UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS

ADELAIDE DE ALMEIDA

"Investigações com dosímetro de
eletreto cilíndrico para neu-
trons rápidos"

Dissertação apresentada ao Instituto de Fí-
sica e Química de São Carlos, para a obten-
ção do título de: Mestre em Física Aplicada.

Orientador:-

Prof. Dr. Sérgio Mascarenhas Oliveira

DEPARTAMENTO DE FÍSICA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

São Carlos - 1982

BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS - USP
FÍSICA

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE _____
Adelaide de Almeida

APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 25 DE janeiro DE 1983.

COMISSÃO JULGADORA:

Dr. Sergio Mascarenhas - Orientador

Dr. Milton Soares de Campos

Dr. Jerome Wagner

À memória de meus pais

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da
CNEN, Pró-Nuclear, CNPq e FINEP.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Sérgio Mascarenhas Oliveira pela sua orientação neste trabalho, idéias e amizade.

Ao Prof. Robert Lee Zimmerman pelas discussões e apoio.

Ao Prof. Thomaz Ghillardi Neto pelo incentivo e amizade.

Aos Profs. John Cameron e Paul de Lucca que permitiram e colaboraram na utilização do acelerador na Universidade de Wisconsin.

Aos Drs. Carlos Eduardo de Almeida e Thomaz Knöpfel que permitiram a utilização da fonte de neutrons no IRD.

Aos Drs. Gian Maria Sordi, Aquiles Suarez e Linda V. L. Caldas, que permitiram a utilização da fonte de neutrons no IPEN.

À Dra. Letícia L. Campos pela atenção e colaboração.

Ao Dr. José de Júlio Rosental pela ajuda financeira quando do meu ingresso na física médica e no início deste trabalho.

Aos Srs. Salvador Binda Sanches Vera, Derminda Isabel de Moraes, Renê de Oste e Silvério Crestana pela ajuda na construção e preparo dos dosímetros e amizade.

Ao Dr. Jan Frans Willem Slaets e ao Valdir de Camargo Melchior que permitiram e apoiaram, tecnicamente, a utilização do computador.

Aos colegas do IFQSC pela amizade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram na confecção deste trabalho.

Aos meus irmãos e amigos pelo incentivo e carinho.

INDICE

Lista de Ilustrações.....	i
Lista de Tabelas.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Contribuições da Presente Tese.....	viii

CAPITULO I

RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA EM FISICA APLICADA A MEDICINA

1.1-Interação da Radiação com as Celulas.....	01
1.2-Resposta do Tecido para Radiação de Neutrons.....	07
1.3-Eletretos.....	12
1.4-Dosimetria com Eletretos.....	15
1.5-Dosimetria da radiação Eletromagnética com Eletretos.....	18
1.6-Dosimetria da Radiação Beta com Eletretos.....	22
1.7-Dosimetria de Neutrons rápidos com Eletretos.....	25

CAPITULO II

CONCEITOS BASICOS

2.1-Propriedades das Partículas Carregadas.....	26
2.2-Câmara de Ionização.....	30
2.3-Unidades de Radiação.....	35

CAPITULO III

DOSIMETRO DE ELETRETO PARA NEUTRONS RAPIDOS

3.1-Resposta do DEC para neutrons rápidos.....	41
3.2-Análise da Dependência Energética.....	42

CAPITULO IV

MATERIAL E METODOS

4.1-Características dos (DEC)s.....	52
4.2-Produção do estado de eletreto.....	53
4.3-Medida de carga.	

CAPITULO V

MEDIDAS, RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CONCLUSÕES

5.1-Efeito Sombra.....	55
5.2-Dependência com a Espessura da Parede.....	61
5.3-Dosímetro de Eletreto em Campo Misto de Radiação.....	64
5.4-Dependência com o Volume da Câmara.....	72
5.5-Utilização de Gás como Conversor.....	75
5.6-Dependência Energética.....	79

CAPITULO VI

Conclusões Finais	84
Sugestões para Trabalhos Futuros	86

APENDICE I

COLISAO ELASTICA DO NEUTRON COM O ATOMO

PESADO.....	87
-------------	----

APENDICE II

DADOS SOBRE AS FONTES DE NEUTRONS

UTILIZADAS.....08

BIBLIOGRAFIA.....94

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1

Efeito biológico por fluência de neutrons versus
energia por neutron.....11

FIGURA 2

Seção transversal do DEC e do sistema de indução para
medida de carga.....17

FIGURA 3

Alcance e perda de energia das partículas carregadas
pesadas na matéria.....29

FIGURA 4 Comportamento da corrente medida versus

voltagem aplicada numa câmara de ionização.....34

FIGURA 5

Fator de qualidade de várias partículas em função de
suas energias.....38

FIGURA 6

Fator de qualidade para neutrons versus energia de
neutrons.....39

FIGURA 7

Seção transversal do DEC,mostrando os vários tipos de
interações.....45

FIGURA 8

Esquema do DEC para neutrons
rápidos.....46

FIGURA 9

Dependência energética de σ , $\frac{dE}{dx}$, e A_p versus energia de
neutrons.....49

FIGURA 10

Dependência energética do DEC versus energia de
neutrons.....51

FIGURA 11

Esquema do sistema de medida de carga.....54

FIGURA 12

Dispositivo para levar o isolante ao estado de
eletreto.....54

FIGURA 13

Câmara interna do sistema de medida feita para medir
o Efeito Sombra.....58

FIGURA 14

Estudo do Efeito Sombra no dosímetro tipo A.....59

FIGURA 15

Estudo do Efeito Sombra no dosímetro tipo B.....60

FIGURA 16

Dependência da espessura de parede na resposta do
DEC.....61

FIGURA 17

Esquema da aparelhagem eletrônica para levantar o
espectro da radiação gama.....69

FIGURA 18

Espectro da radiação gama do ¹³⁷Cs.....69

FIGURA 19

Espectro da radiação gama da fonte de Am-BE
do IFQSC.....70

FIGURA 20

Curvas da Eficiência do cintilador de NaI:Tl.....71

FIGURA 21

Dependência do volume na resposta do DEC.....74

FIGURA 22

Resposta do DEC em função da parede conversora

a gás.....78

FIGURA 23

Carga residual do eletreto em função de neutrons de
14 MeV.....81

FIGURA 24

Carga residual do eletreto em função de neutrons de
4,5 MeV.....82

FIGURA 25

Dependência energética do DEC tipo A para diversas
energias de neutrons.....83

FIGURA 26

Espectro de neutrons da fonte de Am-Be.....91

FIGURA 27

Curva de correção do detector da "Nuclear
Enterprise".....91

FIGURA 28

Curva de calibração da fonte do IFRSC.....92

LISTA DE TABELAS

TABELA I

Resposta biológica à radiação ionizante.....06

TABELA II

Dependência energética dos DEC para radiação
eletromagnéticas.....21

TABELA III

Dependência angular dos DEC para radiação
eletromagnéticas.....21

TABELA IV

Respostas dos DEC em função do material de parede
e geometria de irradiação para
radiação beta.....24

TABELA V

Dependência energética dos DEC para fontes beta e
geometrias de irradiação diferentes.....24

TABELA VI

Revisão histórica da dose máxima
permissível.....40

TABELA VII

Unidades de radiação40

TABELA VIII

Dependência energética total para o DEC.....44

TABELA IX

Características de fonte
de ²⁴¹Am.....93

TABELA X

Decaimento da fonte de ²⁴¹Am.....93

RESUMO

Neste trabalho descrevemos os resultados de pesquisas sobre o dosímetro de eletreto cilíndrico (D.E.C.) e sua aplicação para dosimetria de neutrons rápidos.

Utilizamos os dosímetros com paredes de material hidrogenado para obter prótons de recuo com subsequente produção de ions no ar ou gás de preenchimento dos D.E.C e correspondente compensação de cargas do eletreto.

Os resultados mais importantes encontrados foram as seguintes

I - Verificamos que o D.E.C. pode ser utilizado num campo mixto de radiação de neutrons e gamas para medir uma delas sem interferência da outra.

II - Desenvolvemos um modelo da resposta do D.E.C. para neutrons rápidos, com análise da dependência energética de neutrons. O modelo desenvolvido foi testado em várias experiências com neutrons provenientes de fontes de Am-Be e D resaca (D,T).

III - Comprovamos o modelo apresentado com experiências relativas à dependência da resposta do D.E.C. com a espessura de parede e com seu volume.

IV - Verificamos que a sensibilidade do D.E.C. pode ser alterada significativamente utilizando um volume de gás conversor.

V - Comprovamos o efeito sombra, que no D.E.C. está ligado à compensação desigual da carga do eletreto relativa a direção de incidência dos neutrons.

Em conclusão, o presente trabalho demonstra a possibilidade prática do uso do D.E.C. em dosimetria de neutrons rápidos bem como esclarece os principais aspectos da interação dos neutrons com o sistema.

ABSTRACT

We describe the results of research on a cylindrical electret dosimeter (CED) applied to fast neutron dosimetry. The dosimeters were constructed with walls of hydrogen-containing material to provide recoil protons which subsequently produced ions in the filling gas of the CED and caused a corresponding compensation of the electret charges.

The following important results were obtained:

I We verify the possibility of using the CED in a mixed field of fast neutrons and gamma rays. Appropriate choice of wall material allows measurement of one with no interference from the other.

II We develop a model for the CED response to fast neutrons by an analysis of the energy dependence of the neutron interaction parameters. The model was tested experimentally with neutrons from Am-Be sources and from the (D,T) nuclear reaction.

III We further tested the model experimentally by investigating the response of the CED as a function of its volume and of its wall thickness.

IV We verified that the sensitivity of the CED can be significantly improved by using a hydrogen containing filling gas to provide additional recoil protons.

CONTRIBUIÇÕES DA PRESENTE TESE

I - A verificação de que o D.E.C. pode ser utilizado num campo mixto de radiação de neutrons e gamas para medir uma das duas sem interferência da outra.

II - O modelo de comportamento do D.E.C. para neutrons rápidos e a análise da dependência energética dos neutrons.

III - A comprovação do modelo proposto com experiências variando a espessura da parede conversora e volume do dosímetro.

IV - A verificação de que a sensibilidade do D.E.C. pode ser alterada significativamente utilizando-se um volume de gás conversor.

V - A verificação de que o efeito sombra ocorre devido a compensação desigual da carga do eletreto.

VI - Método para determinação da intensidade de raios gamas provenientes da fonte de Am - Be utilizando curvas publicadas da eficiência do cristal NaI[Tl] para detectar radiação gama.

CAPITULO I

RADIOPROTECAO E DOSIMETRIA EM FISICA APLICADA A MEDICINA

1.1 - Interação da Radiação com as Células

Sabemos que as radiações direta ou indiretamente ionizantes* causam danos aos seres vivos.

A radiação produz eletrons e ions que interagem com as células individualmente produzindo danos somáticos e genéticos. Os primeiros são ocasionados nas células comuns, cujos efeitos aparecem na própria pessoa irradiada e os últimos, aparecem também nos descendentes das pessoas irradiadas como resultado de danos nas células germinativas localizadas nos órgãos reprodutores.

Martin e Harbison (1972)¹ descrevem o processo de danos em estágios, desde a formação de ions no tecido, até a produção dos efeitos biológicos nas células. O primeiro estágio ou estágio físico inicial, ocorre quando a energia depositada no tecido, produz ionizações. Sendo o tecido humano basicamente composto de água, este estágio pode ser visto como

O segundo estágio, ou estágio físico-químico, acontece quando os ions formados produzem espécies

* Usaremos no texto a expressão radiação ionizante, significando diretamente ou indiretamente ionizante, já que a ionização acontece em última instância em ambos os casos.

químicas diferentes, como resultado de sua dissociação ou interação com outras moléculas de água.

