

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS  
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO  
PARA DOSIMETRIA POR LUMINESCÊNCIA  
OTICAMENTE ESTIMULADA (LOE)**

SÉRGIO TORRES DE SANTANA

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL  
MARÇO - 2006

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO  
PARA DOSIMETRIA POR LUMINESCÊNCIA  
OTICAMENTE ESTIMULADA (LOE)**

**SÉRGIO TORRES DE SANTANA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO  
PARA DOSIMETRIA POR LUMINESCÊNCIA  
OTICAMENTE ESTIMULADA (LOE)**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação Nuclear.

Orientadora: **Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Helen Jamil Khoury**

Co-orientador: **Prof. Dr. Francisco A. Melo**

RECIFE,  
Março de 2006

**S232d      Santana, Sérgio Torres de**

Desenvolvimento de um equipamento para dosimetria por luminescência opticamente estimulada (LOE) / Sérgio Torres de Santana. – Recife: O Autor, 2006.

62 f., il. (algumas color.), figs., gráfs. tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Depto. de Energia Nuclear. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2006.

Inclui referências bibliográficas.

**1. Energia Nuclear. 2. Luminescência opticamente estimulada - LOE. 3. Medidor de dose. 5. Radiação. 6. Pulsado. I. Título.**

**616.0757 CDD (20.ed.)**

**BCTG/2006-69**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA  
DOSIMETRIA POR LUMINESCÊNCIA OTICAMENTE  
ESTIMULADA (LOE)**

**Sérgio Torres de Santana**

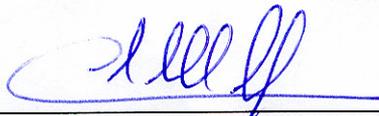
**APROVADO EM: 13.03.2006**

**ORIENTADORA : Profa. Dra. Helen Jamil Khoury  
CO-ORIENTADOR : Prof. Dr. Francisco Almeida de Melo**

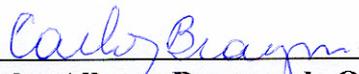
**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Prof. Dra. Carmen Cecília Bueno Tobias – IPEN/USP**



**Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin – CRCN/CNEN-PE**



**Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE**

**Visto e permitida a impressão**



**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

Dedico este trabalho

*Aos meus pais, Moacir e Socorro, pelo esforço e dedicação para plantar o bem maior que levarei sempre comigo, que é minha educação.*

*“O mais importante da vida não é  
a situação em que estamos, mas a direção  
para a qual nos movemos”.*

Oliver Wendell Holmes

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, que sempre me guia nas decisões da minha vida.

À minha família pelo apoio, conselhos e incentivos no decorrer do trabalho.

À minha companheira Tatiana, por seu amor e compreensão.

À Professora Helen e ao professor Chico, por aceitarem realizar o trabalho de orientação desta Dissertação de Mestrado, pela dedicação e amizade sincera.

Aos professores Brayner, Clovis, Iran, Tatumi (FATEC), Walter e Watanabe (USP) pelas discussões e sugestões que muito contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

À equipe do Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes Dayse, Edvânia, Égita, Elias e Macilene pela paciência e por viabilizar as irradiações.

Aos professores do DEN, em especial, Dantas, Elmo, João Filho, Rajendra e Sueldo, que me incentivaram para a realização deste trabalho.

Aos amigos Adriano, Aldrin, Ariosto, Cintya, Eutrópio, Fábio, Flávia, Izabele, Jorge, Jucilene, Malú, Péricles, Poliana e Vinícius, pela descontração, pelas discussões e sugestões para o andamento do trabalho.

Pela torcida e força dos muitos amigos conquistados durante essa caminhada Adna, Álvaro, Aguiar, Amós, Ana Paula, Araújo, Cicília, Dalmário, Edvane, Eliane, Fabiana, Izes, João, Jutaf, Kátia, Laélia, Marcone, Mariana, Maurício, Renata, Tiago, Viviane e Wando.

Aos funcionários do DEN, Antônio, Edvaldo, Eliete, Juarez, Lia, Magali, Nilvania, Norma, Zacarias e Zeza, pela amizade e profissionalismo com o qual desempenham suas funções.

Ao DEN/UFPE pela oportunidade de realizar este trabalho.

## RESUMO

Nos últimos anos a dosimetria por Luminescência Oticamente Estimulada (LOE) tem sido cada vez mais utilizada. A emissão da luminescência ocorre pela recombinação das cargas aprisionadas nas armadilhas do cristal e que foram estimuladas oticamente. A população de elétrons nas armadilhas é decorrente da irradiação da amostra e, portanto, há uma relação entre a intensidade da LOE e a dose recebida pelo material. Neste trabalho apresentamos o equipamento desenvolvido para medidas de dosimetria LOE a fim de ser utilizado nas pesquisas do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. O sistema é baseado na técnica de estimulação pulsada e a LOE é medida apenas depois do fim do pulso. A fonte de estimulação utilizada é composta de um conjunto de 20 LEDs azuis (com  $\lambda \approx 470\text{nm}$  e  $I_{\text{max}} \approx 50\text{cd}$ ). Para detecção da LOE, foi utilizado um tubo fotomultiplicador da Hamamatsu R980 que possui uma curva de resposta com um pico máximo de detecção em 420nm, que é satisfatório para o espectro de emissão da luminescência do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  e do quartzo. Foram estudados o efeito da intensidade da luz de estimulação e a largura do pulso no sinal LOE. Os resultados mostraram que um pulso de estimulação de 500ms seguido de 2s de medida da LOE produzida por uma amostra irradiada são adequados para a dosimetria da radiação usando a luminescência oticamente estimulada por pulso. A aplicação do sistema desenvolvido também foi analisada utilizando dosímetros de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiados tanto com feixes de raios-x como de gama do  $^{137}\text{Cs}$ . Os resultados obtidos mostraram que a resposta à dose do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  é linear na região em que o experimento foi feito e a dose mínima detectável é de  $300\mu\text{Gy}$ . Os resultados obtidos também mostraram que a unidade LOE pulsada desenvolvida baseada em LEDs azuis pode ser considerada um sistema compacto, confiável e barato para medidas rotineiras da LOE.

Palavras-chave: Luminescência Oticamente Estimulada, LOE, medidor de dose, pulsado, radiação.

## ABSTRACT

In recent years the Optically Stimulated Luminescence (OSL) has become a popular procedure for the dosimetry of the ionizing radiation. OSL arises from the recombination of charges which has been optically released from electron traps within the crystal. The electron population in the traps is the result of irradiation of the material, and thus the OSL intensity is related to the absorbed radiation dose. In this paper we describe the development of an equipment for the OSL dosimetry to be used in the Nuclear Energy Department of UFPE. The system is based on the pulse stimulation technique in which the stimulation source is pulsed and the OSL is measured only after the end of the pulse. The stimulation source used was an array of 20 Blue LEDs (with  $\lambda \approx 470\text{nm}$  and  $I_{\text{max}} \approx 50\text{cd}$ ). To detect the OSL we used the photomultiplier tube Hamamatsu R980 which has a response curve with a maximum detection efficiency peaking around 420nm which is suitable for the luminescence emission spectra of  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  and quartz. The effects of stimulation light intensity and the pulse width on the OSL signal were investigated. The results showed that 500ms for the stimulation pulse width and 2s for the measurement of the OSL produced by the irradiated sample are adequate for the radiation dosimetry using pulsed optically stimulated luminescence. The application of the system developed for the  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  dosimetry was also investigated using  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  dosimeters irradiated with an x-ray beam and with a gamma beam of  $^{137}\text{Cs}$ . The results obtained showed that the dose response of  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  is linear over the region of the dose range that the experiment was carried out and the minimum detectable dose is  $300\mu\text{Gy}$ . The results obtained also showed that the pulsed OSL unit developed based on blue LEDs can be considered as a compact, reliable and inexpensive system for routine OSL measurements.

Keywords: Optically Stimulated Luminescence, OSL, dose measurement, pulsed, radiation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático da excitação (i) e da estimulação (ii) em um fósforo (adaptado de MAHESH et al., 1989).....	16
Figura 2 - Modelo de banda de energia para representação dos processos TL e LOE (adaptado de BØTTER-JENSEN; MACKEEVER, 1996).....	17
Figura 3 - Curva de emissão TL típica do LiF (TLD100) (MCKEEVER, 1985).....	18
Figura 4 - Curva de decaimento da luminescência típica emitida no processo contínuo LOE (BØTTER-JENSEN, 2000). ....	20
Figura 5 – Diagrama de funcionamento do sistema LOE no modo pulsado (AKSELROD; MCKEEVER, 1999).....	22
Figura 6 - Gráficos mostrando (I) o sinal LOE durante e após o pulso de laser e (II) a curva de emissão detectado em três diferentes momentos: (a) 0-0,5s, (b) 1,5-2s e (c) 3-3,5s (MARKEY et al., 1995).....	23
Figura 7 - Dependência da LOE com a temperatura para uma amostra de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C estimulada com laser de argônio de 150W com pulsos de 100ms (MARKEY et al., 1995) .....	24
Figura 8 - Medidas do sinal LOE durante e depois da estimulação do Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C mostrando uma saturação para tempos acima de 500ms (LEE; LEE, 2001).....	25
Figura 9 - Variação da luminescência com o aumento da corrente. O gráfico menor mostra a integral da luminescência em função da corrente (BULUR; GÖKSU, 1997).....	26
Figura 10 - Diagrama de um sistema de leitura do sinal LOE (adaptado de BØTTER-JENSEN, 2000).....	27
Figura 11 - Curvas de decaimento LOE de um feldspato estimulado com luz de um Laser infravermelho (500 mW/cm <sup>2</sup> ) e LEDs infra-vermelhos (40 mW/cm <sup>2</sup> ) (BØTTER-JENSEN; MURRAY, 1999).....	29
Figura 12 - Diagrama esquemático de um sistema LOE utilizando uma lâmpada de halogênio como fonte de luz de estimulação (BØTTER-JENSEN; DULLER, 1992).....	30
Figura 13 - Esquema de um detector LOE utilizando LEDs (BØTTER-JENSEN, 1997). ....	32
Figura 14 - Esquema de um detector LOE combinando LEDs azuis e diodo laser IR (BØTTER-JENSEN; MURRAY, 1999).....	32

Figura 15 - Curva de decaimento para comparação entre 3 tipos de fontes de luz: Lâmpada de argônio, LED azul e LED verde (BØTTER-JENSEN et al., 1999a).....	33
Figura 16 - Esquema dos processos ocorridos dentro do tubo fotomultiplicador .....	34
Figura 17 - Sinal LOE de uma amostra de feldspato em função do tempo de estimulação comparando a dose natural encontrada na amostra com diferentes doses artificiais no <sup>60</sup> Co (TATUMI et al., 2003) .....	36
Figura 18 - Curva integrada da LOE em função das diferentes doses onde P é a dose natural medida na amostra (TATUMI et al., 2003) .....	36
Figura 19 – Resposta à dose de radiação do dosímetro de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C em função da dose absorvida de <sup>137</sup> Cs (LEE; LEE, 2001) .....	37
Figura 20 - Esquema do sistema para medidas da luminescência opticamente estimulada .....	38
Figura 21 – Espectro de resposta típico da fotomultiplicadora Hamamatsu R980 (HAMAMATSU, 2001).....	39
Figura 22 – Esquema do sincronismo do bloqueador de luz com os LEDs controlados pelo gerador de onda quadrada .....	41
Figura 23 - Esquema do circuito eletrônico de controle de sincronismo entre os LEDs e o bloqueador .....	41
Figura 24 - Intensidade da luminescência de uma amostra após um pulso de luz, em função do tempo .....	42
Figura 25 – Fonte de tensão dupla (esquerda) que alimenta o equipamento para LOE (centro) que está acoplado a um multicanal (direita) .....	43
Figura 26 - Imagem da tela do multicanal para as medidas do tempo do pulso (P), tempo de transição (T) para a abertura total do bloqueador e o tempo do ciclo (C) do equipamento LOE no modo automático.....	45
Figura 27 - Imagem da tela do multicanal para as medidas do tempo do pulso (P), tempo de transição (T) para a abertura total do bloqueador e o tempo do ciclo (C) do equipamento LOE no modo automático. O sinal LOE é a integração das contagens de 200 canais após o pulso de estimulação. ....	46
Figura 28 - Imagem da tela do osciloscópio mostrando a onda quadrada produzida pelo gerador de pulsos .....	48
Figura 29 – Variação do tempo de abertura do bloqueador de luz (T) em função da tensão de operação do circuito eletrônico.....	50
Figura 30 - Variação do sinal LOE com o tempo de estimulação para amostra de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C ...	51

Figura 31 - Variação da integral da luminescência de uma amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ em função da corrente de cada LED .....	52
Figura 32 - Variação do sinal LOE, durante e após 1s de estimulação, em função da corrente total dos 32 LEDs verdes (8 conjuntos paralelos de 4 LEDs em série) para uma amostra irradiada com 1Gy (BULUR; GOKSU, 1997) .....	53
Figura 33 - Variação da integral do pulso de estimulação com a corrente de cada LED .....	54
Figura 34 - Decaimento da luminescência da amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ irradiada com três diferentes doses de $^{137}\text{Cs}$ .....	55
Figura 35 – Resposta normalizada do sinal LOE integrado em 2s em função do número de pulsos de estimulação para a amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ irradiada com três diferentes doses de $^{137}\text{Cs}$ .....	56
Figura 36 – Curva da porcentagem da luminescência em função do número de pulsos, aproximada por uma exponencial, para a amostra de $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ irradiada com 100mGy. No detalhe, a aproximação linear dos 10 primeiros pulsos. ....	57
Figura 37 – A resposta LOE correspondente à soma do sinal integrado decorrente da estimulação com 3 pulsos de 520ms para o $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ irradiado no raios-x. ....	57
Figura 38 – A resposta LOE correspondente à soma do sinal integrado decorrente da estimulação com 3 pulsos de 520ms para o $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ irradiado com $^{137}\text{Cs}$ . ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos LEDs utilizados no equipamento de medidas da LOE para a condição de teste com $I_{led} = 20\text{mA}$ (dados do fabricante).....	38
Tabela 2 - Principais características da fotomultiplicadora utilizada no equipamento LOE (HAMAMATSU, 2001).....	40
Tabela 3 - Variação da frequência de oscilação em função da tensão de alimentação do circuito eletrônico .....	49
Tabela 4 – Tempo médio e coeficiente de variação para T e P .....	49
Tabela 5 - Variação da integral do sinal LOE com o tempo de estimulação.....	50
Tabela 6 - Principais características do equipamento desenvolvido.....	54

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Princípios do Fenômeno de Luminescência .....	16
2.2 Tipos de Estimulação Ótica .....	20
2.2.1 LOE no modo Contínuo .....	20
2.2.2 LOE no Modo Pulsado .....	21
2.3 Equipamentos para medidas LOE .....	27
2.3.1 Sistema de estimulação Ótica.....	28
2.3.2 Sistema de detecção de luz.....	34
2.4 Dosimetria das radiações ionizantes utilizando LOE .....	35
2.4.1 Dosimetria Restrospectiva.....	35
2.4.2 Dosimetria Individual.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
3.1 Estabilidade e reprodutibilidade do sistema de controle de luz.....	44
3.2 Influência do sistema de estimulação ótica na resposta LOE.....	45
3.3 Aplicação do equipamento para medida do sinal LOE com $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ .....	46
4 RESULTADOS .....	48
4.1 Estabilidade e reprodutibilidade do sistema de controle de luz.....	48
4.2 Influência do sistema de estimulação ótica na resposta LOE.....	50
4.3 Aplicação do equipamento para medida do sinal LOE com $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ .....	55
5 CONCLUSÃO.....	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

## 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da Luminescência Óticamente Estimulada (LOE)<sup>1</sup> corresponde à emissão de luz por um dado material previamente irradiado, durante o processo de estimulação com feixes de fótons de determinados comprimentos de onda. A aplicação deste fenômeno para a dosimetria das radiações ionizantes foi proposta na década de 1960. Entretanto, somente a partir da década de 1990 é que a sua aplicação para a área de dosimetria das radiações tem crescido. Uma das razões para esta dificuldade de implementação é a obtenção de materiais com estabilidade da resposta do sinal LOE e com alta sensibilidade à radiação. Além disso, o desenvolvimento da dosimetria termoluminescente na década de 1960 fez com que o interesse pela dosimetria pela LOE não fosse tão incentivado.

Entretanto, ao longo dos últimos anos, com o surgimento de novos materiais como o MgS, CaS, SrS e SrSe dopados com diferentes terras raras, retomaram-se as pesquisas em dosimetria pela LOE. Quando estimulados por radiação no infravermelho, estes materiais apresentam elevada sensibilidade à radiação e elevada eficiência de emissão de luz na faixa de comprimento de onda de 1µm, porém apresentam uma resposta em função da dose com elevada dependência energética, o que não é muito recomendado em dosimetria.

Outros materiais vêm sendo desenvolvidos e entre eles destaca-se o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C que, após a estimulação ótica, emite a luminescência na faixa de 420nm com uma constante de tempo de decaimento de 36ms. As características dosimétricas do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C vêm incentivando o desenvolvimento de pesquisas para o uso da LOE para dosimetria de trabalhadores e de pacientes. Ao mesmo tempo, as propriedades de diversos materiais minerais como o quartzo e o feldspato têm incentivado o uso do fenômeno da LOE para estudos de datação e de arqueologia.

De modo geral, a técnica de dosimetria pela LOE apresenta vantagens sobre a dosimetria por termoluminescência tais como: não requer o aquecimento da amostra uma vez que o método de leitura é totalmente ótico, permite múltiplas leituras do dosímetro, além do processo de leitura ser rápido possibilitando a análise de um grande número de dosímetros.

---

<sup>1</sup> Em inglês é conhecido como Optically Stimulated Luminescence (OSL)

Diante destas vantagens, foi objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um equipamento para dosimetria pela LOE a fim de contribuir para implantação desta técnica dosimétrica no Departamento de Energia Nuclear da UFPE.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PRINCÍPIOS DO FENÔMENO DE LUMINESCÊNCIA

Os fenômenos de emissão de luz que ocorrem por emissão espontânea ou por estimulação prévia são chamados de luminescência. Existem muitos tipos de fenômenos luminescentes que são classificados de acordo com a fonte utilizada para estimular a emissão de luz da amostra.

Os materiais luminescentes são, em geral, policristais iônicos nos quais, no estado fundamental, a banda de valência se encontra povoada de elétrons e a banda de condução vazia, ambas separadas por uma faixa de estados energéticos não permitidos denominada de banda proibida (Figura 1).

