

Instrumentação Nuclear e Detecção de Nêutrons e γ

Prof. Dr. Ulysses D'Utra Bitelli

Renato Kuramoto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN

Sumário

1	Experimentos - Eletrônica modular e processamento de sinais	1
1.1	Caracterização de sinais de um pulsador	1
1.2	Sistema típico de contagem	4
2	Experimentos - Detecção de nêutrons	7
2.1	Características gerais de alguns detectores de nêutrons	7
2.2	Curva característica de um BF_3	9
2.3	Espectros de energia de detectores de nêutrons	11
3	Experimentos - Espectroscopia γ com um detector HPGe	17
3.1	Interação de fótons com a matéria	17
3.2	Funções resposta	18
3.3	Calibração em energia	20
3.4	Resolução em energia	23
A	Osciloscópio	25
A.1	Largura de banda e tempo de subida	26
A.2	Principais controles e modos de operação	26
A.2.1	Acoplamento de entrada	26
A.2.2	Trigger	27
A.2.3	Display	28

Lista de Figuras

1.1	Pulso nuclear típico produzido por um pulsador.	2
1.2	Esquema eletrônico para observar efeitos de reflexões de sinais e casamento de impedâncias.	4
1.3	Diagrama de blocos da eletrônica padrão utilizada em um sistema de contagem típico.	5
2.1	Curva característica típica de um detector BF_3 . Na região 1 ocorrem efeitos de recombinação. O patamar na região 2 indica que todas as cargas formadas estão sendo coletadas. Na região 3 devido à tensão elevada ocorrem ionizações involuntárias e descargas espúrias.	10
2.2	Diagrama de blocos da eletrônica utilizada para determinar a curva característica de um detector BF_3	11
2.3	Diagrama de blocos da eletrônica utilizada para medida dos espectros de energia de detectores de nêutrons.	13
3.1	Função resposta de um detector típico para uma fonte γ monoenergética.	18
3.2	Diagrama de blocos da eletrônica utilizada para espectroscopia- γ de alta resolução com detector HPGe.	21
3.3	Espectro γ do nuclídeo ^{137}Cs adquirido com um detector HPGe.	21
3.4	Espectro γ do nuclídeo ^{60}Co adquirido com um detector HPGe.	22
A.1	Esboço de um tubo de raios catódicos utilizado em um osciloscópio.	25
A.2	Diagrama esquemático da eletrônica empregada em um osciloscópio.	26
A.3	Monitor de um osciloscópio.	28

Lista de Tabelas

1.1	Dados para calibração do pulsador.	3
1.2	Dados para calibração do SCA.	6
2.1	Dados para obtenção da curva característica de um BF_3	12
3.1	Dados para obtenção da curva de calibração do sistema de espectroscopia- γ	22

Capítulo 1

Experimentos - Eletrônica modular e processamento de sinais

O objetivo dos experimentos sugeridos neste capítulo é fornecer familiaridade com a eletrônica padrão NIM (*Nuclear Instruments Modules*)[1, 2, 3], a qual envolve módulos como: amplificadores, discriminadores, contadores, etc. Para tal finalidade, esta seção envolve basicamente a montagem de cadeias de módulos eletrônicos, e a caracterização dos sinais de entrada e saída de cada módulo envolvido.

1.1 Caracterização de sinais de um pulsador

Equipamentos utilizados:

1. Bin ORTEC 4001C;
2. Pulsador ORTEC 419;
3. Osciloscópio Tektronix TDS 210 (60MHz);
4. Cabos coaxiais com impedâncias de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
5. Conectores “T” e “I”;
6. Cargas de 50Ω , 75Ω e 93Ω .

Este primeiro experimento envolve a familiarização com o osciloscópio (apêndice A). Este instrumento será utilizado para se caracterizar os pulsos de entrada e saída de cada módulo eletrônico. Como fonte de sinais, utilizaremos um módulo eletrônico denominado de *pulsador* (gerador de ondas). O pulsador é um módulo NIM que simula pulsos nucleares provenientes de pré-amplificadores de detectores de radiação. Um pulso nuclear típico possui a forma ilustrada na Fig. 1.1, com tempo de subida da ordem de $\sim 5ns$ e tempo de descida de centenas de μs .

A forma deste pulso é conveniente pois é menos sensível à ruídos e impedâncias parasitas, podendo ser transmitido por longas distâncias. O pulsador é frequentemente utilizado para calibração e teste do sistema eletrônico.

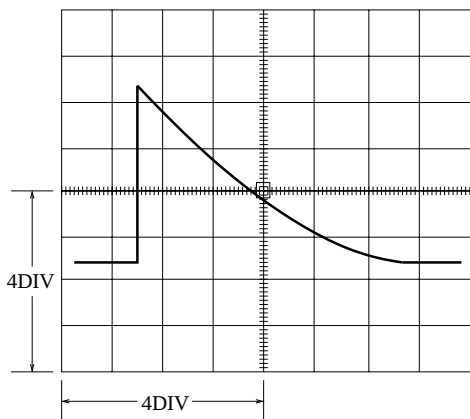


Figura 1.1: Pulso nuclear típico produzido por um pulsador.

