

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

AVALIAÇÃO DE UM NOVO SISTEMA DE DOSIMETRIA POR
LUMINESCÊNCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA

CÁSSIA EUGÊNIA BARROS

UBERLÂNDIA
2023

CÁSSIA EUGÊNIA BARROS

AVALIAÇÃO DE UM NOVO SISTEMA DE DOSIMETRIA POR
LUMINESCÊNCIA OPTICAMENTE ESTIMULADA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

Uberlândia
2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B277
2023

Barros, Cássia Eugênia, 1998-
Avaliação de um novo Sistema de Dosimetria por
Luminescência Opticamente Estimulada [recurso
eletrônico] / Cássia Eugênia Barros. - 2023.

Orientador: Lucio Pereira Neves.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Biomédica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.140>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia biomédica. I. Neves, Lucio Pereira ,
1982-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Biomédica. III.
Título.

CDU: 62:61

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N, Sala 115 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4761 - www.ppegb.feelt.ufu.br - ppegb@feelt.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Biomédica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 091, PPGEB				
Data:	sete de março de dois mil e vinte e três	Hora de início:	13 horas	Hora de encerramento:	14:24
Matrícula do Discente:	1211EBI004				
Nome do Discente:	Cássia Eugênia Barros				
Título do Trabalho:	Avaliação de um novo Sistema de Dosimetria por Luminescência Opticamente Estimulada				
Área de concentração:	Engenharia Biomédica				
Linha de pesquisa:	Sistemas Computacionais e Dispositivos Aplicados à Saúde				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Dosimetria em tempo real de procedimentos de Radiologia Intervencionista empregando os Métodos de Monte Carlo e Machine Learning				

Reuniu-se via plataforma Google Meet (<https://meet.google.com/bbj-wpxm-cof>), da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, assim composta: Professores Doutores: Divanizia do Nascimento Souza - UFS; Linda Viola Ehlin Caldas - IPEN; Lucio Pereira Neves - PPGEB/UFU orientador da candidata.

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

A seguir o senhor 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):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

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 07/03/2023, às 14:25, 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 **Divanizia do Nascimento Souza, Usuário Externo**, em 07/03/2023, às 14:25, 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 **Linda Viola Ehlin Caldas, Usuário Externo**, em 07/03/2023, às 14:37, 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 **4315429** e o código CRC **5972A05A**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Paulo e Edileuza, que sempre me apoiaram e me incentivaram.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Lucio Pereira Neves, pelo apoio, pela confiança e por todo ensinamento compartilhado.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado que permitiu a minha dedicação exclusiva a esse trabalho de pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia pela autorização de uso dos laboratórios necessários para a pesquisa.

Agradeço aos profissionais dos Hospitais do Câncer e das Clínicas de Uberlândia por toda cooperação com este trabalho.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pela doação da leitora *LumiDeteck 3000* e fornecimento dos dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

Agradeço à *Sapra Landauer* pela cooperação com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$.

Agradeço à MRA- Indústria de equipamentos eletrônicos, juntamente com a Metrobrás – Metrologia das Radiações Ionizantes Ltda pelo fornecimento dos dosímetros de BeO , pelo apoio e cooperação com essa pesquisa.

Agradeço à Professora Dra. Ana Paula Perini e à Professora Dra. Amanda Bravim, pela amizade e disponibilidade durante a realização desse trabalho.

Agradeço ao meu namorado, Rafael, por todo apoio e ajuda nessa caminhada. Sem seu companheirismo eu não teria chegado até aqui.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estabelecimento de um sistema dosimétrico composto de uma leitora de luminescência opticamente estimulada - desenvolvida no Brasil e chamada *LumiDeteck 3000* - com dosímetros de 3 materiais diferentes - BeO, CaSO₄:Dy e Al₂O₃:C. Os dosímetros foram divididos em grupos irradiados com um acelerador linear para doses da ordem de alguns Gy e um tubo de Raios-X para doses da ordem de mGy. A curva de luminescência foi gerada pela leitora para cada dosímetro, a partir da qual a integral de luminescência -- esperada ser proporcional à dose -- foi calculada. A leitura de alguns grupos de dosímetros foi comparada com leituras realizadas em uma leitora comercial *Lexsyg Smart*. Ensaio foram feitos para avaliar a dependência do resultado das leituras em função da temperatura interna da leitora. A relação linear entre integral de luminescência e dose irradiada esperada de leitoras LOE foi observada, entretanto, os resultados mostraram que as curvas LOE para doses abaixo de 0,5 Gy apresentam nível de ruído suficiente para prejudicar a confiabilidade da leitura, o que não acontece com a leitora comercial utilizada para comparação. A relação linear entre a integral de luminescência e a dose absorvida esperada de leitoras LOE foi observada. Os resultados mostraram que as curvas LOE para doses abaixo de 0,5 Gy apresentam nível de ruído suficiente para prejudicar a confiabilidade da leitura, o que não acontece com a luminescência lida na *Lexsyg Smart*. As medidas feitas em função da temperatura apontam que o ruído diminui significativamente com a diminuição da temperatura, indicando que um sistema de resfriamento possivelmente possibilite a leitura confiável de doses na ordem de mGy. Mais testes devem ser realizados e uma sala com melhor sistema de refrigeração deve ser empregada.

PALAVRAS-CHAVE: Proteção Radiológica, Dosimetria, Luminescência Opticamente Estimada, LOE, Leitora LOE, LumiDeteck 3000.

ABSTRACT

This work aims to establish a dosimetric system composed of an optically stimulated luminescence reader - developed in Brazil and called LumiDeteck 3000 - with dosimeters of 3 different materials- BeO, CaSO₄:Dy, and Al₂O₃:C. The dosimeters were separated into groups irradiated with a linear accelerator for doses of a few Gy and an X-Ray tube for Doses of a few mGy. The luminescence curve was generated by the reader for each dosimeter, from which the luminescence integral - expected to be proportional to the dose - was calculated. The reading of some groups of dosimeters was compared with readings taken on a commercial reader, the Lexsyg Smart reader. Tests were carried out to evaluate the dependence of the result of the readings on temperature. The linear relationship between the luminescence integral and the expected irradiated dose of LOE readers was observed, however, the results showed that the LOE curves for doses below 0.5 Gy present a noise level sufficient to impair the reliability of the reading, which does not happen with the Lexsyg Smart. Measurements made as a function of temperature indicate that noise decreases significantly with temperature, showing that a cooling system possibly enables reliable reading of doses of mGy. More tests should be carried out, and a room with a better cooling system should be used.

KEYWORDS: Radiological Protection, Dosimetry, Optically Stimulated Luminescence, OSL, OSLReader, LumiDeteck 3000.

LISTA DE ABREVIACÕES

Al₂O₃:C – Óxido de Alumínio dopado com Carbono

BeO – Óxido de Berílio

CaSO₄:Dy – Sulfato de Cálcio dopado com Disprósio

⁶⁰Co – Cobalto-60

IOE – Indivíduo Ocupacionalmente Exposto

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

LOE – Luminescência Opticamente Estimulada

LOE-OC – LOE por Onda Contínua

LOE-ML – LOE por Modulação Linear

LOEP – LOE por Estimulação Pulsada

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de curva de decaimento de LOE usando luz verde para estimulação em sedimentos de quartzo (modo de estimulação LOE-OC).	13
Figura 2. Comparação entre as curvas LOE-OC e LOE-ML.	14
Figura 3. Leitora LOE <i>LumiDeteck 3000</i>	16
Figura 4. Esquema simplificado de uma leitora LOE.....	17
Figura 5. Dosímetros de $Al_2O_3:C$ utilizados neste trabalho.	18
Figura 6. Disposição dos dosímetros para irradiação no sistema de Radioterapia.	19
Figura 7. a) disposição dos dosímetros para irradiação no sistema de radiodiagnóstico. b) Dosímetros de BeO utilizadas nesse trabalho.	20
Figura 8. Curva de emissão LOE (1 kGy, ^{60}Co).....	21
Figura 9. Intensidade de sinal OSL do $CaSO_4:Dy$ irradiado com dose de 30 Gy.	22
Figura 10. a) Dosímetros de $CaSO_4:Dy$ utilizadas nesse trabalho. b) Forno utilizado para tratamento térmico dos dosímetros de $CaSO_4:Dy$	22
Figura 11 Resposta da leitora <i>LumiDeteck 3000</i> em função da variação da temperatura interna da leitora.	23
Figura 12 Medidas feitas com o LED de estimulação da leitora <i>LumiDeteck 3000</i> desligado.....	24
Figura 13 Medidas realizadas em uma mesma temperatura.	24
Figura 14 Emissão LOE do dosímetro de $Al_2O_3:C$ para as doses obtidas no setor de radiodiagnóstico utilizando a leitora <i>LumiDeteck 3000</i>	26
Figura 15 Emissão LOE do dosímetro de $Al_2O_3:C$ para as doses obtidas no setor radioterapia utilizando a leitora <i>LumiDeteck 3000</i>	27

Figura 16 Curva Dose-Resposta para as doses do radiodiagnóstico com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ utilizando a leitora LumiDeteck 3000.	28
Figura 17. Curva Dose-Resposta para as doses da radioterapia com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ utilizando a leitora LumiDeteck 3000.	28
Figura 18 Emissão LOE do dosímetro de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ da leitora LexsygSmart para as doses da radioterapia.	30
Figura 19 Curva Dose-Resposta para as doses da radioterapia com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ utilizando a leitora Lexsyg Smart.	31
Figura 20 Emissão LOE do BeO para doses acima de 3 Gy para a LumiDeteck 3000.	32
Figura 21. Curvas de decaimento LOE do dosímetro de BeO para doses de radiodiagnóstico utilizando leitora <i>LumiDeteck3000</i>	33
Figura 22. Curvas de decaimento LOE do dosímetro de BeO para doses de radioterapia utilizando leitora LumiDeteck 3000.	34
Figura 23 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de BeO com as doses do radiodiagnóstico utilizando a Leitora LumiDeteck 3000.	35
Figura 24 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de BeO com as doses da radioterapia utilizando a Leitora LumiDeteck 3000.	35
Figura 25. Curvas de decaimento LOE do dosímetro de BeO para doses de radioterapia utilizando leitora Lexsyg Smart.	37
Figura 26 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de BeO com as doses da radioterapia utilizando a leitora Lexsyg Smart.	38
Figura 27 Curvas de decaimento LOE do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para as doses de radiodiagnóstico utilizando leitora LumiDeteck 3000.	39

Figura 28 Curvas de decaimento LOE do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para as doses de radioterapia utilizando a leitora LumiDeteck 3000.	40
Figura 29 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ com as doses do radiodiagnóstico utilizando a Leitora LumiDeteck 3000.	41
Figura 30 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ com as doses da radioterapia utilizando a Leitora LumiDeteck 3000.....	41
Figura 31 Curvas de decaimento LOE do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para as doses de radioterapia utilizando leitora LexsygSmart.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Doses utilizadas para irradiar os dosímetros no sistema de Radioterapia. ...	19
Tabela 2. Parâmetros de irradiação no sistema de radiodiagnóstico.	20
Tabela 3. Reprodutibilidade de resposta do $Al_2O_3:C$ utilizando o Sistema LumiDeteck 3000.	29
Tabela 4 Reprodutibilidade de resposta para medições feitas com o $Al_2O_3:C$ utilizando a Lexsyg Smart.	31
Tabela 5. Reprodutibilidade de resposta para medidas feitas com o BeO utilizando a LumiDeteck 3000.	36
Tabela 6 Reprodutibilidade de resposta para medições feitas com o BeO utilizando a Lexsyg Smart.	38

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	DOSE ABSORVIDA	16
3.2	REPRODUTIBILIDADE DE RESPOSTA.....	17
3.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO LOE	17
3.4	DOSÍMETRO DE $Al_2O_3:C$	18
3.5	DOSÍMETRO DE BEO.....	20
3.6	DOSÍMETRO DE $CaSO_4:Dy$	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1	TESTES INICIAIS	23
4.2	$Al_2O_3:C$	25
4.3	DOSÍMETRO DE BEO.....	32
4.4	DOSÍMETRO DE $CaSO_4:Dy$	39
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A radiação ionizante está presente em diversas áreas da medicina e pode ser considerada essencial para a prática médica (REED, 2011). Esse tipo de radiação foi extensamente utilizado no início de sua descoberta quando seus efeitos colaterais eram pouco ou nada conhecidos. Nessa época não se tinha ideia dos prejuízos que a radiação poderia trazer para saúde, até que Pierre Curie fez os primeiros relatos de complicações resultantes do uso indevido da radiação (CORDEIRO; PEDUZZI, 2011). Com a descoberta das graves consequências do uso indevido da radiação ionizante, surgiu a dosimetria. Conforme TAUHATA (2013), dosimetria das radiações ionizantes são medições criteriosas relacionadas às grandezas radiológicas para proteção de indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) e pacientes sujeitos às práticas médicas que envolvam o uso da radiação ionizante (TAUHATA *et al.*, 2013).

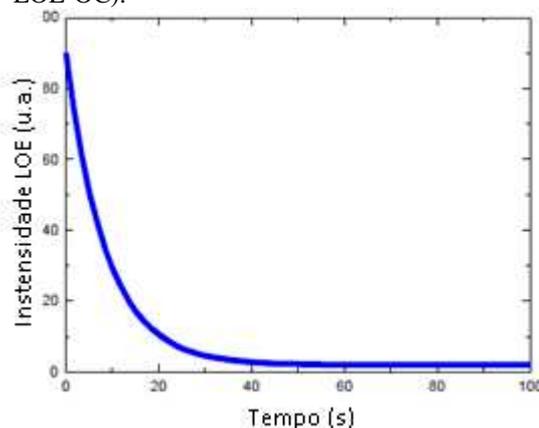
O objetivo da dosimetria é e sempre foi garantir que os malefícios do uso da radiação ionizante não sejam maiores que os benefícios, objetivo esse que não pode ser alcançado sem a utilização de detectores de radiação. Tais detectores são classificados quanto ao princípio físico de funcionamento em: detectores cintiladores, detectores de estado sólido e câmaras de ionização a gás. Cada um desses 3 tipos é mais ou menos adequado para determinada situação (MILBRATH *et al.*, 2008). Devido à alta confiabilidade, ao rendimento elevado e ao baixo custo, materiais luminescentes são os mais empregados na dosimetria com detectores de estado sólido (SOUZA *et al.*, 2014). Os detectores de estado sólido podem ser classificados em 2 tipos: termoluminescentes e luminescência opticamente estimulada. O que diferencia um detector de outro é a maneira como é realizada a leitura (ALGARVE, 2017). Neste trabalho foram utilizados detectores de luminescência opticamente estimulados.