Os íons positivos podem ser dissociados :

O elétron interage com uma molécula neutra de água e há uma dissociação do conjunto :

Os subprodutos ainda podem interagir e formar um agente altamente oxidante, como é o caso do peróxido de hidrogênio proveniente da reação

O terceiro estágio ou estágio químico, ocorre quando o produto da reação interage com moléculas orgânicas importantes. Os radicais livres e agentes oxidantes podem atacar as moléculas complexas ligando-se a elas e causando ruptura de ligações.

O quarto e último estágio é o biológico, aquele no qual aparece a resposta biológica e os sintomas. A resposta biológica foi observada empiricamente e um resumo feito por Wang e Robbins (1982)² é dado na tabela I.

As mudanças químicas podem afetar uma célula individualmente de diversas maneiras: causando morte prematura da célula, bloqueio no desenvolvimento celular ou modificação permanente, que é transmitida para as células filhas.

O uso indiscriminado das radiações ionizantes e por conseguinte o aparecimento de danos no homem, criou a necessidade de se estabelecerem normas para proteger o trabalhador com radiações, seus descendentes, a população e o meio ambiente.

Doses limites foram impostas ao trabalhador com radiações e à população, como a Dose Máxima Permissível que segundo Bushong (1975)³ é a dose na qual à luz do conhecimento atual, não são esperados danos detetáveis em uma pessoa em qualquer tempo de sua vida, nem na de seus descendentes.

A partir desta filosofia de Proteção Radiológica, aparelhos foram desenvolvidos para detectar e medir as radiações através de seus efeitos físicos, químicos e biológicos produzidos na matéria.

Dada esta necessidade, o Instituto de Física e Química de São Carlos (IFQSC) tem desenvolvido pesquisas em dosimetria em vários campos, tais como : radioproteção, radioterapia e dosimetria fundamental, entre os quais podemos citar:

I - Dosimetria Compton, realizada por B. Gross e R. Faria (1980)⁴

II - Dosimetria com ressonância paramagnética eletrônica (RPE), realizada em ossos por H. Panepucci, S. Mascarenhas e C. Terrile (1972)⁵ e I. Caracelli, C. Terrile e S. Mascarenhas (1982).⁶

III - Dosimetria com eletródios ion - sensíveis, realizada por S. Mascarenhas e C. Vanderoust (1979).⁷

IV - Dosimetria com Espectroscopia Foto-Acústica por S. Mascarenhas, H. Vargas e C. L. Cesar (submetido à publicação no Health Physics em 1982).⁸

V - Dosimetria com eletretos realizada por S. Mascarenhas e R. L. Zimmerman (1979);⁹ J. Cameron e S. Mascarenhas (1980);¹⁰ L. L. Campos, L. V. E. Caldas e S. Mascarenhas (1982);¹¹ L. L. Campos, L. V. E. Caldas e S. Mascarenhas (1982);¹² S. Mascarenhas, L. L. Campos e A. Suarez (1982).¹³²

Com relação a dosimetria com eletretos temos ainda trabalhos de O. Guerrini e S. Mascarenhas, L. N. Rodrigues e S. Mascarenhas, J. C. Pereira e S. Mascarenhas e P. E. Cruvinel e S. Mascarenhas, referentes a teses em andamento no Laboratório de Biofísica e Dosimetria do IFQSC.

Trata-se pois de pesquisas de caráter e tradição brasileiros, visto que há grande experiência neste campo no IFQSC - USP, com domínio tanto da pesquisa como do desenvolvimento da tecnologia de produção de eletretos.

Por outro lado entre as vantagens do uso do D.E.C pode-se citar :

- a) simplicidade de construção
- b) simplicidade de medida
- c) memória permanente
- d) versatilidade para vários tipos de radiação
- e) baixo custo

TABELA I

Dosimetria da Radiação e Resposta Biológica.

Dosimetria		Exposição	Resposta Biológica
Dose, r	Fracionamento		
0,3	Semanalmente	T= corpo total	Provavelmente nada(dose permissível)
0,1	Diariamente	T	Leucopenia
1,5	Semanalmente	L= local	Provavelmente nada (dose permissível para as mãos e os dedos)
25	dose única	L	Quebra cromossômica nas células do tumor (cultura de tecido)
50-100	Em pequenas doses acumuladas	L	Mutação genética para dobrar a razão espontânea por geração
60	dose única	L	Depressão da atividade do fosfato
200	dose única	T	Náusea
300	dose única	L	Dose Eritema para 100 Kv
300-500	dose única	T	LD ₅₀ para o homem
300-600	dose única	L (ovários)	Esterilização na mulher
400	dose única	L	Epilação reversível
400-500	10-50r/dia	T	Recupera. Clínica
500	dose única	L	Dose Eritema para 200 Kv
600-800	dose única	L (testículos)	Esterilização no homem
600-900	≤ 300r/dia	L	Catarata por Radiação
1000	dose única	L	Dose Eritema para o Radium
1000-1500	200-300r/dia	L	Retardamento epifisiário
1000-2500	200-300r/dia	L	Para câncer marcadamente radiosensível
1500	200-300r/dia	L (ovários)	Castração na mulher
1500-2000	200-300r/dia	L	Cessaçao das funções das glândulas salivares
1800-2000	200-300r/dia	L (estômago)	Acloridria
2000	dose única	L	Dose Eritema para 2 MeV
2000-3000	200-300 r/dia	L (rin)	Nefrite por radiação
2500-6000	200-300r/dia	L	Para câncer moderadamente radiosensível
2700-3000	dose única	L	Descamação úmida, sem ulceração da pele, radiação de 100 Kv (campo pequeno)
3600-5000	200-300r/dia	L	Limites da pele (campo único, 200 Kv, campo 5x5cm ²)
4000-5000	200-300r/dia	L	Limites do tecido nervoso
5000-6000	200-300r/dia	L	Limites do trato gastrointestinal
5000-7000	200-300r/dia	L	Descamação úmida, sem ulceração da pele (campo único 2000 a 3000 Kv de radiação, campo 10x10 cm ²)
~50.000	10-100r/dia	L	Carcinogênica

1.2 - Resposta do tecido para radiação de neutrons

As interações que o neutron realiza com a matéria são nucleares porque o neutron não possuindo carga, inexistirão forças Coulumbianas com os eletrons orbitais ou com carga do núcleo do material alvo.

Como resposta do efeito biológico do tecido em função da energia de neutrons esperamos uma reta ou seja, supondo simplesmente que o neutron deposita toda sua energia cinética no tecido, quanto maior for a energia depositada, maior será o efeito biológico produzido.

Os afastamentos desta linearidade ocorrem porque o neutron com energia alta passa sem interagir pelo tecido, e aqueles com energia baixa são capturados com liberação de uma energia constante que provem de uma reação nuclear.

As interações que o neutron apresenta com o tecido podem ser resumidas em duas mais importantes (a) - colisão elástica com o hidrogênio e a captura de neutron.

A Colisão elástica com o hidrogênio se torna importante devido a três fatores :

I - Abundância de hidrogênio no tecido. A relação entre a quantidade de hidrogênio existente no tecido humano com as quantidades dos outros elementos é dada

pelas seguintes razões :

H	N	O	C
1	$1/50$	$1/25$	$1/7$

II - A seção de choque por colisão elástica no hidrogênio é alta em comparação com as seções de choque dos outros elementos constituintes do tecido : 20 barn

III - A massa do neutron é aproximadamente igual a massa do proton por isso o neutron facilmente transfere sua energia ao proton proveniente do hidrogênio, o mesmo não ocorrendo com os outros elementos, já que possuem uma massa maior.

Na colisão elástica, à medida que vai se aumentando a energia do neutron, a seção de choque do hidrogênio vai diminuindo e as seções de choque dos outros elementos vão se tornando igualmente importantes, entretanto sendo os outros núcleos mais pesados do que o hidrogênio o neutron não cede energia a eles e assim o efeito biológico irá diminuir afastando-se da linearidade na parte superior da curva, figura 1.b.

A termalização do neutron, que vem a ser a perda de sua energia cinética, faz com que a probabilidade de colisão com o hidrogênio seja diminuída e a captura do neutron térmico possa ocorrer através das seguintes

reações citadas por Auxier, Snuder e Jones (1968):

$$H(n, \gamma)D_{(1)} \quad Q=2,226 \text{ MeV} \quad \sigma_c=0,330 \text{ barn}$$

$$N(n, p)^{14}C_{(2)} \quad Q=0,68 \text{ MeV} \quad \sigma_c=1,8 \text{ barn}$$

As contribuições destes dois tipos de reações ao efeito biológico se tornam comparáveis porque apesar da abundância de hidrogênio, a considerável energia liberada na reação com o hidrogênio, a seção de choque com o nitrogênio é maior. Ainda devemos levar em conta que o alcance do próton é de $10 \mu\text{m}$ no tecido, portanto não escapa, ao passo que o raio gama de 2,226 MeV tem uma probabilidade de escapar.

Um neutron com qualquer energia pode interagir com o tecido, e uma vez que tal aconteça, podemos obter o R da reação por captura que tem um valor constante, logo o efeito biológico será constante, como podemos observar na reação de baixas energias de neutron na curva da figura 1.b.

A figura 1.c, nos mostra a curva do efeito biológico versus energia por neutron, citada por Andersson e Braun (1962)¹⁵, que é semelhante a curva da figura 1.b.

Do ponto de vista da radioproteção, se um detector de radiação for construído de tal maneira que se consiga ter uma resposta semelhante à resposta do tecido para neutrons com relação à energia, então tal detector é denominado um

"rem - meter," isto é, um dosímetro que detecta a radiação de neutrons com resposta já corrigida pela dependência energética para o tecido.

Figura 1 - Efeito biológico por neutron versus energia de neutron. Em 1.a, hipotizamos o efeito biológico linear. Os desvios da linearidade apresentados em 1.b, mostram respectivamente a captura dos neutrons de baixa energia com conseqüente efeito biológico adicional e penetração dos neutrons de alta energia com conseqüente redução do efeito biológico. A curva experimental 1.c, reproduzida da literatura por Andersson e Braun (1962), é semelhante a curva apresentada em 1.b.

1.3 - Eletretos

O eletreto é um material isolante que está num estado de polarização elétrica quase-permanente. A polarização pode ser proveniente da orientação de dipolos intrínsecos no material, da presença de dipolos de impurezas ou da captura de eletrons ou ions por defeitos estruturais microscópicos ou heterogeneidades macroscópicas no isolante.¹⁶
(Gross 1980).

Supondo um eletreto com uma polarização inicial P_0 , a polarização residual P após transcorrido um tempo t é dada pela expressão seguinte :

$$P = P_0 \exp(-t/\tau) \quad \text{I.6}$$

Onde, τ é a grandeza física importante para definir um eletreto. Tal grandeza física é o tempo de relaxação, tempo no qual uma fração de $1/e$ da polarização inicial ainda permanece no material.

A razão $1/\tau$ é a probabilidade por unidade de tempo da polarização ser diminuída por uma transição. Esta probabilidade depende exponencialmente de uma energia A e da temperatura T segundo

$$1/\tau = 1/\tau_0 \exp(-A/kT) \quad \text{I.7}$$

No nosso caso, utilizando Teflon como isolante, a polarização ocorre através da captura de eletrons ou buracos por armadilhas na superfície ou em profundidades próximas a superfície. A energia A é aquela que deve ser fornecida para conseguir liberar a carga da armadilha numa determinada profundidade.

