para ser utilizado como dosímetro LOE, portanto é importante a análise do seu comportamento com diferentes intensidades de feixe a fim de se analisar o comportamento do material. Uma nova leitora LOE, denominada LumiDeteck 3000, desenvolvida pela Universidade Federal do Pernambuco, foi avaliada utilizando dosímetros de BeO com doses de 0,1 Gy a 10 Gy. O limite inferior de detecção calculado para a leitora foi de 0,19 Gy, a reprodutibilidade não foi satisfatória, ultrapassando o limite sugerido. A curva dose resposta apresentou comportamento linear, como esperado, apesar da incerteza relativamente grande devido à baixa reprodutibilidade. Entretanto cabe ressaltar que a referida leitora funciona muito bem para outros dosímetros, apresentando este comportamento para as pastilhas empregadas neste estudo.

Palavras-chave: Dosimetria opticamente estimulada, LumiDeteck 3000, Óxido de berílio.

ABSTRACT

Optically stimulated luminescence (OSL) dosimetry consists of a technique where crystals, after being irradiated and optically stimulated, emit light. This property has been extensively studied and has shown to be very promising for personal dosimetry. Beryllium oxide (BeO) is a material that has the necessary properties to be used as an OSL dosimeter, so it is important to analyze its behavior with different beam intensities in order to analyze the behavior of the material. A new LOE reader, called LumiDeteck 3000, developed by the Federal University of Pernambuco, was evaluated using BeO dosimeters with doses from 0.1 Gy to 10 Gy. The lower limit of detection calculated for the reader was 0.19 Gy, the reproducibility was not satisfactory, exceeding the suggested limit. The dose-response curve showed a linear behavior, as expected, despite the relatively large uncertainties due to low reproducibility. However, it should be noted that the OSL reader works very well for other dosimeters, showing this behavior for the material used in this study.

Keywords: Optically stimulated dosimetry, LumiDeteck 3000, Beryllium oxide.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

LOE	Luminescencia opticamente estimulada
TL	Termoluminescencia
LiF	Fluoreto de lítio
Al ₂ O ₃	xido de alumínio
CaSO ₄	Sulfato de clcio
BeO	xido de berílio
LID	Limite inferior de detecção
LED	Diodo emissor de luz
OSL	Optically stimulated luminescence
USB	Universal Serial Bus
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
Gy	Gray

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Probabilidade de ocorrência dos modos de interação da radiação com a matéria em função do número atômico do material absorvedor e da energia da radiação incidente	14
Figura 2 -	Processo de exposição radioativa e excitação ótica para leitura LOE em cristais. (BV) Banda de valência; (BP) Banda proibida; (BC) Banda de condução	17
Figura 3 -	Esquema de um sistema de leitura LOE	18
Figura 4 -	Diodo emissor de luz utilizado no tratamento óptico	19
Figura 5 -	Leitora LumiDeteck 3000	20
Figura 6 -	Disposição dos dosímetros e do detector PIRANHA© para irradiação em um equipamento de radiodiagnóstico	21
Figura 7 -	Disposição dos dosímetros na radioterapia	22
Figura 8 -	Curvas de luminescência dos dosímetros irradiados no radiodiagnóstico	25
Figura 9 -	Curvas de luminescência dos dosímetros irradiados na radioterapia.	26
Figura 10 -	Curva de Resposta LOE em função da dose para os dosímetros irradiados no radiodiagnóstico	27
Figura 11 -	Curva de Resposta LOE em função da dose para os dosímetros irradiados na radioterapia	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Parâmetros do raio X, utilizado para irradiação no radiodiagnóstico, medidos com o medidor de dose de raios X PIRANHA©	24
Tabela 2 -	Limite inferior de detecção	28
Tabela 3 -	Reprodutibilidade para cada grupo de dosímetros, irradiados com diferentes doses, no radiodiagnóstico	29
Tabela 4 -	Reprodutibilidade para cada grupo de dosímetros, irradiados com diferentes doses, em um LINAC	29

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 RADIAÇÕES IONIZANTES.....	13
2.1.1 Interação Da Radiação Eletromagnética Com A Matéria.....	13
2.1.2 Grandezas Dosimétricas.....	14
2.1.3 Raio X.....	15
2.1.4 Aceleradores Lineares.....	15
2.2 DETECTORES DE RADIAÇÃO.....	16
2.2.1 Características Dos Dosímetros.....	16
2.2.2 Dosimetria Opticamente Estimulada.....	17
2.2.3 Óxido de Berílio.....	18
2.3 TRATAMENTO ÓPTICO.....	18
3. METODOLOGIA.....	19
3.1 TRATAMENTO ÓPTICO.....	19
3.2 SISTEMA DE LEITURA.....	19
3.3 LEITURA PRÉ-IRRADIAÇÃO.....	20
3.4 IRRADIAÇÃO NO RADIODIAGNÓSTICO.....	20
3.5 PARÂMETROS DO RAO X.....	21
3.6 LEITURA PÓS IRRADIAÇÃO.....	21
3.7 IRRADIAÇÃO EM UM LINAC.....	21
3.8 CURVAS DE LUMINESCÊNCIA.....	22
3.9 CURVA DOSE RESPOSTA.....	22
3.10 LIMITE INFERIOR DE DETECÇÃO.....	22
3.11 REPRODUTIBILIDADE.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
4.1 PARÂMETROS DO RAO X.....	24
4.2 CURVAS DE LUMINESCÊNCIA.....	25
4.3 CURVAS DOSE RESPOSTA.....	27

4.4 LIMITE INFERIOR DE DETECÇÃO.....	28
4.5 REPRODUTIBILIDADE	28
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

Em 1895, marcou-se a descoberta dos raios X pelo físico Wilhelm Roentgen, que ao verificar a impressão fluorescente ou fosforescente deixada pelo feixe em alguns materiais, apresentou ao mundo a primeira imagem radiográfica, a qual continha a mão da sua esposa. Henri Becquerel se interessou pelo fenômeno apresentado e começou seus estudos sobre a emissão de raios X por sulfato duplo de potássio e uranila, um composto que se tornava fluorescente se exposto ao sol, descobrindo que o material, mesmo sem exposição solar, deixava a impressão em uma placa. Anos depois, em 1897, Pierre e Marie Curie começaram a estudar os raios descobertos por Becquerel e os denominaram de radioatividade, passando também a utilizar uma câmara de ionização para definir materiais radioativos. Ao tentarem isolar urânio puro, descobriram um novo elemento denominado Polônio e, quatro anos depois, isolaram o Rádio (PERUZZO, 2012).