Luminescência opticamente estimulada (LOE) é a propriedade de um material isolante ou semicondutor de emitir luz na presença de outro sinal luminoso, se previamente exposto à radiação ionizante. LOE é também o nome dado à técnica dosimétrica que utiliza materiais com essa propriedade para dosimetria de radiações ionizantes (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003; GUIDELLI, 2015).

A dosimetria LOE tornou-se popular e é uma das principais técnicas dosimétricas utilizadas em física médica, datação em geologia e arqueologia, dosimetria espacial e dosimetria individual externa (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003; NASCIMENTO, 2007). Nessa técnica uma amostra LOE previamente irradiada é exposta a uma fonte de luz com características

(comprimento de onda e intensidade) apropriadas (previamente estudadas e determinadas) e sua luminescência avaliada durante o tempo de exposição. A luminescência em função do tempo é chamada de emissão LOE (Figura 1) e a integral dessa curva pode ser correlacionada à dose total absorvida pelo dosímetro; essa correlação pode ser representada pela curva dose-resposta. O sistema que realiza a estimulação do sinal luminescente da amostra e leitura desse sinal é chamado de leitora LOE. As primeiras medições utilizando essa técnica foram feitas em quartzo e feldspato utilizando-se laser de argônio (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003). Após a descoberta da possibilidade de utilização de opções com menor custo financeiro, a exemplo de diodos emissores de luz (LED), houve uma expansão na utilização da técnica (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003).

Figura 1. Exemplo de curva de decaimento de LOE usando luz verde para estimulação em sedimentos de quartzo (modo de estimulação LOE-OC).



Fonte: Adaptada de (BRAVIM, 2015)

A técnica LOE é versátil em relação aos modos de leitura. Os principais tipos de estimulação que as leitoras LOE trabalham são: (a) onda contínua (LOE-OC), (b) modulação linear (LOE-ML) e (c) estimulação pulsada (LOEP) (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003; YUKIHARA, MCKEEVER., 2011).

(a) Onda contínua (LOE-OC)

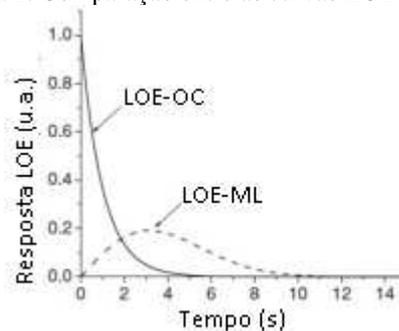
Esse é o modo de estimulação mais simples e consiste em estimular a amostra com luz de intensidade constante. A discriminação entre a emissão LOE e a luz de estimulação ($\lambda_{LOE} \neq \lambda_{ESTIM}$) é feita por filtros ópticos. Devido à sua simplicidade, esse é o modo de estimulação mais utilizado. A integral total da curva LOE não é afetada

quando se muda a intensidade de estimulação. Dependendo da intensidade e do tempo da estimulação, boa parte da informação contida na amostra é preservada e a amostra pode ser avaliada novamente (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003; FREITAS, 2017; YUKIHARA, McKEEVER, 2011). A Figura 1 mostra uma emissão LOE característica da estimulação por OC.

(b) Modulação linear (LOE-ML)

Neste modo a intensidade da luz de estimulação aumenta linearmente com o tempo. A Figura 2 mostra uma comparação entre a estimulação de onda contínua e a estimulação por modulação linear (YUKIHARA, McKEEVER, 2011).

Figura 2. Comparação entre as curvas LOE-OC e LOE-ML.



Fonte: Adaptada de (YUKIHARA, McKEEVER., 2011)

(c) Estimulação Pulsada (LOEP)

Pulsos de luz com intensidade constante são aplicados à amostra, separados por períodos de intensidade zero. A luminescência é detectada apenas nos intervalos de excitação do material (SILVA, 2017).

A variedade de modos de leitura LOE é uma das vantagens que ela apresenta em relação às outras técnicas de dosimetria. Outra vantagem da dosimetria LOE é a possibilidade de releitura com perda do sinal menor que 3% (YUKIHARA, McKEEVER, 2011). A principal desvantagem é que não foi encontrado qualquer material LOE que consiga detectar nêutrons (McKEEVER; MOSCOVITCH, 2003).

2 OBJETIVOS

O objetivo do projeto é a avaliação do desempenho de uma nova leitora de luminescência opticamente estimulada (LOE), *LumiDeteck 3000*, utilizando dosímetros de BeO, CaSO₄:Dy e Al₂O₃:C.

2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a luminescência opticamente estimulada de três tipos de dosímetros, irradiados com diversas doses bem conhecidas, com a nova leitora;
- Calcular as integrais de luminescência para cada medição e verificar a faixa de linearidade da curva Dose-Resposta;
- Determinar as curvas que correlacionam os valores da integral de luminescência com as doses, em Gy, na faixa linear;
- Calcular a reprodutibilidade das medições;
- Realizar medições com os mesmos dosímetros utilizando uma leitora comercial para comparação com a leitora estudada;
- Analisar os dados obtidos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma leitora LOE desenvolvida no Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, e doada à Universidade Federal de Uberlândia pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Foram utilizados Dosímetros de Óxido de Berílio (BeO), doados pela MRA- Indústria de Equipamentos Eletrônicos, Sulfato de Cálcio dopado com disprósio (CaSO₄:Dy), doados pelo IPEN e Óxido de Alumínio dopado com Carbono (Al₂O₃:C), doados pela Sagra Landauer.

Os dosímetros tiveram a resposta residual apagada no Laboratório de Instrumentação e Dosimetria (LInda) da Universidade Federal de Uberlândia. Após limpas, os dosímetros foram embrulhados em papel alumínio a fim de evitar qualquer influência ambiental nas respostas. Depois foram levadas para irradiação no Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Uberlândia e no Hospital do Câncer da Universidade Federal de Uberlândia e levadas para realização das medições do sinal LOE. Para as doses da Radioterapia, foram feitas leituras na

leitadora comercial *Lexsyg Smart* – da *Freiberg Instruments* – de propriedade da MRA- Indústria de equipamentos eletrônicos, a fim de comparar os resultados obtidos com as duas leitoras.

A *LumiDeteck 3000* realiza a leitura no modo de onda contínua e a estimulação é feita por LEDs azuis. Na Figura 3 está a imagem da leitora, a qual fica em uma sala equipada com luz vermelha e ar-condicionado.

Os dados das leituras foram analisados e traçados com “scripts” python, utilizando-se os módulos *scipy*, *pandas*, *numpy* e *matplotlib*. Nessa etapa as curvas de decaimento, as curvas dose-resposta e as integrais de luminescência foram geradas. Com essas informações, foram comparadas as respostas da leitora *LumiDeteck 3000* com as doses às quais os dosímetros foram expostos com as respostas da leitora *Lexsyg Smart*.

Antes de realizar as medidas com os dosímetros, testes iniciais foram feitos a fim de se conhecer o comportamento da leitora em função da variação da temperatura interna dela, a resposta quando não tem pastilha na leitora (BG) e a reprodutibilidade dessa resposta.

Figura 3. Leitora LOE *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2022)

3.1 Dose absorvida

Dose absorvida é a energia média depositada ($d\bar{E}$) por massa do material irradiado (dm). Pode ser descrita pela Equação (1) ((TAUHATA *et al.*, 2013):

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}; [Gy] \quad (1)$$

3.2 Reprodutibilidade de Resposta

A reprodutibilidade de um experimento expressa a sua precisão. Na dosimetria de radiações ionizantes, a reprodutibilidade de resposta pode ser calculada pela Equação (2) (BRAVIM, CAMPOS, 2012):

$$\text{Reprodutibilidade (\%)} = \left(1 - \frac{\sigma}{\sqrt{n} \cdot \bar{R}}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

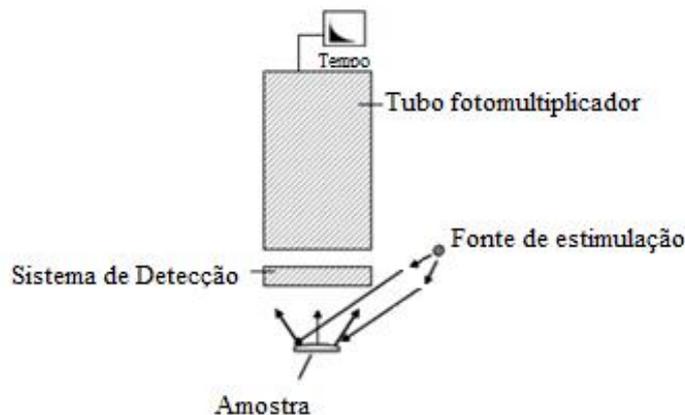
Onde σ é o desvio padrão dos valores das integrais de luminescência de determinada dose (grupo de dosímetros), n a quantidade de dosímetros do grupo e \bar{R} é a média das integrais de luminescência do grupo.

Quanto maior a reprodutibilidade, mais próximos os resultados estão entre si. Para ser considerada uma boa reprodutibilidade, o valor obtido com a equação (2) deve ser superior a 95%.

3.3 Sistema de Medição LOE

A leitora de luminescência opticamente estimulada é composta por uma fonte de estimulação óptica, um detector de luz e um filtro óptico. A fonte estimula o dosímetro e sua emissão LOE é captada pelo sistema de detecção e amplificada pelo sistema fotomultiplicador. A leitora fornece a resposta luminescente do dosímetro em função do tempo de estimulação, gerando uma curva da emissão LOE. A dose absorvida pode ser obtida a partir da integral dessa curva (NASCIMENTO, 2007). A Figura 4 mostra um esquema de uma leitora LOE.

Figura 4. Esquema simplificado de uma leitora LOE.



Fonte: Adaptada de (GRONCHI, 2009).

3.4 Dosímetro de Al₂O₃:C

O óxido de alumínio tem apresentado bons resultados como dosímetro LOE, pois possuem alta sensibilidade e leitura rápida. A dopagem com carbono aumenta sua sensibilidade à radiação e conseqüentemente a sua emissão LOE. Atualmente o Al₂O₃:C é utilizado em forma de monocristais que são estáveis e não são afetados pela umidade. Esses monocristais têm a vantagem de poder ser utilizados por um período indeterminado, pois podem ser recozidos para restaurar sua sensibilidade luminescente. Para apagar o sinal LOE presente no dosímetro, recomenda-se aquecer o cristal a 900°C por 15 min após cada uso. Os sinais LOE também podem ser apagados utilizando luz, porém deve-se tomar cuidado, pois a luz utilizada para “limpeza” dos dosímetros deve ter espectro semelhante ao da luz utilizada para leitura. Por serem muito sensíveis, alguns cuidados devem ser tomados, como evitar iluminação com comprimento de onda baixo ($\lambda < 450$ nm), pois esse comprimento de onda pode gerar um sinal LOE no dosímetro durante sua leitura (BØTTER-JENSEN *et al.*, 2003; YUKIHARA, McKEEVER, 2011). Depois de preparados, os dosímetros devem ser armazenados e protegidos da luz para evitar indução de qualquer sinal LOE ((YUKIHARA, McKEEVER, 2011).

No presente trabalho, os dosímetros de Al₂O₃:C foram adquiridas da empresa Sagra Landauer, já calibradas. Para zerar o sinal LOE utilizou-se uma lâmpada composta por 6 LEDs azuis com potência de 10W durante 45 min. Essa metodologia para limpeza da resposta dos dosímetros mostrou-se eficaz para os objetivos do trabalho (PEREIRA *et al.*, 2022). A Figura 5 a seguir mostra a pastilha utilizada nesse trabalho.

Figura 5. Dosímetros de Al₂O₃:C utilizados neste trabalho.



Fonte: O autor (2022)

Os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ foram separadas em 8 grupos de 5 dosímetros e irradiadas em um serviço de radioterapia com as doses descritas na Tabela 1 utilizando um acelerador linear Varian Clinac 6000c. Os parâmetros utilizados foram uma distância fonte-superfície (SSD, *source-skin distance*) de 100 cm, um campo de $30 \times 30 \text{ cm}^2$ e taxa de dose de 400 cGy/min . A Figura 6 mostra a disposição dos dosímetros para irradiação.

Tabela 1. Doses utilizadas para irradiar os dosímetros no sistema de Radioterapia.

Grupo de Dosímetros	Doses (Gy)
A	0,1
B	0,3
C	0,5
D	0,7
E	1
F	3
G	5
H	10

Fonte: O autor (2022)

Figura 6. Disposição dos dosímetros para irradiação no sistema de Radioterapia.



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

Também foram feitas irradiações em um equipamento de raios X convencional, utilizado no Setor de Radiodiagnóstico do Hospital das Clínicas da Universidade Federal de Uberlândia. Para conhecer a dose com que os dosímetros foram expostos, utilizou-se o detector RED PIRANHA[®] (RTI, 2014). Foram feitas várias exposições com uma mesma configuração, anotando-se as doses obtidas com o detector RED PIRANHA[®] e, por fim, fez-se a soma das doses para determinar a dose total que os dosímetros receberam. As doses utilizadas estão

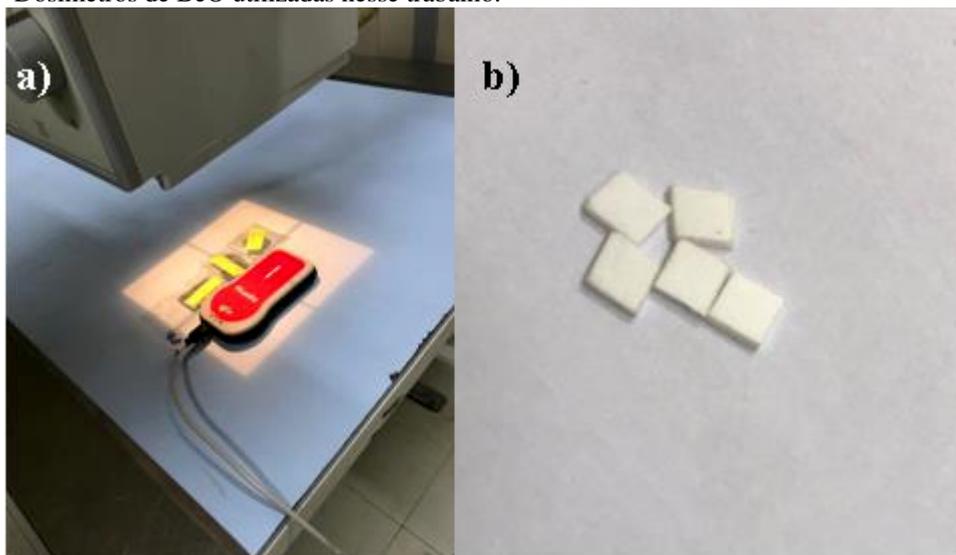
dispostas na Tabela 2 e a disposição dos dosímetros na irradiação, na Figura 7. Utilizou-se uma corrente fixa de 200 mA, uma distância foco-superfície de 50 cm e um campo de irradiação de 20x20 cm².

Tabela 2. Parâmetros de irradiação no sistema de radiodiagnóstico.

Grupo de dosímetros	Tensão (kV)	Produto corrente-tempo (mA.s)	Número de exposições	Dose Final (mGy)
I	50	40	7	24
J	60	40	6	31
K	70	32	7	38
L	80	20	10	46
M	90	20	9	60
N	100	20	9	71
O	110	20	8	88
P	120	20	7	91

Fonte: o autor (2022)

Figura 7. a) disposição dos dosímetros para irradiação no sistema de radiodiagnóstico. b) Dosímetros de BeO utilizadas nesse trabalho.



Fonte: O autor (2022)

Neste trabalho, as irradiações no sistema de radioterapia, com o LINAC, e no sistema de radiodiagnóstico, com um tubo de Raios-X convencional, foram padronizadas, conforme descrito anteriormente, para todas os dosímetros utilizados.

3.5 Dosímetro de BeO

O óxido de berílio é um material quase equivalente ao tecido humano, por conta de seu baixo número atômico ($Z_{\text{eff}} = 7,2$), e possui uma sensibilidade LOE comparável à do $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

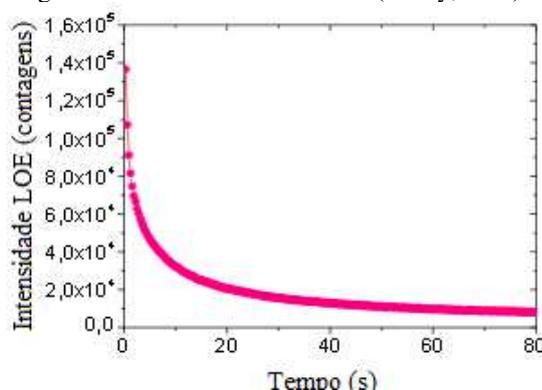
(YUKIHARA, McKEEVER, 2011). SOMMER e HENNIGER (2006) mostraram que doses da ordem de μGy podem ser detectadas por esse material. A curva dose-resposta do BeO é linear de $5\mu\text{Gy}$ até 5Gy . Sabe-se que o sinal do BeO desvanece cerca de 5% na primeira hora após ter sido irradiado, depois disso torna-se relativamente estável (YUKIHARA, McKEEVER, 2011). Em princípio, a exposição à luz de espectro semelhante ao usado para leitura LOE é suficiente para “limpar” a emissão LOE presente nos detectores de BeO. Assim como os detectores de óxido de alumínio, os detectores de BeO devem ser armazenados protegidos da luz para evitar qualquer indução de sinal LOE (FREITAS, 2017).

Os dosímetros de BeO utilizadas nesse trabalho foram fonte de uma cooperação da empresa MRA- Equipamentos e Serviços para Radioproteção. Para “limpar” a resposta dos dosímetros de BeO, utilizou-se o mesmo método para “zerar” a resposta dos dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$.

3.6 Dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$

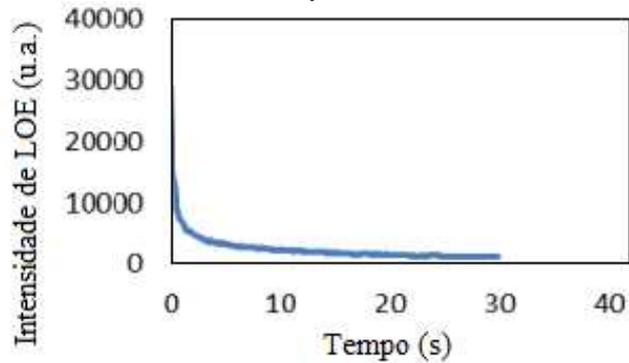
O $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ é um tipo de dosímetro empregado na dosimetria termoluminescente e utilizado na monitoração das radiações de fótons e partículas beta. Seu número atômico efetivo é em torno de 104% a 118% maior que o do tecido humano e sua dependência energética com a taxa de dose e temperatura de armazenamento são pequenas no intervalo de dose de radioterapia; por isso é uma boa opção para dosimetria na área médica (MATSUSHIMA, 2010). Estudos recentes vêm mostrando a possibilidade de utilização desse dosímetro na dosimetria LOE e os resultados obtidos podem ser vistos nas Figura 8 e Figura 9.

Figura 8. Curva de emissão LOE (1 kGy, ^{60}Co).



Fonte: Adaptada de (ANTONIO; CALDAS, 2020).

Figura 9. Intensidade de sinal OSL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ irradiado com dose de 30 Gy.

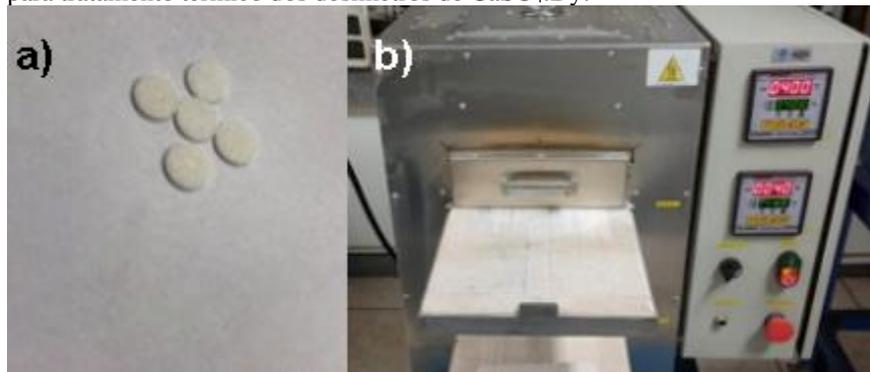


Fonte: Adaptada de (MEDEIROS; ALENCAR, 2013).

Estudos mostraram que na dosimetria LOE os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ tiveram uma resposta linear para doses entre 0,4 Gy e 1 Gy (MEDEIROS; ALENCAR, 2013). O tratamento mais apropriado para esse dosímetro é térmico: 300°C por 30 min. (SILVA *et al.*, 2008).

As patilhas utilizadas nesse trabalho foram uma cooperação com Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN), Figura 10a mostra os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizadas. Utilizou-se o tratamento térmico recomendado, 300°C por 30 min utilizando um forno INTI com controlador FE50RPN (Figura 10 b). Os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ foram irradiadas no serviço de Radioterapia da mesma maneira que os dosímetros anteriores.

Figura 10. a) Dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizadas nesse trabalho. b) Forno utilizado para tratamento térmico dos dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.



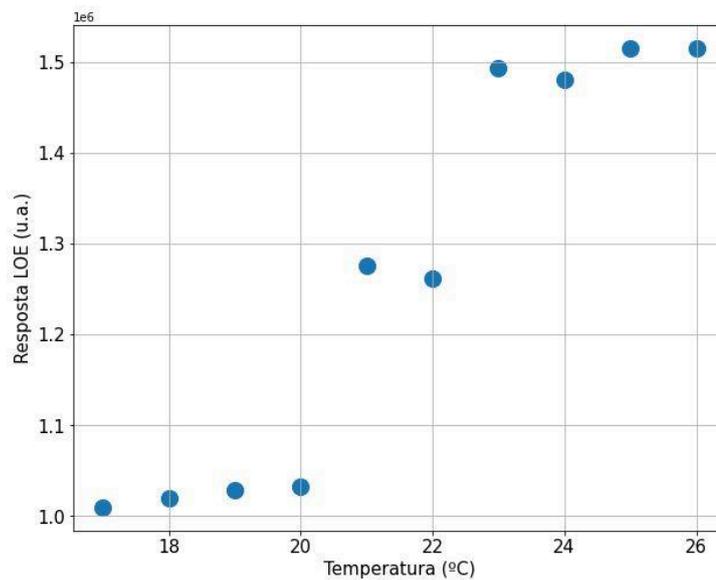
Fonte: O autor (2022)

4 Resultados e Discussão

4.1 Testes iniciais

O gráfico que mostra a variação da resposta da leitora em função da temperatura interna da leitora está apresentado na Figura 11. A menor temperatura interna da leitora que se conseguiu chegar foi de 17 °C e percebe-se que, quanto maior a temperatura, maior é o BG da leitora e que há uma pequena variação na resposta em determinados intervalos de temperatura.

Figura 11 Resposta da leitora *LumiDeteck 3000* em função da variação da temperatura interna da leitora.



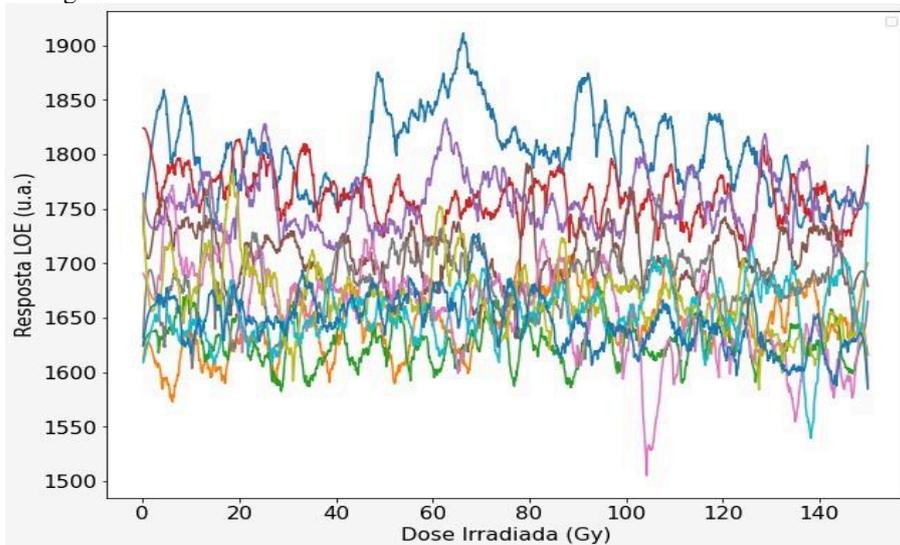
Fonte: O autor (2023)

Então, a melhor região de temperatura interna para se trabalhar, é no intervalo de 17 a 20 °C. Como a leitora não possui um sistema de refrigeração interno, foi preciso trabalhar com o ar-condicionado na menor temperatura, fazendo-se intervalos entre as medidas para que, caso a leitora aquecesse, resfriasse entre uma leitura e outra.

Notou-se a presença de um ruído significativo, que foi detectado, mesmo com uma análise qualitativa e visual nas leituras, em todas as faixas de temperatura. A primeira observação do ruído ocorreu com o LED de estimulação ligado; para descartar ou confirmar a hipótese de que o filtro óptico possuía baixa eficiência para o comprimento de onda da luz do LED de estimulação, medidas foram feitas com ele deligado. A Figura 12 ilustra o resultado dessas medições; mostra também que o ruído permaneceu, e que, portanto, a hipótese em questão foi descartada. Isso sugere a existência de uma corrente escura maior do que deveria

nos componentes eletrônicos, notavelmente na célula fotomultiplicadora. A corrente escura é aquela observada em dispositivos eletrônicos sensíveis à luz, como o tubo fotomultiplicador ou um fotodiodo, mesmo sem a presença de uma fonte luminosa; ocorre devido à geração aleatória de pares elétrons lacuna na camada de depleção do dispositivo devido à energia térmica. A corrente escura sempre existe; entretanto, espera-se que seja suficientemente menor que os sinais que se desejam medir com o equipamento (WIDENHORN *et al.*, 2002).

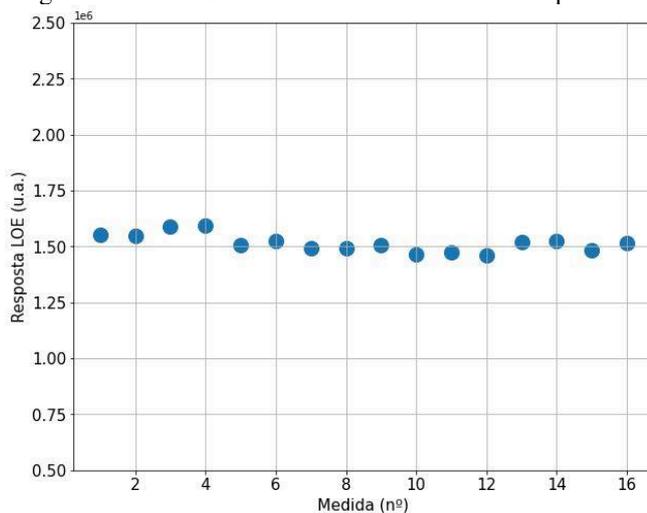
Figura 12 Medidas feitas com o LED de estimulação da leitora *LumiDeteck 3000* desligado.



Fonte: O autor (2022)

Ainda, foram realizadas 16 medições do BG da leitora para uma mesma temperatura, a fim de avaliar a reprodutibilidade do ruído, o resultado pode ser visto no gráfico da Figura 13.

Figura 13 Medidas realizadas em uma mesma temperatura.



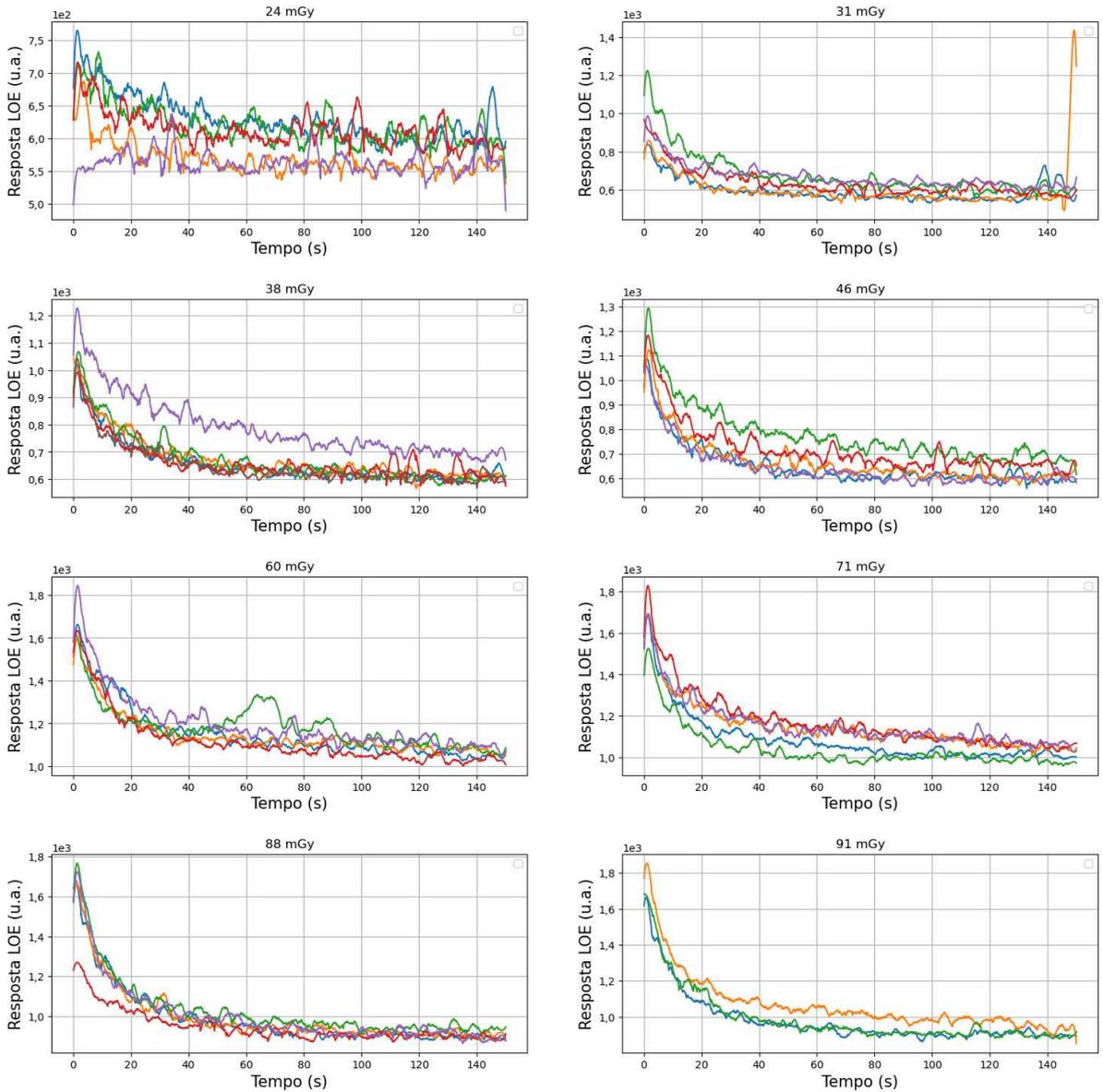
Fonte: O autor (2023)

Utilizando a Equação (2) foi possível calcular a reprodutibilidade dessas medições e obteve-se um valor de 99,33%. Apesar do ruído ser alto, sua variação é muito pequena, quando a medição foi realizada em uma mesma temperatura. Neste trabalho, todas as medições foram realizadas em 17 °C, a fim de diminuir a influência do ruído na pesquisa.

4.2 Al₂O₃:C

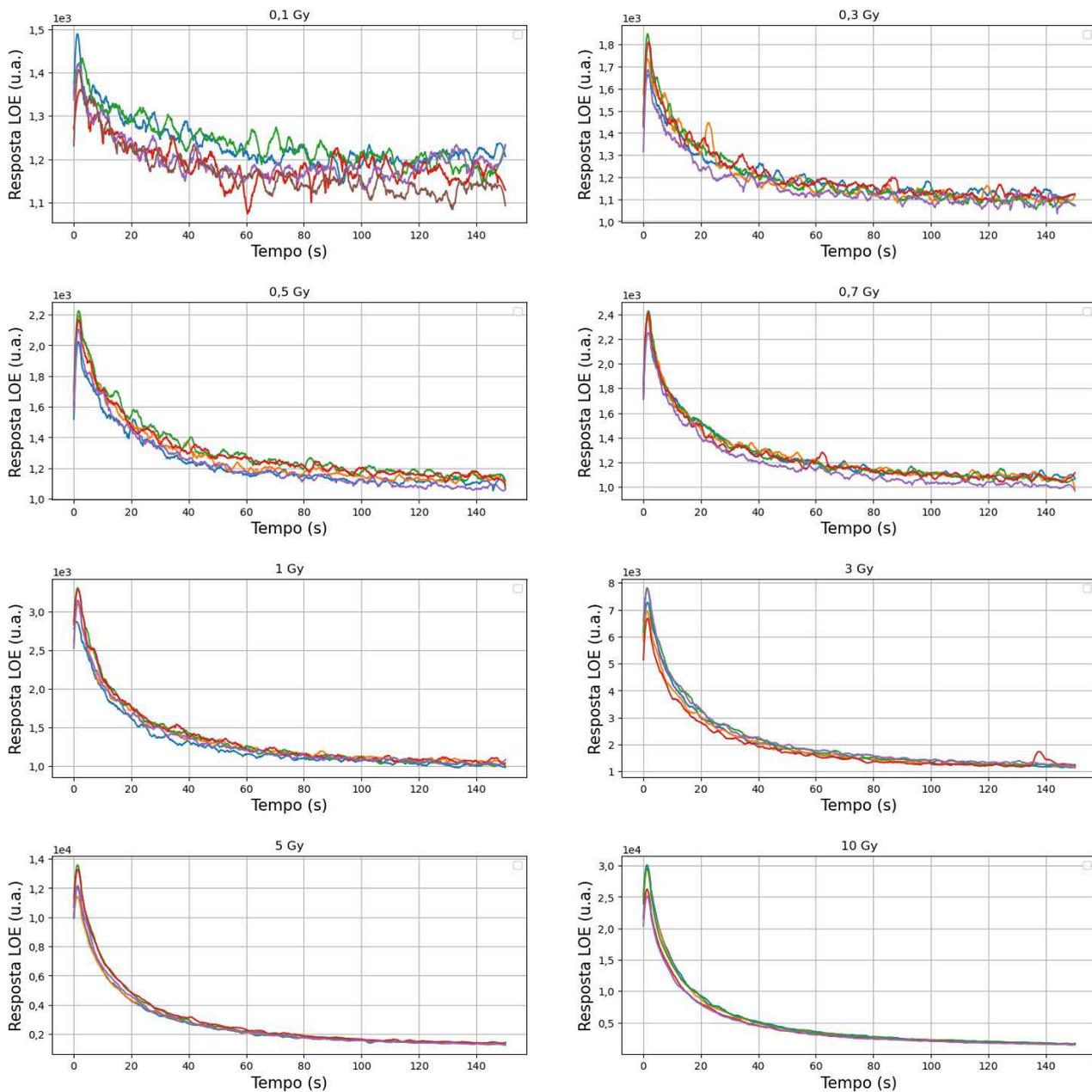
As Figuras 14 e 15 mostram as curvas obtidas para os dosímetros de Al₂O₃:C irradiadas no equipamento de raios X e no LINAC, respectivamente. Nota-se, pelas figuras, um grande ruído nas medições, principalmente para as doses mais baixas ($\leq 0,1$ Gy). Esse ruído prejudica a sensibilidade da leitora, como pode ser visto na curva para a dose de 24 mGy (Figura 14), onde a formação da curva de decaimento LOE é bem discreta.

Figura 14 Emissão LOE do dosímetro de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ para as doses obtidas no setor de radiodiagnóstico utilizando a leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

Figura 15 Emissão LOE do dosímetro de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ para as doses obtidas no setor radioterapia utilizando a leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

Além da análise das curvas de emissão LOE, foi possível analisar a curva Dose-Resposta para os dosímetros expostos ao feixe do radiodiagnóstico e da radioterapia, que estão dispostas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 Curva Dose-Resposta para as doses do radiodiagnóstico com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ utilizando a leitora *LumiDeteck 3000*.

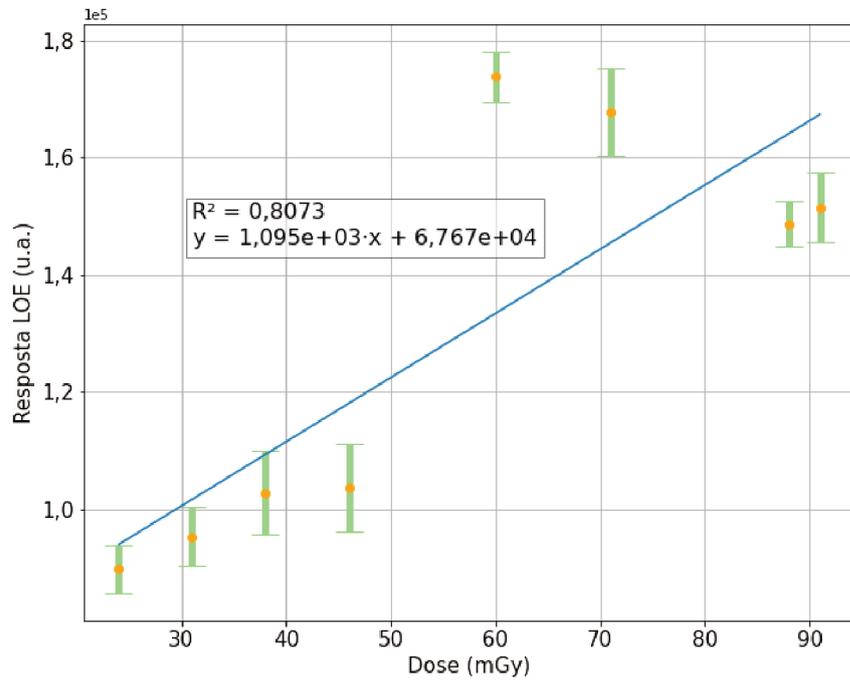
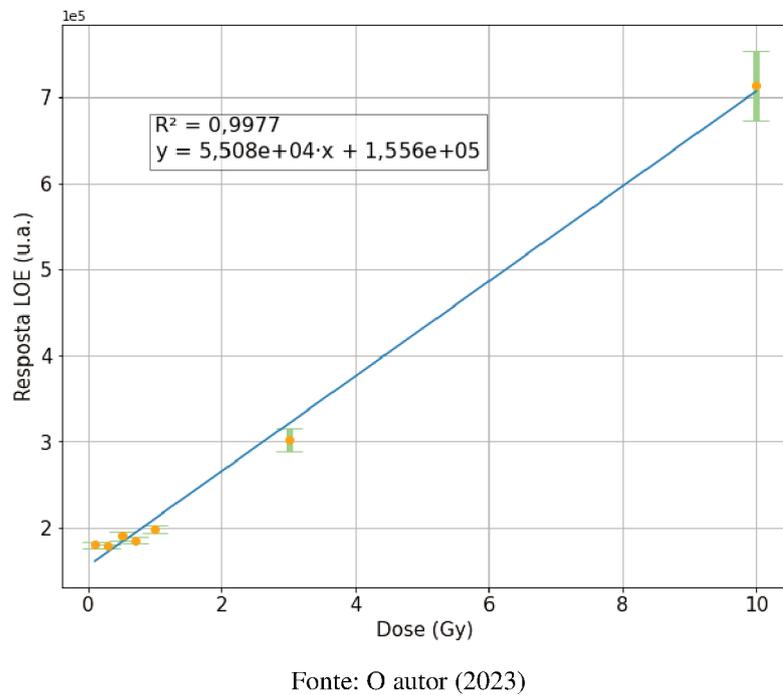


Figura 17. Curva Dose-Resposta para as doses da radioterapia com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ utilizando a leitora *LumiDeteck 3000*.



A curva da Figura 16 apresenta uma falta de linearidade na região das doses de 60 e 71 mGy, isso indica que, para o intervalo de doses avaliadas no radiodiagnóstico, o conjunto *LumiDeteck 3000* - Al₂O₃:C não é adequado. A Figura 17 mostra que o comportamento da curva Dose-Resposta é linear para o intervalo de doses irradiadas na radioterapia, mostrando que, para este intervalo de dose, o conjunto *LumiDeteck 3000* – Al₂O₃:C é promissor para uso.

Utilizando a Equação 2 calculou-se a reprodutibilidade das medições com a *LumiDeteck 3000*, cujos resultados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Reprodutibilidade de resposta do Al₂O₃:C utilizando o Sistema *LumiDeteck 3000*.

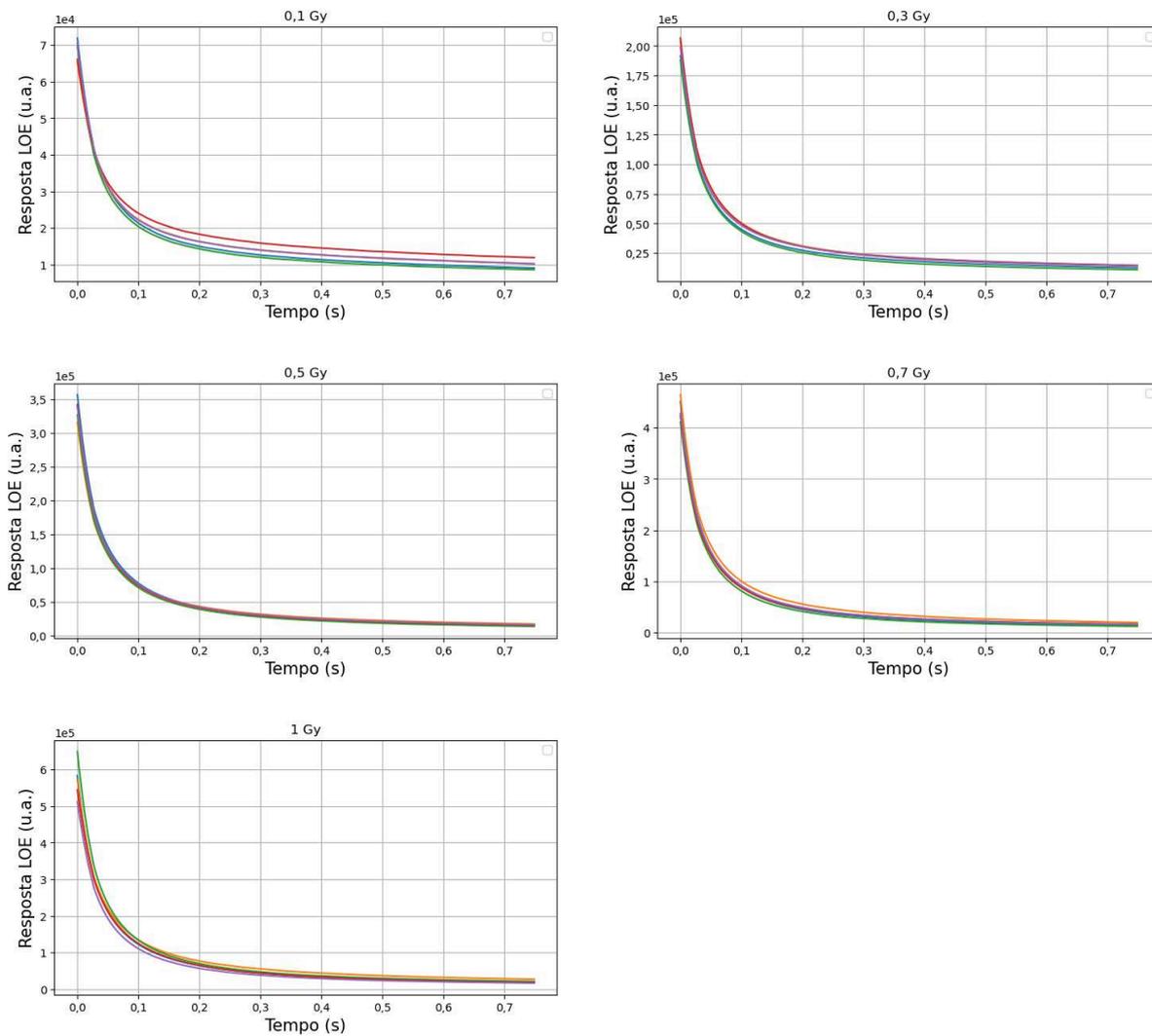
Doses Radioterapia (Gy)	Reprodutibilidade (%)	Doses Radiodiagnóstico (mGy)	Reprodutibilidade (%)
0,1	99,16	24	97,94
0,3	99,37	31	97,66
0,5	98,77	38	97,15
0,7	99,02	46	96,76
1	98,93	60	98,86
3	98,08	71	98,01
5	98,25	88	98,82
10	97,42	91	97,72

Fonte: O autor (2022)

Pela Tabela 3, a reprodutibilidade do conjunto *LumiDeteck*- Al₂O₃:C apresentou resultado satisfatório, obtendo-se, para todo o intervalo de dose utilizado, uma reprodutibilidade acima de 95%, que é o limite inferior de confiabilidade das medições estabelecido para este trabalho.

Os resultados obtidos com a leitora comercial *LexsygSmart* estão dispostos na Figura 18. A leitora comercial só conseguiu realizar as leituras até 1Gy e não apresentou o ruído apresentado na *LumiDeteck 3000*.

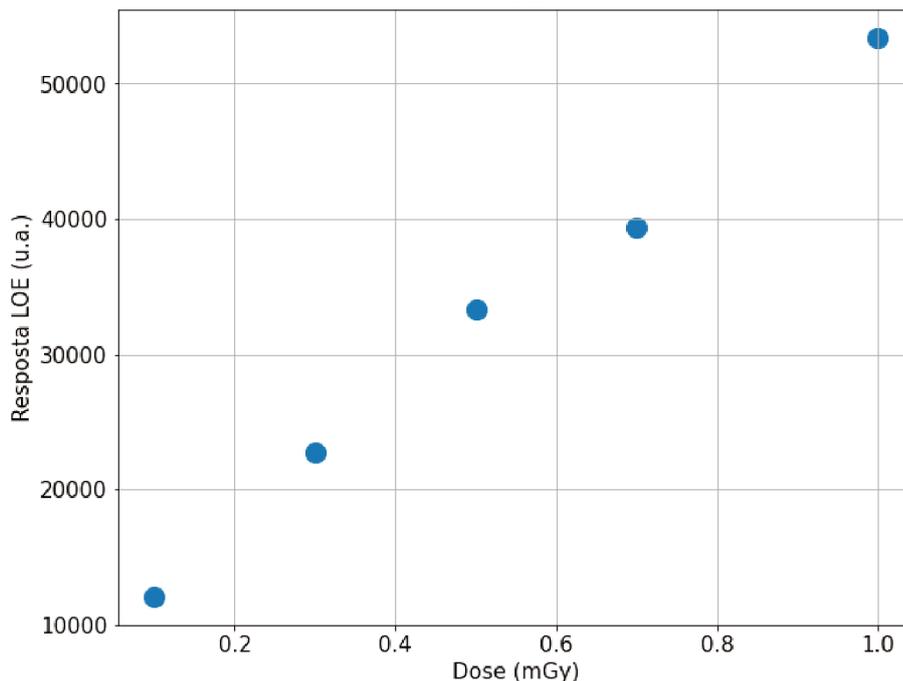
Figura 18 Emissão LOE do dosímetro de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ da leitora LexsygSmart para as doses da radioterapia.



Fonte: O autor (2023)

A curva Dose- Resposta para as doses de radioterapia e obtidas com a leitora *Lexsyg Smart* está disposta na Figura 19.

Figura 19 Curva Dose-Resposta para as doses da radioterapia com os dosímetros de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ utilizando a leitora *Lexsyg Smart*.



Fonte: O autor (2023)

O comportamento da curva Dose-Resposta para as doses lidas com a leitora *Lexsyg Smart* foi linear, assim como o resultado com as mesmas doses obtidas no sistema *LumiDeteck 3000*.

A partir da Equação (2) calculou-se a reprodutibilidade de emissão LOE para as doses obtidas com o sistema *Lexsyg Smart*; o resultado pode ser visto na Tabela 4. Mais uma vez, obteve-se resultados satisfatórios, com reprodutibilidade acima de 95% para todas as doses utilizando-se o sistema *Lexsyg Smart*.

Tabela 4 Reprodutibilidade de resposta para medições feitas com o $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ utilizando a *Lexsyg Smart*.

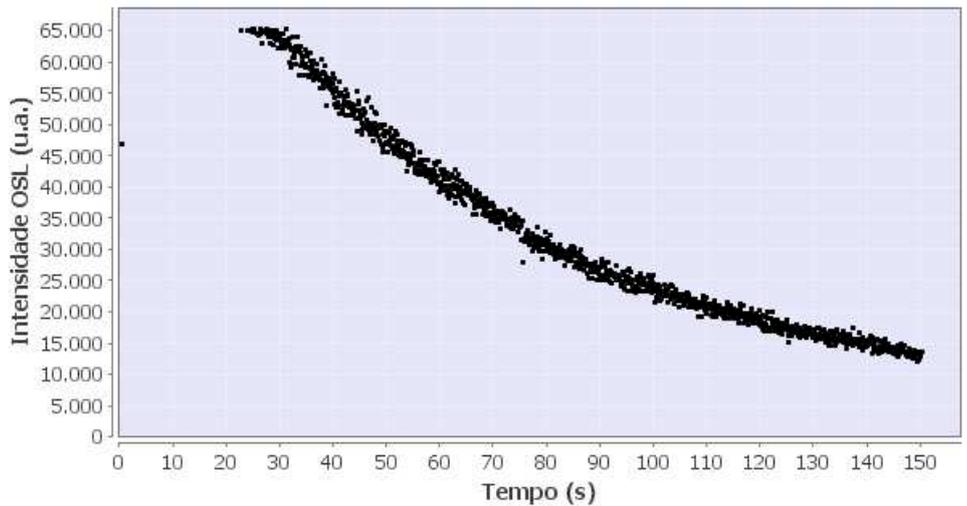
Dose (Gy)	Reprodutibilidade (%)
0,1	96,76
0,3	96,92
0,5	98,59
0,7	96,37

Fonte: O autor (2023)

4.3 Dosímetro de BeO

A alta sensibilidade de emissão LOE do BeO apresentou um ponto negativo para a pesquisa, doses altas atingiram o limite de contagens das leitoras, a *LumiDeteck 3000*, que conseguiu obter até 3Gy, e a *Lexsyg Smart*, até 0,7Gy. A Figura 20 exemplifica esse acontecimento para a leitora *LumiDeteck 3000*

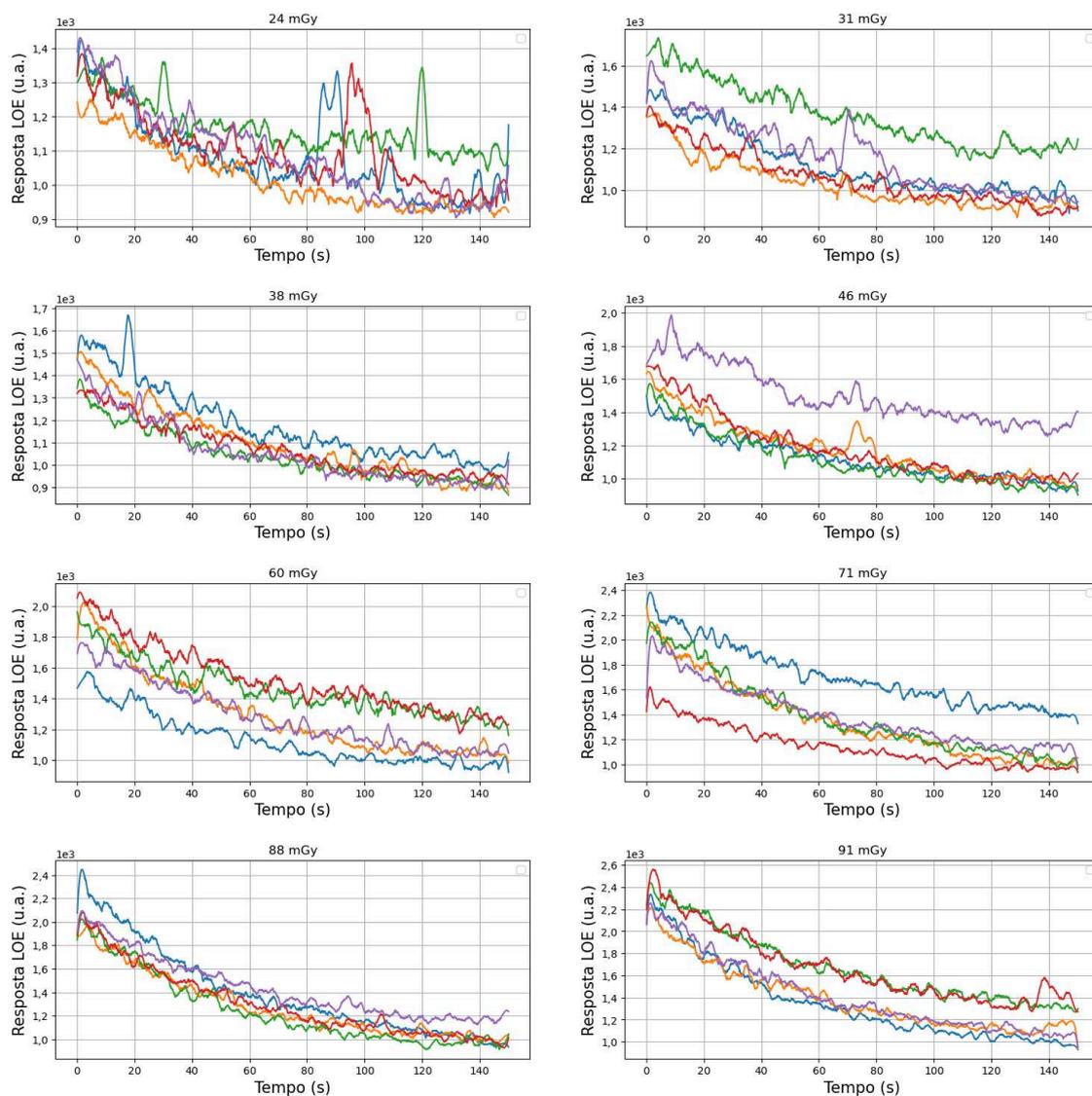
Figura 20 Emissão LOE do BeO para doses acima de 3 Gy para a *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2022)