As armadilhas mais profundas armazenam as cargas por períodos de tempos mais longos fazendo com que a polarização seja mais estável ou quase - permanente.

Os materiais capazes de apresentar este efeito, basicamente têm baixa condutividade e podem ser os mais variados, por exemplo : filmes poliméricos (nylon, Teflon, polietileno), sólidos orgânicos (cêras orgânicas, naftaleno), inclusive os chamados bioeletretos obtidos a partir de biomateriais e biopolímeros como citados por S. Mascarenhas (1980).¹⁷

Há varios métodos para se obter o estado de eletreto no que diz respeito a carga e a polarização. Dentre eles podemos citar

I -- Polarização dos dipolos.

Este método é obtido aquecendo-se o isolante, e uma vez com a temperatura constante T um campo elétrico é aplicado.

II -- Injeção de cargas espaciais ou superficiais

Pode ser obtida através da injeção de partículas carregadas utilizando o processo de descarga corona, por contato injetor ou ainda utilizando feixes de partículas incidente (canhão de elétrons ou aceleradores).

III - Geração de cargas dentro do dielétrico

Consegue-se através da foto-injeção, da incidência de radiação ou do aumento da temperatura com simultânea aplicação de um campo elétrico para separação das cargas (foto, radio e termoeletreto respectivamente).

O eletreto foi descoberto por Esuchi no Japão, e somente nestas últimas décadas é que têm sido estudado mais intensamente, visando sua aplicação tecnológica como em microfones, detetores de ultrassom, materiais de uso biomédico, filtros de ar, dosímetros, etc... Discussão de tais aplicações tecnológicas pode ser encontrada em Sessler e West (1980).¹⁸

O Brasil muito tem contribuído na área de pesquisas com eletretos, nas pessoas de B. Gross e J. C. Ribeiro, e vem continuamente contribuindo com pesquisas feitas nos laboratórios do IFQSC em S. Carlos, nas pessoas de B. Gross, G. F. L. Ferreira, R. A. Moreno, M. S. Campos, S. Mascarenhas, R. L. Zimmerman, L. N. Oliveira, J. A. Giacometti, R. M. Faria e outros colaboradores.

1.4 - Dosimetria com Eletretos

A dosimetria utilizando eletretos foi sugerida há tempos e B. Gross recentemente revisou vários métodos que podem ser utilizados para se fazer esta dosimetria, a saber: a - Uso do campo do eletreto como campo de coleção em sistema tipo câmara de ionização. b - Variação da quantidade de armadilhas pela radiação e monitoração subsequente com técnica de corrente termo-estimulada. c - Efeitos de danos de radiação sobre o eletreto variando a quantidade ou tipos de armadilhas.

A utilização do campo do eletreto como campo de coleção em sistema tipo câmara de ionização é o método que nos interessa.

Estudos foram desenvolvidos neste sentido por Bauser, e Ronse (1977)¹⁹, Ikeya e Miti (1980)²⁰, fazendo com que algumas limitações iniciais ("fading", repolarização) pudessem ser superadas.

Ikeya (1979)²¹, também mostrou a viabilidade da câmara de ionização de eletretos ser utilizada num campo misto de radiação (neutrons lentos e gama), utilizando a comparação da sensibilidade das câmaras com e sem parede de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Em 1981, Roulleau, Bui, Lisbona, Morucci, Ricard e
 22
 Segui, construíram um dosímetro com eletretos para medir
 dose na pele de pessoas submetidas a radiografias.

O grupo de dosimetria com eletretos do IFQSC, sob
 orientação do Prof. S. Mascarenhas, tem trabalhado
 basicamente com dosímetros de eletretos com câmara de
 ionização cilíndrica, Mascarenhas e Zimmerman (1979),
 Cameron e Mascarenhas (1980). Este dosímetro se assemelha
 a uma câmara tipo condensador, onde a radiação incidente
 ioniza o gás (ou ar atmosférico) existente dentro da
 câmara e estes íons compensam parcialmente a polarização
 do eletreto.

As cargas iniciais e finais podem ser relacionadas à
 dose de radiação através da expressão linear I.8, desde
 que se esteja trabalhando no regime de saturação da

$$Q = Q_0 - KD \quad \text{I.8}$$

Onde: Q_0 = carga inicial D = dose de radiação (rem)

Q = carga final K = sensibilidade do DEC (C/rem)

A representação esquemática da seção transversal do
 D.E.C., bem como do sistema de indução para medida da
 carga são vistos na figura 2, cuja expressão para o campo
 elétrico foi dada por Cameron e Mascarenhas (1980), como
 sendo

$$E(V/m) = \frac{1}{L} \cdot \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0 r_{\infty}} \left(\frac{1+KR_E}{1+KR_D} \right) \quad \text{I.9}$$

Onde: $R_D = \frac{\ln r_3/r_2}{\ln r_2/r_1}$; $R_E = \frac{\ln r_3'/r_2}{\ln r_2/r_1}$;

Q = carga; L = comprimento no teflon; K = cte. dielétrica

Figura 2 - Seção transversal da câmara de ionização cilíndrica com eletretos e do sistema de indução para medida de carga, com r_1 = raio do eletreto metálico, r_2 = raio do Teflon, r_3' = raio interno do sistema de indução, r_3 = raio interno da câmara externa. A parede externa e o eletrodo metálico estão permanentemente ligados. O eletrodo com raio r_3' foi introduzido para medir a carga residual no Teflon (veja item 4.3)

1.5 - Dosimetria da Radiação Eletromagnética co Eletretos

Resultados preliminares dos trabalhos desenvolvidos por Mascarenhas e Guerrini (tese em andamento).

Dependência Energética

Das interações da radiação eletromagnética com matéria, os efeitos mais importantes são : o Foto - Elétrico, o Compton e o de Produção de Pares (Evans - 1979).

Para as energias utilizadas neste experimento (tabela II), os efeitos que têm a maior probabilidade de ocorrência são : Foto - elétrico e o Compton. O primeiro depende do Z do material alvo e da energia do foton incidente, o segundo depende da densidade eletrônica do material alvo.

Dessas considerações, conclui-se que a dependência energética deve ser função do material da parede e do núcleo interno da câmara de ionização de eletretos.

A tabela III, mostra ainda, que os dosímetros de eletretos podem ser utilizados para monitoração pessoal, radiodiagnóstico e para dosimetria geral.

Decaimento dos D.E.C.

Para que a polarização do eletreto seja quase permanente, é necessário eliminar as cargas das armadilhas mais rasas e deixar as mais profundas no volume do material.

Uma boa estabilidade de cargas após o dosímetro ter sido carregado por descarga Corona (segundo a fig. 11) foi conseguida a partir de um tratamento térmico realizado a 160 C durante um tempo de 15 minutos. Findo este tratamento, medidas foram realizadas segundo a fig. 12 que evidenciaram uma redução da carga inicial de 1,5 durante o período de um mês. Outros tratamentos térmicos são sugeridos na literatura e pelos trabalhos do grupo de nosso laboratório.

A medida que a energia de radiação eletromagnética vai aumentando, a dependência angular do eletreto para esta radiação vai tendendo a diminuir, porque a absorção e a probabilidade de retroespalhamento vão diminuindo.

A resposta do D.E.C. com parede de alumínio, em função do ângulo de exposição em relação à radiação incidente perpendicularmente ao eixo de simetria do D.E.C., foi levantada para raios X de 90 KV e raios Gama do ^{60}Co .

As respostas obtidas são dadas na tabela III, com normalização unitária para ângulo de 0 grau.

Foi notado que a dependência angular foi maior para raios X do que para o ^{60}Co , como esperado.

Sensibilidade e Limites de Detecção

A resposta de um D.E.C. com a exposição é esperada ser linear na região de saturação da câmara (item 2.2 do capítulo II), isto é, todos os ions formados no volume do gás são coletados e detetados pelo sistema de medida.

A inclinação da reta dá a sensibilidade ou eficiência com que o D.E.C. responde á radiação e depende da qualidade do feixe de radiação, da parede e do núcleo da câmara.

O limite de detecção é dado pelo limite do afastamento da linearidade da região de saturação, isto é, não existe mais uma correspondência linear entre ions formados e medida de carga, mas existe uma perda de ions por recombinação.

Para o D.E.C. com paredes de alumínio, submetido a raios X diagnóstico, os autores observaram que a sensibilidade foi de 2 nC / mR e o limite de detecção foi de 5 mR. Tais limites podem ser variados com desenho adequado do sistema. A sensibilidade na faixa de μ R podem ser conseguida aumentando - se o volume ou variando - se o material das paredes e/ou o gás.

TABELA II

Dependência da constante $K(\text{pC/mR})$ dos DEC em função da energia da radiação eletromagnética incidente.

KV_p	KV_{efetivo}	Valor de $K(\text{pC/mR})$
60	30	2,5
100	50	2,0
250	115	1,3
—	^{60}Co	0,7

TABELA III

Dependência angular dos DEC com parede de alumínio para fontes de radiação de ^{60}Co e raios X de 90 KVp. As medidas foram feitas com os dosímetros rotacionando no plano formado pelo eixo do cilindro e a direção do feixe de radiação (com normalização 1 para 0 grau).

Ângulo (graus)	Raios X (90 KVp)	^{60}Co
0	1	1
30	,98	,87
60	,90	,83
90	,90	,46

1.6 - Dosimetria de raios Beta com eletretos

Resultados dos trabalhos desenvolvidos por Mascarenhas, Campos e Caldas com dosímetro de eletreto cilíndrico (1982).

Comportamento Linear

Para um dosímetro é desejável que a sua resposta tenha uma dependência linear com a dose de radiação recebida, equação I.8. As respostas obtidas com N.E.C. para radiação Beta quanto à carga residual versus dose de radiação foi linear. O intervalo de dose onde existiu esta linearidade foi encontrado ser dependente do material, da parede da câmara e da geometria de irradiação conforme tabela IV.

Inverso do Quadrado da Distância

Sabemos que a intensidade de radiação ionizante varia com o inverso do quadrado da distância para uma fonte pontual. Por esse motivo é esperado que o comportamento de um dosímetro mostre também esta dependência se for utilizado para medir um tal campo.

O D.E.C. foi testado para várias fontes Beta e distâncias fonte detector. As respostas obtidas comprovaram a dependência inversa quadrática da distância, obtida por outros detetores, como a câmara de extrapolação tipo Buchler do laboratório do IPEN.

Dependência Energética

Foram utilizadas fontes Beta ^{90}Sr - ^{90}Y e ^{204}Tl com energias médias de 0,8MeV e 0,24MeV respectivamente. Os resultados desta experiência estão na Tabela V que comprova a dependência energética com a geometria de radiação.

Baseados nestas experiências, foi feito um D.E.C. sem parede com a finalidade de detectar a radiação beta para doses muito baixas.

Com o novo dosímetro conseguiu-se uma resposta linear no intervalo de dose de 2,5 a 40Gy, e a dependência energética foi reduzida a 2% que mostrou ser um dosímetro útil também para este tipo de radiação.

TABELA IV

Intervalo de linearidade dos DEC com paredes de Lucite, Lucite grafitada e alumínio, para fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{204}Tl e ^{85}Kr com geometrias de irradiação diferentes.

FONTES	GEOMETRIA DE IRRADIAÇÃO	MATERIAL DE PAREDE	INTERVALO DE DOSE DETETADA
^{90}Sr - ^{90}Y , ^{204}Tl , ^{85}Kr	eixos dos DEC _s paralelos à direção do feixe	Lucite grafitada	2,5 μGy -40 μGy
"	"	AL	"
"	eixos dos DEC _s perpendiculares à direção do feixe	AL	40 μGy -600 μGy
"	"	Lucite	sensibilidade não suficiente para detecção.

TABELA V

Dependência energética para o DEC utilizando fontes isótopos de radiação em função da geometria de irradiação.

GEOMETRIA DE IRRADIAÇÃO	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS FONTES DE ^{90}Sr - ^{90}Y E ^{204}Tl
eixo dos DEC _s paralelos à direção do feixe	23%
eixo dos DEC _s perpendiculares à direção do feixe	7%

1.7 - Dosimetria de Neutrons Rápidos com Eletretos

Investigações preliminares com dosímetro de eletreto cilíndrico foram feitas por Mascarenhas, Campos, Caldas e Suarez (1982).

O princípio da dosimetria de neutrons rápidos utilizando eletretos, foi de compensar as cargas do eletreto através da ionização produzida pelos prótons de recuo originados no material hidrogenado (lucite), como pode ser visto a fig. 7.

Uma fonte de neutrons de Am - Be (α , n), com atividade de 2 Ci e energia média de neutrons de 4,5 MeV, foi utilizada para irradiar dosímetros de eletretos cilíndricos (D.E.C.), com cargas iniciais diferentes. Os D.E.Cs. foram colocados sob ação do campo de neutrons e suas respostas foram paralelas e lineares, concordando com a equação 18.

Uma espessura de parafina foi interposta entre a fonte e os dosímetros com a finalidade de moderar os neutrons rápidos. A resposta do D.E.C. para tal situação foi constante. Essa constância já era esperada, uma vez que os dosímetros foram feitos para a detecção apenas de neutrons rápidos, os neutrons lentos não foram efetivamente detectados pelo sistema de medidas.

CAPITULO II

CONCEITOS BASICOS

2.1 - Propriedades das Partículas Carregadas Pesadas

Transferência de energia à matéria

Os processos mais importantes com que a partícula carregada interage ao atravessar a matéria são a ionização e a excitação, com a liderança deste último.

A ionização é o processo no qual a perda de energia ocorre através da colisão elástica com os eletrons atômicos.

A energia transferida como excitação e ionização ao longo de um elemento de caminho dx em um meio absorvente homogêneo por uma partícula carregada pesada é dada pela expressão teórica de Bethe segundo Evans (1979) como

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right] \quad \text{II.1}$$

Onde N = densidade de átomos no material absorvedor;
 ez = carga da partícula incidente;
 v = velocidade da partícula incidente;
 m_0 = massa do eletron;
 I = média geométrica das energias de excitação e ionização;
 β = v/c com c = velocidade da luz

Nesta expressão percebemos que a transferência de energia depende da carga e da velocidade da partícula incidente e independente de sua massa.

Alcance da partícula carregada pesada na matéria

Uma partícula carregada e dotada de energia cinética ao penetrar na matéria, perde energia gradualmente na sua trajetória e só para quando toda sua energia foi dissipada.

Partículas semelhantes, com a mesma energia inicial, percorrem quase exatamente a mesma distância e por isso para um grande número de partículas é considerado o percurso médio.

O alcance $A(E)$ é definido como a média de comprimento do caminho percorrido por partículas monoenergéticas.

Uma aproximação que pode ser utilizada para o alcance das partículas carregadas pesadas com energia maior do que 5 MeV, é dada pela regra de Geiger (Evans 1979) como

$$A = 0,129 \left(\frac{E}{9,3} \right)^{1,8} \quad (\text{cm}) \quad \text{II.2}$$

Para energias mais baixas do que 5 MeV, podemos utilizar a curva do alcance na figura 3 cujos dados foram obtidos do Evans (1979)

Com base no item 1.2 do capítulo I, notamos que os tipos de partículas pesadas provenientes da interação dos neutrons com o tecido são os protons.

A perda de energia e o alcance no meio para os protons e outras partículas pesadas, podem ser retiradas das curvas dadas na figura 3. Estas curvas são universais, isto é, foi eliminada a dependência da densidade do meio. Portanto para sabermos qual a perda de energia ou o alcance, num determinado material, basta multiplicarmos e dividirmos respectivamente os valores dados nas curvas pela densidade do material em questão.

Figura 3 - Curvas universais do alcance e da perda de energia na matéria pelos protons. Os dados para esta apresentação aparecem no Evans (1979).

2.2 - Câmara de ionização

A câmara de ionização acoplada a um aparelho de medida, por exemplo, um eletrômetro, é um sistema para medir corrente ou carga através do efeito da ionização produzida no gás pela radiação. Consiste basicamente de um par de eletrodos mediados por uma camada de ar ou gás aos quais é aplicada uma diferença de potencial com a finalidade de coletar os íons produzidos.

O efeito da voltagem de coleta sobre a corrente de ionização pode ser visto na figura 4, na qual a corrente aumenta primeiro linearmente com a voltagem, depois mais rapidamente e no final se aproxima assintoticamente da corrente de saturação.

Nesta curva estão salientadas duas regiões, a de recombinação e a de saturação.

A região de recombinação, é aquela na qual os íons produzidos no gás encontram e neutralizam outros íons de carga oposta, antes que alcancem o eletrodo coletor.

A recombinação pode ser reduzida ou aumentando-se a intensidade do campo entre os eletrodos ou diminuindo-se a distância entre os mesmos. Podemos ainda fazer uso dos dois parâmetros simultaneamente, pois a velocidade dos íons depende do campo elétrico e da distância entre os eletrodos. Entretanto o aumento da intensidade do campo, bem como a redução da distância entre os eletrodos são

limitados.

O aumento do campo pode dar energia adicional a um eletrón livre e este durante o seu percurso poderá ionizar uma molécula com a qual ele colidiu, provocando uma multiplicação de ions e a corrente total começa a depender fortemente da voltagem aplicada.

A região de saturação, é aquela na qual todos os ions produzidos na câmara pela radiação são capazes de alcançar os eletrodos e são contados.

A corrente de saturação vai existir para valores de voltagens aplicadas que eliminam bastante o efeito de recombinação.

A voltagem de saturação para uma câmara de ionização particular depende do desenho da câmara, da forma, do espaço entre os eletrodos e do tipo do gás na câmara.

A região de voltagem na qual a corrente é constante, é chamada " Plateau " da câmara de ionização.

Eficiência de coleção de ions

É a razão entre a corrente medida e a corrente de saturação de uma câmara de ionização operando sob condições específicas. Esta eficiência depende da geometria da câmara e da tensão aplicada.

A eficiência para a câmara cilíndrica é dada por:

$$U = \frac{I_m}{I_s} \quad \text{ou} \quad U = \frac{0,01}{1 - 0,002qt} \quad \text{II.3}$$

Onde U é a tensão, q é a taxa de exposição em mR por segundo e t é o tempo de exposição.

Material de parede e gás

A escolha dos materiais dependerão da grandeza física a ser medida, por exemplo, se a grandeza a ser medida é a exposição, então os materiais deverão ser equivalentes ao ar. Se a quantidade a ser medida é dose absorvida num meio determinado, os materiais deverão ser equivalentes a este meio. Segundo Boas (1966)²⁴, para que os materiais sejam equivalentes, precisam apresentar o mesmo coeficiente de absorção para a radiação primária e a mesma perda de energia para as partículas secundárias.

O material de parede utilizado nas nossas câmaras de ionização cilíndricas com eletretos foi de polietileno cujas características de densidade, número atômico e densidade eletrônica são próximas as do tecido.

Correcção da pressão e da temperatura

A medida da corrente de ionização é feita através da ionização ocorrida na massa de ar ou gás existente dentro da câmara. Geralmente a câmara não é selada, isto é, o número de moléculas de gás dentro da câmara varia com a pressão e com a temperatura. Assim sendo, a leitura do instrumento associada com a ionização dependerá das condições de pressão e temperatura do gás da câmara.

Se medidas forem feitas com valores de pressão e temperaturas diferentes dos padrões estabelecidos, é necessário aplicar os fatores de correcção para variação desses parâmetros.

Figura 4 - Curva de corrente de ionização versus tensão aplicada numa câmara de ionização. Nesta curva aparecem as regiões de recombinação e de saturação

2.3 - Unidades de radiação

As unidades relacionadas à radiação ionizante, estão ligadas às grandezas físicas tais como : exposição, dose absorvida, dose equivalente, atividade, e outras.

A Comissão Internacional sobre Unidades de Radiação e Medidas (ICRU), em conferência geral em 1975, decidiu adotar o Sistema Internacional de Unidades no uso das radiações ionizantes.

Novas unidades surgiram, com nomes diferentes e desde então as unidades antigas têm sido utilizadas no decorrer deste período com a ressalva do ICRU que as novas precisam ser adotadas oficialmente em 1985.

Um resumo dos conceitos dessas grandezas, feito com base no ICRU 33 (1980)²⁵ é dado a seguir, e a tabela VI apresenta as grandezas físicas citadas com respectivas unidades.

Exposição (X) é a quantidade total de cargas produzidas por fotoeletrons numa massa de ar.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (C/kg)$$

II.4

Atividade (A) atividade de uma quantidade de nuclídeo instável é o número de vezes por segundo que ocorre uma transição para qualquer estado subsequente.

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (s^{-1}) \quad \text{II.5}$$

Dose absorvida (D) é a quantidade de energia média depositada pela radiação ionizante na matéria de massa dm.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (J/kg) \quad \text{II.6}$$

A dose absorvida não leva em conta os efeitos biológicos a ela associados quando o material biológico é irradiado.

O efeito biológico tem uma dependência direta da densidade de ionizações ou a quantidade de energia depositada no tecido.

A correção para o efeito biológico é feita pelo fator Q (fator de qualidade) determinado empiricamente que faz com que a resposta biológica do tecido para doses iguais de radiação de tipos diversos seja diferente.

A dose absorvida quando leva em conta os efeitos biológicos produzido no tecido, é chamada de Dose Equivalente e pode ser definida como

$$H = D.Q \quad (J/kg) \quad \text{II.7}$$

A determinação do fator W , pode ser feita através da comparação entre o resultado obtido pela radiação em questão com o resultado obtido pela radiação de referência.

A figura 5, nos dá uma idéia do fator de qualidade de outras partículas em função de suas energias e a figura 6, mostra o fator de qualidade em função das energias de neutrons.

No capítulo I, salientamos a necessidade de um limite máximo de dose absorvida, para o trabalhador com radiação ionizante. A dose equivalente máxima que pode ser recebida é chamada de Dose Máxima Permissível, (DMP).

A DMP tem sido modificada ao longo dos anos, como pode ser visto na tabela VII. Estas doses foram estabelecidas inicialmente para proteção contra Raios X e Raios Gama do ^{226}Ra e com a introdução dos reatores nucleares estes limites foram alterados devido ao aumento da consciência sobre as incertezas na maioria dos dados experimentais, (Hine 1982).²⁶

Figura 5 - Curvas do fator de qualidade versus energia para várias partículas carregadas (curso de dosimetria do IRD - 1982).²⁷

Figura 6 - Fator de qualidade do neutron versus energia de neutron. As referências estão citadas na Publicação 21 do ICRP (1973).²⁸

TABELA VI

Grandezas físicas ligadas à radiação ionizante, com respectivas unidade (antigas e novas).

—		UNIDADES ANTIGAS			UNIDADES NOVAS		
GRANDEZA FÍSICA	SÍMBOLO	NOME	SÍMBOLO	VALOR	NOME	SÍMBOLO	VALOR
EXPOSIÇÃO	X	Roëntgen	R	$2,58 \cdot 10^4 \text{ C/kg}$	Coulomb/kg	C/kg	1
DOSE ABSORVIDA	D	rad	rad	100 erg/g	Gray	Gy	1 J/Kg
DOSE EQUIVALENTE	H	rem	rem	100 erg/g	Sievert	Sv	1 J/Kg

TABELA VII

Revisão histórica da dose máxima permissível anual citada por Rushong (1975).

DATA	D.M.P. anual (rem)
1931	50
1936	30
1948	15
1958	5

CAPITULO III

DOSIMETRO DE ELETRETO PARA NEUTRONS RAPIDOS

3.1 - Resposta do D.E.C. para Neutrons Rápidos

Sabemos que os neutrons não ionizam diretamente a matéria. Necessitamos converter a energia dos neutrons rápidos numa partícula ionizante que determinará então a compensação de carga do eletreto.

No presente trabalho a conversão é realizada em parede de polietileno ($C H_2$) com subsequente liberação de protons.

O neutron ao penetrar no D.E.C. (figura 7), pode se comportar das seguintes maneiras :

I - A tendência predominante é do neutron penetrar direto sem interagir na parede da câmara.

II - O neutron penetra, converte na parede, porém a energia ou direção do proton não é apropriada para fazer com que ele consiga escapar e entrar no gás da câmara produzindo ionizações.

III - O neutron pode penetrar na parede, termalizar e ser capturado pelo hidrogenio, porém as espessuras por nós utilizadas não termalizam os neutrons rápidos.

IV - A interação que realmente nos interessa é aquela na qual o neutron penetra na parede, converte numa espessura igual ao alcance do proton, o proton recua gastando parte da energia que lhe resta produzindo ionizações no gás. Estas ionizações irão compensar a carga do eletreto.

A camada conversora A está do lado de incidência dos neutrons, ela inexistente do lado oposto porque os protons não são retroespalhados, logo não podem produzir ionizações no gás localizado na face posterior à incidência dos neutrons, portanto, as cargas superficiais do teflon nesta face posterior não serão compensadas e teremos o "Efeito Sombra", cujas medidas serão visto posteriormente.

O esquema do D.E.C para neutrons rápidos, por nós utilizado, é dado na figura 8, onde é vista a parede conversora de polietileno, a camada de gás, e a espessura de teflon ajustada ao eletrodo central.

A resposta desta câmara, leva em conta a física da conversão neutron-proton na parede do material hidrogenado, a ionização produzida no gás pelo proton de recuo e a compensação da carga do eletreto.

Esta resposta tem seu comportamento resido pela seguinte expressão :

$$R = \phi A \exp(-N\sigma d) \cdot [1 - \exp(-N\sigma' A_p)] \int_0^{\Delta x} dE/dx \cdot \rho \cdot dx \cdot e/w \cdot g \quad (C/s) \quad III.1$$

Onde, o primeiro produto está ligado à física da conversão na parede e o segundo à ionização do gás na câmara. Os fatores são dados por :

ϕ = Fluxo de neutrons rápidos

A = Area efetiva da câmara, "vista" pelos neutrons incidentes.

$\exp(-N\sigma d)$ = Probabilidade do neutron passar direto sem converter na parede de espessura d .

$1/\sigma' N$ = Comprimento de relaxação ou distância média que o neutron caminha até fazer a primeira colisão.

$1 - \exp(-N\sigma' A_p)$ = Probabilidade do neutron converter no alcance do proton A_p .

dE/dx = Perda de energia do proton durante seu percurso no gás.

e/w = Recíproco da energia necessária para produzir um par de ions no gás com carga e .

g = Fator geométrico que corrige a expressão para protons que não saem de uma colisão frontal e também para perdas de energia do proton na parede.

Se o neutron converter no alcance do proton de recuo no polietileno e produzir ionizações até perder toda sua energia no gás de espessura Δx , a expressão **III1** pode ser simplificada para

$$R = \phi \cdot A \cdot N \sigma'_{Ap} \cdot dE/d\rho x \cdot \rho \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot e/w \cdot g \quad (C/s) \quad \text{III2}$$

onde a probabilidade $\exp(-N\sigma'd)$ de passar direto sem converter na parede é aproximadamente 1, e a probabilidade de ser capturado no alcance do proton pode ser simplificada para $N\sigma'_{Ap}$.

Figura 7 - Seção transversal da câmara de ionização de eletretos, mostrando a espessura de Teflon sobre o eletrodo metálico central e os tipos de interações que o neutron faz com a câmara. Sómente os protons de recuo produzidos na camada A_p , do lado de incidência dos neutrons, contribuem com ions que compensam a carga no teflon.

Figura 8 - Dosímetro de eletretos para neutrons rápidos, onde a = eletrodo metálico central, b = base metálica, c = parede de polietileno com superfície condutora, d = camada de Teflon, e = sás ou ar atmosférico e f = cara do dosímetro.

3.2 - Análise da dependência energética

A dependência energética dos fatores que influenciam a sensibilidade da câmara de ionização de eletretos é conhecida. É importante considerar a comparação entre o alcance do proton convertido com a espessura da parede e espessura do gás que preenche a câmara.

Dado um dosímetro de eletreto com espessura da parede de 2 mm de polietileno, diâmetro D de 10 mm preenchido com gás, a resposta da câmara pode ser escrita para as tres regiões relevantes de energia de neutron como se segue :

$E_n < 0,7 \text{ MeV}$	$\phi \cdot A \cdot N^0 A_p \cdot E_n \cdot g_1 \cdot e/w$	III.3
$0,7 < E_n < 12 \text{ MeV}$	$\phi \cdot A \cdot N^0 A_p \cdot (dE/d\rho x) \cdot \rho \cdot D \cdot g_2 \cdot e/w$	III.4
$12 < E_n$	$\phi \cdot A \cdot N^0 d \cdot (dE/d\rho x) \cdot \rho \cdot D \cdot g_3 \cdot e/w$	III.5

Para a primeira região de energia, a parede de polietileno e espessura do gás têm dimensões maiores que o alcance do proton de recuo. Na terceira região o oposto acontece, o alcance do proton no polietileno e no ar são maiores do que a espessura da parede e diâmetro da câmara respectivamente. Na região intermediária, o alcance do proton na parede é menor do que sua espessura e o alcance do proton no gás é maior do que o diâmetro da câmara.

Fazendo uso da dependência em energia dos fatores $\sigma, A_p, \frac{dE}{d\rho x}$ da figura 9, esperamos que a sensibilidade da câmara tenha a seguinte dependência com a energia de neutrons :

$E_n < 0,7 \text{ MeV}$	$E^{2,5}$
$0,7 < E_n < 12 \text{ MeV}$	$E^{0,5}$
$12 < E_n$	$E^{-1,3}$

A figura 10, mostra estas dependências em representação log-log de carga por fluência versus energia de neutron. As resistências apresentadas não podem ser comparadas, pois dependem da determinação dos g_s .

Para o dosímetro dado, caso tenhamos neutrons na gama de baixas e altas energias, o proton de recuo "enxergará" as espessuras de polietileno e do gás diferentemente influenciando na dependência da resposta do dosímetro, cujo resumo é apresentado na tabela V.III.

Figura 9 - Dependência energética de σ seção de choque n-p, dE/dx perda de energia do próton no ar, e A_p alcance do próton no polietileno, onde σ foi obtido a partir de Ende (1972).

Figura 10 - Dependência energética dos D.E.C. versus energia de neutrons. As transições de uma resição para outra dependem das dimensões do D.E.C. e estão discutidas no texto.

TABELA VIII

Dependência energética total para um DEC com parede de 2 mm de polietileno, no campo de neutrons de varias energias.

ENERGIAS DE NEUTRON	ESPESSURA DE POLIETILENO	ESPESSURA DO GÁS	RESPOSTA DA CÂMARA	DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA TOTAL
baixa	grossa $> A_p$	grossa $> A_p$	$N \sigma' A_p \cdot E_p \cdot (1 - N \sigma' d)$	$E^{2.26}$
media	grossa $> A_p$	fina $< A_p$	$N \sigma' A_p \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \Delta x (1 - N \sigma' d)$	$E^{.53}$
alta	fina $< A_p$	fina $< A_p$	$N \sigma' d \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \Delta x$	$E^{-1.3}$

CAPITULO IV

MATERIAL E METODOS

4.1 - Características dos D.E.C.

Foram utilizados dois tipos de dosímetros de eletretos cilíndricos A e B cujas dimensões são dadas por

	Comprimento (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro do eletrodo metálico (mm)
A	48	15	4,5
B	48	60	4,5

O dosímetro B tem uma parede de 0,5 mm de alumínio.

O sistema de câmaras concêntricas tem as seguintes dimensões:

	Comprimento (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Espessura (mm)
CÂMARA INTERNA	47,5	8,3	0,6
CÂMARA EXTERNA	70	17	10

O material de parede utilizados foi o polietileno com densidade de $0,95 \text{ g / cm}^3$, densidade eletrônica de $3,17 \times 10^{23} \text{ e} / \text{cm}^3$, número atômico efetivo 5,44.

O gás utilizado na maioria dos experimentos foi o ar atmosférico.

4.2 - Produção do estado de eletreto

A produção do estado de eletreto nos laboratórios do IFQSC, é feita por deposição de cargas pelo Processo Corona, método este desenvolvido em seus próprios laboratórios por Moreno e Gross (1976)²⁹.

Em resumo, consiste em colocar o material sob a ação de um campo elétrico e uma descarga corona é produzida no ar através de uma ponta metálica, criando ions principalmente de CO_3^- que se depositam na superfície e provavelmente em armadilhas no volume do material.

O isolante utilizado em nossos dosímetros foi o Teflon nacional no formato de tubo cilíndrico. O tubo foi girado a uma velocidade constante com a ajuda de um motor, figura 11, para que houvesse uma homogeneidade de cargas depositadas.

4.3 - Medida de carga

A medida de carga, figura 12, é feita através de um sistema de indução cilíndrica de câmaras concêntricas acoplado a um eletrômetro. A câmara externa liga o corpo do dosímetro à terra e a câmara interna fornece a medida da carga induzida proporcional à carga do eletreto.

O eletrômetro utilizado nas medidas de carga foi o Keithley digital modelo 616, com um conector UHF para fazer contato entre as câmaras e o eletrômetro.

Figura 11 - Diagrama para obtenção do eletreto por descarga corona, com P = ponta de tungstênio, H = tensão entre a ponta e o Teflon, A = amostra e M = motor para girar o isolante. Depois da implantação da carga no Teflon, ele fica submetido a tratamento térmico para esvaziar as armadilhas rasas.

Figura 12 - Diagrama do circuito do eletrômetro acoplado ao sistema de câmaras para medida de carga induzida com I = câmara interna, E = câmara externa e C' = conector UHF. O D.E.C. entra neste sistema fazendo contato com e induzindo cargas em mantido pelo eletrômetro no potencial zero. O valor da carga é medido como o produto da voltagem V e da capacitância C .

CAPITULO V

MEDIDAS, RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CONCLUSÕES

5.1 - Efeito sombra

A experiência do efeito sombra, foi realizada com o objetivo de verificar se a quantidade de cargas residuais do eletreto no lado oposto ao de incidência dos neutrons era maior conforme a hipótese apresentada acima no item 3.1 do capítulo III.

O D.E.C de tipo A com parede de 0,55 mm de polietileno foi colocado numa posição fixa, encostado à fonte de Am - Be do IFQSC, com seu eixo perpendicular à direção de incidência dos neutrons e variando apenas o tempo de exposição.

