INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**SIMULAÇÃO SEMI-EMPÍRICA DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE SOB
DIFERENTES GEOMETRIAS DE FILTRO**

GABRIEL ISSA JABRA SHAMMAS

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção
do grau de Mestre em Ciências na
Área de Tecnologia Nuclear –
Aplicações.**

**Orientador:
Dr. José Eduardo Manzoli**

**SÃO PAULO
2006**

Dedico este trabalho ao meu pai, Issa Jabra Shammas (in memoriam), e a minha mãe, Saidi Alfia Jabra Shammas, que, com dedicação, confiança e sacrifício, sempre acreditaram em mim e me ajudaram a trilhar o caminho em busca do conhecimento.

“O pensamento e o sentimento se aconselham mutuamente e completam um ao outro.”

Vauvenargues

“Um homem nada mais é do que o produto de seus pensamentos; ele se transforma no que ele pensa.”

Mohandas K. Gandhi

“A leitura torna um homem pleno, a conversa, um homem pronto e a escrita, um homem exato.”

Francis Bacon

“Como anjos em alguns sonhos mais luminosos

Chamam à alma quando o homem dorme,

Assim alguns pensamentos estranhos transcendem

Nossos temas limitados

E espreitam a glória.”

Henry Vaughan

“Minha existência não depende do fato de que estou pensando; depende do fato de que, sabendo ou não, sou pensado – sou pensado por uma mente muito maior do que a consciência a qual costume identificar comigo mesmo.”

Aldous Huxley

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela proteção e amparo que nunca me faltaram.

Ao Dr. José Eduardo Manzoli pela orientação, paciência, incentivo, apoio e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Cláudio Rodrigues, superintendente do IPEN, por permitir o uso da infraestrutura dos Centros adjuntos na realização deste trabalho.

Ao mestre Vicente de Paulo de Campos, por sua amizade e apoio para a continuidade do seu trabalho.

Aos meus pais, Issa Jabra Shammass (in memoriam) e Saídi Alfia Jabra Shammass, pelo apoio constante, pelas preces pelo meu sucesso e pela paciência e compreensão que sempre me dedicaram.

A Marlene do Carmo Vasconcellos, amiga e conselheira, que me apoiou em momentos delicados.

A Edméia Murta, sem a qual eu não teria a tranquilidade e a paz necessária para o andamento dos meus estudos.

A minha irmã Jacqueline e minha sobrinha Cristiane, que estão sempre em meu coração.

Ao professor Luiz Antonio Barbagli, que um dia acreditou em um aluno curioso e teve a paciência de instruí-lo nos caminhos da pesquisa.

Ao professor Luiz Antonio Alves de Oliveira que me direcionou para a área acadêmica.

A todos os amigos invisíveis que me protegeram e protegem, cuidando para que eu pudesse me desenvolver, estudar e avançar em minhas realizações.

A todos que direta ou indiretamente auxiliaram-me na execução deste trabalho.

SIMULAÇÃO SEMI-EMPÍRICA DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE SOB DIFERENTES GEOMETRIAS DE FILTRO

GABRIEL ISSA JABRA SHAMMAS

RESUMO

Muitos materiais termoluminescentes têm sido desenvolvidos e utilizados para a monitoração individual externa de fótons, mas nenhum tem todas as características desejadas sozinho. Estas características incluem robustez, alta sensibilidade, independência de resposta quanto à energia do fóton, larga faixa de detecção de energia, boa reprodutibilidade, evanescência pequena e curva de emissão termoluminescente simples, com picos abaixo de 150°C. O dosímetro de sulfato de cálcio dopado com disprósio ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$) tem sido usado por muitos laboratórios, principalmente no Brasil e na Índia. Outro fósforo interessante é o fluoreto de cálcio (CaF_2). As vantagens destes fósforos começam a ser mais requisitadas e suas desvantagens mais aparentes, no mercado globalizado mais e mais competitivo. Estes fósforos são utilizados em monitoração de área e ambiental devido à sua maior sensibilidade do que outros fósforos, como o LiF:Mg . A sua maior desvantagem é a forte dependência energética da resposta, que deve ser corrigida para suas aplicações em campo, onde o fóton é desconhecido a priori. Um modo interessante de fazer esta correção numa incidência ortogonal da radiação no fósforo é a interposição de um filtro plano vazado entre o feixe e o fósforo. Com o objetivo de reduzir a dependência energética sob incidência em qualquer ângulo, reduzindo a incerteza de medição da dose em campo também, este trabalho apresenta um estudo de simulação em geometrias de filtro esféricas. Foram simuladas irradiações de fótons com raios gama do cobalto 60, com raios-X de 33, 48 e 118 keV, em vários ângulos de incidência de zero a noventa graus. Estas simulações computacionais semi-empíricas, utilizando diferenças finitas em três dimensões, foram feitas em coordenadas esféricas. Os resultados indicaram as melhores espessuras e larguras para a otimização da correção da dependência energética.

SEMI-EMPIRICAL SIMULATION OF THERMOLUMINESCENT RESPONSE UNDER DIFFERENT FILTER GEOMETRIES

GABRIEL ISSA JABRA SHAMMAS

ABSTRACT

Many thermoluminescent materials has been developed and used for photon personal dosimetry but no one has all desired characteristics alone. These characteristics include robustness, high sensitivity, energy photon independence, large range of photon energy detection, good reproductibility, small fading and simple glow curve with peaks above 150°C. Calcium Sulfate Dysprosium doped ($\text{CaSO}_4\text{:Dy}$) phosphor Thermoluminescent Dosimeter (TLD) has been used by many laboratories, mainly in Brazil and India. Another interesting phosphor is Calcium Fluoride (CaF_2). These phosphor advantages begin to be more required and its disadvantages have become more apparent, in a global market more and more competitive. These phosphors are used in environmental and area monitoring, once they present more sensibility than other phosphors, like LiF:Mg . Theirs mainly disadvantage is a strong energetic dependence response, which must be corrected for theirs application in the field, where photon radiation is unknown *a priori*. An interesting way do make this correction in orthogonal incidence of the radiation on the phosphor is to interject a plane leaked filter between the beam and the phosphor. In order to reduce the energetic dependence on any incidence angle, reducing the field dose measurement uncertainty too, this work presents a simulation study on spherical filter geometries. It was simulated photon irradiations with Gamma rays of ^{60}Co and x-rays of 33; 48 and 118 keV, on many incidence angles from zero to ninety degrees. These semi-empirical computational simulations using finite differences in three dimensions were done in spherical coordinates. The results pointed out the best filter thicknesses and widths, in order to optimize the correction on energetic dependence.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	6
3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	7
3.1. Termoluminescência	7
3.2. Dependência Energética	8
4. PROCEDIMENTOS COMPUTACIONAIS	12
4.1. Considerações Numéricas	12
4.2. Considerações Empíricas	16
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
5.1. Fósforo $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$	17
5.2. Fósforo CaF_2	22
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
ANEXO A - Programa Fonte da Simulação	30
ANEXO B - Trajetória Linear em Coordenadas Esféricas	39
APÊNDICE - Trabalhos Gerados durante o (e por causa do) Projeto	41

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1: Valores dos coeficientes de atenuação utilizados na simulação ^[23]	16
TABELA 2: Simulações que melhor apresentaram correção da dependência energética do CaSO ₄ :Dy, em média, para todas as incidências e todos os fótons estudados	21
TABELA 3: Simulações que melhor apresentaram correção da dependência energética do CaF ₂ :Mn, em média, para todas as incidências e todos os fótons estudados	26

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1: Curva de emissão do $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ submetido à irradiação de 1 mGy de ^{137}Cs . A taxa de aquecimento foi de 1°C/s . A dosimetria utiliza os picos III e IV. Os picos I e II, de 80°C e 110°C , desvanecem rapidamente e por isso não são utilizados ^[8]	3
FIGURA 2: Esquema do filtro de chumbo e pastilha termoluminescente de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ utilizados em SMIE do Brasil. A <i>área de incidência com atenuação</i> emite luz, no processo termoluminescente, menos intensa que a <i>região de incidência sem atenuação</i> . O filtro apresenta um diâmetro de 13 mm	4
FIGURA 3: Efeitos predominantes na interação da radiação ionizante de fótons com o material, de número atômico efetivo representado no eixo das ordenadas. As curvas indicam os pontos para os quais as probabilidade dos processos são iguais ^[21]	9
FIGURA 4: Variação da resposta termoluminescente para irradiação com diferentes energias de fótons. Note a diferença de escala para o LiF comparado com $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ e $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ ^[8]	10
FIGURA 5: Sistema de coordenadas esférico utilizado na discretização, com elemento infinito em destaque. Também consta o sistema cartesiano retangular respectivo	12
FIGURA 6: Ilustração da geometria de filtros utilizada, em vermelho, com dosímetro esférico em seu centro	14
FIGURA 7: Ilustração de vários ângulos de vista da geometria de filtros utilizada	14
FIGURA 8: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para dois ângulos de incidência distintos	18
FIGURA 9: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura indicada	19
FIGURA 10: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da largura do filtro para a espessura de 3,0 mm e incidências indicadas	20
FIGURA 11: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 72° e incidências indicadas. A linha pontilhada sobre a espessura de 1,6 mm mostra a proximidade das respostas TL ao valor 1	22

FIGURA 12: Visualização da chapinha na geometria de filtro com a chapinha	23
FIGURA 13: Filtro com a chapinha visto por outro ângulo	23
FIGURA 14: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 18^0 e incidências indicadas	24
FIGURA 15: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 66^0 e incidências indicadas	25
FIGURA 16: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 78^0 e incidências indicadas	26

1. INTRODUÇÃO

As aplicações pacíficas das radiações ionizantes envolvem atividades de radioesterilização, radioterapia, radiodiagnósticos, geração de energia (reatores de potência), reatores de pesquisa, etc. A preocupação com a segurança radiológica (radioproteção) dos indivíduos ocupacionalmente expostos tem aumentado. Nestas atividades, há o risco dos trabalhadores receberem quantidade de radiação além dos limites adequados, o que leva à procura por métodos de detecção cada vez melhores, capazes de mensurar com maior precisão, exatidão e confiabilidade, além de facilidade. Para esta segurança existem procedimentos e formas de monitoramento que avaliam a dose recebida, tais como: monitoração de área, monitoração ambiental, monitoração de corpo inteiro, dosimetria citogenética e monitoração individual externa^[1,2]. Todo indivíduo que trabalhe ou utilize material e equipamento radioativo deve ser monitorado individualmente^[3], e esta deve ser uma atividade simples e de baixo custo, sem lhe causar nenhum transtorno na sua ocupação.

A monitoração individual externa (M.I.E.) é uma atividade complexa onde estão envolvidos vários aspectos metrológicos, tais como a utilização de diferentes grandezas físicas, unidades de medição e o inter-relacionamento entre as mesmas. Além disso, a M.I.E. envolve o estudo de Ciência dos Materiais, algoritmos e aspectos administrativos. As atividades ou ocupações que envolvem potencial exposição à radiação ionizante, implicam no uso diário de monitores ou dosímetros individuais na rotina do trabalhador. As interpretações dos resultados destes monitores demandam metodologias e medidas para a avaliação final da dose que o trabalhador recebeu e, por último, o registro oficial destes valores. No Brasil é admitido legalmente apenas utilizar dois processos de monitoração individual externa^[4]:

- a) através da velação de filmes fotográficos (dosimetria fotográfica), e
- b) através do fenômeno da termoluminescência (dosimetria termoluminescente, ou dosimetria TL) ^[5].

A dosimetria TL é realizada por instrumentos denominados dosímetros pessoais, monitores pessoais, dosímetros TL ou TLDs (sigla do inglês, *Thermoluminescence Dosimeter*) que são utilizados sobre o tórax do trabalhador e medem a radiação de forma passiva, ou seja, a medição ocorre após o seu uso, normalmente depois de um mês. Os dosímetros pessoais são constituídos de um suporte chamado de porta-detector ou porta-dosímetro, no qual são colocados materiais que apresentam propriedades termoluminescentes (fósforos ou detectores TL). Estes detectores permitem relacionar, através de equipamentos adequados e mediante processos de calibração, sua luminosidade emitida termoluminescentemente com a grandeza operacional estabelecida para quantificação da radiação no ensaio de M.I.E. No Brasil, esta grandeza é a *Dose Individual para Fótons*, $H_x^{[4,6,7]}$, na qual é exigida a detecção apenas de fótons, com energia entre 20 e 1250 keV.

A avaliação do material termoluminescente do TLD é realizada por instrumentos, chamados *leitores*¹ *termoluminescentes*, constituídos basicamente de duas partes: um sistema aquecedor com controle preciso das taxas de aquecimento e um sistema de detecção da luz emitida pelo material termoluminescente. Ambas as partes são controladas de maneira eletrônica. A luz emitida é detectada por um tubo fotomultiplicador ou por um fotodiodo, dependendo do modelo, que produz sinais elétricos (correntes) que são coletados por outros dispositivos. Estas correntes são integradas no tempo e geram a resposta final, em unidades de carga elétrica. A associação desta carga com a dose gera a *curva de calibração* do processo. Através da intensidade da luz emitida em função do tempo de aquecimento obtém-se a *curva de emissão* gerada pelo material termoluminescente dos TLDs, que é uma característica importante para estudos mais detalhados da estrutura eletrônica do fósforo. Uma curva de emissão típica é apresentada na FIG.1.

O chamado *sistema* de monitoração individual termoluminescente é o conjunto formado pelos dosímetros pessoais, pelo equipamento de leitura TL e demais processos preparativos, como o tratamento térmico. Através de um algoritmo apropriado, que utiliza diversas informações, como as obtidas nas curvas de calibração e de emissão, obtém-se a dose individual a que um trabalhador esteve sujeito, independentemente da energia do fóton a que tenha sido submetido.

¹ Por isto a avaliação TL é também chamada de "leitura TL".

FIGURA 1: Curva de emissão do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ submetido à irradiação de 1 mGy de ^{137}Cs . A taxa de aquecimento foi de 1°C/s . A dosimetria utiliza os picos III e IV. Os picos I e II, de 80°C e 110°C , desvanecem rapidamente e por isso não são utilizados^[8].

É indispensável o conhecimento das propriedades da resposta TL dos dosímetros pessoais e do material termoluminescente para utilizá-lo com fins dosimétricos.

O sulfato de cálcio dopado com disprósio, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, tem propriedades interessantes quando comparado com outros fósforos, como o baixo desvanecimento, que é de 7% em três meses^[9] e para um período de 30 dias (utilizado na monitoração pessoal) o desvanecimento é de apenas 3%. Também sua sensibilidade é elevada^[10], que o beneficia em aplicações de medições de baixas doses, como em dosimetria ambiental.

Mas assim como todos os materiais termoluminescentes, este também tem suas desvantagens. Uma destas é a sua forte *dependência energética*, ou seja, aplicando-se duas mesmas doses de radiação de fótons em detectores diferentes do mesmo lote, estes apresentarão respostas TL diferentes, se a energia dos fótons que as compuseram não forem as mesmas. Esta dependência é causada pelo alto número atômico efetivo do material termoluminescente ($Z \cong 15,6$ u.m.a). Esta dependência energética deve ser corrigida para a sua aplicação em M.I.E., pois a calibração é feita com uma única energia de irradiação, normalmente a energia média dos fótons emitidos pelo isótopo 60 do cobalto

(^{60}Co), e o TLD deve ser capaz de mensurar a dose de qualquer energia de irradiação no intervalo normativo.

Outro material de alta sensibilidade TL e com semelhante deficiência na dependência energética é a fluorita, ou $\text{CaF}_2:\text{Mn}$, com número atômico efetivo 16,9 u.m.a..

Um dos estudos da correção da dependência energética utiliza filtros de metais, tais como cobre, alumínio, estanho e chumbo^[11,12]. Se a geometria do TLD e do filtro não é esférica, há uma grande influência causada pelo *ângulo de incidência* da radiação sobre o TLD, na avaliação da dose. É o caso da geometria do filtro de radiação tipo "chumbo furado", ilustrado na FIG.2, utilizado para a correção da dependência energética.

FIGURA 2: Esquema do filtro de chumbo e pastilha termoluminescente de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ utilizados em SMIE do Brasil. A *área de incidência com atenuação* emite luz, no processo termoluminescente, menos intensa que a *região de incidência sem atenuação*. O filtro apresenta um diâmetro de 13 mm.

A resposta TL do material depende da sua própria composição química e da sua geometria, além da composição química e geometria dos filtros utilizados no suporte ou porta-dosímetro. Seria desejável ter uma mesma resposta TL para quaisquer ângulos de incidência da radiação, uma vez que estes TLDs serão utilizados na monitoração individual por trabalhadores e poderão sofrer irradiações em todos os ângulos possíveis. Para a

geometria de filtro como o da FIG.3, acima de 45° a resposta TL não é satisfatória^[13,14], ou seja, há uma *dependência angular*.

Este trabalho avaliou a resposta TL de geometrias inovadoras do filtro minimizando, como escopo principal, a dependência angular e energética.

O algoritmo produto deste trabalho permite a análise de diferentes geometrias de filtro para a correção da dependência energética da resposta termoluminescente para diferentes fósforos, para irradiações sob quaisquer ângulos e quaisquer energias.

Os aspectos empíricos da atenuação do feixe ao atravessar os filtros e da curva de dependência energética do $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ e da $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ foram parâmetros de entrada.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um procedimento computacional capaz de avaliar geometrias de filtros que corrijam a dependência energética da resposta termoluminescente do $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ e do $\text{CaF}_2\text{:Mn}$, cristais ou compósitos destes com formatos esféricos, para irradiações sob quaisquer ângulos e quaisquer energias entre 20 e 1250 keV (faixa de interesse para a Monitoração Individual Externa).

3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

3.1 - Termoluminescência

Termoluminescência, TL, é a emissão de luz visível por um cristal devido ao seu aquecimento. O cristal só tem esta capacidade se foi submetido à radiação ionizante previamente. A taxa e a quantidade de aquecimento dependem do material TL, bem como a quantidade de luz emitida, que depende também, e principalmente, da quantidade de radiação incidente.

A termoluminescência foi descrita pela primeira vez no século XVII, quando sir Robert Boyle (1627-1691), um dos fundadores da Química moderna, descreveu, em 28 de outubro de 1663, o fenômeno da termoluminescência (TL) à “Royal Society” de Londres (Inglaterra). Ele relatou a observação da emissão de uma luz estranha por um diamante, quando o aqueceu na escuridão do seu quarto. Desde então outros cientistas estudaram esse efeito em outros materiais. Foi somente em 1904, com Marie Curie, que soube-se que era possível restaurar propriedades TL de cristais expondo-os à radiação ionizante^[15].

Sua aplicação na determinação da dose de radiação ionizante (dosimetria) tornou-se uma ferramenta muito utilizada nos dias de hoje com os trabalhos pioneiros de Cameron, na década de 1960^[15].

Após uma irradiação, o material termoluminescente deve retornar à sua condição inicial, sendo necessário submetê-lo a um aquecimento adequado, se pretende ser re-utilizado para produzir TL.

O objetivo central da dosimetria TL é a determinação da quantidade desta energia por unidade de massa que foi absorvida pelo material durante o processo. Isto é realizado pela medição da intensidade de luz emitida termo-estimulada consequência da energia absorvida da radiação. A emissão de luz (luminescência) é um resultado do relaxamento de cargas eletrônicas excitadas através do fornecimento de calor. Boas informações sobre TL são citadas^[15-19].

Para a dosimetria e, particularmente, para os S.M.I.E.s utiliza-se normalmente a integral (área sob a curva) da função matemática que se ajusta à curva de emissão (FIG.1), desde uma temperatura inicial T_i até uma final T_f , de forma que o principal pico

esteja compreendido entre ambas. Esta integral, que basicamente é a integral da corrente elétrica gerada pela fotomultiplicadora entre dois instantes (tempos) da “rampa de aquecimento”, tem como grandeza física a “carga elétrica”. Assim, a “carga” gerada no leitor TL é linearmente proporcional à dose individual, num gráfico da resposta TL (na ordenada) contra o valor verdadeiro convencional da dose (na abscissa), e o seu “coeficiente angular” é o inverso do “fator de calibração” do lote de detectores.

A dose individual a que um detector foi submetido é obtida multiplicando-se a carga lida no leitor TL pelo fator de calibração. Algumas correções extras podem ser necessárias, como o “fator de desvanecimento”, a subtração de radiação espúria, não desejada, e a correção quanto à dependência energética.

3.2. Dependência Energética

A resposta TL é consequência direta da interação da radiação ionizante incidente com o material fósforo. Particularmente, esta resposta TL é proporcional ao coeficiente de absorção da energia do fóton. Embora diversas possibilidades de mecanismo de interações da radiação ionizante com a matéria sejam conhecido^[20], três tipos apresentam os principais papéis na medição da radiação: o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares. Todos estes efeitos levam a uma transferência parcial ou completa da energia do fóton para o material. Cada um destes efeitos apresenta-se mais ou menos predominante sobre os demais, dependendo principalmente do número atômico efetivo do material e da energia do fóton da radiação incidente, como ilustrado na FIG.3. Materiais com maior número atômico efetivo (Z_{ef}) apresentam o efeito fotoelétrico tornando-se mais pronunciado para energias de fótons abaixo de 100 keV.

FIGURA 3: Efeitos predominantes na interação da radiação ionizante de fótons com o material, de número atômico efetivo representado no eixo das ordenadas. As curvas indicam os pontos para os quais as probabilidade dos processos são iguais^[21].

Materiais com números atômicos menores, da ordem de 7, são mais interessantes para a detecção em Radioproteção, por estarem próximos aos dos tecidos biológicos. Uma aproximação empírica para o coeficiente de absorção, τ , da energia na interação é proporcional à razão entre o número atômico do material e a energia da radiação E_γ , dada pela equação 01^[20] seguinte:

$$\tau \cong \text{constante} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3,5}} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde: n = varia entre 4 e 5

Z = n.º atômico efetivo do material

E_γ = energia da radiação gama

Assim, como a resposta TL é proporcional à absorção da energia do fóton, a resposta TL de um cristal apresentará também a proporção dada pelo lado direito da (Eq. 01). Todos os fósforos apresentam esta dependência energética, em maior ou menor

grau. Na FIG.4. são ilustrados alguns materiais termoluminescente com sua variação de resposta TL com a energia do fóton.

FIGURA 4: Variação da resposta termoluminescente para irradiação com diferentes energias de fótons. Note a diferença de escala para o LiF comparado com $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ e $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ ^[8].

Deve-se considerar que é desejável que o fósforo tenha uma interação com a radiação semelhante àquela que ocorreria no tecido biológico, sobre o qual se deseja avaliar os *efeitos biológicos* da radiação. Os tecidos biológicos apresentam, em média, Z_{ef} próximo de 7. Esta é uma das razões da “popularidade” do LiF, fósforo mais utilizado mundialmente, com Z_{ef} igual a 8,31 u.m.a. e, além disso, menor dependência energética.

A interposição de filtros permite correções da dependência energética porque:

- 1) radiações de baixa energia são mais intensamente atenuadas por estes filtros do que as maiores
- 2) embora gerem maior sinal TL, devido a 1); os feixes de fótons de baixa energia atingem o material com intensidade menor.

Assim, os efeitos 1 e 2 diminuem a dependência energética. Utilizar estes efeitos para corrigir a dependência energética, ainda que pareça simples, na prática é um problema difícil de engenharia de materiais. Há que se avaliar não só o tipo de material

(coeficiente de atenuação), como também sua espessura ou geometria para tornar o TLD prático.

A dependência energética deve ser conhecida e corrigida. Principalmente para detectores termoluminescentes com Z_{ef} maior, como o $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ ($\cong 15$ u.m.a.) ou o $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ ($\cong 17$ u.m.a.).

4. PROCEDIMENTOS COMPUTACIONAIS

4.1 Considerações Numéricas

Neste trabalho determinou-se geometrias que corrigem muito mais efetivamente a dependência energética para irradiações sob quaisquer ângulos e quaisquer energias entre 20 e 1250 keV (faixa de interesse para a Monitoração Individual Externa). Para calcular estas geometrias foi utilizada uma simulação numérica computacional, compilada em FORTRAN com elementos finitos^[22] de coordenadas esféricas, ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Sistema de coordenadas esférico utilizado na discretização, com elemento finito em destaque. Também consta o sistema cartesiano retangular respectivo.

A direção ρ foi discretizada em 40 pontos de forma não uniforme, a coordenada θ foi discretizada homogeneamente em 60 pontos (3°) e a coordenada ϕ em 30 pontos homogeneamente também (3°). Portanto, um sistema de $40 \times 60 \times 30 = 72000$ pontos. O estudo de Campos ^[14] já demonstrou a capacidade deste método computacional, mas ali foi simulado apenas uma geometria, e com discretização de $36 \times 36 \times 12$ retangular.

Como as curvas experimentais que melhor se ajustam aos pontos experimentais de dependência energética foram utilizadas, além dos coeficientes de atenuação, a simulação é também classificada como semi-empírica. Há uma suposição implícita de que o sistema esteja dentro de uma camada de, no mínimo, 4 mm de um polímero de densidade 1 g/ml, para garantir o *equilíbrio eletrônico* ^[23].

Como deseja-se uma independência angular, a simetria imposta é esférica. Para manter esta simetria ao máximo, a forma em pelo menos um dos ângulos deveria ser mantida constante. Assim, a forma geométrica básica escolhida manteve a simetria em ϕ e foi a de "4 gomos", ilustrada na Figura 5 e 6, onde o fósforo foi proposto esférico, também, com um diâmetro de 0,50 cm, factível experimentalmente.

Figura 6: Ilustração da geometria de filtros utilizada, em vermelho, com dosímetro esférico em seu centro.

Figura 7: Ilustração de vários ângulos de vista da geometria de filtros utilizada.

Nesta geometria, a largura do "gomo", em ângulos da coordenada θ , foi variada de 0° à 90° ; assim como a espessura do filtro de chumbo, de 0,0 à 3,6 mm. Na simulação, uma pequena camada de cobre de 0,5 mm foi colocada cobrindo a superfície interna do filtro, para prevenir retroespalhamento de fótons de baixa energia.

Como a simetria do problema permitiu que se utilizasse apenas dois octantes da esfera, simulou-se a incidência de feixes paralelos de radiação de fótons com energias de 33, 48, 118 e 1250 keV, sob os ângulos $\theta = 45^\circ$; $67,5^\circ$; $78,75^\circ$ e 90° ; e ângulos $\phi = 0^\circ$; 30° ; 45° ; 60° e 90° ; num total de 80 resultados de resposta TL para cada combinação de Largura/Espessura. O grande número de resultados foi organizado em planilhas eletrônicas e bancos de dados para "filtrar" as combinações de largura e espessura que melhor corrigissem a dependência energética, ou seja, tivessem o resultado relativo à resposta sob ^{60}Co (utilizado na calibração) mais próximos da unidade.

Cada execução do programa, cujo código fonte encontra-se no Anexo 1, para uma única combinação de largura/espessura, demora em média 30 minutos, num processador Pentium IV de 3,20 GHz, com 512 Mbytes de memória RAM, sistema operacional Windows XP Home Edition Versão 2002, sem a concorrência de outros programas.

Finalizadas as simulações, todos os resultados foram inseridos em uma planilha Excel, de onde foram extraídas as combinações de valores de espessura e largura que melhor corrigiam a dependência energética para quaisquer ângulos de incidência do feixe de radiação de fótons.

4.2. Considerações Empíricas

Ao propagar pelo meio, a radiação sofre atenuações. A propagação do feixe é uma trajetória linear descrita em coordenadas esféricas no Anexo 2. O feixe paralelo é interpretado como um conjunto de trajetórias individuais. Foi utilizado um coeficiente de atenuação para o chumbo e para o cobre, para cada fóton avaliado, conforme TAB. 1. Desprezou-se a atenuação do ar e do próprio cristal por serem muito menores que a destes materiais, nas dimensões propostas.

TABELA 1. Valores dos coeficientes de atenuação utilizados na simulação ^[23].

Fóton (keV)	Chumbo	Cobre
33	30	8.0584
48	11.36	2.692
118	4.786	0.33266
1250	0.066	0.04704

Os valores da dependência energética do CaSO₄:Dy e do CaF₂:Mn foram extraídos de ^[8] e foram mostrados na FIG. 4. Para utilização no algoritmo, estas dependências energéticas foram colocadas numa forma algébrica por ajuste numérico utilizando funções (ou soma de funções) de formato gaussiano, em escalas semi-logarítmicas. Dada uma energia de fóton E, estas funções dependência energética são:

para o CaSO₄:Dy :

$$\text{Sinal TL} = e^{2,365 \cdot e^{\frac{-(\ln(E) - 3,5)^2}{1,21057}}}$$

para o CaF₂:Mn :

$$\text{Sinal TL} = 1 + 11,0 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{\log E + 1,94}{0,2} \right)^2} + 13,5 \cdot e^{-0,5 \left(\frac{\log E + 1,45}{0,24} \right)^2}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Fósforo $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$

Foi escolhida a forma de gráficos tridimensionais, onde a ordenada z, vertical, será sempre o sinal TL relativo à média de todos os sinais TL obtidos com o fóton de energia 1250 keV, típico do ^{60}Co e utilizado usualmente na calibração de dosímetros. Uma das ordenadas, x ou y, será sempre a energia do fóton incidente, para os valores 33, 48, 118 e 1250 keV; qualidades típicas de irradiações com Raios-X, além do ^{60}Co . Cada gráfico tridimensional compõe-se de resultados de várias simulações.

O filtro desejado não pode ter uma espessura muito pequena pois isto não atenuaria o feixe de maneira satisfatória. Filtros muito espessos, que "blindem" demais o detector, também não são úteis para a compensação do sinal TL resultante.

Os resultados mostrados na FIG. 8, para o $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$, demonstram a insuficiência da correção da dependência energética quando a largura dos gomos é muito estreita. No caso, esta situação é ilustrada com 30° , mas obteve-se resultados também insuficientes com outras larguras até 60° .

FIGURA 8: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para dois ângulos de incidência distintos.

Esta situação, onde larguras estreitas não corrigem adequadamente a dependência energética, aplica-se também para o $\text{CaF}_2:\text{Mn}$.

Os resultados mostrados na FIG. 9, indicam a melhoria na correção da dependência energética quando a largura dos gomos é maior. No caso, esta situação é ilustrada com 66° .

FIGURA 9: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura indicada.

Com o aumento da espessura do filtro verifica-se a melhoria na correção da dependência energética. Essa melhoria é mais visível na medida em que se aumenta a largura. Assim, alguns dos resultados desta busca pelas dimensões mais apropriadas são vistos na FIG. 10.

FIGURA 10: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da largura do filtro para a espessura de 3,0 mm e incidências indicadas.

As larguras acima de 72^0 não são adequadas pois blindam o feixe de radiação em demasia, para a espessura de 3,0 mm.

Utilizando o critério descrito anteriormente, nos procedimentos experimentais, as combinações mais adequadas de espessura e largura dos gomos para a correção da dependência energética são indicados na TAB. 2.

Tabela 2: Simulações que melhor apresentaram correção da dependência energética do $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$, em média, para todas as incidências e todos os fótons estudados.

Simulação:	Espessura (mm)	Largura (em graus)	Média de Resposta TL	Desvio Padrão da Média
1	1,6	72	1,06	0,74
2	1,7	72	1,01	0,74
3	1,8	66	1,19	0,96
4	1,9	66	1,16	0,97
5	2,1	66	1,10	0,98

Na FIG. 11, é indicada a espessura 1.6 mm para a largura de 72^0 do gomo do filtro que melhor corrige a dependência energética, numa incidência particular.

FIGURA 11: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 72° e incidências indicadas. A linha pontilhada sobre a espessura de 1,6 mm mostra a proximidade das respostas TL ao valor 1.

5.2 Fósforo $\text{CaF}_2:\text{Mn}$

Para a fluorita, ou $\text{CaF}_2:\text{Mn}$, a correção da dependência energética seguiu os mesmos procedimentos adotados para o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$.

Nas simulações para este fósforo foi considerada a adição de uma pequena chapa nas extremidades dos gomos. Esta chapinha visa melhorar a correção da dependência energética, uma vez que nas extremidades do gomo, onde o ângulo de incidência ϕ é igual a 0° , apresentava distorções na correção da dependência energética. A inserção desta chapinha mostrou-se adequada, pois estas distorções foram sanadas.

Na FIG. 12 pode-se visualizar a introdução deste elemento ao filtro.

FIGURA 12: Visualização da chapinha na geometria de filtro com a chapinha.

Na FIG. 13 é apresentada uma outra visão do mesmo filtro contendo a referida chapinha.

FIGURA 13: Filtro com a chapinha visto por outro ângulo.

São mostrados a seguir os principais resultados que levaram à obtenção das espessuras e larguras que melhor corrigiram a dependência energética.

Os resultados mostrados na FIG. 14 indicam que larguras de filtro diminutas não corrigem a dependência energética. O mesmo se aplica à espessura, de modo que um filtro pouco espesso também não corrige adequadamente a dependência energética. Os dados exibidos são referentes a um ângulo θ igual a 0° e um ângulo ϕ igual a 60° , com uma

largura de 18^0 . A mesma situação se repete para os outros ângulos θ ($11,25^0$, $22,5^0$ e 45^0) e para os demais ângulos ϕ .

FIGURA 14: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 18^0 e incidências indicadas.

Na medida em que se aumenta a largura, ocorre uma melhoria na correção da dependência energética. Isso se aplica também para a espessura dos gomos. Essa situação é visualizada na FIG. 15 Os dados exibidos são referentes a um ângulo θ igual a 0^0 e um ângulo ϕ igual a 60^0 , com uma largura de 66^0 . A mesma situação se repete para os outros ângulos θ ($11,25^0$, $22,5^0$ e 45^0) e para os demais ângulos ϕ .

FIGURA 15: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 66° e incidências indicadas.

Situação similar pode ser visualizada na FIG. 16. Neste caso, os dados exibidos referem-se a um ângulo θ igual a 0° e um ângulo ϕ igual a 60° , com uma largura de 78° . A mesma situação se repete para os outros ângulos θ ($11,25^\circ$, $22,5^\circ$ e 45°) e para os demais ângulos ϕ .

Assim, para largura e espessura de gomo maiores tem-se uma melhor correção da dependência energética.

FIGURA 16: Sinal TL relativo para os fótons indicados em função da espessura do filtro para a largura de 78° e incidências indicadas.

Utilizando o critério descrito anteriormente, nos procedimentos experimentais, as combinações mais adequadas obtidas de espessura e largura dos gomos para a correção da dependência energética são indicados na TAB. 3.

Tabela 3: Simulações que melhor apresentaram correção da dependência energética do $\text{CaF}_2\text{:Mn}$, em média, para todas as incidências e todos os fótons estudados.

Simulação:	Espessura (mm)	Largura (em graus)	Média de Resposta TL	Desvio Padrão da Média
1	3,0	72	0,96	1,17
2	3,6	72	0,91	1,17
3	4,0	78	0,88	1,18

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Para a geometria de filtro proposta e descrita no capítulo *Procedimentos Computacionais*, com um fósforo esférico de 0,5 cm de diâmetro de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ ou de $\text{CaF}_2\text{:Mn}$, as combinações de espessura e largura que melhor corrigiram a dependência energética para os ângulos de incidência estudados encontram-se nas tabelas Tab.2 e Tab.3, respectivamente.

O modelamento matemático mostrou-se coerente com os resultados esperados em situações bem conhecidas (ausência de filtro, excesso de blindagem, todos os resultados com ^{60}Co , etc.) e, embora não tenha sido o escopo deste trabalho sua validação formal, os resultados mostraram que o seu uso pode ser muito útil para o projeto de novos dosímetros TL que utilizem fósforos com muita dependência energética de resposta, e onde se deseje corrigir esta dependência com a anteposição de filtros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers*, 1982, ICRP publications 35. Pergamon Press, Oxford.
2. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *General Principles for the Radiation Protection of workers*. 1997. ICRP publications 75. Pergamon Press, Oxford.
3. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Diretrizes básicas de radioproteção*. jan. 2005. (CNEN 3.01).
4. COMITÊ DE AVALIAÇÃO DO SERVIÇO DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA. *Regulamento técnico referentes ao processo de certificação de sistemas de monitoração individual externa*. Out. 4, 1995. IRD-RT nº001 ao 005.01/95.(CASMIE).
5. Nambi, K. S. V.; Thermoluminescence: Its understanding and applications. São Paulo. maio de 1977, (IEA-Pub.-54).
6. Wolfgang G. A.; Ambrosi P.; Bohm J.; Dietze G.; Hohfeld K.; Wolfram W. *New dose quantities in radiation protection*. PTB-Bericht-Dos-23e. Braunschweig, 1995.
7. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of International Commission on Radiological Protection*, ICRP, 1991. (Publicação 60). Pergamon Press., Oxford, UK
8. OBERHOFER M.; SCHARMANN. A. *Applied Thermoluminescence Dosimetry*. Published for the Commission of the European Communities. Adam Hilger, Italy. 1979.
9. CAMPOS, L.L. Pastilhas dosimétricas de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ + Teflon para detecção da radiação X, beta e gama. *Publicação IPEN-120*, v.120, p. 1-10, 1987.
10. CAMPOS, L.L; Lima, M. F. Dosimetric properties of $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ teflon pellets produced at IPEN. . *Radiation Protection Dosimetry*, v.14, n.4, p.333-335, 1996.
11. Bapat, V. N. **Filter Studies for thermoluminescent Phosphors**. Relatório interno IPEN. 1978.
12. CAMPOS, L. L. Development of $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ dosimeter. In: *Meeting on Radiation Protection Dosimetry*. Itaipava. Proceeding of meeting on Radiation Protection Dosimetry. Rio de Janeiro, 1983. v.1. p.2-4.

13. Campos, V. P., Saori, M., Manzoli, J. E.- Avaliação do limite de repetitividade e de detecção de dosímetros de $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$. In: **CONGRESSO LATINO AMERICANO DE METROLOGIA**. Nov. 09-12, 2004. Paraná: Rede Paranaense de Metrologia e Ensaios. Metrosul IV.1 CD-ROM.
14. Campos, V.P. - Desenvolvimento e Avaliação de um Novo Porta Detector/Filtro para Monitoramento Termoluminescente com $\text{CaSO}_4\text{:Dy/PTFE}$ - Dissertação de Mestrado, TNA-USP, São Paulo, 2005. Orientador: Dr. José Eduardo Manzoli.
15. CAMERON, J. R. SUNTHARALINGAM, N.; KENNEY, G. N.
Thermoluminescent Dosimetry Madison, Univ. Wisconsin Press,,1968.
16. Rosa L. A. R. *Dosimetria Termoluminescente Aplicada à Física Médica.:* Departamento de Física Médica. 2000.IRD.
17. MCKEEVER, S. W. S; MOSCOVITCH, M; TOWNSEND, P. D.
Thermoluminescence Dosimetry: Properties and Uses. London, Nuclear Technology Publishing, 1995.
18. J. S. YANG, D. Y. KIM; J. L. CHANG; Y. M. NAM AND J. W. PARK.
Thermoluminescence Characteristics of Teflon Embedded $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ TLD.
Radiation Protection Dosimetry, v. 100. nº 1-4, p. 337-400, 2002
19. Lakshmanan, A. R.; Pobili, K, L; Bhatt, R. C. Thermal history and reusability of $\text{CaSO}_4\text{:Dy}$ Teflon TLD discs. **Physics in Medicine and Biology**, v. 24, n. 5, p. 999-1008, 1979
20. Knoll, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 2 ed. Michigan. John Wiley & Sons. 1989.
21. Evans, R. D. **The Atomic Nucleus**. Tata McGraw Hill Publishing Company Ltd. - New Delhi. 1955.
22. Milne, L.M. and Thomson, C.B.E. - *The Calculus of Finite Differences*, New York, 1960.
23. Johns, H.N.; Cunnighan, J.R. **The physics of radiology**. Charles C. Thomaz Publisher, Illinois, USA, 1983.

ANEXO A - Programa Fonte da Simulação


```

1:      program jemtl4gs4
2:      c
3:      c -----
4:      c Authors: José Eduardo Manzoli & Gabriel Issa Jabra Shammam
5:      c Local: São Paulo/IPEN - Junho/2006
6:      c Remarks: Avalia a resposta TL de detector esférico sob filtração em
7:      c forma de gomos de chumbo, inserindo largura e espessura e variando
8:      c fótons e ângulo de incidência da radiação.
9:      c Cálculos em coordenadas esféricas onde o raio apresenta discretiza-
10:     c ção não uniforme.
11:     c -----
12:     c
13:     c -----
14:     c Define variáveis
15:     c -----
16:     c
17:     real ALF, CO, COEF,
18:     .   DEPFOT, DIS, DR, ESPES,
19:     .   FIA, FIAC, FIB, FIFC, FIG,
20:     .   PI,
21:     .   RA1, RA2, RA3, RAR1, RAR2, RCU, RFINAL,
22:     .   ROA, ROAC, ROB, ROFC, RXY,
23:     .   SINAL,
24:     .   TETAA, TETAAC, TETAB, TETAFC, TETAG,
25:     .   XIS, YPS, ZE,
26:     .   AFOTCU(4), AFOTPB(4), DOMR(40),
27:     .   FII(5), FOTON(4), TEI(4),
28:     .   SPAST(40, 60, 30)
29:     c
30:     integer FI, FOT,
31:     .   g, h, s, GSDBG1,
32:     .   IFI, IROA, IROF, ITETA,
33:     .   LAR, NPAS, TET,
34:     .   FILTCU(40, 60, 30), FILTPB(40, 60, 30)
35:     c
36:     character*8 HorDial1, HorDial2, HorDial3
37:     c
38:     c -----
39:     c Inicializa as variáveis
40:     c g, h e s - Variáveis usadas no processo de inicialização
41:     c -----
42:     c
43:     GSDBG1 = 0
44:     call time(hordial1)
45:     write(*,*) "GIS- ", GSDBG1,
46:     .   " Programa JemTl04- Horário de Início: ", HorDial1
47:     g= 0
48:     h= 0
49:     s= 0
50:     c
51:     c -----
52:     c Inicializa as variáveis integer
53:     c -----
54:     fi= 0
55:     FOT= 0
56:     IFI= 0
57:     IROA= 0
58:     IROF= 0
59:     ITETA= 0
60:     LAR= 0
61:     NPAS= 0
62:     TET= 0
63:     c
64:     c -----
65:     c Inicializa as variáveis real
66:     c -----
67:     ALF= 0.0
68:     CO= 0.0
69:     COEF= 0.0
70:     DEPFOT= 0.0
71:     DIS= 0.0
72:     DR= 0.0

```

```

73:      ESPES= 0.0
74:      FIA= 0.0
75:      FIAC= 0.0
76:      FIB= 0.0
77:      FIFC= 0.0
78:      FIG= 0.0
79:      PI= 0.0
80:      RA1= 0.0
81:      RA2= 0.0
82:      RA3= 0.0
83:      RAR1= 0.0
84:      RAR2= 0.0
85:      RCU= 0.0
86:      RFINAL= 0.0
87:      ROA= 0.0
88:      ROAC= 0.0
89:      ROB= 0.0
90:      ROFC= 0.0
91:      RXY= 0.0
92:      SINAL= 0.0
93:      TETAA= 0.0
94:      TETAAC= 0.0
95:      TETAB= 0.0
96:      TETAFC= 0.0
97:      TETAG= 0.0
98:      XIS= 0.0
99:      YPS= 0.0
100:     ZE= 0.0
101:     AFOTCU(1)= 0.0
102:     AFOTCU(2)= 0.0
103:     AFOTCU(3)= 0.0
104:     AFOTCU(4)= 0.0
105:     AFOTPB(1)= 0.0
106:     AFOTPB(2)= 0.0
107:     AFOTPB(3)= 0.0
108:     AFOTPB(4)= 0.0
109:     FII(1)= 0.0
110:     FII(2)= 0.0
111:     FII(3)= 0.0
112:     FII(4)= 0.0
113:     FII(5)= 0.0
114:     FOTON(1)= 0.0
115:     FOTON(2)= 0.0
116:     FOTON(3)= 0.0
117:     FOTON(4)= 0.0
118:     TEI(1)= 0.0
119:     TEI(2)= 0.0
120:     TEI(3)= 0.0
121:     TEI(4)= 0.0
122: c
123: c -----
124: c Looping- inicializa variáveis
125: c -----
126: c
127:     do 1 g=1,40
128:     DOMR(g) = 0.0
129:     1 continue
130:     do 500 g=1,40
131:     do 502 h=1,60
132:     do 504 s=1,30
133:     spast(g,h,s) = 0.0
134:     FILTCU(g,h,s) = 0
135:     FILTPB(g,h,s) = 0
136:     504 continue
137:     502 continue
138:     500 continue
139: c
140: c -----
141:     GSDBG1 = GSDBG1 + 1
142:     WRITE(*,*) "GIS- ", GSDBG1, " -Variáveis- todas inicializadas!"
143: c -----
144: c

```

```

145: c -----
146: c teta de 1 a 4, fi de 1 a 5 e fot de 1 a 4
147: c Ângulo em graus e Energia em keV
148: c -----
149: c
150: 5 format (/,/,/,15x,I2,
151: .      /,/,/,/,15x,G15.7,
152: .      /,/,/,4(15x,G15.7,/),
153: .      /,/,15x,G15.7,
154: .      /,/,/,/,15x,G15.7,
155: .      /,/,/,15x,G15.7,
156: .      /,/,15x,G15.7,
157: .      /,15x,I4)
158: 6 format (4(G15.7,2x))
159: c
160: c -----
161: GSDBG1 = GSDBG1 + 1
162: WRITE(*,*) "GIS- ", GSDBG1, " -Arquivos- Abertura!"
163: c -----
164: c
165: OPEN (UNIT=10, FILE='ENTRADA.dat', STATUS='OLD')
166: OPEN (UNIT=11, FILE='S00G32L15A00P2.dat', STATUS='NEW')
167: c
168: READ (10,5) LAR, ESPES, CO, RA1, RA2, RA3, RAR1, RCU, RAR2, ALF, NPAS
169: c
170: c -----
171: c Definições dos vetores e das variáveis
172: c -----
173: c
174: pi=3.1415926
175: DANG= 3.0 *pi/180.
176: TEI(1)= 90. *pi/180.
177: TEI(2)= 78.75 *pi/180.
178: TEI(3)= 67.5 *pi/180.
179: TEI(4)= 45. *pi/180.
180: FII(1)= 0. *pi/180.
181: FII(2)= 30. *pi/180.
182: FII(3)= 45. *pi/180.
183: FII(4)= 60. *pi/180.
184: FII(5)= 90. *pi/180.
185: FOTON(1)= 33.
186: FOTON(2)= 48.
187: FOTON(3)= 118.
188: FOTON(4)= 1250.
189: RFINAL=CO+RA1+RA2+RA3+RAR1+RCU+ESPES+RAR2
190: c
191: c -----
192: c Atenuacao para milímetros:
193: c -----
194: c
195: AFOTPB(1)= 30.
196: AFOTPB(2)= 11.36
197: AFOTPB(3)= 4.786
198: AFOTPB(4)= 0.066
199: AFOTCU(1)= 8.0584
200: AFOTCU(2)= 2.692
201: AFOTCU(3)= 0.33266
202: AFOTCU(4)= 0.04704
203: c
204: c -----
205: c Domínio teta: discret.= 3 graus
206: c Domínio fi: discret.= 3 graus
207: c Domínio radial:
208: c -----
209: c
210: DR=RA1/4.0
211: DOMR(1)=CO+DR
212: do 10 i=2,4
213: DR=RA1/4.0
214: DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
215: 10 continue
216: do 11 i=5,10

```

```

217:         DR=RA2/6.0
218:         DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
219: 11 continue
220:         do 12 i=11,20
221:             DR=RA3/10.0
222:             DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
223: 12 continue
224:         do 13 i=21,25
225:             DR=RA1/5.0
226:             DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
227: 13 continue
228:         do 14 i=26,27
229:             DR=RCU/2.0
230:             DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
231: 14 continue
232:         do 15 i=28,37
233:             DR=ESPES/10.0
234:             DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
235: 15 continue
236:         do 16 i=38,40
237:             DR=RA2/3.0
238:             DOMR(i)=DOMR(i-1)+DR
239: 16 continue
240: c
241: c -----
242: c Definindo detector e filtro
243: c -----
244: c
245: c -----
246:         GSDBG1 = GSDBG1 + 1
247:         WRITE(*,*) "GIS- ", GSDBG1, " -Detector e filtro- Sendo definidos!"
248: c -----
249: c
250:         do 20 k=1,30
251:             do 20 j=1,60
252:                 do 20 i=1,40
253:                     spast(i,j,k)=0.0
254:                     DETE(i,j,k)= 0
255:                     FILTPB(i,j,k)=0
256:                     FILTCU(i,j,k)=0
257: 20 continue
258: c         do 30 k=1,30
259: c             do 30 j=1,60
260: c                 do 30 i=15,20
261: c                     DETE(i,j,k)=1
262: c 30 continue
263:         do 40 k=1,30
264:             do 40 i=28,37
265:                 do 40 j=1,LAR
266:                     FILTPB(i,j,k)= 1
267:                     FILTPB(i,31-j,k)=1
268:                     FILTPB(i,30+j,k)=1
269:                     FILTPB(i,61-j,k)=1
270: 40 continue
271:         do 50 k=1,30
272:             do 50 i=26,27
273:                 do 50 j=1,LAR
274:                     FILTCU(i,j,k)= 1
275:                     FILTCU(i,31-j,k)=1
276:                     FILTCU(i,30+j,k)=1
277:                     FILTCU(i,61-j,k)=1
278: 50 continue
279:         alarg=2.0*LAR*3.0
280:         aespes=DOMR(37)-DOMR(27)
281:         WRITE(*,*) " "
282:         WRITE(*,*) "Largura do gomo = ",alarg," graus"
283:         WRITE(*,*) "Espessura = ",aespes," mm"
284:         WRITE(*,*) "Raio do sistema = ",RFINAL," mm"
285:         WRITE(*,*) " "
286: c
287: c -----
288: c Looping de fótons

```

```

289: c -----
290: c
291: c -----
292:     GSDBG1 = GSDBG1 + 1
293:     call time(HorDia2)
294:     write(*,*) "GIS- ", GSDBG1,
295:     . " -Looping de fótons- Iniciando agora: ", HorDia2
296:     write(*,*) "GIS- "
297: c -----
298: c
299:     do 200 fot=1,4
300: c
301: c -----
302: c     "fitting" da dependência energética TL da pastilha para
303: c     Sulfato de Calcio:Dy:
304: c -----
305: c
306:     a=-(log(FOTON(fot))-3.5)**2/1.21057
307:     a=2.365*exp(a)
308:     DEPFOT=exp(a)
309: c
310: c -----
311: c     Looping dos ângulos
312: c -----
313: c
314:     do 200 tet=1,4
315:     do 200 fi= 1,5
316:         SINAL=0.0
317:         call time(HorDia2)
318:         write(*,*) "FOT= ",FOT," - TETA= ", TET,
319:         . " - FI= ", FI,
320:         . " - HOR.= ", HorDia2
321: c
322: c -----
323: c     Loopings de cada ponto inicial da trajetória do feixe,
324: c     no detector
325: c -----
326: c
327:     do 150 k=1,30
328:     do 150 j=1,60
329:     do 150 i=15,20
330:         COEF=1.0
331:         ROB=DOMR(i)
332:         ROA=ROB
333:         ROAC=ROB
334:         ROFC=DOMR(i+1)
335:         IROA=i
336:         IROF=i+1
337:         TETAA=j*DANG
338:         TETAAC=TETAA
339:         TETAFC=TETAA+DANG
340:         ITETA=j
341:         FIA=k*DANG
342:         FIAC=FIA
343:         FIFC=FIAC+DANG
344:         IFI=k
345: c
346: c -----
347: c     Looping de caminho linear de feixe pelo sistema:
348: c -----
349: c
350:     do 120 m=1,NPAS
351:         IF (ROB.LT.RFINAL) THEN
352: c
353: c -----
354: c     Propagando o feixe:
355: c -----
356: c
357:         XIS=DOMR(i)*sin(K*DANG)*cos(J*DANG)+
358:         . m*ALF*sin(FII(fi))*cos(TEI(tet))
359:         YPS=DOMR(i)*sin(K*DANG)*sin(J*DANG)+
360:         . m*ALF*sin(FII(fi))*sin(TEI(tet))