Procedimento 1 - Pulso nuclear típico

1. Instale o pulsador no Bin e ligue;
2. Conecte uma extremidade do cabo coaxial de 50Ω na saída atenuada do pulsador, e a outra no canal 1 do osciloscópio;
3. Ajuste os controles do pulsador em: *Normalize* = 0.0, *Pulse Height* = 2.0, *Ref Voltage* = INT, *Polarity* = POS, *Rise Time* = MIN, *Attenuation Factor* = 2X;
4. Ajuste o *trigger*, a base de tempo e a escala de tensão do osciloscópio;
5. Observe o sinal do pulsador.

Exercícios 1 - Pulso nuclear típico

1. Faça um gráfico em papel milimetrado do sinal observado. Observe que a escala vertical do osciloscópio corresponde à *Volts/Divisão* e a escala horizontal à *Segundos/Divisão* (anote estes valores);
2. Meça no osciloscópio a tensão de pico, o tempo de subida, o tempo de descida, e a frequência dos pulsos;
3. Mude as chaves de atenuação do pulsador e observe as alterações no osciloscópio. Se necessário reajuste o *trigger*, a base de tempo e a escala de tensão;
4. Conhecendo a frequência de corte do osciloscópio ($f_{osc} = 60\text{MHz}$, para o Tektronix TDS 210), calcule o tempo de subida/descida intrínseco do osciloscópio utilizando a expressão:

$$t_{osc}(ns) = \frac{350}{f_{osc}(MHz)} \quad (1.1)$$

5. Calcule a contribuição do osciloscópio no tempo de subida/descida real do pulso através da equação:

$$t_{observado}^2 = t_{pulso}^2 + t_{osc}^2 \quad (1.2)$$

onde: $t_{observado}$ é o tempo de subida/descida medido; t_{pulso} é o tempo de subida/descida real do pulso; e t_{osc} é a contribuição do osciloscópio.

Procedimento 2 - Calibração do pulsador

1. Utilizando a mesma montagem do **procedimento 1** coloque o fator de atenuação do pulsador em $10X$;
2. Medindo a tensão de pico do sinal do pulsador no osciloscópio, preencha a Tab. 1.1.
Obs: talvez será necessário ajustar a normalização do sinal no pulsador;

Tabela 1.1: Dados para calibração do pulsador.

Ajuste do pulsador	Altura do pulso(V)
1.0	
2.0	
4.0	
6.0	
8.0	
10.0	

Exercícios 2 - Calibração do pulsador

1. Faça um gráfico com os dados da Tab. 1.1;
2. Faça um ajuste linear ($y = ax + b$) dos dados. Esta é a reta de calibração do pulsador para atenuação de $10X$. Através desta é possível conhecer a amplitude do pulso em Volts a partir dos ajustes no pulsador.;

Procedimento 3 - Casamento de impedâncias e reflexões

1. Monte o esquema eletrônico ilustrado na Fig. 1.2;
2. Com a extremidade do cabo de 75Ω aberta, ajuste o *trigger* do osciloscópio e coloque a base de tempo em $50ns$. Observe a subida do sinal;

Exercícios 3 - Casamento de impedâncias e reflexões

1. Observe que o sinal possui duas bordas de subida. A primeira borda corresponde ao sinal direto do pulsador e a segunda ao sinal refletido na extremidade aberta do cabo de 75Ω . A reflexão ocorre devido ao não casamento de impedância na extremidade aberta;

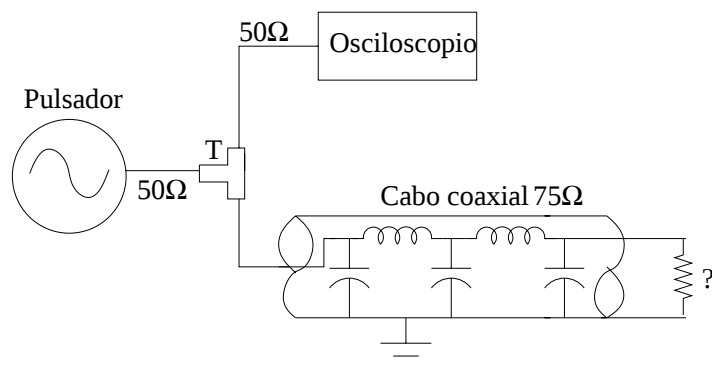


Figura 1.2: Esquema eletrônico para observar efeitos de reflexões de sinais e casamento de impedâncias.

2. Faça um desenho das bordas de subida do sinal observado em um papel milimetrado. Anote as escalas verticais e horizontais do osciloscópio;
3. Meça no osciloscópio o intervalo de tempo entre as duas bordas de subida ($\sim 250ns$). Este intervalo corresponde ao tempo em que o sinal proveniente do pulsador percorre duas vezes o comprimento total do cabo, ou seja, o tempo de ida e volta do pulso. A metade deste intervalo de tempo é denominada de *atraso do cabo* (*delay*);
4. Se a impedância na extremidade aberta do cabo de 75Ω for casada, nenhuma reflexão será observada. Para casar a impedância utilize um “T” e uma carga de 75Ω (impedâncias em série).
5. Troque o cabo de 75Ω por um de 50Ω com comprimento conhecido (no caso $3.6m$);
6. Meça o atraso do cabo de $3.6m$ ($\sim 30/2ns = 15ns$);
7. