

CONSTRUÇÃO DE UM DETETOR PROPORCIONAL PARA MEDIDA DE BAIXA ATIVIDADE

Cândido Justino de Melo Neto

ORIENTADORA: Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA, COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

Fortaleza - dezembro de 1995

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M485c Melo Neto, Cândido Justino de.

Construção de um detetor proporcional para medida de baixa atividade / Cândido Justino de Melo Neto. - 1995.

86 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Física, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Maria Marlúcia Freitas Santiago.

1. Carbono. 2. Pressão. I. Título.

CDD 530

**CONSTRUÇÃO DE UM DETETOR PROPORCIONAL
PARA MEDIDA DE BAIXA ATIVIDADE**

Cândido Justino de Melo Neto

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre.

Comissão Julgadora:

Maria Marlúcia Freitas Santiago (UFC)

- Orientadora -

Alfredo Nelson Cabral Serejo (UFC)

Sperô ~~Penia~~ Morato (IPEN)

Aprovada em 07 de dezembro de 1995.

Agradeço ao meu criador por toda
inspiração deste trabalho

Dedico este trabalho:

ao meu pai Luiz (in memoriam),

à minha mãe Raimunda, ao meu tio (pai) Sebastião,

à minha esposa Diony,

aos meus filhos Leonardo, Cristiane e Alexandre,

*e aos meus irmãos Raimundo, Celeste, Tujara,
Suely, Leonor, Luís e Reinaldo.*

AGRADECIMENTOS

À profa. Maria Marlúcia Freitas Santiago, minha orientadora, pela dedicação e orientação, pela discussão científica e apoio de todas as horas e principalmente pela coragem, dedicação e paciência comigo na orientação deste trabalho.

Ao prof. Horst Frischkorn, pelo apoio experimental, discussões científicas, companheirismo de sala e pela leitura do texto.

Ao prof. Josué Mendes Filho, pelo apoio, ajuda e discussões para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Daniel Xavier Gouveia e Ivan Carnaúba Accioly pelas valiosas discussões sobre a eletrônica dos detetores.

Ao chefe da oficina mecânica, Francisco Sales de Lima, pelo apoio de todas as horas e ajuda na confecção dos detetores.

À Carminha pelo apoio de todas as horas especialmente pelo trabalho de admissão e retirada de gás no contador e ao Antônio José de Melo Lima da UFC e Raimundo Nonato da UFMA pelos desenhos e à Joana.

À profa. Carla Maria Salgado Vidal Silva pelo apoio e leitura do texto final.

Aos funcionários do Depto. de Física da UFC Ronaldo Pereira da Silva, Ismael, Mazinho, Sr Aduino, Vezamar, Everton Prata, Edimar Lima, Regina particularmente aos funcionários da Pós-Graduação, Almiran, Ana Cleide e Rejane.

Aos professores do Depto. de Física da UFC, em particular aos Profs. Antônio Fernandes Siqueira e José Francisco Julião pelo apoio e a todos os colegas da Pós-Graduação.

Ao Departamento de Física da UFMA, pela paciência e apoio, particularmente ao prof. Antônio Jeferson de Deus Moreno pela amizade.

Ao Magnífico Reitor da UFMA, prof. Aldy Mello de Araújo, ao diretor do Centro de Tecnologia da UFMA, prof. Pedro Berniz, ao Pró-Reitor de Administração da UFMA, Prof. Raimundo Palhano Silva, ao Coordenador da PPG, prof. Clovis Silva Carneiro e à diretora do DRH, Ana Rita Botão

À FAPEMA, por um ano de Bolsa de Estudos.

À Fundação Sousa Andrade pelo apoio na pessoa do Presidente Dr. Raimundo Nonato Souza de Aquino.

E por fim gostaria de agradecer:

aos professores da UFMA, Buna, José Lima Assunção, Luiz Pimentel, Antônio Carlos, Raimundo Antônio e Ariovaldo e Arionivio, Pinto, Siqueira, Ivone, Consuelo, Rute, às secretárias Conceição e Elizabeth, da UNAM, Dr. Eugênio Ley-koo, da IFUG, Dr. Gustavo Lopes e Dr. Gerardo Moreno, da UFR Benedito Lopes,

à Maria de las Dolores Gonzales Torres, Luis Felipe, Enrique Cardone, Alexandre Tarine Dr. Maximiliano e Henrique Franco

que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

A todos os irmãos das Lojas “Faro del Centro” e “7º Dia Nº 32” pelo apoio e amizade.

ABSTRACT

We developed a gas proportional detector to measure the carbon-14 activity (β^- decay). The samples used are acetylene which is kept at a pressure of 1 atm. The detector developed is going to be used with samples of low volume (about 0.2 g of carbon). It has only 29% in volume of that constructed by Dr. Geyh/Hannover/Germany which is used in our Carbon-14 Laboratory. The detector has a background higher than expected. However its performance may be improved when using selected material with very low β^- contamination. The mean values of modern carbon are reported and the results are in good agreement comparison those obtained by the Geyh's detector (deviation of 4 % to 5 %) which is of international standard. The comparison is more favorable when Geyh's detector is filled with a 'background gas' when measuring small samples in order to produce the pressure of 1 atm.

RESUMO

Construímos um detetor proporcional a gás para medida da atividade do carbono-14, emissor β^- em amostras de acetileno a pressão de uma atmosfera. Com 29 % do volume do detetor em uso no laboratório de carbono-14 construído pelo Dr. Geyh, Hanover, ele se destina a medida de amostra com 0,2 g de carbono. A impossibilidade de procedimentos capazes de determinar baixíssimas atividades nos materiais com os quais construímos o detetor impossibilitou atingir valor de contagem de fundo no nível de contagem previsto. Mesmo assim, o detetor é capaz de discriminar e medir baixas atividades em amostras de volume pequeno. O uso de materiais com contaminação radiativa extremamente baixa faria com que este detetor atingisse excelente desempenho por sua simplicidade e fácil montagem. Comparamos os valores medidos com os valores determinados com o detetor Geyh, de padrão internacional, obtendo um erro de 4 a 5 % no valor da percentagem do carbono moderno e compatível com o erro quando é feita a mistura com “gás de fundo” para produzir a pressão de uma atmosfera no detetor Geyh.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	(i)
ÍNDICE	(ii)
ÍNDICE DE FIGURAS	(iv)
ÍNDICE DE TABELAS	(vi)
1. INTRODUÇÃO	01
2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE DETETOR PROPORCIONAL	05
2.1 Detetores de Ionização Gasosa	06
2.2 Detetor Proporcional Cilíndrico	08
2.3 Tempo de Desenvolvimento de um Pulso	10
3. CONSTRUÇÃO DE DETETOR PROPORCIONAL	14
3.1 Montagem do Detetor	20
4. ELETRÔNICA ASSOCIADA AO DETETOR	22
4.1 Sinal de Saída do Detetor	23
4.1.1 Transmissão do Sinal	24
4.2 Conectores	26
4.3 Conexões do Detetor com a Alta Tensão e o Pré-Amplificador	27
4.3.1 Circuito de Diferenciação ou Filtro Passa-Alto	30
4.3.2 Circuito Integrador ou Filtro Passa-Baixo	31
4.4 Pré-Amplificador	33
4.5 Amplificador	37
4.6 Discriminadores	39
4.6.1 Discriminador de barreira	39
4.6.2 Discriminador diferencial	40
4.7 Unidade de coincidência	41
4.8 Unidade de Contagem	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 Especificações do Detetor	44
5.2 Condições de Operação do Detetor Proporcional	47
5.3 Tempo de Desenvolvimento do Sinal	48
5.4 Limiar de Tensão	50

5.5 Diferenciação dos Pulsos	56
5.6 Medidas de Percentual do Carbono Moderno	59
6. CONCLUSÕES	66
7. BIBLIOGRAFIA	69
8. ANEXOS	73
A.1 Radioatividade	74
A.2 Fenômenos de ionização	76
A.3 Origem do carbono ¹⁴	79
A.4 Cálculo da contagem média e da percentagem do carbono moderno	81
A.5 Exemplo 1	84
A.6 Exemplo 2	85
A.7 Exemplo 3	86

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 - Voltagem e número de íons coletados nas diferentes regiões de operação	06
Figura 2.2 - Detetor proporcional cilíndrico	08
Figura 2.3 - Distribuição espacial de cargas formando uma avalanche no detetor	09
Figura 2.4 - Desenvolvimento de uma avalanche em torno do fio central	09
Figura 2.5 - Tempo de desenvolvimento de um pulso	13
Figura 3.1 - Detetor com cátodo de quartzo metalizado com prata	16
Figura 3.2 - Detetor com cátodo de quartzo metalizado com prata	19
Figura 4.1 - Características do pulso de saída do detetor	23
Figura 4.2 - Vista do corte de um cabo coaxial	24
Figura 4.3 - Circuito equivalente de comprimento unitário de linha de transmissão	25
Figura 4.4 - Conectores para cabos coaxiais	26
Figura 4.5 a - Circuito para conectar o detetor central ao pré-amplificador e à alta tensão	28
Figura 4.5 b - Circuito para conectar o detetor central ao pré-amplificador e à alta tensão	29
Figura 4.6 - Circuito diferenciação	30
Figura 4.7 - Filtro RC passa-baixo ou circuito integrador	32
Figura 4.8 - Filtragem de ruído por integração	32
Figura 4.9 - Curva característica de tensão de saída em função da frequência	33
Figura 4.10 - Esquema básico de um pré-amplificador de sensibilidade de carga	34
Figura 4.11 - Esquema básico de um pré-amplificador de sensibilidade de tensão	35
Figura 4.12 - Esquema para montagem de pré-amplificador	36
Figura 4.13 - Cauda de um pulso e pilhas de pulsos	37
Figura 4.14 - Diagrama do amplificador	38
Figura 4.15 - Operação do discriminador com um limiar	39
Figura 4.16 - Analisador de sinal com um canal	40
Figura 4.17 - Sistema para medida de coincidência	41
Figura 5.1 - Diagrama de bloco do sistema de contagem	46
Figura 5.2 - Taxa de contagem em função da tensão aplicada no detetor	48
Figura 5.3 - Pulsos no detetor interno	49
Figura 5.4a - Taxa de contagem do padrão NBS em função da tensão com o limiar de 6 mV	51

Figura 5.4b - Taxa de contagem do padrão NBS em função da voltagem com o limiar de 9 mV	52
Figura 5.4c - Taxa de contagem do padrão NBS em função da voltagem com o limiar de 10 mV	53
Figura 5.5a - Taxa de contagem de fundo em função da voltagem com o limiar de 9 mV	54
Figura 5.5b - Taxa de contagem de fundo em função da voltagem com o limiar de 10 mV	55
Figura 5.6 - Fator no erro do pMC em função do percentual da amostra na mistura com gás de fundo	64
Figura A.1 - Natureza das radiações nucleares	75

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 - Material utilizado na construção do detetor	18
Tabela 4.1 - Propriedades de alguns cabos coaxiais	25
Tabela 4.2 - Propriedades dos conectores coaxiais mais comuns	27
Tabela 4.3 - Componentes do pré-amplificador	36
Tabela 4.4 - Componentes de um amplificador	39
Tabela 5.1 - Dados do detetor proporcional e do gás	44
Tabela 5.2 - Campo elétrico, potencial, tempo de desenvolvimento do pulso e corrente máxima em função da voltagem	50
Tabela 5.3 - Taxas de contagem R_{ac} , R_{ex} e R_{co} dos padrões P20 e ∞ 72 e amostras FZ 624 e FZ 634	57
Tabela 5.4 - Taxa de contagem líquida em função do tempo de diferenciação do pulso	60
Tabela 5.5 - Taxa de contagem e percentual do carbono moderno das amostras FZ 624 e FZ 634	63

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A datação pelo método do carbono-14 foi introduzida por Anderson e Libby em 1947 (Libby, 1967) e desde então, várias técnicas foram desenvolvidas para medida da atividade do carbono-14 ambiental que é de 13,5 desintegrações por minuto por grama de carbono ($\text{dpm g}^{-1} \text{C}$) (Polach, 1984) e de amostras com menor atividade do que a ambiental.

Nas primeiras datações feitas por Libby as amostras eram medidas como carbono puro com uma preparação muito trabalhosa; o detetor precisava ser desmontado em cada análise e a eficiência era muito baixa, da ordem de 5 % (De Vries e Barendsen, 1953).

Somente em 1952 um estudo de comparação entre o detetor de Libby e um detetor a gás, mostrou as vantagens deste último tipo de detetor. O gás escolhido inicialmente foi o dióxido de carbono por ter uma preparação menos trabalhosa e felizmente se prestar muito bem como gás de contagem. No início o gás era usado em detetor Geiger e só em 1952 o dióxido de carbono foi utilizado em um detetor proporcional.

Desde então as medidas de baixa atividade passaram a ser feitas por equipamentos conhecidos como Contadores de Baixa Atividade, “Low-Level Counting”. Os equipamentos que usam radiometria são:

(i) Contadores proporcionais a gás (GPCs) medindo amostras como dióxido de carbono (CO_2) (De Vries e Barendsen, 1953; Fergursson, 1955 e muitos outros), metano

(CH₄) (Burke, Jr e Meinshein, 1955 e Diethorn, 1956) ou acetileno, que foi utilizado inicialmente por Barker (1953), Crathorn (1953) e Suess (1954).

(ii) Contadores de cintilação líquida (LSC) medindo benzeno, foram introduzidos em 1963 (Tamers, 1965).

Duas técnicas não radiométricas são também atualmente usadas; o acelerador de partículas que distingue as massas das espécies ionizadas do carbono 12, 13 e 14 e o laser baseado na determinação do momento vibracional do átomo do carbono-14. Estes dois métodos foram introduzidos em 1977.

Os detetores proporcionais a gás apresentam eficiência que varia de 75 % a 100 % (Broecker et al., 1959; Crathorn, 1953; Burke e Meinschein, 1955) enquanto os detetores de cintilação líquida que no início tinham eficiência de 42 % a 52 % usando amostras de acetileno (Audric e Lung, 1954) e de benzeno (Arnold, 1954 e Pringle et al., 1955) têm atualmente eficiência de 84 % (Oikawa, 1978).

A grande dificuldade em medir baixa atividade é discriminar a contagem de fundo que é no mínimo duas ordens de grandeza acima da atividade das amostras. Para diminuir a radiação de fundo o detetor deve ser construído com materiais sem contaminantes radioativos e:

(i) deve ser colocado dentro de um anel de detectores Geiger ou dentro de um detector do tipo anel (De Vries e Barendsen, 1953);

(ii) o conjunto de detectores deve ser colocado dentro de uma blindagem de chumbo e

(iii) um sistema de coincidência deve ser utilizado para filtrar a radiação cósmica.

Os detectores proporcionais foram construídos usando os mais diversos materiais. Em 1957, Nydal e Sigmond construíram um detector de aço inoxidável com um tubo de periscópio de submarino. Raeth e outros (1951) construíram um detector anel e fizeram um estudo comparativo entre ele e um anel de seis Geiger encontrando uma eficiência de medida da radiação cósmica de 97,5 % e 97,8% para os Geigers e o detector de multiarama.

Construímos um detector de 200 ml e calibramos uma eletrônica a ele associada que permite medir amostras com baixa atividade de carbono-14, com 29 % da massa de carbono que necessita o detector em rotina no laboratório de carbono-14 do Departamento de Física - UFC construído pelo Dr. Mebus A. Geyh, Hanôver. O detector tem a vantagem de uma construção simples especialmente quanto aos contatos elétricos e à vedação sem uso de cola. A impossibilidade de procedimentos capazes de determinar baixíssimas atividades nos materiais com os quais construímos o detector, impossibilitou atingir valor de contagem de fundo no nível de contagem previsto. Comparamos medidas feitas com os dois detectores constatando a boa qualidade do novo sistema.

Capítulo 2

PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE DETECTOR PROPORCIONAL

2.1 Detetores de Ionização Gasosa

A câmara de ionização, o detector proporcional e o detector de Geiger-Müller são aplicações do fenômeno de ionização gasosa em instrumentos clássicos. Nestes três detetores partículas e/ou radiação eletromagnética (Ver anexo A.1) ionizam um gás formando pares ion - elétron. Eles trabalham em diferentes condições de operação e exploram diferentes tipos de emissão radioativa. A figura 2.1 mostra um gráfico que especifica os números de pares de íons coletados em função da voltagem aplicada aos detetores (Kaplan, 1978).

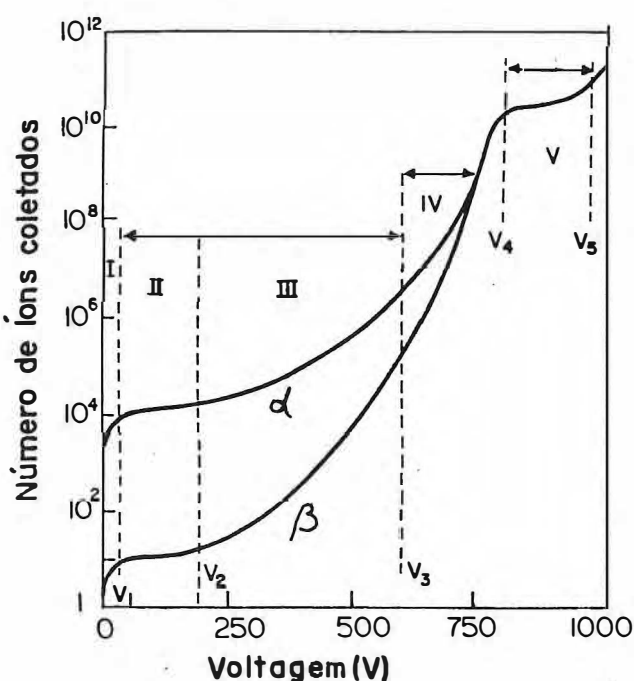


Figura 2.1 Voltagem e número de íons coletados nas diferentes regiões de operação. I: recombinação, II: câmara de ionização III: detector proporcional, IV: limite de proporcionalidade, V: Geiger Müller, partículas α e β (Sauli, 1977)

Na voltagem zero não há carga coletada e os pares íon - elétron se recombinam por atração coulombiana. Aumentando a voltagem, a força de recombinação é excedida

e a corrente começa a crescer porque mais e mais pares íon - elétron são coletados antes de recombinarem. Em determinado valor V_1 de voltagem, todos os pares criados são coletados e o aumento de voltagem não afeta a corrente, o que corresponde à região II onde trabalha a câmara de ionização e são geralmente usadas para medidas de radiação gama e para monitoramento de intensos fluxos de radiação (Kleinknecht, 1986).

Aumentando a voltagem de V_2 a V_3 os elétrons livres são acelerados a energias capazes de ionizar moléculas de gás; os elétrons liberados nesta ionização secundária também são acelerados, produzindo ainda mais ionização e o resultado é a ionização por avalanche ou cascata. Nesta região trabalham os detetores proporcionais, pois a ionização continua sendo proporcional à energia das partículas absorvidas pelo gás. O campo elétrico nestes detetores é extremamente forte ao redor do anodo e a avalanche ocorre a poucos micrômetros do fio central. O detetor proporcional oferece vantagens para medidas de partículas beta que produzem baixa ionização em relação às câmaras de ionização que não são suficientemente sensíveis para medida destas partículas.

Com o aumento da voltagem, atinge-se a faixa entre V_3 e V_4 , que é a faixa de limite de proporcionalidade. Nesta região a quantidade total de ionização cria distorções do campo elétrico ao longo do fio central (anodo), iniciando a saída da região de proporcionalidade. Aumentando a voltagem, atinge-se a região de V_4 a V_5 , onde opera o detetor Geiger-Müller, também conhecido como detetor Geiger. Neste detetor cada partícula que passa pelo gás produz ionização total do gás independentemente de sua energia.

Nesta região, com o aumento de voltagem, ao invés de uma simples avalanche localizada em algum ponto do anodo, pode ocorrer uma reação em cadeia de muitas avalanches espalhadas ao longo de todo o fio o promovendo descargas; se continuarmos a aumentar a voltagem podemos estragar o detetor, com possível ruptura do anodo e dano à eletrônica, especialmente ao pré-amplificador.

2.2 Detetor Proporcional Cilíndrico

Este detetor consiste de um cilindro com gás (figura 2.2), com paredes condutoras, ligado normalmente à terra, que pode receber radiação externa ou conter uma amostra de gás radioativo, como no caso de medida carbono-14 com amostra de acetileno. Ao longo do eixo central é colocado um fio condutor onde se aplica uma voltagem (V) positiva em relação ao cilindro.

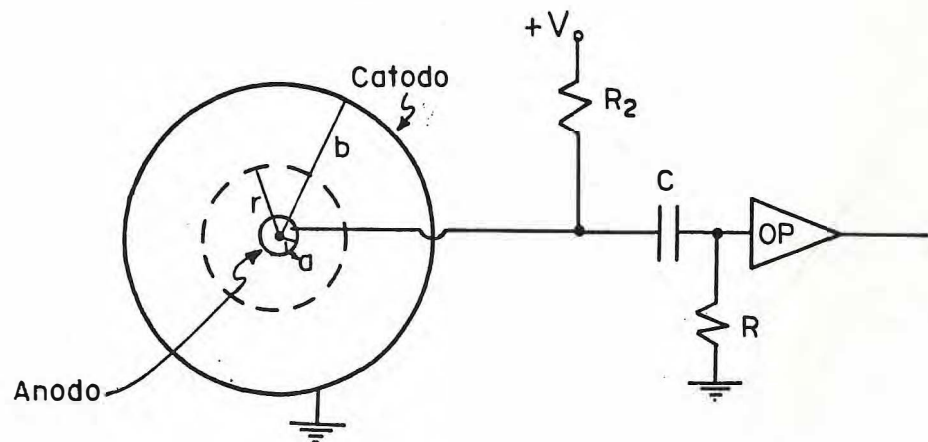


Figura 2.2 Detetor proporcional cilíndrico

Radiação excita e ioniza o gás produzindo pares de íon - elétron. O número de pares criados é proporcional à energia depositada no detetor. Sob o efeito do campo

elétrico entre o cilindro e o fio central, os elétrons são acelerados em direção ao anodo e os íons positivos em direção ao cátodo (Ver anexo A.2), como mostra a figura 2.3 e 2.4.

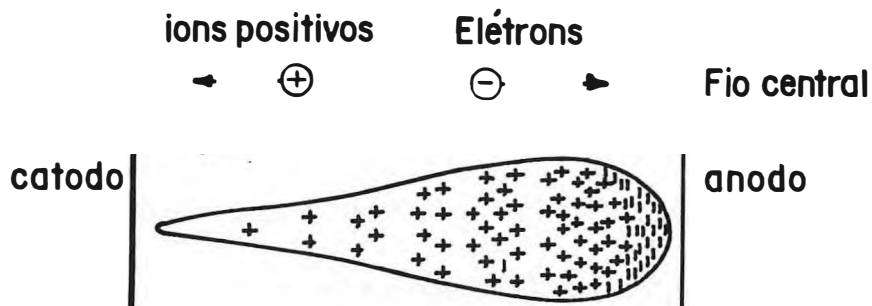


Figura 2.3 Distribuição espacial de cargas formando uma avalanche no detector
(Fonte: Sauli, 1977)

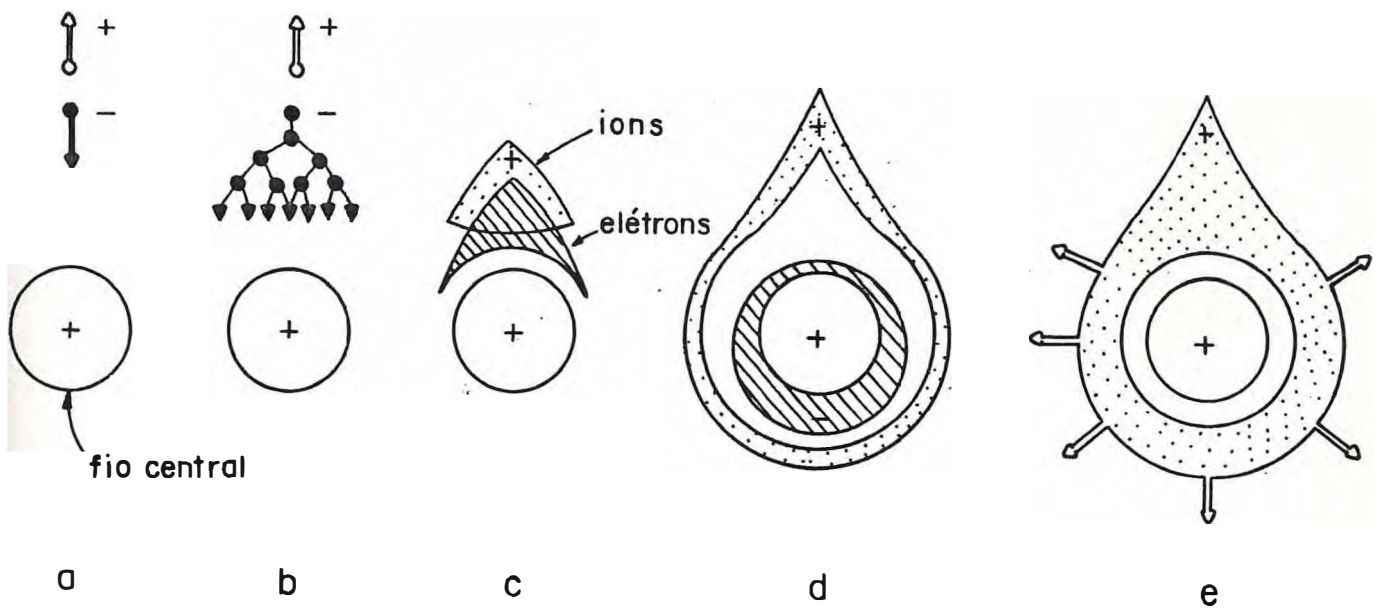


Figura 2.4 Desenvolvimento de uma avalanche em torno do fio central (Fonte: Sauli, 1977)

O campo elétrico nestes detetores é extremamente forte ao redor do anodo e uma avalanche (figura 2.4) ocorre a poucos micrômetros do fio central (anodo). Os elétrons são coletados no anodo no tempo de 1 ns enquanto os íons positivos se dirigem ao catodo com velocidade bem menor devido à massa maior.

2.3 Tempo de Desenvolvimento de um Pulso

Apresentamos nesta seção as discussões a cerca do tempo de desenvolvimento de um pulso em um detetor proporcional cilíndrico (Leo, 1987 e Sauli, 1977).

Aplicando uma diferença de potencial, V , entre o anodo e o catodo de um detetor proporcional cilíndrico de raio b e fio central de raio a (figura 2.2), o gás no detetor fica sob ação do campo elétrico radial $E(r)$ do capacitor cilíndrico.

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad \text{ou} \quad E(r) = \frac{CV}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.1)$$

e de um potencial

$$\varphi(r) = \frac{CV}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.2)$$

onde ϵ é a constante dielétrica do gás = 8,85 pF/m (Sauli, 1977)

C é a capacitância.

Da equação (2.1) temos a capacitância por unidade de comprimento do detetor expressa por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad (2.3)$$

Consideramos que em um detetor proporcional cilíndrico de comprimento ℓ , a ionização ocorre a uma distância r do fio central; logo, a indução total de voltagem pelos elétrons em função da carga Q é expressa por:

$$V^- = -\frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{a+r}{a} \quad (2.4)$$

enquanto para os íons positivos é:

$$V^+ = -\frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{b}{a+r} \quad (2.5)$$

O sinal total induzido no anodo é então:

$$V = V^- + V^+ = -\frac{Q}{\ell C} \quad (2.6)$$

e a razão entre as duas contribuições é:

$$\frac{V^-}{V^+} = \frac{\ln \frac{a+r}{a}}{\ln \frac{b}{a+r}} \quad (2.7)$$

Como foi limitada a distância para poucos micrômetros do fio central podemos ver pela equação (2.7) que a contribuição dos elétrons é pequena comparada com a dos íons positivos, sendo somente da ordem de 1% de V^+ ; conseqüentemente, podemos ignorar o movimento dos elétrons.

Com esta simplificação podemos calcular o desenvolvimento de um pulso (Sauli, 1977) integrando a equação:

$$V(t) = \int_a^{r(t)} \frac{dV}{dr} dr = -\frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{r(t)}{a} \quad (2.8)$$

Encontramos $r(t)$ através da equação da mobilidade de carga μ que é função da velocidade ω (dr/dt) e do campo elétrico $E(r)$ sendo definida por $\mu = \omega$. É conveniente utilizar a mobilidade específica para cada íon $\mu^+ = \omega^+ \left(\frac{E}{p}\right)^{-1}$ onde p é a pressão do gás. Como os íons positivos estão na região próxima do anodo, podemos usar $r(0) = a$. Assim,

$$r(t) = \left(a^2 + \frac{\mu^+ CV}{\pi\epsilon p} t \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Com as equações (2.8) e (2.9) temos:

$$\dot{V}(t) = -\frac{Q}{4\pi\epsilon\ell} \ln \left(1 + \frac{t}{t_0} \right) \quad (2.10)$$

$$\text{sendo } t_0 = \frac{\pi\epsilon p a^2}{\mu^+ CV}$$

O tempo total (t) de movimento dos íons é obtido na condição $r(t) = b$

$$t = \frac{\pi\epsilon p}{\mu^+ CV} (b^2 - a^2) \quad \text{ou} \quad t = t_0 \cdot (b^2 - a^2) \quad (2.11)$$

A figura 2.5 mostra a forma do pulso obtido por diferenciação com constante de tempo $\tau = RC$. No limite quando $R \rightarrow 0$ o sinal de corrente é dado por

$$i(t) = \ell C \frac{dV}{dt} = - \frac{Q \cdot C}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{t_0 + t}$$

e a corrente máxima quando $t = 0$ dada por,

$$i_{\max} = i(0) = - \frac{\mu^+ Q C^2 V}{4\pi^2 \epsilon^2 a^2 p} \quad (2.13)$$

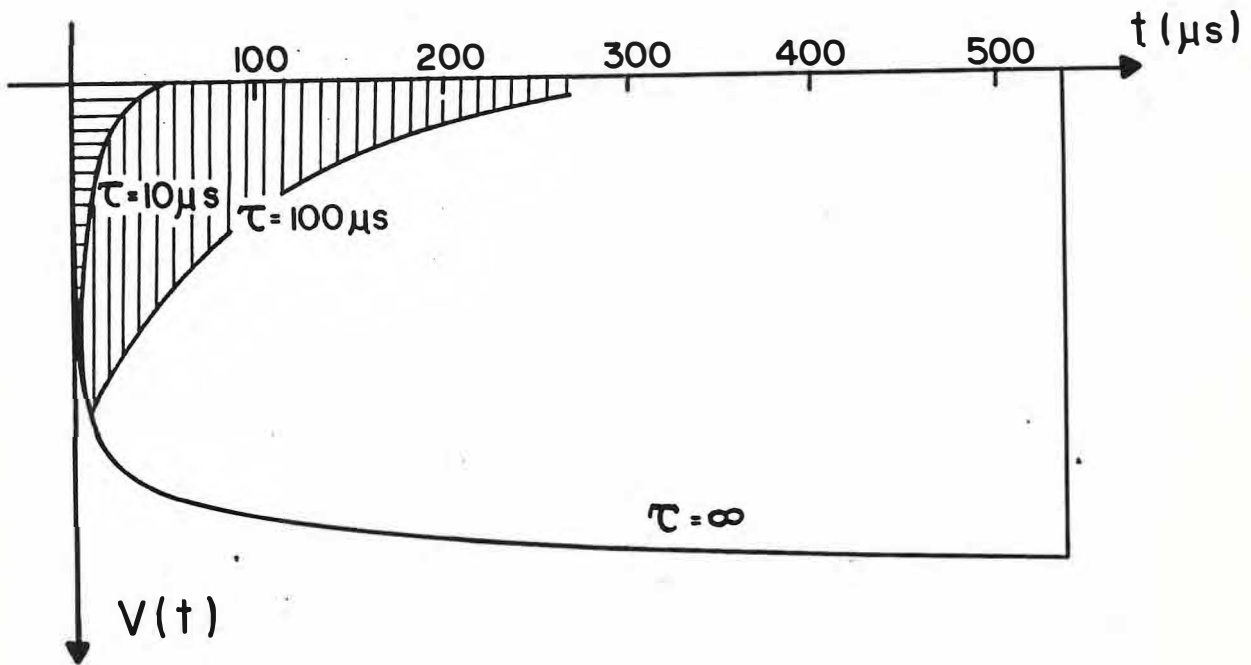


Figura 2.5 Tempo de desenvolvimento de um pulso. $V(t)$: pulso de voltagem (Fonte: Sauli, 1977)

Na figura 2.5 que mostra o tempo de desenvolvimento de um pulso em um detetor proporcional, t é o tempo total de deslocamento dos íons positivos deslocando-se da região do anodo para o catodo e $V(t)$ é o pulso de voltagem cuja forma depende da constante de diferenciação $\tau = RC$.

Capítulo 3

CONSTRUÇÃO DE UM DETETOR PROPORCIONAL

Apresentamos, neste capítulo, a construção de um detetor proporcional à gás para medida de baixa atividade do carbono-14, emissor de partículas β^- . Este detetor tem um volume de 200 ml e com ele podemos utilizá-lo para amostras de pequena quantidade já que o detetor em rotina no Laboratório de Carbono-14 da UFC exige um volume de 690 ml.

Projetamos um detetor cilíndrico de bronze funcionando o cilindro como catodo e um fio central de tungstênio funcionando como anodo, usando tampas de náilon tecnil para fechar o cilindro e discos de fibra cobreada de face dupla para fazer os contatos elétricos. Antes de montar este detetor fizemos as seguintes modificações no projeto:

(i) Em um primeiro passo, decidimos usar um tubo de quartzo metalizado com prata, dentro do cilindro de bronze passando a camada de prata a funcionar como catodo. A idéia da substituição foi diminuir a quantidade de bronze, que usualmente tem traços de contaminantes radioativos; no entanto, este detetor teria um volume morto com gás entre as paredes dos cilindros de bronze e de quartzo.

(ii) No segundo passo, usamos somente o tubo de quartzo (1) metalizado internamente mostrado na figura 3.1.a, fechado com tampas de náilon tecnil (2a e 2b) que pressionam os três flanges também de náilon (3). Entre os três flanges e as tampas de aperto (4) estão os orings (5) que também são pressionados quando as tampas 2a e 2b são rosqueadas.

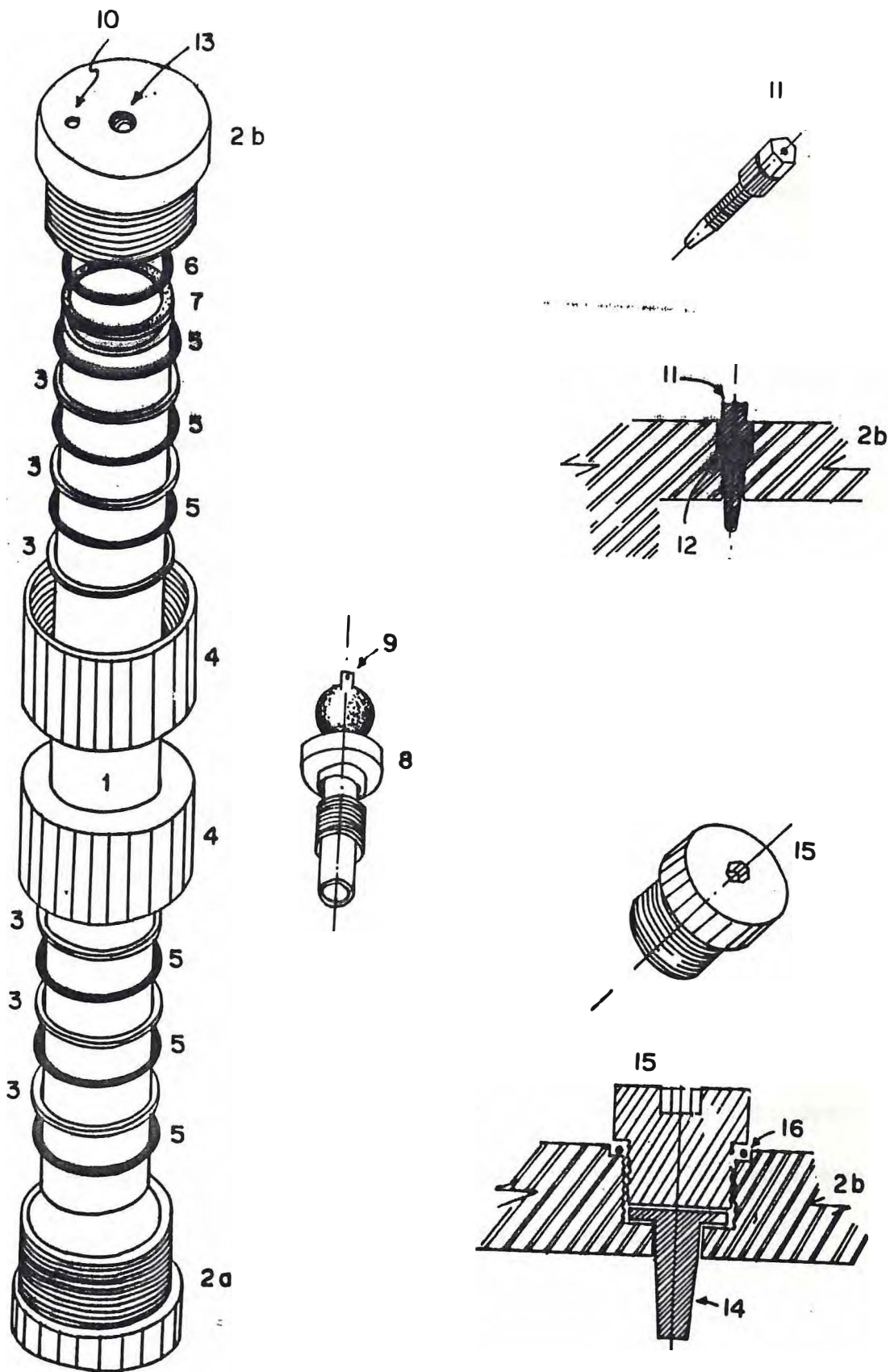


Figura 3.1 Detetor com catodo de quartzo metalizado com prata.

O oring 6 aperta o anel de cobre 7 contra o tubo de quartzo. Este anel de cobre foi prateado por cima para evitar oxidação pelo gás acetileno e para fazer contato com a prata metalizando internamente o tubo de quartzo.

Um conector 8 é fixo na tampa 2a onde são ligados os cabos para extração do sinal do detetor numa extremidade e na outra (9) é soldado o fio central. No outro lado do tubo, no orifício lateral da tampa 2b, é colocado a peça (11) para fixar a entrada de gás. Esta peça tem também as funções de vedação e de contato através de soldagem com o anel (7), servindo como aterramento. O tubo de conexão para a entrada do gás é rosqueado na peça (11) junto com um oring (12) de vedação e fixada na tampa de náilon (2b).

A tampa 2b tem um orifício central (13) para entrada da peça 14 que tem um orifício para permitir a passagem do fio central que é soldado na peça 14 depois de estirado até 0,7N. Para vedação é rosqueada a peça 14 juntamente com o oring (16).

(iii) Em um terceiro passo foi eliminado o maior número possível de componentes e com esse procedimento facilitar a construção do detetor e tornar mais fácil o reparo se houver rompimento do fio central. Construimos então, um conjunto de anéis de aperto (2), anéis de náilon (3) e orings (4) que estão mostrados na figura 3.2.

(iv) O disco de fibra parcialmente cobreado, que servia para os contatos elétricos, foi substituído por três contatos de cobre, um (6) colocado no centro da tampa (5a) e outro (7) no centro da outra tampa (5b) onde é soldado o fio central. No furo lateral da tampa (5b) é colocada a peça 9 que tem a função de permitir a passagem do

gás, utilizar o sistema de vácuo e de aterramento do catodo. O tubo tem suas bordas externas pintadas com prata em cerca de 0,5 cm. As tampas 5a e 5b são também pintadas internamente com cola prata em até 0,5 cm para contato com o tubo. O cabo de sinal do fio central é conectado em (6) pela parte exterior da tampa (5a).

O material e as dimensões das peças utilizadas na construção de detetor estão mostradas na tabela 3.1. A entrada do gás é feita através de um tubo de aço inoxidável com uma válvula metálica que é rosqueado ao conector (9).