Tendo em vista as descobertas de materiais radioativos, a radioatividade foi empregada na vida humana. Atualmente, é utilizada nas áreas de radioterapia, radiodiagnóstico, produção de radiofármacos, esterilização de materiais, para examinar soldas, junções, rachaduras e vazamento em tubulações, tratamento de alimentos dentre outras aplicações (ALGARVE, 2017).

Apesar das inovações as quais empregam radiações ionizantes, é importante ressaltar que tais comprimentos de onda podem ocasionar danos para os seres vivos, tendo em vista o poder de ionização da radiação. A dosimetria da radiação surgiu como uma forma de se garantir que os benefícios ao se usar a radiação ionizante sejam maiores que os malefícios, definindo limites de exposição e realizando as medições necessárias (ALGARVE, 2017).

O sistema dosimétrico utilizado pode empregar o uso de câmaras de ionização, cristais ou filmes fotográficos. Materiais luminescentes são utilizados na dosimetria de estado sólido, sendo os mais comuns: Fluoreto de Lítio (LiF), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$) e Óxido de Berílio (BeO). Na dosimetria com esses materiais, podem ser utilizadas duas técnicas, sendo elas a luminescência opticamente estimulada (LOE), na qual o material é estimulado por luz, e a termoluminescência (TL), na qual ocorre estímulo térmico (ALGARVE, 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a importância da dosimetria, principalmente na área médica, faz-se necessário a avaliação dos sistemas dosimétricos, especificamente da dosimetria opticamente estimulada, na qual o material utilizado e a leitora precisam funcionar em conjunto e da maneira mais precisa possível.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Neste trabalho o intuito foi caracterizar pastilhas de BeO com a Leitora LumiDeteck 3000, desenvolvida pela Universidade Federal do Pernambuco, irradiando as pastilhas em feixes de radioterapia e radiodiagnóstico.

1.2.2 Objetivos Específicos

Analisar as curvas de luminescência apresentadas pela leitora, a curva dose-resposta para diferentes energias de feixe, o limite inferior de detecção da leitora e a reprodutibilidade dos dosímetros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RADIAÇÕES IONIZANTES

Radiação é a energia em trânsito, emitida por uma fonte e propagada através do vácuo, do ar ou de outros meios materiais. As radiações são divididas entre radiações corpusculares, compreendendo as partículas alfa, elétrons, pósitrons, prótons e nêutrons, e as radiações eletromagnéticas, os fótons, constituídas de campo elétrico e campo magnético os quais oscilam perpendicularmente (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

As radiações eletromagnéticas ionizantes são aquelas com energia capaz de ionizar átomos ou moléculas, em especial raios X e gama, que devido ao seu comportamento ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, são capazes de penetrar nos materiais e percorrer grandes espessuras antes de interagir com o meio (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

2.1.1 Interação Da Radiação Eletromagnética Com A Matéria

Os principais modos de interação da radiação com a matéria são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares, como mostrado na figura 1.

O efeito fotoelétrico ocorre quando a energia total da radiação incidente é transferida para um elétron orbital, o qual será ejetado com energia cinética que pode ser definida como (OKUNO, YOSHIMURA, 2010; TAUHATA *et al.*, 2013):

$$E_C = h \cdot \nu - E_l \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck, ν a frequência da radiação incidente e E_l a energia de ligação do elétron antes da ejeção.

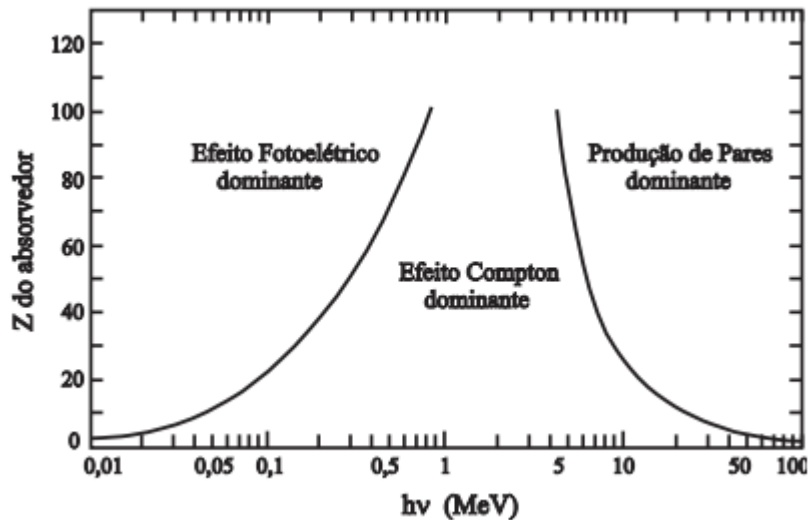
O efeito fotoelétrico é predominante para radiações incidentes de baixa energia e em elementos químicos com elevado número atômico (Z), tendo a probabilidade aumentada com Z^4 (OKUNO, YOSHIMURA, 2010; TAUHATA *et al.*, 2013).

No efeito Compton, um fóton é absorvido por um elétron. O elétron é ejetado e outro fóton é emitido. A energia do fóton espalhado (E') depende da energia do fóton incidente (E) e do ângulo de espalhamento (θ), podendo ser calculado com a seguinte equação (OKUNO, YOSHIMURA, 2010; TAUHATA *et al.*, 2013):

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (2)$$

Por fim, tem-se a formação de pares, efeito no qual é necessário alta energia de incidência (superior a 1,022 MeV) para que possa haver interação com a força nuclear forte e a produção de um par elétron-pósitron (OKUNO, YOSHIMURA, 2010; TAUHATA *et al.*, 2013).

