



BR0544379



INIS-BR-3971

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS QUÍMICOS PARA
DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES EM PROCESSOS
INDUSTRIAIS**

ANA MARIA SISTI GALANTE

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientadora:
Dra. Barbara M. Rzycki

**São Paulo
1999**

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

CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS QUÍMICOS PARA
DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES EM PROCESSOS
INDUSTRIAIS

ANA MARIA SISTI GALANTE

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

Orientadora: Dra Barbara M. Rzycki

São Paulo
1999



Aos meus pais, com carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

À Dra Bárbara M. Rzyski pela orientação, incentivo, amizade e confiança demonstradas, que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares na pessoa do Superintendente Dr. Claudio Rodrigues pela oportunidade oferecida.

Ao CNPq, CNEN e FAPESP pelo suporte financeiro.

Aos meus pais, minha irmã, meu marido e minha filha pelo carinho, compreensão, incentivo e colaboração durante a realização deste trabalho.

Na Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria, ao Dr Leonardo G. de Andrade e Silva, chefe da Divisão de Pesquisas em Novas Aplicações, pelo incentivo e apoio, à Eng. Elizabeth S.R. Somessari e ao Eng. Carlos G. da Silveira pelas irradiações das amostras e pela amizade demonstrada e à todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente.

À Dra Letícia L. C. Rodrigues por ter disponibilizado as instalações do Dep. de Metrologia das Radiações e ao Sr. Vanderlei I. Souto e Sra. Maria de Lourdes do Nascimento pela ajuda na prensagem das pastilhas de Nitrato de Potássio.

Às pessoas do Dep. de Produção de Radiofármacos que forneceram a água para preparação das soluções.

À Dra Linda V. Caldas, Presidenta da Pós-Graduação, que sempre recebe-nos com muita atenção.

Meus agradecimentos se estendem a todas as pessoas do IPEN ou fora dele que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do presente trabalho.....	4
2 PROCESSAMENTO POR RADIAÇÃO	6
2.1 Interação da radiação com a matéria.....	7
2.1.1 Radiação eletromagnética.....	7
2.1.2 Elétrons.....	9
2.2 Grandezas e unidades relevantes para dosimetria das radiações em processos industriais.....	9
2.2.1 Dose absorvida e taxa de dose.....	10
2.2.2 Dose absorvida em outros meios.....	11
2.2.3 Rendimento químico.....	11
2.3 Determinação da dose absorvida.....	12
2.3.1 Para fontes gama.....	13
2.3.2 Para aceleradores de elétrons.....	14
2.4 Aplicação da radiação na indústria.....	14
3 DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES.....	23
3.1 Classificação técnica dos dosímetros.....	23

3.2 Dosimetria química.....	24
3.3 Dosímetros mais usados.....	26
3.4 Algumas características dos compostos usados neste trabalho.....	29
3.4.1 Solução de Fricke.....	30
3.4.2 Soluções radiocrômicas.....	30
3.4.2.1 2,3,5 Trifenil – 2H – Tetrazólio Cloridrato (TTC).....	32
3.4.2.2 Solução com indicador Azul Cresil Brillhante (ACB).....	33
3.4.2.3 Solução com indicador Verde de Bromocresol (VBC).....	33
3.4.3 Nitrato de Potássio.....	35
3.5 Características importantes para seleção do dosímetro.....	35
3.6 Técnicas de medidas – Espectrofotometria.....	36
3.6.1 O espectro.....	38
3.6.2 Absorção da luz.....	39
3.6.3 Caminhos da luz em um espectrofotômetro.....	39
4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	41
4.1 Equipamentos.....	41
4.1.1 Medidas ópticas.....	41
4.1.2 Obtenção de água pura.....	42
4.1.3 Confeção de pastilhas.....	42
4.1.4 Fontes de irradiação.....	44
4.1.5 Determinação do pH.....	46
4.2 Reagentes e vidraria.....	47
4.3 Métodos de análise.....	48

4.4 Preparo dos materiais dosimétricos.....	50
4.4.1 Solução de Fricke.....	50
4.4.1.1 Formulação e manuseio.....	50
4.4.1.2 Calibração do sistema de leitura.....	51
4.4.1.3 Preparação dos dosímetros para irradiação.....	51
4.4.1.4 Preparação das amostras irradiadas para análise.....	52
4.4.1.5 Cálculo da dose absorvida.....	52
4.4.2 Soluções radiocrômicas.....	53
4.4.2.1 2,3,5 Trifenil – 2H – Tetrazólio Cloridrato.....	53
4.4.2.1.1 Formulação e manuseio.....	53
4.4.2.1.2 Irradiações.....	53
4.4.2.1.3 Análises ópticas.....	54
4.4.2.2 Solução com indicador Azul Cresil Brilhante	54
4.4.2.2.1 Formulação e manuseio.....	54
4.4.2.2.2 Irradiações.....	54
4.4.2.2.4 Análises ópticas.....	55
4.4.2.3 Solução com indicador Verde de Bromocresol	55
4.4.2.3.1 Formulação e manuseio.....	55
4.4.2.3.2 Irradiações e medidas ópticas.....	55
4.4.3 Nitrato de Potássio.....	58
4.4.3.1 Reagentes utilizados.....	58
4.4.3.2 Formulação e manuseio.....	58
4.4.3.3 Preparação dos dosímetros para irradiação.....	59
4.4.3.4 Irradiações.....	59
4.4.3.5 Leitura dos dosímetros.....	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
5.1 Solução de Fricke.....	69
5.2 Solução de 2,3,5 Trifenil - 2H – Tetrazólio Cloridrato.....	70

5.3 Solução com indicador Azul Cresil Brilhante.....	71
5.4 Solução com indicador Verde de Bromocresol.....	72
5.4.1 Determinação da estabilidade da resposta.....	73
5.4.2 Curva de calibração.....	75
5.4.3 Determinação da sensibilidade do dosímetro.....	75
5.4.4 Determinação da influência das condições ambientais.....	76
5.4.5 Resposta para diferentes tipos de radiação e energias.....	76
5.4.6 Variação da absorção óptica com a taxa de dose.....	77
5.4.7 Determinação da reprodutibilidade de resposta.....	77
5.4.8 Determinação do pH.....	78
5.5 Nitrato de Potássio.....	78
5.5.1 Determinação da estabilidade da resposta.....	79
5.5.2 Determinação da variação da absorção óptica com a massa da pastilha.....	81
5.5.3 Determinação da variação da absorção óptica com a taxa de dose.....	82
5.5.4 Determinação do limite inferior de dose.....	83
5.5.5 Determinação da curva de calibração.....	83
5.5.6 Determinação da dependência da resposta com o ângulo de incidência da radiação.....	84
5.5.7 Determinação do comportamento do dosímetro em diferentes campos de radiação.....	84
5.5.8 Determinação da reprodutibilidade de resposta do dosímetro.....	85
5.5.9 Determinação da influência das condições ambientais na resposta do dosímetro.....	85
5.5.10 Determinação do pH nas soluções preparadas a partir das pastilhas.....	86

5.5.11	Teste para determinação da dose em condições de irradiação de rotina.....	86
5.5.12	Determinação da influência das dimensões da pastilha na resposta.....	87
6	CONCLUSÕES.....	88
6.1	Solução de Fricke.....	88
6.2	Solução de 2,3,5 Trifenil -2H-Tetrazólio Cloridrato.....	88
6.3	Solução de Cloreto de Aminodietilaminometildifenazônio (Azul Cresil Brilhante).....	88
6.4	Solução de 3,3',5,5' Tetrabromo-m-cresolsulfonftaleína (Verde de Bromocresol).....	89
6.5	Nitrato de Potássio.....	90
	ANEXO 1.....	92
	ANEXO 2	96
	ANEXO 3	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS QUÍMICOS PARA DOSIMETRIA DA RADIAÇÃO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Ana Maria Sisti Galante

RESUMO

Diferentes compostos químicos têm sido estudados para otimizar os sistemas dosimétricos nos processos de irradiação. Neste estudo foram investigados o 2,3,5 Trifenil-2H-Tetrazólio Cloridrato, Azul Cresil Brilhante, Verde de Bromocresol e Nitrato de Potássio quanto aos seus méritos ou falhas, para o campo gama do ^{60}Co , de modo a verificar se podem ser considerados como dosímetros. A solução de Fricke foi usada como dosímetro de referência para determinar a taxa de dose absorvida nas instalações gama. Somente o Verde de Bromocresol e o Nitrato de Potássio são recomendados para fins de dosimetria, porque foram satisfeitas as características principais. Os outros dois compostos químicos podem ser usados em dosimetria com modificações em sua formulação. O Verde de Bromocresol e o Nitrato de Potássio são reprodutíveis e sensíveis a doses absorvidas entre 300Gy e 150kGy. O Verde de Bromocresol foi usado na forma líquida e o Nitrato de Potássio foi preparado na forma de pastilhas sólidas. A espectrofotometria foi usada como técnica principal de detecção, que permitiu relacionar a absorção óptica, antes e depois da irradiação, com a dose absorvida. O comprimento de onda de absorção máxima para cada composto foi observado em 450-460nm para o Verde de Bromocresol e 546nm para o Nitrato de Potássio. As curvas de calibração para os dois compostos são lineares em todo o intervalo de doses. Quando o Nitrato de Potássio é irradiado com elétrons acelerados, com energias entre 0,9MeV e 1,5MeV, observa-se a intensificação da resposta da absorção óptica em 2,6 vezes, quando são comparados os resultados com os da irradiação com raios gama. Todas as avaliações são apresentadas neste trabalho.

CHARACTERIZATION OF CHEMICAL COMPOUNDS FOR DOSIMETRY OF THE RADIATION IN INDUSTRIALS PROCESSES

Ana Maria Sisti Galante

ABSTRACT

Different chemical compounds have been studied to optimize dosimetric systems in irradiation processes. In this study 2,3,5 Triphenil -2H- Tetrazolium Chloride, Brilliant Cresyl Blue, Bromocresol Green and Potassium Nitrate were investigated for their merits or faults, for ^{60}Co gamma field, in order to verify if can be considered as dosimeters. Fricke solution was used as reference dosimeter to determine absorption dose rates at the gamma facilities. Only Bromocresol Green and Potassium Nitrate are recommended for dosimetry purposes since the main characteristics were achieved. The other two compounds could be used in dosimetry with changes in their formulation. Bromocresol Green and Potassium Nitrate are reproducible and radiation sensitive for absorbed doses from 300Gy to 150kGy. Bromocresol Green was used in liquid form and Potassium Nitrate was prepared in solid pellets form. Spectrophotometry in the visible region was used as the main detection technique, which allows relating optical absorption, before and after irradiation, with the absorbed dose. The maximum absorption wavelength for each compound was observed at 450-460nm for Bromocresol Green and 546nm for Potassium Nitrate. Dose calibration curves are linear for both compounds in all dose intervals. When irradiated with accelerated electrons, with energies between 0,9MeV and 1,5MeV, optical absorption intensification, of about 2,6 times, was observed when comparing results for Potassium Nitrate, with those for gamma rays. All the evaluations are presented in this work.

1 INTRODUÇÃO

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Konrad Von Röntgen (1845–1923) descobriu uma radiação desconhecida quando estudava o comportamento da corrente elétrica em tubos de vidro com vácuo parcial, que chamou de raios X. Um ano depois, o físico francês Antonie Henry Becquerel (1852–1909) descobriu emissões radioativas que emanavam do mineral de urânio e verificou que além da luminosidade, as radiações emitidas eram capazes de penetrar na matéria. Dois anos depois, a polonesa Marie Sklodowska Curie (1867–1934), intrigada com a descoberta de Becquerel, foi auxiliada por seu marido o físico francês Pierre Curie (1859–1906), para fracionar o mineral de urânio. Encontraram elementos radiativos cujas emissões eram muito mais intensas e isolaram o rádio e o polônio. Constataram que as partículas emitidas pelo rádio eram tão penetrantes que podiam provocar ferimentos sérios e até fatais, nas pessoas que dele se aproximavam [11,12].

Muitos cientistas, na transição do século XIX para o século XX, estudaram os fenômenos procurando uma explicação adequada. A compreensão do decaimento radioativo não foi obra de apenas uma pessoa, mas resultou da colaboração de muitos estudiosos durante as primeiras décadas deste século. Entre eles o físico neo-zelandês Ernest Rutherford (1871–1937), em 1902, em colaboração com o químico inglês Frederick Soddy (1877–1956), estabeleceram um novo ramo da física chamada de física das radiações. Eles publicaram suas descobertas nas quais identificaram três tipos de emissões: as partículas alfa e beta, os raios gama e suas propriedades durante o decaimento radioativo. Suas descobertas incluem também o decaimento do urânio. Este trabalho conferiu a Rutherford o prêmio Nobel em 1908. Em 1932, James Chadwick (1891–1974), físico britânico, descobriu o nêutron e por causa disto lhe foi outorgado o prêmio Nobel, em 1935. Esta descoberta conduziu o físico alemão Werner Heisenberg (1901–1974), em 1932, a sugerir um modelo para os núcleos atômicos, constituídos por partículas eletricamente positivas, os prótons, e partículas neutras, os nêutrons. Este modelo perdura até os dias atuais.

Após a década dos anos 30 a tecnologia nuclear desenvolveu - se rapidamente. A partir da 2ª Grande Guerra Mundial, ocorreu um grande avanço e o feito mais proeminente, exceto a bomba atômica, foi a construção de reatores de potência. Mais tarde o físico americano Robert Jemison Van de Graaff (1901-1967) desenvolveu o acelerador de partículas que recebeu seu nome [26].

A aplicação da radiação em várias áreas da vida humana foi iniciada na década de 50, culminando em 1954 quando Karl Ziegler (1898-1973) e Giulio Natta (1903-1979) descobriram os mecanismos químicos de polimerização e copolimerização para a indústria do plástico. As perspectivas foram aumentadas e a intensidade das fontes de radiação também. A irradiação de grandes volumes de material, com doses altas, tornou-se um processo viável [6].

A maior aplicação pacífica das reações nucleares é a produção de energia elétrica. Além disso, a radiação pode ser usada na propulsão de navios e de submarinos; nas indústrias auxilia no rastreamento de vazamentos em oleodutos, é usada em detecção de imperfeições através da técnica da gamagrafia, permite melhorar as propriedades mecânicas em inúmeros produtos; na agricultura – pode ser usada em estudos do mecanismo de absorção de fertilizantes e adubos em diversos tipos de plantas e solos; na medicina – em diagnóstico e tratamento de doenças.

Três fatores influenciaram o desenvolvimento da indústria de processamento por radiação: o conhecimento sobre os efeitos químicos e biológicos da radiação; a rápida expansão da indústria do plástico e o primeiro encontro do Uso Pacífico da Energia Atômica, organizado pelas Nações Unidas (1955 - 1958). Este encontro permitiu salientar que a radiação e os radionuclídeos podem ser usados em inúmeras áreas para o benefício da humanidade e servir de estímulo para tecnólogos e cientistas da área nuclear, para expandir as aplicações em processos de irradiação de materiais [19].

Em quase todas as aplicações da radiação ionizante é necessário conhecer a dose absorvida pelo material de modo a poder otimizar os processos de irradiação em escala laboratorial ou comercial. A transferência dos processos da escala laboratorial para a escala comercial é facilitada, quando o conhecimento do efeito induzido pela radiação é cuidadosamente rastreado por medidas de dosimetria. A medida correta da dose, num certo intervalo de doses requerido pelo pesquisador ou cliente, é a forma mais adequada para conhecer a qualidade do trabalho de irradiação realizado. A dosimetria das radiações tem portanto uma importância vital nos processos de irradiação conduzidos dentro das exigências das normas e a otimização do processo confere sucessos científicos e posteriormente financeiros.

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, que atende a sua comunidade e a de outras entidades de ensino, pesquisa e particulares, possui nas dependências da Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e Indústria, TE, duas fontes de ^{60}Co Cobalto e dois aceleradores de elétrons com energia máxima igual a 1,5MeV. Estas instalações permitem irradiar materiais com diferentes composições químicas, formas físicas e dimensões, além de aplicar doses abaixo de 10Gy e até 10^5Gy .

Como a dosimetria química com fins de aplicação em processos rotineiros de irradiação de materiais não havia sido muito explorada no TE, ficaram estabelecidas duas linhas de pesquisa com o intuito de reduzir os custos e não depender da importação de materiais: uma para estudar compostos químicos em solução e outra para estudar compostos químicos na forma sólida. Estas pesquisas permitiram desenvolver materiais dosimétricos preparados no TE, a partir de insumos comprados no país.

Neste trabalho foram estudados os compostos seguintes:

- Solução de 2,3,5 Trifenil – 2H – Tetrazólio Cloridrato;
- Solução com o Cloreto de Aminodietilaminometildifenazônio (mais conhecido como indicador Azul Cresil Brillhante);

- Solução com o 3,3",5,5'-Tetrabromo-m-Cresolsulfonoftaleína (mais conhecido como indicador Verde de Bromocresol); e
- Nitrato de Potássio

Como dosímetro de referência, foi usado o composto de sulfato ferroso conhecido como solução de Fricke, que permite determinar a taxa de dose absorvida nas fontes de cobalto.

A literatura sobre a dosimetria em processos industriais é muito escassa com relação aos dosímetros químicos que sejam preparados a partir de indicadores normalmente usados em química convencional. Este fato pode ser explicado com a dificuldade de manipulação e preparo desse tipo de material bem como a vidraria associada. O Nitrato de Potássio ainda não foi explorado como dosímetro de rotina, na literatura não há muitos trabalhos publicados [9,31].

A implantação de serviços modernos de dosimetria em processos industriais permitirá ao Brasil igualar-se aos países que adotam a tecnologia de processamento por radiação. Além deste aspecto permitirá manter pessoal especializado em controle de qualidade nas instalações de irradiação de porte industrial e qualificar esse pessoal para a redação de normas nacionais bem como manter padrões dosimétricos baseados nas pesquisas e desenvolvimento tecnológicos feitos até o momento no país.

1.1 Objetivos do presente trabalho

O primeiro objetivo deste trabalho de pesquisa é caracterizar alguns compostos químicos, como o Nitrato de Potássio, corantes e indicadores químicos solúveis em água, para averiguar a possibilidade de serem usados como dosímetros de radiação. A aplicação dos compostos, classificados como materiais dosimétricos, será em atividades de monitoração e controle da qualidade das irradiações de diversos materiais nas dependências da Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria, TE- IPEN. Soma-se

a estes propósitos a redução de custos porque é possível produzir os materiais dosimétricos no próprio TE usando insumos adquiridos no país.

O outro objetivo é participar da intercomparação com a Agência Internacional de Energia Atômica, IAEA (International Atomic Energy Agency). Esta intercomparação é feita pelo Serviço Internacional de Garantia da Dose (IDAS = International Dose Assurance Service), sediado em Viena, Áustria.

2 PROCESSAMENTO POR RADIAÇÃO

Materiais, em qualquer estado físico, podem ser expostos à radiação e sofrer transformações que permitem modificar e melhorar algumas de suas qualidades físico-químicas. Esta técnica conhecida como *processamento por radiação* é muito usada na indústria moderna para acelerar a produção e reduzir os seus custos.

As vantagens da técnica de irradiação podem ser resumidas em: a velocidade da radiação não depende da temperatura ambiente; podem se formar espécies reativas em substâncias sólidas, líquidas e gasosas de um modo homogêneo; a velocidade de reação como também a qualidade do produto podem ser controladas de modo fácil; para alguns produtos a reação química induzida pela radiação pode ocorrer sem a adição de catalisadores [34].

Nos processos industriais de irradiação, em que a indução desejada de certas propriedades, no material irradiado, requer um processo uniforme e preciso, torna-se necessário conhecer a dose absorvida. As técnicas de medida da dose (dosimetria) permitem também controlar a qualidade do processo.

As transformações físicas e químicas provocadas pela radiação, quando interage com um material, podem ser relacionadas com os efeitos produzidos no mesmo. Para determinar a dose absorvida pelo material irradiado, durante a exposição às radiações ionizantes, usam-se materiais específicos denominados dosímetros. Estes, por sua vez, precisam ser corretamente caracterizados. Desta maneira os resultados obtidos em laboratório podem ser reproduzidos em outros laboratórios ou instalações comerciais.

2.1 Interação da radiação com a matéria

A transferência de energia de uma partícula, ou de um fóton, para os átomos do material sob efeito da radiação ocorre sobretudo, através de dois mecanismos: a excitação e a ionização. Mudanças químicas são induzidas em materiais expostos à energia alta de radiações [22].

2.1.1 Radiação eletromagnética

A interação da radiação eletromagnética com a matéria compreende uma série de mecanismos que podem envolver a interação com os elétrons de átomos, com os núcleos dos átomos, com o campo coulombiano dos núcleos, ou dos elétrons, ou simplesmente atravessam o material sem interagir.

A radiação eletromagnética usada em muitas instalações de irradiação pode ser a de raios X ou radiação gama, fisicamente iguais, a diferença essencial esteja na origem.

Os três processos principais da interação da radiação eletromagnética com a matéria são o *efeito fotoelétrico*, o *efeito Compton* e a *produção de pares*.

No *processo fotoelétrico*, toda a energia do fóton incidente $h\nu$ é transferida para um elétron ligado que é ejetado do átomo, no rearranjo das camadas eletrônicas surge um fóton de fluorescência. Este mecanismo está representado na **Figura 1**.

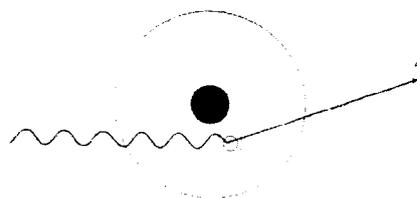


Figura 1 - Esquema que representa o efeito fotoelétrico [24].

No *efeito Compton* um fóton incidente perde parte de sua energia em um processo de espalhamento com um elétron orbital de um átomo. O elétron orbital, que causou o espalhamento, é ejetado do átomo e o restante da energia continua no fóton espalhado. Este efeito é representado pelo esquema da **Figura 2**.

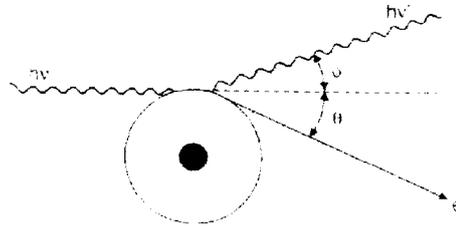


Figura 2 - Esquema que representa o efeito Compton [24].

Na *produção de pares* a radiação eletromagnética com energia superior a $1,02\text{MeV}$, interage nas vizinhanças do núcleo do átomo que pode desaparecer e em seu lugar surgir um par de elétrons, um negativo e outro positivo (chamado de pósitron). A soma das energias do elétron positivo e negativo é igual à energia do fóton incidente menos $1,02\text{MeV}$. A representação esquemática da produção de pares encontra-se na **Figura 3**.

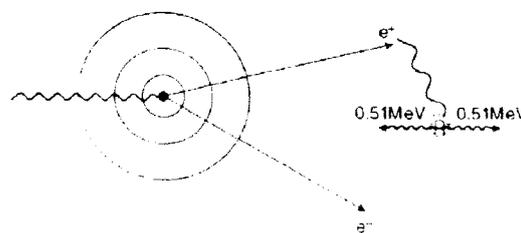


Figura 3 - Esquema que representa a produção de pares [24]

2.1.2 Elétrons

Os elétrons perdem a sua energia em colisões com o material com o qual interagem e este efeito é representado pelo poder de freamento de partículas carregadas.

De todas as interações que ocorrem durante a passagem do feixe de elétrons através da matéria as mais freqüentes são as colisões com os elétrons orbitais. Elétrons individuais podem interagir com o átomo como um todo, com elétrons atômicos ou com o núcleo.

As interações que ocorrem são:

- colisões inelásticas com os elétrons orbitais resultando em excitações e ionizações ;
- espalhamento elástico (espalhamento coulombiano);
- espalhamento e colisões radioativas envolvendo o núcleo ou elétrons orbitais.

Em dosimetria, as colisões inelásticas são as de maior interesse porque elas são as responsáveis pela deposição de energia localmente no meio irradiado.

2.2 Grandezas e unidades relevantes para dosimetria das radiações em processos industriais [17,19,23].

A irradiação de diversos tipos de materiais e de seres humanos, levou os cientistas a necessidade de saber a quantidade de radiação que produzia o efeito observado ou desejado.

A medida da radiação, numa instalação onde se processa diversos tipos de materiais como os destinados à medicina, agricultura ou aqueles destinados ao desenvolvimento de materiais novos, deve ser feita com atenção e critério em relação às grandezas e respectivas unidades.

2.2.1 Dose absorvida e taxa de dose

Dose absorvida

A grandeza mais importante em dosimetria das radiações é a dose absorvida, D , ou apenas dose, que é definida como o quociente entre a energia média, dE , transferida a uma quantidade infinitésima de material e o elemento de massa, dm , deste material:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad \text{Gy} \quad (1)$$

Embora esta definição seja feita apenas para um só ponto da massa de material que está sendo irradiado, ela se estende para toda a massa finita do volume ocupado pelo mesmo. Nos processos de irradiação, o material de referência, na maioria das calibrações, é usualmente a água, mas podem ser feitas conversões para outros compostos de interesse como a grafita, polímeros ou metais por exemplo.

Deve-se lembrar que o dosímetro é usado para que se possa calcular a dose absorvida média sobre um volume reduzido da amostra. A resposta deste dosímetro permite medir a energia absorvida naquele volume, que pode ser relacionada à dose no produto. Quando se transforma a dose no dosímetro para a dose no material leva-se em conta o tamanho, forma, composição e uniformidade do material dosimétrico.

A unidade de dose absorvida é o *joule por quilograma* (J kg^{-1}) e é expressa em *gray* (cuja abreviatura é Gy) em homenagem a L.H.Gray pioneiro da física das radiações.

A unidade antiga de dose absorvida, *rad*, era definido como:

1 rad = 100erg/g de modo que hoje 1Gy equivale a 100 rad antigos.

Taxa de dose

A dose absorvida, dD , no intervalo de tempo, dt , é expressa como taxa de dose absorvida, \dot{D} :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad \text{Gy s}^{-1} \quad (2)$$

Pode ser denominada, em irradiações contínuas com radiação gama, como dose por unidade de tempo e ser expressa em unidades de Gy min^{-1} ou Gy h^{-1} .

2.2.2 Dose absorvida em outros meios

Quando se deseja calcular a dose em outros meios, D_M , diferentes da água ou ar, D_A ou D_{AR} , deve-se levar em conta $(\mu_{en}/\rho)_A$ e $(\mu_{en}/\rho)_M$, os coeficientes de absorção de massa do ar e do material.

A dose no meio, para uma dada energia da radiação incidente neste meio será dada por:

$$D_M = D_A \cdot \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_M}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_A} \quad \text{Gy} \quad (3)$$

2.2.3 Rendimento Químico

Quando se trabalha com dosimetria química o rendimento químico da radiação, $G(x)$, é uma grandeza importante. Esta grandeza é representada pelo quociente entre a quantidade, n , de uma substância x produzida, destruída ou modificada pela radiação, e a energia média absorvida \mathcal{E} :

$$G(x) = \frac{n(x)}{\mathcal{E}} \quad \text{mol J}^{-1} \quad (4)$$

O rendimento químico em uma solução, expresso como *valor G*, é definido como a quantidade de moléculas produzidas, destruídas ou modificadas por 100eV de energia absorvida. A conversão para o sistema SI é :

$$1 \text{ mol } J^{-1} = 9,65 \times 10^6 \text{ moléculas } (100\text{eV})^{-1}$$

ou

$$1 \text{ molécula } (100\text{eV})^{-1} = 1,036 \times 10^{-7} \text{ mol } J^{-1}$$

O valor *G* é usado para calcular a dose absorvida em dosímetros químicos como na solução de sulfato ferroso (solução de Fricke).

Outras unidades e grandezas encontram-se no **Anexo 1**.

2.3 Determinação da dose absorvida

A dose absorvida na água é a grandeza mais relevante na maioria das aplicações de doses altas. A dose absorvida em outros materiais depende de correções em consequência de propriedades particulares a cada um desses materiais como foi visto no item 2.2.2 [19].

Para a determinação da dose absorvida na água em um determinado ponto do meio irradiado é necessário satisfazer as condições de equilíbrio eletrônico.

O *equilíbrio eletrônico* é descrito como a condição na qual a energia cinética dos elétrons (ou partículas carregadas), exceto a energia em repouso, que entram num volume infinitesimal de material irradiado é igual à energia cinética dos elétrons emergentes deste mesmo volume de material. No caso de radiação gama de uma fonte de ^{60}Co , pode-se alcançar o equilíbrio eletrônico aproximado, num volume reduzido que está sendo irradiado, com cerca de $0,5\text{gcm}^{-2}$ de material. Isto corresponde ao alcance dos elétrons secundários de energia mais alta, produzidos por fótons de energia mais elevada, ou seja de 1,33MeV [4,5].

A dose absorvida em um dado ponto de um material específico submetido à radiação gama, pode ser medida usando um dosímetro de rotina calibrado com radiação gama, neste trabalho foi feita na fonte do ^{60}Co em condições de equilíbrio eletrônico.

Os procedimentos das medidas da dose absorvida ou da taxa de dose num material são feitos da maneira seguinte: a fonte de referência é calibrada com o auxílio de um padrão primário (câmara de ionização) ou com métodos padronizados de referência (solução de Fricke) e o sinal do dosímetro é então convertido para a dose absorvida ou taxa de dose na água. As fontes de referência são usadas para irradiar os dosímetros de rotina em condições idênticas e a calibração é usualmente expressa em termos de dose ou taxa de dose na água, para as soluções dosimétricas.

2.3.1 Para fontes gama

A dose absorvida, quando se efetua irradiações nas fontes gama, é calculada a partir da taxa de dose medida com a solução de Fricke. Uma vez tendo a taxa de dose no local em que é colocado o material para ser irradiado e conhecendo-se a dose requerida pelo usuário, é calculado o tempo de permanência na frente da fonte exposta.

$$D(\text{Gy}) = \dot{D} \times t \quad (5)$$

É necessário observar com atenção se a taxa de dose tem alguma influência no resultado desejado ao irradiar um material, pois, a taxa de dose é a velocidade com que a radiação deposita sua energia ao longo da massa do material irradiado.

Neste trabalho de pesquisa foram utilizadas duas fontes de ^{60}Co , pertencentes ao TE, as fontes Panorâmica e Gammacell, cada material novo que é trazido com a finalidade de ser irradiado, deve ser caracterizado (tipo de

composto, densidade, composição para o cálculo do μ_{en}/ρ) antes que se processem as irradiações rotineiras e se forneça o valor da dose.

2.3.2 Para aceleradores de elétrons

O cálculo da dose no acelerador é feita com o auxílio da expressão:

$$D \text{ (kGy)} = \frac{K}{2} \cdot \frac{P.I.10}{LV} \quad (6)$$

Onde: $K = A \cdot \exp^{(B.E)}$

P = Número de passadas do material sob o feixe de elétrons

I = Corrente do feixe de elétrons

L = Largura do feixe de elétrons

V = Velocidade de deslocamento do material sob o feixe de elétrons

No **Anexo 3** encontram-se maiores detalhes do cálculo da dose em um acelerador de elétrons.

2.4 Aplicações da radiação na indústria

O órgão da AIEA (IAEA =International Atomic Energy Agency) , em 1977, implantou um programa científico de padronização da dosimetria em doses altas cujos objetivos são: (1) recomendar a aplicação de técnicas de dosimetria nas instalações de doses altas; (2) padronizar a dose e garantir o serviço em escala internacional; (3) recomendar que a dosimetria seja a forma de controle da qualidade dos processos de irradiação; e (4) apoiar o desenvolvimento de novas técnicas dosimétricas. Em 1985, implantou o programa denominado IDAS (Serviço Internacional de Garantia da Dose), que tem por objetivo qualificar a dosimetria das instalações, para assegurar e garantir que o valor de dose em processos de irradiação seja rigorosamente correto e confiável. Várias instalações de irradiação comerciais ou não, bem como institutos de pesquisas que operam com doses entre 10Gy e 10⁵Gy, são convidados a participar deste programa [21].

Por razões práticas os programas de padronização, definidos pela IAEA, para doses entre 10Gy e 100kGy [21] foram subdivididos em três intervalos:

- (1) doses baixas : 10Gy – 3 kGy
- (2) doses médias : 1kGy – 10kGy
- (3) doses altas : 5kGy – 100kGy

Existem processos industriais associados com vários tipos de exigências do mundo moderno. A esterilização de produtos para a medicina ou tratamento de alimentos é uma das atividades ligadas à saúde pública que possui outras ramificações como o tratamento de lixo e controle da poluição ambiental. Todas estas atividades são muito bem concluídas com o auxílio das técnicas radiativas. Neste caso, a irradiação precisa ser feita de forma correta e isto só pode ser feito com o controle adequado do processo de irradiação acompanhado de materiais e métodos dosimétricos adequados.

Nas instalações de irradiação de produtos industrializados ou insumos existe uma infinidade de valores de dose que dependem do tipo de material que é recebido para irradiação e da finalidade de seu uso . Pode ocorrer que para alguns produtos como alimentos ou insumos para a medicina estes valores sejam fixados por órgãos específicos de cada país [19]. A **Figura 4** mostra algumas aplicações da radiação e os intervalos de doses associados.

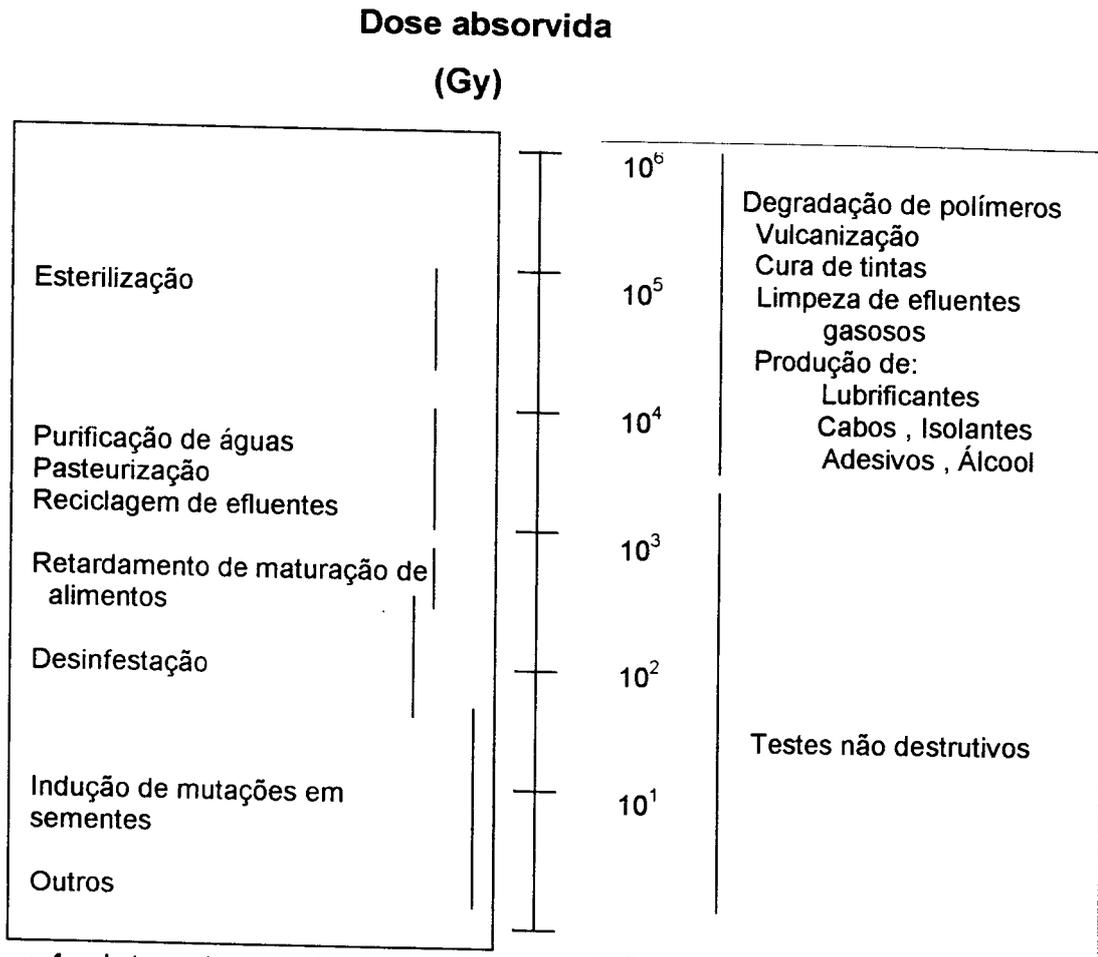


Figura 4 – Intervalos de doses para várias aplicações da radiação ionizante [19].

Sistemas sólidos, líquidos e gasosos têm sido aplicados em dosimetria das radiações. Como exemplos pode-se citar: **Sólidos** – filmes radiocrômicos, sistemas com corantes orgânicos, filmes fotográficos etc; **Líquidos** – solução de Fricke, solução ferroso-cérea, sulfato cérico etc; **Gasosos** - óxido de nitrogênio, dióxido de carbono etc [19]. A **Tabela 1** mostra um resumo dos sistemas dosimétricos, métodos de leitura e intervalos de doses de utilização.

Tabela 1 - Sistemas dosimétricos importantes para uso em processos de irradiação [20].

Tipos	Métodos de leitura	Exemplos	Intervalos de Dose (Gy)
Calorímetros	Medidas de temperatura	Grafita, água	$10 - 10^4$
Cristais Orgânicos	Espectrometria EPR	Alanina, celulose	$10 - 10^5$
Semicondutores	Medidas elétricas	Diodos de Si	$10 - 10^4$
Cristais Inorgânicos	Espectrofotometria Espectrometria EPR	LiF, SiO ₂ , vidros	$10^3 - 10^7$
Soluções Químicas	Espectrofotometria Espectrofluorimetria	Sol. Cérico-cerosa, Ác.orgânicos	$10^2 - 10^5$
Filmes Radiocrômicos	Espectrofotometria Microdensitometria	Plásticos pigmentados	$10 - 10^6$
Sistemas Fluorescentes	Espectrofluorimetria Espectrofotometria	Fluoretos org. e inorg.	$10 - 10^4$

Deve-se ressaltar, que poucos materiais dosimétricos têm características que permitem usá-los em intervalos de doses suficientemente amplos para abranger as três categorias. Por este motivo, o setor comercial oferece uma variedade apreciável de materiais dosimétricos, sólidos ou líquidos. Porém o preço, visto que muitos, ou a maioria, são importados, eleva os custos do serviço de dosimetria em uma instalação de irradiação.

Em uma instalação como a do TE-IPEN onde é feita pesquisa básica e desenvolvimento, são solicitadas doses desde poucos Gy até 5×10^5 Gy.

Quando se trabalha numa instalação de irradiação de porte, o objetivo é irradiar grandes quantidades de materiais e produtos com doses requeridas pelos usuários e fazê-lo de modo competitivo. As instalações de porte industrial normalmente irradiam vários tipos de materiais assim como na instalação do TE que além de prestar serviço às indústrias (irradiação de cabos e fios no

acelerador de elétrons), atende em número maior os pesquisadores da própria instituição e de entidades externas.

Em qualquer tipo de instalação deve-se cuidar para que a irradiação seja a mais uniforme possível de forma a impedir heterogeneidade da distribuição da dose.

Para entender como costumam ser feitas as irradiações numa instalação de porte industrial descreve-se em linhas gerais, as formas de irradiação.

1. *Fontes gama*

Nas irradiações em que o produto é irradiado dos dois lados, é importante ter em conta que uma parte desse volume terá sido irradiada com dose próxima ao valor mínimo requerido (~35%) [19]. Normalmente as instalações que possuem fontes gama, na forma de placa (vários lápis de ^{60}Co ou ^{137}Cs), o produto é movido de modo a receber a radiação nos dois lados opostos, conforme mostra a **Figura 5**. Neste caso as curvas de isodose mostram que os valores máximos da dose são alcançados nas faces que recebem a radiação e são menores nos topos superior e inferior do produto.

A razão entre as doses máxima e mínima depende da espessura do material e de sua densidade. Desta maneira a unidade de processamento adapta-se a estas condições para irradiar o produto, **Figuras 6 (a) e (b)**.

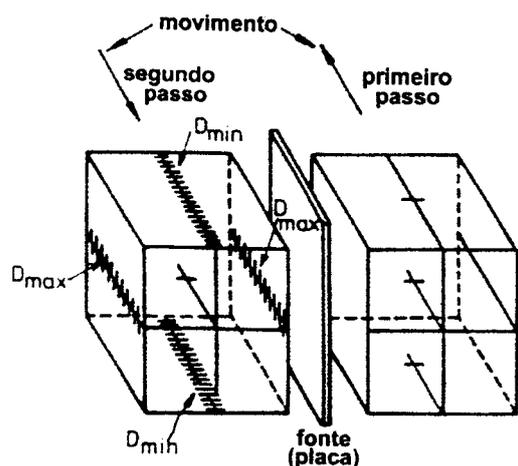


Figura 5 – Localização das doses máxima e mínima no volume do produto irradiado numa fonte plana de radiação gama [19].

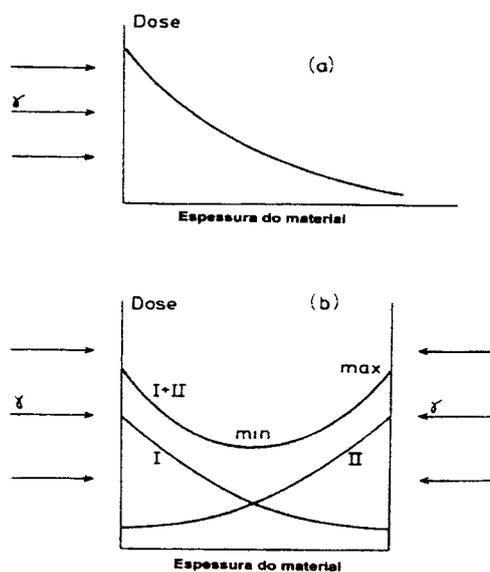


Figura 6 – (a) Distribuição da dose para uma irradiação mono-direcional (I) de um produto homogêneo com radiação gama. (b) A distribuição da dose usando irradiação dos dois lados (I + II) de um produto, se observa onde a dose é máxima e mínima.

Se a fonte gama tiver outra geometria, por exemplo, na forma de um lápis, como ocorre no TE-IPEN, o produto terá outra distribuição das doses máxima e mínima porque haverá dependência com o ângulo de incidência da radiação. A equação para o cálculo da dose em um ponto P do produto, como mostra a **Figura 7**, para uma distância d da fonte é dada por:

$$D^P(\text{Gy}) = 33,72 \times \frac{\Gamma A}{d} \left(\text{tg}^{-1} \frac{a_1}{d} + \text{tg}^{-1} \frac{a_2}{d} \right)$$

onde Γ é a constante específica da radiação gama, A é a atividade da fonte e o valor 33,72 é uma constante que permite relacionar a dose absorvida e a exposição no sistema SI ($D_{\text{ar}}(\text{Gy}) = 33,72 X (\text{C.kg}^{-1})$). Se o ponto P estiver localizado na direção da meia altura da fonte de comprimento $2a$, os ângulos θ_1 e θ_2 serão iguais, então $a_1 = a_2 = a$. A equação acima é simplificada para:

$$D(\text{Gy}) = 33,72 \times \frac{\Gamma A}{d} \times 2 \text{tg}^{-1} \left(\frac{a}{d} \right)$$

A dose média no produto, para infinitos pontos distribuídos em todo o volume, será igual a somatória de todas as doses individuais dividida pelo número de pontos, levando-se em conta os ângulos sob os quais são vistos esses pontos. A distribuição da dose pode ser mapeada através do cálculo de transporte da radiação com o auxílio do programa Monte Carlo.

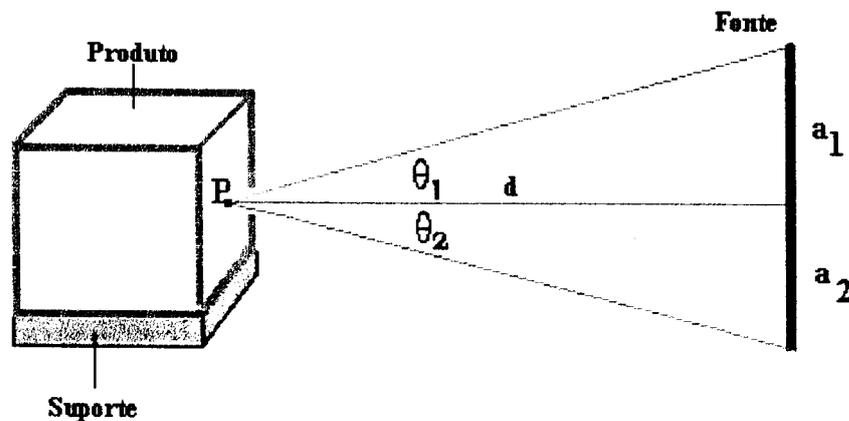


Figura 7 – Dose absorvida em cada ponto do produto exposto a uma fonte radioativa na forma geométrica de lápis.

2. Elétrons acelerados

Nos aceleradores de elétrons, a distribuição da dose depende da energia do feixe, corrente, densidade do produto e de sua espessura.

A **Figura 8** mostra a irradiação de um material em um acelerador de elétrons, com a localização das doses máximas e mínimas no volume do produto.

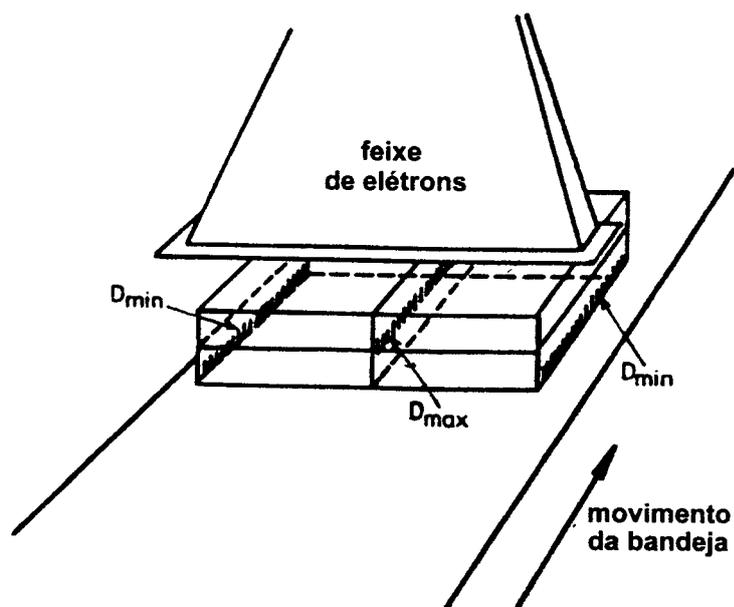


Figura 8 – Localização das doses máxima e mínima no volume do produto irradiado no acelerador de elétrons.

A distribuição da dose no produto, em relação à profundidade pode ser otimizada se for escolhido um valor de energia do feixe de elétrons adequado e se for restringida a espessura do material (espessura menor que o alcance dos elétrons) ou ainda, no caso de produtos espessos, proceder a irradiação dos dois lados, **Figura 9(a) e (b)**[19].

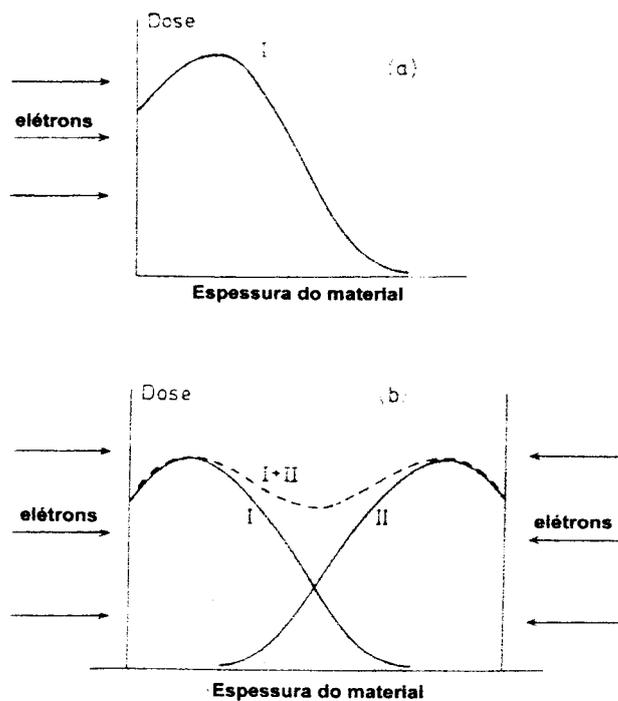


Figura 9 – (a) Distribuição da dose para uma irradiação unidirecional (I) de um produto homogêneo com feixe de elétrons. **(b)** O efeito da uma irradiação do produto dos dois lados (I + II) mostra os pontos de dose máxima e mínima.

3 DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES

3.1 Classificação técnica dos dosímetros

Os dosímetros são classificados nas categorias seguintes [19]:

(1) **Dosímetros primários ou de referência** : São aqueles capazes de medir diretamente a dose absorvida, ou a grandeza física que pode ser associada com a dose absorvida. Têm a qualidade metrológica mais alta e são mundialmente reconhecidos e usados como padrões. Esses padrões encontram-se em laboratórios de reconhecida qualidade internacional como no NBS (National Bureau of Standards, Washington, DC, U.S.A.); CEN (Centre des Études Nucleaires - Saclay-CAPRI, Giv-sur-Yvette, France); NPL (National Physical Laboratory, UK), entre outros.

(2) **Dosímetros padrão de referência** : São dosímetros, de qualidade metrológica alta, que fazem parte do acervo da instalação de irradiação, e são coincidentes com os padrões primários nacionais (calibrados contra dosímetros primários em laboratórios de padronização internacional como NBS, CEN, NPL etc).

(3) **Dosímetros de campo ou de transferência** : São sistemas dosimétricos suficientemente precisos e estáveis e podem ser calibrados com um dosímetro de referência. Podem ser usados para calibrar a resposta característica dos dosímetros de rotina. São também usados como **dosímetros secundários** e em alguns países usados em rotina.

(4) **Dosímetros de rotina** : São sistemas padronizados, no estado sólido, líquido ou gasoso, usados de forma rotineira nas unidades de irradiação e devem ser freqüentemente calibrados contra os dosímetros de referência. Servem para determinar a dose absorvida nos materiais, monitorar as irradiações e garantir a qualidade das mesmas.

(5) **Dosímetros terciários** : São os que fornecem uma estimativa da dose absorvida. Nesta categoria estão classificadas as espécies químicas radiosensíveis como alguns corantes que dão origem a materiais dosimétricos que mudam gradativamente de cor com o aumento da dose.

3.2 Dosimetria química

Quando a radiação atravessa os dosímetros químicos podem ocorrer ionizações e excitações, em escala molecular ou atômica, ou ambas, ao longo da trajetória da radiação. Nesta trajetória podem ser formadas inúmeras espécies ativas como os elétrons hidratados, íons, radicais livres ou radicais iônicos. Quando a radiação envolve taxas de dose altas de fótons ou elétrons, em volumes relativamente pequenos, o processo de irradiação torna-se mais homogêneo (isto é a irradiação do material dosimétrico). Desta maneira as espécies químicas formadas são em número suficiente para serem detectadas com facilidade pelas técnicas citadas no Capítulo anterior.

Uma reação típica em dosimetria química é dada por [19]:



onde $\cdot R$ representa o radical do soluto induzido por radiação que reage (a uma taxa constante k_1) com as moléculas do solvente, S , resultando num produto estável, P . A medida correta das espécies produzidas, quando estáveis e reprodutíveis para a mesma dose, qualifica certos dosímetros químicos como dosímetros de referência. Como exemplo pode-se citar a solução de sulfato ferroso conhecida como solução de Fricke.

Em materiais em que esteja bem estabelecida a relação das doses com as espécies químicas formadas durante a exposição à radiação, nos campos de radiação gama ou elétrons acelerados, a concentração de íons pode ser determinada pela técnica da espectrofotometria óptica para um comprimento de onda característico a cada tipo de espécie e o valor do rendimento químico, $G(x)$, neste caso, é muito importante.

Alguns acontecimentos históricos mostram a evolução da dosimetria química como é visto a seguir:

- Em 1902, G. Holzkecht [32] desenvolveu o que chamava de "cromoradiômetro", usado para medidas em campos de raios X especificamente em aplicações médicas. Este sistema consistia de pequenos discos de metal de cloreto de potássio e carbonato de sódio que mudavam de cor quando submetidos aos raios X;
- Em 1904, R. Sabouraud [33] em vez de usar a mistura preparada por Holzkecht, usou, pastilhas de platino-cianeto de bário, que apresentavam mudança de coloração, do verde ao vermelho escuro, quando submetidas à mesma radiação;
- G. Schwarz, em 1907, inventou o radiômetro, denominado "calomel", composto por uma solução de oxalato de amônio e cloreto de mercúrio;
- Entre 1900 e 1927, foram inventados métodos fotográficos, empregados também para determinar a dose relacionada com a radiação incidente;
- Em 1927, H. Fricke e S. Morse descobriram que uma solução aquosa de sulfato ferroso, em 0,8N de ácido sulfúrico, podia ser usada em dosimetria. Esta descoberta marcou um grande avanço em dosimetria e hoje esta mistura é conhecida como solução de Fricke;
- P. Guntner e co-autores utilizaram clorofórmio e suas soluções saturadas;
- W. Stenstrom e A. Lohman, em 1931, notaram que o azul de metileno é descolorido quando submetido à ação dos raios X;
- Em 1932, E.V. Shpolskii e S.V. Platonov propuseram o uso de uma mistura de cloreto de mercúrio e oxalato de potássio;
- Após a 2ª Guerra Mundial, foi necessário um trabalho intenso no desenvolvimento de métodos químicos em dosimetria, por causa da necessidade de aplicar dosímetros sensíveis e baratos em dosimetria individual e nos processos industriais que estavam sendo iniciados.

Com o desenvolvimento de vários sistemas de irradiação tornou-se necessária a seleção de materiais dosimétricos para a medida exata da quantidade de radiação incidente no material de interesse.

3.3 Dosímetros mais usados

Os materiais utilizados na dosimetria de doses altas são os do tipo sólido e alguns no estado líquido ou gasoso. Os materiais sólidos consistem normalmente de compostos cristalinos orgânicos ou inorgânicos (amino-ácidos, fluoreto de lítio), amorfos ou quase cristalinos (cerâmicas, vidros, plásticos, plásticos com corantes ou semicondutores). Estes materiais podem ser adquiridos no comércio em quantidades suficientes para atividades rotineiras dos laboratórios de dosimetria em instalações de porte industrial. Em atividades rotineiras é mais interessante utilizar os dosímetros sólidos, por apresentar dimensões e resistência mecânica adequadas aos trabalhos mais pesados em processamento industrial por radiação. Os dosímetros líquidos, apesar de exigir um preparo muito cuidadoso, têm suas aplicações em casos em que os dosímetros sólidos não são indicados. A aplicação de soluções encapsuladas para o controle de processos de irradiação, por exemplo de efluentes industriais com vistas ao saneamento básico, em que se aplica as técnicas da radiação ionizante, é uma das possíveis aplicações dos dosímetros líquidos. São também empregados para calibrar dosímetros de rotina, como vidros e filmes plásticos e em experimentos onde a exatidão é exigida como um parâmetro de qualidade. Os sistemas gasosos têm aplicações mais específicas e são mais aplicados para o controle de qualidade de irradiações de gases.

Nos sistemas sólidos o método de leitura da maior parte dos dosímetros é por espectrofotometria mas para alguns tipos de materiais também são usadas as técnicas da termoluminescência, ressonância de spin eletrônico ou lioluminescência. Os dosímetros sólidos mais comumente usados são os filmes finos, pastilhas de dimensões reduzidas, placas ou filmes em que se aplica um corante radiosensível sobre um substrato rígido.

Como exemplos de dosímetros sólidos pode-se citar [19]:

Materiais cristalinos: Pastilhas de fluoreto de lítio na forma de LiF natural ou enriquecido com ^6Li ou ^7Li que permitem aplicá-los nos intervalos de dose entre 10^3Gy até 10^7Gy . Pastilhas de sulfato de cálcio impurificado com disprósio, para intervalos de dose de 10^{-5}Gy até 10^7Gy .

Materiais amorfos : vidros nos intervalos de 10Gy a 10^4Gy mas que tem uma tendência a perder a resposta, após a irradiação, de forma muito rápida.

Plásticos sem corantes: Placas de polimetilmetacrilato, Perspex, Lucite ou Plexiglass são alguns exemplos. Os intervalos de dose para estes tipos de compostos está entre 10^3Gy e $5 \times 10^4\text{Gy}$. O triacetato de celulose é outro exemplo e o intervalo de doses em que pode ser usado como dosímetro encontra-se entre 10kGy e 300kGy .

Plásticos com corantes: O polimetilmetacrilato colorido, PMMA, pode ser usado no intervalo de doses entre $5 \times 10^3\text{Gy}$ e $5 \times 10^4\text{Gy}$ (PMMA vermelho), $2 \times 10^3\text{Gy}$ e $2 \times 10^4\text{Gy}$ (PMMA âmbar) e 100Gy a $3 \times 10^3\text{Gy}$ (Gammachrome YR). Existem também os filmes radiocrômicos cuja composição básica é o nylon e que contém certos leucocianetos e outros corantes cuja cor é modificada pela ação da radiação. Os intervalos de dose nos quais estes filmes podem ser usados são diferentes dependendo do composto corante e geralmente respondem para doses entre 10^2Gy a $1,5 \times 10^5\text{Gy}$.

Os sistemas químicos líquidos usados em dosimetria de altas doses são formados por soluções aquosas preparadas a partir de reagentes inorgânicos cujo pH está na faixa ácida. Existem também certos solventes orgânicos, ou combinações, nos quais pode-se dissolver corantes. A maioria dessas soluções pode conter ácidos fracos ou bases em concentrações baixas [19].

Os dosímetros líquidos podem ser preparados com reagentes como a água, ou materiais equivalentes ao tecido humano considerando-se a densidade ou as propriedades de absorção da radiação. Os produtos de reação, induzidos pela radiação, são geralmente estáveis e podem ser medidos diretamente pela mudança de cor, ou indiretamente por simples procedimentos analíticos. Os

métodos de leitura mais comuns dos sistemas líquidos são a espectrofotometria, potenciometria, análise colorimétrica ou viscosimetria [28]. Exemplos típicos de dosímetros líquidos encontram-se na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Dosímetros químicos para doses altas [19].

Soluto	Solvente	Intervalo útil De dose (Gy)	Intervalo útil de Taxa de dose(Gy.s ⁻¹)	Precisão nominal (1σ)
Sulfato ferroso	Sol aq. H ₂ SO ₄	20 a 200	<10 ⁶	1%
Sulfato cérico ceroso	Sol aq. H ₂ SO ₄	10 ³ a 10 ⁶	Depende da C (Ce ³⁺)	3%
Dicromato de prata	Sol aq. H ₂ SO ₄	10 ³ a 10 ⁴	-	2%
Ácido oxálico	Água	5x10 ³ a 10 ⁶	1 - 10 ⁸	5%
Iodeto de potássio	Água+H ₂ O ₂	5x10 ⁵ a 10 ⁸	5 - 10 ³	2%
Benzeno	Água	50 a 7x10 ²	0,01 – 10	2%
Clorobenzeno	Etanol aq.	10 ³ a 10 ⁵	Variável	3%
Leuco corantes	Solventes orgânicos	10 a 10 ⁴	10 ⁻² - 10 ¹²	3%
Corantes extingüíveis	Água	10 ² a 10 ⁵	Variável	10%
Corantes indicadores	Hidrocarbonetos	10 ³ a 10 ⁶	Dependentes	10%

A dosimetria dos sistemas líquidos aquosos baseia-se na reação do soluto com a espécie formada na radiólise da água e é feita por determinação da concentração das espécies químicas formadas. A leitura é proporcional aos produtos químicos formados e a concentração aumenta (ou diminui) em função da dose, dependendo do composto químico usado. As reações químicas originadas pela ação da radiação na água, dão origem a radicais livres e produtos moleculares. Átomos de hidrogênio (H), radicais hidroxilas ($\cdot\text{OH}$) e elétrons hidratados (e^-_{aq}) constituem o grupo de radicais livres; hidrogênico (H_2) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) constituem o grupo dos produtos moleculares [19,25,26].

As espécies químicas formadas em uma solução aquosa são as seguintes [6,14]:

- (1) $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + e^-_{\text{aq}}$
- (2) $\text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{H}^+_{(\text{aq})} + \text{OH}^\cdot$
- (3) $e^-_{\text{aq}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^-$
- (4) $\text{H}_2\text{O}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{OH}^-$
- (5) $\text{H}^\cdot + \text{H}^\cdot \rightarrow \text{H}_2$
- (6) $\text{OH}^\cdot + \text{OH}^\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$
- (7) $\text{H}^\cdot + \text{OH}^\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
- (8) $\text{H}^\cdot + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}^\cdot$
- (9) $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}^\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2^\cdot$
- (10) $\text{H}^\cdot + \text{O}_2\text{H}^\cdot \rightarrow \text{HO}_2^\cdot$
- (11) $\text{HO}_2^\cdot + \text{H}^\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$
- (12) $\text{R}^\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{RO}_2^\cdot$

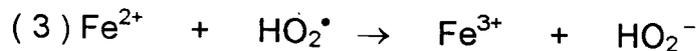
3.4 Algumas características dos compostos usados neste trabalho

Algumas particularidades das soluções usadas nesta pesquisa estão descritas a seguir.

3.4.1 Solução de Fricke

A solução de Fricke, que foi desenvolvida há mais de 70 anos por H. Fricke e S. Morse, em 1927, baseia-se na oxidação de uma solução de sulfato ferroso. Este dosímetro tem sido utilizado como dosímetro de referência para determinação da taxa de dose em campos gama e pode ser usado também como dosímetro de rotina [1,2,14,18].

A radiação gama, quando atinge os íons Fe^{2+} transforma-os em íons Fe^{3+} . As reações envolvidas são:



Cada átomo de hidrogênio forma um radical hidroperóxido, HO_2 , e cada um destes radicais oxida três íons de Fe^{2+} , um através da reação (3) e dois através das reações (4), (5) e (1). Cada radical hidroxila oxida um íon de Fe^{2+} e cada molécula de peróxido de hidrogênio oxida dois íons de Fe^{2+} . Todas as reações, exceto a (5), são rápidas [6].

A presença de impurezas orgânicas causa variação significativa na resposta deste dosímetro, por este motivo é essencial utilizar compostos muito puros.

3.4.2 Soluções radiocrômicas

Foram analisados alguns corantes e indicadores radiosensíveis, em solução, que poderão ser fixados em uma base sólida ou usados em solução.

Muitos dosímetros sólidos, geralmente confeccionados com substrato de polímero, não possuem sensibilidade suficiente à radiação. Por este motivo esta

sensibilidade é intensificada usando-se um corante ou indicador radiosensível que é fixado ao material de diversas formas. Na própria rede da matriz ou em camadas depositadas sobre este substrato de polímero. Os materiais assim confeccionados passam a ser chamados “filmes radiocrômicos” e as respectivas espessuras variam conforme o fabricante.

O dosímetro químico radiocrômico consiste de soluções que contém compostos que sob influência da radiação ionizante, se modificam por reações químicas variando a amplitude das bandas de absorção óptica, por causa da mudança de cor. Esta mudança na absorção óptica pode ser associada com a dose absorvida na água [3].

Segundo a teoria sobre a ação de um indicador sugerida por W. Ostwald, em 1894, as modificações de cor são causadas por modificações estruturais, que incluem a formação de formas quinônicas e de ressonância, estas mudanças podem ser ilustradas pela fenolftaleína, **Figura 10**, cujas alterações são características de todos os indicadores de ftaleína [15].

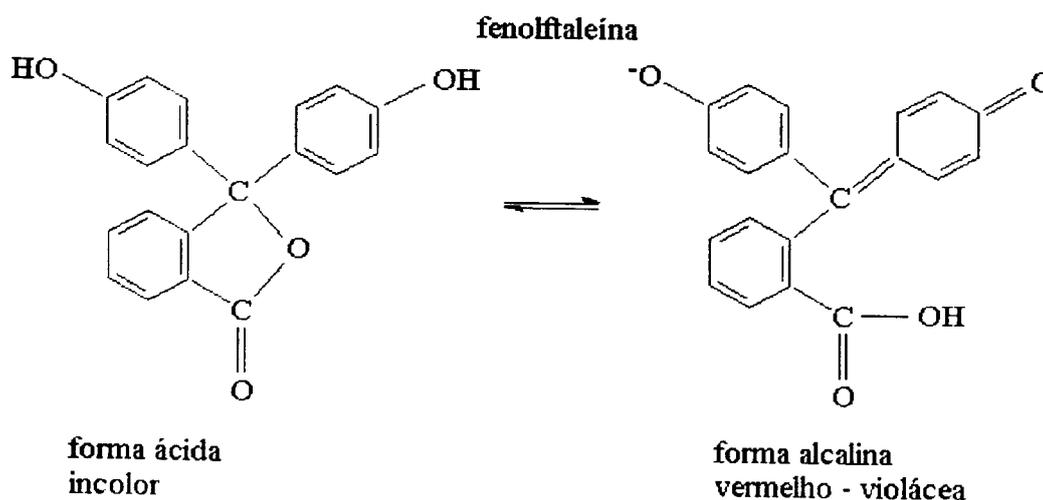


Figura 10 – Mudanças estruturais da Fenolftaleína.

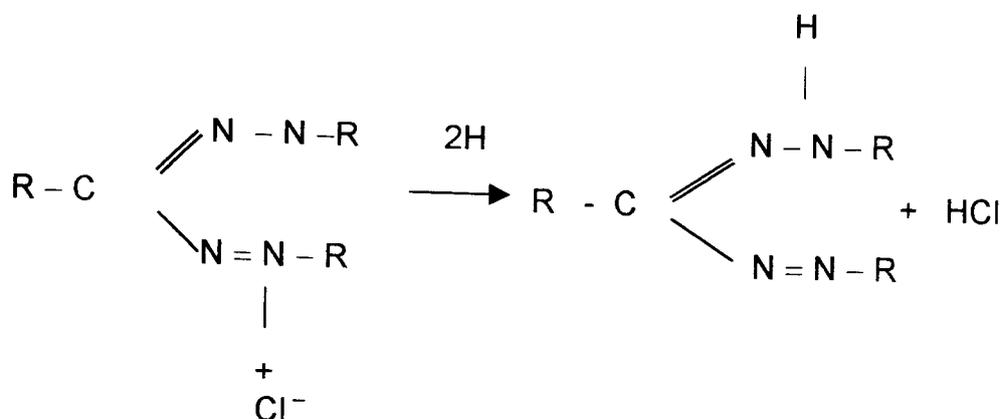
3.4.2.1 2,3,5 Trifenil – 2H – Tetrazólio Cloridrato (TTC)

Em 1949 Z. S. Gierlach e A. T. Krebs mostraram o efeito de coloração pela luz ultravioleta, partículas α e raios X nas soluções aquosas e nas emulsões gelatinosas do Trifeniltetrazólio Cloridrato [13].

O 2,3,5 Trifenil – 2H – Tetrazólio Cloridrato foi sintetizado inicialmente, em 1894, por H. von Pechmann e P. Runge. Em 1941, R. Kuhn e colaboradores estudaram suas propriedades. A. M. Mattson, C. O. Jensen e R. A. Dutcher usaram-no como um reagente no teste para verificar a vitalidade do tecido vivo. T. D. Waugh, então, usou este sal como descolorante da raiz do tecido vivo e de folhas. P. Pratt, J. Dufrenay e V. L. Pickering propuseram como um reagente para fisiologia celular. F. H. Straus, N. D. Cheronis e E. Straus foram os primeiros a explorar seu uso em tecido animal [13].

Os sais desse composto químico são incolores ou ligeiramente amarelados quando em solução aquosa, mas após a irradiação, precipitam um pigmento denominado formazam que é insolúvel em água [10].

De acordo com alguns trabalhos publicados [10,13] a sua fórmula e o seu estado reduzido é :



Como o sal tetrazólio incolor possui baixo potencial de redução em solução aquosa, é facilmente reduzido por meios químicos, tão bem como nos fotoquímicos, a um corante formazam colorido.

As investigações fotoquímicas realizadas pelos pesquisadores foram feitas em cebolas com um equipamento de fluorescência tendo-se notado que a epiderme viva da cebola, sujeita à solução de Trifeniltetrazólio Cloridrato, torna-se rosa. Esta preparação resultou também no aparecimento de uma mancha vermelha e brilhante detectada pelo equipamento de fluorescência. A fluorescência apareceu na área estudada e a intensidade de saturação diminuiu durante o período de observação.

Foram realizadas também investigações radioquímicas com raios X e partículas α . Os raios X e as partículas α agem de modo similar à luz ultravioleta, isto é, o sal tetrazólio incolor é reduzido a formazam vermelho.

Alguns fatores influenciam essa redução como a concentração de tetrazólio, o tempo de exposição à radiação, o pH e a temperatura.

3.4.2.2 Solução com indicador Azul Cresil Brilhante (ACB)

O indicador Azul Cresil Brilhante tem massa molecular de 317,82. Este composto é amplamente usado como corante em aplicações biológicas para identificação de alguns comportamentos fisiológicos em tecidos de animais ou plantas.

3.4.2.3 Solução com indicador Verde de Bromocresol (VBC)

O indicador Verde de Bromocresol tem massa molecular de 698,05 e é obtido pela adição de brometo em uma suspensão de m-cresolsulfonftaleína em ácido acético glacial [29]. É usado como indicador ácido-base e apresenta mudança de coloração quando ocorre mudança no pH: pH = 3,8 \Rightarrow amarelo e pH

= 5,4 \Rightarrow azul. Tais mudanças de cor são acompanhadas por mudanças químicas. A reação do indicador é dependente do pH, porque envolve liberação ou captura de íon hidrogênio



O indicador VBC é amarelo na forma HIn e na forma In^- é azul. Quando as formas ácida e básica estão presentes em igual concentração o pH é 4,68 e a solução é verde claro. A **Figura 11** mostra a variação da cor deste indicador quando irradiado.

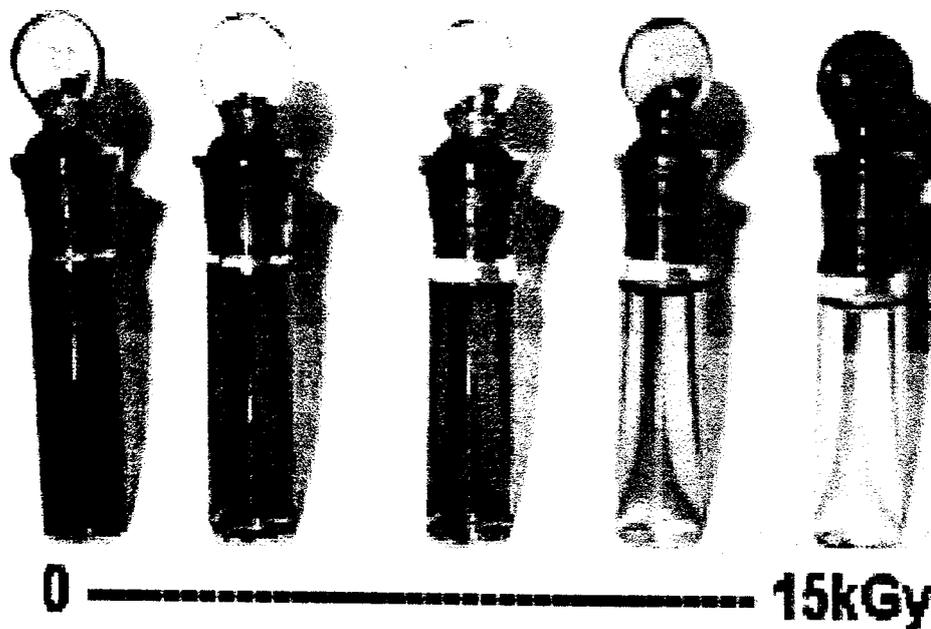
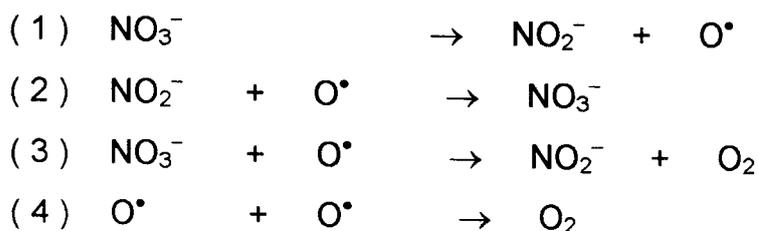


Figura 11 - Soluções com indicador Verde de Bromocresol , variação da cor quando irradiada.

3.4.3 Nitrato de Potássio

A radiólise do nitrato inorgânico sólido é muito complexa. O rendimento depende de muitos parâmetros. A decomposição do Nitrato de Potássio pela radiação ionizante, tal como a maioria dos nitratos, rende íons nitrito e oxigênio. Há uma correlação entre as doses empregadas no material sólido e a produção de nitrito. A reação que descreve esta situação é a seguinte [8,9,16]:



Para a determinação do íon nitrito formado quando o Nitrato de Potássio é irradiado, são preparadas soluções com reagentes específicos. Em condições ácidas o íon nitrito provoca a diazotação da sulfanilamida e o produto é acoplado ao diidrocloreto de N – (1 – Naftil) etilenodiamina, esta reação resulta em uma coloração característica para cada concentração de íon nitrito formado e que pode ser observada em um espectrofotômetro [15].

3.5 Características importantes para seleção do dosímetro

Como alguns dos compostos usados neste trabalho só foram pesquisados em aplicações diferentes da dosimetria das radiações deve-se ressaltar que existe uma bibliografia muito escassa a este respeito. Por este motivo a qualificação das soluções estudadas neste trabalho de pesquisa como materiais dosimétricos, baseou-se no estudo das características específicas na área da dosimetria das radiações que se encontram relacionadas na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Características analisadas para classificar um material como adequado para a medida da dose absorvida em dosimetria das radiações.

Simplicidade de preparo e facilidade de uso
Estabilidade de resposta, antes e após a irradiação
Resposta independente da taxa de dose, no intervalo de dose pré-estabelecido
Resposta independente da energia da radiação incidente
Resposta independente do ângulo de incidência da radiação
Resposta independente das condições ambientais
Resposta reprodutível dentro de um intervalo de dose
Exatidão e precisão da resposta nos extremos do intervalo de dose pré-estabelecido
Facilidade operacional adequada à precisão da resposta em dosimetria de rotina
Dose mínima $> (\bar{x}_0 \pm 3\sigma)^*$

* A dose mínima corresponde ao valor médio encontrado em ao menos 10 medidas da absorvância de uma solução não irradiada.

3.6 Técnicas de medidas - Espectrofotometria

Na análise espectrofotométrica é possível detectar as mudanças de cor provocada pela formação de um composto colorido resultante da adição de um reagente apropriado, ou pode ser intrínseca ao constituinte analisado [15].

O método analítico é baseado na absorção da radiação eletromagnética.

Quando a luz (monocromática ou heterogênea) incide sobre um meio homogêneo, uma parcela da luz incidente é refletida, uma outra parcela é absorvida no meio e o restante é transmitido.

As leis que regem a técnica da espectrofotometria podem ser resumidas por:

Lei de Lambert

Esta lei é expressa por:

$$I_T / I_o = T$$

Onde: I_T = intensidade da luz transmitida

I_o = intensidade da luz incidente

T = transmitância

A transmitância pode ser expressa em valores percentuais: $\%T = I_t / I_o \times 100$

A absorvância A do meio é dada por :

$$A = \log I_o / I_t$$

Lei de Beer

A intensidade de um feixe de luz monocromática diminui exponencialmente com a concentração da substância absorvedora.

Lei de Lambert - Beer

A combinação das duas leis, de Lambert e de Beer, define a relação existente entre T e A de modo que :

$$A = \varepsilon C x = \log (I_o / I_t) = \log 1/T = -\log T$$

Onde : A = absorvância;

ε = absortividade molar ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$);

C = concentração molar (mol dm^3) e

x = caminho óptico percorrido pela luz na amostra (cm).

3.6.1 O espectro

A luz tem radiações para as quais a vista humana é sensível, e as ondas com diversos comprimentos de onda provocam sensações de cores diferentes; uma mistura apropriada da luz com estes comprimentos de onda, constitui a luz branca.

Quando um feixe de luz branca atravessa uma cubeta contendo um determinado líquido, a radiação emergente será menos intensa por causa das perdas por reflexão, dispersão e, acima de tudo, pela absorção.

A radiação eletromagnética desloca-se numa velocidade de 3×10^{10} cm por segundo que é a velocidade da luz. São usualmente descritas em termos (a) do comprimento de onda λ (distância entre dois picos da onda) e (b) da frequência ν (número de vibrações da onda por segundo) : $c = \lambda \cdot \nu$. A **Figura 12** mostra um exemplo genérico do espectro de luz.

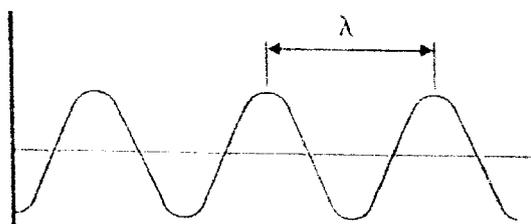


Figura 12 - Representação gráfica de uma onda

Na região do espectro onde predomina o ultravioleta, UV, e o visível, Vis., é conveniente definir o comprimento de onda em nanômetros, nm. Então:

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^0 \text{ \AA}$$

O Angstrom (\AA) também pode ser usado como unidade em espectrofotometria óptica.

3.6.2 Absorção da luz

A absorção da radiação luminosa se deve ao fato de as moléculas terem elétrons que podem ser promovidos a níveis de energia elevados mediante a absorção de energia. A energia necessária pode ser, em alguns casos, a proporcionada pela radiação com comprimentos de onda no visível, e o espectro de absorção estará na região visível. Em outros casos, é necessária energia maior, associada à radiação ultravioleta.

3.6.3 Caminhos da luz em um espectrofotômetro

A fonte luminosa pode ser uma lâmpada de tungstênio ou de deutério. Os raios luminosos, depois de atravessarem a fenda de entrada chegam ao colimador. A luz, depois de convertida em um feixe de raios paralelos, dirige-se ao prisma. O comprimento de onda já selecionado através do deslocamento do prisma é centralizado na fenda, atingindo finalmente a solução em estudo. A **Figura 13** representa o esquema descrito.

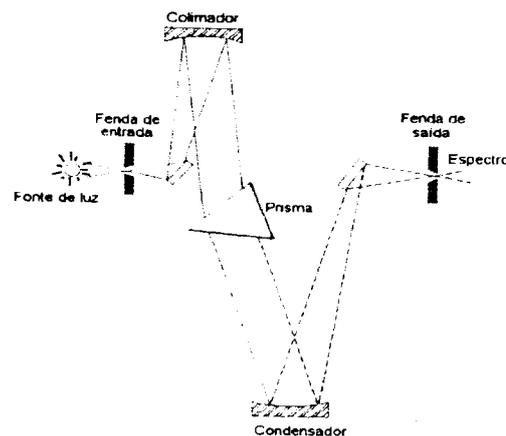
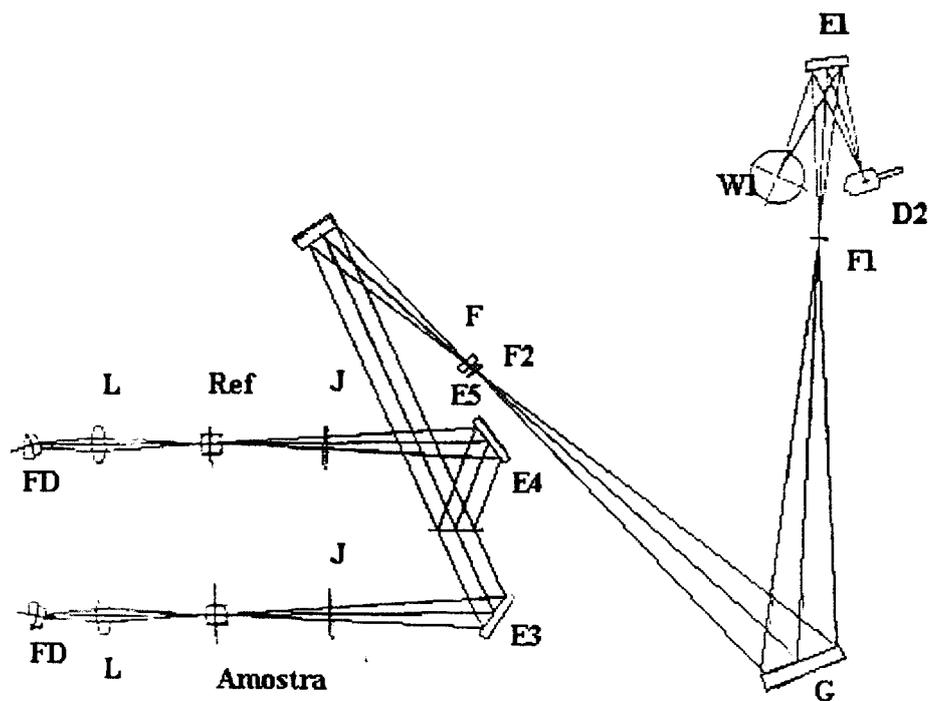


Figura 13 . Esquema básico dos caminhos da luz em um espectrofotômetro

O esquema da **Figura 14** mostra o funcionamento de um espectrofotômetro onde podem ser analisados ao mesmo tempo a amostra e uma referência.



FD = foto diodo L = lente Ref = referência J = janela
 F = filtro F1 = fenda de entrada F2 = fenda de saída
 W1 = janela D2 = lâmpada de Dautério E1...E5 = espelhos

Figura 14 – Esquema de operação de um espectrofotômetro moderno.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Equipamentos

4.1.1 Medidas ópticas

As medidas de absorção óptica foram feitas em dois espectrofotômetros:

- ❖ marca Pharmacia – modelo Novaspec II → permite determinar a absorção óptica em comprimentos de onda na região visível do espectro de luz (325nm a 900nm);
- ❖ marca Shimadzu – modelo UV –1601PC → permite determinar a absorção óptica em comprimentos de onda na região ultravioleta e visível do espectro de luz (190nm a 900nm).

As características principais dos espectrofotômetros citados estão na **Tabela 4.**

Tabela 4 - Características dos espectrofotômetros usados nesta pesquisa

Descrição	Espectrofotômetro	Espectrofotômetro
	Pharmacia	Shimadzu
Intervalo do comp. de onda	325nm – 900nm	190nm – 1100nm
Espessura da banda	<6nm	2nm
Resolução	2nm	2nm
Precisão	± 2nm	±0,5nm
Sistema fotométrico	feixe único	feixe duplo
Varredura	1nm	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 2nm
Intervalo fotométrico	A = - 0,3 ~ 3,00A	A = -0,5 ~ 3,99A
	T = 0,1 ~ 200%T	T = 0 ~ 300%T
Velocidade de varredura	Manual	2800nm/min a 200nm/min
Fonte luminosa	Tungstênio, halogênio	Deutério , Tungstênio halogênio

4.1.2 Obtenção de água pura

A água usada para preparar as soluções estudadas no presente trabalho foi obtida no Departamento de Produção de Radiofármacos do IPEN, no destilador marca Millipore modelo Milli-RX se obtém água cujo alto grau de pureza (água tri-distilada) permite usá-la na fabricação de produtos medicinais, injetáveis em seres humanos.

4.1.3 Confeção de pastilhas

A prensa, **Figura 15**, utilizada para a confecção das pastilhas de Nitrato de Potássio, pertence ao Departamento de Metrologia das Radiações, IPEN, e é da marca Fred Frey. Apresenta um dispositivo que permite posicionar três moldes por prensagem.

A quantidade de pó de Nitrato de Potássio usada foi de 50mg, 75mg e 100mg por pastilha. Cada molde permite confeccionar quatro pastilhas. Foram usados dois tipos de moldes: um onde as pastilhas tem diâmetro de 6mm e outro onde as pastilhas têm diâmetro de 3mm, a espessura da pastilha depende da massa a ser prensada. As **Figuras 16 e 17** mostram os dois tipos de moldes usados.

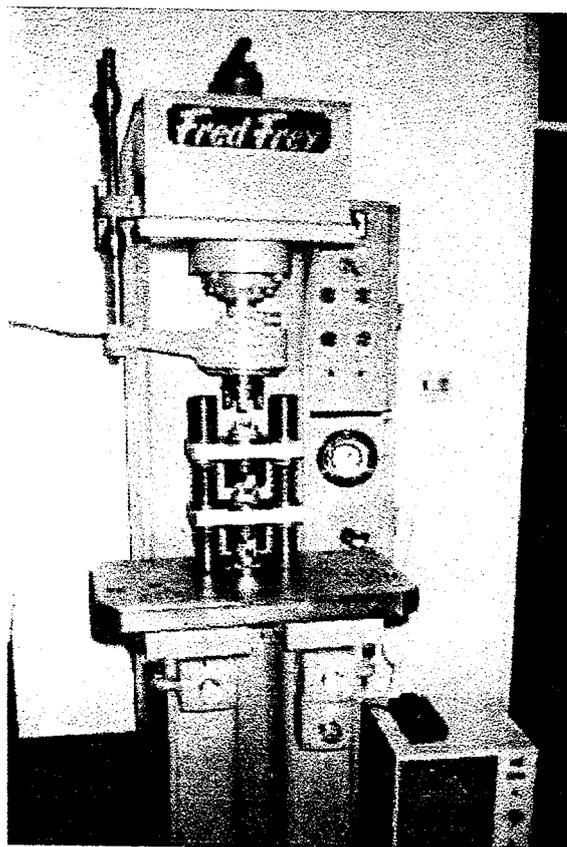


Figura 15 - Prensa marca Fred Frey para prensagem de pastilhas.

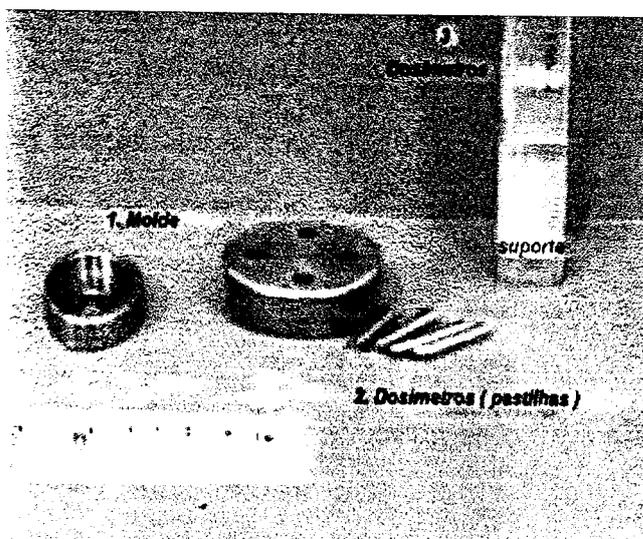


Figura 16 - 1- Molde para prensar pastilhas com 6mm de diâmetro; 2- Pastilhas acondicionadas entre folhas de polietileno e 3- Pastilhas entre duas placas de Lucite® (3mm) preparadas para irradiação (fixadas sobre um suporte de madeira).

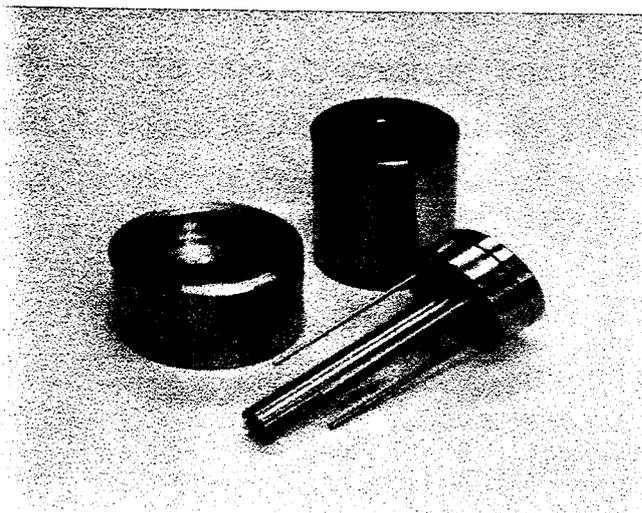


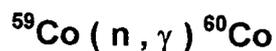
Figura 17 - Molde que permite prensar pastilhas cilíndricas com diâmetro de 3mm.

4.1.4 Fontes de irradiação

Neste trabalho de pesquisa foram utilizadas duas fontes de ^{60}Co (Gammacell e Panorâmica) e o acelerador de elétrons pertencentes à Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria, IPEN-TE. Apresentam as características seguintes:

❖ Fontes Gama de ^{60}Co .

O ^{60}Co é um radioisótopo de meia vida igual a 5,27 anos e é usado para irradiar materiais diversos. É obtido em reatores a partir da reação seguinte [19]:



Os tipos principais de radiações emitidas pelo ^{60}Co são :

1 partícula β com $E = 0,314\text{MeV}$, e

2 raios γ com $E = 1,332\text{MeV}$ e $1,17\text{MeV}$ respectivamente.

Para efeito de cálculo pode-se usar o valor da energia média de 1,25MeV. No processo de decaimento esse radioisótopo transforma-se em ^{60}Ni que é um elemento estável. A **Figura 18** mostra o esquema do decaimento do ^{60}Co .

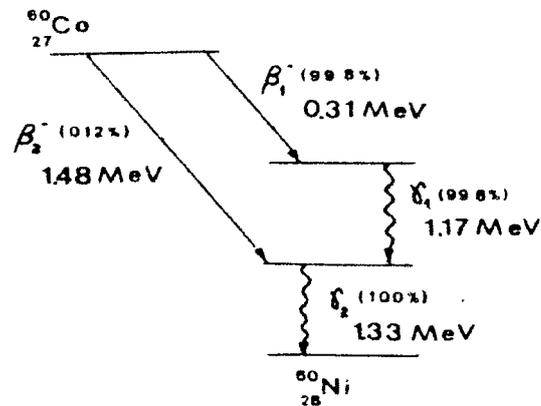


Figura 18 - Esquema do decaimento do ^{60}Co para o ^{60}Ni estável.

➤ Fonte Gama de ^{60}Co (Gammacell 220)

- Tipo = Câmara com 3,6L de capacidade útil ;
- Forma = Cilíndrica com 26 lápis dispostos simetricamente;
cada lápis contém 7 pastilhas de ^{60}Co ;
- Atividade (janeiro/99) = $38,9 \times 10^{13}\text{Bq}$ (10.508,4Ci);
- Taxa de dose (janeiro/99) = 7,48kGy/h.

Obs.: São utilizados atenuadores de chumbo que reduzem a taxa de dose em aproximadamente 50%, 70% e 90% do valor inicial*.

*Instruction Manual – Irradiation unit – Accessories – Atomic Energy of Canada – Ottawa – Canada.

➤ Fonte Gama de ^{60}Co

- Tipo = Panorâmica, mesa suporte de 1,5 x 1,5m;
- Cobalto metálico, encapsulado em aço inoxidável em forma de lápis
- Dimensões do lápis $\varnothing = 1,2\text{cm}$; comprimento = 20cm ;
- Atividade (janeiro / 99) = $6,94 \times 10^{13}\text{Bq}$ (1.876,1Ci);
- Taxa de dose = depende da distância entre o material a ser irradiado e a fonte.

Neste trabalho foi utilizada a posição posterior do cano guia, a 40cm de distância do mesmo, que em janeiro/99 apresentava taxa de dose igual a 0,1083kGy/h. Foi escolhida, por ter sido efetuada uma calibração pelo programa IDAS - IAEA, com dosímetro de alanina e solução de Fricke.

❖ Aceleradores de elétrons

O TE/IPEN possui dois aceleradores de elétrons cujas características são apresentadas na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Características dos aceleradores de elétrons pertencentes ao TE/IPEN

Parâmetros	Modelo E00120210 JOB 188	Modelo DPC 200 JOB 307
Energia (MeV)	0,5 a 1,5	0,75 a 1,50
Corrente (mA)	0,3 a 25,0	0,3 a 65,0
Potência (kW)	0,5 a 37,5	0,225 a 97,500
Varredura do feixe (cm)	60 a 120	60 a 120
Taxa de dose (kGy/s)	1,0 a 301,4	1,0 a 651,4

As ilustrações das fontes de cobalto encontram-se no **Anexo 2**.

No **Anexo 3** encontram-se a ilustração do acelerador de elétrons e as tabelas utilizadas para cálculos dos parâmetros de irradiação.

4.1.5 Determinação do pH

O pH das soluções, foi medido com auxílio do pHmetro modelo B474, marca Micronal.

4.2 Reagentes e vidraria

Todos os reagentes usados durante os experimentos são de grau analítico, pró-análise, fornecidos pela Merck S.A. Indústrias Químicas, empresa conceituada no mercado, que garante pureza adequada, conforme o controle de qualidade específico.

Os reagentes usados no trabalho foram:

- $[\text{Fe} (\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}]$ = Sulfato ferroso amoniacal , sal de Mohr;
- NaCl = Cloreto de sódio;
- H_2SO_4 = Ácido sulfúrico ;
- $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\text{HCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ = Orto-fenantrolina cloridrato;
- CH_3COOH = Ácido acético glacial;
- KNO_3 = Nitrato de potássio;
- $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ = Álcool etílico;
- $\text{C}_{19}\text{H}_{15}\text{ClN}_4$ = 2,3,5 Trifenil-2H-tetrazólio cloridrato;
- $\text{C}_{17}\text{H}_{20}\text{ClN}_3\text{O}$ = Cloreto de aminodietilaminometildifenazônio ou Azul Cresil Brilhante [15];
- $\text{C}_{21}\text{H}_{14}\text{Br}_4\text{O}_5\text{S}$ = 3,3',5,5' -Tetrabromo-m-cresolsulfonoftaleína ou Verde de Bromocresol [15];
- $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$ = Sulfanilamida (4-aminobenzenossulfonamida) [15];
- $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2 \cdot 2\text{HCl}$ = Diidrocloreto de N - (1-Naftil) etilenodiamina [15].

A limpeza da vidraria utilizada nos experimentos seguiu um criterioso procedimento que incluía várias lavagens com solução sulfocrômica e água destilada, a fim de eliminar possíveis contaminações com material orgânico [1,34].

Para irradiar as soluções dosimétricas, foram utilizados tubos de ensaio especiais com as características seguintes: a) fabricados em vidro Pyrex; b) rolha de vidro; c) dimensões: diâmetro = 15mm; altura = 65mm; espessura da

parede = 1mm. Em cada tubo de ensaio foi irradiada uma alíquota de 3mL da solução.

Para medir a absorção óptica das soluções foram usadas cubetas de quartzo com caminho óptico de 10mm.

4.3 Métodos de análise

Para todas as soluções estudadas determinou-se o comprimento de onda de absorção máxima, λ_{\max} , no intervalo óptico entre 325nm e 900nm, antes da irradiação. Uma vez determinado este valor, as medidas após a irradiação foram feitas para este mesmo valor.

Todas as irradiações foram feitas em condições de equilíbrio eletrônico. Para manter as condições de equilíbrio eletrônico, foram utilizados suportes de polietileno com 3mm de espessura para as soluções dosimétricas e para as pastilhas de Nitrato de Potássio foram utilizadas placas de Lucite® com 3mm de espessura [4].

O limite inferior de detecção da radiação (sensibilidade) foi determinado para as soluções não irradiadas. Foram realizadas 10 medidas de absorção óptica de cada solução e a dose mínima detectável, para cada tipo de material dosimétrico, foi considerada como ($\bar{x}_0 \pm 3\sigma$), onde \bar{x}_0 é a média de 10 medidas de absorvância da solução não irradiada e σ é o desvio padrão da média.

Cada valor experimental, obtido neste trabalho, é resultado da média dos valores da intensidade da absorção óptica obtida em três medidas para cada tipo de amostra e cada concentração usada.

A **Figura 19** mostra os materiais utilizados para a irradiação das amostras: frascos de contenção das soluções, suportes para o equilíbrio eletrônico e posicionamento nas fontes.

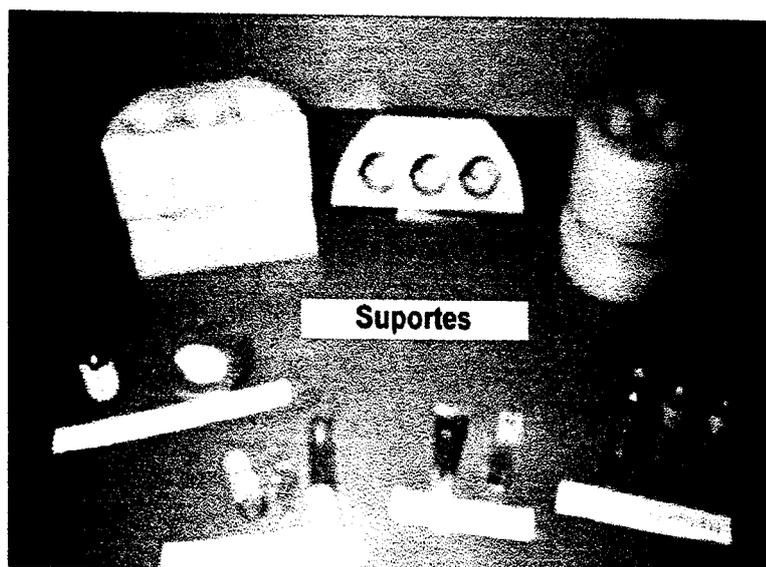


Figura 19 - Materiais utilizados para a irradiação das soluções.

As curvas de calibração (dose x absorvância), para cada solução experimentada, foram construídas em função da irradiação em cada uma das fontes gama.

Nas soluções não irradiadas e irradiadas foi determinada a variação na absorção óptica com o tempo de estocagem, para isso foram feitas medidas ópticas em tempos específicos.

A influência da luz e da temperatura ambiente na absorvância de cada composto foram analisadas mantendo-se as amostras por longos períodos expostas à luz ambiente, formada por luz de lâmpadas fluorescentes, incandescentes e a luz solar, e temperaturas de $10^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $23^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ e $35^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$.

Para a determinação da influência da taxa de dose na intensidade óptica, os dosímetros foram irradiados nas duas fontes de ^{60}Co .

Não foi possível determinar a dependência energética dos dosímetros estudados. Os valores de dose empregados são muito altos inviabilizando as irradiações nas outras fontes pertencentes ao IPEN, tais como a fonte de ^{137}Cs ;

aparelho de raio X, etc, pois, o tempo necessário para a irradiação seria demasiado longo.

Analizou-se os dosímetros, apenas em fontes gama e acelerador de elétrons, mas há uma certa dificuldade em se comparar irradiações com características tão diferentes. Os dados serão apresentados, individualmente, para cada dosímetro.

4.4 Preparo dos materiais dosimétricos

4.4.1 Solução de Fricke

4.4.1.1 Formulação e manuseio

A solução dosimétrica é preparada com os reagentes seguintes [1,34]:

- $1 \times 10^{-3}M$ sal de Mohr
- $1 \times 10^{-3}M$ NaCl
- 0,8N H_2SO_4

Prepara-se 1L de solução, dissolvendo-se 0,392g de sulfato ferroso amoniacal e 0,058g de cloreto de sódio em 1,25mL de ácido sulfúrico 0,8N. Dilui-se até 1L, em balão volumétrico, com ácido sulfúrico 0,8N. O cloreto de sódio é usado para reduzir os efeitos adversos das impurezas orgânicas. A solução dosimétrica oxida-se em temperatura ambiente, portanto, a absorvância dessa solução é maior com o passar do tempo. O efeito da oxidação pode ser atenuado guardando-se a solução em local abrigado da luz e sob refrigeração ($\sim 8^\circ C$).

Para fazer as medidas ópticas adiciona-se:

- Solução 1% Orto-fenantrolina cloridrato;
- Solução 3% Ácido acético glacial.

4.4.1.2 Calibração do sistema de leitura

Para se determinar o comprimento de onda onde a absorvância é mais intensa, faz-se a medida com a solução não irradiada preparada como descrito a seguir:

Pipeta-se 2,5mL da solução dosimétrica não irradiada;

Pipeta-se 1,25mL de solução de ácido acético glacial 3%;

Pipeta-se 0,5mL de solução de orto-fenantrolina cloridrato 1%;

Transfere-se tudo para um balão volumétrico de 25mL;

Completa-se o balão com água pura;

Deixa-se em local abrigado da luz durante 1 hora para formação do complexo de $[(C_{12} H_{18} N_2)_3 Fe]^{+2}$ que é vermelho –alaranjado [15];

Calcula-se a concentração de Fe^{2+} ;

Coloca-se uma determinada quantidade de solução na cubeta de leitura (3mL);

Tira-se o espectro de absorção para esta concentração de íons de Fe^{2+} . O valor de comprimento de onda de máxima absorção, λ_{max} , é então utilizado para as medidas dos resultados das irradiações no espectrofotômetro. Para se fazer a curva de calibração, preparam-se soluções de Fricke com diferentes concentrações de íons Fe^{2+} , que são diluídas, então, as medidas da absorvância são obtidas para o λ_{max} . Desta forma é obtida a curva de calibração (concentração x absorvância).

4.4.1.3 Preparação dos dosímetros para irradiação

Enxágua-se os tubos de ensaio com a solução dosimétrica e coloca-se 3mL de solução para irradiar. Posiciona-se o dosímetro na fonte de radiação e deixa-se o material exposto até atingir a dose desejada.

4.4.1.4 Preparação das amostras irradiadas para análise

Pipeta-se 2,5mL de solução dosimétrica irradiada;

Pipeta-se 2,5mL de solução de orto-fenantrolina 1%;

Pipeta-se 7,25mL de solução de ácido acético glacial 3%;

Transfere-se para um balão volumétrico de 25mL e completa-se até o traço com água pura;

Deixa-se em local abrigado da luz, durante 1 hora, para formação do complexo de $[(C_{12}H_{18}N_2)_3Fe]^{+2}$ que é vermelho – alaranjado .

4.4.1.5 Cálculo da dose absorvida

Depois que a solução é preparada, mede-se o valor de absorvância e por intermédio da curva de calibração, determina-se a concentração de íons Fe^{2+} que não foram oxidados. A diferença entre a concentração inicial e a concentração final dos íons Fe^{2+} é o valor da concentração de íons Fe^{3+} produzidos. O procedimento é o seguinte:

- Cálculo da diluição

$$C_{lida} \times 10 = C_{real}$$

$$C_{Fe^{3+}} = C_{Fe^{2+} \text{ inicial}} - C_{Fe^{2+} \text{ final}}$$

$$C_{Fe^{3+}} = \text{mol} (2,5\text{mL})$$

- Cálculo da dose absorvida

$$1\text{mol sol. Fricke} \text{ ----- } 6,023 \times 10^{23} \text{ íons (n}^\circ \text{ Avogadro)}$$

$$C_{Fe^{3+}} \text{ ----- } n^\circ \text{ íons } Fe^{3+}$$

Na literatura [1] o valor G (rendimento químico), para a solução de Fricke, é de 15,6 íons produzidos para cada 100eV de energia absorvida. Portanto:

$$\begin{array}{l} 100\text{eV} \text{ ----- } 15,6\text{íons de Fe}^{3+} \\ X \text{ eV} \text{ ----- } n^{\circ} \text{ íons de Fe}^{3+} \end{array}$$

e

$$\begin{array}{l} 0,01\text{Gy} \text{ ----- } 6,24 \times 10^{13}\text{eV/g} \\ x \text{ Gy} \text{ ----- } x \text{ eV/g} \left[x = \frac{X(\text{eV})}{m(\text{g})} \right] \end{array}$$

4.4.2 Soluções radiocrômicas

4.4.2.1 2,3,5 Trifenil – 2H – Tetrazólio Cloridrato

4.4.2.1.1 Formulação e manuseio

Inicialmente a solução foi preparada diluindo-se o reagente em água com elevada pureza, nas concentrações: 0,05%; 0,25% e 0,5%, em massa. Cada uma foi acondicionada em um frasco de vidro e armazenada à temperatura ambiente.

Após os primeiros testes, verificou-se que as soluções preparadas não apresentavam resultados estáveis. Foi mudado o tipo de solvente e preparadas duas soluções com concentrações 0,05%, em massa. Neste caso foi adotado o álcool etílico a 5% e a 100%, em volume.

4.4.2.1.2 Irradiações

As amostras foram preparadas em alíquotas de 3mL da solução em um tubo de ensaio com tampa.

Os conjuntos, suportes mais dosímetros, foram posicionados na fonte Gammacell, e irradiados com doses entre 9,9Gy e 50kGy.

As soluções aquosas com concentrações 0,05%, 0,25% e 0,5%, em massa, foram irradiadas com doses de: 9,9Gy; 1kGy; 10kGy e 50kGy e as soluções diluídas em álcool foram irradiadas com doses de 1kGy. Foram irradiadas amostras na situação em que a fonte chega à posição de irradiação e é imediatamente recolhida (desce /sobe) para verificar se nesta forma de irradiação o dosímetro acusa alguma dose, esta dose é chamada de dose de trânsito.

4.4.2.1.3 Análises ópticas

A leitura no espectrofômetro foi feita antes da irradiação, para determinar o λ_{\max} para cada concentração. Uma vez fixados estes comprimentos de onda, todas as leituras posteriores foram feitas no mesmo valor característico para cada uma das concentrações.

4.4.2.2 Solução com indicador Azul Cresil Brilhante

4.4.2.2.1 Formulação e manuseio

A solução foi preparada diluindo-se o indicador em água com elevada pureza na concentração de 0,1%, em massa, acondicionada em um frasco de vidro e armazenada à temperatura ambiente.

4.4.2.2.2 Irradiações

Os procedimentos são os mesmos descritos para o composto anterior. Porém, esta solução foi irradiada na fonte Panorâmica com doses entre 45Gy e 405,3Gy.

4.4.2.2.3 Análises ópticas

A solução foi analisada no espectrofotômetro para a determinação do λ_{\max} e as leituras subsequentes foram feitas neste mesmo comprimento de onda.

4.4.2.3 Solução com indicador Verde de Bromocresol

4.4.2.3.1 Formulação e manuseio

Foram preparadas soluções com diferentes concentrações, a saber: 0,01%, 0,0075% e 0,005%, em massa. O indicador foi dissolvido em 5%, em volume, de álcool etílico 95% p.a. e então em água com elevada pureza na concentração desejada.

Depois da dissolução as soluções foram acondicionadas em frascos de vidro âmbar e armazenadas em local abrigado da luz à temperatura ambiente.

4.4.2.3.2 Irradiações e medidas ópticas

O limite inferior de detecção (sensibilidade) foi determinado para a solução não irradiada com concentração 0,01%, em massa.

As soluções foram irradiadas com doses entre 50Gy e 15kGy. As **Tabelas 6 e 7** mostram as doses induzidas nas soluções nas fontes de ^{60}Co , Panorâmica e Gammacell.

Tabela 6 - Dose absorvida (kGy) nas soluções com indicador Verde de Bromocresol na fonte Panorâmica.

Solução 1 (conc. 0,005%)	Solução 2 (conc. 0,0075%)	Solução 3 (conc. 0,01%)
0,05	0,05	0,05
0,10	0,10	0,10
0,20	0,20	0,20
0,30	0,30	0,30
-	0,50	0,50
2,00	2,00	2,00
5,00	5,08	5,02
8,23	8,21	8,24
10,00	10,00	10,00
15,00	15,00	15,00

Tabela 7 - Dose absorvida (kGy) nas soluções com indicador Verde de Bromocresol na fonte Gammacell.

Solução 1 (conc. 0,005%)	Solução 2 (conc. 0,0075%)	Solução 3 (conc. 0,01%)
0,05	0,05	0,05
0,10	0,10	0,10
0,50	0,50	0,50
1,00	1,00	1,00
2,00	2,00	2,00

Na fonte Gammacell foram irradiados com as taxas de dose de 0,765, 2,295, 3,82 e 7,65kGy/h. A taxa de dose 7,65kGy/h é fixada sem atenuador e, para as demais, empregou-se atenuadores de chumbo que correspondem respectivamente a 90, 70 e 50% aproximadamente de atenuação.

Na fonte Panorâmica foram irradiados com as taxas de dose de 0,063, 0,128, 0,351 e 0,628kGy/h que correspondem às distâncias de 60, 40, 20 e 10cm na parte frontal. Após as irradiações mediu-se a absorvância da solução.

Analisou-se ainda a resposta do dosímetro em diferentes campos de radiação; para tanto foram feitas irradiações nas fontes de ^{60}Co e no acelerador de elétrons. Para irradiar no acelerador de elétrons foram utilizadas placas de Petri com 8,5cm de diâmetro. Os volumes irradiados da solução foram 24mL ($a = 4,4\text{mm}$) e 56mL ($a = 10,0\text{mm}$). Empregou-se a menor taxa de dose factível de ser fixada na máquina, que é de 1,07kGy/s. Procurou-se manter o valor da dose próximo daquele anteriormente usado nas fontes gama de ^{60}Co e que corresponde aos parâmetros mostrados na **Tabela 8** :

Tabela 8 . Parâmetros de irradiação, no acelerador de elétrons JOB188, para soluções com indicador Verde de Bromocresol.

Parâmetros	Valor
Energia (E)	1,5MeV
Corrente (I)	0,3mA
Dose (D)	0,47kGy

*Outros parâmetros: Largura do feixe (L) =112cm; Scan - parâmetro da máquina = 99,68%; K - constante de correção = 119; HVD - corrente no divisor de alta tensão = 109,3 μA ; Número de passadas sob o feixe (P) = 1.

Nas soluções irradiadas e não irradiadas, com concentração 0,01%, em massa, foi determinado o valor do pH com a finalidade de se verificar se as variações de pH e coloração da solução correspondem as modificações teóricas apresentadas.

A reprodutibilidade da resposta óptica foi verificada irradiando o mesmo lote da solução em datas diferentes.

4.4.3 Nitrato de Potássio

4.4.3.1 Reagentes utilizados

- Nitrato de Potássio;
- Ácido acético glacial;
- Sulfanilamida;
- Diidrocloreto de N - (1-Naftil) etilenodiamina.

4.4.3.2 Formulação e manuseio

O Nitrato de Potássio em pó passou por um processo de secagem em estufa à temperatura de 80°C por 2 horas. Em seguida foi armazenado em dessecador para posterior utilização.

O pó foi pesado e diferentes massas de material foram prensadas na forma de pastilhas. A pressão aplicada foi de 5 toneladas. As pastilhas foram seladas entre duas folhas de polietileno, com 0,18mm de espessura e armazenadas em dessecador.

A **Tabela 9** mostra os três tipos de pastilhas, conforme a quantidade de pó de Nitrato de Potássio.

Tabela 9. Tipos de pastilhas de Nitrato de Potássio em função da massa, diâmetro e espessura.

Tipo	massa (mg)	Diâmetro (mm)	espessura (mm)
1	50	6	0,8
2	75	6	1,2
3	100	6	1,7

4.4.3.3 Preparação dos dosímetros para irradiação

Cada conjunto de dosímetros consistiu de três pastilhas, colocadas entre duas placas de Polimetilmetacrilato, Lucite[®], com 3mm de espessura para manter a condição de equilíbrio eletrônico. Esse conjunto era fixado em suportes de madeira para a irradiação.

4.4.3.4 Irradiações

O limite inferior de detecção (sensibilidade) foi determinado no composto não irradiado.

Para a curva de calibração as pastilhas de 50mg foram irradiadas na fonte Gammacell com doses entre 1 e 150kGy. Na fonte Panorâmica irradiou-se num intervalo de dose entre 10 e 50kGy. O mesmo intervalo de dose não foi aplicado nas duas fontes por causa da baixa atividade que a fonte Panorâmica apresenta o que ocasiona um tempo maior de irradiação.