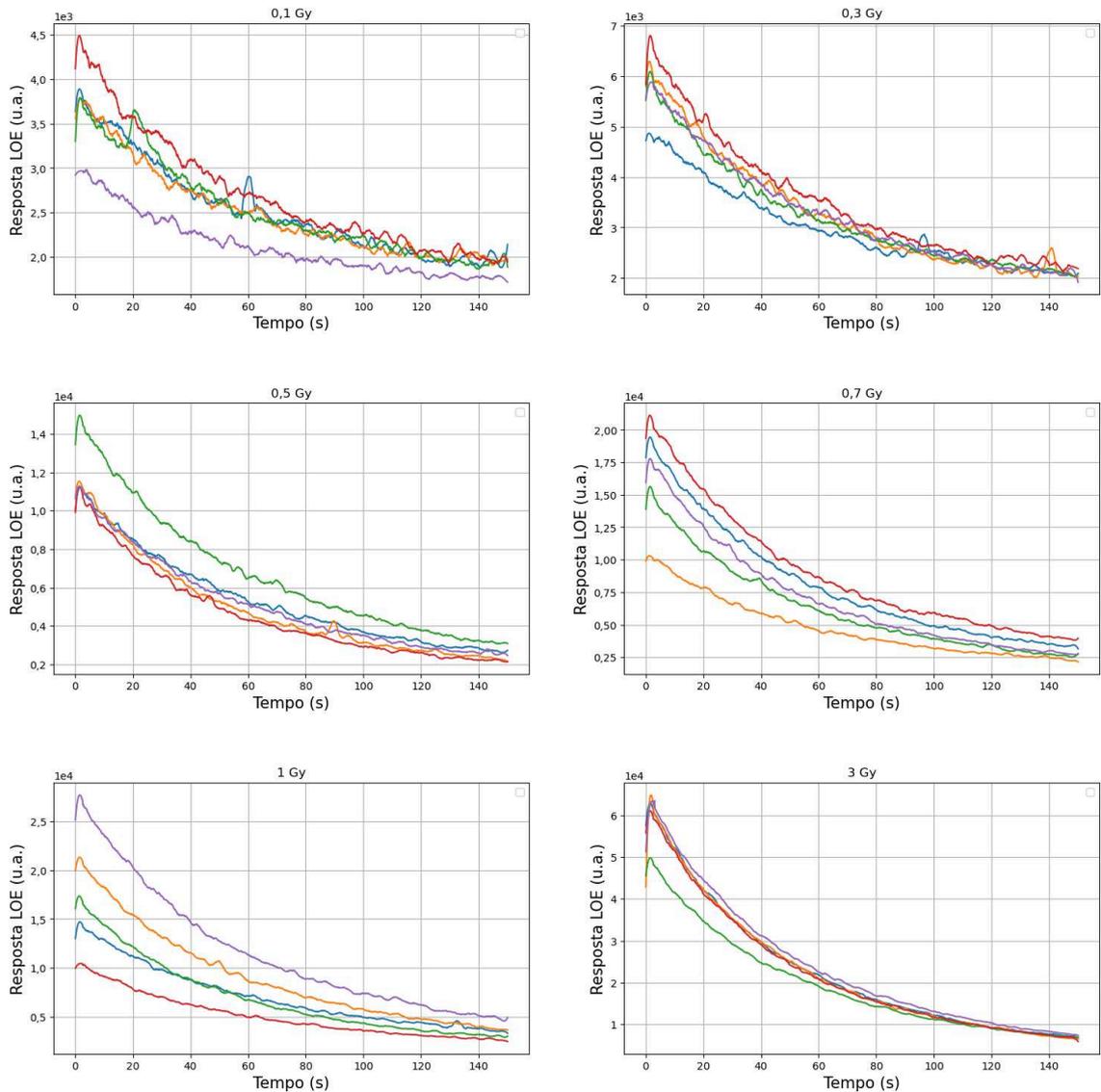
As curvas de decaimento obtidas com o sistema *LumiDeteck 3000* correspondentes às doses de radiodiagnóstico e de radioterapia podem ser vistas nas Figuras 21 e 22, respectivamente. Pode-se observar que, mesmo a intensidade LOE do BeO sendo alta, o ruído ainda se faz presente nas doses mais baixas, fato que não é observado para a dose de 3 Gy.

Figura 21. Curvas de decaimento LOE do dosímetro de BeO para doses de radiodiagnóstico utilizando leitora *LumiDeteck3000*.



Fonte: O autor (2023)

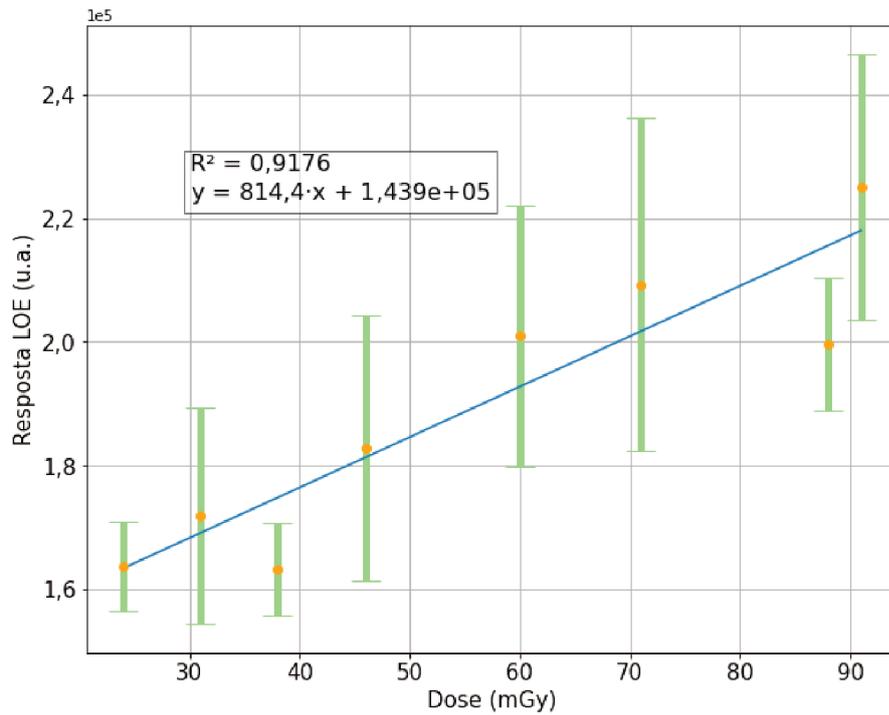
Figura 22. Curvas de decaimento LOE do dosímetro de BeO para doses de radioterapia utilizando leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

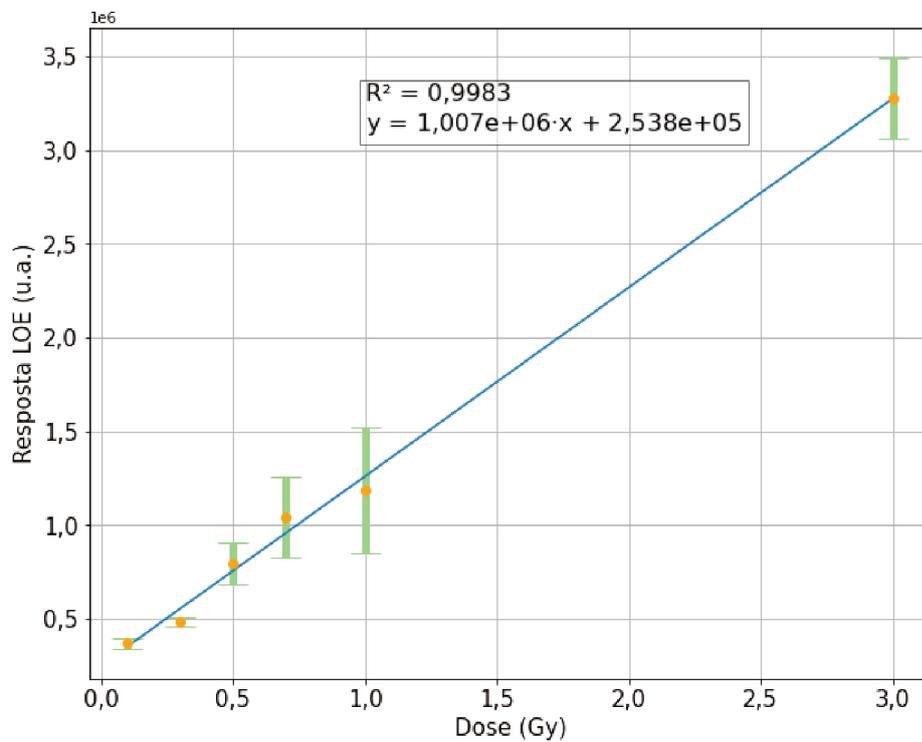
A curva Dose-Resposta para as doses do radiodiagnóstico está apresentada na Figura 23. O que se esperava era um gráfico linear, porém, pela Figura 23, pode-se ver que alguns pontos ficaram deslocados. Esse acontecimento indica uma limitação do conjunto *LumiDeteck 3000* – BeO para o intervalo de doses irradiadas no radiodiagnóstico. Isso não foi observado na curva Dose-Resposta para as doses em radioterapia, indicando que o conjunto *LumiDeteck 3000* – BeO é promissor para as doses irradiadas na radioterapia.

Figura 23 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de BeO com as doses do radiodiagnóstico utilizando a Leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

Figura 24 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de BeO com as doses da radioterapia utilizando a Leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

A reprodutibilidade de resposta para as doses de radiodiagnóstico e de radioterapia, obtidas com a leitora *LumiDeteck 3000*, estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5. Reprodutibilidade de resposta para medidas feitas com o BeO utilizando a *LumiDeteck 3000*.

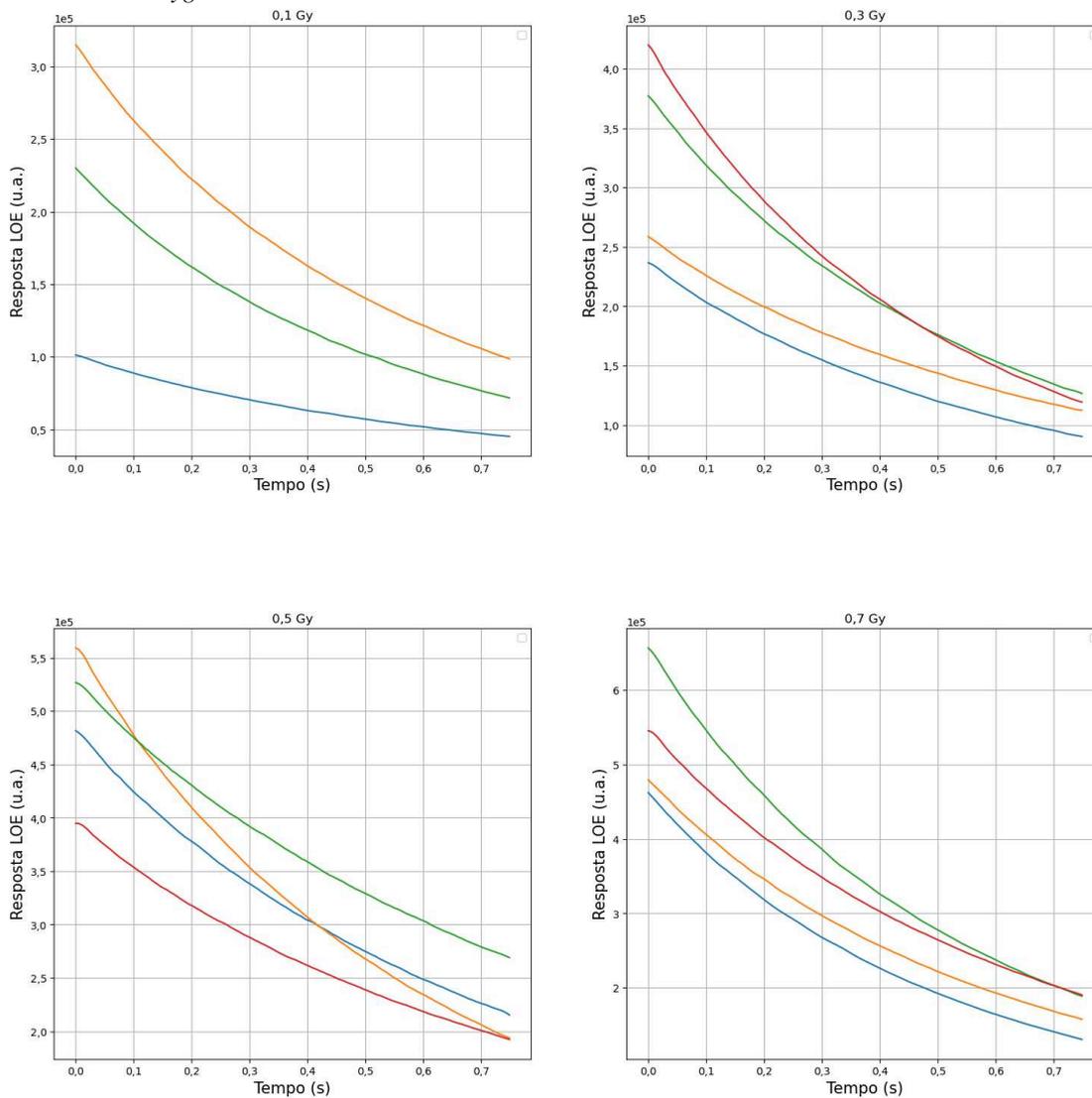
Doses Radioterapia (Gy)	Reprodutibilidade (%)	Doses Radiodiagnóstico (mGy)	Reprodutibilidade (%)
0,1	96,54	24	98,04
0,3	97,65	31	95,43
0,5	93,89	38	97,94
0,7	90,76	46	94,75
1	87,46	60	95,30
3	97,06	71	94,25
5	-	88	97,59
10	-	91	95,72

Fonte: O autor (2023)

A Tabela 5 mostra que, dentre os 14 valores de doses medidos com a leitora *LumiDeteck 3000*, 5 apresentaram uma reprodutibilidade abaixo de 95%. Como foi visto nos testes iniciais (item 4.1), apesar de um ruído alto, a reprodutibilidade do ruído estava acima de 95%, portanto, o fato de ter obtido resultados abaixo de 95% para doses com o BeO, não pode ser atribuído à leitora.