Tabela 3.1 Material utilizado na construção do detetor . L: comprimento; I: espessura da parede ϕ_i e ϕ_e diâmetros interno e externo; w_i e w_e : roscas grossa interna e externa

Material	L (mm)	I (mm)	ϕ_i (mm)	ϕ_e (mm)	w_i	w_e
Tubo de quartzo (1)	284	1,5	30	33	-	-
Anéis de aperto dos orings (2)	34	4,5	42	51	10	-
Anéis de sede de orings (3)	9	3	33,5	39,7	-	-
Oring (4)	-	3,5	32	39	-	-
Tampa de náilon (5a) e (5b)	40	6	33,2	51	-	10
Bujão (8)	15	-	-	12	-	2
Fio de tungstênio	280	-	-	0,045	-	-

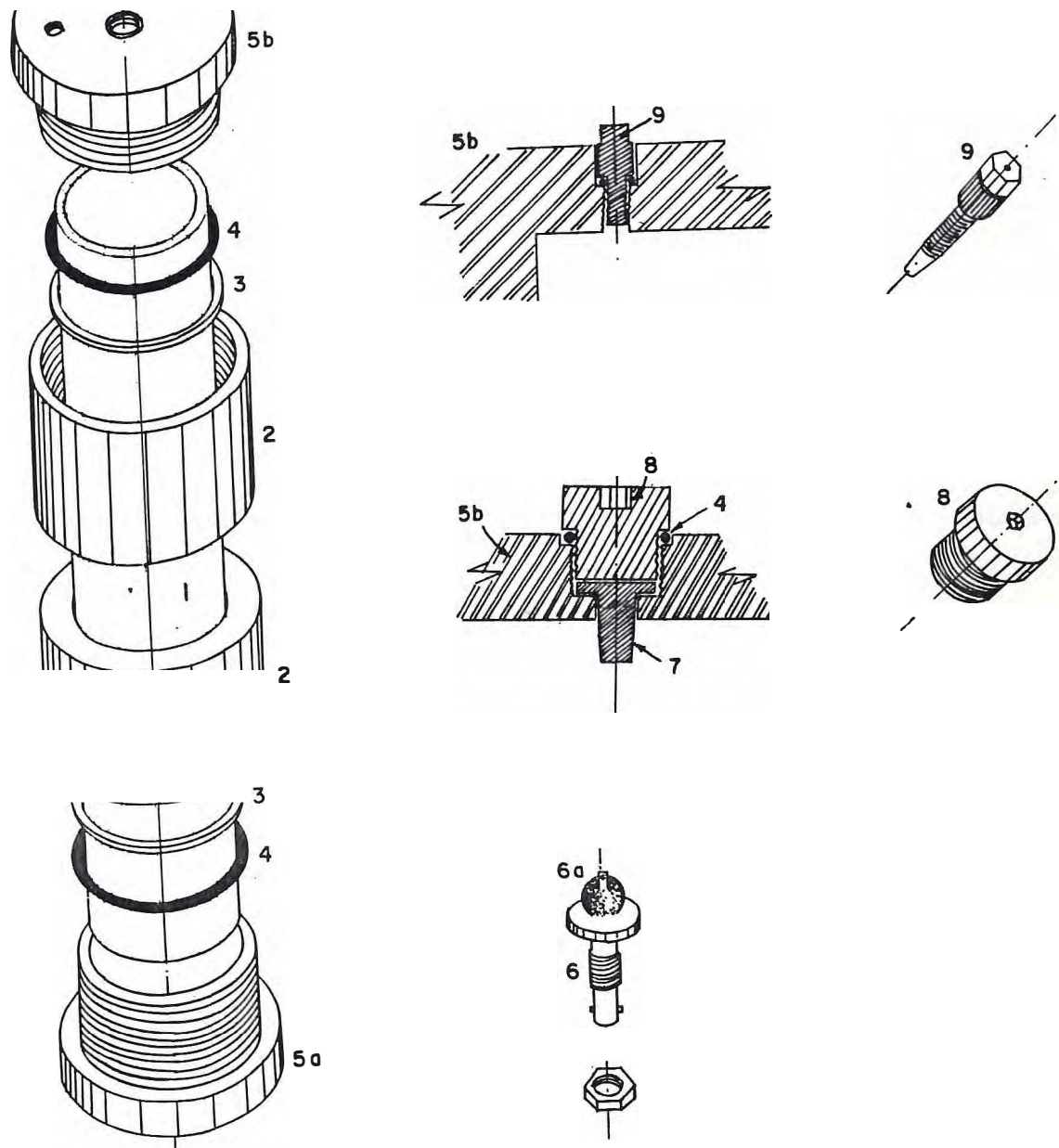


Figura 3.2 Detetor com catodo de quartzo metalizado com prata. 1 - cilindro de quartzo metalizado; 2 anéis de aperto 3 - anéis de náilon; 4 - orings; 5 - tampas de náilon; 6 e 7 - conectores; 8 - bujão; 9 - conexão da linha de vácuo

3.1 Montagem do detetor

Os passos seguidos na montagem do detetor mostrado na figura 3.1 são:

- 1) Fixar o tubo (1), horizontalmente, com a ajuda de duas garras.
- 2) Colocar no tubo os anéis de aperto (2), os anéis de náilon (3) e os orings (4).
- 3) Pintar internamente com cola prata as tampas de náilon 5a e 5b, para contato. A pintura deve ser feita somente onde há contato entre o tubo e tampa.
- 4) Colocar um arame através de um tubo de vidro fixo por um suporte com o objetivo de movimentá-lo por dentro do tubo de quartzo sem tocar nas paredes internas do mesmo.
- 5) Fixar o fio de tungstênio no arame e puxá-lo para atingir a outra extremidade do tubo.
- 6) Fixar com solda o fio de tungstênio no ponto 6a do conector 6 e depois instalá-lo na tampa 5a.
- 7) Pintar com cola prata uma faixa 0,5 cm da borda na parte exterior do tubo de quartzo para contato com a terra quando as tampas de náilon são ajustadas.
- 8) Colocar o tubo dentro da tampa 5a e apertar com um anel de aperto (2), rosqueando lentamente deixando a tampa (5a) para não danificar o fio.
- 9) Limpar o tubo de quartzo com aspirador de pó.
- 10) Medir a resistência da película de prata no tubo de quartzo, de uma das extremidades ao conector (6), para verificar os contatos.
- 11) Passar o fio pelo orifício central na tampa 5b e depois pelo conector (7).
- 12) O fio que passa pelo conector (7) é tencionado com um dinamômetro
- 13) Repetir o passo (7) na outra extremidade do tubo, colocar a tampa 5b e apertar lentamente com o anel de aperto (2) deixando a tampa (5b) fixa.

- 14) Colocar o tubo na vertical, esticar o fio de 45 μm de diâmetro com o dinamômetro até 0,7 N, ajustar o conector (9) à tampa e depois fixar com solda o fio no conector
- 15) Medir as resistências do fio central (ânodo) e do tubo prateado (catodo) que são respectivamente, 8 Ω no fio central e 42 Ω no catodo.
- 16) Colocar um oring no bujão (8) e enroscá-lo na tampa (5b)
- 17) Ajustar o conector (9) no orifício lateral da tampa (5b)
- 18) Soldar o fio de terra na parte externa da peça (9) que fica no orifício lateral da tampa (5b).
- 19) Encaixar o cabo de sinal na parte externa do conector (6) e na eletrônica

Capítulo 4

ELETRÔNICA ASSOCIADA AO DETETOR

4.1 Sinal de saída do detetor

Os sinais elétricos na saída do detetor proporcional aparecem na forma de pulsos, com as seguintes características: amplitude, largura, tempo de subida (t_s) e tempo de descida (t_d). A figura 4.1 mostra estes parâmetros. Os sinais podem ser bipolares ou unipolares, conforme podemos observar na mesma figura 4.

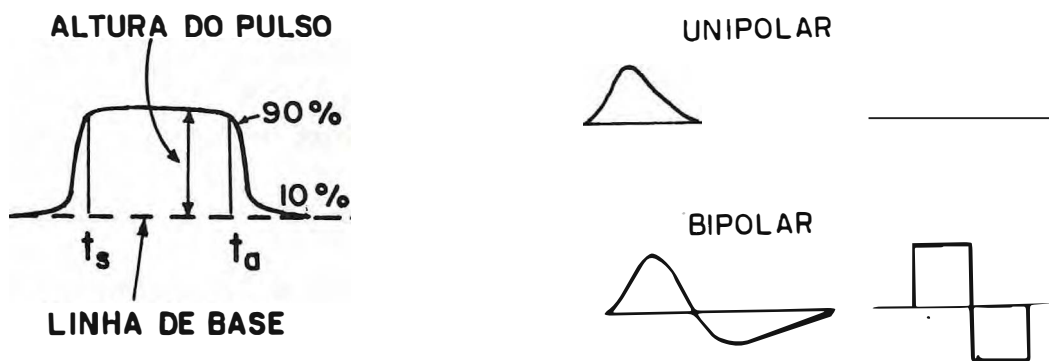


Figura 4.1 Características do pulso de saída do detetor (Fonte: Leo, 1987).

É importante distinguir entre os sinais rápidos e os sinais lentos; os primeiros têm tempo de subida da ordem de nanosegundos ou menos, enquanto os sinais lentos têm tempos de subida ordem de milhares de nanosegundos ou mais.

Os sinais rápidos são menos imunes a ruídos e distorções causadas por elementos parasitas no circuito cujas constantes de tempo podem ser da mesma ordem de grandeza do sinal. Uma fonte de problema dos sinais rápidos são as reflexões indesejadas nos cabos de interconexão, o que exige uma atenção especial nos circuitos de interconexão.

Devido a diferença entre tipos de interconexões, os equipamentos na área de eletrônica nuclear foram padronizados em duas linhas de projeto, no que diz respeito à interconexão de módulos; uma para sinais rápidos e outra para sinais lentos.

4.1.1 Transmissão do Sinal

A transmissão do sinal de saída do detetor para o sistema eletrônico é feita com um cabo coaxial curto para preservar a informação do sinal. O cabo coaxial consiste de cilindros concêntricos, um interno condutor de raio a e uma tela externa de raio b , os dois separados por um cilindro de material dielétrico conforme está mostrado na figura 4.2. A tabela 4.1 apresenta propriedades de alguns cabos coaxiais em uso.

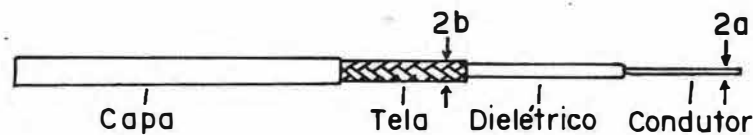


Figura 4.2 Vista do corte de um cabo coaxial

A figura 4.3 apresenta um circuito equivalente de um cabo coaxial, onde G é a condutância do dielétrico por unidade de comprimento e R é a resistência por unidade de comprimento. Para o cabo ideal, R e G são zero, indicando que não há perda de sinal.

Tabela 4.1 Propriedades de alguns cabos coaxiais. ϕ : diâmetro, R: impedância característica, C: capacitância, V : alta tensão, A: atenuação do sinal por metro (Fonte: Leo, 1987; Knoll, 1989)

Tipo de cabo	Material	ϕ (cm)	R (ohms)	V	C (pF/m)	A	
						Mhz	dB
RG-8/U	Poliétileno	1.03	52	5000	96.8	100	0.066
						400	0.154
RG-11/U	Poliétileno	1.03	75	5000	67.3	100	0.066
						400	0.138
RG-58/U	Poliétileno	0.50	53.5	1900	93.5	100	0.135
						400	0.312
RG-58C/U	Poliétileno	0.50	50	1900	100.1	100	0.174
						400	0.413
RG-59/U	Poliétileno	0.61	73	2300	68.9	100	0.112
						400	0.233
RG-62/U	Semi-sólido Poliétileno	0.61	93	750	44.3	100	0.102
						400	0.207
RG-174/U	Poliétileno	0.25	50	1500	101.0	100	0.289
						400	0.659
RG-178/U	TFE Teflon	0.18	50	1500	95.1	400	0.951
Cabo Coaxial com Dupla Blindagem							
RG-9/U	Poliétileno	1.07	51	5000	98.4	100	0.062
RG-233/U	Poliétileno	0.52	50	1900	101.0	400	0.135
						400	

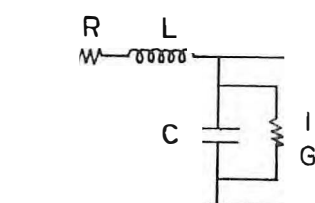


Figura 4.3 Circuito equivalente de comprimento unitário de linha de transmissão (Fonte: Leo, 1987)

4.2 Conectores

Os cabos coaxiais são acoplados com conectores do tipo macho e fêmea (plugs and jacks). Por convenção o macho é colocado no cabo coaxial e a fêmea no equipamento eletrônico.

Os conectores são de dois tipos: conectores de sinal para alta voltagem e conectores de cabo de sinal para pulso de baixa nível de voltagem. A figura 4.4 mostra vários tipos de conectores em uso e a tabela 4.2 mostra as propriedades dos conectores que devemos utilizar com segurança de trabalho.

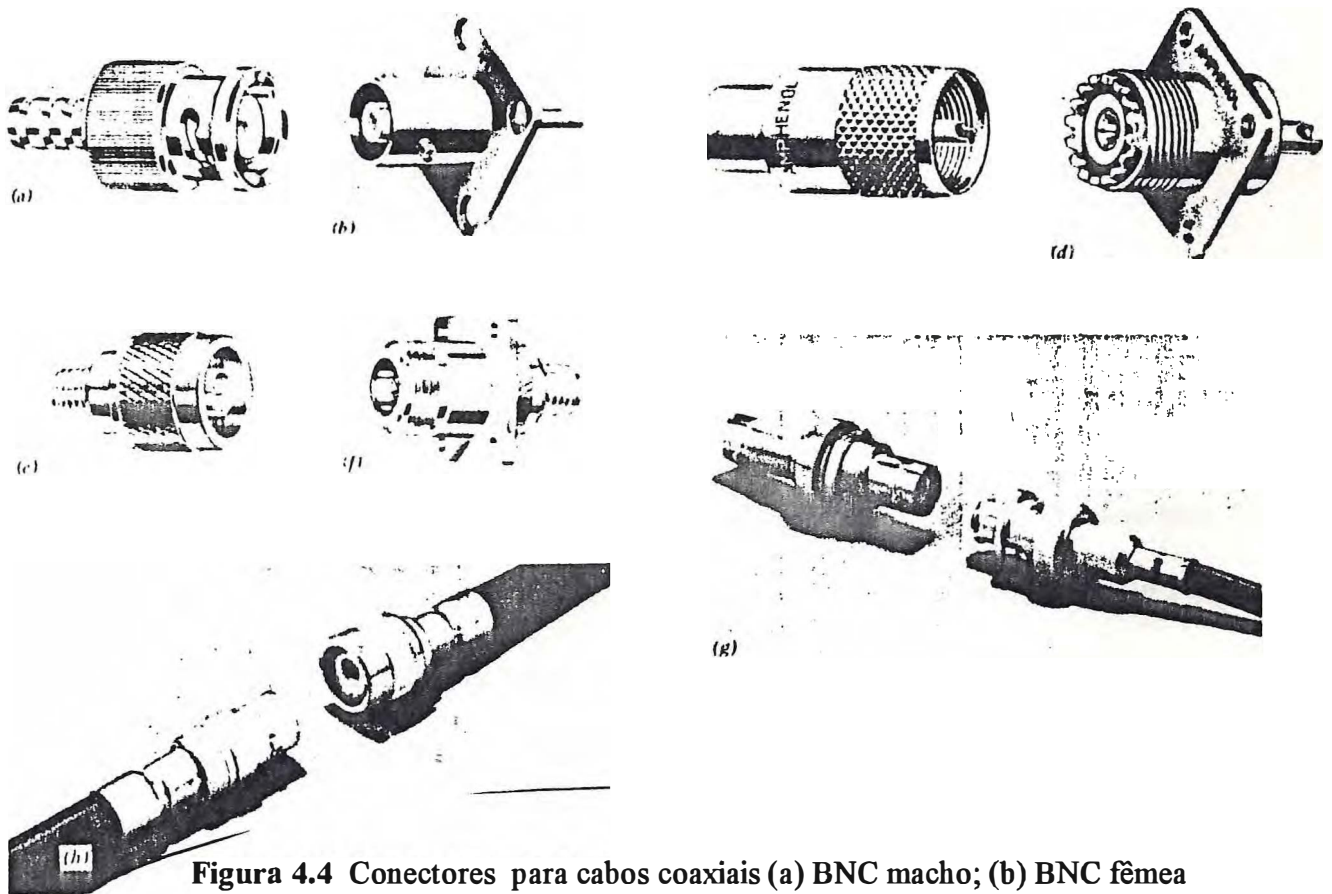


Figura 4.4 Conectores para cabos coaxiais (a) BNC macho; (b) BNC fêmea (c) UHF macho; (d) UHF fêmea (e) N macho; (f) N fêmea; (g) e (h) conexão macho e fêmea (Fonte: Knoll, 1989)

Tabela 4.2 Propriedades dos conectores coaxiais mais comuns
(Fonte: Knoll, 1989)

Conector Tipo	Voltagem máxima (V)	Impedância (Ohms)	Frequência máxima (GHz)	Acoplamento
UHF	500		0,3	
BNC	500	50	10	baioneta
TNC	500	50	10	
General	1000	50	18	ação de mola
Microdot	1500	50, 70 ou 93	2	
50 CM	500	50	4	interruptor
HN	5000	50	4	
MHV	5000		0,1	baioneta
SHV	5000	50	10	baioneta

4.3 Conexões do Detetor com a Alta Tensão e o Pré-Amplificador

A figura 4.5 mostra os circuitos utilizados para conectar os detetores central e externo com a alta tensão e com o pré-amplificador. Estes circuitos foram adaptados do circuito de entrada do pré-amplificador Camberra (1977). Os valores das capacitâncias entre parênteses correspondem ao circuito utilizado no contador externo.

A resistência de carga R (figura 4.5a e 4.5b) é normalmente de $10\text{ M}\Omega$ a $22\text{ M}\Omega$. Ela é um resistor de polarização do detetor e serve como filtro adicional separando o circuito de alimentação do detetor e o circuito diferenciador. Se os detetores usados possuem corrente de fuga maior que $10\text{ }\mu\text{A}$, a voltagem através do resistor deve ser levada em conta, ou alternativamente o valor de R_2 deve ser reduzido para produzir uma voltagem aceitável mas R_2 não deve ter valor abaixo de $1\text{ M}\Omega$

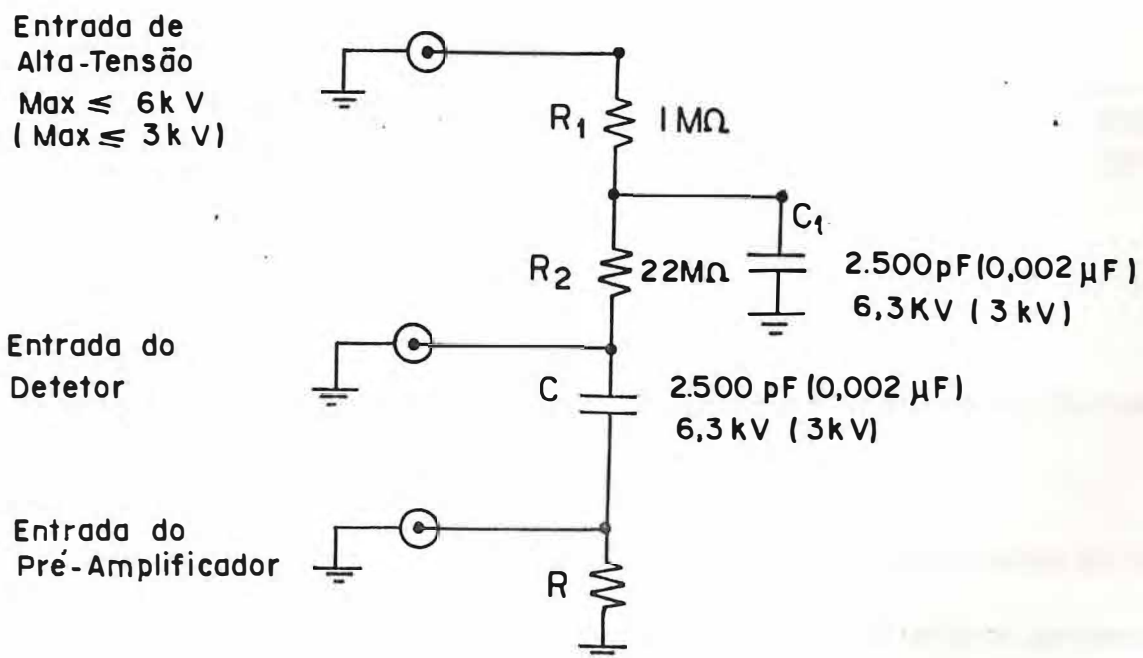


Figura 4.5a Circuito para conectar o detetor central ao pré-amplificador e à alta tensão. Os valores entre parênteses se referem ao detetor externo (Fonte: modificado de Camberra, 1977).

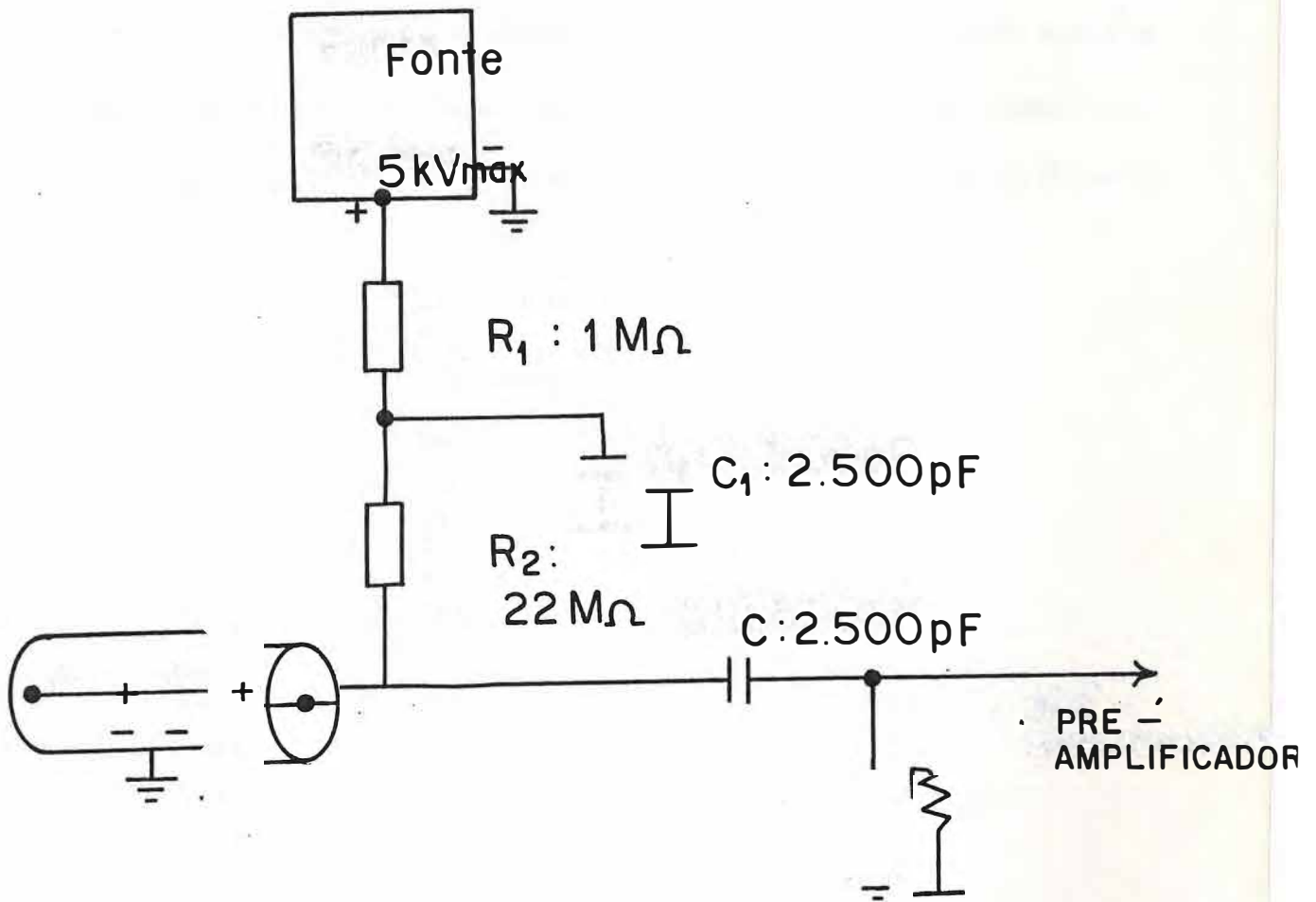


Figura 4.5b Circuito para conectar o detetor central ao pré-amplificador e à alta tensão.