Para verificar se a resposta do dosímetro independe da taxa de dose, as pastilhas foram irradiadas com diferentes taxas, na fonte Panorâmica: 0,059, 0,120, 0,328 e 0,586kGy/h que correspondem, respectivamente, às distâncias de 60cm, 40cm, 20cm e 10cm. Na Gammacell foram irradiadas com taxas de dose de: 0,765, 2,295 e 3,82kGy/h, que correspondem, respectivamente, à taxas resultantes da atenuação de aproximadamente 50%, 70% e 90% e de 7,65kGy/h sem atenuação.

Além da radiação gama foi analisada a resposta do dosímetro para os elétrons. Os valores apresentados na **Tabela 10** correspondem aos parâmetros da irradiação no acelerador de elétrons.

Tabela 10 - Parâmetros de irradiação, no acelerador de elétrons JOB 188, de pastilhas de Nitrato de Potássio.

Parâmetros	
Dose (kGy)	30
Taxa de dose (kGy/	67,39
Energia (MeV)	1,25
Corrente (mA)	15,2

*Outros parâmetros: HVD (μA) = 88,2; SCAN (%) = 77,00; N^o passadas (P) = 1;

Veloc. Bandeja (m/min.) = 3,36 e Largura do feixe (cm) = 100

Pastilhas com diferentes massas foram irradiadas na fonte Gammacell nas doses de 10, 30 e 50kGy para cada massa.

Irradiou-se pastilhas de 50mg na fonte Panorâmica e na fonte Gammacell para verificar a variação da resposta com o ângulo de incidência da radiação. Para tanto foi feita uma variação angular entre 0^o e 90^o. As **Figuras 20 a 23** mostram as várias posições em que os dosímetros foram colocados para a irradiação.

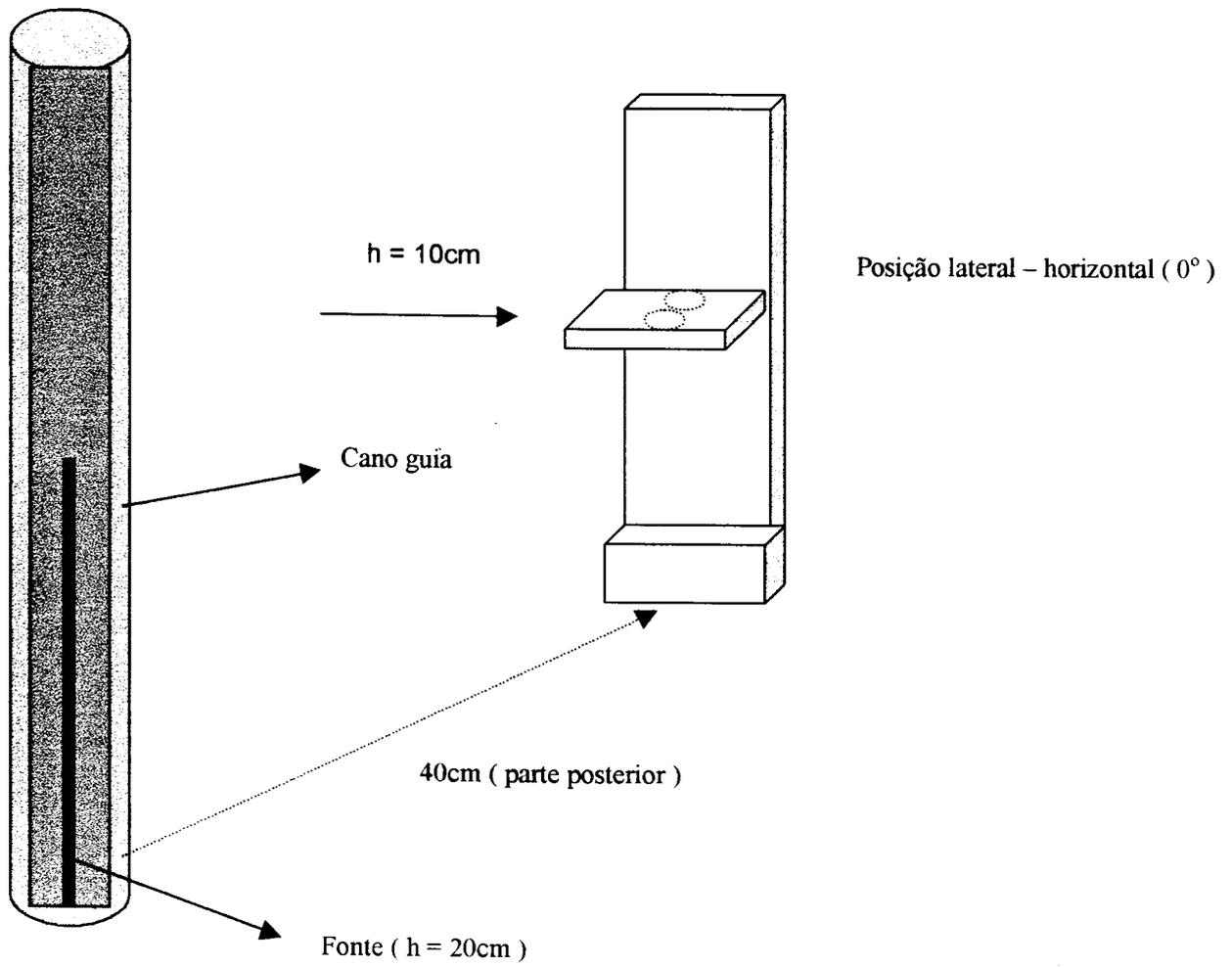


Figura 20 – Dosímetro na posição horizontal (0°) - lateral

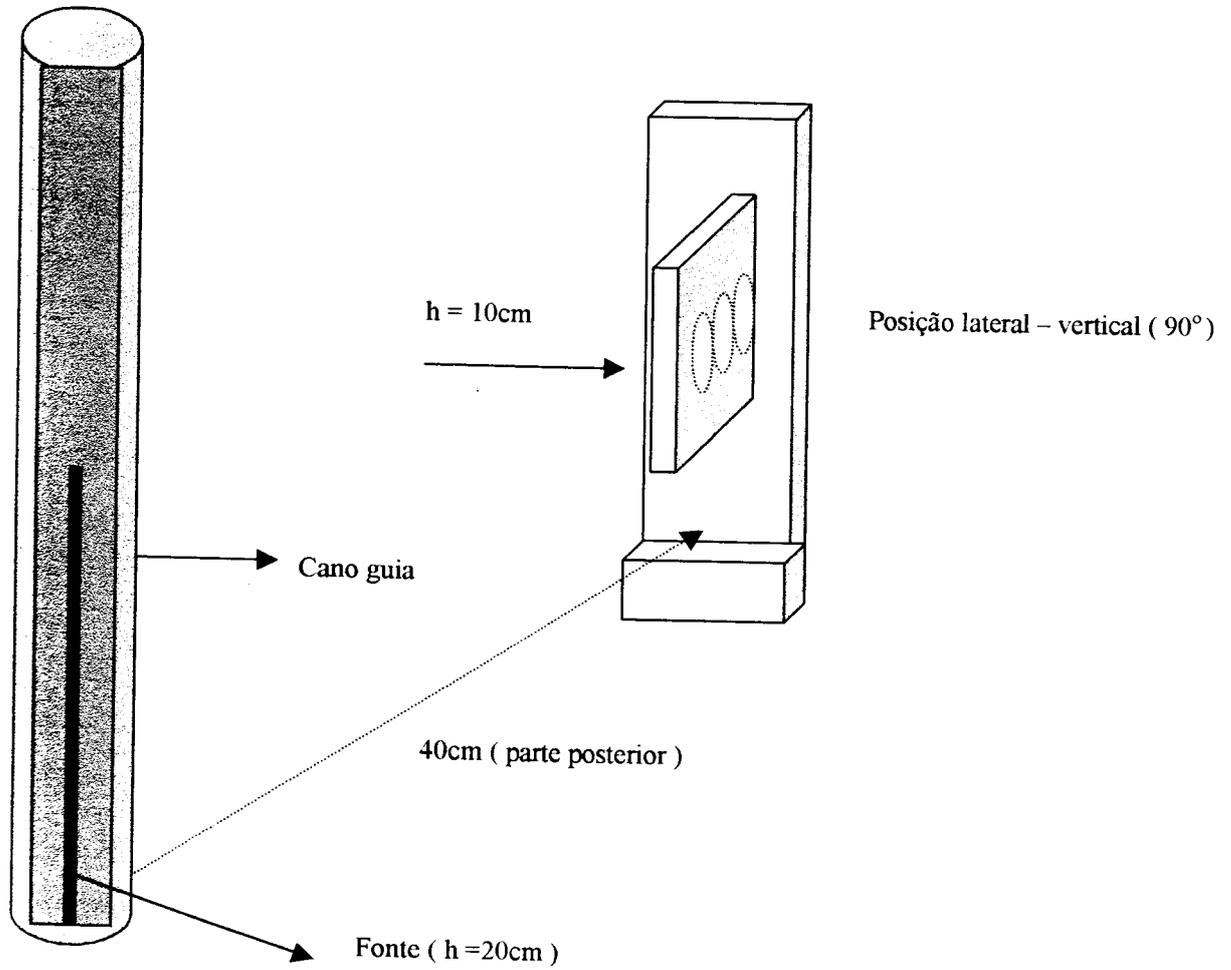


Figura 21 – Dosímetro na posição vertical (90°) - lateral

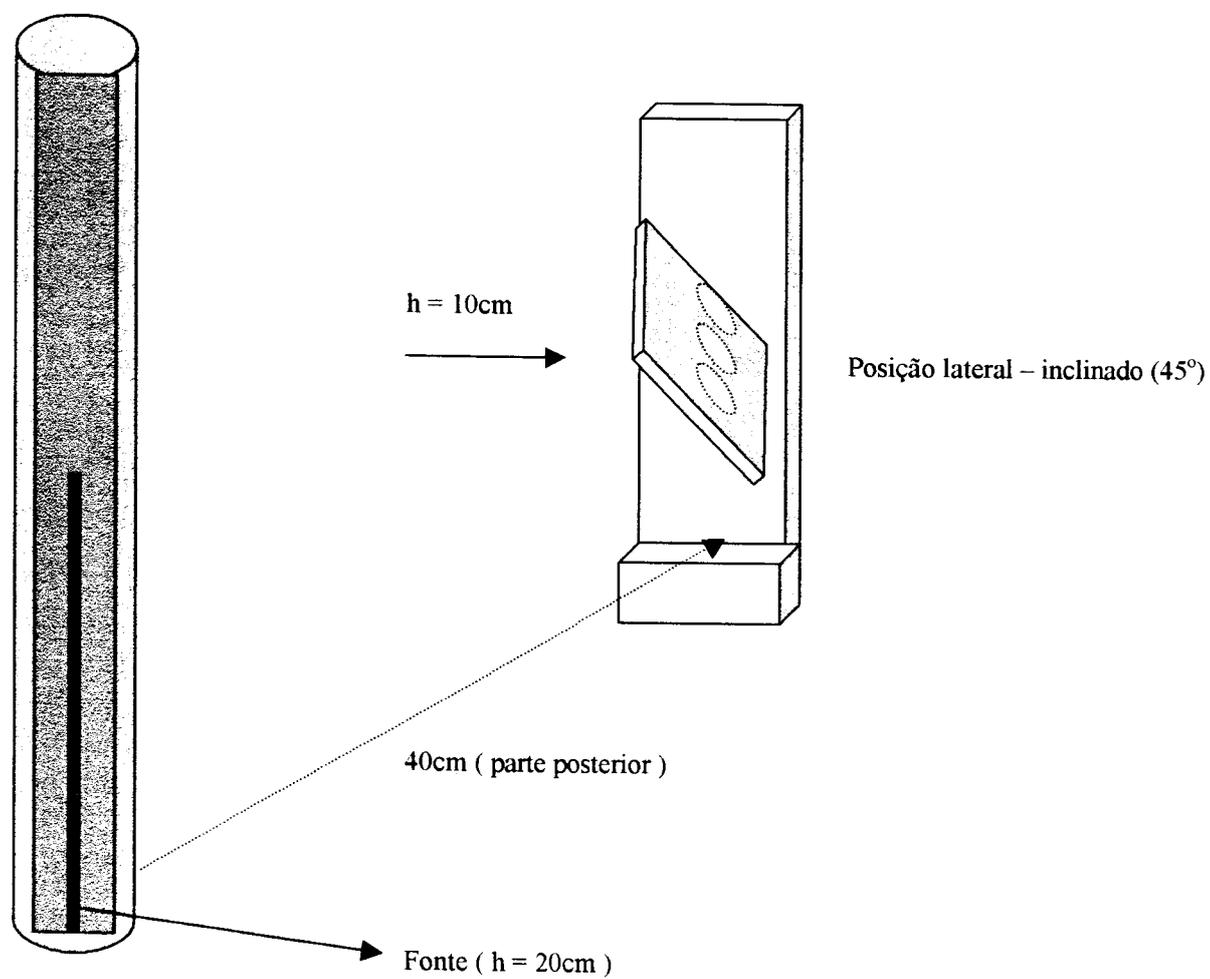


Figura 22 – Dosímetro na posição inclinado (45°) - lateral

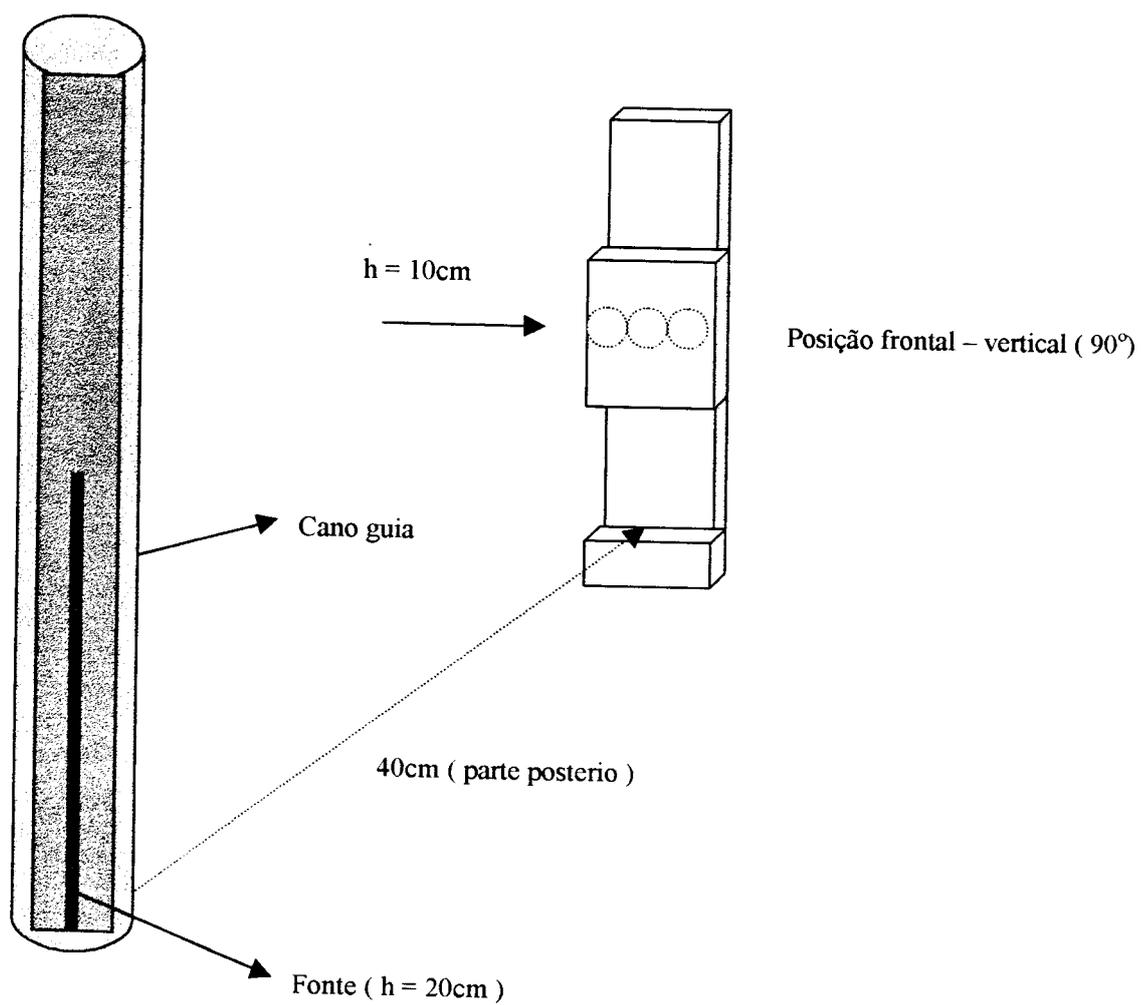
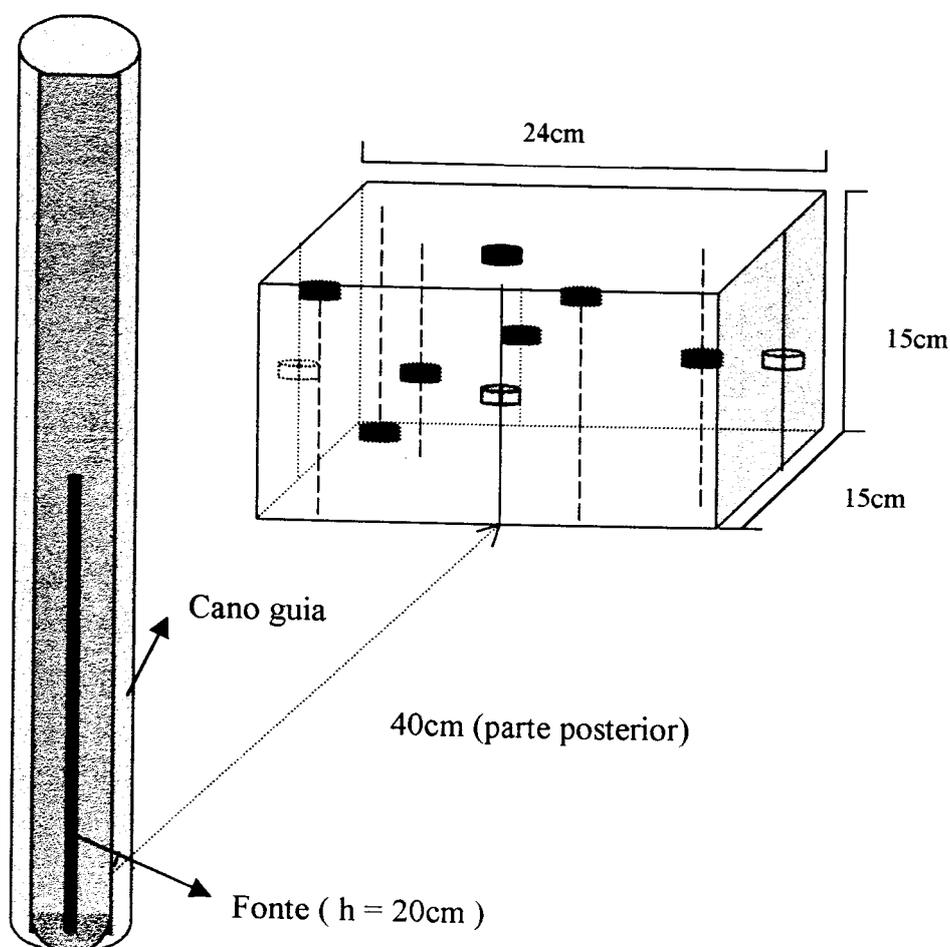


Figura 23 – Dosímetro na posição vertical (90°) - frontal

A acidez de cada uma das soluções testadas foi determinada com a finalidade de se determinar o intervalo de pH onde a absorção óptica é estável.

A reprodutibilidade da resposta foi constatada irradiando-se um determinado lote de pastilhas com a mesma taxa de dose e mesma dose, em dias diferentes.

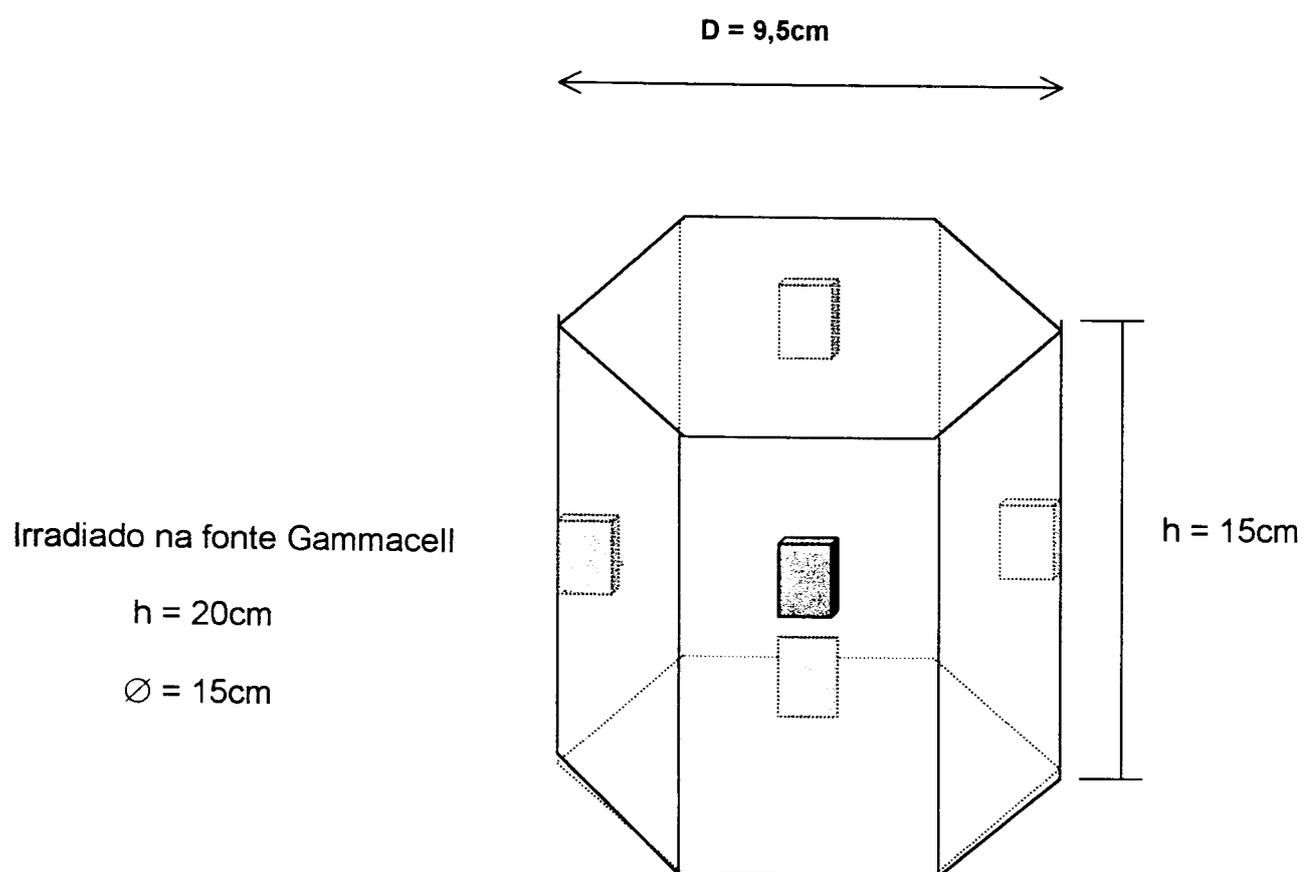
Para observar a distribuição de dose em um embalado, isto é, para determinar os pontos onde a dose no produto é máxima e onde ela é mínima, foram colocadas pastilhas em recipientes contendo um produto fictício distribuído em todo o volume. Após a irradiação desses recipientes, com o auxílio da curva de calibração, determinou-se a dose absorvida em cada pastilha. Estas medidas permitem identificar a localização das doses mínimas e máximas nestes recipientes e constatar a qualidade da irradiação que deve manter-se entre estes dois valores determinados previamente pelo Laboratório de Dosimetria em função da dose requerida pelo "cliente" dono do produto. As **Figuras 24 (a) e (b)** mostram o posicionamento das pastilhas nos recipientes irradiados



LEGENDA

- # 1 Dosímetro posicionado fora da caixa - ~45cm de distância da fonte; 10cm da mesa
- # 2 Dosímetro posicionado fora da caixa - 50cm de distância da fonte ; 10cm da mesa
- # 3 Dosímetro posicionado fora da caixa - 40cm de distância da fonte; 10cm da mesa
- # 4 Dosímetro posicionado fora da caixa - 55cm de distância da fonte ; 10cm da mesa
- # 5 Dosímetro posicionado dentro da caixa - ~55cm de distância da fonte ; 0cm da mesa
- # 6 Dosímetro posicionado dentro da caixa - ~50cm de distância da fonte; 5cm da mesa
- # 7 Dosímetro posicionado dentro da caixa - ~40cm de distância da fonte ; 13cm da mesa
- # 8 Dosímetro posicionado dentro da caixa - ~40cm de distância da fonte; 15cm da mesa
- # 9 Dosímetro posicionado dentro da caixa - ~40cm de distância da fonte; 15cm da mesa
- # 10 Dosímetro posicionado fora da caixa - ~40cm de distância da fonte; 15cm da mesa

Figura 24 (a) – Material irradiado na fonte Panorâmica



-  #1 Dose = 21,3kGy
-  #2 Dose = 21,0kGy
-  #3 Dose = 20,9kGy
-  #4 Dose = 18,8kGy
-  #5 Dose = 17,6kGy

Figura 24 (b) – Material irradiado na fonte Gammacell

4.4.3.5 Leitura dos dosímetros

Para se determinar a absorvância no sistema óptico, cada pastilha deve ser dissolvida em 50mL de água pura, em balão volumétrico de 100mL [7,15];

Adiciona-se 20mL de solução corante*;

Aguarda-se 10 minutos para proceder a leitura para $\lambda = 546\text{nm}$.

*Preparação da solução corante:

Solução A: Dissolve-se 2g de Sulfanilamida p.a em 1L de solução 30% de Ácido acético glacial p.a.

Solução B: Dissolve-se 1g de diidrocloreto de N -(1- Naftil) etilenodiamina p.a em 1L de ^{solução 30% de}Ácido acético glacial p.a.

As soluções A e B devem ser armazenadas em local abrigado da luz e sob temperaturas baixas ($\sim 8^{\circ}\text{C}$), nestas condições podem ser conservadas por até 3 meses.

No momento de preparar as pastilhas para leitura, mistura-se as soluções A e B na proporção de 5:1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Solução de Fricke

A adequação do método, isto é, a utilização de reagentes e água com grau alto de pureza e a eliminação das impurezas da vidraria utilizada, permitiu que se alcançasse a qualidade necessária para se poder calibrar os campos de radiação, bem como validar e calibrar os compostos analisados.

Com o auxílio do programa IDAS, da IAEA, numa primeira etapa do programa de intercomparação realizado em 1996, utilizou-se a solução de Fricke para calibrar uma única posição de irradiação. Esta posição, no sistema panorâmico, situa-se a 40cm da fonte e localiza-se na parte posterior do cano guia, e foi utilizada para a maioria das irradiações deste trabalho. Na segunda etapa do programa de intercomparação, realizado no mês de maio de 1999, foi solicitada a intercomparação de 10 posições de irradiação e que estão apresentadas nas **Tabelas 11 e 12**. Estas posições correspondem às irradiações nas fontes Gammacell e Panorâmica, respectivamente. Deve-se ressaltar no entanto que por motivos de irradiação do material com doses muito próximas do limite de sensibilidade da alanina para serviço de intercomparação do IDAS as medidas serão repetidas e por este motivo nem todas as posições foram confirmadas. Este trabalho está em andamento e os dosímetros serão irradiados com doses mais altas.

Tabela 11 - Fonte Gammacell - Condições de irradiação e doses obtidas com a solução de Fricke e com alanina do programa IDAS.

Condições de irradiação	Dose (kGy)		Erro Relativo (%)
	Solução de Fricke	Alanina /IDAS	
Sem atenuador de Pb	0,327	0,344	-4,9
Com atenuador (4cm)	0,335	*	*

- Em teste.