Figura 1: Probabilidade de ocorrência dos modos de interação da radiação com a matéria em função do número atômico do material absorvedor e da energia da radiação incidente.



Fonte: TAUHATA *et al.*, 2013.

2.1.2 Grandezas Dosimétricas

As grandezas dosimétricas são importantes para quantificar a exposição dos seres humanos à radiação ionizante. Podem ser utilizados para exposição externa, quando se tem o uso de fontes emissoras de radiação fora do corpo, e para exposição interna, quando radionuclídeos são inalados, ingeridos ou injetados no corpo (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

As grandezas dosimétricas podem ser classificadas em três categorias: grandezas físicas, grandezas operacionais e grandezas de proteção. As grandezas físicas descrevem quantitativamente e qualitativamente as propriedades dos fenômenos físicos da radiação. As grandezas de proteção são especificadas para o corpo humano e não podem ser mensuradas com o uso de equipamentos, sendo necessário a combinação com grandezas operacionais, de modo que essas possam ser relacionadas para estimar os limites da exposição externa do corpo por meio de coeficientes de conversão, assim, as grandezas operacionais relacionam-se com os valores dos dosímetros e instrumentos utilizados para monitoramento das doses de radiação (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

A primeira grandeza dosimétrica criada foi a exposição, a qual é definida apenas para raios X e raios gama interagindo no ar e mede a capacidade dos fótons de ionizar esse meio. É descrito como a quantidade de carga elétrica de um mesmo sinal por unidade de massa do ar, sendo a unidade no Sistema Internacional o C/kg (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

Um outro exemplo muito importante de grandeza física é a dose absorvida D_t , a qual está relacionada com a energia da radiação absorvida e os danos biológicos causados. Tal grandeza pode ser descrita como o quociente entre a energia média depositada pela radiação D_E e o volume elementar de massa D_m , como mostrado na equação 3, e pode ser utilizada para todos os tipos de radiação, toda geometria de exposição e qualquer meio pelo qual o feixe possa ser espalhado. A unidade de dose absorvida no Sistema Internacional é o Gray (Gy) (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

$$D_t = \frac{D_E}{D_m} \quad (3)$$

2.1.3 Raio X

Os raios X são produzidos dentro do tubo de raio X, no qual elétrons são acelerados a partir de um campo elétrico e atingem um alvo metálico, fazendo com que alguns elétrons mudem de direção (raio X) e produzindo radiação de freamento. O feixe de elétrons é gerado por emissão termiônica, por um filamento aquecido, e é submetido à uma diferença de potencial entre o terminal emissor (cátodo), o qual é carregado negativamente, e o alvo (anodo), o qual é carregado positivamente. A energia dos raios X é proporcional à tensão aplicada no tubo e a intensidade do feixe aumenta com o aumento da corrente aplicada (TAUHATA *et al.*, 2013).

2.1.4 Aceleradores Lineares

Nos aceleradores de elétrons, as partículas são geradas por emissão termiônica, assim como no tubo de raio X, mas nesse caso são carregadas por uma onda portadora gerada por válvulas amplificadoras de radiofrequência e inseridas em um guia de ondas. Os elétrons acelerados colidem com um alvo de tungstênio, produzindo calor e fótons (raio X). O feixe pode ser delineado por meio de um colimador e a energia pode ser uniformizada com o uso de filtros (TAUHATA *et al.*, 2013; MORALES, 2011).

2.2 DETECTORES DE RADIAÇÃO

Os detectores de radiação são utilizados na proteção radiológica como um sensor para mostrar a presença de radiação e até para quantificá-la. De modo geral, podem ser classificados como transdutores, podendo converter a energia da radiação detectada em um sinal, geralmente elétrico. Quando um detector apenas mostra o número de interações causadas pela radiação é chamado de detector contador. Quando o sinal do equipamento corresponde à energia depositada pela radiação, é possível obter a dose pela qual foi exposto, nesses casos tem-se os dosímetros. Por fim, tem-se os espectrômetros, que detectam a presença de radiação e a energia, podendo medir seu espectro (OKUNO, YOSHIMURA, 2010; BAPTISTA, 2015).

2.2.1 Características dos Dosímetros

A curva dose-resposta é construída a partir da resposta apresentada pela leitora, sendo ela TL ou LOE, em função da dose pela qual a pastilha foi exposta. Para um dosímetro ideal, essa curva deve apresentar comportamento linear (ALGARVE, 2017).

O limite inferior de detecção (LID) é uma característica observável nos detectores, o qual corresponde a menor dose que pode ser discriminada. Este parâmetro pode ser calculado a partir da variação da resposta de dosímetros não irradiados como mostra a equação 4 (BRAVIM, 2015).

$$LID = (R_0 + 3\sigma)f_{cal} \quad (4)$$

onde R_0 é a média das integrais de luminescência dos dosímetros não irradiados (após tratamento para diminuição do sinal residual), σ é o desvio padrão e f_{cal} é o fator de calibração, que corresponde ao inverso do coeficiente angular da curva Dose-Resposta, no caso em que esta é linear.

Além disso, tem-se a reprodutibilidade dos dosímetros, que representa a exatidão dos valores lidos, analisando a variação dos resultados obtidos a fim de se determinar a sua precisão levando em consideração todo o processo de obtenção das medidas. A reprodutibilidade pode ser calculada a partir da equação 5 (OKUNO, YOSHIMURA, 2010; BRAVIM, CAMPOS, 2012).

$$Reprodutibilidade (\%) = \frac{\sigma}{\sqrt{n} \cdot \bar{R}} \cdot 100 \quad (5)$$

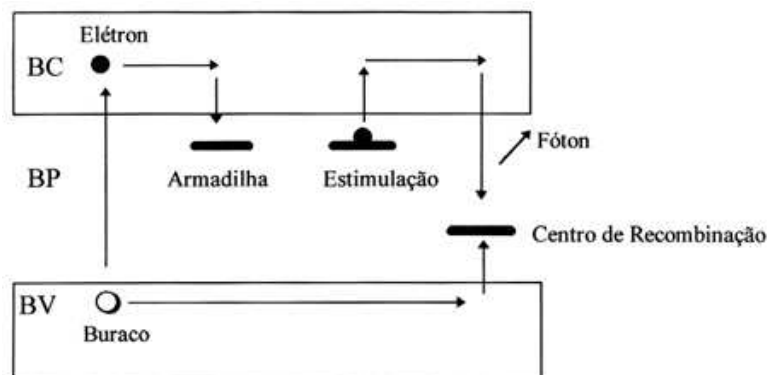
onde σ é o desvio padrão das integrais de luminescência de determinada dose (grupo de dosímetros), n a quantidade de dosímetros do grupo e \bar{R} é a média das integrais de luminescência do grupo.

2.2.2 Dosimetria Opticamente Estimulada

A dosimetria opticamente estimulada consiste no uso de dosímetros com modelos de bandas de energia. Nesses materiais, geralmente cristais, a banda de valência se apresenta cheia de elétrons, a banda de condução não possui nenhum elétron no seu estado inicial e, entre essas duas bandas, tem-se a banda proibida, a qual não permite a permanência de elétrons. No caso dos dosímetros LOE, a banda proibida possui impurezas (o material é dopado) para que os elétrons fiquem aprisionados (BRAVIM, CAMPOS, 2012).

Quando o material é excitado pela incidência de radiação eletromagnética, um elétron da banda de valência é levado para a banda de condução, deixando um buraco no seu lugar original e, ao tentar voltar para a banda de valência, ele emite o excesso de energia em forma de radiação eletromagnética. Caso esse elétron encontre uma impureza entre as bandas, ele ficará em um estado metaestável até que outro processo de excitação o permita voltar, emitindo radiação no espectro de luz visível nesse caso (BRAVIM, CAMPOS, 2012), como ilustrado na figura 2 (CAMPOS, 1998.).

Figura 2: Processo de exposição radioativa e excitação ótica para leitura LOE em cristais. (BV) Banda de valência; (BP) Banda proibida; (BC) Banda de condução.

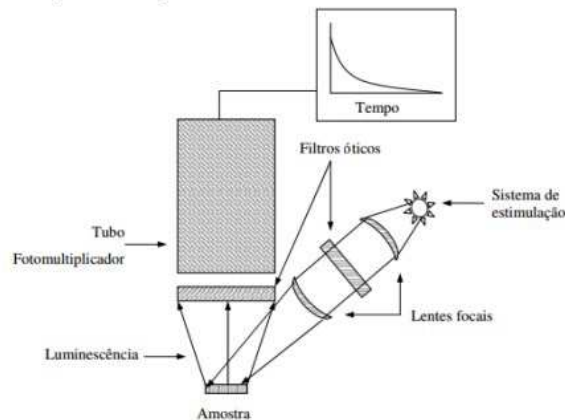


Fonte: CAMPOS, 1998.

Em uma leitora LOE, o material será estimulado opticamente, emitindo radiação eletromagnética no espectro da luz visível, podendo essa quantidade de luz emitida ser mensurada de forma a ser proporcional com a energia que o cristal recebeu inicialmente. O

sistema de leitura possui um filtro óptico com a função de distinguir os comprimentos de onda da luz estimulante e da luz emitida pelo dosímetro, fazendo com que apenas a intensidade de interesse passe para um tubo fotomultiplicador (BRAVIM, CAMPOS, 2012), como mostrado na figura 3 (SILVA, 2017).

Figura 3: Esquema de um sistema de leitura LOE.



Fonte: SILVA, 2017.

2.2.3 Óxido de Berílio

O óxido de berílio (BeO) começou a ser usado em dosimetria termoluminescente na década de 70 e, na década de 90, começou a ser aplicado também na dosimetria opticamente estimulada devido a sua sensibilidade à sua luz. BeO consiste em um material bastante recomendado para dosimetria por possuir número atômico efetivo similar ao do tecido biológico humano (7,22 e 7,6 respectivamente). Também apresenta linearidade de resposta e alta sensibilidade, além de ser um material com baixo custo de produção (ALGARVE, 2017).

2.3 TRATAMENTO ÓPTICO

Para reutilização do dosímetro é necessário a realização de um tratamento óptico, o qual elimina as informações de irradiações anteriores, restaurando o seu estado inicial e estabilizando as armadilhas presentes na banda proibida. Esse processo acontece com a exposição do material a um feixe de luz, podendo ser de um diodo emissor de luz (LED) (ALGARVE, 2017). GROppo E CALDAS (2013) analisaram o tempo de tratamento necessário para desarmadilhar os elétrons em amostras de óxido de berílio e constataram que a resposta LOE manteve-se constante após 30 minutos de exposição usando LEDs azuis.

3. METODOLOGIA

3.1 TRATAMENTO ÓPTICO

Para realização do tratamento óptico foi utilizado um LED da marca *Annly LED's* (figura 4) de 10 Watts na cor azul. Foi empregado um sistema composto por uma caixa preta vedada da iluminação externa, 40 pastilhas de BeO, e foi empregado um tempo de exposição de 30 minutos, à luz azul.

Figura 4: Diodo emissor de luz utilizado no tratamento óptico.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.2 SISTEMA DE LEITURA

A leitora avaliada é a LumiDeteck 3000 (Figura 5) desenvolvida pela Universidade Federal do Pernambuco. O usuário interage com a leitora através do software SISTEMA OSL V1.3 por meio de um cabo USB (SANTANA, KHOURY, 2006).

Cada leitura dura 150 s e, após o término da captação do sinal, o software fornece um gráfico de luminescência em função do tempo de estimulação da amostra, a integral dessa curva e as medidas máxima e a mínima.

Figura 5: Leitora LumiDeteck 3000.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.3 LEITURA PRÉ-IRRADIAÇÃO

Para análises posteriores, é necessária a realização da leitura dos dosímetros após o tratamento óptico e anterior a qualquer exposição à radiação, devido a este fato, foi realizada a leitura pré-irradiação. Após a realização da leitura, as 40 pastilhas foram divididas em oito grupos e envolvidas por papel alumínio a fim de evitar interferências externas.