A resistência R e a capacitância C determinam a constante de tempo do circuito. Esta constante é normalmente escolhida para ter valores de μs de tal forma que somente os componentes do sinal que crescem rapidamente, são preservados. O acoplamento do capacitor C é necessário para bloquear valores de tensão constante e corrente contínua entre o detetor e o pré-amplificador. Os componentes R_1 e C_1 são o filtro passa baixo.

4.3.1 Circuito de Diferenciação ou Filtro Passa-Alto

O detetor proporcional tem em sua saída um circuito de diferenciação com uma constante de tempo $\tau = R C$ (Figura 4.6). Este circuito consiste de um capacitor e um resistor que agem como um filtro de baixa frequência atenuando as frequências abaixo de $\frac{1}{2\pi RC}$ (Leo, 1987).

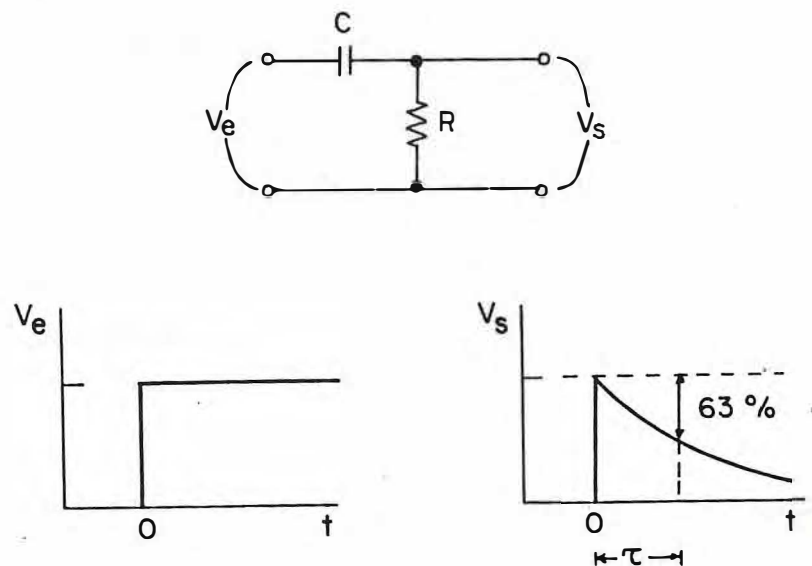


Figura 4.6 Circuito de diferenciação (Fonte: Knoll, 1989)

Para pequenas constantes de tempo, a função do circuito é produzir uma tensão de saída V_s proporcional à derivada temporal da tensão de entrada V_e ; daí o nome diferenciador. Para chegar a estas condições, a constante de tempo deve ser pequena quando comparada com a duração do pulso a ser diferenciado. Assim, o pulso de entrada no circuito somente será diferenciado se a constante de tempo for pequena quando comparada com a largura do pulso.

Para ondas senoidais de alta frequência, a reatância capacitiva $\chi_c = \frac{1}{2\pi fC}$ onde, f é a frequência, assume valores baixos em comparação com o valor da resistência de modo que a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada.

Para ondas de baixa frequência, a reatância capacitiva assume valores altos em comparação com o valor da resistência atenuando a tensão de saída para um valor praticamente nulo. Dessa maneira o filtro permite a passagem de sinais de alta frequência.

4.3.2 Circuito Integrador ou Filtro Passa-Baixo

O circuito R_1C_1 da figura 4.5 é o filtro passa-baixo também mostrado na figura 4.7.

Para ondas senoidais de baixa frequência a reatância capacitiva $\chi_c = \frac{1}{2\pi fC}$ assume valores altos em comparação com o valor da resistência e a tensão de saída é praticamente igual à tensão de entrada.

Para ondas senoidais de alta frequência, a reatância capacitiva assume valores baixos em comparação com o valor da resistência, atenuando a tensão de saída para um valor praticamente nulo. Assim, este filtro permite somente a passagem de baixa frequência. A

freqüência de corte ou limite de freqüência, f_c , é determinada neste circuito igualando o valor da reatância ao da resistência, ou seja, $f_c \geq \frac{1}{2\pi RC}$

A principal aplicação do integrador é amenizar as flutuações de um sinal com ruído conforme está mostrado na figura 4.8. Este circuito é muito importante porque corrige a forma de saída do pulso do detetor.

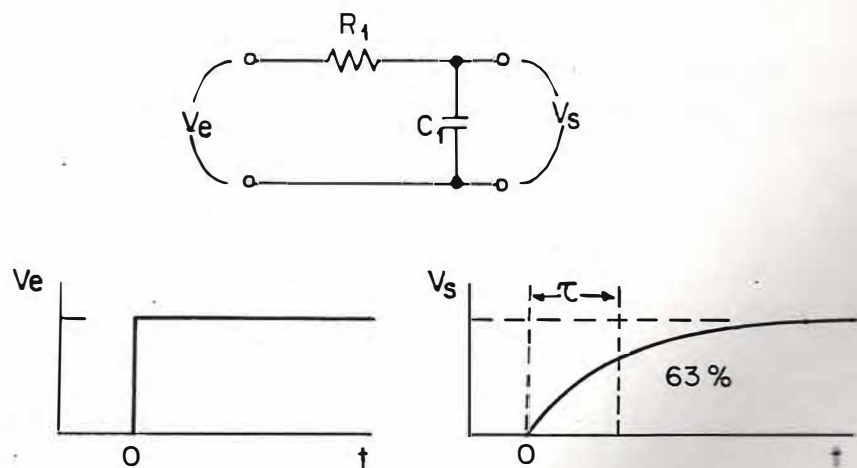


Figura 4.7 Filtro RC passa-baixo ou circuito integrador (Fonte: Knoll, 1989)

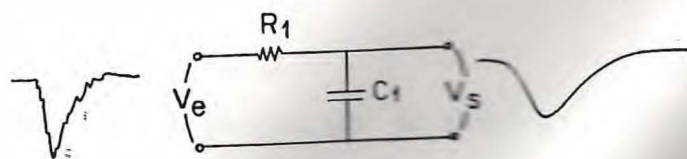


Figura 4.8 Filtragem de ruído por integração (Fonte: Leo, 1987)

A figura 4.9 mostra as curvas características de tensão de saída V_s de um filtro passa-alto em (a) e de um filtro passa-baixo em (b) em função da frequência f , do sinal.

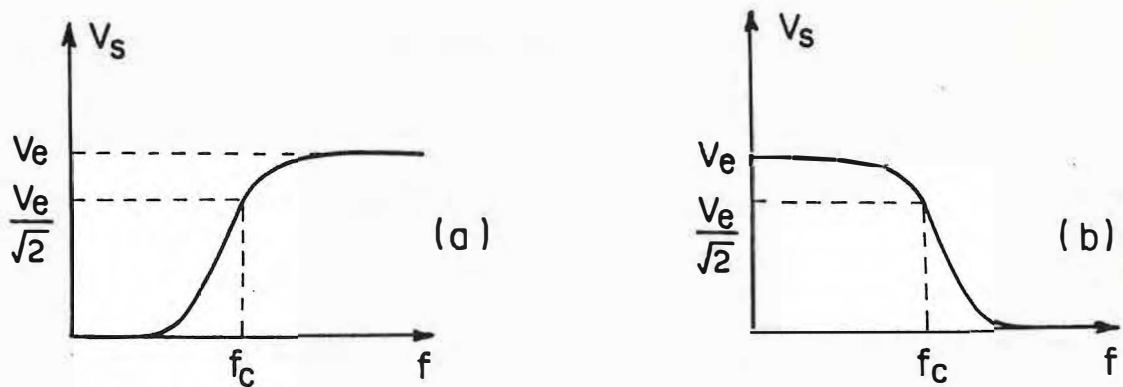


Figura 4.9 Curva característica de voltagem de saída em função da frequência. (a) circuito passa-alto; (b) circuito passa-baixo. f_c é a frequência de corte (Capuano e Marino, 1988)

4.4 Pré-Amplificador

A função básica do pré-amplificador é amplificar os sinais fracos de um detector que chegam a ele através de um cabo coaxial. Devemos ter cuidados especiais para obter baixo ruído no processamento do sinal.

Para minimizar o perigo de captação de sinais falsos devemos colocar o pré-amplificador dentro da blindagem de chumbo, próximo do detector; com isso, se reduz o comprimento do cabo coaxial e logicamente a capacitância e as perturbações por campos eletromagnéticos.

O pré-amplificador também é usado para corrigir as impedâncias do detetor e do amplificador, visando uma forma de pulso de saída mais perfeito. Os tipos básicos de pré-amplificador para os detetores proporcionais são de sensibilidade de carga e de sensibilidade da voltagem (Belove, 1968, Cooper, 1978, e Schiling e Belove, 1986).

O pré-amplificador de sensibilidade de carga tem uma configuração do tipo da figura 4.10 e o transistor operacional é de efeito de campo (FET) (Rutrowski, 1975). A tarefa básica desse circuito é integrar a carga levada pelo pulso para a entrada do capacitor C_f . Com isso podemos garantir que a voltagem de saída é sempre proporcional à carga.

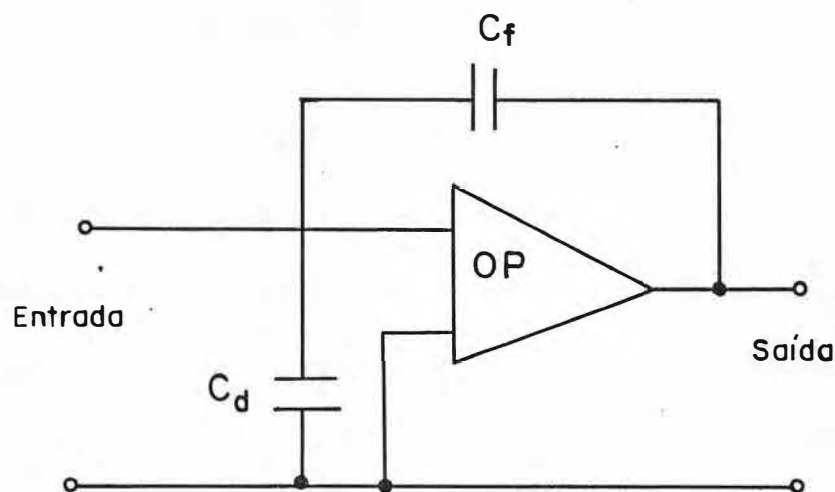


Figura 4.10 Esquema básico de um pré-amplificador de sensibilidade de carga (Fonte: Leo, 1987)

Os pré-amplificadores sensíveis a voltagem têm uma configuração do tipo da figura 4.11. Esta configuração com amplificador operacional (LF556 - FET), de alto ganho intrínseco (entrada FET), tem uma realimentação que assegura a estabilidade e o controle do

ganho para um valor finito. É sensível a muito baixas correntes de entrada e tem alta impedância de entrada.

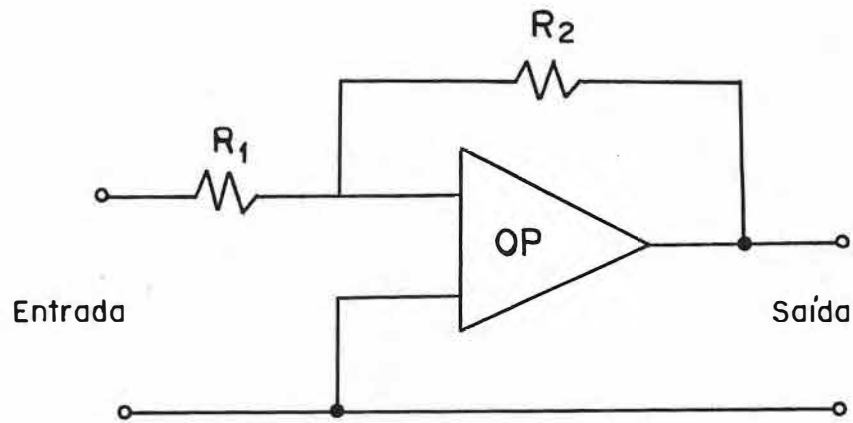


Figura 4.11 Esquema básico de um pré-amplificador de sensibilidade de voltagem
(Fonte: Leo, 1987)

Os amplificadores operacionais (FET) danificam-se facilmente com a manipulação devido às descargas produzidas entre o operador e o FET; por isso, são necessários cuidados especiais na montagem dos circuitos, como por exemplo, usar soquete em substituição à soldagem. Na montagem do pré-amplificador o circuito deve ficar protegido por uma caixa metálica para evitar ruído no pré-amplificador. A figura 4.12 apresenta o esquema de um pré-amplificador, modelo Geyh, cujos componentes e funções se encontram na tabela 4.3.

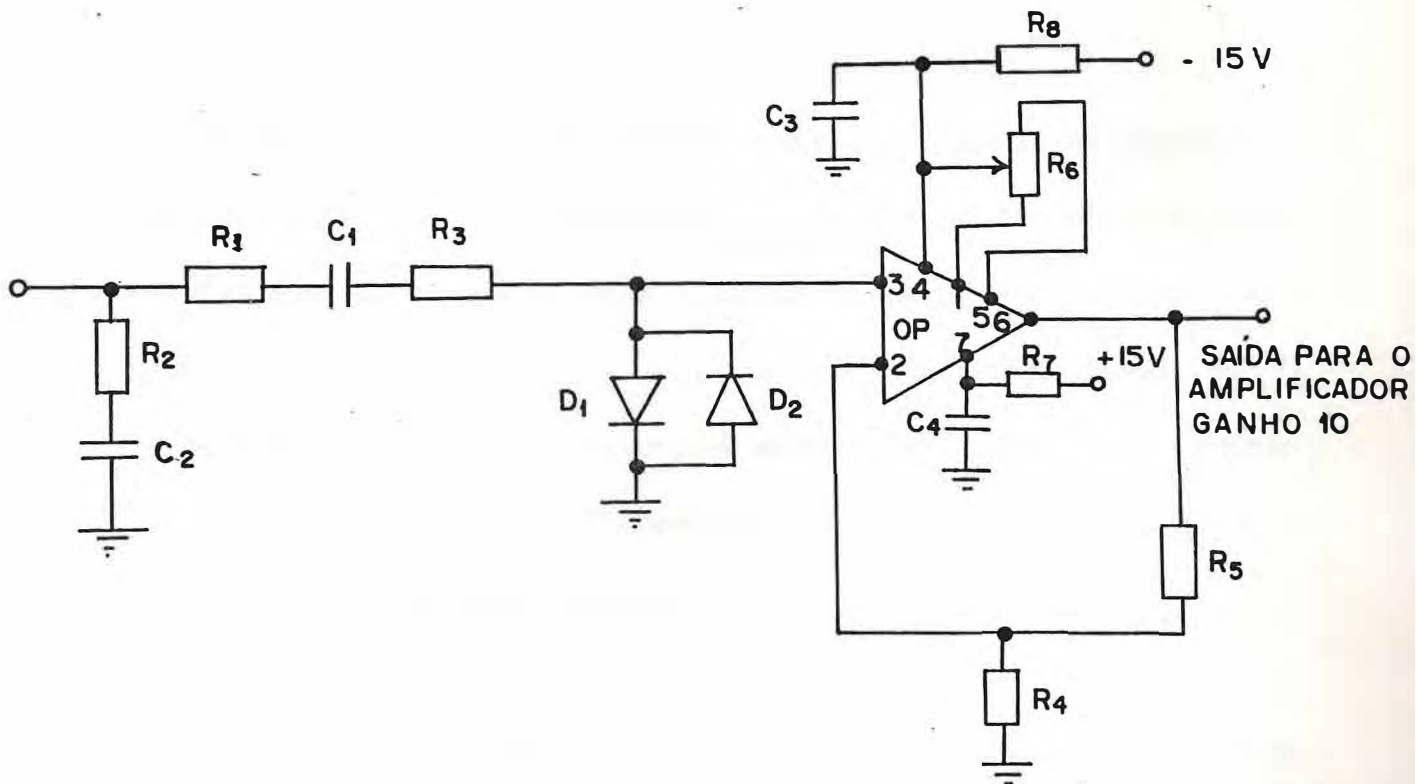


Figura 4.12 Esquema para montagem de pré-amplificador modelo Geyh

Tabela 4.3 Componentes do pré-amplificador

Componentes	Função dos Componentes
$R_1 = 51 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 1000 \text{ pF}/1000 \text{ V}$	R_1 e C_1 : filtro de entrada
$R_2 = 510 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 0,047 \text{ }\mu\text{f}/400 \text{ V}$	R_2 e C_2 : filtro
$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$	R_3 : filtro de entrada
$R_4 = 1 \text{ k}\Omega$	R_4 : variável (define o ganho)
$R_5 = 9 \text{ k}\Omega$	R_5 : realimentação
$R_6 = 10 \text{ k}\Omega$	R_6 : resistor de polarização
$R_7 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_4 = 0,1 \text{ }\mu\text{f}/20 \text{ V}$	R_7 e C_4 : filtro para diminuir influência do ripple de fonte
$R_8 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_3 = 0,1 \text{ }\mu\text{f}/20 \text{ V}$	R_8 e C_3 : filtro para diminuir influência do ripple de fonte
D_1 e D_2 : FST2000	D_1 e D_2 : diodos de proteção da entrada
OP: LF356	

4.5 Amplificador

A finalidade do amplificador é aumentar o sinal proveniente do pré-amplificador e modelar o pulso para posterior processamento (Graeme et al., 1986 e Hillsmann, 1986). Modelar o pulso significa passar o sinal por circuitos integradores e diferenciadores com o objetivo de evitar empilhamento de sinal e também de melhorar a relação de sinal ruído. O “empilhamento” significa a chegada de um pulso antes do final da cauda do pulso anterior, como está mostrado na figura 4.13. O amplificador deve sempre preservar a informação de interesse, seja o tempo de subida, seja a altura do pulso.

O encurtamento da cauda dos pulsos pode ser obtido dentro do bloco de amplificação principal. A figura 4.14 apresenta o diagrama esquemático do amplificador modelo Geyh, e a tabela 4.4 mostra os componentes e suas funções. O amplificador operacional (LF 356) que utilizamos no pré-amplificador é também utilizado no amplificador.

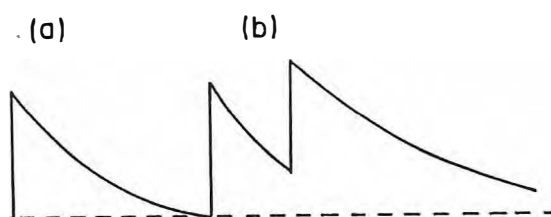


Figura 4.13 (a) Cauda de um pulso, (b) Pilhas de pulso

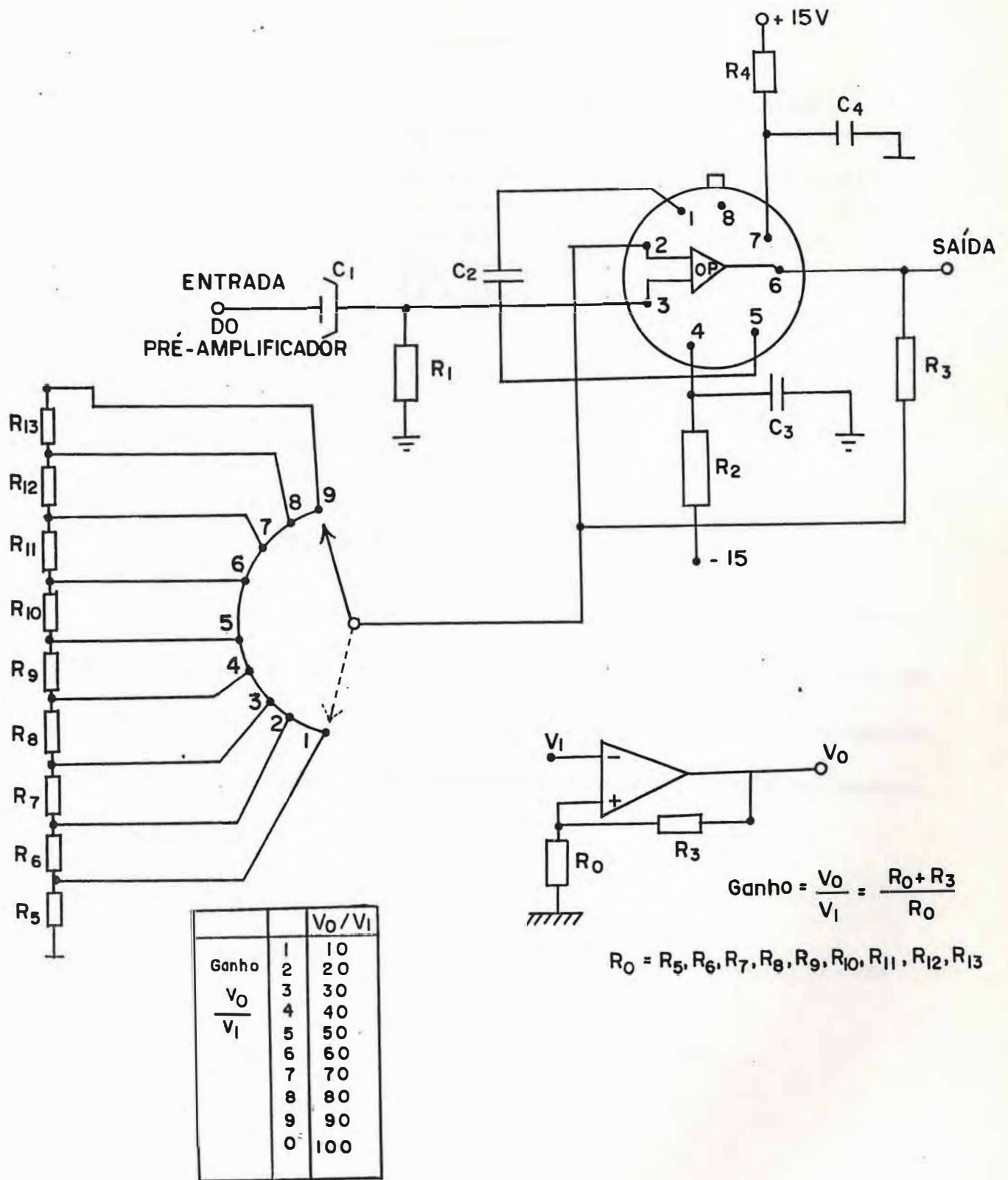


Figura 4.14 Diagrama do amplificador modelo Geyh

Tabela 4.4 Componentes de um amplificador

Componentes	Função dos Componentes
$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 1000 \text{ pf}/1000 \text{ V}$	R_1 e C_1 : filtro para o nível DC
$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_3 = 0,1 \text{ }\mu\text{f}/20 \text{ V}$	R_2 e C_3 : filtro para diminuir influência do ripple de fonte
$R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $C_4 = 0,1 \text{ }\mu\text{f}/20 \text{ V}$	R_4 e C_4 : filtro para diminuir influência do ripple de fonte
R_5 a $R_{13} = 100 \text{ k}\Omega$	R_5 a R_{13} : definem o ganho do amplificador
$C_2 = 0,047 \text{ }\mu\text{f}/400 \text{ V}$	C_2 : compensação de frequência
OP = LF356	R_3 : realimentação

4.6 Discriminadores

4.6.1 Discriminador de Barreira

Discriminadores são circuitos que respondem somente a um valor fixo de referência (“Threshold” = barreira) de entrada. O nível de barreira pode ser regulado com um potenciômetro e abaixo do valor fixado nele os sinais de pulsos de saída são bloqueados (Figura 4.15) ou seja, somente sinais com amplitude maior que a barreira fixada produzem sinal de saída.

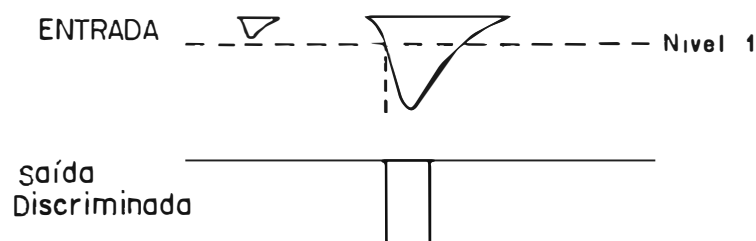


Figura 4.15 Operação do discriminador com um limiar (Fonte: Leo, 1987)

4.6.2 Discriminador Diferencial

O discriminador diferencial, de janela ou SCA (“Single-Channel Analyser”) é um dispositivo que usa um nível mínimo e um nível máximo. Seja $V_e(t)$ o sinal de entrada na figura 4.16. Quando $\text{nível } 2 > V_e(t) > \text{nível } 1$ um pulso unitário é gerado. A faixa entre os níveis 2 e 1 é normalmente chamada de “janela”. Pulsos com amplitudes fora da janela são suprimidos.

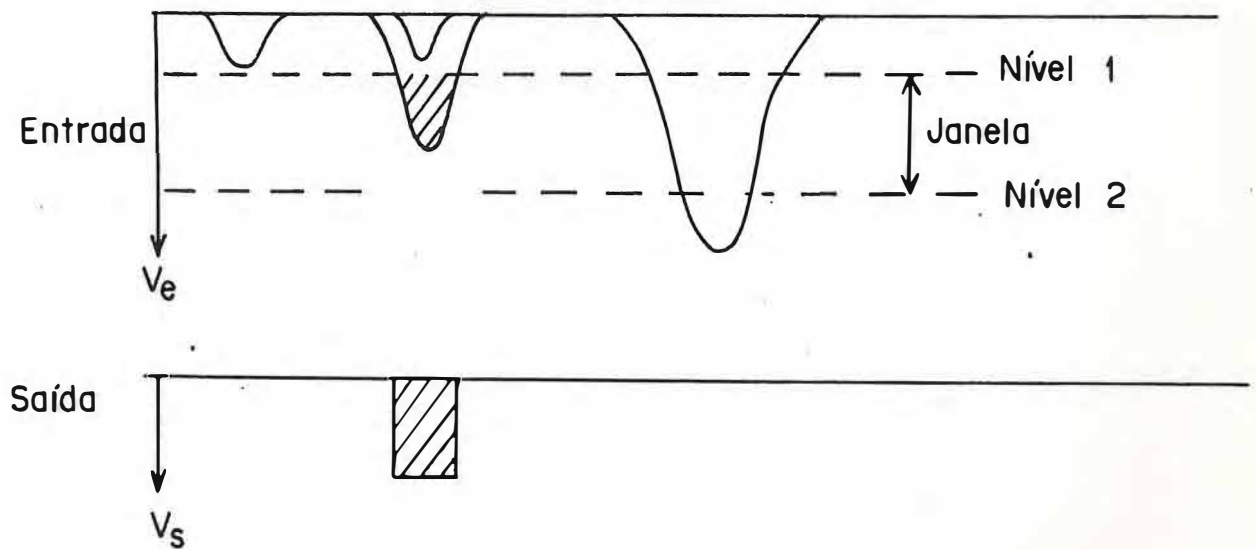


Figura 4.16 Analisador de sinal com um canal. V_e = voltagem de entrada e V_s = voltagem de saída (Fonte: Leo, 1987)

4.7 Unidade de Coincidência

Em medidas de baixa atividade é necessário discriminar sinais produzidos por radiação cósmica, basicamente por mesons- μ . Para isso, monta-se em torno do detetor de amostras (detetor central) um ou vários detetores de guarda (detetor externo). Neste arranjo, sinais coincidentes são detectados e eliminados da contagem de eventos “verdadeiros”.

No sistema de coincidência (Figura 4.17) os pulsos provenientes de cada um desses detetores são conectados a um sistema de pré-amplificador amplificador e discriminador e conduzidos para um circuito comum chamado comparador.

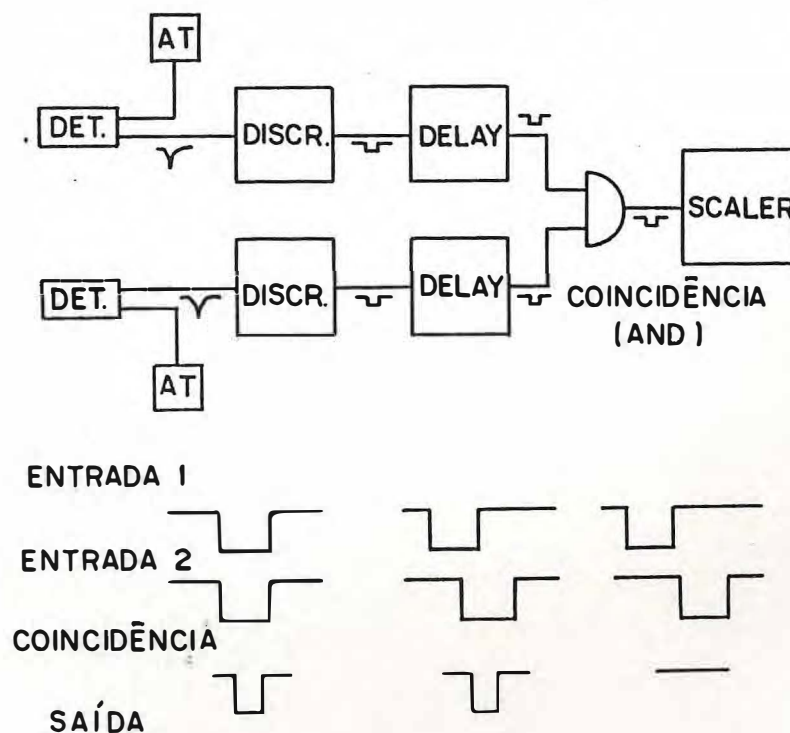


Figura 4.17 Sistema para medida de coincidência (Fonte: Leo, 1987)

4.8 Unidade de Contagem

A unidade de contagem, “scaler”, é a unidade que conta e mostra o número de pulsos injetados na entrada e apresenta a informação num display.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Especificações do Detetor

Depois de construído seguindo a descrição feita no capítulo 3, o detetor com as dimensões apresentadas na tabela 5.1 será utilizado para medir a atividade do carbono-14 com o objetivo de datar amostras preparadas na forma de acetileno. Esta tabela apresenta também propriedades deste gás. O detetor, com um volume de 200 ml, permitirá medir amostras menores uma vez que ele tem um volume que é 29 % do volume do detetor atualmente usado no Laboratório de Carbono-14 da UFC.

Tabela 5.1 Dados do detetor proporcional e do gás

Comprimento do detetor, l (cm)	28,4
Raio interno, r_b (cm)	1,5
Raio do fio central, r_a (μm)	22,5
Volume do gás, V (ml)	200
Mobilidade do acetileno, μ^+ $\left(\frac{\text{cm}^2 \cdot \text{atm}}{\text{V} \cdot \text{seg}} \right)$	0,71
Constante dielétrica, ϵ (pF/m)	8,85

A atividade de carbono-14 em amostras naturais (Ver anexo A.3) é muito baixa, pois mesmo uma amostra moderna produz somente 14,32 dpm por grama de carbono (ICRUM, 1972 e Polach, 1973) e este valor é extremamente baixo em relação à radiação cósmica que chega a duas ordens de grandeza maior.

Assim, para separar a radiação da amostra e a radiação cósmica é necessário além de instalar o detetor dentro de uma blindagem de chumbo, usar um sistema de coincidência dos pulsos do detetor interno com os do detetor externo.

O detetor externo usado no sistema de coincidência tem a forma de um anel e foi construído pela Canberra Electronik GmbH. A figura 5.1 apresenta o diagrama de bloco da eletrônica usada nas medidas. A fonte de alta tensão do detetor interno é Spellman e do detetor externo é da ICN Instruments Division, os pré-amplificadores, os amplificadores, os comparadores e a unidade de coincidência foram construídos no laboratório do Dr. Geyh, Hanôver, o contador de pulsos é Berthold e as medidas são impressas por um registrador Kienzle.

Com esta eletrônica temos quatro saídas diferentes na unidade de contagem.

EXT - conta pulsos do detetor externo (provenientes da radiação cósmica e ambiental)

CO - conta pulsos do detetor interno que são coincidentes com os pulsos do detetor externo (provenientes da radiação cósmica).

AC - conta pulsos “anticoincidentes” do detetor interno (provenientes da emissão β^- da amostra pois o circuito lógico da eletrônica fecha para coincidência dos pulsos CO e EXT por 30 μ s e conta somente a atividade em anti-coincidência).

TOT - conta todos os pulsos de detetor interno que provenientes da radiação cósmica e da amostra (é uma opção utilizada para determinar a região de patamar do detetor interno).

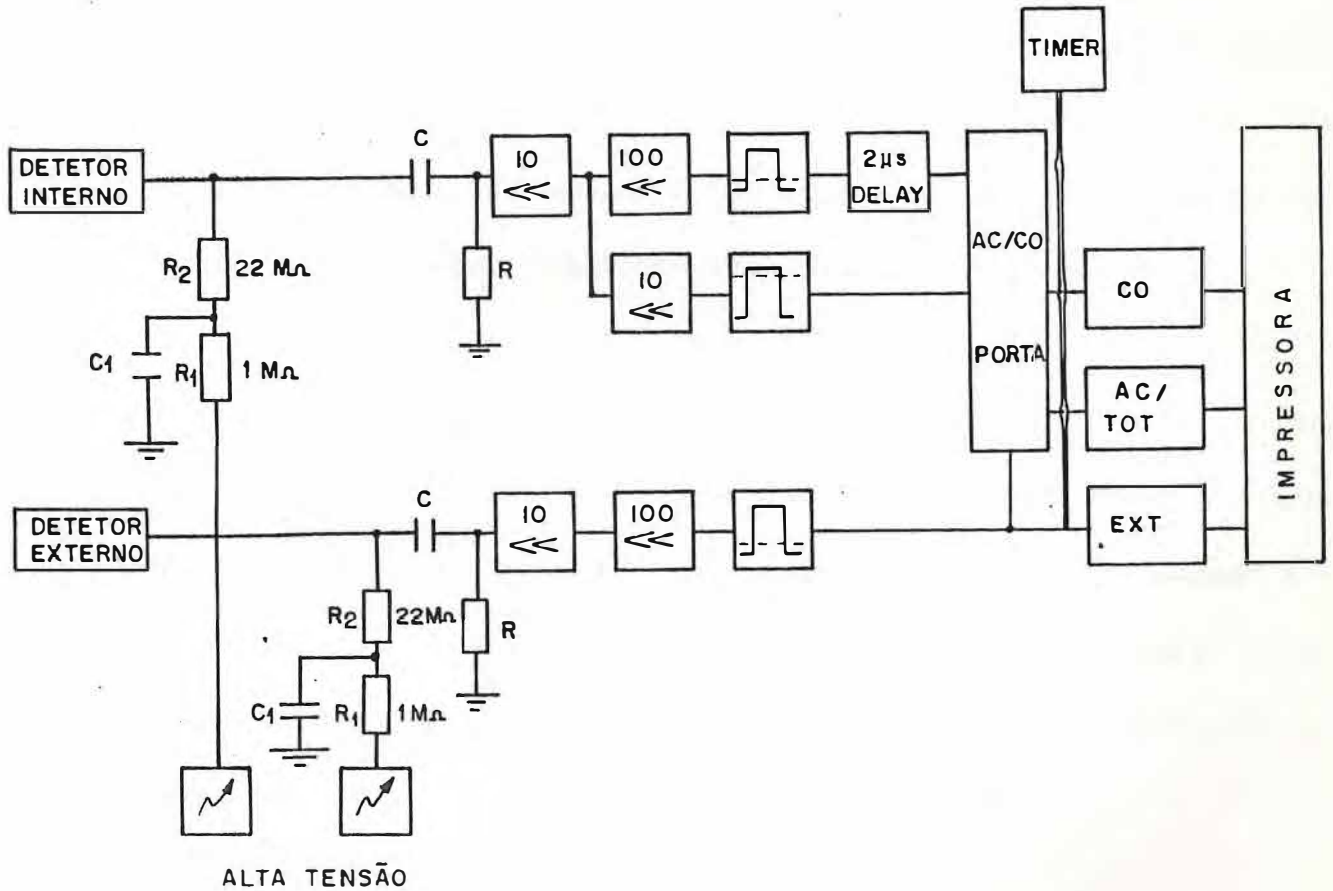


Figura 5.1 - Diagrama de bloco do sistema de contagem.

5.2 Condições de Operação do Detetor Proporcional

Os detetores proporcionais a gás trabalham com um valor de voltagem que chamamos de ponto de trabalho que fica na região de patamar (figura 5.2) que é o intervalo de contagens entre R_1 e R_2 correspondendo ao intervalo de voltagem entre V_1 e V_2 . É importante observar a voltagem V_2 para evitar que um aumento indevido produza descarga contínua no detetor e danifique o pré-amplificador e o próprio detetor.

O patamar da figura 5.2 foi medido com o detetor anel (guarda) com uma mistura argônio-metano à pressão de 700 mm Hg e foi enviado pelo construtor. O ponto de trabalho deve ficar entre 50 % e 70 % da extensão do patamar. A inclinação do patamar, I , é determinada através da equação 5.1 (Ortec, 1971) e deve ser menor do que 10 %. No patamar da figura 5.2 $V_1 = 1360$ V, $V_2 = 1580$ V, $R_1 = 980$ cpm e $R_2 = 1170$ cpm o que corresponde a uma extensão de 220 V e a uma inclinação de 8,8 %.

$$I = \left[100 \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} \right] \left[\frac{100}{V_2 - V_1} \right] \% \quad (5.1)$$

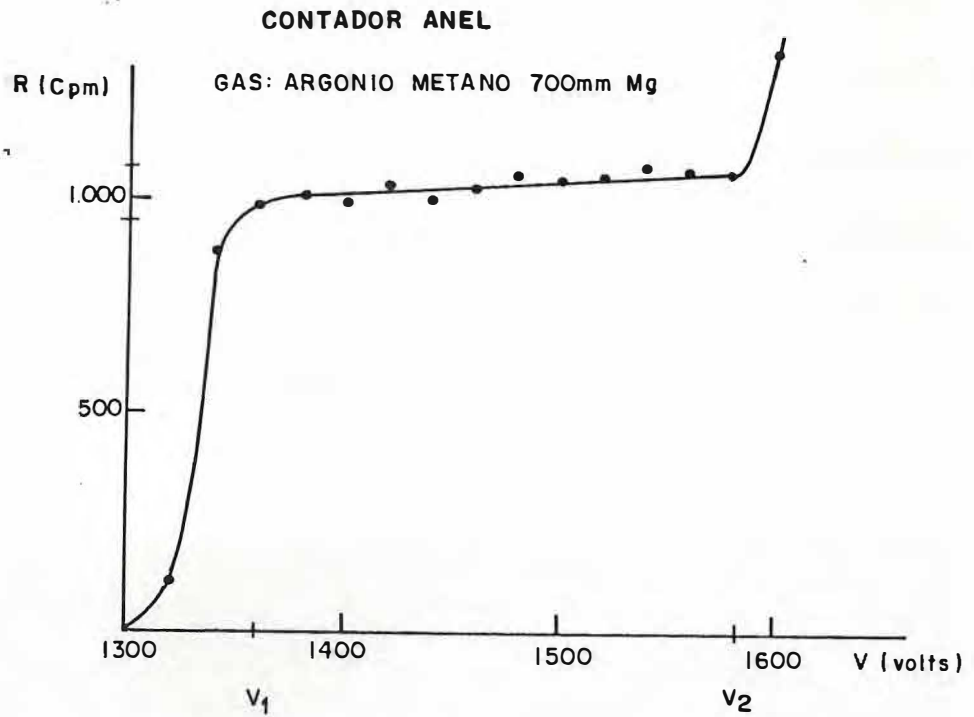


Figura 5.2 - Taxa de contagem em função da voltagem aplicada ao detector

5.3 Tempo de Desenvolvimento do Sinal

O movimento de cargas dentro do detector produz pulsos que estão mostrados na figura 5.3. O tempo de desenvolvimento do pulso corresponde ao tempo de deslocamento dos íons positivos do anodo para o catodo que é a contribuição dos íons que deixam o fio central (voltagem positiva)

O valor da capacitância por unidade de comprimento do detetor (equação 2.3) interno calculada com os dados da tabela 5.1 é de 8,5 pF/m. Com os dados da mesma tabela construímos a tabela 5.2 que mostra o campo elétrico (equação 2.1), o potencial (equação 2.2) o tempo de desenvolvimento de um pulso (equação 2.10) e a corrente máxima (equação 2.12), em função da voltagem aplicada ao detetor na região do patamar, em um ponto próximo do fio central a uma distância de 1,498 cm do catodo.

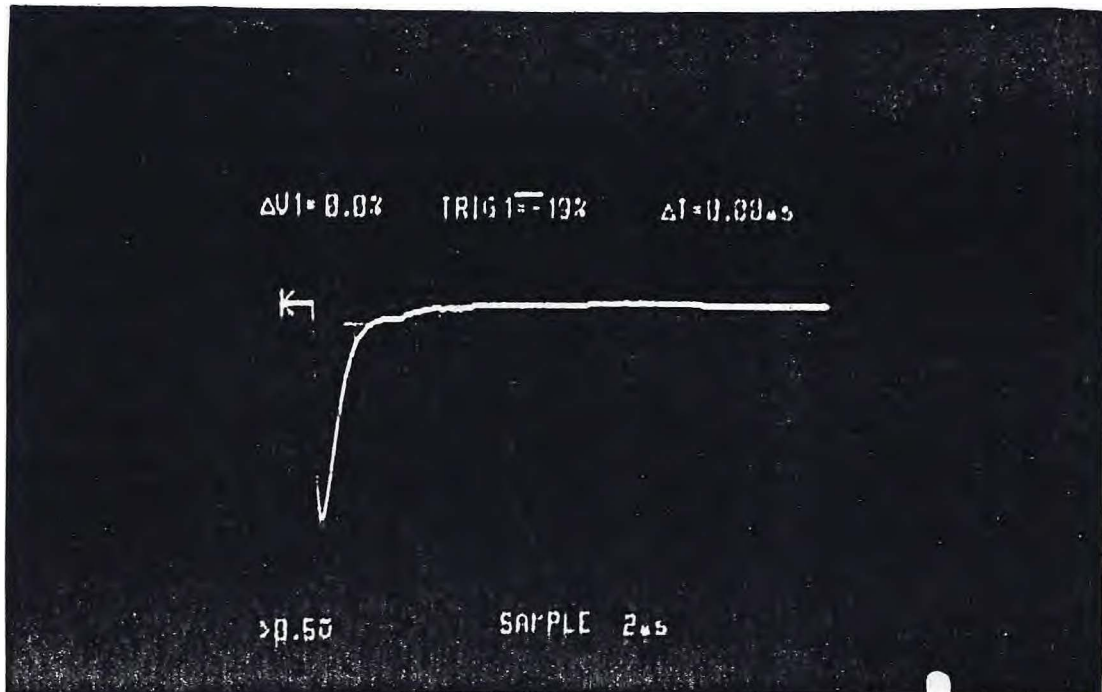


Figura 5.3 - Pulsos no detetor interno (Legenda: 0,5 V/div e 2 μ s/div)

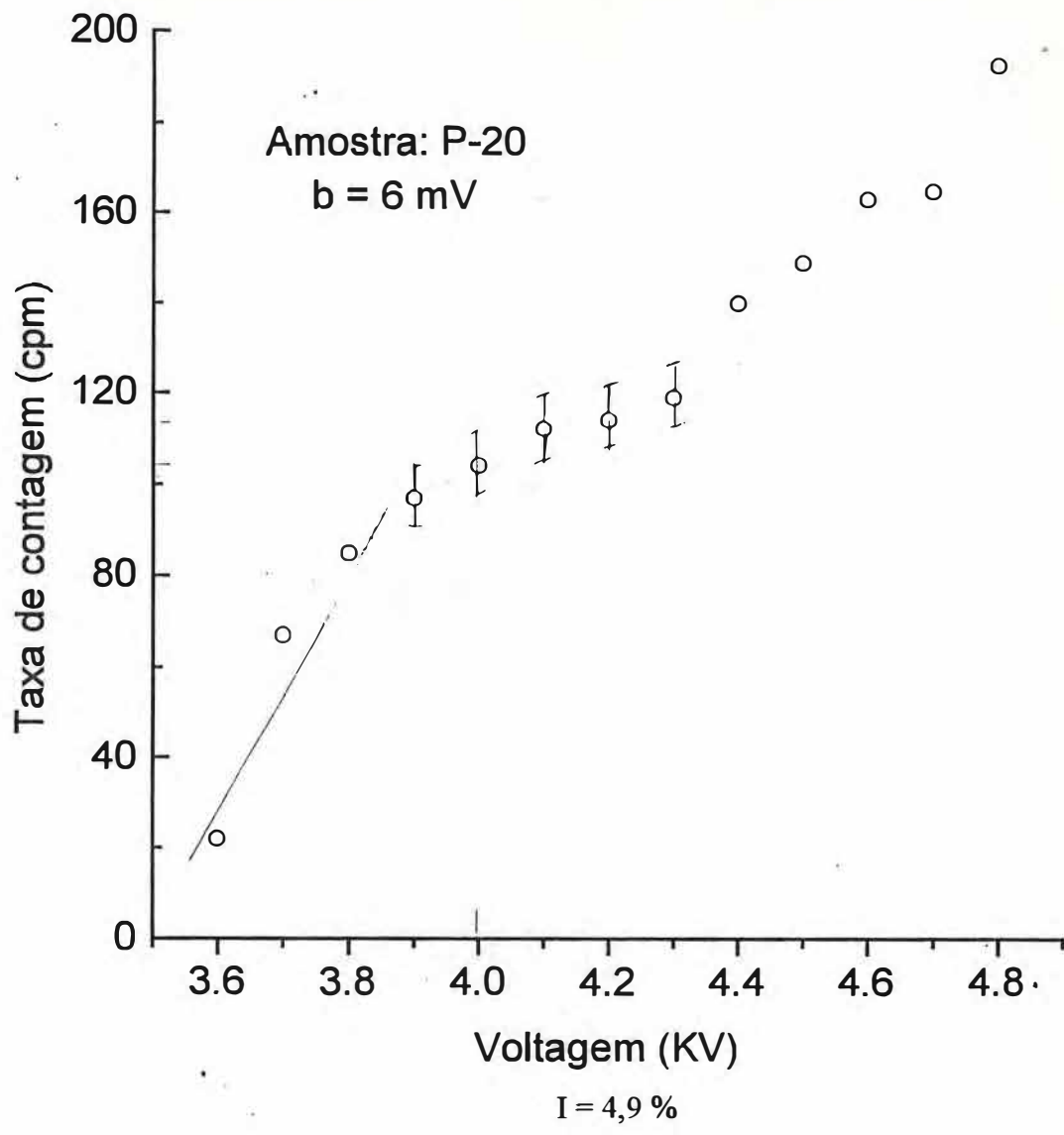
Tabela 5.2 Campo elétrico $E(r)$, potencial $\phi(r)$, tempo de desenvolvimento do pulso (T) e corrente máxima i_m em função da voltagem V

V	E(r) (V/cm)	$\varphi(r)$ (V)	T (ms)	i_m (μA)
4000	411	3960	2,59	2,10
4200	431	4158	2,47	2,21
4400	452	4356	2,35	2,31
4600	470	4554	2,25	2,42
4800	500	4752	2,16	2,52

5.4 Limiar de Tensão

É necessário encontrar um limiar de tensão b (ver seção 4.6.1) para que o comparador só deixe passar pulsos para a unidade lógica com tensão maior do que a do limiar. Encontramos o valor adequado para b do detetor interno, identificando a região do patamar com um gás do padrão ácido oxálico distribuído pelo NBS (National Bureau of Standards) (P20) e com uma amostra preparada com mármore sem carbono-14 (∞ 72), para medida de radiação de fundo.

As figuras 5.4 a), 5.4b) e 5.4 c) mostram as regiões de patamar com o padrão P-20, com valores de limiar de tensão de 6 mV, 9 mV e 10 mV respectivamente. As figuras 5.5 a) e 5.5 b) mostram as regiões de patamar para a radiação de fundo, com a amostra ∞ 72, nos limiares de tensão de 9 mV e 10 mV.



V (KV)	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
R (cpm)	22	67	85	97	104	112	114	119	140	149	163	165	193

Figura 5.4 a) - Taxa de contagem do padrão NBS em função da voltagem com o limiar de 6 mV. I: inclinação do patamar.

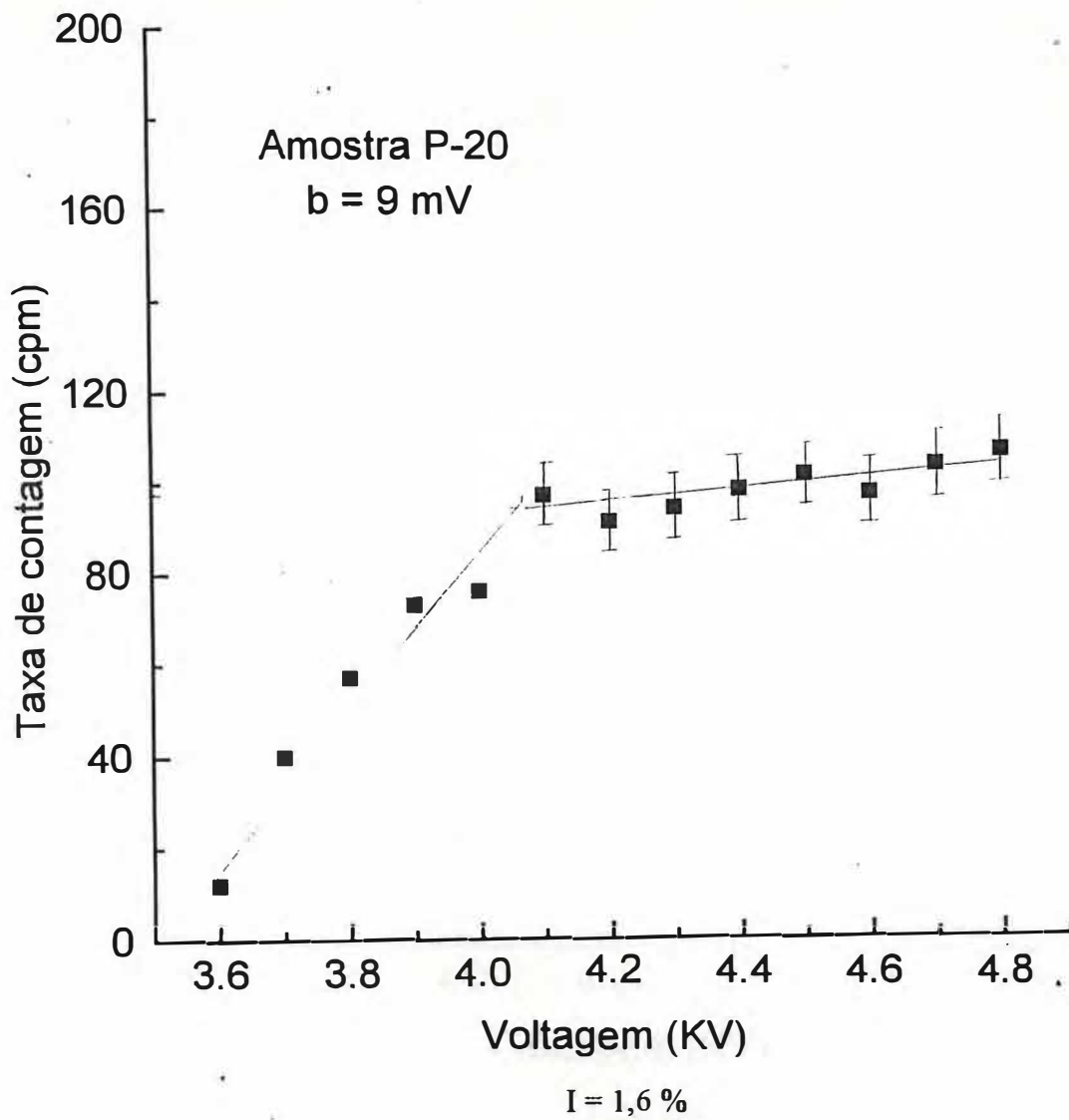
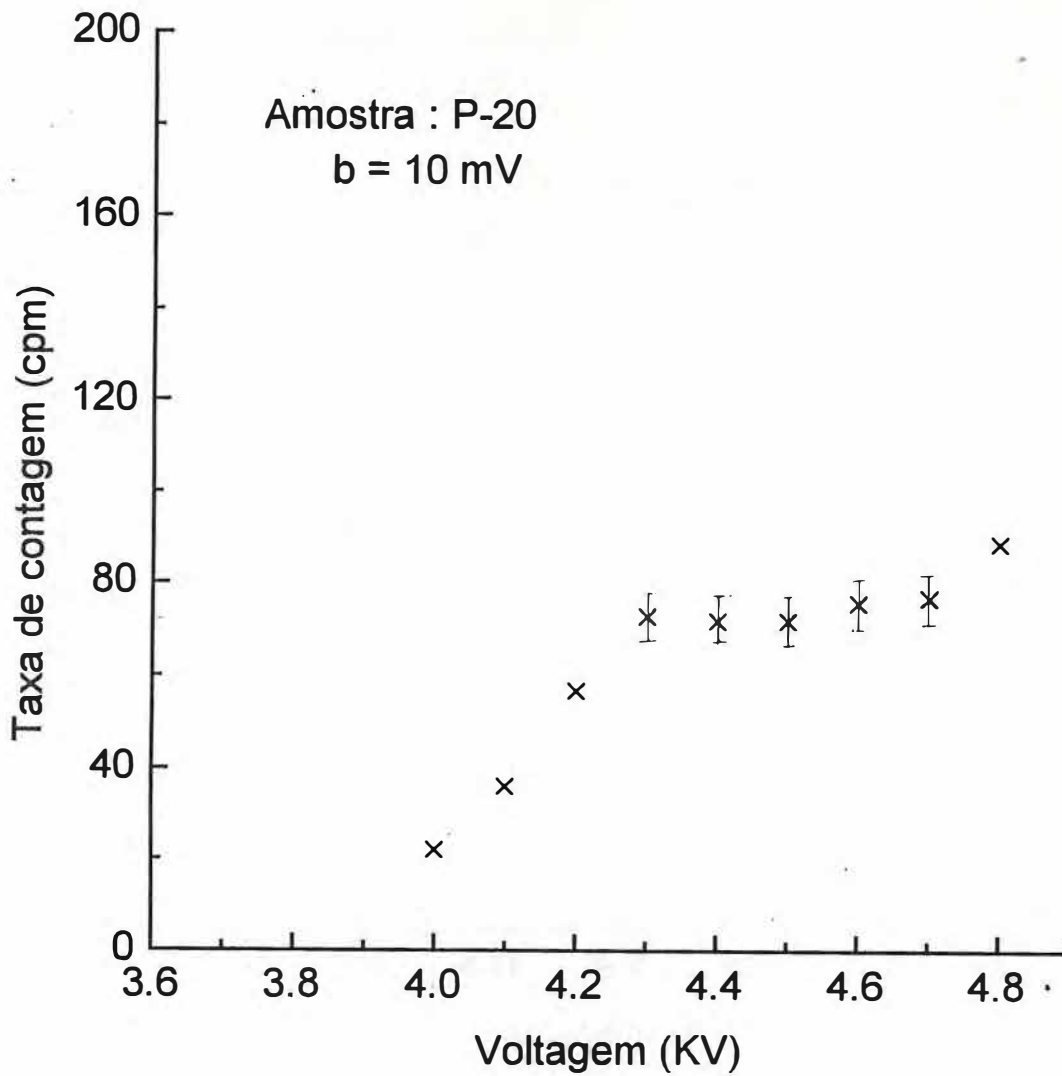


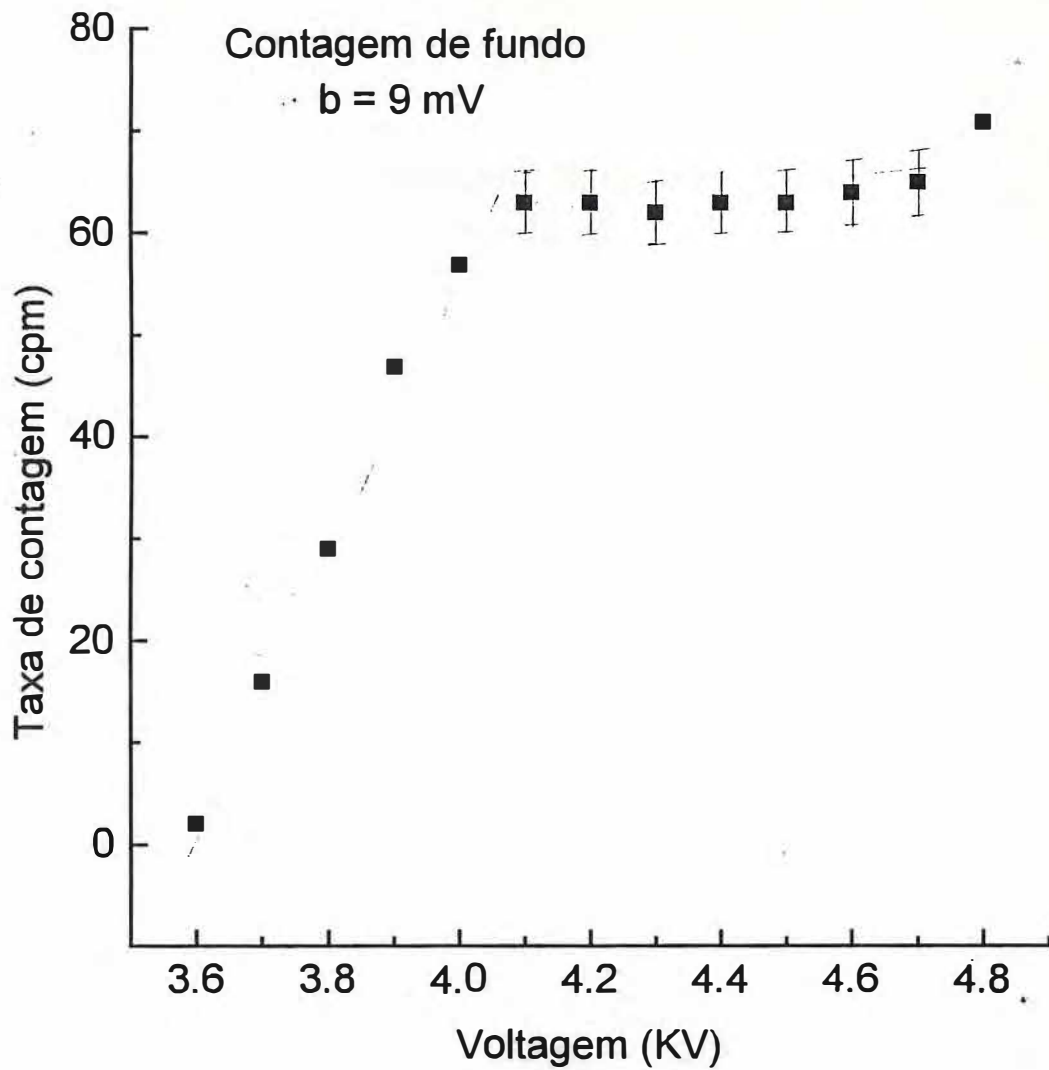
Figura 5.4 b) - Taxa de contagem do padrão NBS em função da voltagem com o limiar de 9 mV. I: inclinação do patamar.



I = 2,1 %

V (KV)	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
R (cpm)	22	36	57	73	72	72	76	77	89

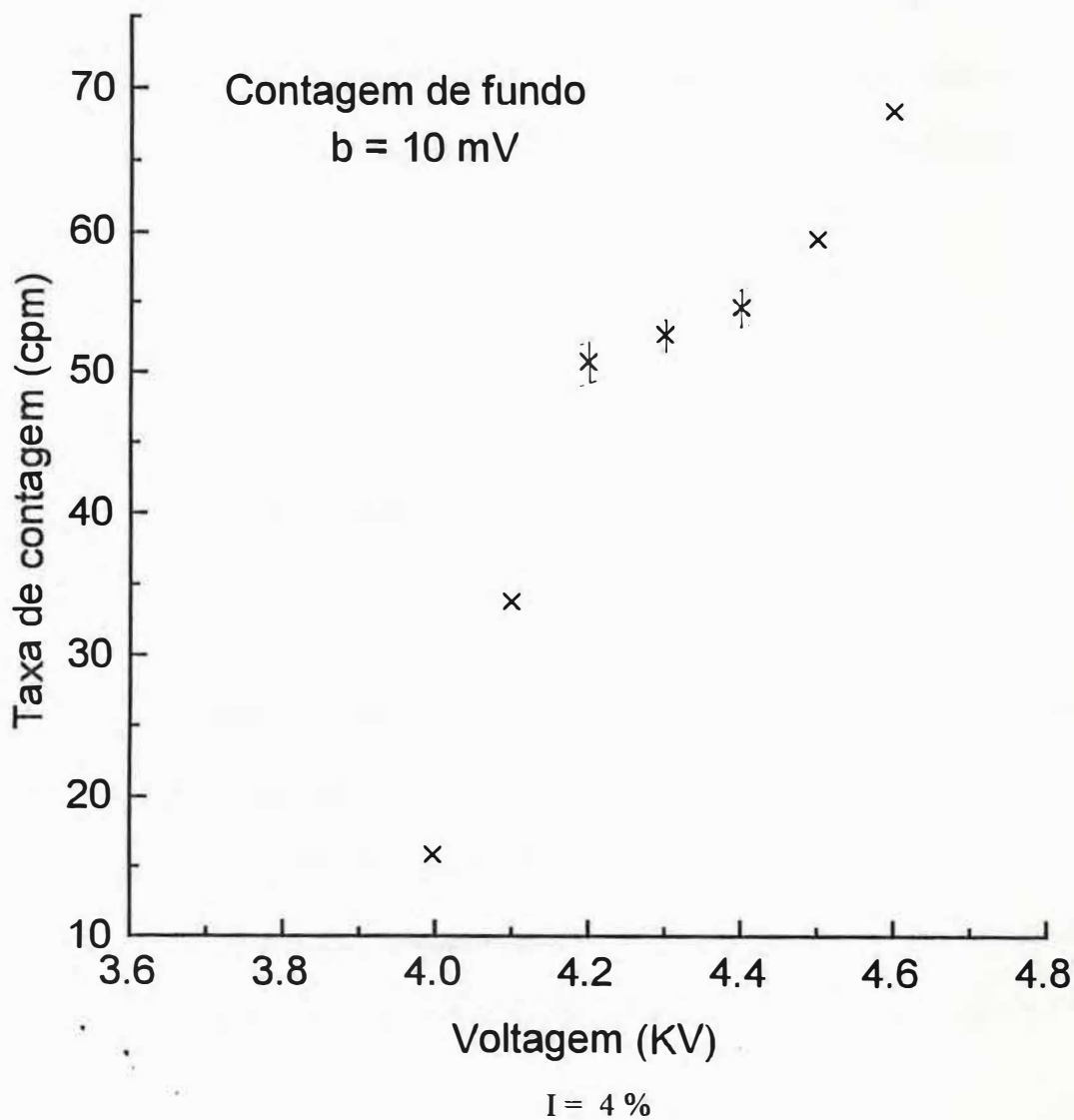
Figura 5.4 c) - Taxa de contagem do padrão NBS em função da voltagem com o limiar de 10 mV. I: inclinação do patamar.



I = 0,5 %

V (KV)	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
R (cpm)	16	29	47	57	63	63	62	63	62	64	65	71

Figura 5.5 a) - Taxa de contagem da radiação de fundo em função da voltagem com o limiar de 9 mV. I: inclinação do patamar.



V (KV)	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
R (cpm)	16	34	51	53	55	60	69

Figura 5.5 b) - Taxa de contagem da radiação de fundo em função da voltagem com o limiar de 10 mV. I: inclinação do patamar.