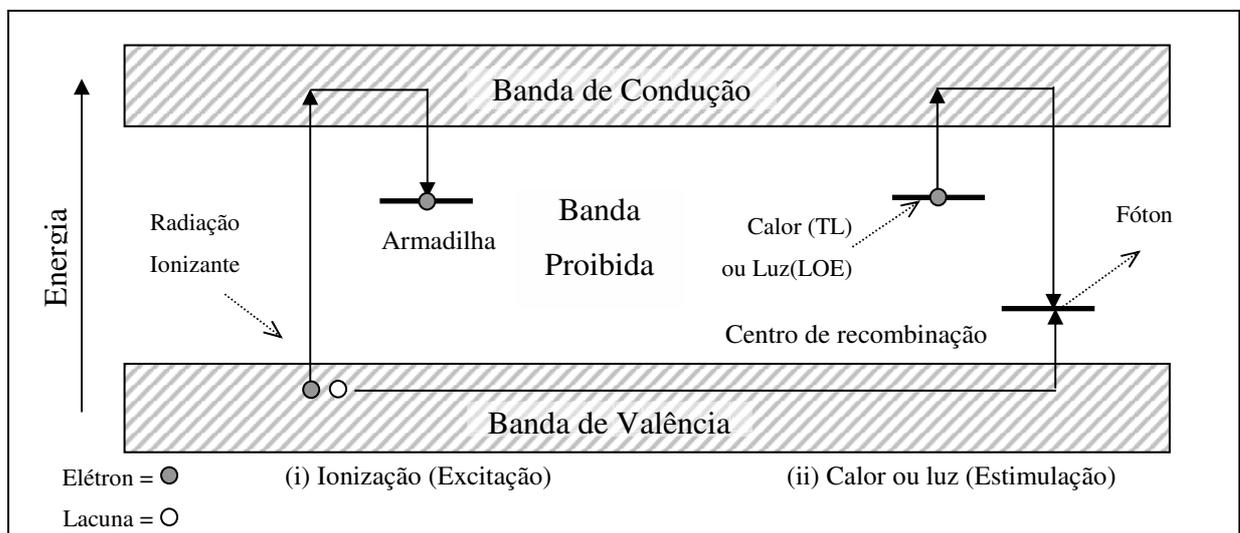


Figura 1 – Diagrama esquemático da excitação (i) e da estimulação (ii) em um fósforo (adaptado de MAHESH et al., 1989).

A radiação ionizante ao incidir neste cristal pode ceder energia a elétrons permitindo que migrem da banda de valência para a banda de condução. Este processo é conhecido como

excitação. A ausência de um elétron da banda de valência forma uma lacuna. Ambos, elétron e lacuna são livres para vagar independentemente através da rede, e qualquer um ou ambos podem contribuir para a condutividade elétrica no cristal. Passado algum tempo, o elétron pode ser capturado por um estado de energia metaestável, denominado armadilha. Os elétrons podem permanecer neste estado metaestável até que sejam estimulados termicamente (TL) ou óticamente (LOE).

A recombinação do elétron com a lacuna resulta na emissão da luminescência. Os processos da TL e da LOE podem ser detalhados com base no modelo genérico de diagrama de bandas de energia, mostrado na Figura 2.

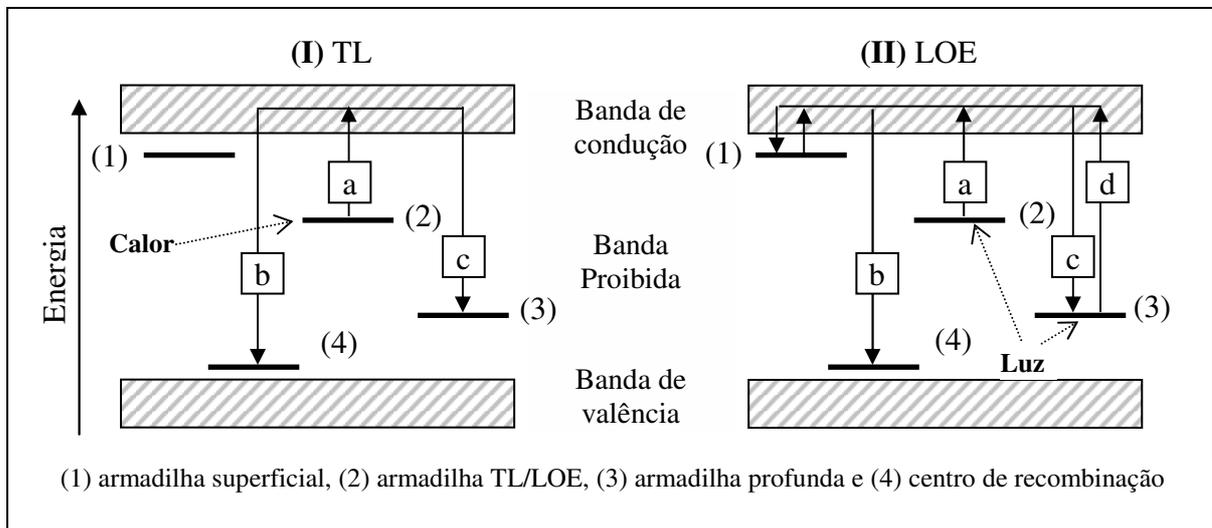


Figura 2 - Modelo de banda de energia para representação dos processos TL e LOE (adaptado de BØTTER-JENSEN; MACKEEVER, 1996).

Observa-se por este diagrama que as armadilhas (nível 2) que estão preenchidas por elétrons livres poderão se recombinar com as lacunas (nível 4) emitindo um fóton que poderá ser registrado para utilização como medida dosimétrica.

Os níveis de energia mais rasos (nível 1) ou mais profundos (nível 3) podem existir dentro da estrutura do cristal, influenciando na resposta através de perdas ou de atrasos na recombinação.

No caso da estimulação térmica (TL), a intensidade de emissão TL dependerá da temperatura de aquecimento da amostra. Medindo a intensidade luminosa e traçando um gráfico em função da temperatura, ou do tempo, durante o período em que a temperatura aumenta, obtém-se uma curva chamada de curva de emissão, ou *glow curve* (Figura 3).

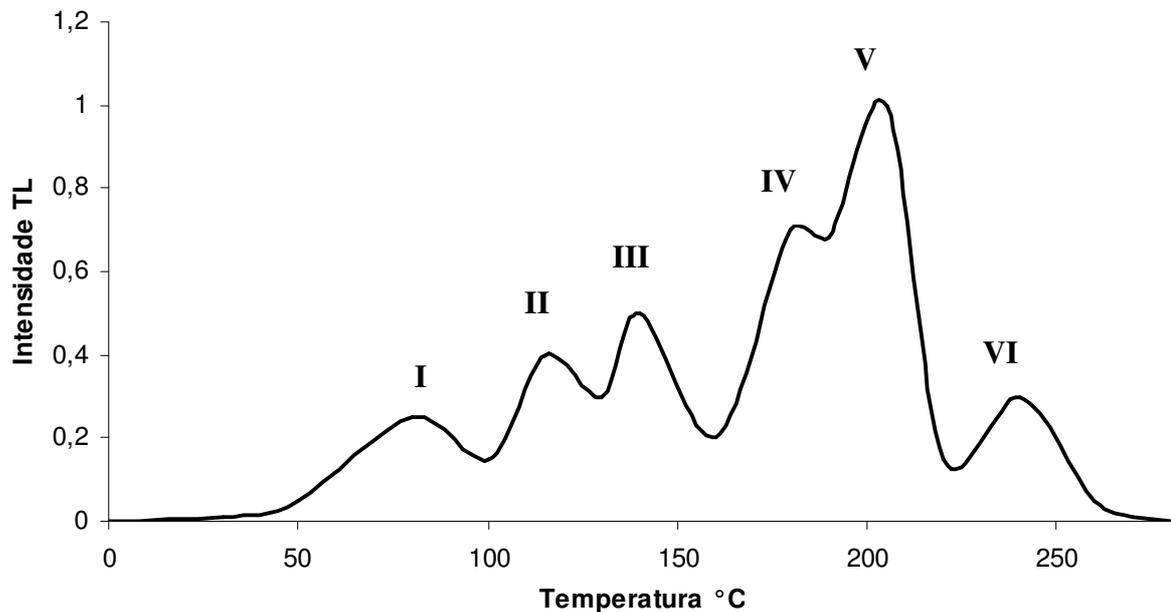


Figura 3 - Curva de emissão TL típica do LiF (TLD100) (MCKEEVER, 1985).

Esta curva é a melhor forma de caracterizar um material TL e consiste, em geral, de vários picos. Cada um deles está associado a uma determinada armadilha, que pode ser de elétrons ou lacunas, de profundidade “E” e é caracterizada pela temperatura onde ocorre o máximo de emissão. A formação de um pico de emissão está relacionada com a probabilidade de escape dos elétrons, ou lacunas, das armadilhas correspondentes. Quando a temperatura do material é menor que a do pico considerado, poucos portadores de carga (elétrons ou lacunas) dessa armadilha são liberados, e a luz emitida é fraca. Aquecendo-se o cristal, a probabilidade de escape aumenta, causando um aumento da emissão, que é máxima na temperatura do pico. A intensidade decresce, em seguida, devido à redução de portadores de carga nessa armadilha.

A forma da curva de emissão depende dos tipos de armadilhas e dos centros de luminescência existentes no cristal, da razão de aquecimento e do aparelho detector utilizado. A presença de mais de um pico na curva revela a existência de mais de um tipo de armadilha.

A amplitude de cada pico indica aproximadamente a população relativa dos elétrons ou lacunas capturados na armadilha correspondente. Tanto a área como a altura do pico da curva de emissão podem servir como uma medida da dose absorvida no cristal. Quando a altura de pico for usada, o ciclo de aquecimento precisa ser suficientemente reprodutível para

evitar flutuações nas medidas. Entretanto, não é necessária uma taxa de aquecimento uniforme ao longo da curva de emissão.

Após as armadilhas serem esvaziadas pelo aquecimento a uma temperatura suficientemente alta por um período de tempo adequado, e o cristal ser subsequentemente resfriado, ele normalmente retorna para sua condição original e está pronto para registrar outra exposição à radiação.

No caso da LOE, a transição dos elétrons que estão presos nas armadilhas para a banda de condução é efetuada pela incidência de luz. Alguns elétrons poderão decair para os centros de recombinação liberando luz cuja intensidade é proporcional à quantidade de recombinações. Estas armadilhas podem ser iguais ou não às armadilhas associadas com os picos TL. Como a população de elétron nas armadilhas é o resultado da irradiação do material, medindo a intensidade da LOE de uma amostra depois da irradiação pode-se relacioná-la com a dose de radiação absorvida.

Segundo Bøtter-Jensen (2000), as principais vantagens da LOE comparada com a TL podem ser resumidas a seguir:

- ✓ O sinal LOE é normalmente medido em temperatura ambiente, o que resulta em menor tempo de aquisição, pois não é necessário haver aquecimento nem resfriamento da amostra. Além disso, evita a degradação da amostra pelo aquecimento;
- ✓ Permite múltiplas leituras do dosímetro uma vez que, para a geração do sinal LOE, não é necessário o total esvaziamento da armadilha. No caso do TL, não é possível efetuar uma segunda leitura uma vez que as armadilhas são totalmente esvaziadas;
- ✓ Como no sistema por estimulação ótica não há o total esvaziamento das armadilhas, é possível efetuar uma leitura TL após a medida LOE em uma mesma amostra;
- ✓ Pequenas frações de uma amostra podem ser medidas pela LOE, utilizando, para isso, um feixe fino de luz incidindo em apenas uma pequena área da amostra;

## 2.2 TIPOS DE ESTIMULAÇÃO ÓTICA

Como foi visto anteriormente, a base do processo LOE é a medida da luz emitida por uma amostra irradiada, a partir da estimulação com um feixe de luz com dado comprimento de onda. Há diferentes modos de estimulação e coleta da luz. Os principais modos de operação são o modo contínuo e o modo pulsado.

### 2.2.1 LOE NO MODO CONTÍNUO

Este é o método tradicional de utilização do processo de dosimetria por luminescência opticamente estimulada. Neste modo, a amostra irradiada é estimulada com uma fonte de luz constante e simultaneamente é efetuada a medida da luz emitida pela amostra.

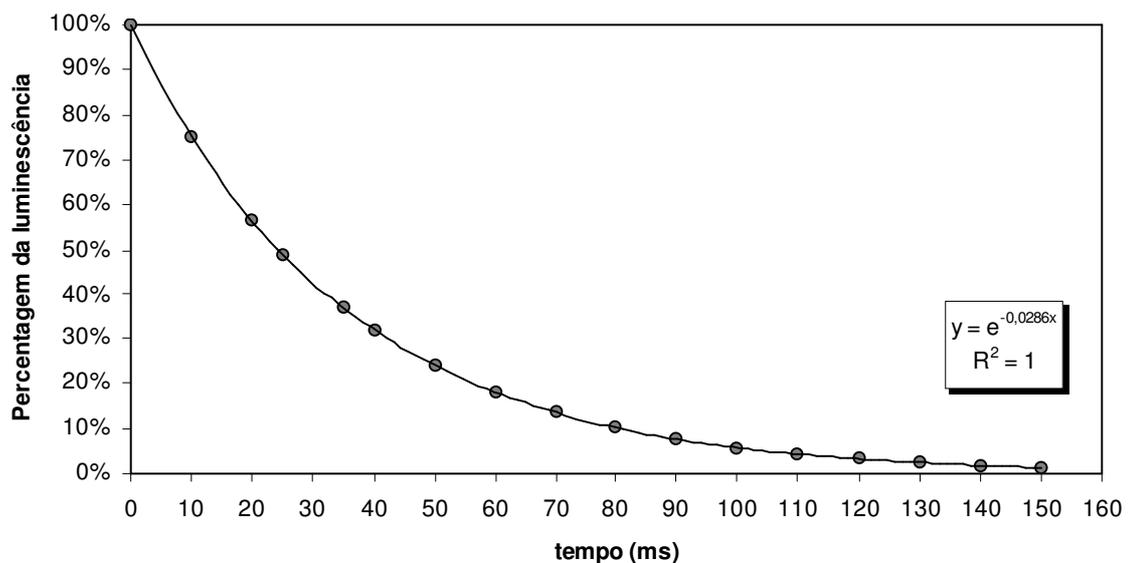


Figura 4 - Curva de decaimento da luminescência típica emitida no processo contínuo LOE (BØTTER-JENSEN, 2000).

Neste caso, a luz utilizada para a estimulação da amostra tem comprimento de onda diferente da luz de emissão e filtros são utilizados para a discriminação entre essas duas luzes, evitando assim a interferência da luz de estimulação na resposta do detector. Com isso, é possível observar a diminuição exponencial do sinal LOE à medida em que as armadilhas são esvaziadas, formando a curva de decaimento, apresentada na Figura 4.

Em vários casos, a curva de decaimento pode ser exatamente exponencial ou pode ser a soma de várias exponenciais. Há casos em que a curva de decaimento não é exponencial e apresenta um crescimento inicial antes do decaimento. Esta grande variedade de formas de curvas de decaimento sugere uma multiplicidade de possíveis caminhos de recombinação e de processos da LOE (MCKEEVER, 2001).

Este método é muito utilizado para estudos com feldspato e com quartzo. No primeiro caso utiliza-se como fonte de estimulação feixes no comprimento de onda do infravermelho e no caso do quartzo utiliza-se luz azul (BØTTER-JENSEN, 2000).

### **2.2.2 LOE NO MODO PULSADO**

O método da LOE no modo pulsado foi descrito por Markey et al. (1995) e consiste em estimular com pulsos de luz amostras previamente irradiadas. A luminescência da amostra é detectada após os pulsos, mas não durante eles. Ao se ignorar a luminescência durante o pulso de estimulação pode-se prevenir o problema da discriminação entre a intensa luz de estimulação e a fraca luminescência emitida pela amostra. Dessa forma, tem-se a medida da luminescência sem a necessidade de uso de filtros para remover a luz de estimulação, o que permite uma melhor eficiência e, conseqüentemente, uma maior sensibilidade de detecção.

A largura dos pulsos é selecionada de modo que seja menor do que a vida média dos centros de luminescência do material da amostra (AKSELROD; MCKEEVER, 1999). O detector utilizado para a medida da luminescência é acionado de modo que registre apenas a luminescência entre os pulsos.

Na Figura 5 é apresentado o diagrama de funcionamento do sistema LOE no modo pulsado. Observa-se pela Figura 5 (a) que uma série de pulsos laser utilizados para estimulação da amostra tem a largura de 300ns. No intervalo de 15 $\mu$ s o detector permanece bloqueado e, durante o período de 235 $\mu$ s, o detector é aberto e a luminescência emitida pela amostra é registrada.

Na Figura 5 (b) é dado o detalhe da seqüência dos tempos.  $T_1$  é a largura do pulso,  $T_2$  é o período durante o qual o detector está bloqueado e  $T_3$  é o período em que a LOE é medida. Como a coleta de luz é efetuada em tempos defasados com o pulso de estimulação, não há necessidade do uso de filtros, e a discriminação entre o sinal LOE e a luz de estimulação é efetuada via resolução no tempo.

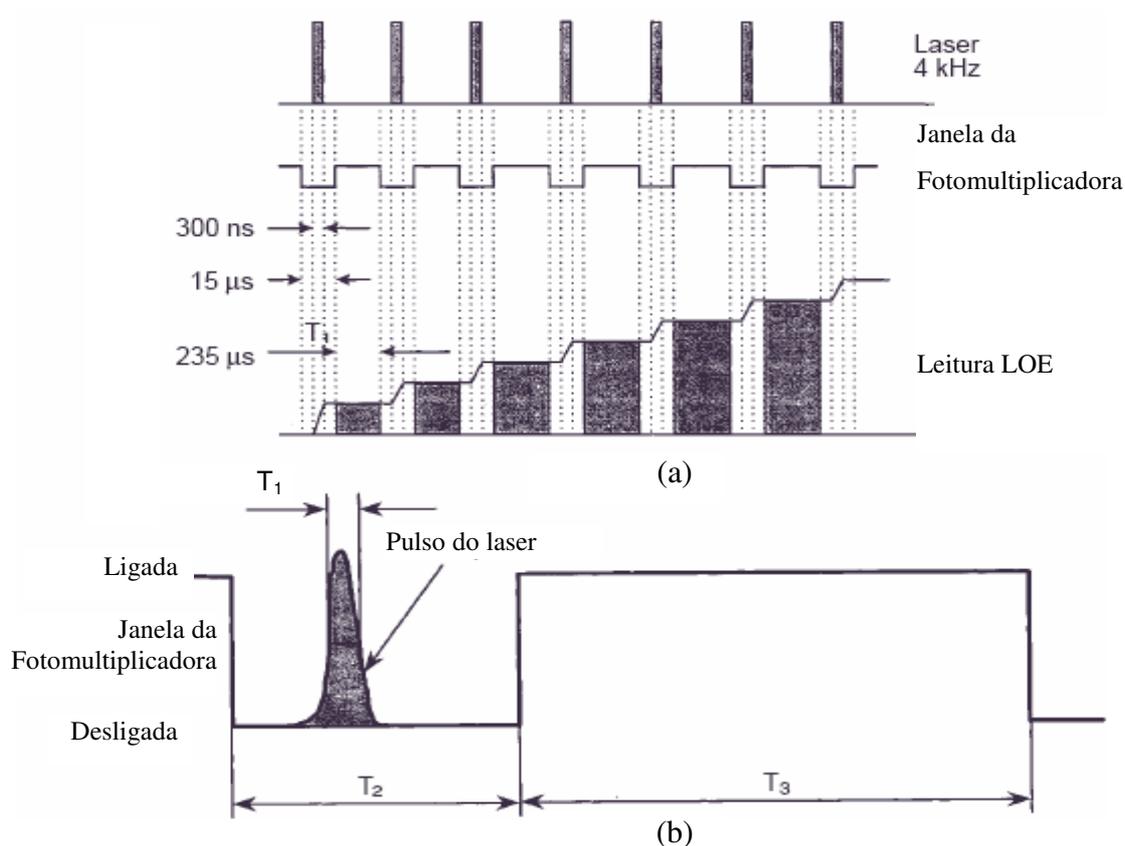


Figura 5 – Diagrama de funcionamento do sistema LOE no modo pulsado (AKSELROD; MCKEEVER, 1999).