3.4 IRRADIAÇÃO EM UM EQUIPAMENTO DE RADIODIAGNÓSTICO

Os dosímetros foram levados ao Hospital das Clínicas da UFU e irradiados em um equipamento de raio X convencional utilizado na rotina do radiodiagnóstico. Foram necessárias repetidas exposições para cada grupo a fim de se obter doses altas o suficiente para serem detectadas pelo sistema pastilha-leitora, tendo em vista que as doses do radiodiagnóstico são baixas.

Nessas exposições, foram utilizadas diferentes tensões no tubo (kV), diferentes tempos de exposição (mAs) e a corrente do tubo fixa em 200 mA.

3.5 PARÂMETROS DO RAIOS X

Durante a irradiação no radiodiagnóstico, foi colocado dentro do campo de irradiação, juntamente com os dosímetros, um medidor de dose de raios X RTI Electronics AB PIRANHA[®] 657 (RTI, 2020), a fim de se obter os parâmetros do feixe de raio X.

Figura 6: Disposição dos dosímetros e do detector PIRANHA[®] para irradiação em um equipamento de radiodiagnóstico.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.6 LEITURA PÓS IRRADIAÇÃO

Após a irradiação dos dosímetros, estes foram levados a leitura novamente para registrar os dados da pastilha após a absorção de energia.

3.7 IRRADIAÇÃO EM UM LINAC

Após as leituras das exposições feitas no radiodiagnóstico, as pastilhas passaram novamente pelo tratamento óptico e pela leitura pré irradiação. Posteriormente, foram separadas em oito grupos, embaladas com papel alumínio e levadas para irradiação no acelerador linear Varian Clinac 6000c do Hospital do Câncer de Uberlândia. O processo de leitura pós irradiação foi repetido.

Figura 7: Disposição dos dosímetros na radioterapia.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.8 CURVAS DE LUMINESCÊNCIA

O software da leitora OSL dispõe da possibilidade de salvar os pontos do gráfico de luminescência em função do tempo em um arquivo. Usando esses dados salvos de todas as leituras realizadas, foram analisadas e graficadas as curvas de luminescência com *scripts* python utilizando-se os módulos *scipy*, *pandas*, *numpy* e *matplotlib* (COSTA, 2010).

3.9 CURVA DOSE RESPOSTA

O software da leitora OSL também dispõe da informação sobre a integral das curvas de luminescência. Esses valores foram utilizados para construir os gráficos de integral da resposta luminescente em função da dose pela qual o dosímetro foi exposto. Essas curvas foram graficadas com o programa SciDAVis (STANDISH, 2017).

3.10 LIMITE INFERIOR DE DETECÇÃO

O limite inferior de detecção foi calculado a partir da equação 3, utilizando os dados de integral de luminescência obtidos nas leituras pré-irradiação e o coeficiente angular da curva dose-resposta obtida anteriormente.

3.11 REPRODUTIBILIDADE

A reprodutibilidade, calculada para cada grupo de dosímetros, foi obtida a partir da equação 4. Nesses cálculos foram utilizadas as integrais de luminescência obtidas nas leituras pós irradiação, assim como o desvio padrão desses valores dentro de cada grupo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARÂMETROS DO RAIOS X

Na tabela 1 são apresentadas as configurações do feixe de raio X, medidas com o PIRANHA[®]. Estão registradas a tensão do tubo, o tempo de exposição, a dose pela qual os dosímetros foram expostos, a taxa de dose, a camada semirredutora e a filtração total.

Tabela 1: Parâmetros do raio X, utilizado para irradiação no radiodiagnóstico, medidos com o medidor de dose de raios X PIRANHA[®].

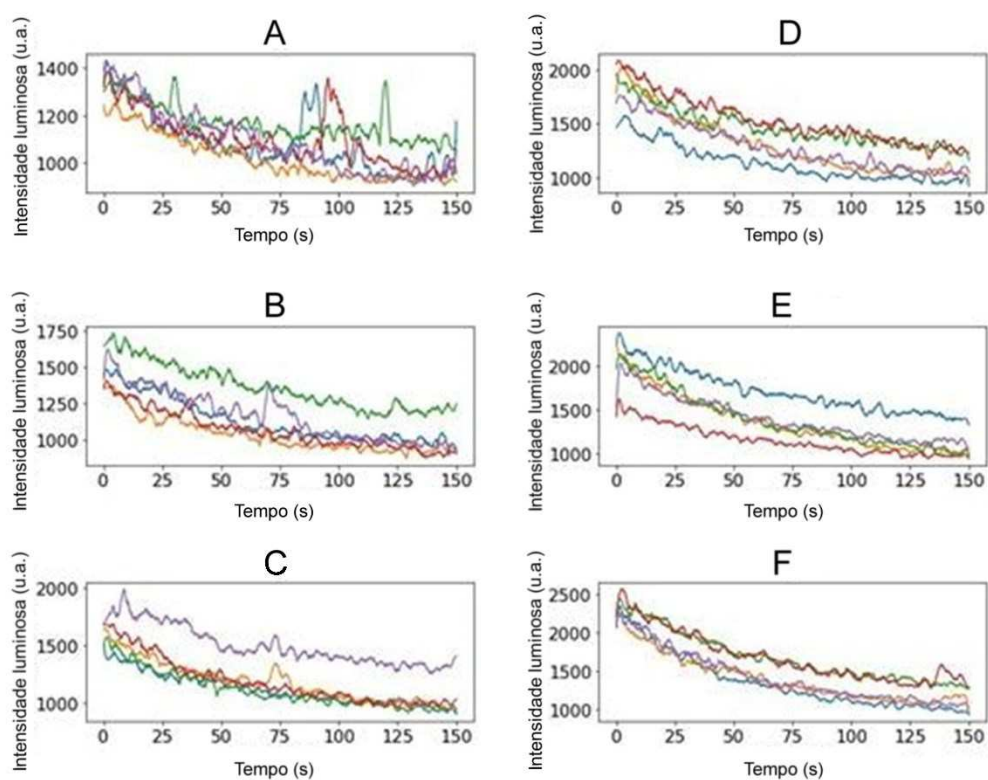
Tensão do tubo (kV)	Tempo de exposição (ms)	Dose (mGy)	Taxa de dose (mGy/s)	HVL (mmAl)	Filtração total (mmAl)
50	249	24	14	2,1	3,6
61	199	31	26	2,5	3,4
72	159	38	35	2,9	3,4
79	99	46	46	3,3	3,4
93	100	60	67	3,8	3,4
99	99	71	79	4,1	3,4
115	99	88	110	4,8	3,5
125	99	91	131	5,3	3,4

Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 CURVAS DE LUMINESCÊNCIA

Na figura 8 são apresentadas as curvas de luminescência para os dosímetros irradiados no serviço de radiodiagnóstico. As curvas, de A a F, correspondem aos grupos de dosímetros irradiados com as doses de 24 mGy, 31 mGy, 46 mGy, 60 mGy, 71 mGy e 91 mGy respectivamente.

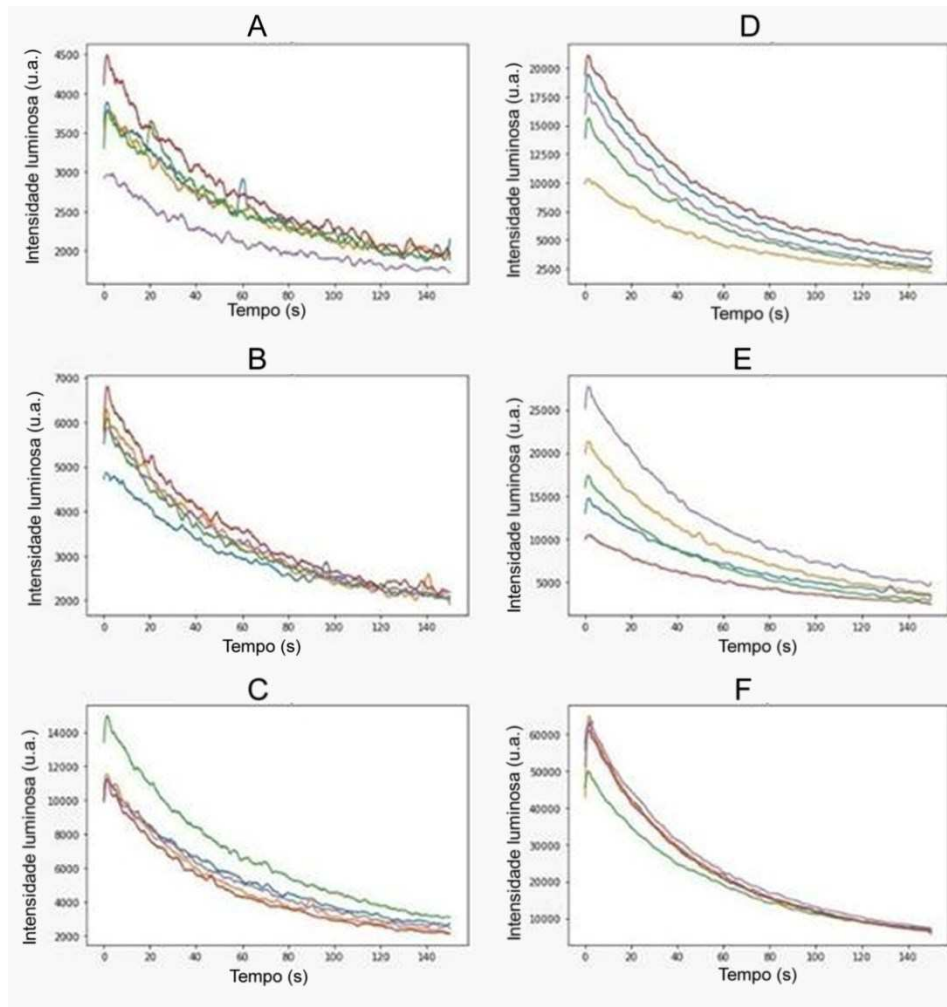
Figura 8: Curvas de luminescência dos dosímetros irradiados no radiodiagnóstico.



Fonte: BARROS *et al.*, (2022).

Na figura 9 tem-se as curvas de luminescência dos dosímetros irradiados na radioterapia. As curvas, de A a F, correspondem aos grupos de dosímetros irradiados com as doses de 0,1 Gy, 0,3 Gy, 0,5 Gy, 0,7 Gy, 1 Gy e 3 Gy.

Figura 9: Curvas de luminescência dos dosímetros irradiados na radioterapia.



Fonte: BARROS *et al.*, (2022).