A curva de decaimento LOE para as doses de radioterapia utilizando a leitora *Lexsyg Smart* são apresentadas na Figura 25. É possível notar que, mesmo com as doses baixas, a leitora *Lexsyg Smart* não apresentou ruídos nas medições.

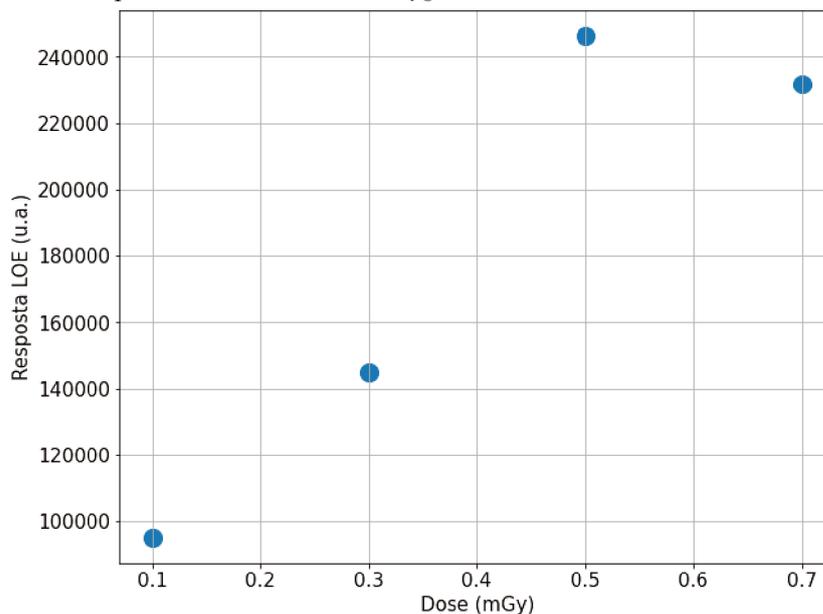
Figura 25. Curvas de decaimento LOE do dosímetro de BeO para doses de radioterapia utilizando leitora *Lexsyg Smart*.



Fonte: O autor (2023)

A curva Dose-Resposta para a leitora *Lexsyg Smart* estão dispostas na Figura 26.

Figura 26 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de BeO com as doses da radioterapia utilizando a leitora *Lexsyg Smart*.



Fonte: O autor (2023)

O esperado era que a curva Dose- Resposta se comportasse linearmente, porém, assim como o obtido para as doses de radiodiagnóstico utilizando a leitora *LumiDeteck 3000*, alguns pontos não seguiram esse comportamento.

A reprodutibilidade de resposta para as doses lidas com *Lexsyg Smart* está disposta na Tabela 6.

Tabela 6 Reprodutibilidade de resposta para medições feitas com o BeO utilizando a *Lexsyg Smart*.

Dose (Gy)	Reprodutibilidade (%)
0,1	78,84
0,3	90,87
0,5	94,54
0,7	93,03

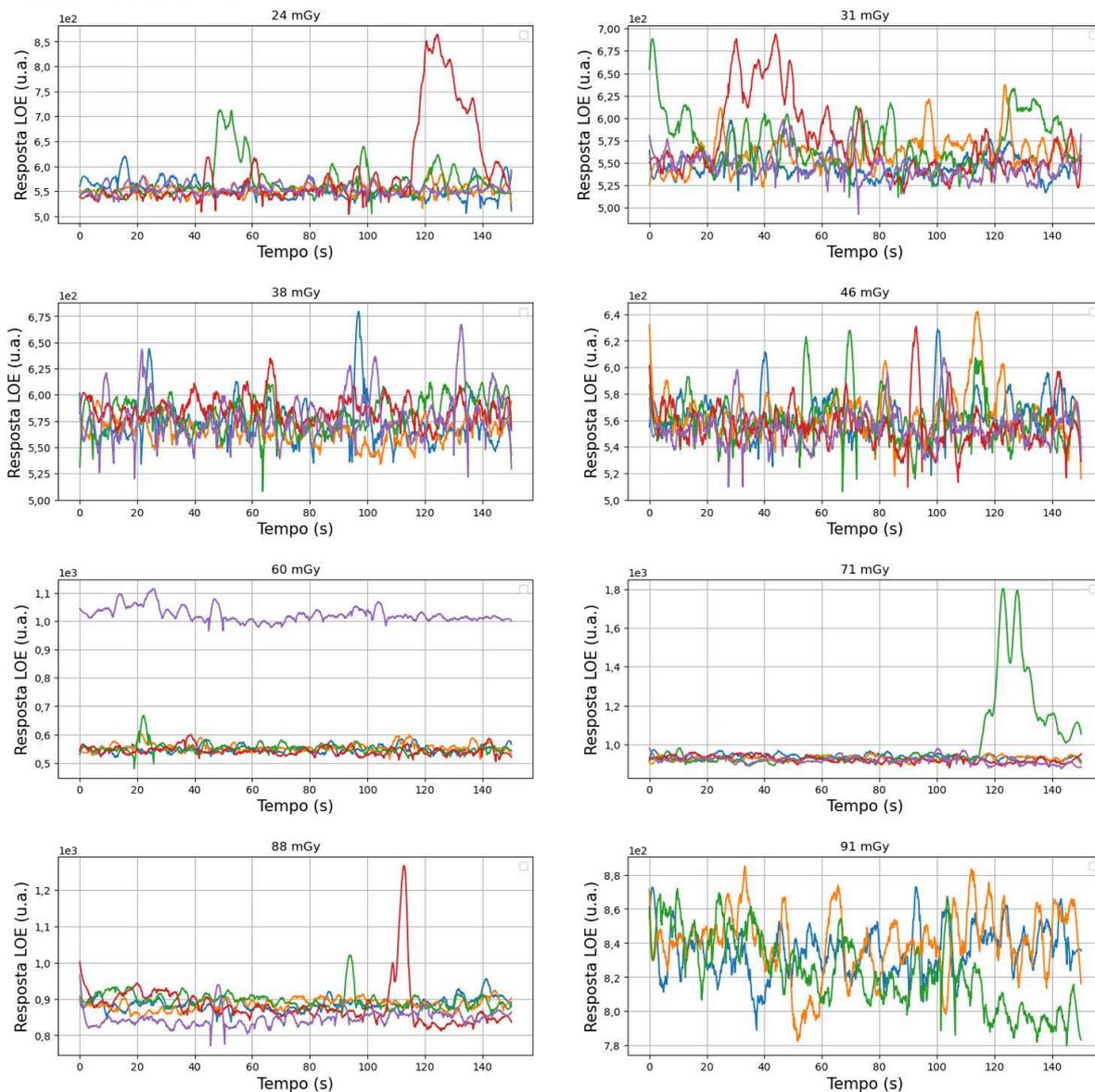
Fonte: O autor (2023)

A reprodutibilidade de resposta ficou abaixo de 95% para todas as doses lidas na *Lexsyg Smart*. Como esse problema foi obtido para as duas leitoras e não foi obtido para as medidas com o $Al_2O_3:C$, isso sugere que, provavelmente, o problema esteja relacionado com os dosímetros do BeO, sendo necessária uma análise dos dosímetros individualmente como irradiar várias vezes um mesmo dosímetro, com uma mesma dose e analisar a reprodutibilidade individualmente. Tais análises são indicadas para estudos futuros.

4.4 Dosímetro de CaSO₄:Dy

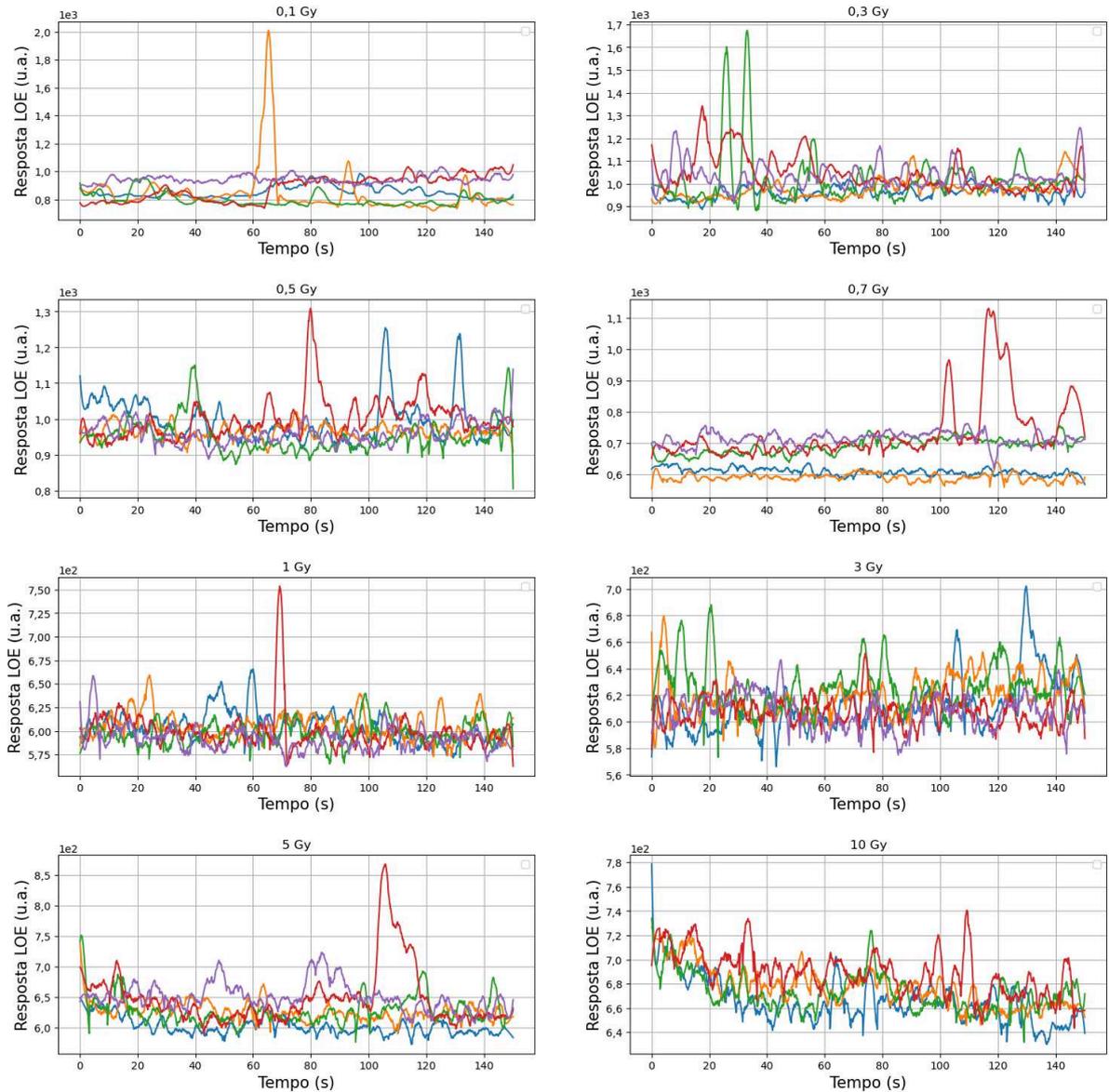
As curvas de decaimento LOE obtidas com a leitora *LumiDeteck 3000*, para as doses de radiodiagnóstico, podem ser vistas na Figura 27, e as de radioterapia, na Figura 28.

Figura 27 Curvas de decaimento LOE do dosímetro de CaSO₄:Dy para as doses de radiodiagnóstico utilizando leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

Figura 28 Curvas de decaimento LOE do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para as doses de radioterapia utilizando a leitora *LumiDeteck 3000*.

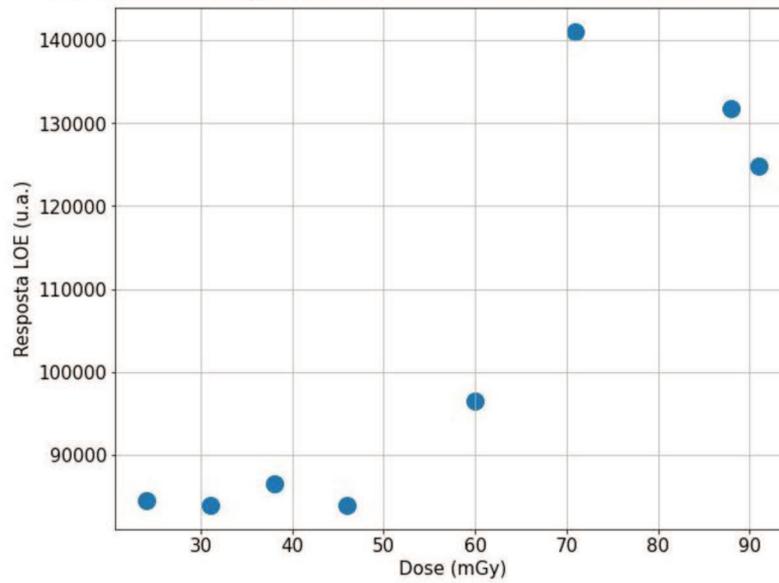


Fonte: O autor (2023)

É possível notar uma emissão LOE discreta para a dose de 10 Gy. Esses resultados indicam que o sistema dosimétrico, composto pela leitora *LumiDeteck 3000* e o dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, não é adequado.