A câmara interna, acoplada ao eletrômetro para medida da carga indutiva foi reduzida a um setor angular de 120° conforme figura 13, com a finalidade de que a leitura da carga fosse feita em apenas uma faixa longitudinal do eletreto.

Medidas de carga inicial e residual foram feitas inserindo o D.E.C. no sistema de câmaras, girando-o e registrando sua carga em intervalos de 40 graus até completar uma volta.

Os dados obtidos foram colocados numa representação polar, segundo figura 14, na qual notamos que a medida que o D.E.C. ficava um tempo maior no campo de radiação de neutrons, a compensação da carga foi maior do lado encostado à fonte, chegando a ser praticamente zero. Porém do lado oposto, como pode ser observado, a compensação não foi tão pronunciada, produzindo um efeito, por nós chamado de " Sombra ".

No item 3.1 do capítulo III, citamos que a camada conversora de polietileno no D.E.C. está situada num setor angular ao redor do eletreto e do lado de incidência dos neutrons. Esta camada não existe do lado oposto porque os protons não são retroespalhados e portanto não contribuirão com ionizações no gás para compensar a carga do eletreto na parte posterior. Tal efeito, apresentará uma constância das cargas do lado posterior ao da incidência dos neutrons e redução das cargas no lado encostado à fonte.

Um outro D.E.C. do tipo B, cujas dimensões, com exceção do diâmetro, são semelhantes às do dosímetro do tipo A, foi submetido ao mesmo experimento. O resultado como pode ser visto na figura 15, não evidencia o " efeito Sombra ".

A explicação para tal fato é que o setor angular que contém o alcance do proton no polietileno é maior neste dosímetro, fazendo com que o proton espalhado consiga

compensar a carga situada no lado oposto ao de incidência dos neutrons.

Figura 13 - Câmara interna do sistema de indução para medir Efeito Sombra.

Figura 14 - Efeito sombra para o D.E.C. do tipo A, onde os neutrons da fonte de Am-Be incidindo na direcao de 0 produzem uma acentuada reducao da carga do eletreto deste lado, finalizando com uma sombra do lado posterior ao da incidencia.

Figura 15 - Dosímetro de eletreto do tipo R submetido a experimentação do Efeito Sombra. Como pode ser notado o Efeito Sombra é pouco evidenciado para este dosímetro.

5.2 - Dependência com a Espessura da Parede

O estudo do comportamento do D.E.C. para neutrons rápidos variando as espessuras de polietileno foi feito baseado no modelo apresentado no capítulo III. Do referido modelo, temos que a resposta do D.E.C. para neutrons rápidos é dada pela expressão

$$R = \phi \cdot A \cdot N \sigma_d \cdot \frac{dE/dx \cdot \Delta x}{2} \cdot e/w \cdot g \quad (C/s) \quad v.1$$

De acordo com tal expressão se tivermos espessura de parede menor do que o alcance do proton no polietileno devemos esperar uma resposta proporcional às espessuras.

Considerando que na colisão frontal o neutron de energia média de 4,5 MeV proveniente de uma fonte de Am - Be, ao colidir com o núcleo do átomo de hidrogênio entrega toda sua energia ao proton de recuo, o alcance deste proton será de 360 μm no polietileno.

Um D.E.C. tipo B com espessuras de parede de polietileno de 0 μm , 160 μm e 550 μm foi exposto ao campo de neutrons da fonte de Am - Be do IFQSC e sua carga residual medida foi registrada. Deste registro a sensibilidade para cada espessura foi obtida e colocada na figura 16 de sensibilidade versus espessura de parede.

Com tal representação comprovamos que a resposta da câmara com a espessura da parede é linear.

Ainda com relação à curva dada, notamos que na ausência de polietileno, obtivemos uma resposta diferente da esperada, que seria nula. Como o dosímetro nestas condições tem parede somente de alumínio, supusemos que o neutron estaria convertendo no alumínio e que íons de alumínio estariam compensando a carga do eletreto. Posteriormente veremos que tal hipótese não corresponde a realidade.

diferentes espessuras de parede de polietileno. A curva obtida confirma a dependência linear da resposta do D.E.C. com as espessuras de parede. Veja expressão (), o intercepto revela uma resposta do D.E.C. para o raio gama da fonte de Am-Re na parede de alumínio. Esta resposta aumentou com a parede de chumbo em proporção da densidade.

5.3 - Dosímetro de eletreto num campo mixto de radiação

Com relação ao ensaio da dependência da resposta do D.E.C. sobre diferentes espessuras de parede, notamos que sem polietileno a resposta da câmara não foi nula, isto é, não havia ainda uma compensação da carga do eletreto que não era ocasionada pelos prótons de recuo.

O neutron poderia estar convertendo no alumínio, e portanto, ions de alumínio com energia cinética dada pela expressão (5)_A estaria fazendo a compensação. Se este fato ocorresse, deveríamos esperar que ao colocarmos um material com Z mais alto, por exemplo chumbo, a compensação da carga seria reduzida porque a energia cinética dos ions do chumbo seria reduzida ainda mais.

Experimentamos então com uma espessura de 2mm de chumbo no dosímetro tipo B e para nossa surpresa a resposta do D.E.C. para o chumbo foi maior do que para o alumínio, como pode ser visto na figura 16, negando a hipótese da conversão do neutron nos referidos metais.

Com esta experiência, ficou evidenciado a existência da radiação gama cuja conversão Compton é proporcional as densidades do Al e do Pb.

O raio gama provém da seguinte reação:

Para medir o fluxo destes raios gama, decidimos fazer um espectroscopia gama da fonte de Am-Be do IFQSC.

Utilizamos um detector de cintilações com cristal de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI:Tl), acoplado a um sistema linear eletrônico de amplificação, análise de altura de pulsos e teletipo para registro das contagens (segundo o diagrama apresentado na figura 17). O detector foi previamente calibrado com o radioisótopo ^{137}Cs cujo espectro de sua radiação gama é mostrado na figura 18.

A figura 19 apresenta o espectro de radiação gama da fonte de Am-Be numa representação mono-log de contagem versus canal que é proporcional à energia. Neste espectro notamos a presença de três picos nítidos separados pela energia $m_0c^2 = 0,51 \text{ MeV}$ (dentro do erro experimental).

Estes picos são característicos de um único raio gama com 4,46 MeV que entra no cristal cintilador e produz um único par pósitron-eletron. Os satélites de energia

3,96 MeV e 3,46 MeV são as respostas do cintilador quando escapam respectivamente um e dois raios gama de 0,51 MeV provenientes da radiação de aniquilação do pósitron.

O raio gama de 4,46 MeV acompanha a reação (3) onde o ^{12}C representa o primeiro estado excitado do ^{12}C . A fração das reações que deixam o carbono no estado excitado determina a razão entre o fluxo de raios gama de 4,46 MeV e o fluxo de neutrons rápidos. Esta razão pode ser determinada utilizando a eficiência absoluta do cintilador de NaI:Tl, publicada por Heath (1957)³⁰ e reproduzida na fig. 20. Destas curvas, a resposta no pico de energia total de 4,46 MeV a uma distância de 100 cm obtivemos a eficiência de $2,8 \times 10^{-5}$.

Experimentalmente com a distância de 100cm entre a fonte de Am-Be do IFQSC e o cintilador, obtivemos 22 cps no pico de energia total. Atribuímos uma incerteza de 20% a este número, devido à incerteza em separar este pico do fundo dos raios gama de captura.

Dividindo o número de contagens pela eficiência temos uma produção de $7,9 \times 10^5$ gamas de 4,46 MeV por segundo. Este número deverá ser corrigido devido à atenuação no encapsulamento, cujas dimensões e densidade referidas no apêndice II, nos levam a concluir que os raios gama e os neutrons têm que atravessar 4 cm de chumbo e portanto os raios gama são atenuados pelo fator :

$$\exp[-(\mu/\rho) \cdot \rho \cdot x] = 0,197$$

V.2

onde $\mu/\rho = 0,035 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$ é o coeficiente de atenuação de massa de (Evans 1979) do raio gama de 4,46 MeV, principalmente devido ao efeito Compton.

A produção de neutrons rápidos, cuja determinação pode ser vista no apêndice II é de $8,15 \times 10^6 \text{ n/s}$. Estes neutrons espalham elasticamente no chumbo porém quase todos conseguem sair sem serem capturados.

Desta forma, determinamos a atividade da fonte do raio gama de 4,46 MeV como $4,0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ e a probabilidade de $0,5 \pm 0,1$ de produzir carbono no estado excitado com subsequente emissão de raio gama de 4,46 MeV. Esta deve ser a probabilidade da emissão gama de 4,46 MeV característica de qualquer fonte de neutrons de Am-Be porém não encontramos uma confirmação, pois outros trabalhos ignoram este raio gama.

Nesta experiência detetamos também outras radiações gama. A de 2,23 MeV, um fundo contínuo fraco e raios discretos a 1,40 MeV e 0,86 MeV. A primeira provavelmente vem da captura dos neutrons no hidrogenio segundo a reacção (1) e as últimas provavelmente de captura em ferro e chumbo (materiais de encapsulamento). Estas radiações mostram que a fonte do IFUSC tem seu espectro modificado.

Os raios gama de 60 KeV do Americium não foram detetados por motivos instrumentais.

Desta experiência, percebemos que o dosímetro de eletretos para neutrons rápidos pode ser utilizado num campo mixto de neutrons e radiação eletromagnética, discriminando um dos dois tipos com apenas a escolha do tipo de parede utilizada, ou seja, chumbo para medir radiação eletromagnética e plástico hidrogenado para medir neutrons.

Figura 17 - Esquema do sistema de detecção para radiação gama utilizando o cristal de iodeto de sódio ativado com talio (NaI:tl).

Figura 18 - Espectro da radiação gama do ^{137}Cs , utilizado para calibração do detetor (NaI:tl).

figura 19 - Espectro de radiação soma da fonte de Am-Be do IFQSC. O detector utilizado foi um cintilador de NaI:tl com $7,5 \times 7,5$ cm, a distancia fonte-detector foi de 100 cm e o tempo para levantar o espectro foi de 25 minutos.

Figura 20 - Curvas da eficiência absoluta do cintilador de NaI:tl. A curva superior mostra a fração da contagem que aparece no pico de 4,46 MeV do espectro (veja figura 19). A eficiência efetiva utilizada é o produto das duas curvas a 4,46 MeV multiplicada por $(40/100)^2$ que leva em conta a correção para a distancia. As curvas foram construídas a partir dos dados de Health (1975).

5.4 - Dependência com o volume do D.E.C.

A sensibilidade de um D.E.C. indica a capacidade que tal dosímetro tem de fornecer uma resposta maior ou menor para uma dada fonte de radiação ionizante.

Para um dado D.E.C. a sua sensibilidade vai ser o número de cargas que é compensado com relação a um parâmetro de medida da radiação, por exemplo : exposição, dose ou o tempo de exposição à fonte.

Dados dois dosímetros A e B, com espessuras de ar preenchedor diferentes, sendo que o dosímetro de B é maior do que o de A, podemos esperar que o número de ionizações no gás que preenche a câmara B será maior e portanto haverá também uma maior compensação da carga do eletreto produzindo uma sensibilidade também maior.

Da expressão (V.1), temos que a resposta da câmara depende da área, frontal, de incidência dos neutrons no dosímetro e do raio do dosímetro, como a área também depende do raio do dosímetro devemos esperar como resposta do D.E.C. uma dependência quadrático do raio.

Para observar esta dependência foram utilizados, dois dosímetros de eletretos A e B com raios $r_A = 0,75$ cm e $r_B = 3,00$ cm respectivamente.

Os procedimentos de carga e medida de carga foram feitos de maneira usual apresentada no início deste capítulo.

Os comportamentos destes dosímetros são mostrados na figura 21, onde as sensibilidades foram obtidas com $S_A = 0,018 \text{ nC / hr}$ e $S_B = 0,33 \text{ nC / hr}$.

Comparando as respostas dos dois dosímetros para radiação de neutrons rápidos com a razão quadrática dos raios temos :

$$\frac{S_A}{S_B} = 18$$

$$\left(\frac{r_A}{r_B}\right)^2 = 16$$

Com estes resultados, confirmamos que o D.E.C. para neutrons rápidos tem uma dependência quadrática com o raio.

Figura 21 - Resposta do D.E.C. para neutrons rápidos variando o volume da câmara. A escala de tempo para o dosímetro A encontra-se na parte inferior da figura ao passo que para B se encontra na parte superior.

5.5 - Utilização de Parede Conversora a Gás

A câmara de ionização com eletreto para neutrons rápidos, como já vimos, se baseia na conversão de neutron - proton em parede hidrogenada.

Para um D.E.C. com parede hidrogenada sólida como o polietileno, vimos que sua resposta seria dada pela equação III.2 como

$$R = \phi \cdot A \cdot N \sigma_{Ap} \cdot (dE/d\eta x) \cdot \int \frac{\Delta x}{2} \cdot e/w \cdot g \quad (C/s)$$

A área A do dosímetro, frontal à incidência dos neutrons, também depende do raio do dosímetro. Portanto a resposta do D.E.C. como foi vista no item anterior terá uma dependência quadrática do raio.

A parede conversora utilizada, pode ser um gás hidrogenado também. Para tal, a probabilidade de conversão será dada por $N \sigma \frac{\Delta x}{2}$ com $\frac{\Delta x}{2}$ igual à espessura do gás dentro do dosímetro. Portanto devemos esperar que a resposta do D.E.C. com a parede conversora a gás se comporte da seguinte maneira:

$$R = \phi \cdot \Delta x \cdot h \cdot N \sigma (\Delta x/2) \cdot (dE/d\eta x) \cdot \int (\Delta x/2) \cdot e/w \cdot g \quad (C/s) \quad V.3$$

Esta resposta tem uma dependência cúbica do raio, e quadrática da densidade ou da pressão do gás. A

dependência quadrática da densidade ocorre porque sendo N a quantidade de protons existente no material, ela tem a seguinte dependência com a densidade :

$$N = A_0 \cdot \rho (n/M) \quad V.4$$

onde A é o número de Avogadro, ρ a densidade do material, M a massa molecular e n o número de hidrogênios por moléculas.

Desta análise notamos que podemos fazer uso simultâneo da pressão do gás e das dimensões da câmara para variar bastante a eficiência do detetor, já que tais fatores possuem potências altas.

Utilizamos um dosímetro do tipo B, com conversor de polietileno numa primeira fase e posteriormente o mesmo dosímetro com conversor de gás butano (C_2H_6) nas condições normais de pressão e temperatura.

A quantidade de protons no polietileno e sua densidade são respectivamente $A_0 \rho_p$ 2 / 14 e $0.95 \text{ g} / \text{cm}^3$ sendo que no gás butano são dadas por $A_0 \rho_g$ 5 / 29 e $0.00059 \text{ g} / \text{cm}^3$. Considerando ainda a densidade do ar como $0.001293 \text{ g} / \text{cm}^3$, o alcance do proton no polietileno de 0.0368 cm e a espessura do gás conversor 6 cm , devemos esperar que a razão entre as respostas do D.E.C. nas

condições de parede sólida e gasosa como :

$$\frac{R_{\text{polietileno}}}{R_{\text{butano}}} = \frac{f_{\text{pol.}} \cdot \frac{2}{14} \cdot f_{\text{ar.}} \cdot 4 \cdot A_p}{f_{\text{but.}} \cdot \frac{5}{29} \cdot 6 \cdot f_{\text{but}}} = \frac{0,95 \cdot 0,001293 \cdot 4 \cdot 0,0368 \cdot 29}{(0,00259)^2 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 14} = 3,6$$

O dosímetro foi irradiado pelos neutrons rápidos de energia média de 4,5 MeV da fonte de Am - Be do IFQSC numa posição fixa, encostado à fonte.

O comportamento do D.E.C. para as duas fases com e sem gás conversor, foram registradas na figura 22 cujas sensibilidades são respectivamente ,72 nC / hr e 0,33 nC / hr. Da razão entre estas respostas, surpreendentemente notamos que o D.E.C. com conversor de gás butano tem a sua sensibilidade dobrada, ao invés de reduzida a um quarto, comparativamente com a do polietileno.

A resposta para tal diferença teórica e experimental poderia residir nos fatores geométricos com detalhes da conversão de neutron - proton nos dois tipos de conversor. Ainda que estes detalhes precisam ser esclarecidos, é importante saber que a sensibilidade do D.E.C. também pode ser aumentada utilizando uma parede conversora a gás como citado no início.

Figura 22 - Variação da carga residual em função do tempo de exposição para o dosímetro de eletreto cilíndrico tipo B preenchido com ar e com gás butano nas CNTP.

5.6 - Dependência Energética.

Como foi visto no item 3.2 do capítulo III, a câmara de eletretos cilíndrica tem uma dependência na energia dos neutrons que varia de acordo com a região de energia.

Experimentos foram realizados Universidade de Wisconsin (WU), com neutrons de 14 MeV, no Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN) e no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) no Rio de Janeiro, com neutrons de 4,5 MeV com a finalidade de observar o comportamento das respostas do D.E.C. versus energia de neutrons.

Dois dosímetros de eletreto cilíndricos do tipo A, testados para reprodutibilidade foram usados nestas medidas.

A figura 23, mostra a carga residual de um dos dosímetros, como função da exposição a neutrons monocromáticos de 14 MeV fornecido pela reação (D,T), através do acelerador da Universidade de Wisconsin, onde a dose em rads, é precisamente relacionada aos parâmetros do acelerador e ao tempo de exposição.

Na figura 24, é vista uma proporcionalidade semelhante na carga residual do eletreto como função da exposição a fonte de neutrons de Am - Be do IPEN, onde o tempo de exposição a uma dada distância é relacionada a dose equivalente através do uso de um "rem-meter".

comercial recentemente calibrado com uma fonte de Am - Be padrão secundário (fornecida pelo Laboratório de Metrologia, França - março 1973).

Utilizando valores publicados, dos fatores de qualidade, figura 6, e fazendo a conversão de rem a fluência, obtivemos os seguintes resultados :

Local	Energia	Diretamente Observado	Normalizado ⁻⁹
WU	14	0,22 mC/rad	$1,35 \cdot 10^{-9} \text{ mC/m/cm}^2$
IRD	4,5	0,24 mC/rem	$3,90 \cdot 10^{-9} \text{ mC/m/cm}^2$
IPEN	4,5	0,35 mC/rem	$4,50 \cdot 10^{-9} \text{ mC/m/cm}^2$

Estes valores são colocados na figura 25, para comparação, na mesma figura também estão contidos os resultados teóricos esperados para o dosímetro de eletreto utilizado, tipo A, nas várias energias de neutrons.

Da simples análise feita, a baixa sensibilidade para neutrons de 14 MeV não é esperada. Uma vez que a espessura da parede é menor do que o alcance dos protons de 14 MeV, esperávamos que com uma espessura maior de parede pudessemos aumentar um pouco a sensibilidade, porém acreditamos que este aumento não será relevante. O que poderá aumentar a sensibilidade será a utilização de gás como conversor.

Figura 23 - Carga residual de uma câmara de ionização de eletretos tipo A, após ser irradiada com neutrons de 14 MeV proveniente do acelerador da Universidade de Wisconsin.

Figura 24 - Carga residual de uma câmara de ionização com eletretos, após ser irradiada com neutrons da fonte de Am-Be do IPEN.

Figura 25 - Dependência energética da carga produzida por fluência de neutrons em uma câmara de ionização por eletretos.

CAPITULO VI

CONCLUSOES FINAIS

Os resultados de nossas experiências com o D.E.C. para a dosimetria de neutrons rápidos somados às vantagens de linearidade da resposta com a quantidade de radiação incidente, a memória permanente do eletreto, seu baixo custo, e a facilidade de produção e medida de carga do eletreto nos laboratórios do IFQSC, transformam-no num dosímetro viável para a realidade brasileira.

Os principais resultados encontrados são os seguintes:

1 - O D.E.C. pode ser utilizado num campo misto de radiação de neutrons, e eletromagnética para medir uma das duas sem interferência da outra (Capítulo IV - 4.3).

2 - O modelo da resposta do D.E.C. para neutrons rápidos e a análise da dependência energética de neutrons nos possibilitam prever o comportamento de um D.E.C. particular num campo de radiação (Capítulo III - 3.1 e 3.2).

3 - Comprovação do comportamento do D.E.C. com o modelo apresentado em experiências variando a espessura do material hidrogenado e volume da câmara (Capítulo IV - 4.2 e 4.4).

4 - A sensibilidade do D.E.C. pode ser alterada significativamente utilizando-se um volume com gás conversor (Capítulo IV - 4.5).

5 - O efeito sombra, que indica a direção de incidência dos neutrons e é devido à compensação desigual da carga no eletreto (Capítulo IV - 4.1).

Resumindo, nosso trabalho demonstrou a viabilidade do D.E.C. na dosimetria de neutrons rápidos e foram investigados os principais aspectos da interação dos neutrons com o sistema.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

I - Estudar o comportamento do D.E.C. para vários tipos de gás conversor e dependência pressão.

II - Levantar as respostas do D.E.C. para várias fontes de neutrons de energias baixas e altas e estudar a possibilidade de ser transformado num "rem - meter".

III - investigar o uso do D.E.C. para dosimetria de neutrons lentos com conversão na parede e em gás conversor.

IV - Investidação ampla do D.E.C. para campos mixtos de neutrons e raios.

V - Investidação do dosímetro de eletreto plano (D.E.P.) nas experiências realizadas e sugeridas.

APENDICE I

1.1 - Cálculo da energia cinética de um átomo pesado após a colisão frontal com um neutron. No sistema de laboratório.

Fazendo uso da conservação da energia e momento antes e após a colisão das partículas citadas temos as seguintes equações:

Energia

Momento

$$V^2 = \overset{\downarrow}{m/M} (v_i^2 - v_f^2) \quad (1)_A$$

$$V = \overset{\downarrow}{m/M} (v_f + v_i) \quad (2)_A$$

Com:

m = massa de neutron M = massa do átomo

v_i = velocidade do neutron antes da colisão

v_f = velocidade do neutron após colisão

V = velocidade final do átomo pesado

Fazendo a razão entre (1)_A e (2)_A e multiplicando por m/M teremos:

$$V = (v_i - v_f) m/M \quad (3)_A$$

Adicionando (2)_A e (3)_A obteremos:

$$V = 2 v_i \frac{m}{M+m} \quad (4)_A$$

$$\therefore E_{\text{átomo}} = E_{\text{c}} \cdot \frac{4 M m}{(M+m)^2} \quad (5)_A$$

APENDICE II

DADOS SOBRE AS FONTES DE NEUTRONS UTILIZADAS

As fontes de neutrons de Am - Be que utilizamos (IFQSC, IRD e IPEN) utiliza emissão de partículas alfa do isótopo ^{241}Am , com meia vida de 433 anos, para produzir neutrons a partir da reação

Esta reação é a mesma utilizada por Chadwick para a descoberta do neutron em 1932 (Kaplan 1970).³¹

Sendo que as partículas alfas do Am - Be têm energias de 5,49 MeV e 5,44 MeV (85 % e 13 % respectivamente) como pode ser vista na tabela VIII, as energias dos neutrons devem ser superiores a 10 MeV.