```

```

361:      ZE=DOMR(i)*cos(K*DANG)+m*ALF*cos(TEI(tet))
362:      ROB=sqrt(XIS**2+YPS**2+ZE**2)
363:      RXY=sqrt(XIS**2+YPS**2)
364:      TETAB=acos(XIS/RXY)
365:      FIB=acos(ZE/ROB)
366: c
367: c -----
368: c  Verificação se o feixe saiu da célula:
369: c -----
370: c
371:      if((ROB.GT.ROFC).or.(ROB.LT.ROAC).or.
372:      .   (FIB.GT.FIFC).or.(FIB.LT.FIAC).or.
373:      .   (TETAB.GT.TETAFC).or.(TETAB.LT.TETAAC)) then
374: c
375: c -----
376: c  Se sim, cálculo da distância caminhada na célula:
377: c -----
378: c
379:      DIS=(ROB*cos(TETAB)*sin(FIB)-
380:      .   ROA*cos(TETAA)*sin(FIA))**2+
381:      .   (ROB*sin(TETAB)*sin(FIB)-
382:      .   ROA*sin(TETAA)*sin(FIA))**2+
383:      .   (ROB*cos(FIB)-ROA*cos(FIA))**2
384:      if((FILTPB(IROA,ITETA,IFI).eq.1).AND.
385:      .   (FILTPB(IROF,ITETA,IFI).eq.1)) then
386:      .   coef=exp(-AFOTPB(fot)*DIS)*coef
387:      else
388:      .   if((FILTCU(IROA,ITETA,IFI).eq.1).AND.
389:      .   .   (FILTCU(IROF,ITETA,IFI).eq.1)) then
390:      .   .   coef=exp(-AFOTCU(fot)*DIS)*coef
391:      .   .   else
392:      .   .   if((FILTPB(IROA,ITETA,IFI).eq.1).AND.
393:      .   .   .   (FILTCU(IROF,ITETA,IFI).eq.1)) then
394:      .   .   .   coef=exp(-AFOTPB(fot)*DIS)*coef
395:      .   .   .   else
396:      .   .   .   if((FILTCU(IROA,ITETA,IFI).eq.1).AND.
397:      .   .   .   .   (FILTPB(IROF,ITETA,IFI).eq.1)) then
398:      .   .   .   .   coef=exp(-AFOTPB(fot)*DIS)*coef
399:      .   .   .   .   else
400:      .   .   .   .   endif
401:      .   .   .   .   endif
402:      .   .   .   .   endif
403:      .   .   .   endif
404:      .   .   .   ROA=ROB
405:      .   .   .   TETAA=TETAB
406:      .   .   .   FIA=FIB
407: c
408: c -----
409: c  Localizar a nova célula:
410: c -----
411: c
412:      do 90 mri=15,39
413:      .   if((ROB.gt.DOMR(mri)).and.
414:      .   .   (ROB.lt.DOMR(mri+1))) then
415:      .   .   IROA=mri
416:      .   .   ROAC=DOMR(IROA)
417:      .   .   IROF=mri+1
418:      .   .   ROFC=DOMR(IROF)
419:      .   .   else
420:      .   .   endif
421:      .   90 continue
422:      .   do 95 mti=1,59
423:      .   .   if((TETAB.gt.(mti*DANG)).and.
424:      .   .   .   (TETAB.lt.((mti+1)*DANG))) then
425:      .   .   .   ITETA=mti
426:      .   .   .   TETAAC=ITETA*DANG
427:      .   .   .   TETAFC=TETAAC+DANG
428:      .   .   .   else
429:      .   .   .   endif
430:      .   .   95 continue
431:      .   do 100 mfi=1,29
432:      .   .   if((FIB.gt.(mfi*DANG)).and.

```

```

433:      .      (FIB.lt.((mfi+1)*DANG)) ) then
434:      IFI=mfi
435:      FIAC=IFI*DANG
436:      FIFC=FIAC+DANG
437:      else
438:      endif
439: 100      continue
440:      else
441:      endif
442:      ELSE
443:      ROFC=RFINAL
444:      ROB=RFINAL
445:      ROAC=RFINAL
446:      ENDIF
447: 120      continue
448:      spast(i,j,k)=coef
449: 150      continue
450: c
451: c -----
452: c Integral de sinal TL apenas na casca do detector:
453: c -----
454: c
455:      do 160 k=1,30
456:      do 160 j=1,60
457:      do 160 i=15,20
458: c
459: c -----
460: c Sinal normalizado para Co-60 sem filtro:
461: c -----
462: c
463:      sinal=sinal+spast(i,j,k)/10.80121E3
464: 160      continue
465:      tetag=TEI(tet)*180./pi
466:      fig=FII(fi)*180./pi
467:      sinal=sinal*DEPFOT
468:      write(11,6) foton(fot),tetag,fig,sinal
469: 200 continue
470:      write(*,*) " "
471:      WRITE(*,*) "Diametro do sistema = ",RFINAL," mm"
472:      WRITE(*,*) "Largura do gomo ... = ",alarg," graus"
473:      WRITE(*,*) "Espessura ..... = ",aespes," mm - CONCLUIDO"
474: c
475: c -----
476: c Encerrando o programa
477: c -----
478: c
479: c -----
480:      GSDBG1 = GSDBG1 + 1
481:      call time(HorDia3)
482:      WRITE(*,*) "GIS- "
483:      WRITE(*,*) "GIS- ", GSDBG1, " - Programa Concluído!"
484:      WRITE(*,*) "GIS- ", "Horário Início= ", HorDia1
485:      WRITE(*,*) "GIS- ", "Horário Final= ", HorDia3
486: c -----
487: c
488:      stop
489:      end

```

ANEXO B - Trajetória Linear em Coordenadas Esféricas

Descreve a trajetória de um feixe de radiação que parta do ponto P_1 , ilustrado na figura seguinte, seguindo a reta descrita pelo vetor $\vec{v}_o$.

$$P_1 = (r_1, \theta_1, \varphi_1)$$

$$v_o = (1, \theta_o, \varphi_o)$$

Em coordenadas cartesianas, $(\dots)_c$, ficam:

$$P_1 = (r_1 \sin(\varphi_1) \cos(\theta_1), r_1 \sin(\varphi_1) \sin(\theta_1), r_1 \cos(\varphi_1))_c$$

$$v_o = (\sin(\varphi_o) \cos(\theta_o), \sin(\varphi_o) \sin(\theta_o), \cos(\varphi_o))_c$$

Qualquer ponto $P(\lambda)$ da reta por P_1 , na direção v_o , é descrito por:

$$\begin{aligned}
 P(\lambda) &= P_1 + \lambda v_o = (r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \cos(\theta_1), r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \operatorname{sen}(\theta_1), r_1 \cos(\varphi_1))_c + \\
 &\quad \lambda (\operatorname{sen}(\varphi_o) \cos(\theta_o), \operatorname{sen}(\varphi_o) \operatorname{sen}(\theta_o), \cos(\varphi_o))_c = \\
 &= \\
 &(r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \cos(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \cos(\theta_o), r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \operatorname{sen}(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \operatorname{sen}(\theta_o), r_1 \cos(\varphi_1) + \lambda \cos(\varphi_o))_c
 \end{aligned}$$

Em coordenadas esféricas, este $P(\lambda)$ é dado por $P(r, \theta, \varphi)$, onde:

$$\begin{aligned}
 r(\lambda) &= \sqrt{(r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \cos(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \cos(\theta_o))^2 + \\
 &\quad (r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \operatorname{sen}(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \operatorname{sen}(\theta_o))^2 + (r_1 \cos(\varphi_1) + \lambda \cos(\varphi_o))^2} \\
 \theta(\lambda) &= \arccos \left(\frac{r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \cos(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \cos(\theta_o)}{\sqrt{(r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \cos(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \cos(\theta_o))^2 + (r_1 \operatorname{sen}(\varphi_1) \operatorname{sen}(\theta_1) + \lambda \operatorname{sen}(\varphi_o) \operatorname{sen}(\theta_o))^2}} \right) \\
 \varphi(\lambda) &= \arccos \left(\frac{r_1 \cos(\varphi_1) + \lambda \cos(\varphi_o)}{r(\lambda)} \right)
 \end{aligned}$$

APÊNDICE - Trabalhos Gerados durante o (e por causa do) Projeto.

São apresentados a seguir os trabalhos produzidos durante o projeto:

1. Trabalho aceito para apresentação na Primeiras Jornadas Luso Brasileiras de Protecção Contra Radiações e das Décimas Primeiras Jornadas Portuguesas de Protecção Contra Radiações. (Sociedade Portuguesa de Física, S.P.F.) “ESTUDOS DA CORREÇÃO DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA E ANGULAR DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE EM DOSÍMETROS PESSOAIS DE CASO₄:DY/PTFE – MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES SEMI-EMPÍRICA”
2. Trabalho apresentado em XI Simpósio Multidisciplinar da Universidade São Judas Tadeu “1905: O ANO MIRACULOSO DE ALBERT EINSTEIN” 3 a 8 de outubro de 2005, São Paulo, SP – Brasil. “SIMULAÇÃO SEMI-EMPÍRICA DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE”
3. Trabalho apresentado em XII Simpósio Multidisciplinar da Universidade São Judas Tadeu “CONHECIMENTO E INOVAÇÃO: 100 ANOS DO VÔO DO 14 BIS” 2 a 7 de outubro de 2006, São Paulo, SP – Brasil. “RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE SIMULADA SEMI-EMPIRICAMENTE”

11 de Março de 1993

SOCIEDADE PORTUGUESA DE PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÕES

NIPC:503027979

Instituição de Utilidade Pública

Afiliada da **International Radiation Protection Association**

terça-feira, 10 de Maio de 2005

Para os Exmos. Senhores Prelectores e Moderadores, intervenientes nas

PRIMEIRAS JORNADAS LUSO BRASILEIRAS DE PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÕES e das DÉCIMAS PRIMEIRAS JORNADAS PORTUGUESAS DE PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÕES

Ao apresentar os meus cumprimentos, agradeço em nome da SOCIEDADE PORTUGUESA DE PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÕES, a disponibilidade posta e a anuência dada para vir a ser observável o vosso valioso contributo, possibilitante da efectivação das PRIMEIRAS JORNADAS LUSO BRASILEIRAS DE PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÕES e das DÉCIMAS PRIMEIRAS JORNADAS PORTUGUESAS DE PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÕES.

Aos Exmos. Senhores Expositores, solicito que me enviem impreterivelmente, até ao dia 5 de Setembro do corrente ano, a sua contribuição numa "disquete" ou num CD, (ou por correio electrónico,) que possam ser abertos em ambiente Windows, não devendo a Comunicação exceder, 15 páginas A4.

O texto, deverá pois compor-se de 10 a 15 páginas tipo A₄, devendo ser precedido dum resumo em Inglês, e de outro em Português.

A área útil do texto deverá ser 165mmx245mm, devendo-se utilizar-se o nº 10 do tipo de letra "Times New Roman" para o mesmo.

*O **Resumo**, não deverá ter menos de 70 palavras, nem mais de 150. Nele, deverá utilizar-se o tipo de letra nº 8.*

Quanto ao nome (s) do autor (es), e endereço deverá utilizar-se o tipo nº 9. O espaçamento deverá ser o de uma linha simples.

Aos Exmos. Senhores Moderadores, das Sessões das Jornadas, permitimo-nos sugerir que façam a gestão do tempo de acordo com o seu elevado critério, procurando respeitar tanto quanto possível o horário a estipular o que naturalmente será consentâneo com a exposição dos Exmos. Senhores Prelectores.

Renovando os meus agradecimentos, com os meus cumprimentos, os mais distintos, subscrevo-me com elevada consideração e estima pessoal,

O Presidente da Sociedade Portuguesa de Protecção Contra Radiações

João Quintela de Brito
(Investigador Científico)

ENGENHARIA NUCLEAR

1905: O ANO MIRACULOSO DE ALBERT EINSTEIN

Classificação: Graduação

Autor(es): DION, Sonia Maria; FERRAZ, Gilberto Marcon; ROCHA, Carlos Antonio da; MARTINI, Sandro

Instituição: Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Em 1905 Einstein, então um jovem funcionário de um escritório de patentes na Suíça, publicou uma série de trabalhos científicos que transformariam o domínio da física. Nessa mesa abordaremos, inicialmente, sua Teoria da Relatividade Restrita, que trata dos fenômenos que ocorrem quando se atingem velocidades próximas à da luz. Trataremos, em primeiro lugar, de suas conseqüências empíricas. Apesar de ser considerada de difícil observação, podem-se tanto encontrar evidências experimentais, na física nuclear, devido ao fato de as partículas fundamentais da matéria poderem se movimentar com velocidades próximas à da luz, como aplicá-la, por exemplo, na medicina, em um processo chamado “tomografia por emissão de pósitron”, que opera baseado no decaimento radiativo de partículas subatômicas. De um ponto de vista teórico, um aspecto interessante do princípio de constância da velocidade da luz, proposto pela teoria, é o surgimento de paradoxos, que parecem violar o senso comum. Entre esses, será tratado o conhecido “paradoxo dos gêmeos”, resultado da contração das distâncias e da dilatação do tempo. Apresentaremos, além disso, um segundo caso, muito interessante e resolvido recentemente, que se refere ao comportamento de um submarino, que se move com velocidade próxima à da luz e que, em decorrência disso, pode, aparentemente, boiar e afundar ao mesmo tempo, dependendo do referencial que se escolha para fazer a observação. A genialidade de Einstein estendeu-se, porém, muito além da Teoria da Relatividade. Nesse mesmo ano de 1905, ele escreveu dois outros importantes artigos: um deles sobre o efeito fotoelétrico e outro sobre o movimento browniano, que foram fundamentais para o desenvolvimento da teoria quântica e da física atômica e molecular. Discutiremos, então, o impacto desses outros trabalhos, menos divulgados para o público, na física moderna, ilustrando, assim, uma fase do progresso científico no domínio da física.

Palavras-chave: Einstein; Física; Teoria da Relatividade Restrita

SIMULAÇÃO SEMI-EMPÍRICA DA RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE

Classificação: Pós-graduação *Stricto Sensu*

Autor(es): SHAMMAS, Gabriel Issa Jabra; MANZOLI, José Eduardo

Instituição: Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Autor(es): CAMPOS, Vicente de Paulo de

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)

Os materiais termoluminescentes (TL) apresentam, quando aquecidos, uma emissão luminosa dependente do tipo de radiação a que foram submetidos. Esta dependência energética da resposta TL torna-se um problema para a utilização desse material em dosimetria, pois normalmente não se conhece previamente de quais radiações o feixe é composto, e a calibração do dosímetro é realizada com uma única radiação. Esta dependência energética é mais acentuada em materiais com números atômicos efetivos elevados (acima de 10 unidades de massa atômica). O fato de possuir um número atômico efetivo baixo é uma das causas do sucesso de materiais como o fluoreto de lítio (LiF) como dosímetro termoluminescente mais utilizado mundialmente. Para aplicações dosimétricas, a dependência energética de materiais como o $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$, de número atômico efetivo mais elevado, pode ser corrigida com a interposição de filtros. A curva de dependência energética de qualquer fósforo apresenta um aumento do sinal TL se a energia da radiação for menor. Radiações de energias mais baixas apresentam uma atenuação maior pelos filtros. Assim, embora a radiação com energias mais baixas gere um sinal maior, ao incidir sobre o filtro ela é atenuada e a quantidade de fótons que atingirá o fósforo será menor. Uma geometria do filtro adequada permite que esta atenuação compense ou corrija a dependência energética. Neste trabalho apresentaremos resultados de uma simulação computacional semi-empírica da resposta TL utilizando diferenças finitas com o objetivo de obter uma ferramenta de estudos para permitir a correção desta dependência energética, por ser possível variar a geometria dos filtros.

Palavras-chave: Simulação computacional; Termoluminescência; Metrologia das radiações

quando na forma de manchas de óleo, estas são dispersadas por ação de ondas, ventos, fotodecomposição, oxidação, evaporação, entre outras. Ocasionalmente, são achados organismos marinhos em amostras, tendo sido registradas plantas que cresceram de caroços de piche. Além das emanações naturais, há outras importantes fontes de introdução de óleo no ambiente aquático: pela deposição atmosférica, descargas urbanas residenciais e industriais, acidentes rodoviários, vazamentos em postos de combustível, acidentes operacionais nos portos e terminais marítimos, acidentes em plataformas de perfuração e produção de óleo, vazamento de oleodutos, derrames provenientes das atividades de prospecção, armazenagem e transporte. De todas as formas, destacam-se despejos industriais e residenciais, os quais representam, conforme dados recentes, 37% de todo o petróleo lançado ao mar.

Palavras-chave: Petróleo; Poluição; Vazamentos

ENGENHARIA NUCLEAR

RESPOSTA TERMOLUMINESCENTE SIMULADA SEMI-EMPIRICAMENTE

Classificação: Pós-Graduação *Stricto Sensu*

Autor(es): SHAMMAS, Gabriel Issa Jabra

Instituição: Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Autor(es): ROSA, Faena Machado Leite; MANZOLI, José Eduardo

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)

Os materiais termoluminescentes apresentam, quando aquecidos, uma emissão luminosa que depende do tipo de radiação a que foram submetidos, além de sua quantidade. A dependência energética da resposta termoluminescente, ou seja, referente a qual fóton o material foi exposto, torna-se um problema para a utilização desse material em dosimetria, pois normalmente não se conhece previamente de quais radiações o feixe é composto, e a calibração do dosímetro é realizada com uma única radiação ou fóton, normalmente proveniente do radioisótopo ^{60}Co . Esta dependência energética é mais acentuada em materiais com números atômicos efetivos elevados (acima de 10 u.m.a., unidades de massa atômica). O fato de possuir um número atômico efetivo baixo é uma das causas do sucesso de materiais como o fluoreto de lítio, LiF (Zefetivo, 7 u.m.a.), como o dosímetro termoluminescente mais utilizado mundialmente. O sulfato de cálcio dopado com disprósio, $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (Zefetivo, 15 u.m.a.), apresenta uma dependência energética muito mais acentuada, embora este material apresente uma sensibilidade bem maior. Para aplicações dosimétricas, a dependência energética pode ser corrigida com a interposição de filtros. Observando-se a curva de dependência energética nota-se que ocorre um aumento do sinal TL se a radiação for menor. Fótons menores têm uma atenuação maior pelos filtros. Assim, embora a radiação com fótons menores gere um sinal maior, ao incidir sobre o filtro ela é atenuada, e a quantidade de fótons que atingirá o fósforo será menor. A geometria do filtro permite, em tese, que esta atenuação compense ou corrija a dependência energética. A geometria de compensação dos dosímetros atualmente utilizados apresenta um filtro cuja compensação só ocorre para irradiações ortogonais ao filtro (normais). Após a irradiação e durante o processo de avaliação termoluminescente, a razão entre as intensidades luminosas emitidas pela região de incidência sem atenuação e a área de incidência com atenuação aproxima-se de 1 (um), quando a energia da radiação aumenta. Quando esta energia fotônica é menor, tal razão aumenta bastante, de forma que, para qualquer energia, o total de luminosidade das áreas com e sem atenuação permanece quase constante. Observa-se que, mesmo sob irradiação normal, a correção não é muito eficaz. Sob o ângulo de 90° , a correção é nula, pois a radiação não passa pelo filtro. Os cálculos determinaram geometrias que corrigem essa dependência energética para irradiações sob diversos ângulos e energias entre 20 e 1.250 keV. Para calcular essas geometrias, foi utilizada uma simulação numérica computacional. Esta simulação é também classificada como semi-empírica, pois a curva de dependência energética foi obtida de forma puramente experimental (empírica).

Palavras-chave: Dosimetria; Termoluminescência; Simulação