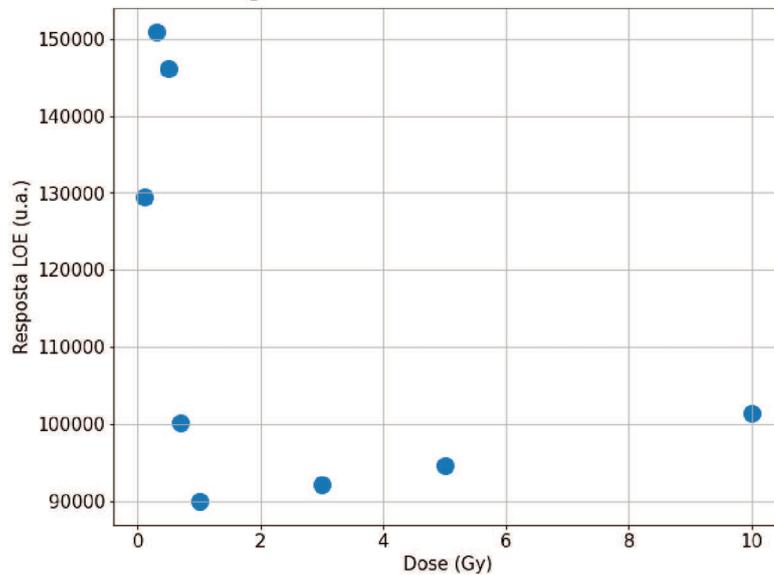
As curvas Dose-Resposta para as doses de radiodiagnóstico e de radioterapia estão dispostas nas figuras 29 e 30, respectivamente

Figura 29 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ com as doses do radiodiagnóstico utilizando a Leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

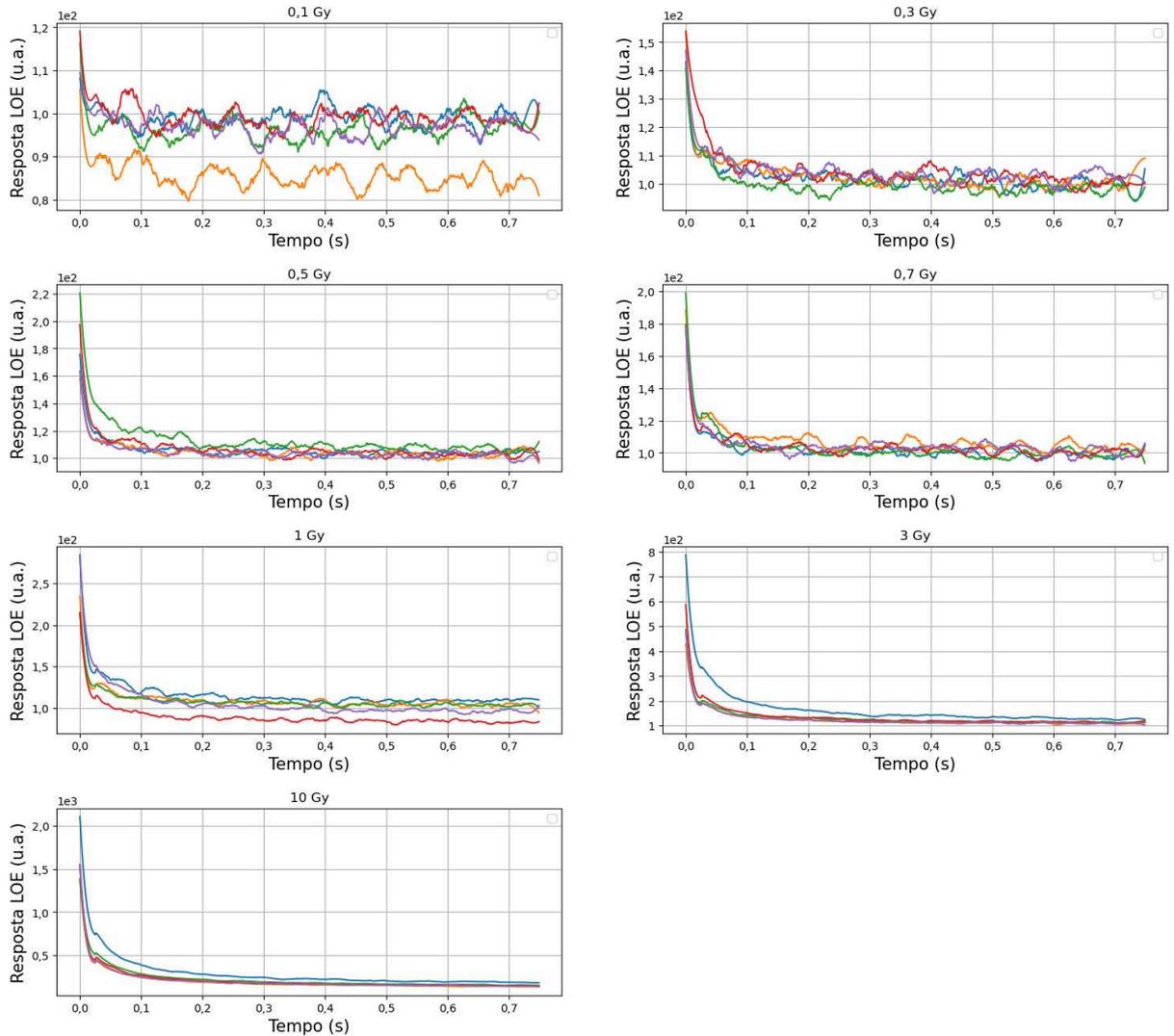
Figura 30 Curva Dose-Resposta para os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ com as doses da radioterapia utilizando a Leitora *LumiDeteck 3000*.



Fonte: O autor (2023)

As curvas de decaimento LOE obtidas com a leitora LexsygSmart estão apresentadas na Figura 31.

Figura 31 Curvas de decaimento LOE do dosímetro de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ para as doses de radioterapia utilizando leitora *LexsygSmart*.



Fonte: O autor (2023)

Os resultados com a leitora *LexsygSmart* para as doses menores também apresentaram ruídos, porém em doses maiores esses ruídos são desprezíveis e pouco aparecem. Esse resultado nos mostra que o problema do conjunto $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ e *LumiDeteck 3000* é proveniente tanto do dosímetro, que apresenta uma baixa fotoluminescência, quanto da leitora, que apresenta baixa sensibilidade. Portanto, esse dosímetro não é o mais indicado para ser utilizado com a leitora *LumiDeteck 3000*.

Considerando que as curvas de decaimento LOE para os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ estão formadas quase totalmente por ruídos, conclui-se que o sistema *LumiDeteck 3000* -

CaSO₄:Dy não é promissor. Por esse motivo, não foi calculada a reprodutibilidade de resposta.

5. Conclusão

A leitora *LumiDeteck 3000* mostrou-se promissora para um futuro uso comercial para dosímetros de BeO ou Al₂O₃:C para altas doses. O principal ponto que limita seu uso é o alto ruído identificado para baixas intensidades de sinal LOE decorrentes de baixas doses ou de materiais que naturalmente possuem uma luminescência baixa para doses mais altas. Como não se trata de um problema de linearidade ou algum tipo de incapacidade de leitura, mas algo provavelmente relacionado a necessidade de pequenos ajustes na eletrônica, acredita-se que após esses ajustes o equipamento terá melhor desempenho para uma faixa de dose maior, incluindo doses muito abaixo de 1 Gy. A dependência da resposta com a temperatura interna da leitora leva à sugestão da necessidade de um sistema de resfriamento que, se for desejado, pode baixar ainda mais o valor de dose mensurável sem interferência de ruído.

REFERÊNCIAS

- ANTONIO, P.L.; CALDAS, L. V. E. **Comportamento do sinal TL / OSL e PTTL / PTOSL após tratamento térmico pós-irradiação com fonte de ^{60}Co , em amostras de $\text{LiF}:\text{Mg}$, Ti e $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$** , Brazilian Journal of Radiation Sciences, v. 16, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v8i1A.1083>
- BARROS, C. E.; PEREIRA, B. H. A.; MACHADO, T. M. P.; OLIVEIRA, E. L.; PERINI, A. P.; CARDOSO, R. B.; BRAVIM, A.; NEVES, L. P. **Avaliação de uma nova leitora por luminescência opticamente estimulada**. Fortaleza: Anais XXVI Congresso Brasileiro e IX Latino Americano de Física Médica. 2022. Disponível em: https://www.cbfm.net.br/_files/ugd/80d924_ad169ebb2b8342b9ae9d29299a45ebdc.pdf
- PEREIRA, B. H. A.; BARROS, C. E.; ALVES, A. S. B. Z.; BRAVIM, A.; PERINI, A. P.; NEVES, L. P. **Avaliação do tempo de tratamento óptico para dosímetros $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ utilizando LED azul e branco**. Uberlândia: Anais XIV Simpósio de Engenharia Biomédica (SEB). 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7490418>
- BØTTER-JENSEN, L.; McKEEVER, S. W. S.; WINTLE, A. G. **Optically stimulated luminescence dosimetry**. 1ª edição, 2003. Elsevier Science, Amsterdã. <https://doi.org/10.1016/B978-044450684-9/50088-X>
- BRAVIM, A. **Aplicação das técnicas de dosimetria termoluminescente e de 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**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência na área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2015. <https://doi.org/10.11606/T.85.2015.tde-30072015-132845>
- BRAVIM, A.; CAMPOS, L. L. **Comparison of TL and OSL signal of $\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$ dosimeters to beta radiation**. International conference on luminescent detectors and transformers of ionizing radiation, 8ª edição. Halle, Estados Unidos. 2012. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/17749>.
- CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. **As Conferências Nobel de Marie e Pierre Curie: a gênese da radioatividade no ensino**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 27, n. 3, p. 473–514, 2011. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27n3p473>
- FREITAS, C. E. **Luminescência opticamente estimulada com aplicações em Radioterapia : dependência da dose absorvida e da energia de fótons produzidos em aceleradores clínicos e Microtron - IFUSP**. Dissertação (Mestre em Ciências) - Instituto de Física- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-26052017-084002/pt-br.php>. Acesso em: 13 mar. 2023.

GRONCHI, C. C. **Estabelecimento de um método dosimétrico para avaliação da exposição à radiação ultravioleta.** Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br:8080/xmlui/handle/123456789/11525>

GUIDELLI, E. J. **Luminescência opticamente estimulada em condições de ressonância plasmônica.** Tese (Doutorado em Ciências na área de Física Aplicada à Medicina e Biologia) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2015. <https://doi.org/10.11606/T.59.2015.tde-25062015-143014>

MATSUSHIMA, C. L. **Avaliação da resposta de detectores termoluminescentes na dosimetria de feixes clínicos utilizando diferentes objetos simuladores.** Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2010. <https://doi.org/10.11606/D.85.2010.tde-12082011-103710>

McKEEVER, S. W. S.; MOSCOVITCH, M. **On the advantages and disadvantages of optically stimulated luminescence dosimetry and thermoluminescence dosimetry.** Radiation Protection Dosimetry Vol. 104, No. 3, pp 263-270, 2003. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006191>

MEDEIROS, B. M.; ALENCAR, M. A. V. **Estudo da Aplicação da Dosimetria OSL em Altas Doses Utilizando os Dosímetros CaSO₄:Dy, CaF₂:Mn E CaF₂:Dy.** XIX Seminário Anual Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica CNPq - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, São Paulo, 2013.

MILBRATH, B. D.; PEURRUNG, A. J.; BLISS, M.; WEBER, W. J. **Radiation detector materials: An overview.** Journal of Materials Research, v. 23, n. 10, p. 2561–2581, 2008. <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0319>

NASCIMENTO, L. F. **Dosimetria usando Luminescência Opticamente Estimulada : aplicações , propriedades físicas e caracterização de materiais dosimétricos.** Dissertação (Mestre em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos- IFSC, São Carlos, 2007. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/pibic/cd-virtual/2012%20-%20JOHANNES%20GUTENBERG/pdf/ird_04_resumo.pdf

REED, A. B. **The history of radiation use in medicine.** Journal of Vascular Surgery, v. 53, n. 1 SUPPL., p. 3S-5S, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jvs.2010.07.024>

RTI Eletronics AB. **Piranha & QABrowser User's Manual.** 2014. Disponível em: http://www.perlamar.ie/wp-content/uploads/pdf/rTI/PIRANHA/Piranha_brochure.pdf

SILVA, R. J. G. G. **Caracterização do CaF₂:Tm para Dosimetria por Luminescência Opticamente Estimulada.** Dissertação (Mestre em Ciências) - Departamento de Energia Nuclear- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/25172/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Regina%20Juliana%20Galdino%20da%20Silva.pdf>

SILVA, R. B. F.; OLIVEIRA, M. L.; HAZIN, C. A. **Efeito do tratamento térmico pré-irradiação na reprodutibilidade de pastilhas de CaSO₄:Dy**. Scientia Plena, v. 4, p. 1–4, 2008. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/717>

SOMMER, M.; HENNIGER, J. **Investigation of a BeO-based optically stimulated luminescence dosimeter**. Radiation Protection Dosimetry, v. 119, n. 1–4, p. 394–397, 2006. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci626>

SOUZA, S. O.; YAMAMOTO, T.; D'ENRRICO, F. **Estado da arte em dosimetria do estado sólido**. International Joint Conference RADIO 2014, p. 8, Gramado, 2014. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/029/46029470.pdf

TAUHATA, L.; SALATI, I.; DI PRIZIO, R.; DI PRIZIO, A. **Radioproteção e Dosimetria**. 5ª revisão agosto/2013, Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria/Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2003. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/documentos/FundamentosCORv10.pdf>

WIDENHORN, R.; BLOUKE, M. M.; WEBER, A.; REST, A.; BODEGOM, E. **Temperature dependence of dark current in a CCD**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Portland State University, Portland. 2002. <https://doi.org/10.1117/12.463446>

YUKIHARA, E. G.; MCKEEVER, S. W. S. **Optically stimulated luminescence: Fundamentals and Applications**. 1ª edição, Oklahoma-EUA, 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470977064>