A figura 26 obtida do ICRU 13 (1969),³² mostra vários espectros superpostos de neutrons da fonte Am - Be obtidos por Geiger e Hardsrove; Greiss; Taylor e Thompson e Saldin e Walter. Estes espectros mostram uma distribuição quase contínua de energias de neutrons menores do que a esperada, visto que esta pode ser reduzida por :

- 1) - Ionização no material pelas alfas antes da reação.

2) - Pela energia cinética do ^{12}C imposta pela conservação da quantidade de movimento depois da reação.

3) - Pelo fato que ^{12}C às vezes fica num estado excitado de 4.46 MeV acima do estado fundamental.

A energia média dos neutrons produzidos nesta reação é citada como 4.5 MeV.

A mistura de Am e Be é encapsulada em alumínio ou aço inoxidável para evitar a contaminação do ambiente. As fontes do IRD e do IPEN por nós utilizadas se apresentam como um cilindro de aço inoxidável de aproximadamente 5 x 5 cm .

A fonte do IFQSC tem um encapsulamento cilíndrico adicional aparentemente em aço inoxidável que faz com que as dimensões totais sejam 9 cm de diâmetro e 32 cm de comprimento. O peso é de 29,85 Kg e o volume de 2,810 cm³ (medido pelo deslocamento da água). A densidade obtida da razão destas medidas é de 10,62 g/cm³ que mostra que o material de encapsulamento é na sua maior parte constituído de chumbo (densidade 11.32 g/cm³).

A produção de neutrons da fonte do IFQSC foi obtida através da intercomparação com a fonte padrão do IRD, através de medidas de dose equivalente versus distância entre centro da fonte e o centro do detetor (feitos com um 'rea counter' da 'Nuclear Enterprise', tipo 0552/117-5941 levando em conta o decaimento da fonte, tabela IX e a

correção da resposta do detetor, figura 27. Os dados obtidos são mostrados na figura 28, onde para a fonte do IFQSC obtivemos a produção de $8,15 \times 10^6$ n / s.

As taxas de emissão de neutrons das fontes de $\text{Am} - \text{Be}$ do IRD e IPEN em 1982 foram respectivamente $11,2 \times 10^6$ n / s e $4,95 \times 10^6$ n / s.

Neutrons monocromáticos com energia de 14 MeV proveniente da reação (D, T) produzida pelo acelerador da Universidade de Wisconsin, também foram utilizados neste trabalho em fevereiro 1982 e sua taxa de dose no ponto de radiação foi de 0,51 rad / seg.

Figura 26 - Espectro de neutrons da fonte de Am-Be obtidos por diferentes pesquisadores : Geiger e Hardsgrove (1964), Greiss (1968), Thompson e Taylor (1965) e Salsir e Walker (1967). Esta apresentação foi tirada do ICRU 33 (1980).

DETECTOR RESPONSE
REQUIRED (ICRP) RESPONSE

Figura 27 - Resposta do detetor em função da energia de neutron comparada com a unidade de razão de dose equivalente do ICRP. Resposta do detetor da Nuclear Enterprise em função da energia de neutron comparada com o efeito biológico (segundo figura 1.c). Estes resultados foram tirados do catálogo do "rem-meter" da Nuclear Enterprise.

Figura 28 - Curvas das taxas de dose equivalentes versus distâncias, utilizadas para calibração da fonte de Am-Be do IFQSC. O detetor utilizado foi o "rem-meter" da Nuclear Enterprise.

VIII
TABELA IX

Dados sobre o radioisótopo de ²⁴¹Am, preparados por
Fleming, 33

meia vida	tipos de decaimento	tipos de radiação, Energias (MeV) e Abundâncias(%)	
		Partículas	fontes
433 anos	α, γ, e^-	α 5,49(85) 5,44(13)	γ .060(36) Np raios X

TABELA IX

Decaimento de uma fonte de ²⁴¹Am.

YEARS	MONTHS											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1 9999	9999	9997	9996	9995	9993	9992	9991	9989	9988	9987	9985
1	9984	9983	9981	9980	9979	9977	9976	9975	9973	9972	9971	9969
2	9959	9967	9965	9964	9963	9962	9960	9959	9958	9956	9955	9954
3	9952	9951	9950	9948	9947	9946	9944	9943	9942	9940	9939	9938
4	9936	9935	9934	9932	9931	9930	9928	9927	9926	9924	9923	9922
5	9920	9919	9918	9916	9915	9914	9912	9911	9910	9908	9907	9906
6	9904	9903	9902	9900	9899	9898	9896	9895	9894	9893	9891	9890
7	9889	9887	9886	9885	9883	9882	9881	9879	9878	9877	9875	9874
8	9873	9871	9870	9869	9868	9866	9865	9864	9862	9861	9860	9858
9	9857	9856	9854	9853	9852	9850	9849	9848	9847	9845	9844	9843
10	9841	9840	9839	9837	9836	9835	9833	9832	9831	9830	9828	9827
11	9826	9824	9823	9822	9820	9819	9818	9816	9815	9814	9812	9811
12	9810	9808	9807	9806	9805	9803	9802	9801	9799	9798	9797	9795
13	9794	9793	9792	9790	9789	9788	9786	9785	9784	9782	9781	9780
14	9778	9777	9776	9775	9773	9772	9771	9769	9768	9767	9765	9764
15	9763	9762	9760	9759	9758	9756	9755	9754	9752	9751	9750	9748
16	9747	9746	9745	9743	9742	9741	9739	9738	9737	9735	9734	9733
17	9732	9730	9729	9728	9726	9725	9724	9723	9721	9720	9719	9717
18	9716	9715	9714	9712	9711	9710	9708	9707	9706	9704	9703	9702
19	9700	9699	9698	9697	9695	9694	9693	9691	9690	9689	9688	9686

B I B L I O G R A F I A

- 1- Martin, A. & Harbison, S.A. - An Introduction to Radiation Protection, London, Chapman and Hall Ltd., 1972.
- 2- Wang, C.C. & Robbins, L.L. "Biological and Medical Effects of Radiation". In: Radiation Dosimetry. 3ed, New York, Academic Press, 1982.
- 3- Bushong, S.C. - Radiologic Science for Technologists, Saint Louis, The C.V. Mosby Company, 1975.
- 4- Gross, B.; Faria, R.M. & Ferreira, G.L. - J. Appl. Phys. 52, 2, 571 (1981).
- 5- Panepucci, H.; Mascarenhas, S. & Terrile, C. - Bone as Dosimeter. In: First Latin American Conference on Physics in Medicine and Radiation Protection, São Paulo, February 28 - March 3, 1972. p. 574.
- 6- Caracelli, I. & Terrile, M.C. - Propriedades dosimetrica dos ossos. São Carlos, Instituto de Física e Química, USP, 1982. (Tese de Mestrado).
- 7- Vanderoost, C. & Mascarenhas, S. - Fricke dosimeter with Ion-Exchange Membranes. In: ABFM tenth Anniversary. Conference, São Paulo, ago 28-set 6.
- 8- Vargas, H.; Cesar, C.L. & Mascarenhas, S. - Dosimetria com Espectroscopia Foto-Acústica (submetido a publicação no Health Physics - 1982).
- 9- Mascarenhas, S. & Zimmerman, R.L. A New Electret Dosimeter. In: ABFM tenth Anniversary Conference, São Paulo, ago 28-set 6. 1979. p. 488.
- 10- Cameron, J. & Mascarenhas, S. - A cylindrical Electret Ionization chamber. In: ^{Nucl. Instrum. Methods 175, 117, 1980} the 6th International Conference on Solid State Dosimetry, Toulouse, France, 1-4 April. 1980.

- 11- Campos, L.L.; Caldas, L.V.E. & Mascarenhas, S. - Dosímetro de Eletreto para Radiação Beta. In: 34a Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Campinas, 6-14 jul.(1982). p.268. 1
- 12- Campos, L.L.; Caldas, L.V.E. & Mascarenhas, S. - Dosimetria beta na faixa de 50 a 500 μ Gy. In: 34a Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Campinas, 6-14 jul.(1982). p.268. 2
- 13- Campos, L.L.; Caldas, L.; Suarez, A.A. & Mascarenhas, S. - Um Novo dosímetro de eletretos para neutrons rápidos. In: 34a. Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Campinas, 6-14 jul. 1982.p.267. *Caldas, L.; Suarez, A.A. & Mascarenhas, S. - Health Physics vol 4, no 5, 1977*
- 14- Auxier, J.A.; Snyder, W.S. & Jones, T.D. "Neutron Interactions and Penetrations in Tissue". In: Radiation Dosimetry. 2^{ed}. Academic Press, 1968. V.1, Cap.6, p.280.
- 15- Andersson, I. Ö. & Braun, J.- A Neutron rem counter with Uniform sensitivity from 0,025 eV to 10 Mev. In: Symposium on Neutron detection dosimetry and Standard, Harwell, England, 10-14 dez. 1962.p.87.
- 16- Gross, B. "Radiation-Induced charge Storage and Polarization-Effects". In: Electrets, Springer-Verlag, 1980. V.33, cap.4. p.217-284.
- 17- Mascarenhas, S. "Bioelectrets: Electrets in Biomaterials and Biopolymers". In: Electrets, Springer-Verlag, 1980. V.33, cap.6, p.321-346.
- 18- Sessler, G.M. & West, J.E. - "Applications". In: Electrets, Springer-Verlag, 1980. V.33. cap.7 p. 347-381.
- 19- Bauser, H. & Ronge, W. - Health Phys. 34, 97 (1977).
- 20- Ikeya, M. Miki, T. - Health Phys. 39, 797 (1980).
- 21- Ikeya, M. - Response of the electret dosimeter to neutron and gamma ray fields. In: KEK Symposium on radiation dosimetry. OHO, Ibaraki, Japan, 4-5 Dec. 1979.

- 22- Roulleau, J.; Bui, A.; Lisbon, A.; Morucci, J.P.; Ricard, M. & Segui, Y. - Acta Radiologica Oncology. 20, 2, 143 (1981).
- 23- Evans, R.D. - The Atomic Nucleus - New Delhi, Tata Mc Graw-Hill Publishing company Ltd, 1979.
- 24- Boag, J.W. " Ionization Chambers". In: Radiation Dosimetry. 2 ed. Academic Press, 1966. V.2, cap. 9, p.1-72.
- 25- ICRU, International Commission on Radiation Units, ICRU. Publ. 33. Washington 1980.
- 26- Hine, G. - Radiation Dosimetry. 3ed, New York, Academic Press, 1982.
- 27- Tauhata, Luiz. - Radioproteção e Dosimetria I, 1982 (Publicação do Instituto de Radioproteção e Dosimetria).
- 28- ICRP, Internacional Commission on Radiation Units, UCRU - Publ. 21. Washington 1973.
- 29- Moreno, R. A. & Gross, B. - J. Appl. Phys. 47, 8, 3397 (1976).
- 30- Health, R.L. - Scientillation Spectrometry gama-Ray Spectrum Catalogue, Phillips Petroleum Co. Atomic Energy division, Idaho 1957.
- 31- Kaplan, I. - Física Nuclear - Madrid, Aguilar S.A. de ediciones, 1970.
- 32- ICRU, International Commission on Radiation Units, ICRU - Publ. 15. Washington 1969.
- 33- Fleming, M.R. - Radioisotopes decay tables, Atomic Energy of Canada, Ottawa.