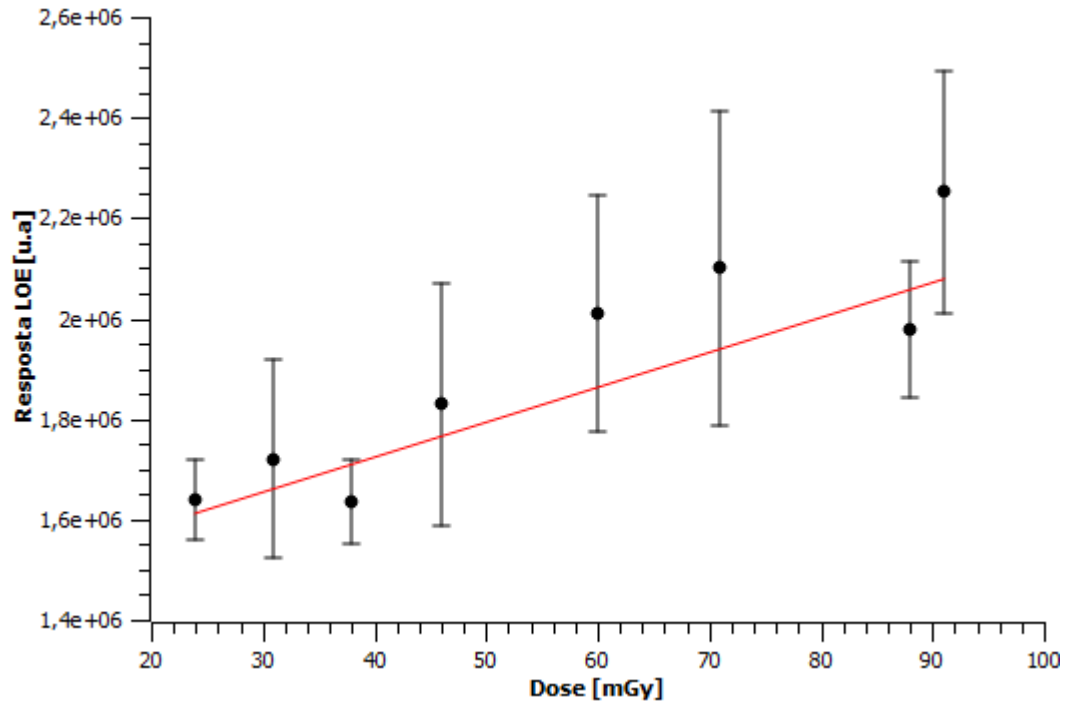
A resposta luminescente para os dosímetros expostos a doses abaixo de 1 Gy apresentou ruído significativo, alterando o comportamento esperado da curva. O ruído diminui conforme a luminescência aumenta com as pastilhas expostas a maiores doses.

Para a dose de 5 Gy e 10 Gy, foi observado um limite na escala da leitora, na qual a maior luminescência registrada é de 65000 u.a, menor que o valor emitido pelos dosímetros ao serem irradiados com doses maiores que 3 Gy, causando um corte na curva e impossibilitando a leitura. Portanto, as doses de 5 Gy e 10 Gy foram excluídas dos cálculos de reprodutibilidade e das curvas de dose resposta.

4.3 CURVAS DOSE-RESPOSTA

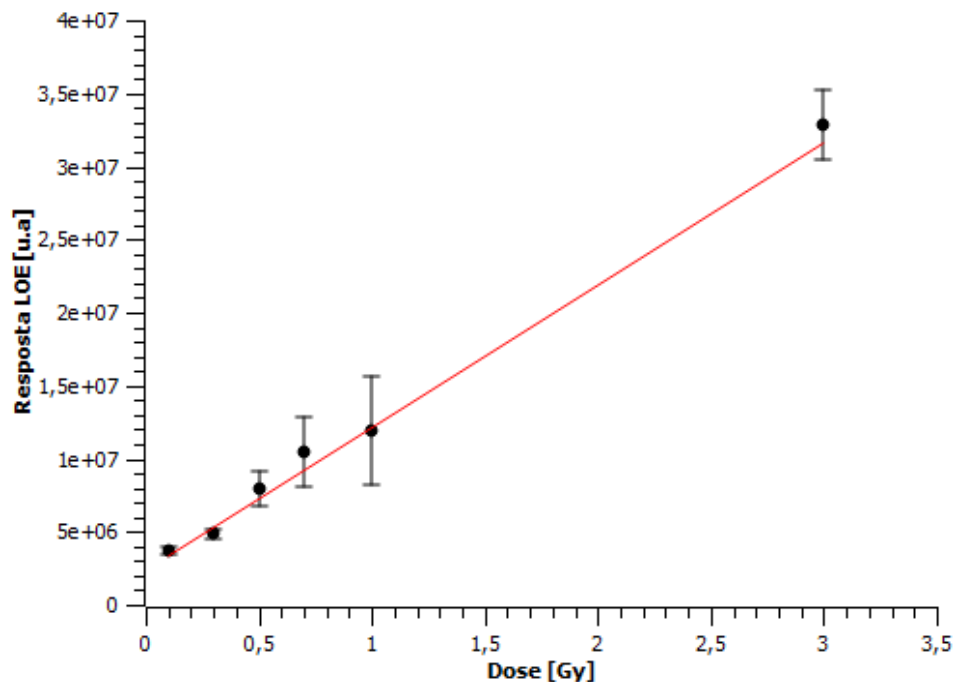
As curvas dose-resposta para os dosímetros irradiados no serviço de radiodiagnóstico e radioterapia podem ser vistas nas figuras 10 e 11 respectivamente.

Figura 10: Curva de Resposta LOE em função da dose para os dosímetros irradiados no radiodiagnóstico.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 11: Curva de Resposta LOE em função da dose para os dosímetros irradiados na radioterapia.



Fonte: Autoria própria (2022).

A curva dose-resposta apresentada nas Figuras 10 não pode ser considerada, necessariamente, linear. Neste caso, é indicado que sejam realizados mais testes com as pastilhas de BeO e a leitora. A curva dose-resposta apresentada na Figura 11, ao contrário, pode ser aproximada por uma curva linear, mostrando que há linearidade na relação entre a dose pela qual a pastilha foi exposta e a luminescência emitida durante a leitura. Nos dois casos, as barras de incerteza sugerem uma baixa reprodutibilidade dos dosímetros.

4.4 LIMITE INFERIOR DE DETECÇÃO

A tabela 2 apresenta o limite inferior de detecção (LID) da leitora obtido neste trabalho.

Tabela 2: Limite inferior de detecção.

Dosímetro	LID (Gy)
BeO	0,19

Fonte: Autoria própria (2022).

O limite inferior de detecção em 0,19 Gy indica que a leitora, juntamente com as pastilhas de BeO, é potencialmente eficiente para dosimetria de altas doses, como na radioterapia.

4.5 REPRODUTIBILIDADE

As tabelas 3 e 4 apresentam a reprodutibilidade para cada grupo de dosímetros irradiados no radiodiagnóstico e na radioterapia respectivamente.

Tabela 3: Reprodutibilidade para cada grupo de dosímetros, irradiados com diferentes doses, no radiodiagnóstico.