Tabela 12 - Fonte Panorâmica - Condições de irradiação e doses obtidas com a solução de Fricke e com alanina do programa IDAS.

Posição		Dose (kGy) Solução de Fricke	Dose (kGy) Alanina / IDAS	Erro Relativo(%)
10cm	atrás da fonte	0,438	0,439	-0,2
20cm	" "	0,150	*	
30cm	" "	0,069	*	
40cm	" "	0,141	0,149	-5,0
50cm	" "	0,093	*	
60cm	" "	0,063	*	
20cm	frente da fonte	0,180	*	
40cm	" "	0,169	*	

* Em teste.

5.2 Solução de 2,3,5 Trifenil - 2H - Tetrazólio Cloridrato

A manipulação deste composto revelou que a solução é de fácil preparo e dissolução.

A leitura da absorvância deste reagente dissolvido em água, é instável no intervalo de comprimento de onda entre 325nm e 700nm após a irradiação na fonte gama e não foi observada nenhuma absorção mais intensa neste intervalo.

Ao se mudar o solvente para álcool, mesmo após a irradiação da solução, ocorreu o mesmo problema de instabilidade da leitura, embora o espectro de absorção tenha sido mais definido.

A instabilidade acentuada durante a leitura da absorvância causada provavelmente pela formação de radicais instáveis, influência da luz e da evaporação da solução quando preparada com álcool sugere que se use o composto dissolvido em substrato de algum polímero e usado na forma de filme sólido. Por este motivo, encerrou-se a pesquisa por não ser este o objetivo da investigação.

5.3 Solução com indicador Azul Cresil Brilhante

A solução é de fácil preparo e manipulação e mostrou resposta detectável pelo método da espectrofotometria após a irradiação na fonte gama.

O composto quando dissolvido em água mostrou uma intensificação da absorção óptica entre 530nm e 700nm com um máximo em 630nm. Este pico foi considerado para análise dos parâmetros dosimétricos da solução.

Para a análise da estabilidade da resposta óptica da solução não irradiada foram feitas leituras em tempos diferentes após a preparação. Observou-se que após 24 horas a intensidade do pico não se modifica. Uma leitura feita após três meses resultou num decréscimo de 10% da resposta inicial. Este resultado permite afirmar que a solução pode ser preparada e usada ao longo de um período aproximado de três meses. O desvio da absorvância deve ser considerado nas leituras antes da irradiação.

A resposta óptica deste composto é reduzida à medida que a dose absorvida aumenta. Portanto ocorre a extinção das espécies químicas que permitem absorver luz no comprimento de onda de 630nm. A **Figura 25** apresenta os espectros de absorção da solução não irradiada e após a irradiação com diferentes doses entre 45Gy e 405,3Gy.

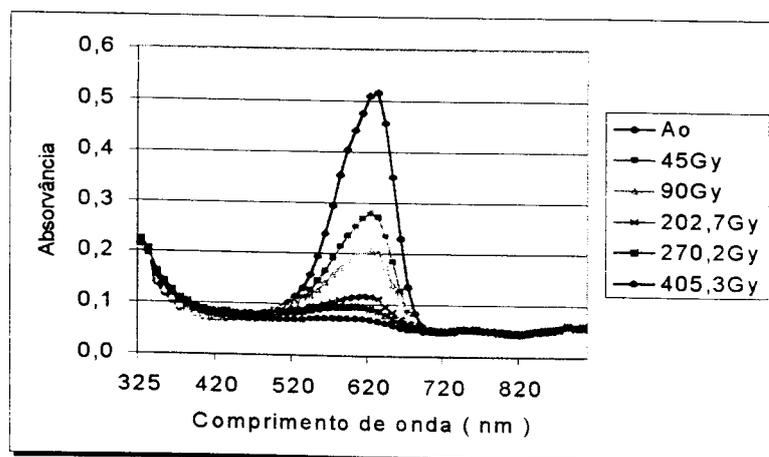


Figura 25 - Espectros de absorção da solução com 0,1%, em massa, do indicador Azul Cresil Brilhante, dissolvido em água, irradiada na fonte Panorâmica.

A **Figura 26** mostra o comportamento da absorção óptica relativa em função da dose absorvida, quando o composto é irradiado na fonte gama.

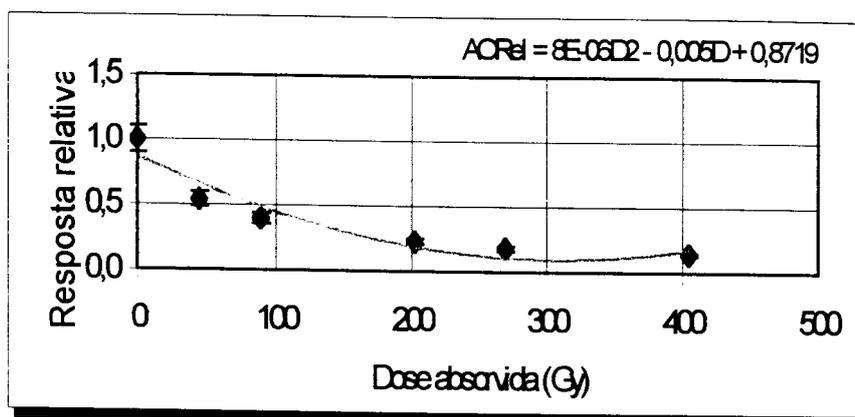


Figura 26 – Absorvância do indicador Azul Cresil Brilhante em função da dose absorvida, após a irradiação na fonte gama.

Observa-se que a resposta não é linear, mas um polinômio de segundo grau como ocorre, por exemplo, com o dicromato de prata [30]. Embora este motivo não desqualifique este soluto como material dosimétrico o intervalo de dose é muito estreito para fins dosimétricos e este parâmetro sugere que se procedam modificações no preparo. O comportamento do composto deve ser mais investigado com a mudança do tipo de solvente, a massa do soluto ou com a sua fixação em uma base de polímero. Por este motivo não se pode usá-lo para fins de dosimetria nesta forma específica de preparo.

5.4 Solução com indicador Verde de Bromocresol

A solução com o indicador Verde de Bromocresol é de fácil preparo em laboratório e não requer cuidados especiais quanto a sua manipulação.

O espectro de absorção óptica da solução não irradiada obtido entre 325nm e 900nm, apresenta uma intensificação na absorção óptica, com dois picos de máxima. O primeiro ocorre no intervalo de comprimentos de onda, característico para cada concentração, entre 450nm e 460nm e o segundo, em 620nm, é igual para todas as concentrações analisadas. Para efeito de análise das propriedades

desta solução é usado o pico mais intenso. Para a concentração de 0,005% em 450nm, para 0,0075% em 450nm e para 0,01% em 460nm.

A **Figura 27** mostra os espectros de absorção da solução nas concentrações 0,005%, 0,0075% e 0,01%, em massa.

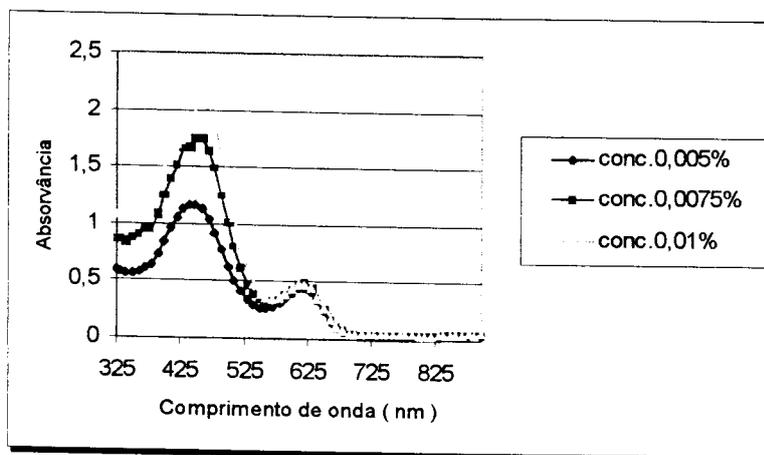
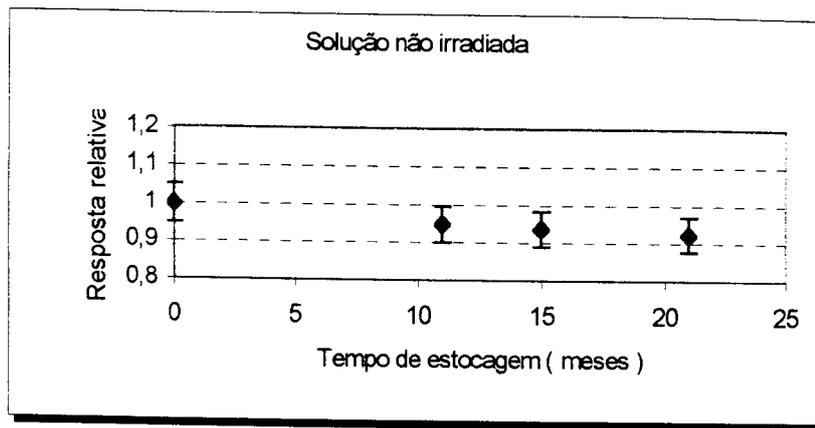


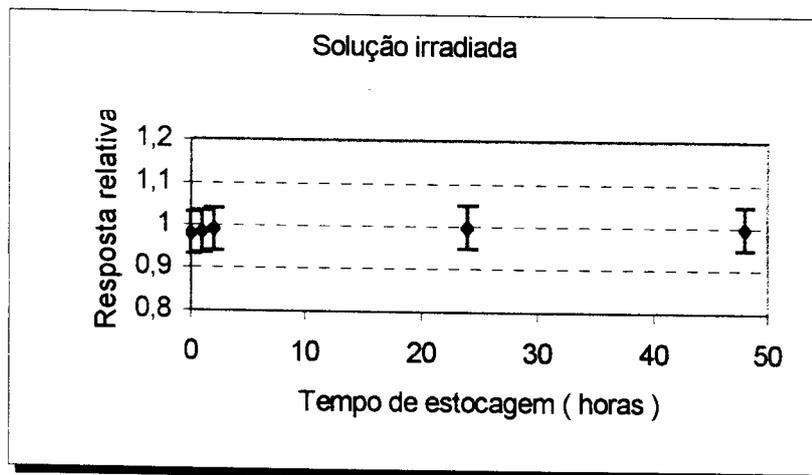
Figura 27 - Espectro de absorção das soluções com indicador Verde de Bromocresol para as concentrações de 0,005%; 0,0075% e 0,01%, em massa.

5.4.1 Determinação da estabilidade da resposta

A estabilidade da absorvância de amostras não irradiadas foi avaliada para tempos diferentes, logo após o preparo da solução. A solução foi estocada em temperatura ambiente durante 21 meses. O mesmo experimento foi feito com a solução irradiada que foi monitorada logo após a irradiação. As **Figuras 28 (a) e (b)** mostram a variação da intensidade óptica da solução com concentração de 0,01%, ao longo do tempo. Comportamento igual foi observado para as três concentrações.



(a)



(b)

Figura 28 - Análise da estabilidade de resposta de soluções com indicador Verde de Bromocresol. **(a)** solução não irradiada estocada por 21 meses; **(b)** solução irradiada na fonte de ^{60}Co com dose de 8kGy e estocada por 48 horas.

Conforme a Figura 28 (a) a intensidade do pico da solução não irradiada foi reduzida em 0,5% em um mês, 6% após um ano, e 7,5% em 21 meses de estocagem. As soluções irradiadas, Figura 28 (b), não acusaram variação do valor da absorção óptica superior a 3 %, em 48 horas. Este tempo de 48 horas é importante para que se possa corrigir o valor da dose no material irradiado caso a leitura seja feita em um intervalo de tempo superior a uma hora após a irradiação.

Este comportamento indica que as soluções podem ficar estocadas antes da irradiação por períodos de tempo longos e que após a irradiação, um intervalo

de 48 horas não causa intensificação da resposta maior que 3%. Isto é conveniente para manipulações em laboratório.

5.4.2 Curva de calibração

A **Figura 29** mostra a extinção gradativa da intensidade da absorção óptica da solução com concentração de 0,0075%, em massa do indicador, após a irradiação na fonte gama, com doses no intervalo de 50Gy a 15kGy. As medidas foram feitas para o comprimento de onda de 450nm. As demais soluções têm comportamento igual proporcional à quantidade do soluto na solução.

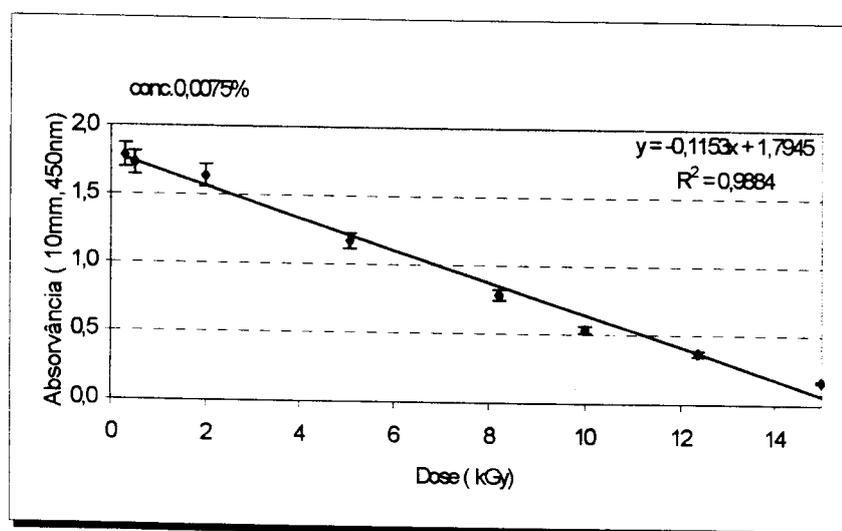


Figura 29 - Curva de calibração da solução com indicador Verde de Bromocresol na concentração de 0,0075%, em massa, irradiada na fonte de ^{60}Co Panorâmica. Cada ponto da curva é o valor médio resultante da absorvância de três amostras por dose.

5.4.3 Determinação da sensibilidade do dosímetro

Para determinar a sensibilidade do dosímetro, foram feitas várias medidas de absorção óptica com a solução não irradiada. Neste caso observou-se que, para irradiações com doses inferiores a 0,3kGy, o indicador não apresenta

sensibilidade suficiente, isto é, a variação na absorção óptica é mínima e não é possível definir o valor da dose absorvida.

À medida que a dose absorvida aumenta, ocorre o desvanecimento da cor; conseqüentemente o valor da absorção óptica decresce. A dose máxima detectável pela solução para as três concentrações é de 15kGy

5.4.4 Determinação da influência das condições ambientais

A luz ambiente natural e a luz fluorescente não modificam a absorvância da solução. Isto foi comprovado deixando a solução exposta à luz ambiente do laboratório durante sete dias.

A solução é considerada estável em temperaturas que variam de $10,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ a $35,0 \pm 2,5^\circ\text{C}$ porque a intensidade do pico, por exemplo, para a solução com 0,0075%, em 450nm, não apresentou nenhuma flutuação no valor da absorvância. O mesmo ocorreu com as soluções cuja concentração do indicador era de 0,005% e 0,01%.

5.4.5 Resposta para diferentes tipos de radiação e energias

A análise do comportamento do dosímetro para diferentes tipos de radiação e com diferentes energias é difícil. Surgem erros quando um dosímetro é calibrado sob condições específicas com respeito à energia da radiação e geometria de irradiação e eles são usados, depois, sob condições que são significativamente diferentes, isto é, quando são irradiados em campos de radiação com diferentes naturezas, geometrias de irradiação e taxas de dose. A dependência energética dos dosímetros pode causar inexatidões nas medidas de dose absorvida em um material de interesse [19]. O dosímetro foi irradiado somente em fontes de ^{60}Co e acelerador de elétrons, pois, nas outras fontes pertencentes ao IPEN que apresentam valores de energia diferentes as atividades são baixas o que demandava um tempo muito longo de irradiação para alcançar a dose necessária. Na ocasião dos experimentos, a taxa de dose no acelerador de elétrons era 500

vezes maior que a da fonte Gammacell e 35.000 vezes maior que na fonte Panorâmica. A fonte Gammacell apresenta taxa de dose 70 vezes maior que a fonte Panorâmica. Por apresentar taxas de dose diferentes a solução foi calibrada para as fontes gama e elétrons separadamente.

5.4.6 Variação da absorção óptica com a taxa de dose

Após a irradiação dos dosímetros em diferentes taxas de dose, verificou-se que não há variação significativa na absorção óptica nas fontes de ^{60}Co utilizadas. Nas duas fontes a variação entre o maior e o menor valor da intensidade da absorção óptica foi inferior a 1%. A **Figura 30** mostra os valores para a fonte Panorâmica, na fonte Gammacell a solução apresentou o mesmo comportamento.

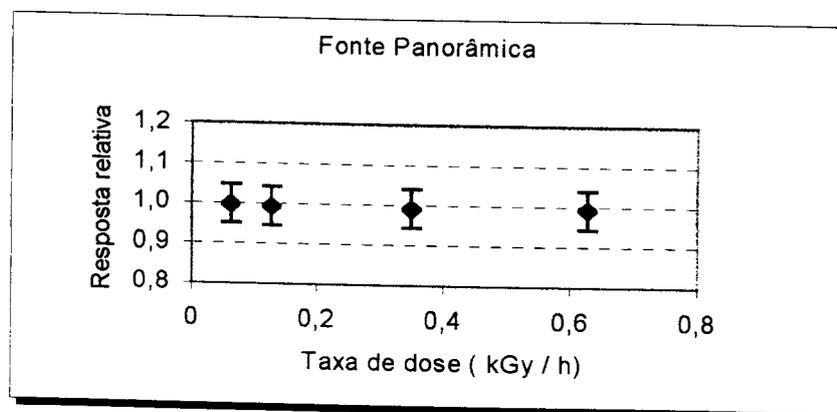


Figura 30 - Variação da absorção óptica da solução com indicador Verde de Bromocresol com a taxa de dose, solução irradiada na fonte Panorâmica.

5.4.7 Determinação da reprodutibilidade de resposta

Para determinar se a resposta do dosímetro é reprodutível, foi usada a solução com concentração de 0,01%, em massa. A irradiação foi feita em três dias diferentes, na fonte Gammacell, adotando a mesma dose.

Observou-se que a variação encontrada nas leituras realizadas nas soluções irradiadas, com as três concentrações, foi inferior a 1%. Os valores obtidos, por exemplo, para a dose de 0,5kGy estão apresentados na **Figura 31**, para as demais doses os resultados são iguais obedecendo a intensidade da absorção óptica individualmente para cada dose. Resultado igual foi obtido para diferentes doses e a mesma taxa de dose.

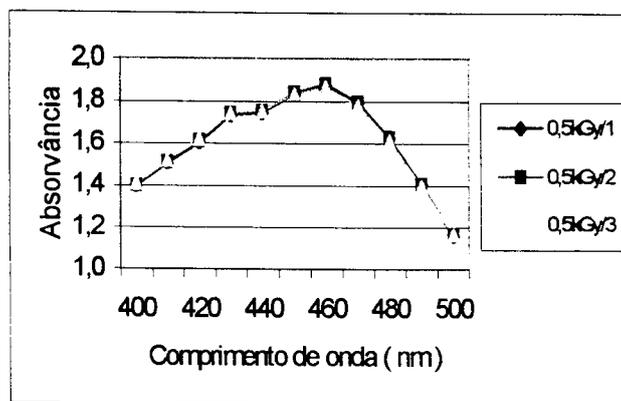


Figura 31 - Reprodutibilidade de resposta da solução de Verde de Bromocresol com concentração de 0,01%, irradiada na fonte Gammacell, em dias diferentes, com dose de 0,5kGy .

5.4.8 Determinação do pH

O pH das soluções irradiadas ou não, está entre 3,8 e 5,0. Sabe-se que o intervalo ótimo de atuação deste indicador é de 3,8 para solução ácida e 5,4 para a alcalina [12].

O pH da solução quando irradiada teve uma mudança semelhante ao da solução quando usada como indicador ácido – básico. Portanto constata-se que nenhuma espécie química nova, foi gerada por causa da irradiação.

5.5 Nitrato de Potássio

As pastilhas são confeccionadas com facilidade e o tempo gasto para prensagem é pequeno. A dissolução das pastilhas para a forma de solução não

requer cuidados especiais. As soluções auxiliares A (sulfanilamida) e B (diidrocloreto de N – (1 Naftil) etilenodiamina), quando armazenadas ao abrigo da luz e sob refrigeração, podem ser utilizadas até três meses após o preparo.

A solução final, que é lida no espectrofotômetro, não apresenta um pico de máxima intensidade bem definido no intervalo de comprimento de onda analisado, entre 500nm e 600nm. Medidas de absorção óptica numa faixa mais restrita, entre 540nm e 560nm, mostram a existência de um patamar na solução não irradiada, e após a irradiação ocorre a intensificação nos valores de absorção óptica e o espectro de absorção óptica apresenta um pico nesta região como pode ser visto na **Figura 32**. Este pico, no comprimento de onda de 546nm, foi considerado em todas as leituras ópticas deste composto.

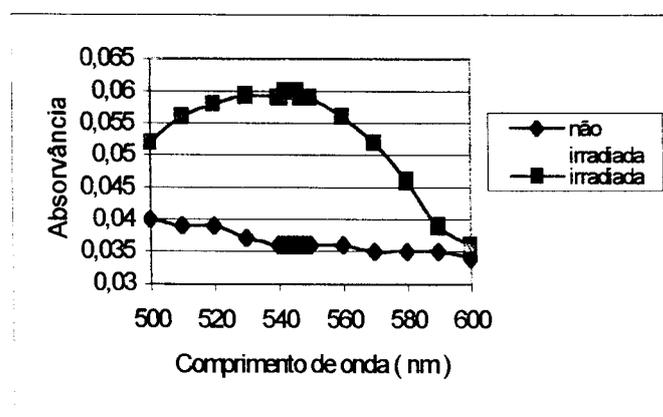


Figura 32 - Espectro de absorção óptica da solução para uma pastilha de Nitrato de Potássio não irradiada e irradiada com 5kGy na fonte Gammacell.

5.5.1 Determinação da estabilidade de resposta

Para determinar a estabilidade de resposta, foram prensadas pastilhas de Nitrato de Potássio e a partir destas, sem irradiá-las, foram preparadas as soluções que foram analisadas nas condições seguintes:

1 - A solução foi preparada e lida no mesmo dia do preparo. Esta condição foi repetida durante vários dias. Os valores de absorção óptica obtidos são mostrados na **Figura 33**;

2 - A solução foi preparada e lida, no mesmo dia do preparo e em dias subsequentes. A **Figura 34** mostra os valores obtidos nas medidas ópticas.

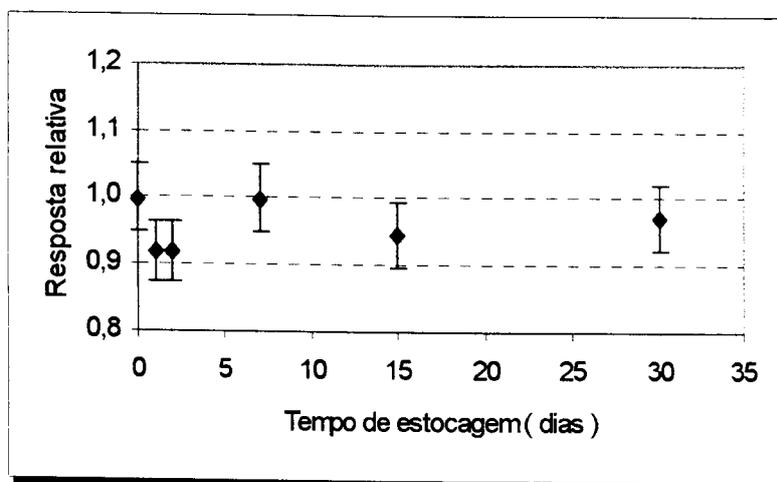


Figura 33 -Soluções preparadas em diferentes dias, a partir de pastilhas de Nitrato de Potássio, e lidas no mesmo dia da preparação.

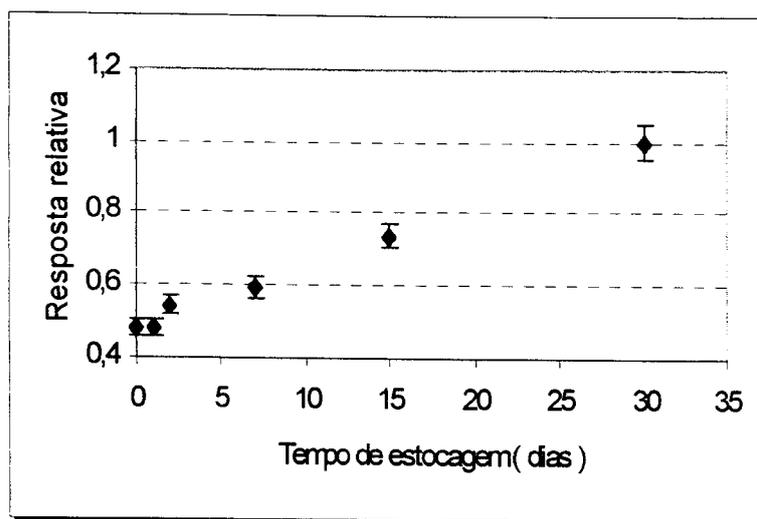


Figura 34 - Solução preparada em um dia a partir de pastilha de Nitrato de Potássio e lida no mesmo dia da preparação e dias subsequentes.

Nas pastilhas irradiadas o comportamento é semelhante como pode ser visto na **Figura 35**.

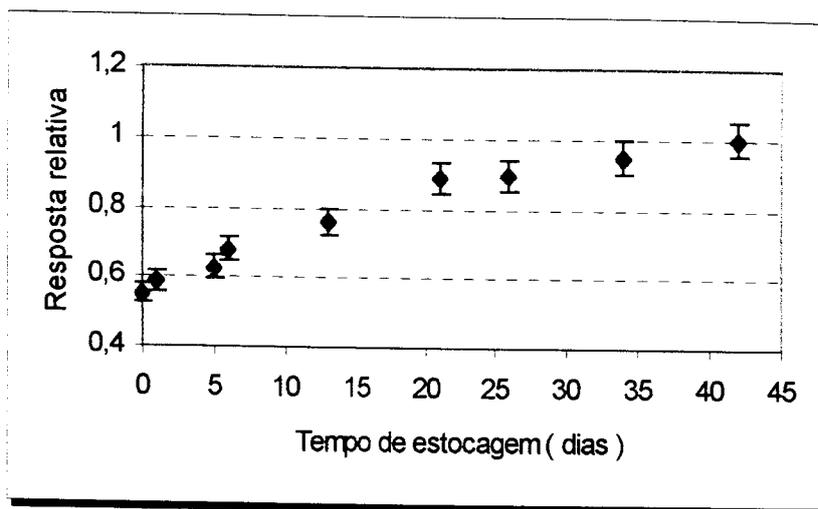


Figura 35 – Pastilhas de Nitrato de Potássio irradiadas na fonte Gammacell com dose de 1kGy, solução preparada e lida no mesmo dia da dissolução e em dias subsequentes.

Observa-se na **Figura 33** que a absorção óptica não mostrou variação acima de 8%. Isto significa que tomados os cuidados necessários de modo a minimizar os fatores de influência nas medidas a resposta é reprodutível.

Quanto aos resultados obtidos e apresentados nas **Figuras 34 e 35**, para soluções resultantes da dissolução de pastilhas de Nitrato de Potássio, lidas no mesmo dia e em dias subsequentes após a armazenagem das mesmas, observa-se uma intensificação da resposta óptica. Em 30 dias a intensidade da absorção óptica, para a mesma solução, chega a ser o dobro da intensidade inicial. Este fato sugere modificações químicas do complexo formado durante a dissolução e que a leitura dessa solução não deve demorar mais que um dia após o preparo.

5.5.2 Determinação da variação da absorção óptica com a massa da pastilha

Para determinar a variação da absorção óptica com relação à quantidade de pó de Nitrato de Potássio para formar uma pastilha, foram irradiadas pastilhas com 50, 75 e 100mg, na fonte Gammacell com doses de 10, 30 e 50kGy. A absorção óptica mostra uma intensificação com o aumento da massa. Como os três tipos de pastilhas têm comportamento semelhante o ideal é utilizar pastilhas

com massa menor, por razões de custo. A **Figura 36** mostra ^{os resultados} ~~os resultados~~ obtidas após a irradiação com 10kGy. Para as demais doses o comportamento é semelhante.

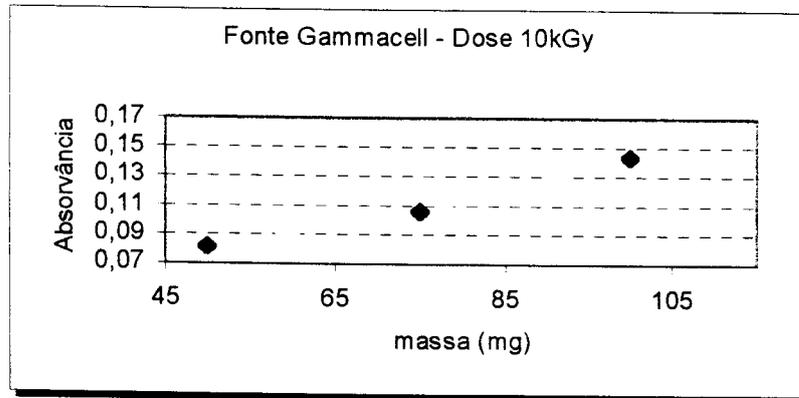


Figura 36 – Variação da absorção óptica para soluções preparadas a partir de pastilhas com diferentes massas que foram irradiadas com 10kGy, na fonte gama.

5.5.3 Determinação da variação da absorção óptica com a taxa de dose

Pode-se observar que, nas irradiações efetuadas na fonte Panorâmica, a resposta é intensificada quando a amostra é posicionada a distância de 10cm da fonte. Esta intensificação ocorre por se tratar de uma posição muito próxima à fonte onde a geometria da radiação pode influenciar a resposta do dosímetro.

A **Figura 37** mostra os valores obtidos nesta irradiação.

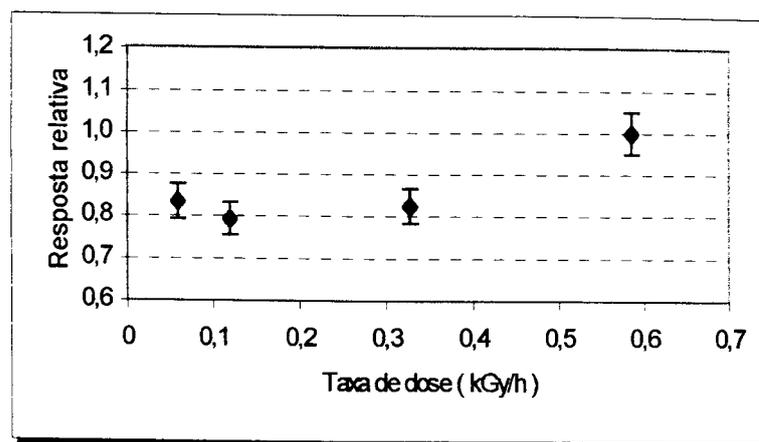


Figura 37 - Variação da absorção óptica de soluções preparadas a partir de pastilhas de Nitrato de Potássio irradiadas com taxas de dose diferentes, na fonte de ^{60}Co Panorâmica.

Nas irradiações realizadas na fonte Gammacell com as taxas de dose 7,65kGy/h (sem atenuador) e 3,82 , 2,295 e 0,765kGy/h (com atenuadores), a resposta independe da taxa de dose.

5.5.4 Determinação do limite inferior de dose

O valor de dose mínima detectável é limitado pela resposta de absorção óptica da solução não irradiada. A análise de várias soluções com Nitrato de Potássio não irradiado determinou que a dose mínima detectável corresponde a 1kGy.

5.5.5 Determinação da curva de calibração

As pastilhas com 50mg, foram irradiadas com a mesma taxa de dose num intervalo de doses entre 1 e 150kGy. Para esta finalidade foi usada a fonte Gammacell que permitiu acelerar o estudo porque o tempo de irradiação é menor. Cada ponto da curva é resultante de três medidas (três amostras por dose). A **Figura 38** mostra esta curva.

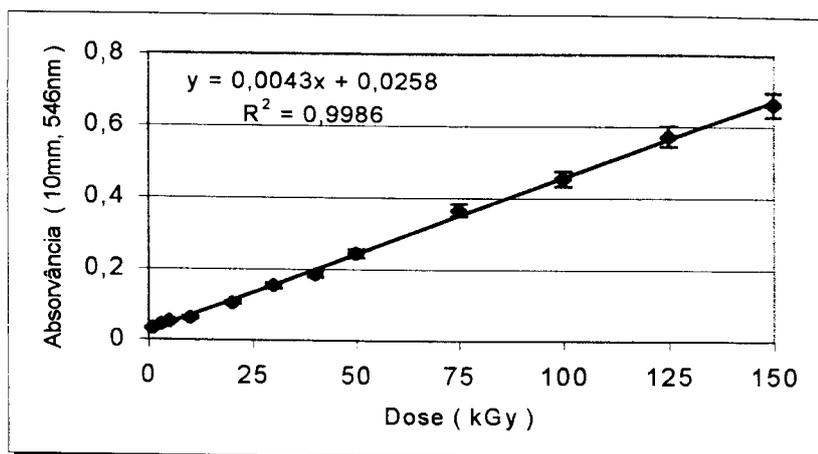


Figura 38 - Curva de calibração do Nitrato de Potássio. Para pastilhas com 50mg, irradiadas com raios gama do ^{60}Co . A leitura foi feita em $\lambda = 546\text{nm}$.

5.5.6 Determinação da dependência da resposta com o ângulo de incidência da radiação

As pastilhas de Nitrato de Potássio não apresentaram dependência da resposta óptica com o ângulo de incidência da radiação gama, quando na posição lateral. Posicionadas de frente, apresentaram uma variação de 2,5% na intensidade óptica quando colocadas na vertical (90°) e na horizontal (0°). Estas posições estão nas Figuras 20 a 23 mostradas anteriormente.

5.5.7 Determinação do comportamento do dosímetro em diferentes campos de radiação

A **Figura 39** mostra curvas de absorção óptica, entre 500nm e 600nm, após a irradiação de pastilhas de 50mg, com raios gama e elétrons. A energia dos elétrons acelerados foi fixada em 1,25MeV.

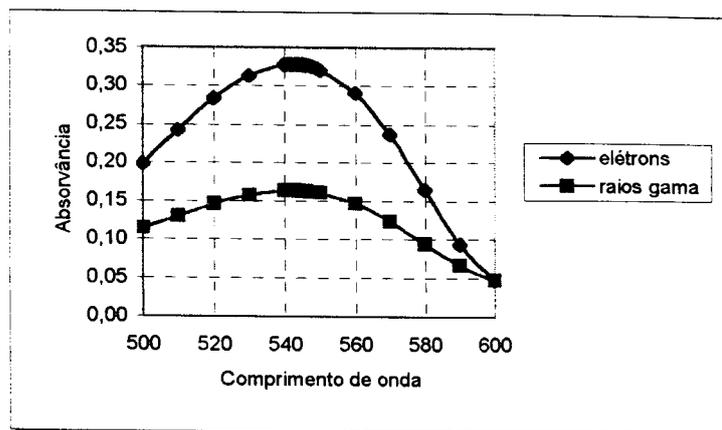


Figura 39 - Pastilhas de Nitrato de Potássio, com 50mg, irradiadas com elétrons acelerados com energias de 1,25MeV e raios gama nas fontes Gammacell.

Pode-se observar que na posição de 546nm, a absorvância é mais intensa para a irradiação com elétrons que para gamas por causa da taxa de dose. No acelerador a taxa de dose neste caso foi de 67,4kGy/s e na fonte gama $2,2 \times 10^{-3}$ kGy/s. Neste caso o material apresentou uma dependência com a taxa de dose que elevou a absorvância de um fator dois, enquanto a taxa de dose dos elétrons é 35.000 vezes maior que a taxa para a radiação gama do ^{60}Co .

5.5.8 Determinação da reprodutibilidade de resposta do dosímetro

A reprodutibilidade da resposta foi constatada em todo intervalo de dose de utilização, para esta determinação foram realizadas irradiações com a mesma dose e taxa de dose em um determinado lote de pastilhas.

5.5.9 Determinação da influência das condições ambientais na resposta do dosímetro

O manuseio das pastilhas deve ser feito em ambiente com umidade abaixo de 60% porque este composto é higroscópico. Esta prática evita problemas de perda de material no processo de dissolução e análise. As diferenças na temperatura ambiente, entre 10°C e 35°C não influenciaram na resposta do dosímetro.

5.5.10 Determinação do pH nas soluções preparadas a partir das pastilhas

As medidas de pH foram realizadas em soluções irradiadas e não irradiadas e em concentrações diferentes. Não foi observada variação do pH, que se manteve entre 2,1 e 2,2. Se este intervalo de pH se mantém o mesmo antes e após a irradiação isto quer dizer que ocorrem apenas as reações típicas para o Nitrato de Potássio causadas pela irradiação.

5.5.11 Teste para determinação da dose em condições de irradiação de rotina

Na prática não se pode garantir que durante a irradiação de um produto todo o seu volume receba uma dose uniforme. Os limites de dose para o processo variam, dependendo de um mínimo, D_{\min} , necessário para alcançar as especificações e que não exceda o máximo, D_{\max} , que pode causar danos ao produto ou ao seu invólucro. Somente os cálculos e a simples relação entre ambas doses, não são suficientes para atestar a qualidade da irradiação. São necessários testes com materiais dosimétricos para documentar o procedimento.

Como as fontes gama do TE são usadas para irradiação de volumes de materiais maiores que 100mL e por vezes até 5000mL, foi feito um teste para observar a distribuição de dose no produto. Deve-se ressaltar que esta prática só é considerada como industrial por causa das doses altas, mas não pelo método que normalmente esse tipo de instalações aplicam na irradiação de produtos industrializados ou insumos.

Para averiguar a utilização do Nitrato de Potássio em uma irradiação rotineira foi usado um volume que simulou esta prática (caixa de papelão). A irradiação foi feita nas duas fontes de cobalto. Os dosímetros foram colocados em diferentes faces do volume e no seu interior. Os resultados obtidos para cada conjunto de três pastilhas, por ponto, mostram os locais onde ocorrem as doses mínimas e máximas nos volumes considerados.

Os valores de dose obtidos encontram-se na **Tabela 13**. Na **Figura 24 (a)**, pode ser visto o posicionamento das pastilhas no produto irradiado.

Tabela 13 - Distribuição de dose em um material embalado e irradiado na fonte Panorâmica.

Posição	Dose (kGy)	
1	7,36	
2	7,07	
3	11,43	$D_{\text{máx}}$
4	6,20	
5	5,62	$D_{\text{mín}}$
6	7,07	
7	8,82	
8	6,78	
9	10,56	
10	9,98	

Em instalações industriais primeiro se faz um levantamento das doses na caixa que vai portar os produtos a serem irradiados e depois se processa o material junto com os dosímetros para garantir que a dose pré-estabelecida foi aplicada aos produtos.

5.5.12 Determinação da influência das dimensões da pastilha na resposta

Para verificar se o formato das pastilhas tem influência na resposta do dosímetro foram preparadas pastilhas com a mesma massa e diferentes diâmetros. A irradiação dos dois tipos de pastilhas resultou que o diâmetro da pastilha não influencia na resposta do dosímetro.

6 CONCLUSÕES

6.1 Solução de Fricke

A solução de Fricke preparada com água ultra-pura e reagentes p.a. adquiridos no mercado nacional, mostrou ser adequada para a determinação da taxa de dose nas fontes de ^{60}Co . Os valores da taxa de dose determinados com esta solução foram certificados pelo programa IDAS e os erros calculados são inferiores a 5% o que é considerado satisfatório pela IAEA.

6.2 Solução de 2,3,5 Trifenil-2H-Tetrazólio Cloridrato

O composto não apresentou qualidade dosimétrica adequada nas condições analisadas. O composto deve ser mais explorado em função dos fatores de redução do tetrazólio para o composto formazam ou ainda a sua fixação em matriz sólida de um composto orgânico como um polímero, o que não foi objetivo desta pesquisa.

6.3 Solução de Cloreto de Aminodietilaminometildifenazônio (Azul Cresil Brilhante)

Este composto não é adequado à dosimetria das radiações em uma escala industrial, porque o intervalo de doses no qual é possível detectar a resposta óptica em função da dose é muito reduzido, entre 45Gy e 450Gy. Este indicador pode ser explorado para outros tipos de solventes e a sua fixação em matriz sólida de um composto orgânico como um polímero, o que não foi objetivo desta pesquisa.

6.4 Solução de 3,3',5,5'Tetrabromo-m-cresolsulfonoftaleína (Verde de Bromocresol)

O composto apresenta características que o qualificam para aplicação em dosimetria das radiações. O intervalo útil de dose encontra-se entre 0,3kGy e 15kGy, embora as leituras da absorvância possam ser detectadas a partir de 0,05kGy. O comprimento de onda onde a leitura óptica da absorção é máxima esta entre 450nm e 460nm dependendo da concentração.

A estabilidade da resposta óptica da solução não irradiada mostrou um decréscimo na absorvância de aproximadamente 0,5% em 30 dias, 6% em um ano e 7,5% após 21 meses. Este comportamento faculta que a solução seja preparada e usada quando necessário. A estabilidade da solução após a irradiação mostrou ser estável dentro das 48 horas subsequentes.

As condições ambientais como luz e temperatura entre 10°C e 35°C não têm influência nas características ópticas do composto. Isto é importante para efeito da manipulação do material dosimétrico antes e após a irradiação.

Não foi observada dependência com a taxa de dose nas fontes gama instaladas no TE.

O valor do pH não foi modificado por causa da radiação e isto significa que nenhum outro tipo de radical é formado além do processo de captura ou liberação de hidrogênio.

A reprodutibilidade da resposta óptica da solução é adequada para fins de dosimetria. Observou-se uma diferença de aproximadamente 1% para doses baixas, 0,5kGy, e para doses mais próximas do limite superior.

6.5 Nitrato de Potássio

As pastilhas de Nitrato de Potássio revelaram ser um dosímetro eficaz no controle de qualidade das irradiações rotineiras, suas características o qualificam para aplicações em dosimetria das radiações.

Apesar de ser um material controlado pelo Exército não se encontrou dificuldades na sua aquisição, é necessário apenas uma licença que o próprio Exército concede.

Este dosímetro apresenta baixo custo de fabricação e elimina os inconvenientes causados pela importação, muitas vezes os embaraços causados pela alfândega inviabilizam a utilização do material importado, o prazo de validade pode expirar até a liberação ou serem armazenados em locais inadequados sem os cuidados necessários que estes produtos exigem.

O intervalo útil de dose encontra-se entre 1kGy e 150kGy nas fontes gama e a resposta óptica é linear. O comprimento de onda onde a leitura óptica da absorção é máxima é de 546nm.

O Nitrato de Potássio pode ser usado na forma sólida, pastilhas, e processado para medidas ópticas na forma de solução. Embora a intensidade da absorvância seja mais alta para massas do composto mais elevadas, 75mg ou 100mg, por questões de custo sugere-se a prensagem de pastilhas com 50mg.

A forma geométrica das pastilhas, seja com diâmetro de 6mm ou 3mm, não apresenta influência no valor da resposta óptica antes e após a irradiação. A forma geométrica pode apenas facilitar o uso nos diversos tipos de materiais com forma geométrica e volume diferentes, que são irradiados nas dependências do TE.

O composto não apresenta dependência com o ângulo de incidência da radiação.

Deve ser mantido em invólucro selado por ser higroscópico e por este motivo deve ser manipulado antes da irradiação em ambiente cuja umidade relativa do ar esteja abaixo de 60%. Outras condições ambientais como luz e temperatura não têm influência na resposta do composto. A reprodutibilidade da resposta óptica é adequada à dosimetria das radiações em todo o intervalo útil de dose.

O pH da solução preparada a partir de pastilhas irradiadas mostra que não foram produzidos outros radicais além do nitrito e oxigênio.

As pastilhas irradiadas no acelerador de elétrons apresentaram resposta óptica intensa, mais alta que para a radiação gama por motivos da velocidade de deposição da energia, geometria etc. Este aspecto faz parte de trabalho futuro porque em feixes de elétrons as primeiras experiências mostraram que o Nitrato de Potássio pode também ser usado como material dosimétrico visto que as outras características são semelhantes.

ANEXO 1

Grandezas e unidades em dosimetria das radiações [17,23]

1 – EXPOSIÇÃO E TAXA DE EXPOSIÇÃO

A exposição X é a grandeza que descreve a capacidade dos raios X e da radiação gama de ionizar o ar, que é definida como a carga total, dQ , dos íons de mesmo sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados por fótons no ar de massa, dm , são completamente parados nesse ar.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad C \text{ kg}^{-1} \quad (1)$$

Também esta grandeza é avaliada como a média sobre uma massa finita de ar, de modo que é a carga por unidade de massa de ar. A unidade de exposição é o *coulomb por quilograma* ($C \text{ kg}^{-1}$). A unidade antiga, *roentgen*, R , foi dada em homenagem ao descobridor dos raios X, Wilhelm Roentgen. Foi convertida para unidades SI como $1R = 2,58 \times 10^{-4} C \text{ kg}^{-1}$

A taxa de exposição, \dot{X} , é dada por:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad C \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

2 - COEFICIENTE DE ABSORÇÃO

2.1 Coeficiente de transferência de energia de massa, μ_{tr}/ρ , de um material é o quociente de dE_{tr}/EN por ρdl , onde E é a energia de cada partícula (excluindo a energia de repouso), N é o número de partículas e dE_{tr}/EN é a fração da energia das partículas incidentes que é transferida à energia cinética

das partículas com carga por interações atravessando uma distância dl num material de densidade ρ .

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \frac{dE_{tr}}{dl} \quad m^2 kg^{-1} \quad (3)$$

2.2 Coeficiente de absorção de energia de massa, μ_{en}/ρ , de um material para partículas sem carga é o produto do coeficiente de transferência de energia de massa μ_{tr}/ρ e $(1-g)$ onde g é a fração da energia das partículas carregadas secundárias que é perdida em bremsstrahlung no material:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1-g) \quad m^2 kg^{-1} \quad (4)$$

A conversão da dose absorvida no ar por exemplo, para a dose absorvida na água, D_a , é dada por:

$$D_a(Gy) = D_{ar}(Gy) \frac{(\mu_{en}/\rho)_a}{(\mu_{en}/\rho)_{ar}} \quad (5)$$

Onde $(\mu_{en}/\rho)_a$ e $(\mu_{en}/\rho)_{ar}$ são os coeficientes de absorção da energia da radiação gama na água e no ar respectivamente.

Caso se deseje calcular a dose absorvida no material irradiado, m , em função da dose encontrada para o dosímetro usado, d , (seja água ou algum outro composto) pode-se adaptar a equação (8) e escrever:

$$D_m(Gy) = D_d(Gy) \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_d} \quad (6)$$

Para a radiação gama do ^{60}Co , o valor de (μ_{en}/ρ) para o ar, é de 0,0268 e para a água é de 0,0295.

3 - PODER DE FREAMENTO TOTAL DE MASSA, S/ρ , de um material para partículas carregadas é o quociente de dE por ρ/dl onde dE é a energia

perdida por uma partícula carregada atravessando uma distância dl num material de densidade ρ .

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad J m^2 kg^{-1} \quad (7)$$

Quando as interações nucleares podem ser desprezadas:

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{col} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{rad} \quad (8)$$

onde $(dE/dl)_{col} = S_{col}$ é o poder de freamento de colisão linear e $(dE/dl)_{rad} = S_{rad}$ é o poder de freamento radioativo linear.

4 - ALCANCE DOS ELÉTRONS

Quando os elétrons penetram perpendicularmente no material sob irradiação, ocorre a distribuição da dose ao longo da espessura deste material. Se E_0 é a energia inicial dos elétrons, que é dissipada ao longo do percurso até ser reduzida a zero, o alcance, R_0 , é dado por:

$$R_0 = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(S/\rho)_{tot}} \quad kg m^{-2} \quad (9)$$

O alcance prático, R_p , pode ser medido em curvas experimentais. O cálculo teórico desta medida pode ser feito através de programa de computador, chamado EDMULT, e pelas equações formuladas por Seltzer. Este mesmo autor, que dá acessoria para a Radiation Dynamics Inc., fabricante dos aceleradores instalados no TE/IPEN, desenvolveu as equações para cálculo de dose para os parâmetros da máquina, sem que seja necessário usar o calorímetro [27].

5 - ATIVIDADE E DECAIMENTO DOS RADIONUCLÍDEOS

A atividade, A , e a constante de decaimento, λ , são também muito importantes quando se opera com fontes emissoras de radiação gama. Estas duas quantidades são úteis quando se deseja conhecer o valor da atividade em

cada tempo desejado. A atividade é definida como o quociente de dN por dt onde dN é o número de transformações nucleares que ocorrem no tempo dt .

$$A = dN/dt \quad \text{s}^{-1} \quad (10)$$

O nome especial da unidade é bequerel, Bq, em homenagem a Henri Bequerel descobridor da radioatividade e o nome antigo é curie, Ci, dado em homenagem ao casal Marie Sklodowska Curie e Pierre Curie. A relação entre estas duas unidades é: $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$.

A constante de decaimento, λ , de um elemento radiativo em um estado particular de energia é definida como o quociente de dP por dt onde dP é a probabilidade de que um determinado núcleo sofra uma transformação nuclear daquele estado de energia num intervalo de tempo dt :

$$\lambda = \frac{dP}{dt} \quad \text{s}^{-1} \quad (11)$$

Esta constante é a determinação da perda exponencial de atividade do elemento radiativo ao longo do tempo:

$$A/A_0 = e^{-\lambda t} \quad (12)$$

Onde A é a atividade após um tempo t e A_0 a atividade inicial. A quantidade $(\ln 2 / \lambda)$ é denominada meia-vida, $T_{1/2}$:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad (13)$$

Por exemplo, o $T_{1/2}$ para o ^{60}Co é igual a $5,2714 \pm 0,0005$ anos. Um ano quer dizer 365,2422 dias.

ANEXO 2

Ilustrações das fontes de cobalto

A Figura 40 mostra foto da fonte Gammacell 220.

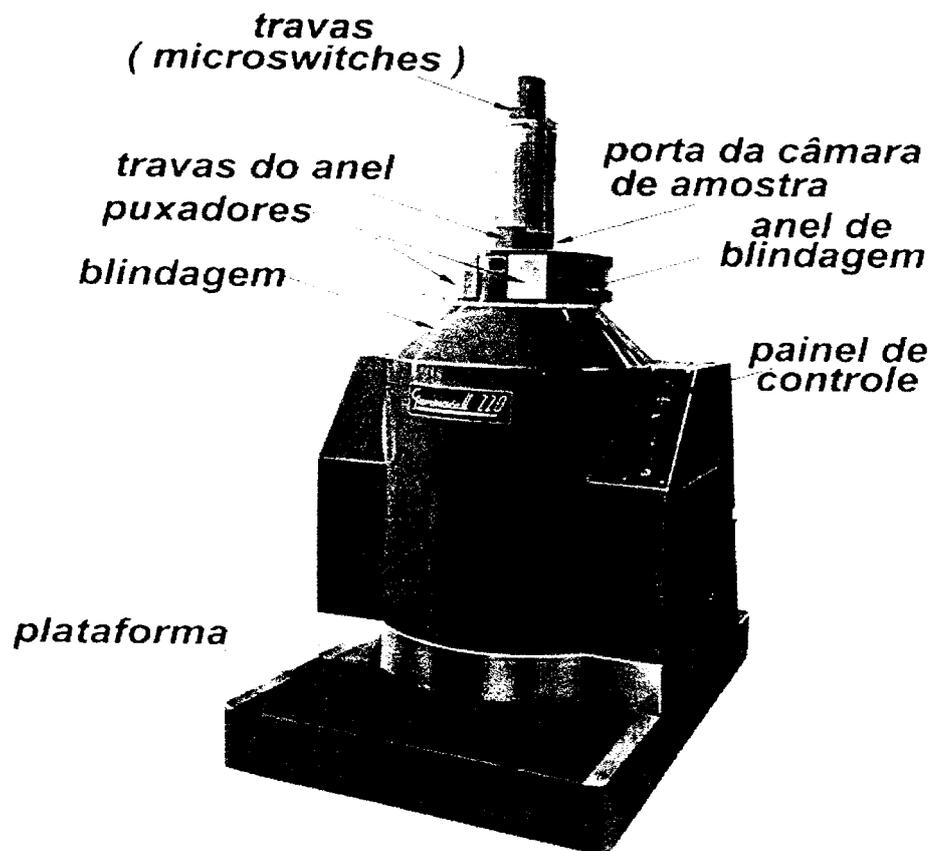


Figura 40 - Fonte de ^{60}Co Gammacell 220

Na **Figura 41**, a câmara de irradiação aparece em destaque, mostrando o local de colocação dos materiais a serem irradiados.

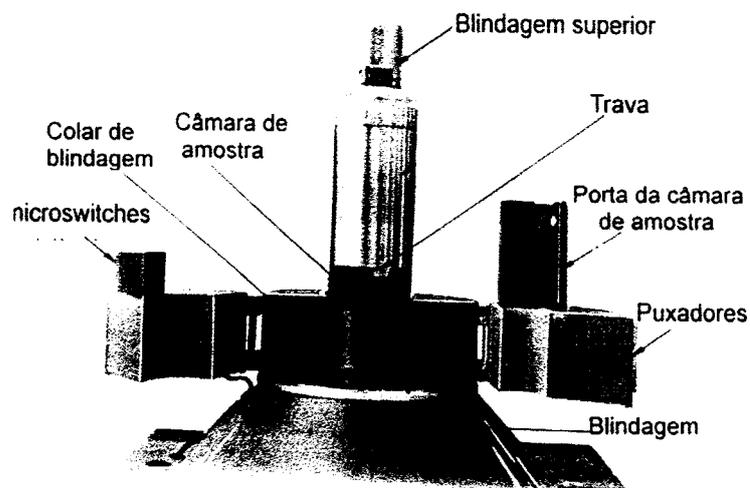


Figura 41 - Destaque da câmara de irradiação .

Na **Figura 42**, é possível verificar o arranjo dos lápis na fonte.

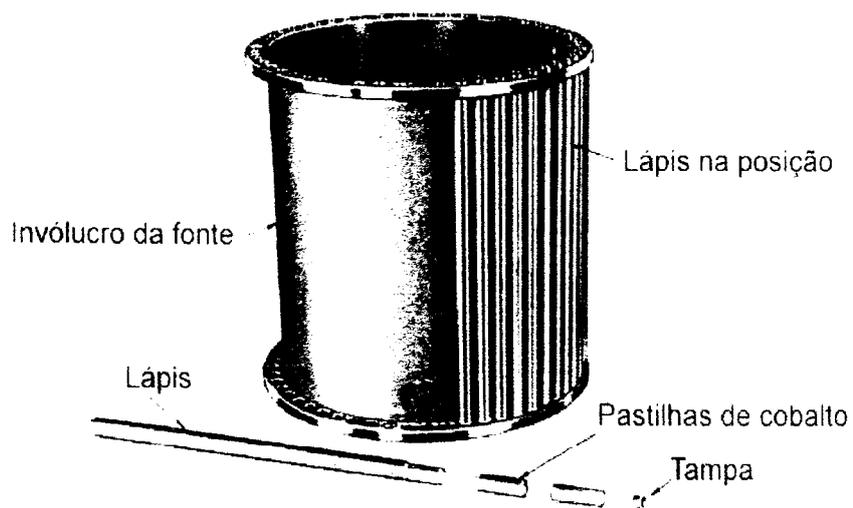


Figura 42 Disposição dos lápis na fonte e lápis com as pastilhas de cobalto

A **Figura 43** mostra os atenuadores de chumbo com 6% de antimônio que são utilizados para reduzir a taxa de dose em aproximadamente 90%, 70% e 50%.