Com base nestes resultados escolhemos o valor de 9 mV quando o patamar é mais longo do que com 6 mV e o ponto de trabalho é menor do que para a barreira de 10 mV. Estas medidas foram realizadas com o detetor fora da blindagem.

5.5 Diferenciação dos pulsos

Para que o sinal seja diferenciado com uma constante de tempo $\tau = RC$, obtendo com este processo pulsos mais curtos, o detetor deve ser conectado a um filtro RC. Este filtro é utilizado para atenuar a cauda exponencial do sinal gerado no detetor e assim, evitar a superposição com outro sinal causando erro na contagem devido ao empilhamento. No entanto, este processo atenua o pico do sinal de saída do diferenciador e diminui a relação sinal-ruído do sistema.

A tensão entre os terminais do capacitor é $V_c = V (1 - \exp(-t/\tau))$; ou seja, V_c / V para $t = \tau$ e 5τ é respectivamente, 63,2 % e 99,9 %. Isso é, em um tempo de cinco vezes a constante de tempo RC, o capacitor chega praticamente a 100 % da voltagem aplicada. Para nosso circuito usamos um capacitor de 2500 pF.

Adotamos três diferentes tempos $t = 5\tau$, para valores da resistência iguais a 640 Ω ($t = 8 \mu\text{s}$), 800 Ω ($t = 10 \mu\text{s}$) e 960 Ω ($t = 12 \mu\text{s}$) e nestas condições, analisamos o padrão

NBS (P-20) com atividade de 14,23 dpm por grama de carbono (ICRUM, 1972 e Polach, 1973), a radiação de fundo com a amostra $\infty 72$ e as amostras FZ 624 e FZ 634 analisadas com o detector em uso no laboratório.

Os resultados estão na tabela 5.3 que apresenta as médias das taxas de contagem e os erros estatísticos (Ver anexo 1) das medidas dos detectores, externo R_{ex} , interno em anti-coincidência R_{ac} e em coincidência R_{co} em função do tempo ($t = 5\tau$) registrados a cada 50 minutos durante um tempo total de medida especificado na tabela.

Tabela 5.3 Taxas de contagem R_{ac} , R_{ex} e R_{co} dos padrões P20 e $\infty 72$ e amostras FZ 624 e FZ 634 (T tempo total de contagem, $t = 5\tau$)

	t (μs)	R_{ac} (cpm)	R_{co} (cpm)	R_{ex} (cpm)	T (min)
P20	12	$9,8824 \pm 0,1025$	$53,3516 \pm 0,2370$	$333,2179 \pm 0,5922$	950
	10	$7,1159 \pm 0,0726$	$49,9630 \pm 0,1865$	$346,0600 \pm 0,7595$	1350
	08	$6,8263 \pm 0,0809$	$44,2500 \pm 0,2104$	$361,1066 \pm 0,6166$	1000
$\infty 72$	12	$6,1880 \pm 0,0704$	$46,8504 \pm 0,1936$	$333,8765 \pm 0,5388$	1250
	10	$4,4686 \pm 0,0627$	$50,0875 \pm 0,2043$	$355,9448 \pm 0,5336$	1250
	08	$4,2140 \pm 0,0673$	$44,7327 \pm 0,2017$	$357,0655 \pm 0,5697$	1100
FZ 624	12	$8,9500 \pm 0,0669$	$54,5000 \pm 0,1574$	$339,9643 \pm 0,4928$	2200
	10	$6,6180 \pm 0,0747$	$43,4271 \pm 0,2260$	$362,3247 \pm 0,6529$	1000
	08	$6,3038 \pm 0,0644$	$42,7781 \pm 0,2018$	$357,5623 \pm 0,5245$	1350
FZ 634	12	$7,8737 \pm 0,07740$	$48,2070 \pm 0,2196$	$360,7956 \pm 0,6332$	1000
	10	$5,7388 \pm 0,0744$	$45,2647 \pm 0,2308$	$361,2768 \pm 0,6167$	1300
	08	$5,4690 \pm 0,0747$	$43,4271 \pm 0,2260$	$362,3247 \pm 0,6529$	1000

Para encontrar estas taxas de contagem seguimos os passos

(i) Colocamos, no detetor interno, a amostra preparada na forma de acetileno.

(ii) Fazemos um patamar do detetor externo, encontramos o ponto de trabalho e deixamos a voltagem neste valor.

(iii) Encontramos a região de patamar do detetor interno, determinamos o ponto de trabalho e deixamos a voltagem neste valor.

(iv) Iniciamos as contagens dos dois detetores registrando os valores de 50 em 50 minutos durante um intervalo de tempo superior a 900 minutos. Os registros contêm valores de contagem do detetor externo R_{ex} , e do detetor interno em coincidência R_{co} e em anti-coincidência R_{ac} . Os valores de contagens de R_{ex} e R_{co} se referem a radiação cósmica no detetor externo e no detetor interno, respectivamente e o valor R_{ac} , representa as contagens da amostra.

(v) Calculamos os valores médios dos três registros R_{ac} , R_{ex} e R_{co} com os critérios apresentados no anexo 1. Nos anexos A.4 a A.6 apresentamos respectivamente, para R_{ac} , R_{ex} e R_{co} , alguns resultados representativos das médias e dos valores teórico e experimental do χ^2 como critério de qualidade dos dados. Apresentamos também, a distribuição de valores em torno da média, separados por intervalos de desvio padrão.

Os valores médios de coincidência, R_{co} , e do externo, R_{ex} , mostram as taxas de contagem da radiação cósmica medidas pelo detetor interno e pelo detetor externo e são respectivamente, $47,24 \pm 7,98$ e $352,63 \pm 22,46$ usando o critério 2σ .

5.6 Medidas de percentual do carbono moderno

Com os valores das taxas de contagem bruta da tabela 5.3 construímos a tabela 5.4 que mostra as contagens líquidas das amostras, R_a , que é a contagem bruta menos a contagem de fundo, em função do tempo de formação do pulso. Estes valores baseiam-se nas medidas apresentadas em anti-coincidência R_{ac} . O erro estatístico para a taxa de contagem líquida foi determinado considerando os erros parciais da amostra e da contagem de fundo.

Como teste do detetor, comparamos os valores medidos por ele (volume 200 ml), com os valores determinados com o detetor desenvolvido por Geyh, (volume 690 ml), que tem padrão internacional da Radiocarbono e mede em rotina no Laboratório de Carbono-14 da UFC.

Tomamos para seleção do tempo de diferenciação do pulso no novo detetor, valores em torno de $10 \mu s$ pois este valor é usado para o contador Geyh e estamos usando a mesma eletrônica. A taxa de contagem de fundo medida com o detetor Geyh, com diferenciação de

10 μs é de 3,5 cpm; por isso, esperamos que o novo detetor, com somente 29 % do volume, tenha uma taxa de contagem de fundo inferior a 3,5 cpm.

Tabela 5.4 Taxa de contagem líquida R_a em função do tempo de diferenciação do pulso t

Amostra	t (μs)	R_a (cpm)
P20	12	$3,6944 \pm 0,1243$
	10	$2,6373 \pm 0,0961$
	08	$2,6123 \pm 0,1050$
FZ 624	12	$2,7620 \pm 0,9724$
	10	$2,1494 \pm 0,0976$
	08	$2,0898 \pm 0,0930$
FZ 364	12	$1,6857 \pm 0,1023$
	10	$1,2702 \pm 0,0989$
	08	$1,2550 \pm 0,0956$

Os dados da tabela 5.3 mostram valores da taxa de contagem de fundo entre 6,19 e 4,21 cpm para tempos de diferenciação entre 8 μs e 12 μs . Estes valores são superiores ao esperado e se deve provavelmente à contaminação radioativa dos materiais usados na construção do detetor e estes materiais só são testados quando são utilizados.

No detetor de 200 ml com gás a pressão de uma atmosfera, temos dentro dele 0,009 moles de acetileno ou 0,21 g de carbono. O padrão para medidas de carbono-14, o

ácido oxálico distribuído pelo NBS tem uma atividade específica de 14,26 dpm/g de carbono (Polach, 1974).

Medindo uma amostra deste padrão devemos portanto, encontrar uma taxa de contagem menor do que 2,97 cpm. Na condição de 12 μ s o valor da contagem líquida do padrão está acima de 2,97 cpm como podemos ver da tabela 5.3, indicando que aconteceu um aumento da taxa de contagem por empilhamento dos pulsos.

A eficiência E , do detetor expressa pela razão entre a atividade do padrão, R_p , medida com o detetor e a atividade do Padrão NBS, definida por (5.2) é de 89 %, na condição de $t = 10 \mu$ s quando a taxa de contagem líquida para o padrão é de $2,6373 \pm 0,0961$ (tabela 5.4).

$$E = \frac{R_p (\text{cpm} / \text{g})}{14,24 \pm 0,07 (\text{dpm} / \text{g})} \quad (5.2)$$

Um índice de comparação entre condições de trabalho do detetor é a figura de mérito, F , definida em função da eficiência, E , quadrado dividida pela contagem de fundo, R_f , que nas condições de operação do detetor é de 1772. Para comparação, temos que este valor, em um sistema de cintilação líquida usado por Oikawa (1978) é de 790.

$$F = \frac{E^2}{R_f} \quad (5.3)$$

Usualmente, as condições de operação dos detetores de carbono-14 são comparadas por outra definição de fator de mérito que é a razão entre a taxa de contagem líquida do Padrão NBS, ($R_p - R_f$) e a contagem de fundo, R_f (Polach, 1982). Nesta nova definição, encontramos $F = 0,59$ para $12 \mu s$ e $10 \mu s$ e $F = 0,62$ para $8 \mu s$. Como a radiação de fundo é alta a figura de mérito é prejudicada, sendo cerca de um quinto do valor do detetor Geyh.

$$F = \frac{R_p - R_f}{R_f} \quad (5.4)$$

Embora com $8 \mu s$ melhore um pouco figura de mérito, de $0,59$ para $0,62$, a análise dos dados da tabela 5.4 mostra que este valor reduz a taxa de contagem do padrão provavelmente, por excesso de separação dos pulsos.

Com os dados da tabela 5.3 construímos a tabela 5.5 com as taxas de contagem do padrão, fundo e amostras FZ 624 e FZ 634 e os percentuais de carbono moderno, pMC, destas amostras definido como a razão entre a taxa de contagem líquida da amostra e a taxa de contagem líquida do padrão. Os pMCs das amostras FZ 624 e FZ 634, medidos pelo detetor Geyh são respectivamente, $84,30 \pm 1,54$ e $49,29 \pm 1,16$ com critério de 1σ .

Tabela 5.5 Taxa de contagem, R, e percentual do carbono moderno, pMC, das amostras FZ 624 e FZ 634.

t (μ s)	R (cpm)		FZ 624		FZ 634	
	P-20	∞ 73	R(cpm)	(pMC)	R(cpm)	(pMC)
12	9,8824 $\pm 0,1025$	6,1880 $\pm 0,0704$	8,9500 $\pm 0,0669$	74,76 \pm 3,14	7,8737 $\pm 0,0774$	45,63 \pm 2,80
10	7,1159 $\pm 0,0726$	4,4686 $\pm 0,0627$	6,6180 $\pm 0,0747$	81,50 \pm 4,11	5,7388 $\pm 0,0744$	47,98 \pm 3,53
8	6,8263 $\pm 0,0809$	4,2140 $\pm 0,0673$	6,3038 $\pm 0,0644$	80,00 \pm 3,51	5,4690 $\pm 0,0747$	48,04 \pm 3,70

Observamos nesta tabela, que na condição 10 μ s encontramos valores de pMC que correspondem a 96,5 % e 97,3 % dos valores medidos pelo contador Geyh, respectivamente para as amostras FZ 624 e FZ 634.

O detetor Geyh, com volume de 690 ml, trabalha com a pressão de uma atmosfera necessitando uma quantidade de 2,45 vezes maior de acetileno do que o novo detetor. Quando a quantidade de amostra não é suficiente podemos medi-la misturando-a com gás de atividade conhecida, usualmente gás de fundo, mas neste processo o erro estatístico aumenta.

A figura 5.6 mostra o crescimento do erro no valor da percentagem do carbono moderno, pMC, em função da diminuição do percentual da amostra misturada com gás de

fundo. Este crescimento é expresso por um fator que relaciona as pressões parciais p_a e p_f respectivamente, da amostra e do fundo quando os gases são misturados através da expressão $(1 + p_a/p_f)$

Muito embora o detetor desenvolvido tenha sido prejudicado pela alta contagem de fundo decorrente do uso de materiais contaminados, ele é capaz de discriminar amostras e medir pMC com o desvio de 5 % quando comparado aos valores calculados a partir de medidas em detetores com certificado de padrão internacional, como mostram os valores na tabela 5.3.

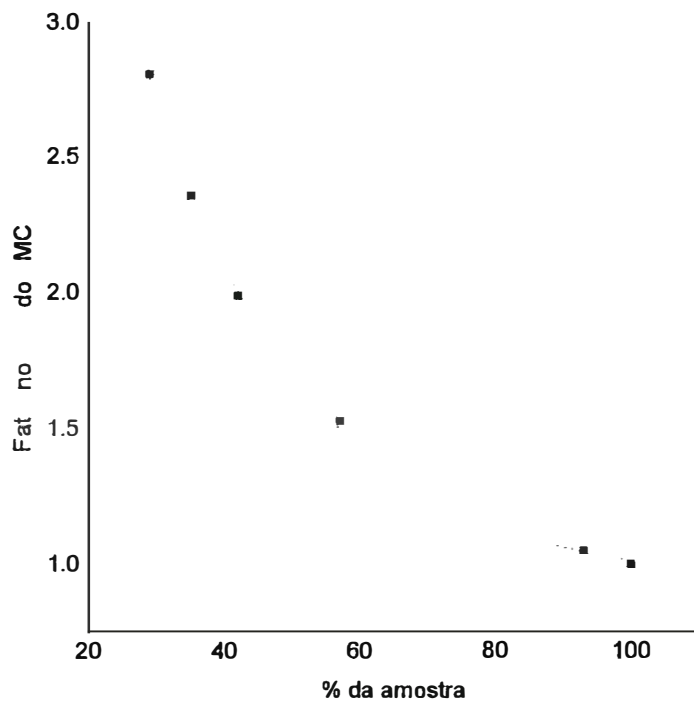


Figura 5.6 Fator no erro do pMC em função do percentual da amostra na mistura com gás de fundo

Se a mesma quantidade de amostra usada no detetor novo for misturada com gás de fundo para análise com o detetor Geyh, o erro no valor do pMC da amostra FZ 634 cresce de 1,16 sem mistura, para 3,26 com mistura; a medida desta amostra com o novo detetor tem um erro de 4,11 como podemos observar na tabela 5.5.

Como o erro experimental na operação de mistura dos dois gases não está considerado no valor de 3,26 podemos concluir que nestas condições de contagem de fundo, a mistura e o uso do novo detetor produzem os mesmos resultados.

Das discussões deste capítulo temos que as melhores condições de operação deste detetor são o valor do limiar de tensão 9 mV, tempo de diferenciação do pulso 10 μ s e pressão de uma atmosfera, medindo amostras de volume de até 200 ml obtendo valores de pMC aproximadamente de 4 a 5 % do valor real com um erro entre 3 e 5% no máximo.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

Foi construído um detetor proporcional a gás para medida de baixa atividade de emissão β^- para a datação com carbono-14 com as amostras na forma de acetileno.

Destacamos neste detetor:

(i) seu volume é de 200 ml, que é 29% do volume do detetor utilizado atualmente no laboratório de carbono-14 da UFC com certificado de padrão internacional;

(ii) ele permite medir amostras com 0,2 g de carbono. O detetor atual mede amostras com 0,7 g de carbono e para amostras menores, precisa-se adicionar gás de fundo para completar a pressão de 1 atm.

(iii) o erro nas determinações do pMC é da ordem do que está associado à medida feita pelo detetor maior, usando a mesma quantidade de amostra misturada com gás de fundo.

(iv) embora ele tenha alta contagem de fundo decorrente dos materiais usados na construção, ele é capaz de discriminar amostras e medir pMCs com o desvio de 5 % quando comparado aos valores com o detetor maior.

(v) as inovações na construção simplificaram sua montagem principalmente quanto ao sistema vedação sem uso de cola;

(vi) a voltagem de trabalho, em torno de 1,48 KV pode ser baixada se o fio central tiver um diâmetro menor do que o fio disponível na época da montagem;

(vii) as tampas de náilon podem ser substituídas por materiais como teflon na busca de materiais mais inertes.

Capítulo 7

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, J.R. Scintillation counting of natural radiocarbon. 1. The counting method. *Science* New York, 119: 155-157, 1954.
- AUDRIC, B.N. e LUNG, J.V.P. Use of dissolved acetylene in liquid scintillation counter for the measurement of C^{14} of low specific activity. *Nature* Londres 173: 992-993, , 1954.
- BARKER, H. Radiocarbon dating: large-scale preparation of acetylene from organic material. *Nature* London, 172: 631 - 632, 1953
- BELOVE, E. D. Circuitos eletrônicos discretos e integrados. Ed. *MCGraw-Hill* Rio de Janeiro - Brasil, 1968
- BERTHOLD Radiation measure instruments for science operation instructions for LB2008 14 p. 1970
- BROECKER, W. S.; TUCEK, C. S.; OLSON, E. A. Radiocarbon analysis of oceanic CO_2 . *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes*, 7 (1): 1 - 18, 1959
- BURKE JR., W.H. e MEINSHEIN, W.G. C^{14} dating with a methane proportional counter. *Rev. Scient. Instrum.* 26 (12): 1137-1140, 1955.
- CAMBERRA Proportional counter preamplifier - mode 806 *Instruction Manual* 7 p. 1977
- CAPUANO, F.G. e MARINO, M.A.M. Laboratório de eletricidade e eletrônica. Ed. Érica, São Paulo, 1988
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN) Radiações Nucleares. Ed. CNEN, 81 p., 1984.
- COOPER, D.W. Electronic instrumentation and measurement technique Ed. *Prentice Hall* New Jersey - EUA, 1978.
- CRATHORN, A. R. Radiocarbon dating: large-scale preparation of acetylene from organic material. *Nature* Londres, 172: 631-633, 1953.
- DE VRIES, H. L. e BARENDSSEN, G.W. Radiocarbon dating by a proportional counter filled with carbondioxide *Physica* XIX: 987 - 1003.1953.
- FERGURSSON, G.J. Radiocarbon dating system. *Nucleonics* 13 n° 1 p.18-23, 1955.

- GRAEME, TOBEY and HILLSMANN Operational amplifiers. Design and Applications. Ed. McGraw-Hill, 1986
- ICN PHARMACEUTICALS Instruction manual SC-722. 28 p. 1971
- ICRUM (International Commission on Radiation Units and Measurements) Measurement of low-level radioactivity, (*ICRU Report*, 22). Washington, D.C., Jun. p.47, 1972
- KAPLAN, I. e Coldemberg, C. Física Nuclear. Ed. Guanabara Dois Rio de Janeiro, 1978.
- KELLER, C. Radioquímica. Ed. Sauerländer (alemã), CNEN (língua brasileira) 322 p. 1981
- KLEINKNECHT, K. Detectors for particles radiation . Ed. Press Syndicate of the University of Cambridge. 1986
- KNOLL, G.F. Radiation detection and measurement. Ed. John Willey & Sons. Canada, 745 p. 1989
- LEO, W. R. Techniques for nuclear and particle physics experiments. Ed. Springer-Verlag. Alemanha, 368 p. 1987.
- LIBBY, W. F. Radiocarbon Dating Ed. The University of Chicago Press. 1952 *LIBBY, W.F. History of radiocarbon dating. In: *International Atomic Energy Agency* Viena, p.3-25, 1967
- MÜNNICH, K. O.; RORTHER, W. Transfer Bomb ^{14}C and Tritium from the atmosphere to the Ocean. In: *Radiocarbon Dating and Methods of Low-Level Counting*. IAEA, Viena, P.93, 1967.
- NYDAL, R. and SIGMOND, R. S. Radiocarbon dating in Tordheim *Appl. Sci. Res. B*, 6: 393 - 400, 1957.
- OIKAWA, H. Estudo das características de um sistema para datação por carbono-14. *Tese de Mestrado IEA 095*, São Paulo, 1978
- OLSSON, I.U. The half-life of ^{14}C and the problems which are encountered in absolute measurements on β^- decaying gases. In: *Radioactive Dating*, IAEA, Viena, P.1-11, 1963.

- ORTEC Experiments in nuclear science - alfa, beta, gama, x-ray, and neutron detectors and associated electronics introduction to theory and basic applications ORTEC AN39, 1971.
- POLACH, H.A. Application of liquid scintillation spectrometers to radiocarbon dating. In: *Liquid Scintillation Counting: recent developments* Nova York, N.Y., Academic, p.153-171, 1984.
- PRINGLE, R.W.; TURCHINETZ, W. and FUNT, B.L. Liquid scintillation techniques for radiocarbon dating. *Rev. Scient. Instrum.* 26 n° 9 p.859-865, 1955.
- RAETHE, C.H.; SEVOLD, B.J. and PEDERSON, C.N. A Multiple-Anode Anticoincidence Ring Counter *The Review of Scientific Instruments*: 461 - 463, 1951.
- RUTKOWSKI, G. Handbook of integrated - circuit operation amplifiers. *Ed. Prentice Hall.* New Jersey - EUA, 1975.
- SAULI, F. Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers. *CERN 77-09*, 92 p. 1977.
- SCHILING, D. e BELOVE, C. Circuitos eletrônicos discretos e integrados. *Ed. MCGraw-Hill*, 1986.
- SUESS, H.E. Natural radiocarbon measurements by acetylene counting. *Science* Nova York 120: 5-7, 1954.
- SUESS, H. E. Radiocarbon Concentration in Modern Wood. *Science* Nova York, 122: 415-417, 1955.
- TAMERS, M. A. Routine ^{14}C dating using liquid scintillation technique. *6 th Int. Conf. on Radiocarbon and Tritium dating.* Ed.Pulman, Washington, p.339 - 53, 1965

Capítulo 8

ANEXOS

A.1 Radioatividade

A primeira evidência da radioatividade foi observada por Becquerel quando, em 1896, verificou que sal de urânio emitia uma energia que atravessava camadas de papel e escurecia placas fotográficas virgens. A este tipo de energia Becquerel deu o nome de *radiação*. Madame Curie e o marido Pierre Curie verificaram em 1898 os elementos rádio e o polônio apresentavam o mesmo tipo de comportamento que o sal de urânio e a este fenômeno deu o nome de *radioatividade*.

Em 1904 já eram conhecidas algumas propriedades interessantes da radioatividade como escurecer filmes, ionizar gases, produzir cintilação, liberar grande quantidade de energia com pequena perda de massa e não ser afetada por alterações químicas e físicas no material que emite a radiação. A radioatividade tem origem no núcleo, por esta razão não é afetada por alterações químicas.

Um feixe de radiação sob a ação de um campo elétrico separa-se em três identificados como raios alfa (carga positiva), raios beta (carga negativa) e raios gama (carga nula, por não sofrer influência de campo elétrico) conforme está mostrado na figura A.1.

A emissão de *partículas α* é o único tipo de decaimento radioativo espontâneo que emite partículas pesadas. As *partículas beta* aparecem em três diferentes emissões que são β^- , β^+ e EC. A *radiação β* consiste de elétrons de alta energia que se originam no núcleo.

Esses elétrons nucleares têm propriedades idênticas aos elétrons atômicos tendo portanto, uma massa de (1/1840) uam e uma unidade de carga negativa.

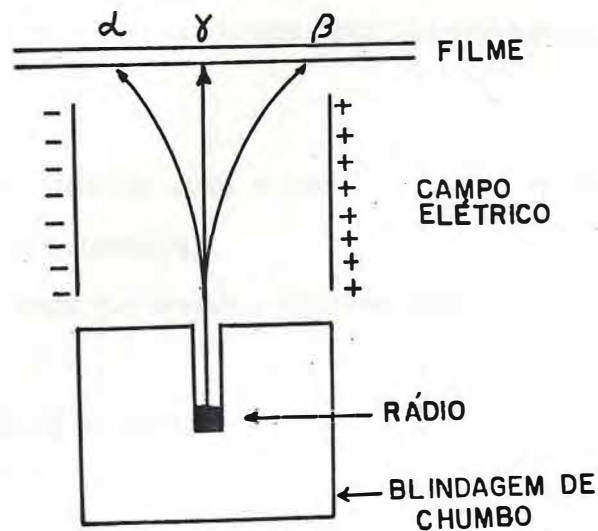


Figura A.1 - Natureza das radiações nucleares (Fonte: CNEN, 1984)

A radiação β^+ foi descoberta por Anderson em 1932. Esta radiação consiste de partículas de massa igual à massa do elétron mas com uma unidade de carga elétrica positiva. Ela é um elétron positivo também chamado de positron e é a antipartícula do elétron.

A terceira forma de decaimento beta foi descoberta por Alvarez, em 1938 e envolve a aniquilação da carga do próton transformando-o em neutron pela *captura de um elétron* orbital (E.C). Os decaimentos β^- , β^+ e EC são chamados de transformações isobáricas porque alteram a carga nuclear mas não alteram o número de massa. Junto com a emissão de elétrons e positrons pode ocorrer também a emissão de radiação gama.

A radiação gama pertence a uma classe conhecida como radiação eletromagnética que consiste de *quanta* ou pacote de energia transmitido como onda.

O decréscimo com o tempo da quantidade restante de um elemento radioativo não é linearmente proporcional ao tempo transcorrido desde sua formação mas obedece a uma *lei exponencial da desintegração radioativa* que é expressa pela equação:

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{A.1})$$

onde, R e R_0 são as atividade atual e inicial no tempo em que a mesma estava em equilíbrio com a atmosfera.

t é o tempo desde que cessou o equilíbrio com a atmosfera até ao momento da medida.

λ é a constante de decaimento radioativo.

T é a meia vida do elemento.

A.2 Fenômenos de ionização

A perda de energia de partículas carregadas é produzida por dois tipos de processos que são a *excitação* e a *ionização* com produção de um pares íon -elétron livre. Para excitar um átomo X é necessário que a partícula carregada p tenha uma quantidade certa de energia a ser transferida.



O processo de ionização pode ser representado por:



Como este processo tem um limiar de energia relativamente alto as reações de excitação geralmente são dominantes. Os elétrons e íons criados são conhecidos como *ionização primária*. Parte da energia é transferida para os elétrons que também criam par íon-elétron. Esta última ionização é conhecida como *ionização secundária*.

Um segundo mecanismo de ionização em gases é o *efeito Penning*. Em alguns átomos, os estados metaestáveis são excitados e por causa da grande diferença spin-paridade, se desexcitam imediatamente para o estado fundamental com emissão de um fóton. Em tais átomos a desexcitação pode ocorrer através de uma colisão com um segundo átomo, resultando na ionização deste último. Este mecanismo ocorre frequentemente com gases moleculares em gases nobres e gases nobres em gases nobres.



Um terceiro mecanismo de ionização que ocorre em gases nobres é a formação de *íons moleculares*. Neste processo, um gás de íons positivos interage com um átomo neutro de mesmo tipo para formar um íon molecular



Na detecção de partículas o número de pares elétron-íon criados é importante para a eficiência e resolução de um detetor mas é igualmente importante que esses pares criados permaneçam em um estado livre, sem se recombinarem, tempo suficiente para serem coletados.

Quando não existe campo elétrico externo, os pares íon-elétron geralmente se recombinam sob as forças de uma *atração elétrica*, emitindo um fóton no processo.



uma recombinação similar ocorre com os íons moleculares,



A taxa de recombinação, dn , depende das concentrações de íons positivos, n^+ e negativos n^- e de b , uma constante que depende do tipo de gás

$$dn = -b n^- n^+ dt \quad (\text{A.8})$$

Quando $n^+ = n^- = n$, integrando esta equação temos,

$$n = \frac{n_0}{1 + bn_0 t} \quad (\text{A.9})$$

onde, n_0 é a concentração inicial em $t = 0$.

Outro processo de eliminação dos íons é a *afinidade eletrônica* que é a captura de elétrons livres por átomos eletronegativos para formar íons negativos. Esses átomos têm a camada de elétrons mais externos quase cheia, tal que a adição de um elétron extra resulta na liberação de energia e na formação de um íon negativo estável.



A presença de gases eletronegativos no detector diminuirá drasticamente a eficiência por causa do aprisionamento dos elétrons antes dos pares elétrons-íons poderem atingir o eletrodos. Alguns gases eletronegativos bem conhecidos são: O₂, H₂O, CO₂, CCl₄ e SF₆. Os gases nobres He, Ne e Ar também têm afinidade eletrônica negativa (Leo, 1987).

O transporte o movimento de elétrons e íons em gases nos detectores de ionização, são extremamente importante, uma vez que esses fatores influenciam características de operação do detector.

A.3 Origem do Carbono -14

A Terra é circundada por uma camada de ar de 8 km de espessura contendo nitrogênio. Raios cósmicos com uma carga de alguns bilhões de eV colidem com o ar e o nitrogênio ao ser bombeado pelos raios cósmicos forma carbono-14 e trício que são isótopos radioativos respectivamente do carbono e do hidrogênio. A reação dominante na produção de carbono-14 é do tipo,



O carbono-14 transforma-se em nitrogênio através de uma reação de desintegração β^- , de acordo com a equação abaixo:

Se a mesma quantidade de amostra usada no detetor novo for misturada com gás de fundo para análise com o detetor Geyh, o erro no valor do pMC da amostra FZ 634 cresce de 1,16 sem mistura, para 3,26 com mistura; a medida desta amostra com o novo detetor tem um erro de 4,11 como podemos observar na tabela 5.5.

Como o erro experimental na operação de mistura dos dois gases não está considerado no valor de 3,26 podemos concluir que nestas condições de contagem de fundo, a mistura e o uso do novo detetor produzem os mesmos resultados.

Das discussões deste capítulo temos que as melhores condições de operação deste detetor são o valor do limiar de tensão 9 mV, tempo de diferenciação do pulso 10 μ s e pressão de uma atmosfera, medindo amostras de volume de até 200 ml obtendo valores de pMC aproximadamente de 4 a 5 % do valor real com um erro entre 3 e 5% no máximo.



A meia-vida do carbono-14 determinada inicialmente por Libby em 1955 é de 5558 ± 30 anos mas medidas mais precisas realizadas em 1963 por Olsson e Karlén (1963) determinaram o valor de 5730 ± 40 anos. Considerando que nessa altura já existiam centenas de determinações de carbono-14, para facilitar a comparação entre os dados futuros e os já publicados, resolveu-se (IAEA, 1968) continuar utilizando o valor determinado Libby.

O carbono radioativo se oxida formando dióxido de carbono, se mistura com o CO_2 existente na atmosfera e é a matéria que as plantas transformam em alimento de modo que ao incorporar material radioativo, elas se tornam também radioativas. Uma vez que os animais se alimentam das plantas e os homens das plantas e dos animais, então todos os seres vivos incorporam o carbono-14 de alguma forma.

Após a morte do organismo, o nível de ${}^{14}\text{C}$ diminui devido ao decaimento radioativo. Medindo a radioatividade presente numa amostra que não tem renovação de ${}^{14}\text{C}$ podemos determinar sua idade que corresponde ao tempo decorrido desde a época de sua formação.

A partir do início do século a atividade de carbono-14 na atmosfera começou a apresentar um decréscimo provocado pelo uso de combustíveis fósseis caracterizando o chamado “*Efeito Industrial*” ou “*Efeito Suess*”. (Suess, 1955). A partir de 1953, devido às

explosões de bombas nucleares, uma quantidade considerável de carbono-14 foi adicionada à atmosfera terrestre (Munnich e Röether, 1967).

A.4 Cálculo da contagem média e da percentagem do carbono moderno

Os valores médios das contagens das amostras, do fundo e do padrão são determinados, de acordo com a rotina no Laboratório de Carbono-14 da UFC, utilizando um critério para excluir valores fora de uma distribuição estatística que é definida a partir do menor valor da contagem, C_m . As contagens utilizadas no cálculo das médias estão no intervalo $C \pm 3\sqrt{C}$, onde $C = C_m \pm 3\sqrt{C_m}$. Este procedimento equivale a considerar verdadeiros os valores mais baixos e considerar incorretos os valores acima do intervalo definido.

A taxa de contagem média é calculada com

$$R = \frac{\sum \text{contagens}}{\sum \text{tempo}} \quad (\text{A.13})$$

e o desvio padrão σ é determinado com a equação

$$\sigma = \sqrt{\frac{R}{\sum \text{tempo}}} \quad (\text{A.14})$$

Medindo a taxa de contagem de uma amostra R_{ac} , o resultado é a soma das contribuições das contagens da amostra R_a e do fundo R_f , sendo a taxa de contagem líquida da amostra dada por

$$R_a = R_{ac} - R_f \quad (\text{A.15})$$

e o erro estatístico, em termos de desvio padrão a ela associado, dado por

$$\sigma = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_f^2} \quad (\text{A.16})$$

Os resultados das medidas de carbono-14 são usualmente expressos em percentagem do carbono moderno, pMC, que é razão entre a taxa de contagem líquida da amostra e 95 % da taxa de contagem líquida do padrão NBS. Usando a, p e f respectivamente para amostra, padrão e fundo, temos

$$pMC = \frac{R_a}{R_p} \quad (\text{A.17})$$

Onde, $R_a = R_{ac}^a - R_{ac}^f$ e $R_p = 0,95 (R_{ac}^p - R_{ac}^f)$

Com os valores do desvio padrão σ_{ac}^a , σ_{ac}^f e σ_{ac}^p respectivamente, nas taxas de contagem da amostra, fundo e padrão usamos a lei de propagação de erro para encontrar o erro na taxa de contagem líquida da amostra e do padrão que são dados por

$$\sigma_a = \frac{760}{P} \cdot \left(1 + \frac{P_f}{P_a}\right) \cdot \sqrt{(\sigma_{ac}^a)^2 + (\sigma_{ac}^f)^2} \quad (\text{A.18})$$

$$\sigma_p = \frac{760}{P} \cdot \sqrt{(\sigma_{ac}^p)^2 + (\sigma_{ac}^f)^2} \quad (\text{A.19})$$

onde, P, P_a e P_f são as pressões total e parciais da amostra e do fundo.

Usando a definição de percentual do carbono moderno e a Lei de Propagação dos Erro o erro no valor do pMC é dado por

$$\sigma_{pMC} = \left[\frac{(\sigma_{ac}^a)^2 + (\sigma_{ac}^f)^2}{(R_a)^2} + \frac{(\sigma_{ac}^p)^2 + (\sigma_{ac}^f)^2}{(R_p)^2} + \frac{2 \cdot (\sigma_{ac}^f)^2}{R_a R_p} \right] \quad (\text{A.20})$$

A.5 Exemplo 1

Cálculo do valor médio da taxa de contagem de coincidência com o detector interno com uma amostra FZ 634, com o Padrão NBS e medindo a contagem de fundo, juntamente com teste estatístico.

AMOSTRA P - 20
Valores em ordem crescente:

x[01]=314	x[15]=357
x[02]=315	x[16]=357
x[03]=322	x[17]=358
x[04]=331	x[18]=358
x[05]=341	x[19]=359
x[06]=344	x[20]=362
x[07]=345	x[21]=362
x[08]=346	x[22]=373
x[09]=349	x[23]=377
x[10]=350	x[24]=384
x[11]=351	x[25]=388
x[12]=353	x[26]=391
x[13]=354	x[27]=396

x[14]=356

DATA	= 06.09.95
INTERVALO	= 50 MIN
NUMERO DE MEDIDAS	= 27
MEDIA DO PADRAO	= 7.1059 CPM
ERRO DO FUNDO	= 0.0726 CPM
PRESSAO TOTAL	= 760
CHI	= 32.03
CHI TEORICO	= 39.83
NUMERO PARA CALCULO	= 27
SIGMA1	= 18
SIGMA2	= 6
SIGMA3	= 3

INTERVALO	= 50 MIN
NUMERO DE MEDIDAS	= 21
MEDIA DO FUNDO	= 4.4686 CPM
ERRO DO FUNDO	= 0.0652 CPM
CHI	= 16.74
CHI TEORICO	= 32.39
NUMERO PARA CALCULO	= 21
SIGMA1	= 12
SIGMA2	= 9
SIGMA3	= 0

AMOSTRA FZ 634
Valores em ordem crescente:

x[01]=255	x[11]=267
x[02]=256	x[12]=268
x[03]=259	x[13]=268
x[04]=260	x[14]=272
x[05]=261	x[15]=280
x[06]=264	x[16]=283
x[07]=264	x[17]=284
x[08]=265	x[18]=288
x[09]=266	x[19]=320
x[10]=266	x[20]=323

DATA	= 12.09.95
INTERVALO	= 50 MIN
NUMERO DE MEDIDAS	= 20
MEDIA DA AMOSTRA	= 5.4690 CPM
ERRO DA AMOSTRA	= 0.0740 CPM
PRESSAO TOTAL	= 760
PRESSAO PARCIAL A	= 1
PRESSAO PARCIAL B	= 0
CHI	= 24.62
CHI TEORICO	= 31.13
NUMERO PARA CALCULO	= 20
SIGMA1	= 16
SIGMA2	= 2
SIGMA3	= 2

AMOSTRA ∞ - 72

Valores em ordem crescente:

x[01]=203	x[12]=224
x[02]=203	x[13]=224
x[03]=207	x[14]=227
x[04]=208	x[15]=230
x[05]=208	x[16]=237
x[06]=210	x[17]=238
x[07]=217	x[18]=241
x[08]=220	x[19]=242
x[09]=221	x[20]=243
x[10]=221	x[21]=244
x[11]=224	

A.6 Exemplo 2

Cálculo do valor médio da taxa de contagem de anti-coincidência no detector interno com uma amostra FZ 634, com o Padrão NBS e medindo a contagem de fundo, juntamente com teste estatístico.

AMOSTRA	∞ - 72	DATA	= 12.09.95
Valores em ordem crescente:		INTERVALO	= 50 MIN
x[01]=2382	x[13]=2502	NUMERO DE MEDIDAS	= 20
x[02]=2408	x[14]=2505	MEDIA	= 48.2070 CPM
x[03]=2414	x[15]=2522	ERRO	= 0.2196 CPM
x[04]=2420	x[16]=2545	PRESSAO TOTAL	= 760
x[05]=2428	x[17]=2551	PRESSAO PARCIAL A	= 1
x[06]=2444	x[18]=2552	PRESSAO PARCIAL B	= 0
x[07]=2462	x[19]=2558	CHI	= 26.19
x[08]=2473	x[20]=2573	CHI TEORICO	= 31.13
x[09]=2483	x[21]=2582	NUMERO PARA CALCULO	= 20
x[10]=2496	x[22]=2584	SIGMA1	= 12
x[11]=2496	x[23]=2585	SIGMA2	= 7
x[12]=2501	x[24]=2639	SIGMA3	= 1
DATA	= 07.09.95	AMOSTRA	P- 20
INTERVALO	= 50 MIN	Valores em ordem crescente:	
NUMERO DE MEDIDAS	= 24	x[01]=2242	x[15]=2358
MEDIA	= 50.0875 CPM	x[02]=2244	x[16]=2359
ERRO	= 0.2043 CPM	x[03]=2253	x[17]=2363
CHI	= 41.29	x[04]=2280	x[18]=2366
CHI TEORICO	= 36.13	x[05]=2281	x[19]=2374
NUMERO PARA CALCULO	= 24	x[06]=2302	x[20]=2378
SIGMA1	= 12	x[07]=2317	x[21]=2394
SIGMA2	= 10	x[08]=2321	x[22]=2409
SIGMA3	= 2	x[09]=2325	x[23]=2412
		x[10]=2335	x[24]=2416
		x[11]=2340	x[25]=2424
		x[12]=2342	x[26]=2431
		x[13]=2349	x[27]=2435
		x[14]=2350	
AMOSTRA	FZ 634	DATA	= 06.09.95
Valores em ordem crescente:		INTERVALO	= 50 MIN
x[01]=2277	x[11]=2415	NUMERO DE MEDIDAS	= 27
x[02]=2332	x[12]=2424	MEDIA	= 46.9630 CPM
x[03]=2333	x[13]=2430	ERRO	= 0.1865 CPM
x[04]=2352	x[14]=2435	PRESSAO TOTAL	= 760
x[05]=2377	x[15]=2447	CHI	= 34.89
x[06]=2381	x[16]=2455	CHI TEORICO	= 39.83
x[07]=2390	x[17]=2474	NUMERO PARA CALCULO	= 27
x[08]=2399	x[18]=2479	SIGMA1	= 16
x[09]=2409	x[19]=2493	SIGMA2	= 9
x[10]=2410	x[20]=2495	SIGMA3	= 2

A.7 Exemplo 3

Cálculo do valor médio da taxa de contagem do contador externo; o detector interno estava com uma amostra FZ 634, com o Padrão NBS e medindo a contagem de fundo juntamente com teste estatístico.

AMOSTRA FZ 634		AMOSTRA ∞ - 72	
Valores em ordem crescente:		Valores em ordem crescente:	
x[01]=17625	x[11]=18105	x[01]=17437	x[14]=17836
x[02]=17709	x[12]=18143	x[02]=17505	x[15]=17843
x[03]=17834	x[13]=18178	x[03]=17614	x[16]=17855
x[04]=17848	x[14]=18190	x[04]=17636	x[17]=17859
x[05]=17931	x[15]=18231	x[05]=17701	x[18]=17872
x[06]=17971	x[16]=18260	x[06]=17703	x[19]=17875
x[07]=17975	x[17]=18320	x[07]=17721	x[20]=17879
x[08]=18000	x[18]=18347	x[08]=17732	x[21]=17924
x[09]=18024	x[19]=18456	x[09]=17751	x[22]=17954
x[10]=18025	x[20]=18699	x[10]=17763	x[23]=17977
		x[11]=17791	x[24]=18016
		x[12]=17834	x[25]=18019
		x[13]=17834	
DATA	= 12.09.95	DATA	= 07.09.95
INTERVALO	= 50 MIN	INTERVALO	= 50 MIN
NUMERO DE MEDIDAS	= 20	NUMERO DE MEDIDAS	= 25
MEDIA	= $\frac{360.7956}{20}$ CPM	MEDIA	= $\frac{355.9448}{25}$ CP
ERRO	= 0.6332 CPM	ERRO	= 0.5336 CPM
PRESSAO TOTAL	= 760	CHI	= 28.55
PRESSAO PARCIAL A	= 1	CHI TEORICO	= 37.37
PRESSAO PARCIAL B	= 0	NUMERO PARA CALCULO	= 25
CHI	= 38.69	SIGMA1	= 17
CHI TEORICO	= 28.58	SIGMA2	= 6
NUMERO PARA CALCULO	= 18	SIGMA3	= 2
SIGMA1	= 8		
SIGMA2	= 6		
SIGMA3	= 4		
VE[1]=18456			
VE[2]=18699			