Grupo	Dose (mGy)	Reprodutibilidade
I	24	1,95
II	31	4,55
III	38	2,05
IV	46	5,24
V	60	4,69
VI	71	5,95
VII	88	2,74
VIII	91	4,27

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4: Reprodutibilidade para cada grupo de dosímetros, irradiados com diferentes doses, em um LINAC.

Grupo	Dose (Gy)	Reprodutibilidade
I	0,1	3,46
II	0,3	2,34
III	0,5	6,11
IV	0,7	9,24
V	1	12,53
VI	3	2,93

Fonte: Autoria própria (2022).

A reprodutibilidade dos dosímetros ficou entre 1,95% e 12,53%, apresentando grande variação e ultrapassando o valor recomendado na literatura, de 5% (SPRAWLS, 1993). Entretanto, dos 14 grupos, 9 deles apresentaram reprodutibilidade abaixo de 5%, sendo apenas 5 grupos acima deste limite. A baixa reprodutibilidade pode estar associada ao desarmadilhamento dos elétrons, tendo em vista que a lâmpada de LED foi ligada a uma corrente alternada, de forma que não é possível controlar a flutuação na emissão de luz, ou ao tempo de uso dos dosímetros, tendo em vista que a reprodutibilidade diminui proporcionalmente à exposição da pastilha.

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A baixa reprodutibilidade encontrada nos resultados pode estar associada ao desarmadilhamento dos elétrons e sugere-se uma melhoria no com a lâmpada azul. O tempo de uso dos dosímetros também pode afetar a reprodutibilidade, diminuindo gradualmente com a exposição.

A curva de dose reposta apresentou linearidade, em relação a dose utilizada na exposição e luminescência emitida pelo dosímetro durante a leitura, para os dosímetros irradiados no LINAC, mas não no Raios-X convencional. A incerteza foi alta, reforçando a hipótese de que as pastilhas precisam de calibração individual.

O limite inferior de detecção indica que a leitora, utilizando pastilhas de BeO, podem ser utilizadas para dosimetrias de altas doses, e se diminuído a influência da corrente escura, é um potencial equipamento para dosimetria de baixas doses.

Tendo em vista tais fatos, a leitora LumiDeteck 3000 e as pastilhas de BeO podem ser utilizadas com segurança, nas condições atuais, para dosimetria de altas doses. Para outras faixas de dose é necessário a calibração individual dos dosímetros e um estudo das frequências emitidas, tanto pela leitora quando pelas pastilhas, além da análise do filtro utilizado no sistema de leitura, a fim de garantir que a corrente escura não interferirá nas medidas. Entretanto cabe ressaltar que a referida leitora funciona muito bem para outros dosímetros, apresentando este comportamento para as pastilhas empregadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ALGARVE, F. J. **Caracterização dosimétrica do BeO em feixes de radiodiagnóstico convencional, mamografia e tomografia computadorizada, pelas técnicas de termoluminescência e luminescência opticamente estimulada.** Tese de Mestrado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. p. 96.
- BAPTISTA, A. **Equipamentos detectores de radiação e sua utilização. Curso de Proteção e Segurança Radiológica em Radiografia Industrial.** Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares. 2015.
- BARROS, C. E. PEREIRA, B. H. A. CARDOSO, *et. al.* **Caracterização de uma leitora por luminescência opticamente estimulada utilizando dosímetros de BeO.** Simpósio de Engenharia Biomédica, 14 ed., Uberlândia, 2022. DOI 10.5281/zenodo.7487159.
- BRAVIM A. **Aplicação das técnicas de dosimetria termoluminescentes e luminescência opticamente estimulada (OSL) na determinação de curvas de isodose em uma simulação de tratamento de câncer pela técnica de radioterapia em arco modulado volumétrico - VMAT.** Tese de Doutorado- Instituto De Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. p. 116.
- BRAVIM A., CAMPOS L. L. **Comparison of TL and OSL signal of LiF: Mg, Ti dosimeters to beta radiation.** International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation, 2012.
- CAMPOS, L. L. **Termoluminescência de materiais e sua aplicação em dosimetria da radiação.** Cerâmica. v. 44. n. 290, p. 244-251, 1998. DOI 10.1590/S0366-69131998000600007.
- COSTA, D. G. **Administração de redes com scripts: Bash script, Python e VBScript.** Brasport Livros e Multimídia Ltda, 2 Ed. p. 180. Rio de Janeiro, 2010. ISBN 978-85-7452-434-4.
- GROPPO, D. P. CALDAS, L. V. E. **Comparação das respostas TL e OSL de amostras de BeO em feixes padrões de radiodiagnóstico convencional.** XVIII Congresso Brasileiro de Física Médica. São Pedro - SP, 2013.
- MORALES, F. C. de. **Sistema de Acelerador Linear Comercial para Radioterapia.** Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
- OKUNO, E; YOSHIMURA, E. **Física das Radiações.** [s. l.]: Oficina de textos. p. 296. 2010. ISBN 9788579752384.
- PERUZZO, J. **Armas Nucleares.** [s.l.] Clube de Autores, 2012.

RTI. **The RTI Piranha family**. Meditron, 2020. Disponível em: <https://www.meditron.ch/quality-assurance/downloads/The-RTI-Piranha-Family-Brochure-210x210-2020.pdf>. Acesso em 28 de outubro de 2022.

SANTANA, T. S. KHOURY, J. H. **Desenvolvimento de um equipamento para dosimetria por luminescência opticamente estimulada**. 2006. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SILVA, R. J. G. G. **Caracterização do CaF₂:Tm para dosimetria por luminescência opticamente estimulada**. Tese de mestrado. p. 88. Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2017.

SPRAWLS, P. **Physical Principles of Medical Imaging**. Gaithersburg: Aspen Publishers, 2 Ed. 1993.

STANDISH, R. **SciDavis. Source Forge**. 2017. Disponível em: <https://scidavis.sourceforge.net/>. Acesso em 4 de outubro de 2022.

TAUHATA, L; SALATI, I; DI PRINZIO, R, *et. al.* **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 9º edição. Instituto De Radioproteção E Dosimetria, Comissão Nacional De Energia Nuclear, Rio De Janeiro, 2013. p. 345.