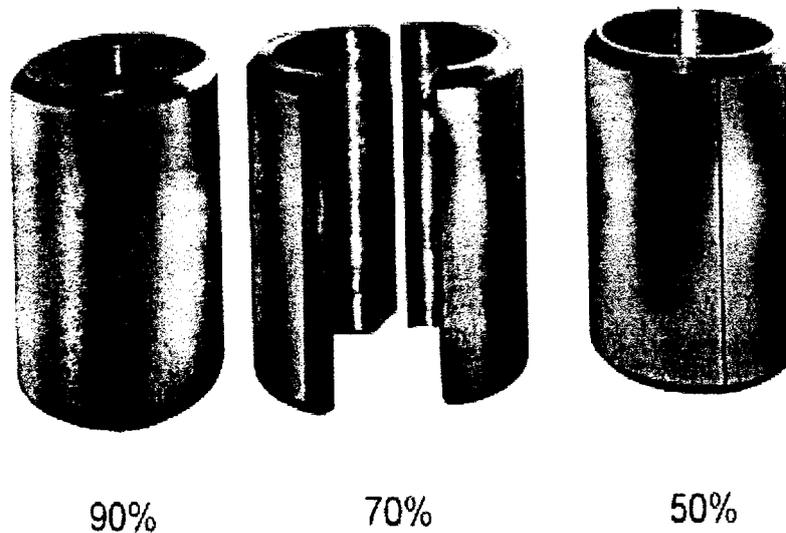


Figura 43 - Atenuadores de chumbo.

A **Figura 44** apresenta uma foto da fonte Panorâmica , destacando-se a blindagem onde é guardada a fonte e a mesa onde são posicionados os materiais a serem irradiados.

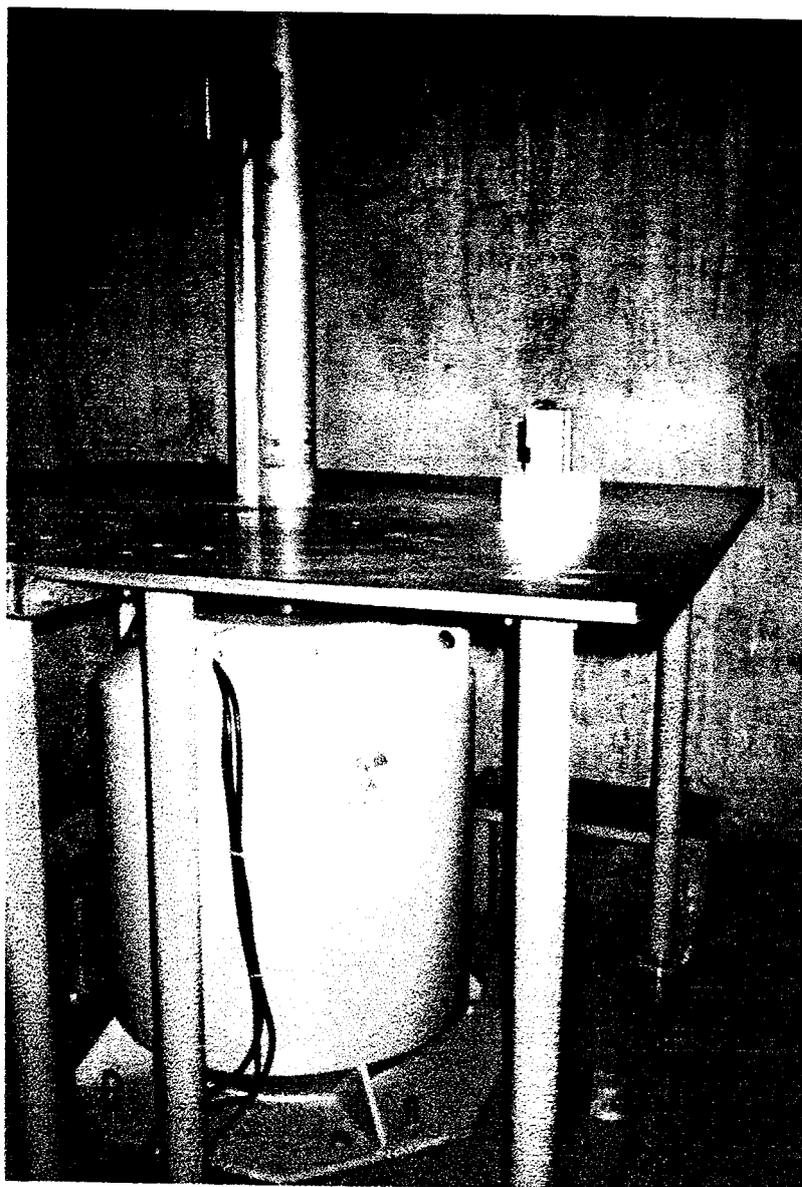


Figura 44 - Fonte de ^{60}Co Panorâmica instalada na Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria do IPEN, TE.

A mesa onde são posicionados os materiais para irradiação pode ser vista na **Figura 45**.

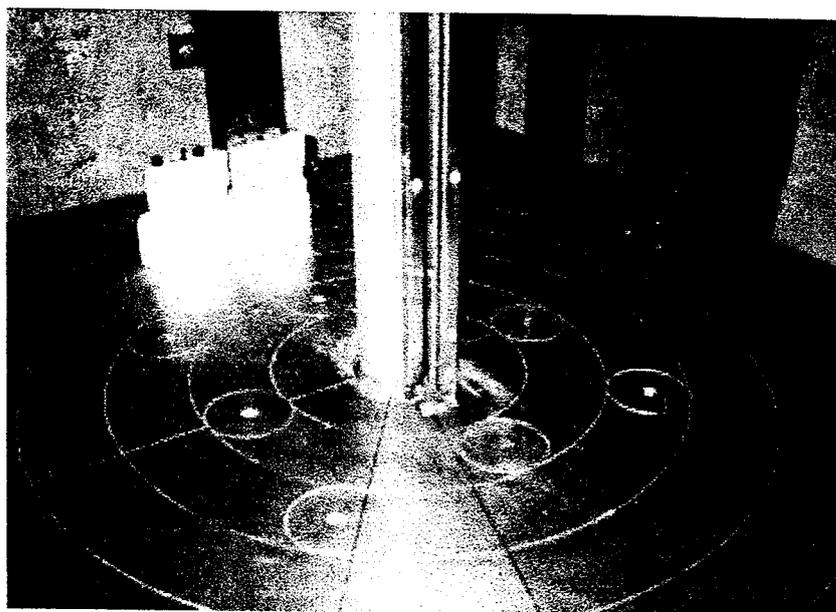


Figura 45 - Mesa para distribuição dos materiais para irradiação, na fonte de ^{60}Co Panorâmica.

ANEXO 3

❖ Acelerador de elétrons

Para irradiar um material no acelerador de elétrons é necessário determinar alguns parâmetros para obter a dose requerida.

- E (MeV) = Energia dos elétrons;
- I (mA) = Corrente do feixe de elétrons;
- L (cm) = Largura da varredura do feixe;
- V (m/min.) = Velocidade de transporte da bandeja onde são posicionados os materiais;
- P = Número de passadas sob o feixe de elétrons;
- D_T (kGy) = Dose absorvida total no material irradiado;
- \dot{D} (kGy/s) = Taxa de dose;
- HVD (μA) = Prefixação de parâmetros da máquina, corresponde à energia E do elétron ou à penetração desejada no material alvo;
- $Scan$ (%) = Prefixação dos parâmetros da máquina, correspondente ao L selecionado, varredura;
- σ (g/cm^2) = Espessura correspondente à penetração desejada no material $\Rightarrow \sigma = x \cdot \rho$, onde x (cm) = espessura do material a ser irradiado e ρ (g/cm^3) = densidade do material a ser irradiado
- τ (s) = Tempo de exposição

Alguns parâmetros podem ser fixados pelo usuário, como a energia dos elétrons e a dose. Os demais são calculados pelas expressões:

$$\text{> } D_T(kGy) = \frac{K}{2} \cdot \frac{I \cdot P}{L \cdot V} \cdot 10$$

$$K = A \cdot \exp^{(B \cdot E)}$$

onde : - para $1,0 < E < 1,5\text{MeV}$ $A = 227$ e $B = - 0,427$
 - para $0,5 < E < 1,03\text{MeV}$ $A = 315$ e $B = - 0,745$

$$\text{> } \dot{D} = \frac{K \cdot I}{3 \cdot L} \cdot 10$$

➤ $Scan = M \cdot L$ (%) onde M é tabelado, **Anexo 3**, e é função da E .

➤ **Limites do acelerador:**

A) Incondicionais:

$I \text{ mín.} = 0,3\text{mA}$ \Leftrightarrow $I \text{ máx.} = 15,0\text{mA}$

$L \text{ mín.} = 60\text{cm}$ \Leftrightarrow $L \text{ máx.} = 112\text{cm}$

$E \text{ mín.} = 0,5\text{MeV}$ \Leftrightarrow $E \text{ máx.} = 1,5\text{MeV}$

B) Condicionais

$$I \text{ (mA)} < 80 \times [E \text{ (MeV)} - 0,5] + 5$$

➤ **HVD e E**

Dependendo da densidade e da espessura do material, há dois critérios de trabalho em função da penetração dos elétrons : quando $0,19 < \sigma < 0,45$ as duas formas de irradiação podem ser aplicadas e a energia E , em função de HVD, é tabelada, **Anexo 3**.

- Quando o elétron atravessa todo o material \Rightarrow $HVD = 25,6 + 187,8 \cdot \sigma$
- Quando σ é maior que o alcance do elétron no material, é necessário irradiá-lo dos dois lados então $\Rightarrow HVD = 19,0 + 79,7\sigma$

A **Figura 46** mostra o acelerador de elétrons JOB 188, que possui uma bandeja móvel onde são posicionados os materiais para irradiação. Esta bandeja é movimentada em sentido “vai e vem”, com velocidades diferentes, fixadas antes da irradiação, e permite irradiar o material com a dose requerida, em função da quantidade de passadas do material sob o feixe de elétrons.

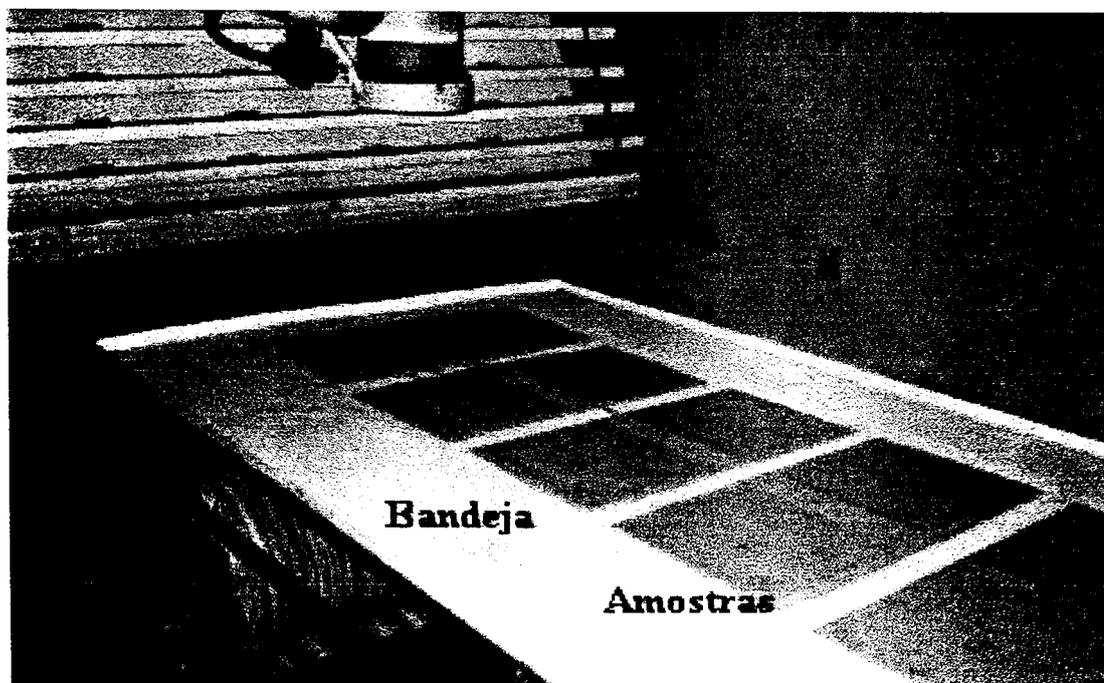


Figura 46 Vista do acelerador de elétrons JOB 188 instalado no TE/IPEN.

ANEXO 3 (continuação)

Fator M em função do feixe (MeV)

E (MeV)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,50	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43
0,60	0,43	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48
0,70	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52	0,53	0,53	0,54
0,80	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,58	0,58	0,58	0,59
0,90	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63	0,63	0,64
1,00	0,64	0,65	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
1,10	0,69	0,70	0,70	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72	0,73	0,74
1,20	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,78	0,78	0,79
1,30	0,79	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,82	0,83	0,83	0,84
1,40	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87	0,88	0,88	0,89
1,50	0,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO 3 (continuação)

Energia do feixe de elétrons (MeV) em função da corrente no divisor de alta tensão (μA)										
HVD (μA)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
12,0	0,194	0,196	0,198	0,199	0,201	0,202	0,204	0,206	0,207	0,209
13,0	0,210	0,212	0,214	0,215	0,217	0,218	0,220	0,222	0,223	0,225
14,0	0,226	0,228	0,230	0,231	0,233	0,234	0,236	0,238	0,239	0,241
15,0	0,242	0,244	0,246	0,247	0,249	0,250	0,252	0,254	0,255	0,257
16,0	0,258	0,260	0,261	0,263	0,265	0,266	0,268	0,269	0,271	0,272
17,0	0,274	0,276	0,277	0,279	0,280	0,282	0,284	0,285	0,287	0,288
18,0	0,290	0,291	0,293	0,294	0,296	0,298	0,299	0,301	0,302	0,304
19,0	0,305	0,307	0,309	0,310	0,312	0,313	0,315	0,316	0,318	0,319
20,0	0,321	0,323	0,324	0,326	0,327	0,329	0,330	0,332	0,333	0,335
21,0	0,336	0,338	0,340	0,341	0,343	0,344	0,346	0,347	0,349	0,350
22,0	0,352	0,353	0,355	0,356	0,358	0,360	0,361	0,363	0,364	0,366
23,0	0,367	0,369	0,370	0,372	0,373	0,375	0,376	0,378	0,379	0,381
24,0	0,383	0,384	0,386	0,387	0,389	0,390	0,392	0,393	0,395	0,396
25,0	0,398	0,399	0,401	0,402	0,404	0,405	0,407	0,408	0,410	0,411
26,0	0,413	0,414	0,416	0,417	0,419	0,420	0,422	0,423	0,425	0,426
27,0	0,428	0,429	0,431	0,432	0,434	0,435	0,437	0,438	0,440	0,441
28,0	0,443	0,444	0,446	0,447	0,449	0,450	0,452	0,453	0,455	0,456
29,0	0,458	0,459	0,461	0,462	0,464	0,465	0,467	0,468	0,470	0,471
30,0	0,473	0,474	0,476	0,477	0,479	0,480	0,482	0,483	0,485	0,486
31,0	0,488	0,489	0,491	0,492	0,493	0,495	0,496	0,498	0,499	0,501
32,0	0,502	0,504	0,505	0,507	0,508	0,510	0,511	0,513	0,514	0,516
33,0	0,517	0,519	0,520	0,521	0,523	0,524	0,526	0,527	0,529	0,530
34,0	0,532	0,533	0,535	0,536	0,538	0,539	0,540	0,542	0,543	0,545
35,0	0,546	0,548	0,549	0,551	0,552	0,554	0,555	0,556	0,558	0,559
36,0	0,561	0,562	0,564	0,565	0,567	0,568	0,569	0,571	0,572	0,574
37,0	0,575	0,577	0,578	0,580	0,581	0,582	0,584	0,585	0,587	0,588
38,0	0,590	0,591	0,592	0,594	0,595	0,597	0,598	0,600	0,601	0,603
39,0	0,604	0,605	0,607	0,608	0,610	0,611	0,613	0,614	0,615	0,617
40,0	0,618	0,620	0,621	0,623	0,624	0,625	0,627	0,628	0,630	0,631
41,0	0,632	0,631	0,635	0,637	0,638	0,640	0,611	0,642	0,644	0,645
42,0	0,647	0,648	0,649	0,651	0,652	0,654	0,655	0,657	0,658	0,659
43,0	0,661	0,662	0,664	0,665	0,666	0,668	0,669	0,671	0,672	0,673
44,0	0,675	0,676	0,678	0,679	0,680	0,682	0,683	0,685	0,686	0,687
45,0	0,689	0,690	0,692	0,693	0,694	0,696	0,697	0,699	0,700	0,701
46,0	0,703	0,704	0,706	0,707	0,708	0,710	0,711	0,713	0,714	0,715
47,0	0,717	0,718	0,720	0,721	0,722	0,724	0,725	0,726	0,728	0,729
48,0	0,731	0,732	0,733	0,735	0,736	0,737	0,739	0,740	0,742	0,743
49,0	0,744	0,746	0,747	0,749	0,750	0,751	0,753	0,754	0,755	0,757
50,0	0,758	0,760	0,761	0,762	0,764	0,765	0,766	0,768	0,769	0,770

51,0	0,772	0,773	0,775	0,776	0,777	0,779	0,780	0,781	0,783	0,784
52,0	0,786	0,787	0,788	0,790	0,791	0,792	0,794	0,795	0,796	0,798
53,0	0,799	0,800	0,802	0,803	0,805	0,806	0,807	0,809	0,810	0,811
54,0	0,813	0,814	0,815	0,817	0,818	0,819	0,821	0,822	0,823	0,825
55,0	0,826	0,828	0,829	0,830	0,832	0,833	0,834	0,836	0,837	0,838
56,0	0,840	0,841	0,842	0,844	0,845	0,846	0,848	0,849	0,850	0,852
57,0	0,853	0,854	0,856	0,857	0,858	0,860	0,861	0,862	0,864	0,865
58,0	0,866	0,868	0,869	0,870	0,872	0,873	0,874	0,876	0,877	0,878
59,0	0,880	0,881	0,882	0,884	0,885	0,886	0,888	0,889	0,890	0,892
60,0	0,893	0,894	0,896	0,897	0,898	0,900	0,901	0,902	0,904	0,905
61,0	0,906	0,908	0,909	0,910	0,912	0,913	0,914	0,916	0,917	0,918
62,0	0,919	0,921	0,922	0,923	0,925	0,926	0,927	0,929	0,930	0,931
63,0	0,933	0,934	0,935	0,937	0,938	0,939	0,941	0,942	0,943	0,944
64,0	0,946	0,947	0,948	0,950	0,951	0,952	0,954	0,955	0,956	0,958
65,0	0,959	0,960	0,961	0,963	0,964	0,965	0,967	0,968	0,969	0,971
66,0	0,972	0,973	0,974	0,976	0,977	0,978	0,980	0,981	0,982	0,984
67,0	0,985	0,986	0,987	0,989	0,990	0,991	0,993	0,994	0,995	0,996
68,0	0,998	0,999	1,000	1,002	1,003	1,004	1,005	1,007	1,008	1,009
69,0	1,011	1,012	1,013	1,014	1,016	1,017	1,018	1,020	1,021	1,022
70,0	1,023	1,025	1,026	1,027	1,029	1,030	1,031	1,032	1,034	1,035
71,0	1,036	1,038	1,039	1,040	1,041	1,043	1,044	1,045	1,047	1,048
72,0	1,049	1,050	1,052	1,053	1,054	1,055	1,057	1,058	1,059	1,061
73,0	1,062	1,063	1,064	1,066	1,067	1,068	1,069	1,071	1,072	1,073
74,0	1,074	1,076	1,077	1,078	1,080	1,081	1,082	1,083	1,085	1,086
75,0	1,087	1,088	1,090	1,091	1,092	1,093	1,095	1,096	1,097	1,098
76,0	1,100	1,101	1,102	1,104	1,105	1,106	1,107	1,109	1,110	1,111
77,0	1,112	1,114	1,115	1,116	1,117	1,119	1,120	1,121	1,122	1,124
78,0	1,125	1,126	1,127	1,129	1,130	1,131	1,132	1,134	1,135	1,136
79,0	1,137	1,139	1,140	1,141	1,142	1,144	1,145	1,146	1,147	1,149
80,0	1,150	1,151	1,152	1,154	1,155	1,156	1,157	1,159	1,160	1,161
81,0	1,162	1,164	1,165	1,166	1,167	1,168	1,170	1,171	1,172	1,173
82,0	1,175	1,176	1,177	1,178	1,180	1,181	1,182	1,183	1,185	1,186
83,0	1,187	1,188	1,189	1,191	1,192	1,193	1,194	1,196	1,197	1,198
84,0	1,199	1,201	1,202	1,203	1,204	1,205	1,207	1,208	1,209	1,210
85,0	1,212	1,213	1,214	1,215	1,217	1,218	1,219	1,220	1,221	1,223
86,0	1,224	1,225	1,226	1,228	1,229	1,230	1,231	1,232	1,234	1,235
87,0	1,236	1,237	1,238	1,240	1,241	1,242	1,243	1,245	1,246	1,247
88,0	1,248	1,249	1,251	1,252	1,253	1,254	1,256	1,257	1,258	1,259
89,0	1,260	1,262	1,263	1,264	1,265	1,266	1,268	1,269	1,270	1,271
90,0	1,272	1,274	1,275	1,276	1,277	1,279	1,280	1,281	1,282	1,283
91,0	1,285	1,286	1,287	1,288	1,289	1,291	1,292	1,293	1,294	1,295
92,0	1,297	1,298	1,299	1,300	1,301	1,303	1,304	1,305	1,306	1,307
93,0	1,309	1,310	1,311	1,312	1,313	1,315	1,316	1,317	1,318	1,319
94,0	1,321	1,322	1,323	1,324	1,325	1,327	1,328	1,329	1,330	1,331
95,0	1,333	1,334	1,335	1,336	1,337	1,338	1,340	1,341	1,342	1,343
96,0	1,344	1,346	1,347	1,348	1,349	1,350	1,352	1,353	1,354	1,355
97,0	1,356	1,357	1,359	1,360	1,361	1,362	1,363	1,365	1,366	1,367
98,0	1,368	1,369	1,370	1,372	1,373	1,374	1,375	1,376	1,378	1,379

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for using the Fricke reference standard dosimetry system, 1992 (ASTM E 1026 – 92) v. 12.02, p. 593 – 599. Annual Book 1994.
- 2 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for absorbed gamma radiation dose in the Fricke Dosimeter, 1972.(ASTM D 1671 – 72) v. 09.01, p 426 – 429. Annual Book 1994.
- 3 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for use of a radiochromic liquid dosimetry system, 1993. (ASTM E1540 –93). Annual Book 1994.
- 4- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Determination of electron equilibrium thickness,1983. (ASTM E 668 – 83 / Apêndice X3) , 1983. Annual Book 1994.
- 5 - ATTIX, F.H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry.** London ,John Wiley & Sons, 1986.
- 6 - ATTIX,F.H.; ROESCH, W.C. **Radiation Dosimetry.** New York, Academic Press, v. 1 e 3, 1968.
- 7 - BOF, E. Comunicação pessoal, 1997.
- 8 - CUNNINGHAM, J. Radiation chemistry of ionic solids. I . Diffusion-controlled Mechanism for radiolysis of ionic nitrates. **J. Phys. Chem.**, v. 65, p. 628-635, 1961.

- 9 - DORDA, E.M.; MUÑOZ, S.S. Potassium Nitrate / Nitrite Dosimeter for High-Dose. In: High-dose Dosimetry – **Proceeding** of an International Symposium IAEA SM 272/1 , Viena, 1984.
- 10 - EBRAHEEM, S.; BESHIR, W.B.; KOVACS, A.; WOYNAROIETS, W.L.; MCLAUGHLIN, W.L., A new spectrophotometric readout for the alanine-triphenyl tetrazolium chloridesystem for high-dose dosimetry, **Radiat. Phys. Chem.**, n 55, p 785-787, 1999.
- 11 – **Enciclopédia Barsa**, 1998, CD-Rom
- 12 - FELTRE, R. **Fundamentos de Química**. Editora moderna, São Paulo-SP, 1996.
- 13 - GIERLACH, Z.S.; KREBS, A.T. Radiation effects on 2,3,5-Triphenyl tetrazolium chloride solutions. **Am. J. Roentgenol., Radium therapy** ,v. 62, n.4, p. 559 – 563, 1949.
- 14 - HOLM, N.W.; BERRY, R.J. **Manual on Radiation Dosimetry**. Marcel Dekker, INC New York, 1970.
- 15 - JEFFERY, G.H.; BASSET, J.; MENDHAM, J.; DENNEY, R.C. **Análise Química Quantitativa**. Vogel, 5ª edição, Guanabara, Koogan, 1989.
- 16 - JOHNSON, E.R. Effect of intensity on the radiation induced decomposition of Inorganic nitrates. **J. Phys. Chem.**, v. 66, jan/abr, p.755-758, 1962.
- 17 - MANN, W.B.; RYTS, A., Radioactivity measurements, principles and practice, definitions, quantities and units; some useful constant and relations, **Appl. Rad. Isot**, v 39, n 8, p 747-753, 1988.
- 18 – **Manual of Food Irradiation dosimetry**, Technical Reports Series n° 178, IAEA, Vienna, 1977.

- 19 - McLAUGHLIN, W.L.; BOYD, A.W.; McDONALD, J.C.; MILLER, A. **Dosimetry for Radiation Processing**. Taylor & Francis, New York, 1989.
- 20 - McLAUGHLIN, W.L.; DESROSIERS, M.C.; Dosimetry systems for radiation processing. **Radiat. Phys. and Chem.**. V 46, n 4-6, p 1163- 1174, 1995.
- 21 - NAM, J.W. High-dose standardization and dose assurance. **Radiat. Phys. and Chem.**. v. 34, n. 3, p. 399- 401, 1989.
- 22 - O'DONNELL, J.H.; SANGSTER, D.F. **Principles of Radiation Chemistry**. Edward Arnold (publishers) LTD, London, 1970.
- 23 - RADIATION QUANTITIES AND UNITS – ICRU REPORT 33 – USA, 1980.
- 24 - SCAFF, L. A. M. **Física em Radioterapia**, 1997.
- 25 - SPINKS, J.W.T; WOODS, R.J. **An Introduction to Radiation Chemistry**. John Wiley & Sons INC, New York, London, Sydney, 1964.
- 26 - SWALLOW, A.J. **Radiation Chemistry of Organic Compounds**. Pergamon Press Oxford, 1960.
- 27 - TABATA, T.; ITO, R.; KURIYAMA, I.; MORIUCHI, Y., Simple method of evaluating absorbed dose in electron-beam processing. **Radiat. Phys. Chem.**, v 33: 441, 1989.
- 28 - TAPLIN, J.W. In : HINE, G.J.; BROWNELL, G.L. **Radiation Dosimetry**. Academic Press INC Publishers, New York, 1956.
- 29 - **THE MERCK INDEX**. An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals, Susan Budavari, Editor, Merck & CO., INC. Ed. Centennial 11ed, USA, 1989.

30 - THOMASSEN, J., Dichromate as a routine dosimeter in the range 1 to 12kGy, **Proceeding of conf. on high dose dosimetry**, IAEA, Vienna, 1985, p 171. In ASTM E 1401-91 Standard Practice for use of dichromate dosimetry system, 1991.

31 - TORRES C., R.R. **Medicion de Altas Dosis de Radiation Gamma por el Sistema Nitrato-Nitrito de Potasio**. Callao – Peru: 1993. Tese (para obter el título de Ingeniero Químico) Universidade Nacional del Callao. Facultad de Ingenieria Química, 1993.

32 - VERESHCHINSKI, I.V.; PIKAEV, A.K. **Introduction to Radiation Chemistry**. Academic of Science of the USSR, Jerusalém, 1964.

33 – VIZEU, D.M. **Revista Brasileira de Radiologia**, 1963.

34 - YAMASAKI, M.C.R. **Aplicações Industriais da Radiação**. São Paulo Publicação IPEN PM 1351.