Após a estimulação, ocorre a emissão da luminescência cuja intensidade  $I_{LOE}$  varia com o tempo segundo a equação:

$$I_{LOE} = I_0 \cdot e^{(-t/\tau)}$$

onde  $I_0$  é a intensidade inicial da emissão após o pulso e  $\tau$  é o tempo característico do material e é igual a  $f^{-1}$  onde  $f = \Phi \cdot \sigma$  onde  $\Phi$  é a intensidade da estimulação e  $\sigma$  é a seção de choque da foto-ionização.

Para as medidas no modo pulsado é necessário um prévio conhecimento do tempo  $\tau$  da luminescência do material em estudo, a fim de se ajustar a largura do pulso para tempos menores que  $\tau$ .

Esta técnica tem apresentado excelentes resultados para as amostras de  $Al_2O_3:C$  cuja  $\tau$  é de 35ms para temperatura ambiente (MCKEEVER, 2001). Na Figura 6 (I) é mostrado o gráfico do sinal LOE após um único pulso de estimulação em uma amostra de  $Al_2O_3:C$  irradiada com  $^{90}Sr/^{90}Y$  com dose de 40mGy e estimulada com feixe de laser de 150W por um tempo de 0,1s, onde a linha pontilhada indica o fim da estimulação. Tanto a taxa de decaimento quanto a intensidade da luminescência dependem do tipo de material da amostra utilizada. A emissão do  $Al_2O_3:C$  ocorre na faixa de 420nm, como mostrado na Figura 6 (II).

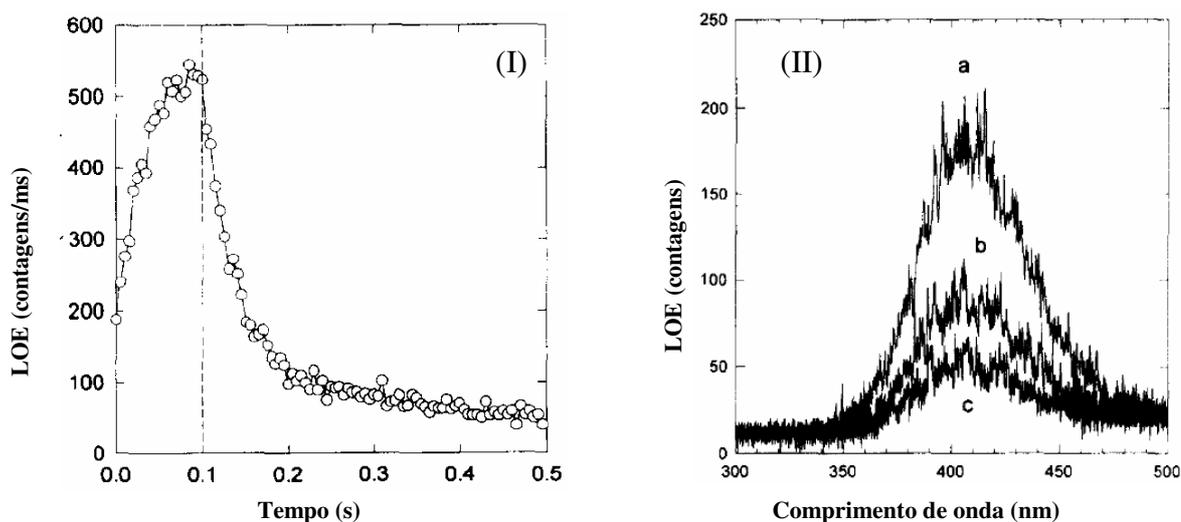


Figura 6 - Gráficos mostrando (I) o sinal LOE durante e após o pulso de laser e (II) a curva de emissão detectado em três diferentes momentos: (a) 0-0,5s, (b) 1,5-2s e (c) 3-3,5s (MARKEY et al., 1995)

Observa-se ainda pelo gráfico da Figura 6 (I), que o sinal LOE do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  consiste basicamente de duas componentes: uma rápida ( $\tau = 35\text{ms}$ ), atribuída aos elétrons que recombina diretamente com as lacunas, e uma lenta ( $400 < \tau < 5000\text{ms}$ ), decorrente da existência de armadilhas rasas na estrutura do óxido de alumínio onde os elétrons ficam por algumas frações de segundos antes de recombinarem com as lacunas (MARKEY et al., 1995).

A Figura 7 mostra a variação do sinal LOE com a temperatura da amostra, obtido com amostras de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiadas com  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  com uma dose de  $40\text{mGy}$ . A estimulação foi efetuada com laser de argônio de  $150\text{W}$  com pulso de largura de  $100\text{ms}$ . Observa-se pelos dados que o sinal LOE cresce com o aumento da temperatura e que ocorre uma variação na taxa do decaimento da luminescência em função da temperatura (MARKEY et al., 1995).

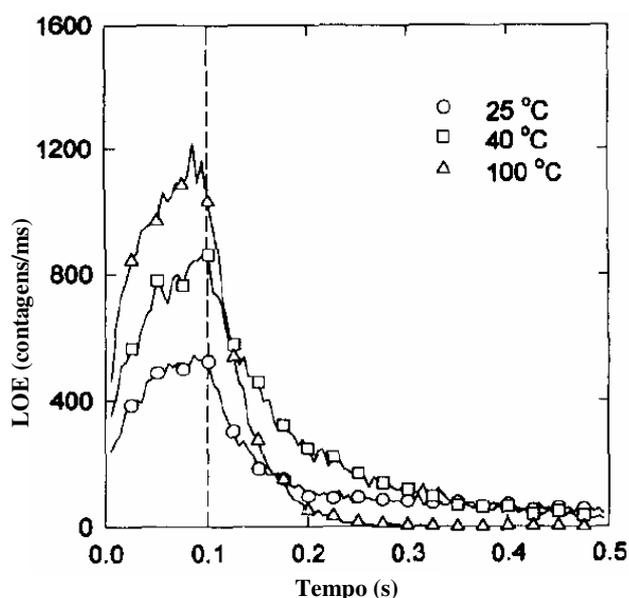


Figura 7 - Dependência da LOE com a temperatura para uma amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  estimulada com laser de argônio de  $150\text{W}$  com pulsos de  $100\text{ms}$  (MARKEY et al., 1995)

Estes dados mostram que a componente rápida é independente da temperatura enquanto que a componente lenta é fortemente dependente da temperatura, desaparecendo nas leituras pela LOE realizadas acima de  $50^\circ\text{C}$  (MARKEY et al., 1995).

Trabalhos de Bulur e Göksu (1997) mostram o efeito da largura do pulso da luz de estimulação na resposta LOE. A amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  foi irradiada com feixe beta de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  com 1Gy, a luz de estimulação utilizada foi de LEDs verdes e a largura do pulso variou de 100ms até 1000ms. Pelos dados, os autores observaram que a resposta da LOE do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  aumenta com a largura do pulso de estimulação, apresentando uma tendência de saturação a partir de pulsos de 1000ms.

Resultados melhores foram encontrados por Lee e Lee (2001) utilizando LEDs de emissão azul como fonte de estimulação. A amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  foi irradiada com  $^{137}\text{Cs}$  e dose de 1mGy. Os resultados estão apresentados na Figura 8 onde a amostra foi estimulada de 0 até 1000ms. Pelos dados observa-se que a partir de 500ms a luminescência atinge um valor máximo e permanece assim durante o resto da estimulação devido à saturação da intensidade de emissão da LOE. Portanto, para o uso de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  para dosimetria por luminescência opticamente estimulada foi proposto o uso de pulso de estimulação de 500ms para coleta da emissão LOE.

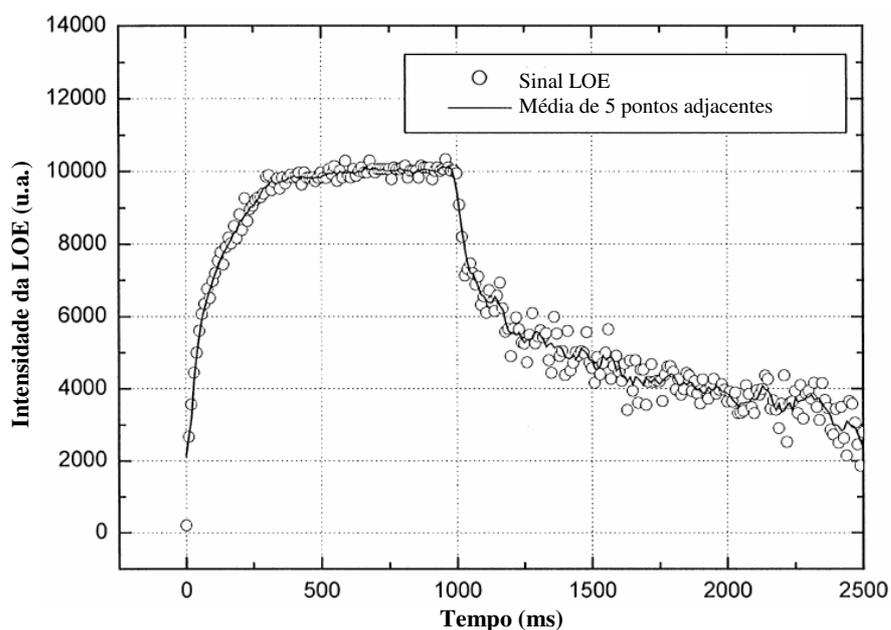


Figura 8 - Medidas do sinal LOE durante e depois da estimulação do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  mostrando uma saturação para tempos acima de 500ms (LEE; LEE, 2001)

Outro fator que afeta a resposta LOE no sistema de medidas pulsado é a intensidade da luz de estimulação. De modo geral, LEDs com emissão no azul ou no verde são utilizados para os estudos com  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ . Trabalhos realizados por Bulur e Göksu (1997) com amostras de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiadas com  $\text{Sr}^{90}/\text{Y}^{90}$  com 1Gy e estimuladas com LEDs verdes apresentaram uma variação linear na resposta LOE em função da corrente dos LEDs.

A Figura 9 mostra a variação do sinal LOE em função do tempo de medida para diferentes intensidades da luz de estimulação que é associada à corrente dos LEDs. A intensidade do sinal LOE integrado é diretamente proporcional à corrente. Portanto, para se obter a máxima eficiência de detecção sem comprometer o tempo de vida útil dos LEDs, deve-se trabalhar com a corrente nos LEDs próxima ao seu valor nominal de operação.

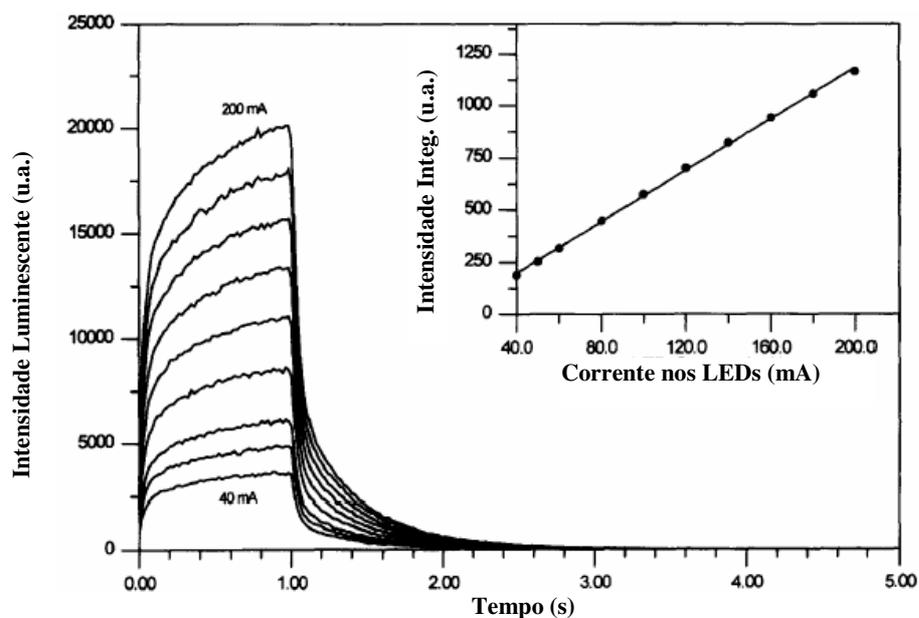


Figura 9 - Variação da luminescência com o aumento da corrente. O gráfico menor mostra a integral da luminescência em função da corrente (BULUR; GÖKSU, 1997)

## 2.3 EQUIPAMENTOS PARA MEDIDAS LOE

Muitos dos equipamentos para medidas LOE foram desenvolvidos a partir de adaptações nos equipamentos para TLD. Entretanto, com a crescente aplicação de dosimetria LOE na área geológica, esforços vêm sendo efetuados no sentido de desenvolver equipamentos exclusivos para medidas LOE, viabilizando assim a otimização do sistema e a redução dos custos adicionais necessários para se ter o sistema TL.

O equipamento utilizado para medidas da luminescência opticamente estimulada consiste basicamente de uma fonte luminosa utilizada para a estimulação ótica da amostra, um sistema eletrônico para captação da luminescência emitida e conversão em sinal elétrico e um sistema eletrônico para registro dos sinais elétricos.

A Figura 10 mostra um diagrama simplificado do sistema de leitura LOE. A seguir, serão discutidas as principais características de cada componente do equipamento para medidas LOE.

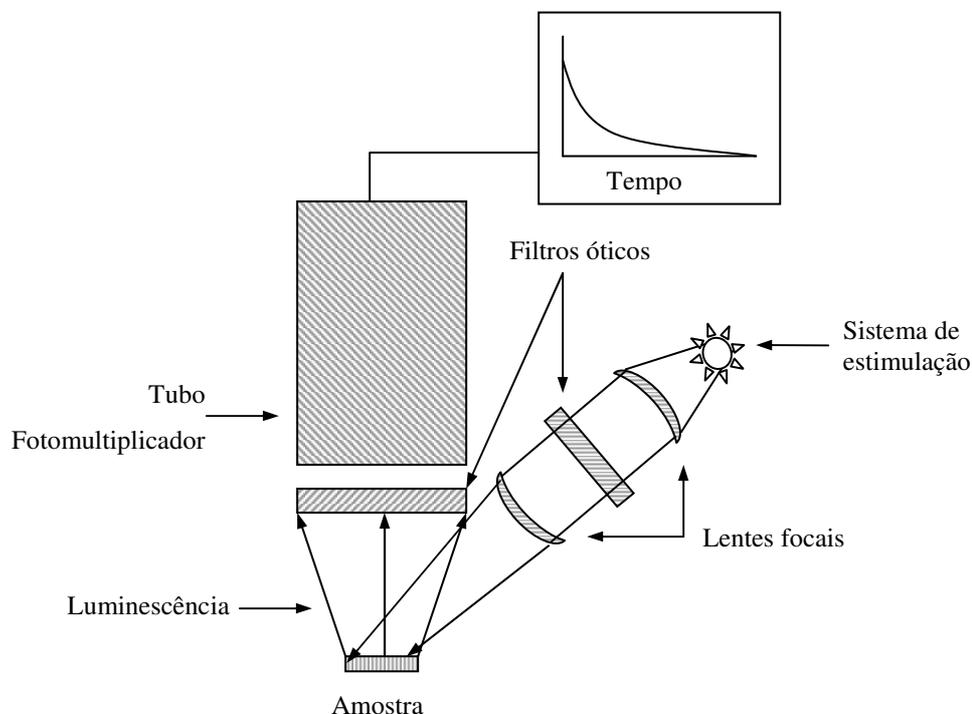


Figura 10 - Diagrama de um sistema de leitura do sinal LOE (adaptado de BØTTER-JENSEN, 2000).

### **2.3.1 SISTEMA DE ESTIMULAÇÃO ÓTICA**

O sistema de estimulação consiste de uma fonte de luz cujo comprimento de onda é selecionado em função do material a ser analisado.

Os primeiros estudos de dosimetria LOE foram efetuados na década de 1980 e utilizavam como materiais dosimétricos o feldspato e o quartzo. Os primeiros sistemas propostos por Huntley et al. (1988) utilizaram luz infravermelha para estimulação do feldspato, uma vez que a energia ressonante para a sua estimulação é em torno de 850nm.

Vários pesquisadores procuraram desenvolver sistemas de estimulação baseados em luz infravermelha. Dentre estes, Poolton e Bailiff (1989), Spooner et al. (1990) e Bøtter-Jensen et al. (1991) descreveram o uso de um conjunto entre 10 e 20 diodos emissores de luz infravermelha para estimulação do feldspato. Este tipo de LED possui um pico de emissão entre 870 e 880 nm, superior aos picos de ressonância infravermelha do feldspato, que é entre 845 e 850 nm, e, portanto, sua eficiência é baixa.

Com o desenvolvimento tecnológico surgiram LEDs emissores no infravermelho com pico em 840nm. Um conjunto de 30 a 40 LEDs destes fornecem uma densidade de potência<sup>2</sup> de 40-50mW/cm<sup>2</sup>, o que corresponde a um sinal luminoso adequado para uma série de aplicações. Entretanto, neste caso, a taxa de decaimento da luz emitida pela amostra é lenta, sendo necessários cerca de 50s para reduzir o sinal à metade (BØTTER-JENSEN, 2000).

Buscando minimizar este processo, o laboratório Risø, da Dinamarca, em colaboração com a empresa deste mesmo país, Nordic Laser Systems S.A., desenvolveram pesquisas para a fabricação de diodos lasers emissores de infravermelho no comprimento de onda de 830nm. Com o uso de lentes óticas adequadas foi possível ter uma área luminosa sobre a amostra de 1cm<sup>2</sup> (BØTTER-JENSEN, 2000).

---

<sup>2</sup> densidade de potência é a potência dividida pela área do feixe luminoso, dado em mW/cm<sup>2</sup>

A Figura 11 mostra a variação em função do tempo do sinal LOE do feldspato quando estimulado com o diodo laser com a densidade de potência de  $500\text{mW}/\text{cm}^2$  e com os LEDs convencionais de infravermelho com densidade de potência de  $40\text{mW}/\text{cm}^2$  (BØTTER-JENSEN; MURRAY, 1999).

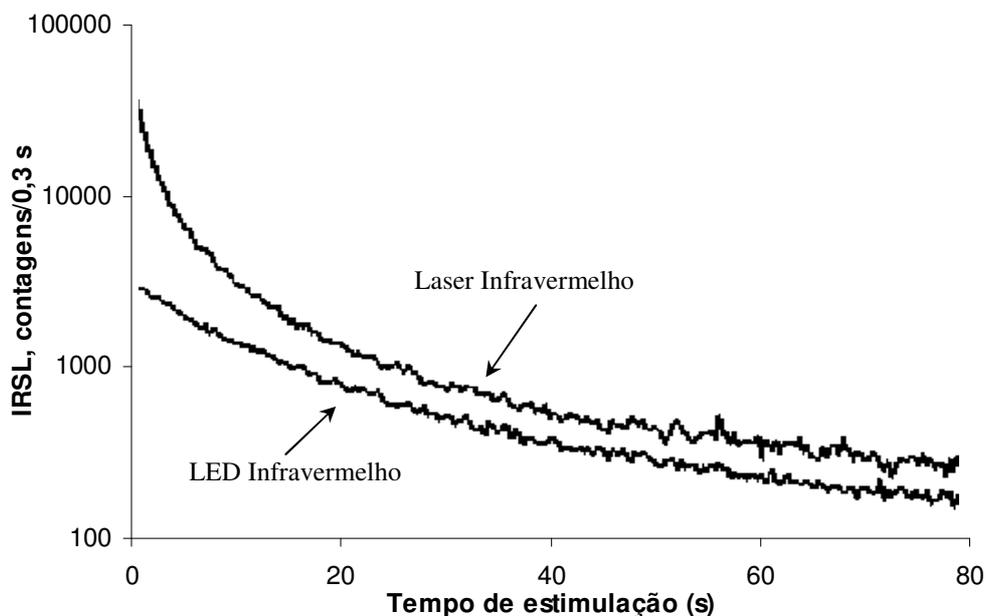


Figura 11 - Curvas de decaimento LOE de um feldspato estimulado com luz de um Laser infravermelho ( $500\text{ mW}/\text{cm}^2$ ) e LEDs infra-vermelhos ( $40\text{ mW}/\text{cm}^2$ ) (BØTTER-JENSEN; MURRAY, 1999)

Como era de se esperar, o laser, além de irradiar com uma maior densidade de potência, possui um comprimento de onda menor que o da luminescência da amostra de feldspato, contribuindo para uma maior eficiência na estimulação da luminescência por infravermelho.

No caso do quartzo, por este ser insensível à luz infravermelha, os pesquisadores voltaram-se para a estimulação utilizando a luz verde. Entretanto, o alto custo e os cuidados que se deve ter com o laser verde levaram ao desenvolvimento de um sistema de estimulação baseado em uma lâmpada incandescente que, através do uso de filtros óticos, emite luz no comprimento de onda do verde. Bøtter-Jensen e Duller (1992) foram os primeiros a desenvolverem um sistema compacto LOE de luz verde baseado em lâmpada de halogênio de baixa potência (Figura 12).

Uma lâmpada de halogênio e tungstênio de baixa potência (75W) filtrada para produzir um estímulo com comprimento de onda entre 420 e 550nm, entrega à amostra uma densidade de potência de 16mW/cm<sup>2</sup>. Essa lâmpada chega a uma estabilidade de 2% após 2 minutos de aquecimento inicial. A principal característica desta construção é que a lâmpada de halogênio não requer um sistema de resfriamento complexo e o pequeno filamento de 2x2 mm pode facilmente ser projetado sobre a amostra, provendo assim, uma boa transferência de energia para a mesma. O único problema encontrado nesta fonte de iluminação é o seu tempo de vida útil bastante curto, de apenas 30 a 40 horas.

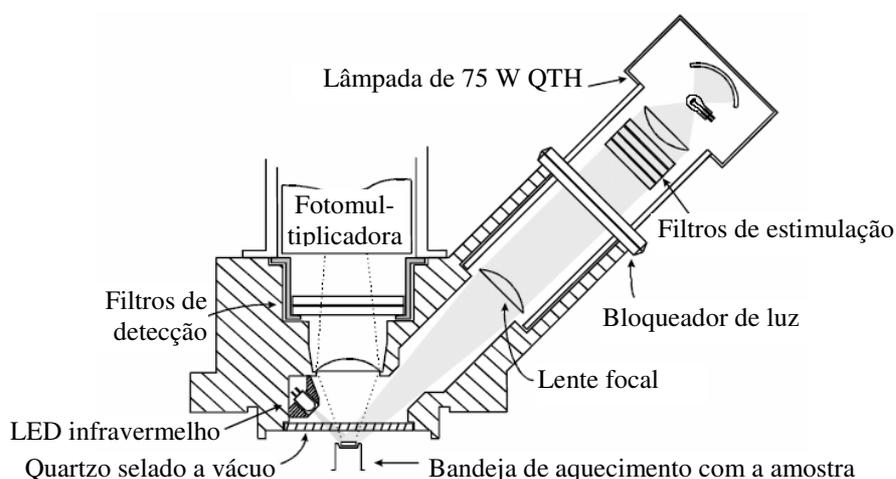


Figura 12 - Diagrama esquemático de um sistema LOE utilizando uma lâmpada de halogênio como fonte de luz de estimulação (BØTTER-JENSEN; DULLER, 1992)

Baseado na experiência com LEDs infra-vermelhos, os pesquisadores procuraram uma alternativa para medir a LOE do quartzo utilizando um conjunto de LEDs verdes. Mas a substituição do laser de argônio por LEDs não é simples, devido não somente à baixa intensidade luminosa, mas também pelo largo espectro de emissão dos LEDs, o que requer um sistema de filtração mais crítico para separação do sinal de luminescência emitido pela amostra com a luz de estimulação.

Apesar destas dificuldades, o potencial dos equipamentos com LEDs verdes para medir LOE para trabalhos de datação foi demonstrado por diversos pesquisadores. Galloway (1993) usando 16 LEDs verdes (III-V tipo TLMP7513), que operavam em paralelo com uma corrente de 20mA por LED, forneciam uma intensidade luminosa com densidade de potência de 0,2mW/cm<sup>2</sup> na amostra. O espectro do LED verde tem um pico em 565 nm. A luz

espalhada é bloqueada por uma combinação de filtros que incluem o HA3, 7-60, UG11, 7-59 (todos com 4 mm de espessura) e o BG39 (0,5 mm) que tem um pico de transmissão em 355 nm. Os fótons transmitidos são detectados por uma fotomultiplicadora 9635QA da EMI. Devido à baixa potência de iluminação, a taxa de decaimento da luminescência na amostra de quartzo era baixa, o que requeria um tempo de leitura da ordem de 200s para a luminescência inicial reduzir em 50%. Em um trabalho posterior, Galloway et al. (1997) testaram o mesmo aparato utilizando LEDs verdes de maior potência, o que permitiu baixar para 20 s o tempo necessário para reduzir a luminescência inicial em 50 %.

Huntley et al. (1991) publicaram em um dos seus trabalhos que a máxima estimulação do quartzo se dá com comprimento de onda na ordem de 360 à 380nm. Além disso, Spooner (1994) e Bøtter-Jensen et al. (1994) descobriram que existe uma relação exponencial entre a saída LOE do quartzo e a energia da luz de estimulação, isto é, quanto menor for o comprimento de onda da luz de estimulação, menor será o número de fótons necessários para estimular um dado sinal LOE.

Em decorrência dessas pesquisas, foram esperados benefícios consideráveis com a utilização de LEDs azuis na estimulação do quartzo (BØTTER-JENSEN et al., 1997, 1999a, 1999b). Os LEDs azuis utilizados foram NISHIA (tipo NSPB-500S) que, segundo o fabricante, têm um pico de emissão em 470 nm ( $\pm 20$  nm), um ângulo de emissão de 15° e uma potência de saída de 2 cd quando alimentados com uma corrente de 20 mA. A luminância de cada diodo pode variar por um fator maior que 2. O autor mediu um grupo de 100 diodos e constatou que 25% projetam uma densidade de potência de 2,5 mW/cm<sup>2</sup> a uma distância de 2 cm, em comparação à média de 1,9 mW/cm<sup>2</sup>. Os trabalhos mostraram que, para densidades de potência semelhantes, a luz de energia mais alta provida pelos LEDs azuis (470nm) dá, para uma ordem de magnitude, maior taxa de estimulação no quartzo que a convencional luz verde-azulada de uma lâmpada de halogênio filtrada por um filtro banda-larga.

Bøtter-Jensen et al. (1999) descreveram algumas configurações práticas (Figura 13 e Figura 14) e concluíram que LEDs azuis oferecem uma alternativa prática para as fontes de estimulação existentes, visto que os resultados são indistinguíveis, além da saída e a potência poderem ser controladas eletronicamente e instantaneamente.

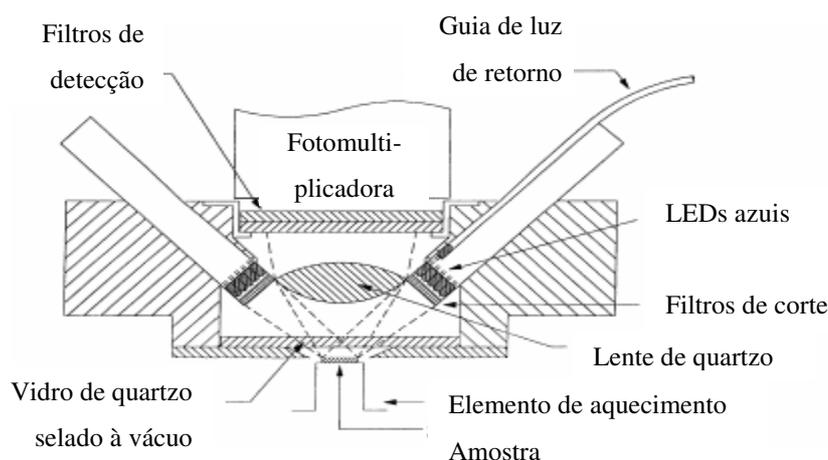


Figura 13 - Esquema de um detector LOE utilizando LEDs (BØTTER-JENSEN, 1997).

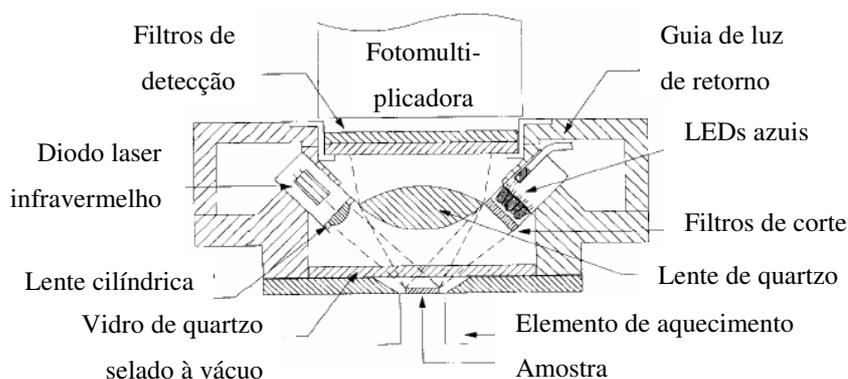


Figura 14 - Esquema de um detector LOE combinando LEDs azuis e diodo laser IR (BØTTER-JENSEN; MURRAY, 1999).

Para comparar os resultados obtidos pelos três tipos de fontes, Bøtter-Jensen et al. (1999a) usaram amostras de 10 mg de quartzo e irradiaram com uma dose de 50 Gy. Para estimulação óptica utilizaram (i) uma lâmpada de halogênio filtrada (420-550 nm) produzindo 28 mW/cm<sup>2</sup> na amostra, (ii) um conjunto de 6 LEDs azuis (Nichia NSPB 500 com pico de emissão em 470 nm) sem filtro produzindo 2,5 mW/cm<sup>2</sup>, (iii) um conjunto de 6 LEDs verdes (Nichia NSPG 500 com pico de emissão em 525 nm) com filtro passa-alta azul GG-475 produzindo 3 mW/cm<sup>2</sup>, (iv) um conjunto de LEDs azuis idêntico ao outro mas com um filtro GG-420 na frente reduzindo para 2 mW/cm<sup>2</sup>, (v) repetição do (i). Os filtros de detecção para todos os casos são dois U-340 (um coberto com óxido metálico). O decaimento inicial, que também é mostrado na Figura 15, foi calculado depois dos 0,4 s iniciais.

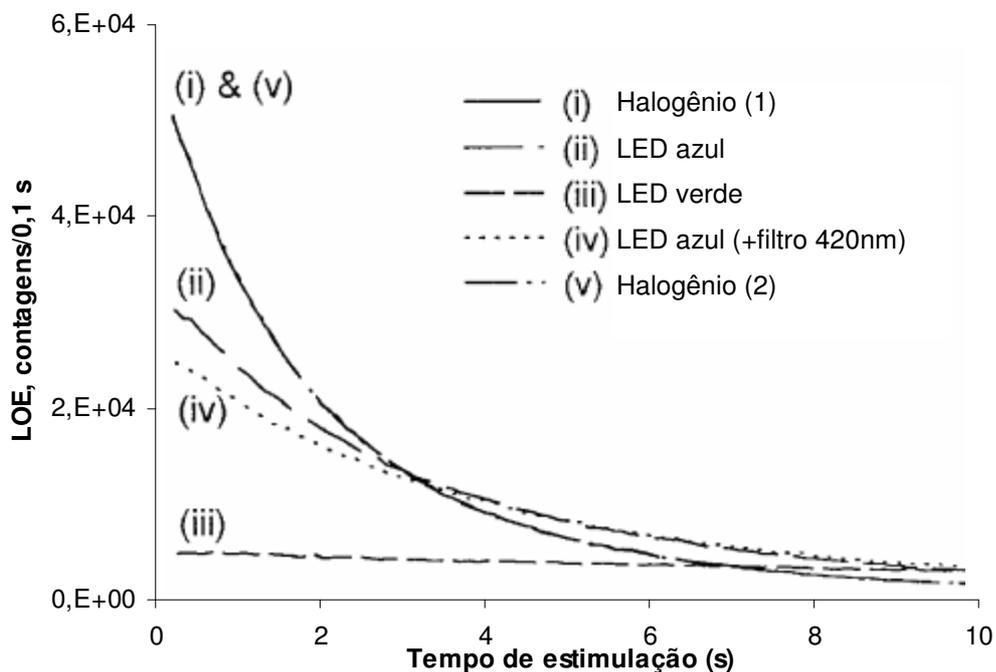


Figura 15 - Curva de decaimento para comparação entre 3 tipos de fontes de luz: Lâmpada de argônio, LED azul e LED verde (BØTTER-JENSEN et al., 1999a).

Em todas estas pesquisas o modo de estimulação utilizado era o modo contínuo, no qual media-se a luz emitida pela amostra simultaneamente ao processo de estimulação. Nesse modo, a discriminação entre a luz de estimulação e a de emissão é efetuada com o uso de filtros na frente da janela da fotomultiplicadora.

Em 1994, Sanderson e Clark propuseram o uso de um sistema de estimulação pulsado. Neste sistema a fonte de estimulação era um laser com pulsos de largura de 10ns e a emissão LOE era medida nos intervalos entre os pulsos, após cada estimulação. Eles substituíram o filtro da fotomultiplicadora por um bloqueador de luz (*shutter*) que cobria a janela da fotomultiplicadora sempre que o pulso do laser de estimulação incidia na amostra e abria quando cessava a estimulação, permitindo a entrada da luz da luminescência na fotomultiplicadora. Dessa forma, separaram a luz de estimulação do laser daquela emitida pela amostra, fazendo a leitura após o pulso de estimulação obtendo somente o sinal LOE, ignorando a luminescência emitida durante a estimulação. Este método de estimulação foi importante para o início das pesquisas com materiais de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ , para a qual se utiliza a luz azul para a estimulação.

### 2.3.2 SISTEMA DE DETECÇÃO DE LUZ

O detector da luminescência geralmente utilizado em um equipamento LOE consiste de um tubo fotomultiplicador cuja função é a de converter o feixe de luz em pulsos elétricos, cuja altura  $h$  está relacionada com a intensidade da luz  $I$ , emitida pela amostra. A fotomultiplicadora, esquematizada na Figura 16, consiste basicamente de um cátodo, um conjunto de dinodos e um anodo.

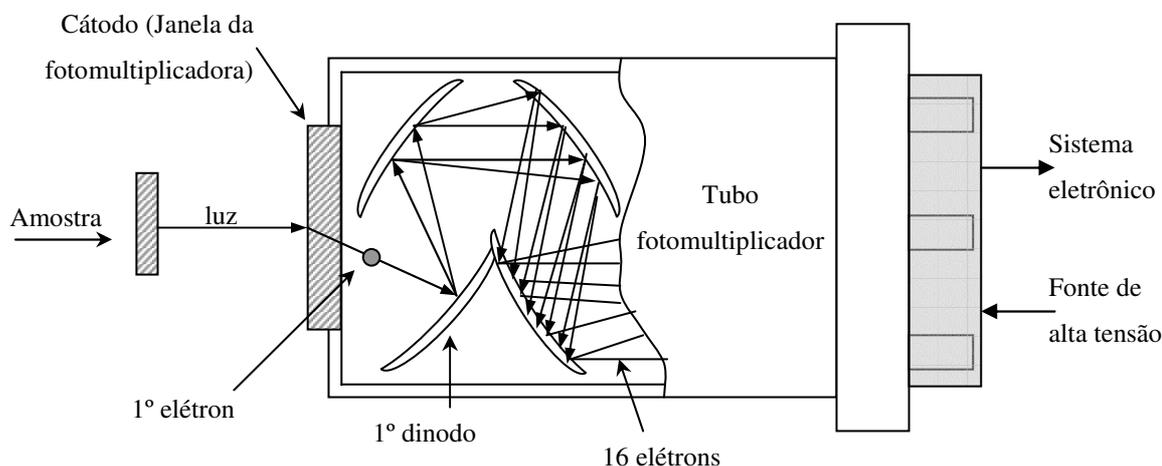


Figura 16 - Esquema dos processos ocorridos dentro do tubo fotomultiplicador

A luz emitida pela amostra, ao incidir no cátodo, arranca um ou mais elétrons que são acelerados na direção do 1º dinodo. Ao incidir no dinodo, cada elétron transfere sua energia cinética arrancando outros elétrons que são acelerados na direção do 2º dinodo. Devido às colisões com os eletrodos, os elétrons se multiplicam, dando origem a uma cascata de elétrons que são coletados pelo anodo formando a corrente que será captada pelo sistema eletrônico de contagem. A intensidade da corrente é proporcional à luz emitida pela amostra que, por sua vez, é proporcional à dose recebida. Em geral, o fator de multiplicação entre dois dinodos consecutivos está entre 2 e 5, dependendo da diferença de potencial aplicada entre eles.

## **2.4 DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES UTILIZANDA LOE**

As aplicações da LOE estão basicamente relacionadas nas seguintes áreas:

- a) Dosimetria retrospectiva;
- b) Dosimetria individual;

### **2.4.1 DOSIMETRIA RESTROSPECTIVA**

Esta modalidade de dosimetria envolve a aplicação em datação e em dosimetria de acidentes. Nestas aplicações procura-se, através de medidas LOE em amostras naturais de quartzo ou feldspato, estimar a dose recebida devido à exposição à radiação natural no caso da datação, ou à radiação artificial após um acidente nuclear no caso da dosimetria de acidentes.

O procedimento de datação envolve a extração de uma amostra de quartzo ou feldspato natural cuja idade se deseja determinar. Uma pequena alíquota do material é então estimulada com a luz de comprimento de onda adequado (no caso do quartzo é o verde ou azul e para o feldspato é o infravermelho) e a luminescência emitida pelo material é medida. Essa luminescência é devida à irradiação natural que a amostra recebeu durante o período em que esteve protegida da luz solar.

Em seguida, a amostra recebe um tratamento com estimulação à luz durante um período de 16h (TATUMI et al., 2003) a fim de eliminar qualquer sinal LOE. Após este tratamento, a amostra é irradiada com uma dose conhecida no  $^{60}\text{Co}$  e o sinal LOE é medido novamente. Este procedimento é repetido várias vezes com diferentes doses. A partir dos resultados obtidos é traçada a curva do sinal LOE em função da dose (Figura 17).

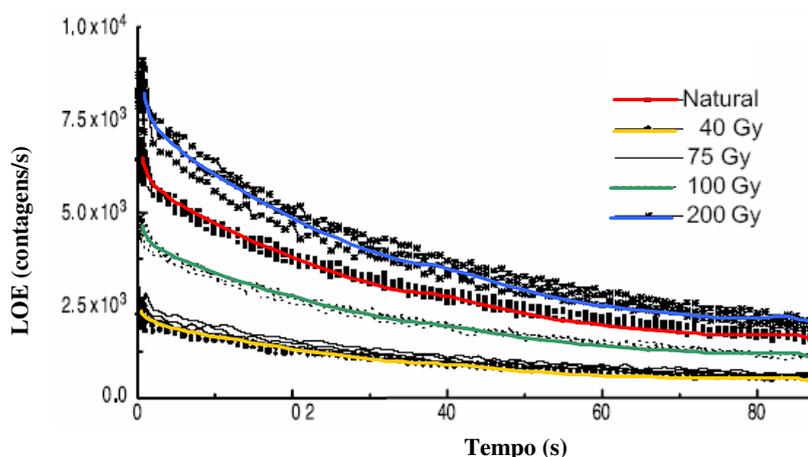


Figura 17 - Sinal LOE de uma amostra de feldspato em função do tempo de estimulação comparando a dose natural encontrada na amostra com diferentes doses artificiais no  $^{60}\text{Co}$  (TATUMI et al., 2003)

Com a curva de calibração e com o valor da leitura LOE obtida com a amostra natural pode-se estimar a dose absorvida. Para estimar a idade da amostra que corresponde a esta dose, utiliza-se o valor da taxa de dose anual na região aonde foi coletada a amostra em estudo. Dividindo a dose natural que havia na amostra pela taxa de dose calcula-se a sua idade.

Por exemplo, os dados do gráfico da Figura 18 correspondem a uma amostra de feldspato do sudeste brasileiro que foi estimulada com LEDs infra-vermelhos (880nm). A dose natural encontrada correspondente ao sinal LOE integrada foi de 127Gy e a taxa de dose anual na localidade em que essa amostra foi coletada é de 2631  $\mu\text{Gy}/\text{ano}$ . Assim, estima-se que a amostra tenha uma idade de 48,3 mil anos (TATUMI et al., 2003).

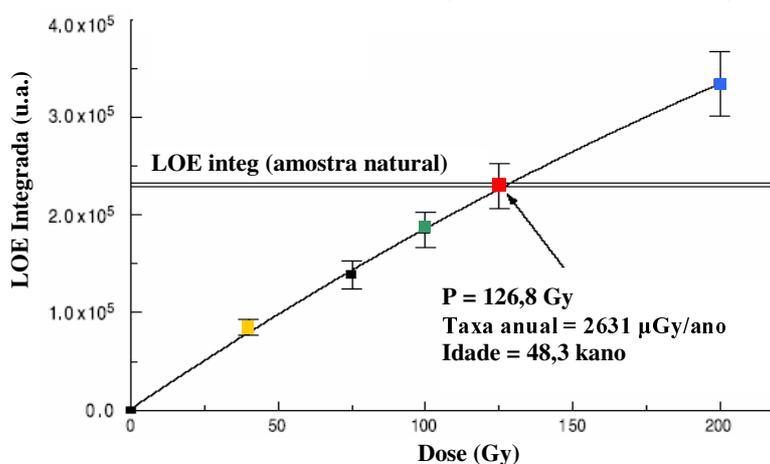


Figura 18 - Curva integrada da LOE em função das diferentes doses onde P é a dose natural medida na amostra (TATUMI et al., 2003)

## 2.4.2 DOSIMETRIA INDIVIDUAL

Para dosimetria individual são utilizados principalmente os dosímetros de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ . Este é um campo aberto às pesquisas para novos materiais LOE com propriedades dosimétricas. Diversos trabalhos têm mostrado a resposta LOE de cristais de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  para radiação  $\beta$ ,  $\gamma$  e raios-x. A Figura 19 mostra os resultados obtidos por Lee; Lee (2001) com amostras de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiadas com  $^{137}\text{Cs}$ .

No gráfico são apresentados os resultados da intensidade máxima do sinal LOE (pico) bem como o resultado da integração da luminescência emitida durante 1s quando a amostra foi estimulada com luz azul com pulso de 500ms. Pelos dados observa-se o comportamento linear da resposta das amostras de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  em função da dose dentro do intervalo de 0,5mGy a 1Gy. Neste experimento o valor mínimo da dose detectável, definido como três vezes o desvio padrão do sinal de fundo, foi de 0,1mGy.

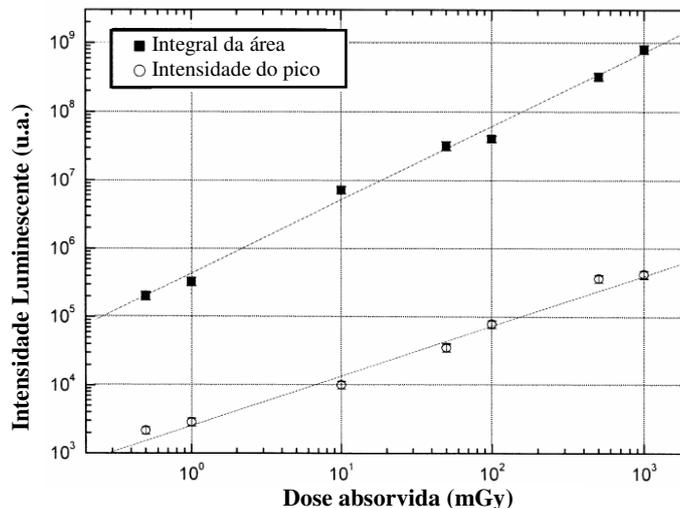


Figura 19 – Resposta à dose de radiação do dosímetro de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  em função da dose absorvida de  $^{137}\text{Cs}$  (LEE; LEE, 2001)

Trabalhos de McKeever (2001) mostram que é possível chegar a limites de 5  $\mu\text{Gy}$ . Os dosímetros de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  são atualmente utilizados pela empresa Landauer Inc<sup>3</sup> sob o nome de Luxel.

<sup>3</sup> A representante da Landauer Inc no Brasil é a empresa SAPRA

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento desenvolvido neste trabalho consiste de um sistema de estimulação ótica, uma bandeja para suporte da amostra, um bloqueador de luz (*shutter*), uma fotomultiplicadora e um sistema eletrônico de aquisição do sinal. A Figura 20 mostra esquematicamente os componentes do equipamento.

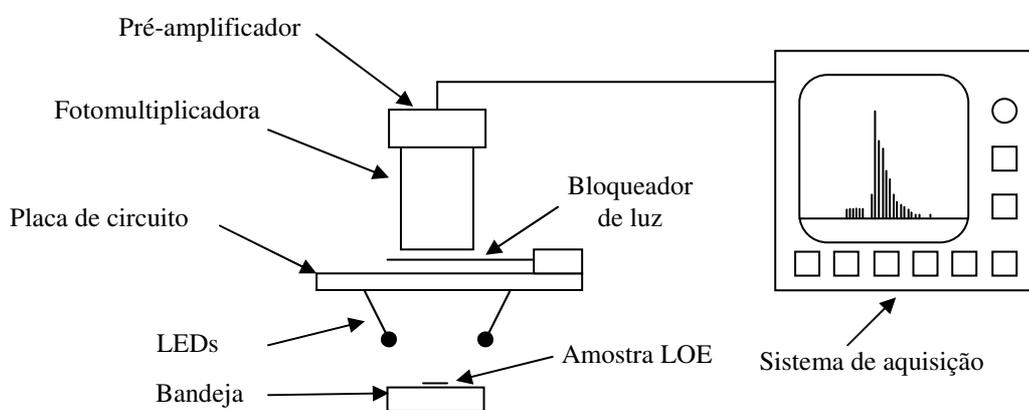


Figura 20 - Esquema do sistema para medidas da luminescência opticamente estimulada

O sistema de estimulação da amostra consiste de um conjunto de diodos emissores de luz (*LED*) cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características dos LEDs utilizados no equipamento de medidas da LOE para a condição de teste com  $I_{led} = 20\text{mA}$  (dados do fabricante)

Característica	Valor típico
Intensidade luminosa	2500 mcd
Pico do comprimento de onda	470 nm
Ângulo de divergência	20°

A escolha dos LEDs com emissão na faixa do azul (470nm) deve-se ao fato de que se pretende utilizar o equipamento desenvolvido para medidas da LOE de amostras de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  e quartzo, e, segundo a literatura (LEE; LEE, 2001), o feixe de luz neste comprimento de onda é o que apresenta uma melhor eficiência da resposta da LOE destes materiais.

O arranjo luminoso é formado por 20 LEDs azuis de alto brilho, que foram montados em uma placa de circuito impresso vazada no centro formando um círculo, a qual foi fixada no suporte da fotomultiplicadora. Com esse arranjo, a luz de cada um dos LEDs é direcionada focalizando o centro da bandeja onde a amostra é depositada, conforme pode ser visto na Figura 20.

A luz emitida pela amostra irradiada devido à estimulação com o feixe de luz dos LEDs é coletada pela fotomultiplicadora bialcalina Hamamatsu, modelo R980, a qual tem a máxima eficiência em 420nm. O espectro de resposta da fotomultiplicadora é mostrado na Figura 21 e suas principais características são apresentadas na Tabela 2.

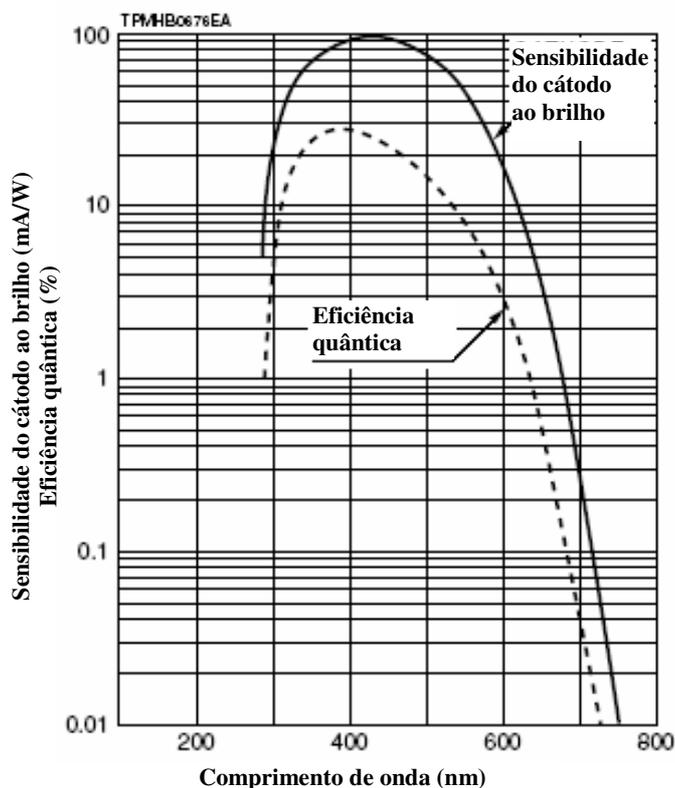


Figura 21 – Espectro de resposta típico da fotomultiplicadora Hamamatsu R980 (HAMAMATSU, 2001)

Tabela 2 - Principais características da fotomultiplicadora utilizada no equipamento LOE (HAMAMATSU, 2001)

<b>Característica</b>	<b>Valor típico</b>
Comprimento de onda da resposta máxima	420 nm
Área efetiva mínima do fotocátodo	34 mm de diâmetro
Nº de estágios no dinodo	10
Alta tensão máxima	1250 V
Ganho	$3,7 \times 10^5$

O processo utilizado para a estimulação da amostra e a coleta da luz foi o do sistema de estimulação pelo modo pulsado. Este modo traz como principal diferença em relação ao modo de estimulação contínua, a substituição do uso do filtro ótico por um sistema bloqueador de luz, a fim de separar a luminescência emitida pela amostra daquela emitida pelos LEDs.

O sistema bloqueador consiste de um dispositivo opaco, localizado na frente da fotomultiplicadora mostrado na Figura 20. Ele é acoplado a um motor elétrico que possibilita o seu rápido deslocamento para fechamento e abertura da passagem da luz na janela da fotomultiplicadora.

O funcionamento do bloqueador de luz se dá da seguinte forma: enquanto a luz dos LEDs está incidindo na amostra, o bloqueador está fechado, impedindo a entrada da luz na fotomultiplicadora. Decorrido um tempo de estimulação pré-fixado, o bloqueador abre permitindo que a luz emitida pela amostra seja vista pela fotomultiplicadora.

Um circuito eletrônico de controle faz com que os LEDs acendam e apaguem em sincronia com o bloqueador de luz. O diagrama de tempo da Figura 22 mostra o sincronismo dos LEDs com o bloqueador de luz. O movimento do bloqueador de luz e o seu sincronismo com o acionamento dos LEDs é conseguido através de um circuito eletrônico que foi desenvolvido neste trabalho, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 23.

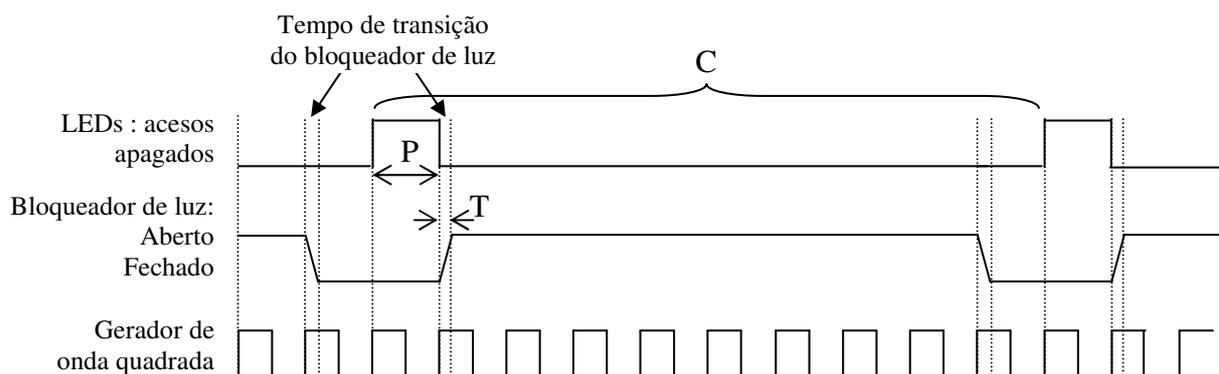


Figura 22 – Esquema do sincronismo do bloqueador de luz com os LEDs controlados pelo gerador de onda quadrada

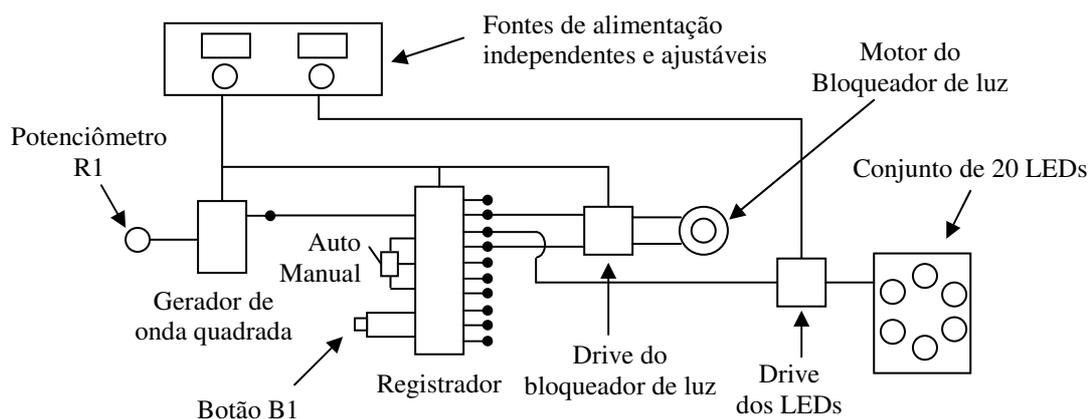


Figura 23 - Esquema do circuito eletrônico de controle de sincronismo entre os LEDs e o bloqueador

O sistema consiste de um gerador de onda quadrada, baseado no CI 555, um registrador de 10 passos formado por um CI 4017, e os drives de saída para os LEDs e para o bloqueador de luz. Uma fonte de tensão ajustável alimenta todo o circuito. Uma segunda fonte, também ajustável, gera uma tensão de alimentação somente para os 20 LEDs.

É possível controlar o tempo do pulso de luz através de um potenciômetro multivolts R1, que permite uma variação do tempo entre 100 e 1000ms. O circuito ainda contém um botão selecionador para dois modos: automático e manual. No modo automático, o processo é cíclico sendo que o tempo do ciclo está ligado ao tempo do pulso na proporção de 1/10, variando de 1 até 10s. No modo manual, existe o botão (B1) no painel que deve ser pressionado para iniciar um único ciclo completo. Quando é acionado o botão B1 inicia-se o

ciclo de funcionamento do circuito eletrônico controlador. O período de duração do pulso (P) produzido pelo gerador de onda quadrada depende do ajuste R1.

Após o segundo pulso, o bloqueador é fechado e no terceiro pulso, os LEDs são acesos. O tempo em que os LEDs permanecem acesos (P) corresponde a um ciclo completo do gerador (P). Assim que os LEDs apagam, o bloqueador é aberto em um tempo de transição (T), permanecendo assim pelo tempo desejado quando o equipamento opera no modo manual até que o botão B1 seja acionado, ou pelo tempo correspondente a oito pulsos, quando o equipamento opera no modo automático, onde o ciclo completo (C) é igual a 10 pulsos (P).

A saída da fotomultiplicadora é acoplada à entrada do multicanal Canberra serie 20, com 4096 canais, operando no modo mcs (*multichannel scaler*). Neste modo de operação, cada canal do multicanal armazena o número de pulsos produzidos na saída da fotomultiplicadora, durante um intervalo de tempo pré-fixado. A imagem obtida na tela do multicanal após a estimulação de uma amostra irradiada é apresentada na Figura 24. Este gráfico mostra como varia a resposta da fotomultiplicadora em função da intensidade da luminescência incidente na sua janela em função do tempo decorrido após a estimulação ótica da amostra.

Fixados a corrente dos LEDs e o tempo em que esses permanecem acessos (P), a intensidade e o tempo da estimulação ótica tornam-se constantes. Para as aplicações de dosimetria por estimulação ótica é efetuada a integral da curva de luminescência (área rachureada da Figura 24) e o valor dessa integral é proporcional à dose de radiação recebida pela amostra.

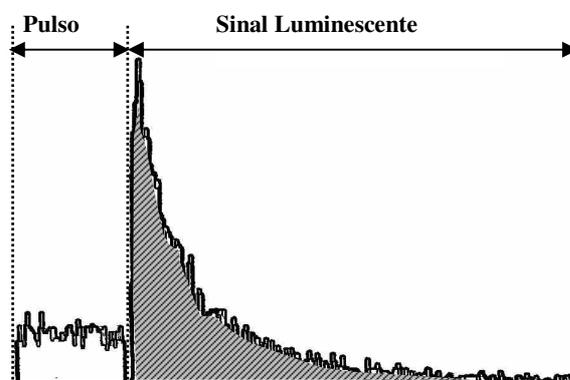


Figura 24 - Intensidade da luminescência de uma amostra após um pulso de luz, em função do tempo

Para a reutilização da amostra irradiada, após a leitura LOE, utilizou-se o equipamento fotopolimerizador que emite luz a partir de uma lâmpada de halogênio. A amostra foi exposta por 50s e em seguida foi efetuada a leitura LOE. Observou-se pelos dados da imagem de que com este tempo havia total esvaziamento das armadilhas óticas para a faixa de doses estudadas (menores que 1Gy).

A Figura 25 mostra a imagem do equipamento desenvolvido ao centro, as fontes de tensão que alimentam os LEDs e os circuitos à esquerda, o pré-amplificador e o multicanal à direita.



Figura 25 – Fonte de tensão dupla (esquerda) que alimenta o equipamento para LOE (centro) que está acoplado a um multicanal (direita)

Depois do equipamento ter sido montado, testes foram efetuados de modo a avaliar:

- a) A estabilidade e reprodutibilidade do sistema de controle de luz;
- b) A influência do sistema de estimulação ótica na resposta LOE;
- c) A aplicação do equipamento desenvolvido para medida do sinal LOE com  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ .

### 3.1 ESTABILIDADE E REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA DE CONTROLE DE LUZ

O tempo decorrido entre o apagamento dos LEDs e a abertura total do bloqueador de luz (T) é um dos pontos críticos do equipamento, visto que o máximo da curva de luminescência acontece exatamente no fim da estimulação. Então, quanto menor for o tempo de abertura do bloqueador de luz, maior será a captação dessa parte do sinal. Como foi visto anteriormente, o sistema eletrônico é o responsável pelo acionamento dos LEDs e pela abertura e fechamento do bloqueador de luz. Para o seu adequado funcionamento é necessário verificar a estabilidade da frequência dos pulsos produzidos pelo gerador, bem como o seu sincronismo com os LEDs e o bloqueador de luz.

Inicialmente procurou-se medir a frequência e a largura da onda quadrada produzida pelo gerador. Para tanto, o osciloscópio Minipa modelo MO-1150D foi conectado na saída do gerador e as medidas foram efetuadas para os valores de tensão de alimentação variando no intervalo de 4 a 7 volts.

Para verificar o sincronismo entre o apagamento dos LEDs e a abertura do bloqueador, medidas foram efetuadas ao longo de dois ciclos completos utilizando-se uma fonte de luz de baixa intensidade para simular uma luminescência constante. Para tanto, a fotomultiplicadora foi conectada ao multicanal e, com o equipamento operando no modo automático, foram efetuadas medidas do sinal produzido pela fotomultiplicadora ao longo dos ciclos. Através da imagem produzida na tela do multicanal (Figura 26) foi possível obter o tempo em que os LEDs permanecem acessos (P), o tempo decorrido entre o apagamento dos LEDs e a abertura total do bloqueador (T) e o tempo correspondente a um ciclo completo (C). Foram efetuadas 10 medidas onde a média e o desvio padrão foram calculados para cada um dos três parâmetros (P, T e C).

Observa-se pelos dados de que após o início do ciclo, durante o tempo de estimulação (P) em que os LEDs são acesos e o bloqueador está fechado, há uma contagem que corresponde ao sinal produzido pela fotomultiplicadora devido à parte da luz dos LEDs que ainda consegue atravessar o material do sistema bloqueador. O valor médio da integral é de 1200 contagens para um tempo de estimulação de 520 ms, que é o tempo de duração dos LEDs acesos, identificado na Figura 26 como P.

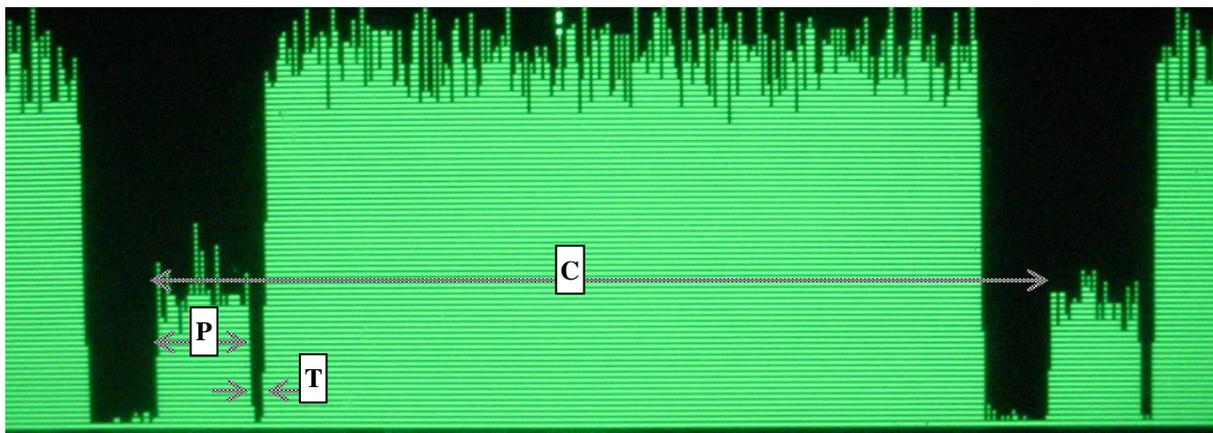


Figura 26 - Imagem da tela do multicanal para as medidas do tempo do pulso (P), tempo de transição (T) para a abertura total do bloqueador e o tempo do ciclo (C) do equipamento LOE no modo automático

Após o pulso, o bloqueador leva um tempo T para abrir totalmente. O sinal produzido pela fotomultiplicadora, após o tempo T, é devido à incidência da fonte de luz que simula a luminescência constante, uma vez que o bloqueador está aberto.

### 3.2 INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE ESTIMULAÇÃO ÓTICA NA RESPOSTA LOE

Como foi visto antes, a luminescência por estimulação ótica de qualquer material depende do comprimento de onda da fonte de estimulação, da sua intensidade luminosa bem como do tempo de estimulação. No nosso equipamento a fonte luminosa é composta por LEDs com comprimento de onda de 470nm e portanto é fixa. A variação da resposta LOE dependerá apenas do tempo de estimulação ótica e da intensidade luminosa dos LEDs.

Para efetuar este estudo, foi utilizado o dosímetro  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  que foi encapsulado em um invólucro plástico preto fino e exposto a um feixe de radiação gama do  $^{137}\text{Cs}$ , no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMRI) do DEN, com uma dose de 30mGy. A fonte de  $^{137}\text{Cs}$  tinha uma taxa de kerma no ar, a 1m, de 44,1mGy/h em dezembro de 2005. Antes de cada irradiação, a amostra foi exposta à luz do fotopolimerizador por 50s, em ambos os lados, visando com isso, esvaziar as armadilhas óticas.

Para o estudo do efeito do tempo de estimulação, variou-se apenas o tempo de estimulação entre 100ms e 600ms. As tensões dos LEDs e do circuito foram fixadas em 7V.

O sinal LOE integrado corresponde ao somatório da luminescência no intervalo de 2s após o fim do pulso de estimulação. Com a configuração do tempo de contagens por canal do multicanal (*dwell*) ajustada em 10ms/canal, os 2s correspondem a uma integração do sinal LOE de 200 canais (área rachureada da Figura 27).

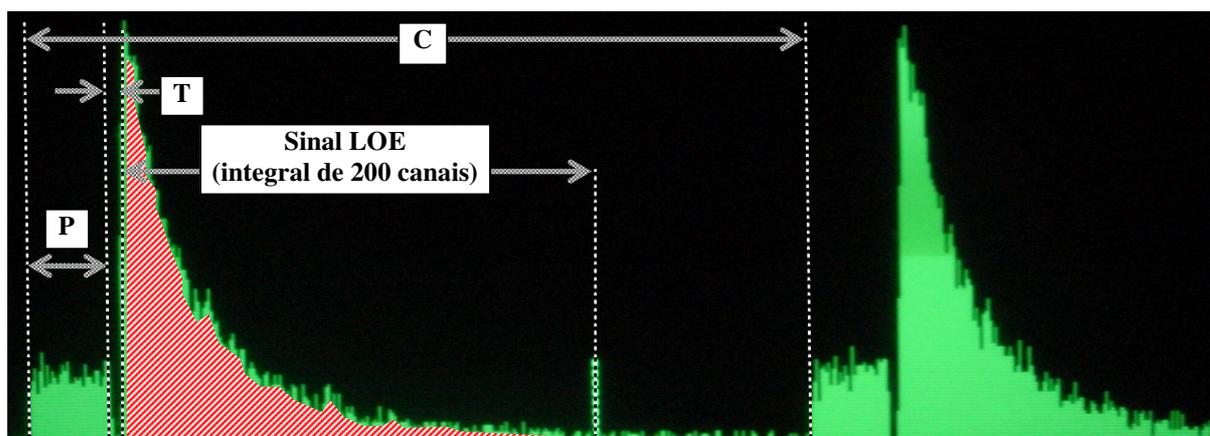


Figura 27 - Imagem da tela do multicanal para as medidas do tempo do pulso (P), tempo de transição (T) para a abertura total do bloqueador e o tempo do ciclo (C) do equipamento LOE no modo automático. O sinal LOE é a integração das contagens de 200 canais após o pulso de estimulação.

### 3.3 APLICAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA MEDIDA DO SINAL LOE COM $Al_2O_3:C$

Para avaliar o uso do equipamento desenvolvido para dosimetria LOE, foram efetuadas exposições do dosímetro de  $Al_2O_3:C$  com feixes de raios-x e radiação gama do  $^{137}Cs$  no LMRI.

Antes, porém, analisou-se o comportamento do sinal LOE após sucessivos pulsos para diferentes doses de irradiação. Para isso, irradiou-se a amostra de  $Al_2O_3:C$  com  $^{137}Cs$  com doses de 300, 600 e 1000 mGy. O tempo do pulso de estimulação foi fixado no valor máximo do equipamento ( $P = 1s$ ), visando, com isso, diminuir a quantidade de pulsos necessários para o decaimento do sinal LOE. O sinal LOE obtido após o estímulo foi integrado para o intervalo de tempo de 2s.

A estimulação foi repetida a cada 1 minuto de intervalo entre os pulsos para evitar a sobreposição do sinal LOE. Com isto traçou-se o gráfico da intensidade da integral da intensidade de luz emitida após cada pulso de estimulação em função do número de pulsos. A partir destes dados foi possível avaliar o percentual de redução da intensidade luminosa em função do número de pulsos de estimulação.

Medidas foram repetidas utilizando-se pulsos de estimulação com largura de 520ms e a amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiada com  $^{137}\text{Cs}$  com 100mGy. Analisando os dados com os dois tipos de pulsos foi possível verificar que após a estimulação com três pulsos o percentual de redução da luminescência integrada decaiu menos que 4%. Diante deste comportamento e visando aumentar a sensibilidade de detecção do sistema, decidiu-se utilizar a soma dos resultados de luminescência produzida pela estimulação de três pulsos consecutivos. A cada pulso de 520ms foi medido o sinal LOE e foi efetuada a sua integração durante o intervalo de 2s. A soma dos sinais integrados correspondentes a três pulsos foi utilizada como resposta LOE do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  e foi relacionada com a dose da radiação x e gama.

Para tanto, a amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  foi encapsulada com plástico preto e inicialmente exposta a um feixe de raios-x com 75kV, filtro de 2,5mm de Al, de um equipamento de raio-x diagnóstico marca EDR modelo 750B. A amostra foi posicionada no ar, a 50cm do foco. Junto com ela, foi posicionada uma câmara de ionização da Radcal, modelo PTW.LS-01 série 24, a fim de determinar a dose recebida. Variando-se o tempo de exposição, o conjunto amostra e câmara de ionização foi irradiado com doses entre 4 e 16mGy.

Medidas também foram efetuadas com feixes do  $^{137}\text{Cs}$ . Para tanto, as amostras foram irradiadas no LMRI. A amostra foi irradiada com doses entre 10 e 80mGy, a uma distância de 1m da fonte.

A leitura LOE foi efetuada no modo manual com um pulso de estimulação de 500ms e um tempo de medida de 2s após o fim do pulso. A integração do sinal LOE e da leitura do ruído de fundo foi efetuada ao longo de 200 canais do multicanal. A soma dos sinais LOE de três pulsos de estimulação foi associada com o valor da dose e os gráficos foram traçados.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ESTABILIDADE E REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA DE CONTROLE DE LUZ

A Figura 28 mostra a imagem obtida no osciloscópio dos pulsos produzidos pelo gerador de pulsos que é utilizado tanto para acionar a abertura e fechamento do bloqueador de luz quanto para a ligação e o apagamento dos LEDs.

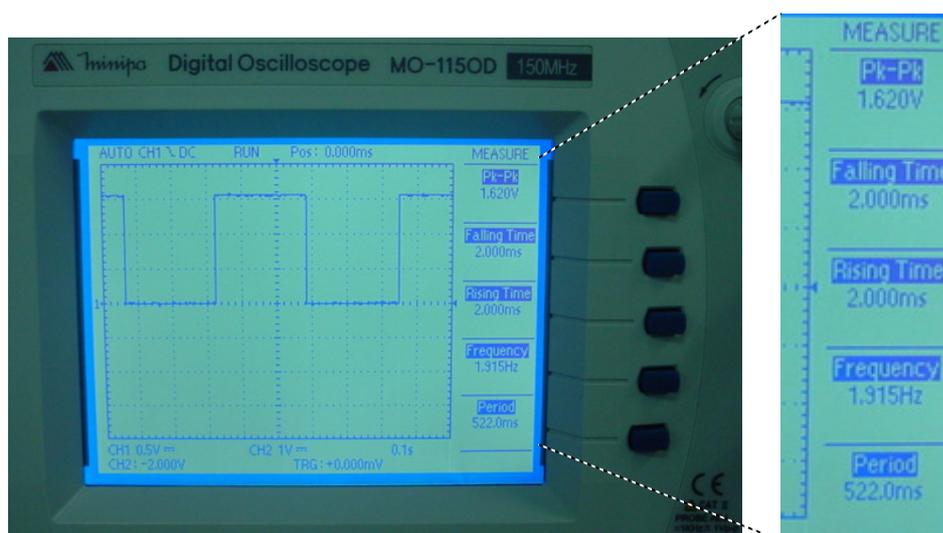


Figura 28 - Imagem da tela do osciloscópio mostrando a onda quadrada produzida pelo gerador de pulsos

Na Tabela 3 são apresentados os dados da variação da tensão de alimentação com a frequência de oscilação do gerador. Observa-se pelos dados que a largura do pulso varia entre 528ms e 520ms para tensão entre 4 e 7V. A partir da tensão de 6V, a largura dos pulsos torna-se constante e independente da tensão de alimentação. Para realização das medidas foi selecionada a tensão de alimentação de 7V.

Tabela 3 - Variação da frequência de oscilação em função da tensão de alimentação do circuito eletrônico

<b>Tensão (V)</b>	<b>Frequência (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Período da onda (ms)</b>	<b>Amplitude da onda (V)</b>
4,0	1,893	528	1,52
5,0	1,908	524	1,54
6,0	1,923	520	1,56
7,0	1,923	520	1,56
8,0	1,915	522	1,62

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos com 10 leituras consecutivas com a fonte de alimentação fixada em 7V. Os dados mostram que a variação no tempo T é menor que 4%, evidenciando a reprodutibilidade no tempo de abertura do bloqueador. Com relação ao tempo de estimulação, observa-se que o erro percentual obtido nas 10 medidas é de 0,26%, o que evidencia a estabilidade do sistema de controle da luz dos LEDs que é utilizado para estimular a amostra durante as medidas LOE.

Tabela 4 – Tempo médio e coeficiente de variação para T e P

<b>Parâmetros</b>	<b>Tempo médio <math>\pm</math> S* (ms)</b>	<b>Coeficiente de variação</b>
Abertura total do bloqueador (T)	43,2 $\pm$ 1,7	3,95%
Pulso de estimulação(P)	522 $\pm$ 1,4	0,26%

\* S é o desvio padrão

Como o tempo de abertura do bloqueador depende da tensão aplicada ao circuito eletrônico, medidas do tempo de abertura total do bloqueador (T) foram efetuadas para diferentes valores de tensão de alimentação do circuito. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 29. Os dados mostram que a variação do tempo T em função da tensão não é linear e que, com a tensão em 7 V obtém-se o menor tempo para a abertura total do bloqueador. Para valores acima desta tensão, o sistema apresentou uma instabilidade no processo de abertura e fechamento do bloqueador, o que resultou em uma reduzida

reprodutibilidade no tempo T. Com base nestes dados, adotou-se 7 V como a tensão de alimentação padrão do circuito eletrônico.

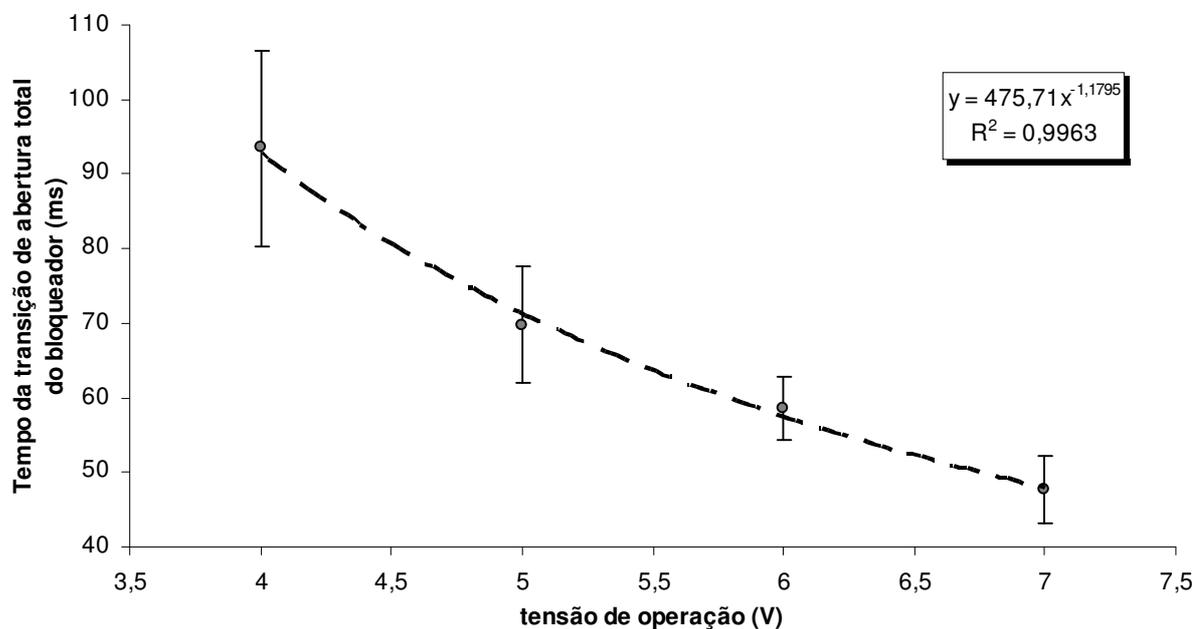


Figura 29 – Variação do tempo de abertura do bloqueador de luz (T) em função da tensão de operação do circuito eletrônico

## 4.2 INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE ESTIMULAÇÃO ÓTICA NA RESPOSTA LOE

Os resultados do sinal LOE de dosimetria de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado com 30 mGy no  $^{137}\text{Cs}$ , em função do tempo de estimulação, são apresentados na Tabela 5. A Figura 30 mostra o gráfico para estes dados.

Tabela 5 - Variação da integral do sinal LOE com o tempo de estimulação

Tempo de estimulação (ms)	LOE Integrada $\pm$ S*	Coefficiente de variação
100	908 $\pm$ 40	4,4%
200	1950 $\pm$ 147	7,5%
300	2377 $\pm$ 163	6,9%
400	2771 $\pm$ 188	6,8%
500	3060 $\pm$ 245	8,0%
600	3226 $\pm$ 201	6,2%

\* S é o desvio padrão

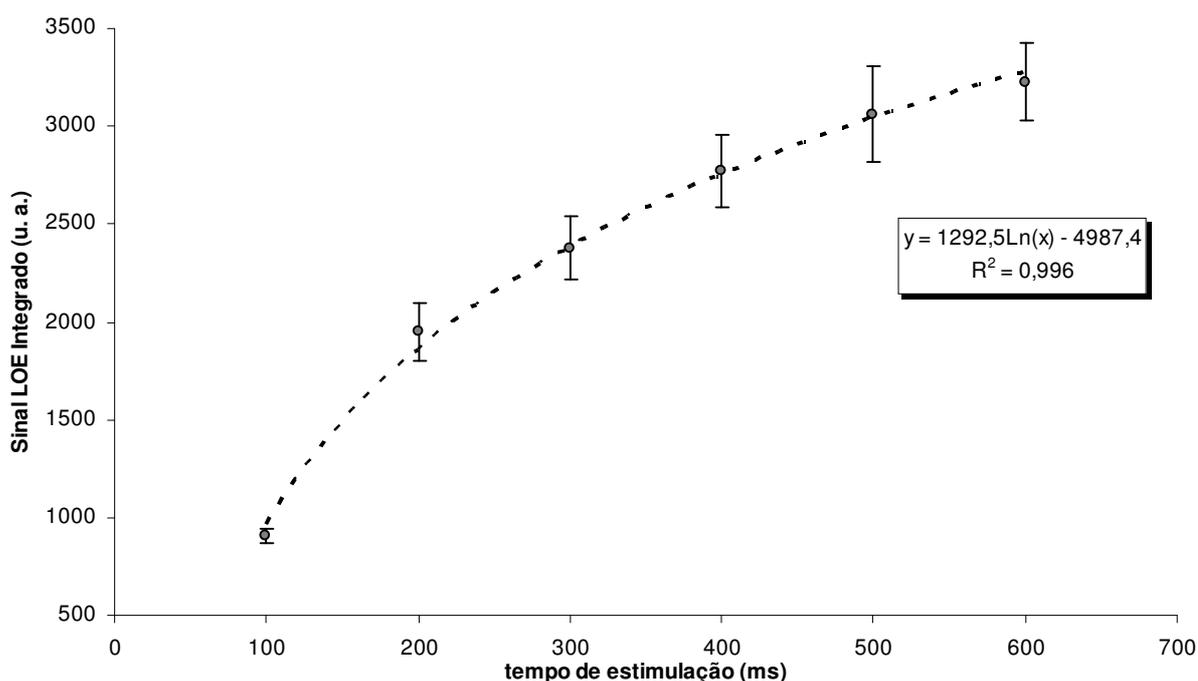


Figura 30 - Variação do sinal LOE com o tempo de estimulação para amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

Para um tempo de estimulação maior do que 500ms o sinal LOE permanece praticamente constante, devido ao equilíbrio de carga na banda de condução e possíveis perdas da componente rápida. Por isso, esse tempo foi fixado em 520ms para a realização de outras medidas com o equipamento.

Os pesquisadores Lee e Lee (2001) obtiveram resultados idênticos utilizando um conjunto de 28 LEDs azuis com mesma intensidade luminosa. Já Bulur e Goksu (1997) chegaram a uma condição de equilíbrio com um pulso de 1s utilizando um conjunto de 32 LEDs verdes. Este aumento no tempo de estimulação e do número de LEDs se deve não só ao fato da intensidade do conjunto dos LEDs verdes ser cinco vezes menor que a dos LEDs azuis, como também ao fato de que a luz do LED azul (470nm) fica mais próxima, em relação a luz do LED verde (565nm), do comprimento de onda em que se obtém o máximo de luminescência na amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  (~485nm).

Os resultados do sinal LOE em função da corrente em cada LED são mostrados no gráfico da Figura 31 para um dosímetro de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado com 30 mGy no  $^{137}\text{Cs}$ . O tempo de estimulação e a tensão do circuito foram fixados em 520ms e 7V respectivamente. A tensão de alimentação dos LEDs variou de 5 a 8V, que corresponde a uma variação na corrente de 8 a 24mA.

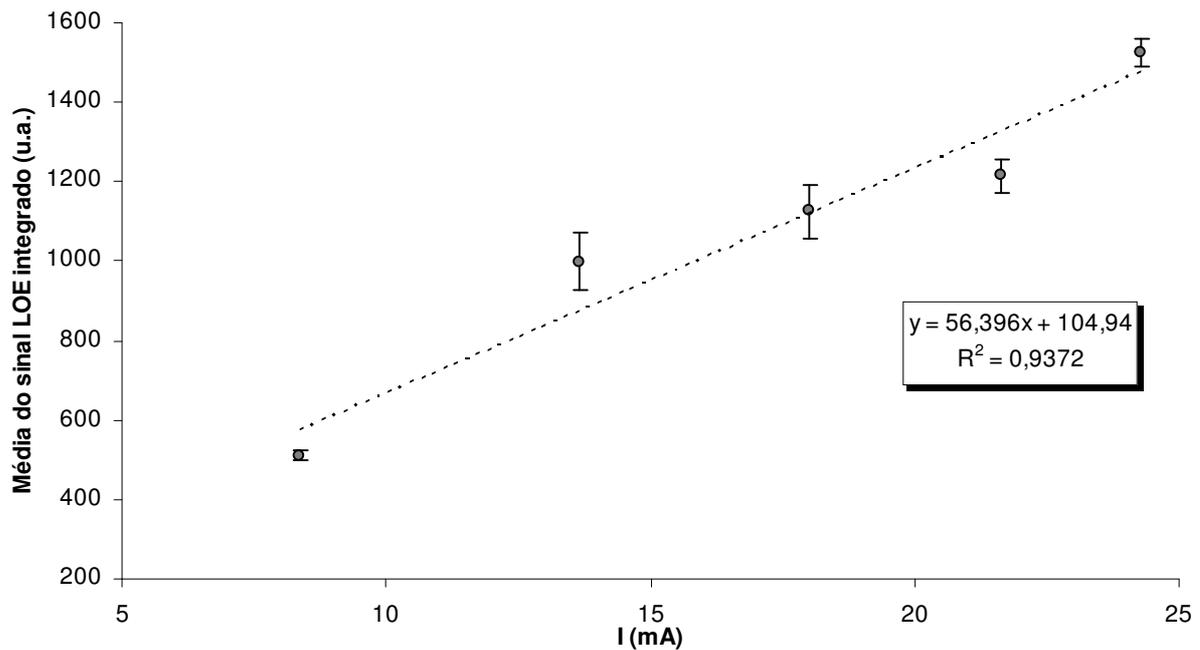


Figura 31 - Variação da integral da luminescência de uma amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  em função da corrente de cada LED

A mesma proporcionalidade na variação do sinal LOE com a corrente de alimentação dos LEDs foi encontrada por Bulur e Göksu (1997) com uma corrente de 5 à 25mA em cada LED (ou 40 a 200mA nos 8 conjuntos paralelos de 4 LEDs em série), como mostra o gráfico menor da Figura 32, que é a Figura 9 aqui repetida. Porém, os autores também constataram que a corrente praticamente não tem influência no tempo de decaimento do sinal LOE após o fim do pulso de 1s, mas apenas na sua intensidade (altura do sinal), como pode ser constatado no gráfico maior da mesma Figura 32

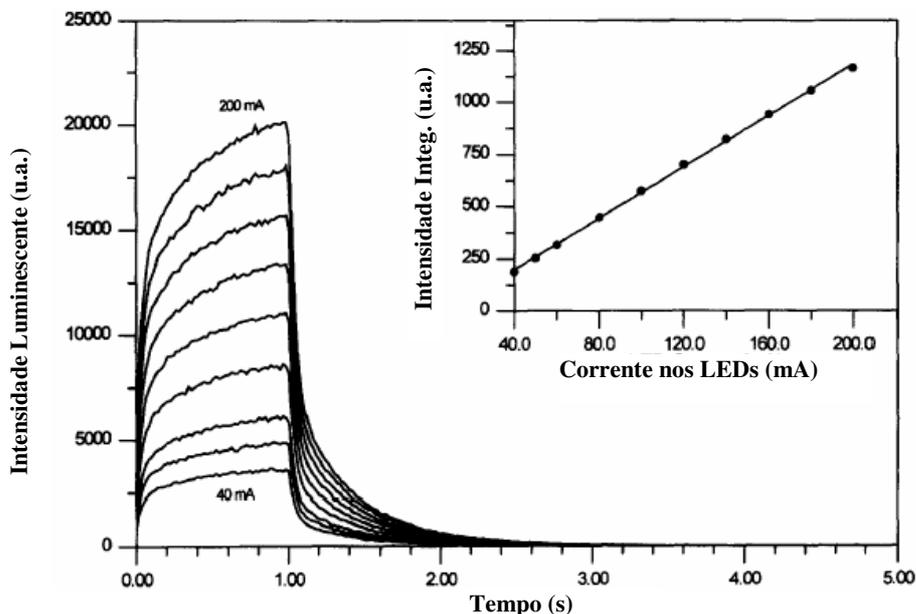


Figura 32 - Variação do sinal LOE, durante e após 1s de estimulação, em função da corrente total dos 32 LEDs verdes (8 conjuntos paralelos de 4 LEDs em série) para uma amostra irradiada com 1Gy (BULUR; GOKSU, 1997)

Ainda na Figura 32, pode-se observar que os autores mediram o sinal de luminescência durante e após a estimulação, utilizando filtros óticos para separar a luz dos LEDs da luminescência emitida pela amostra. No caso do equipamento do presente trabalho, não é possível a leitura da luminescência durante a estimulação devido ao bloqueador de luz localizado na frente da fotomultiplicadora estar fechado. Porém, existe uma parcela do feixe de luz que consegue atravessar o bloqueador de luz sendo que um aumento na corrente do LED também contribui na intensidade da contagem obtida durante esse tempo P. Para avaliar este efeito, foi efetuada a integral das contagens obtidas na região correspondente ao tempo de estimulação P em função da corrente do LED. Os dados são apresentados na Figura 33.

Mantendo o compromisso entre a potência da luz necessária para produzir a estimulação da amostra e a durabilidade dos LEDs, o valor nominal da tensão foi fixado em 7V. Desta forma, a corrente média que circula em cada LED é de 20mA, o que garante uma intensidade luminosa total de 50cd sem comprometer a vida útil do conjunto de LEDs já que esta é a corrente nominal, segundo o fabricante.

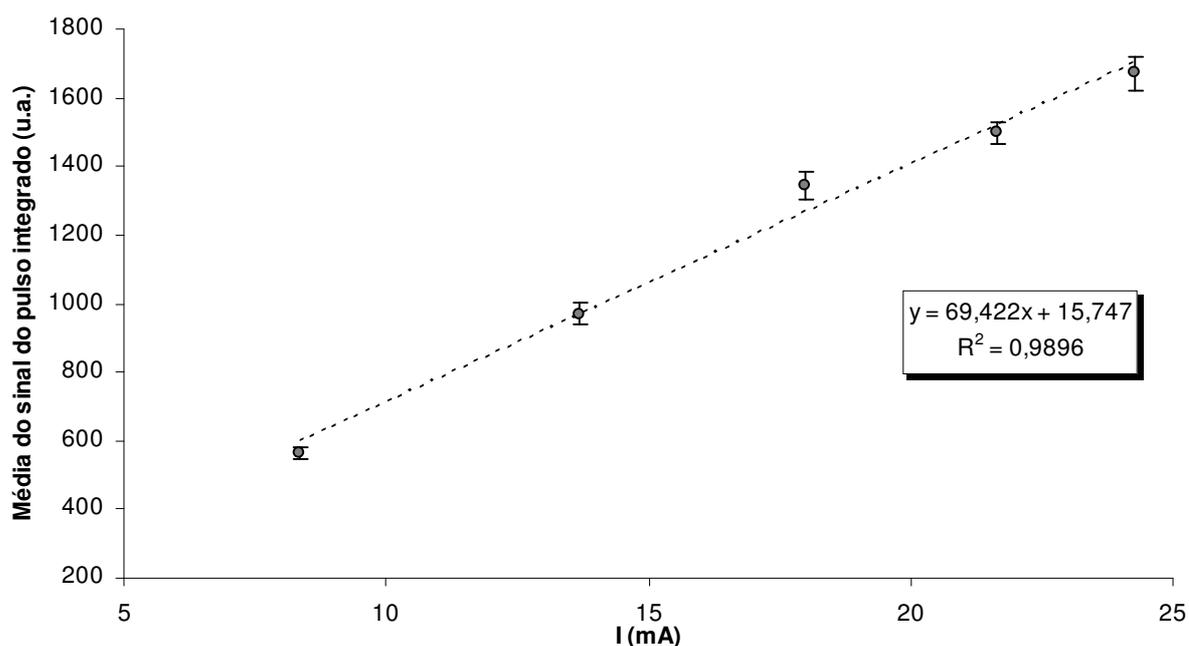


Figura 33 - Variação da integral do pulso de estimulação com a corrente de cada LED

A Tabela 6 mostra as principais características do equipamento desenvolvido neste trabalho para leitura de luminescência.

Tabela 6 - Principais características do equipamento desenvolvido

Características de operação	Valores		
	Min	Máx	Nominal
Modo de estimulação	-	-	Automático ou Manual
Largura do pulso	100ms	1000ms	520ms
Comprimento de onda de estimulação*	-	-	470nm
Intensidade luminosa total* (estimada)	-	-	50cd
Tensão dos LEDs	3,5V	8V	7V
Tensão da Fotomultiplicadora	400V	1250V	700V

\* Corrente no LED de 20mA

### 4.3 APLICAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA MEDIDA DO SINAL LOE COM $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

A Figura 34 mostra o resultado da luminescência emitida pelo  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado com  $^{137}\text{Cs}$  com diferentes doses, após a estimulação com um pulso de 1s de largura. Observa-se pelos dados que a taxa de decaimento da luminescência é constante e independente da dose. Este fato é evidenciado pelos dados da Figura 35 na qual são apresentados os valores normalizados da luminescência correspondentes às três doses de irradiação. Observa-se que para a redução de 50% do sinal LOE são necessários cerca de 35 pulsos com 1s de duração cada.

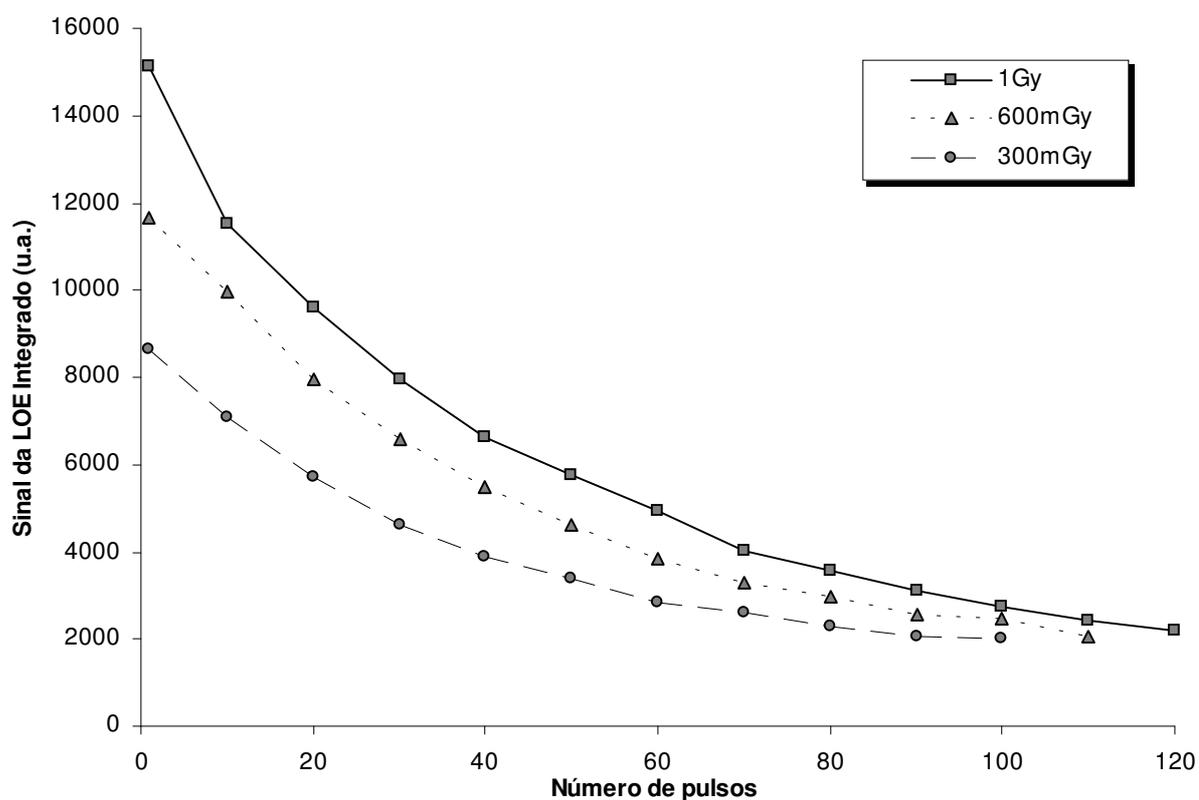


Figura 34 - Decaimento da luminescência da amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiada com três diferentes doses de  $^{137}\text{Cs}$

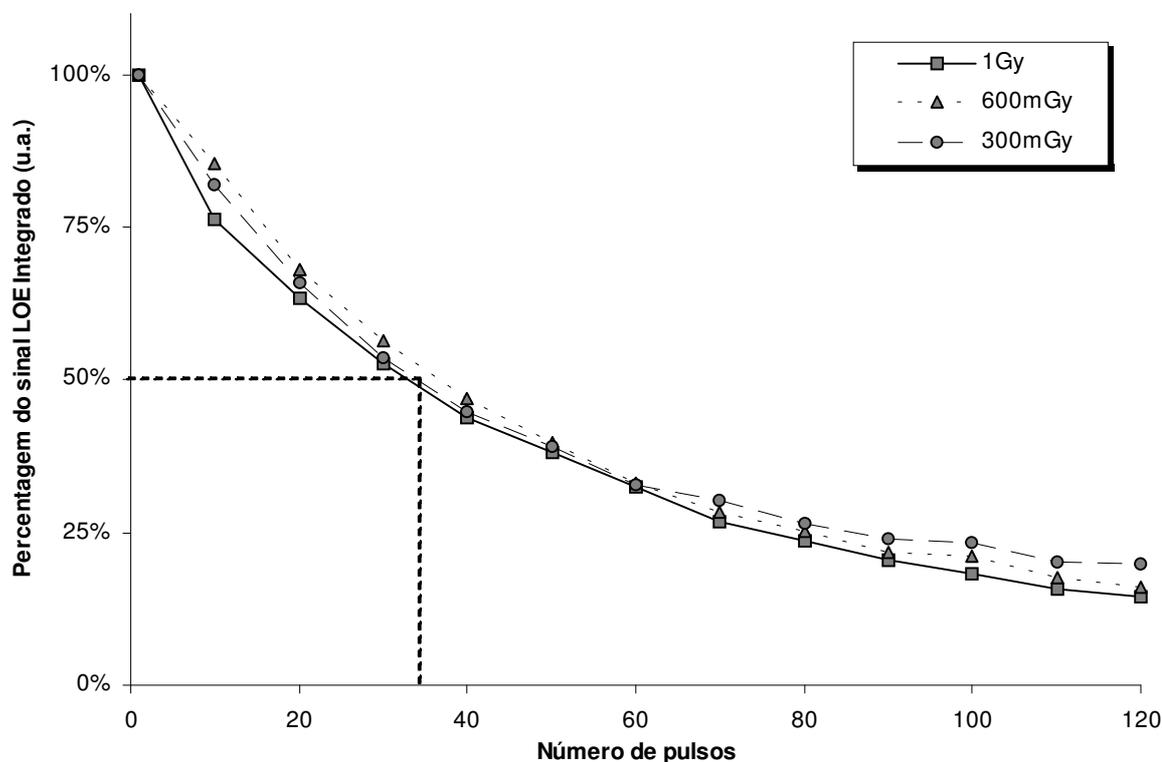


Figura 35 – Resposta normalizada do sinal LOE integrado em 2s em função do número de pulsos de estimulação para a amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiada com três diferentes doses de  $^{137}\text{Cs}$

A Figura 36 mostra os resultados do sinal LOE integrado em 2s após a estimulação por um pulso de 520ms, em função do número de pulsos. Os dados apresentados no detalhe desta mesma figura mostram que, após três pulsos de estimulação, a redução do sinal é menor que 4%. Isto possibilita a associação da dose de radiação à resposta do  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  obtida pela média do sinal LOE correspondente à estimulação de três pulsos consecutivos, ou, como queremos uma melhor resolução gráfica, a dose será associada à soma do sinal LOE devido a esses três pulsos.

Neste caso, a quantidade de pulsos necessários para o sinal decair em 50% é de quase 100 pulsos, o que representa cerca de três vezes o valor encontrado para a estimulação com pulsos de 1s. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que durante a estimulação com pulsos de 1s ocorrem emissões que não são registradas pela fotomultiplicadora uma vez que o bloqueador está fechado.

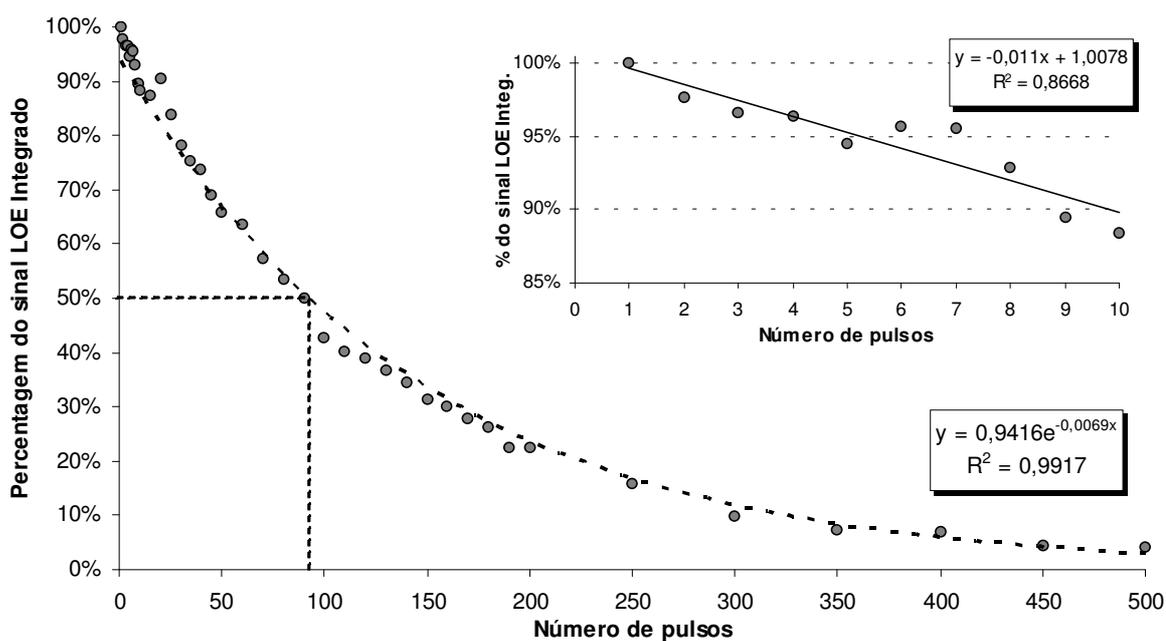


Figura 36 – Curva da porcentagem da luminescência em função do número de pulsos, aproximada por uma exponencial, para a amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiada com 100mGy. No detalhe, a aproximação linear dos 10 primeiros pulsos.

A Figura 37 mostra os resultados obtidos da resposta LOE para o  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado com raios-x. Nota-se que a curva de tendência com uma boa aproximação linear, mas não passa pela origem, provavelmente devido à geometria das medidas, uma vez que a dose foi determinada utilizando uma câmara de ionização ao lado da amostra durante cada irradiação.

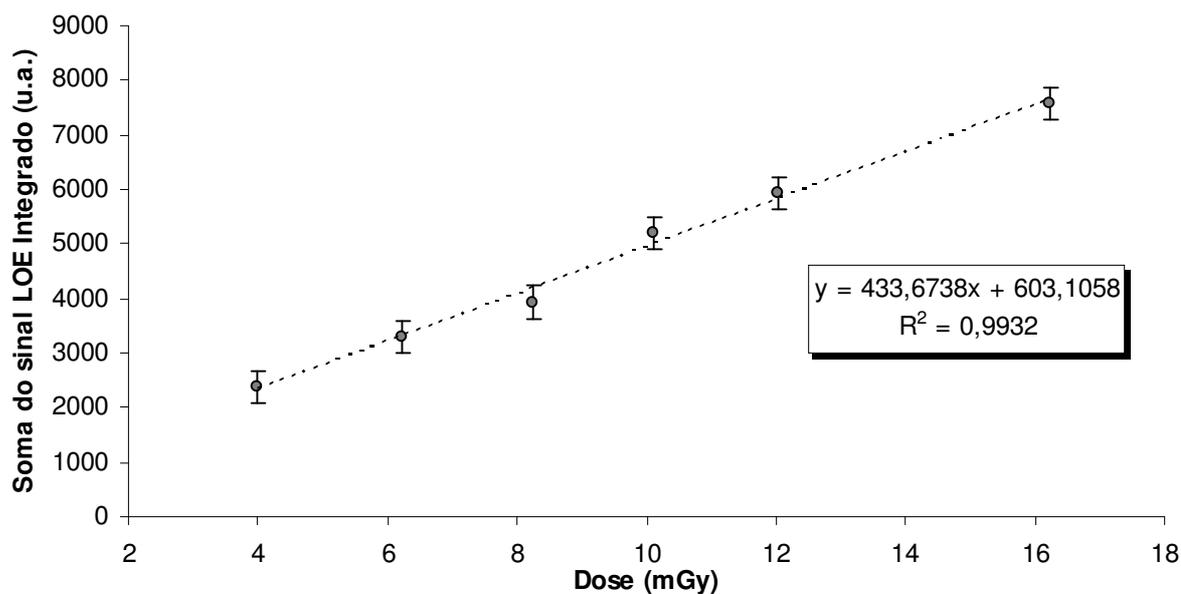


Figura 37 – A resposta LOE correspondente à soma do sinal integrado decorrente da estimulação com 3 pulsos de 520ms para o  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado no raios-x.

A Figura 38 mostra o gráfico de resposta LOE para o  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado com  $^{137}\text{Cs}$ . A aproximação dos pontos ficou muito próxima a uma reta para a faixa de dose medida, apresentou uma boa resolução permitindo diferenciar facilmente as doses.

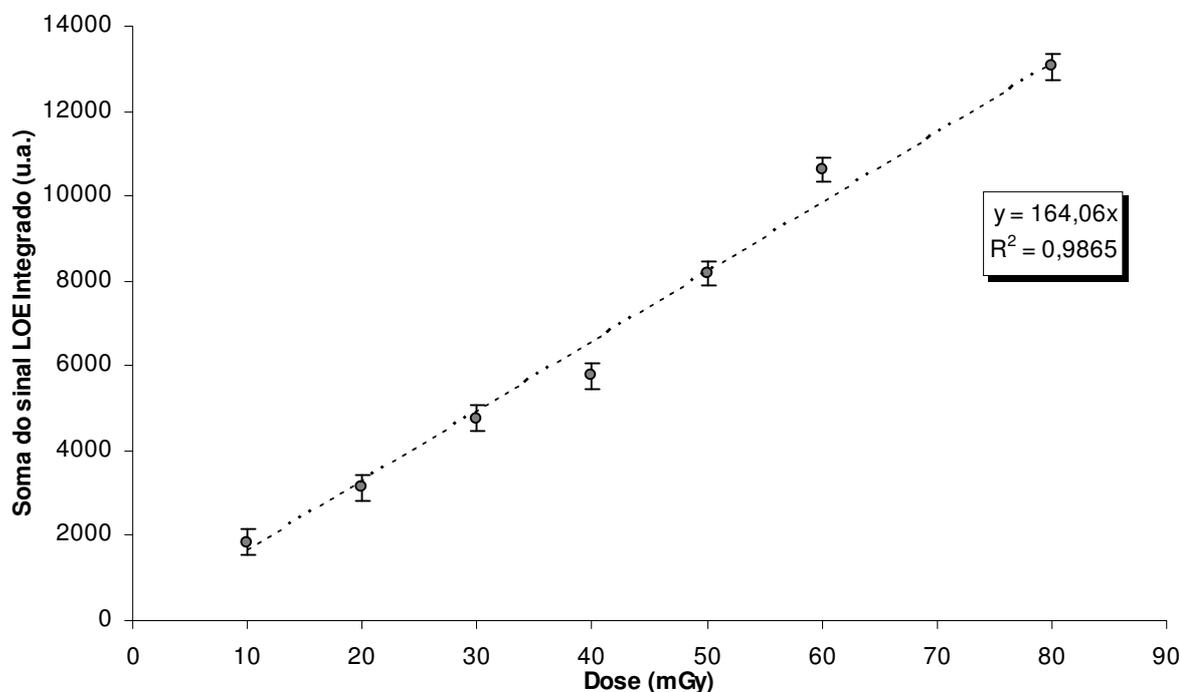


Figura 38 – A resposta LOE correspondente à soma do sinal integrado decorrente da estimulação com 3 pulsos de 520ms para o  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  irradiado com  $^{137}\text{Cs}$ .

Comparando a Figura 37 com a Figura 38, nota-se que a amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  apresenta uma dependência energética, onde o gráfico da resposta para os raios-x tem uma inclinação bem mais acentuada que o gráfico da resposta à fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . Estudos posteriores poderão fornecer essa relação entre o ângulo de inclinação da curva de resposta e a energia em que a amostra foi irradiada.

Finalmente, tomando com base três vezes o valor do desvio padrão correspondente às medidas com a amostra não irradiada, pode-se estimar o valor do limite de detecção para o equipamento, que neste caso foi de  $300\mu\text{Gy}$ , que é da mesma ordem de grandeza do valor de  $100\mu\text{Gy}$  encontrado por Lee e Lee (2001).

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que o equipamento desenvolvido é adequado para medidas do sinal LOE, apresentando boa estabilidade e reprodutibilidade na sua resposta o que permitiu a implantação da técnica da dosimetria por luminescência opticamente estimulada no DEN.

O equipamento é de fácil operação e, apesar de permitir realização de leituras com valores de largura de pulso na faixa de 100 a 1000ms, pulsos em torno de 500ms de largura possibilitam a otimização do sinal LOE, isto é, a maior resposta luminescente com a menor perda durante o período em que a fotomultiplicadora está bloqueada.

A utilização de um conjunto de 20 LEDs como fonte luminosa tornou possível o controle eletrônico no chaveamento e na intensidade luminosa desses. O feixe de luz no comprimento de onda azul (470nm) desses LEDs é o que apresenta uma melhor eficiência da resposta LOE para a amostra comercial de  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ . As medidas efetuadas com essa amostra mostraram a linearidade da resposta em função da dose e comprovaram a viabilidade do seu uso no equipamento desenvolvido para dosimetria pela LOE.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- ✓ Desenvolver placas com fontes de luz de diversos comprimentos de onda, como o verde e o infravermelho, permitindo a utilização do equipamento para leitura de outras amostras;
- ✓ Melhorar a geometria do bloqueador de luz visando reduzir seu tempo de abertura.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSELROD, M. S.; MCKEEVER, S. W. S. A radiation dosimetry method using pulsed optically stimulated luminescence. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 81, p. 167-176, 1999.

BØTTER-JENSEN, L.; DITLEVSEN, C.; MEJDAHL, V. Combined OSL (infrared) and TL studies of feldspars. **Radiation Measurements**, v. 18, p. 257-263, 1991.

BØTTER-JENSEN, L.; DULLER G. A. T. A new system for measuring OSL from quartz samples. **Radiation Measurements**, v. 20, p. 549-553, 1992.

BØTTER-JENSEN, L.; DULLER, G. A. T.; POOLTON, N. R. J. Excitation and emission spectrometry of stimulated luminescence from quartz and feldspars. **Radiation Measurements**, v. 23, p. 613-616, 1994.

BØTTER-JENSEN, L.; MCKEEVER, S. W. S. Optically stimulated luminescence dosimetry using natural and synthetic materials. **Radiation Protection Dosimetry** v. 65, p. 273-280, 1996.

BØTTER-JENSEN, L. Luminescence techniques: instrumentation and methods. **Radiation Measurements**, v. 17, p. 749-768, 1997.

BØTTER-JENSEN, L.; MURRAY, A., S. Developments in optically stimulated luminescence techniques for dating and retrospective dosimetry. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 84, p. 307-316, 1999.

BØTTER-JENSEN, L.; MEJDAHL, V.; MURRAY, A.S. New light on OSL. **Quaternary Science Reviews**, v. 18/2, p. 303-309, 1999a.

BØTTER-JENSEN, L.; DULLER, G. A. T.; MURRAY, A. S.; BANERJEE, D. Blue light emitting diodes for optical stimulation of quartz in retrospective dosimetry and dating. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 84, p. 335-340, 1999b.

BØTTER-JENSEN, L. Development of optically stimulated luminescence techniques using natural minerals and ceramics, and their application to retrospective dosimetry. **Roskilde: Risø National Laboratory**, Thesis, 2000.

BULUR, E.; GÖKSU, H. Y. Pulsed optically stimulated luminescence from  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C using green light emitting diodes. **Radiation Measurements**, v. 27, p.479-488, 1997.

GALLOWAY, R.B. Stimulation of luminescence using green light emitting diodes. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 47, p. 679-682, 1993.

GALLOWAY, R.B.; HONG, D. G.; NAPIER, H. J. A substantially improved green light emitting diodes system for luminescence stimulation. **Measurement Sci. Technol.**, v. 8, p. 267-271, 1997.

HAMAMATSU PHOTONICS. Datasheet. Disponível em: <http://www.hamamatsu.com>. Acessado em Outubro de 2005.

HUNTLEY, D. J.; GODFREY-SMITH, D. I.; THEWALT, M. L. W. Optical dating of sediments. **Nature**, v. 313, p. 105-107, 1985.

HUNTLEY, D. J.; GODFREY-SMITH, D. I.; THEWALT, M. L. W., BERGER G. W. Thermoluminescence spectra of some mineral samples relevant to thermoluminescence dating. **Journal of Luminescence**, v. 39, p. 123-136, 1988.

HUNTLEY, D. J.; GODFREY-SMITH, D. I.; HASKELL, E. H. Light-induced emission spectra from some quartz and feldspars. **Radiation Measurements**, v. 18, p. 127-131, 1991.

LEE, S.; LEE, K. J. Development of a personal dosimetry system based on optically stimulated luminescence of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C for mixed radiation fields. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 54, p.675-685, 2001.

MAHESH, K.; WENG, P. S.; FURETTA, C. Thermoluminescence in solids and its applications. **England: Nuclear Technology Publishing**, p. 43-84, 1989.

MARKEY, B. G.; COLYOTT, L. E.; MCKEEVER, S. W. S. Time-resolved optically stimulated luminescence from  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C. **Radiation Measurements**, v. 24, p. 457-463, 1995.

MCKEEVER, S. W. S. Thermoluminescence of solids. **New York: Cambridge University Press**, p. 205-235, 1985.

MCKEEVER, S. W. S.; AKSELROD, M. S.; MARKEY, B. G. Pulsed optically stimulated luminescence dosimetry using  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 65, p. 267-272, 1996.

MCKEEVER, S. W. S. Optically stimulated luminescence dosimetry. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 184, p. 29-56, 2001.

POOLTON, N. R. J.; BAILIFF, I. K. The use of LEDs as an excitation source for photoluminescence dating of sediments. **Ancient**, v. 7, p. 18-20, 1989.

SANDERSON, D. C. W.; CLARK, R. J. Pulsed photostimulated luminescence in alkali feldspar. **Radiation Measurements**, v. 23, p. 633-639, 1994.

SPOONER, N. A.; AITKEN, M. J.; SMITH, B. W.; FRANKS, M.; MCELROY, C. Archaeological dating by infrared stimulated luminescence using a diode array. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 34, p. 83-86, 1990.

SPOONER, N. A. On the optical dating signal from quartz. **Radiation Measurements**, v. 23, p. 593-600, 1994.

TATUMI, S. H.; PEIXOTO, M. N. O.; MOURA, J. R. S.; MELLO, C. L.; CARMO, I. O.; KOWATA, E. A.; YEE, M.; BRITO, S. L. M.; GOZZI, G.; KASSAB, L. R. P. Optical dating using feldspar from Quaternary alluvial and colluvial sediments from SE Brazilian Plateau, Brazil. **Journal of Luminescence**, v. 23, p. 566-570, 2003.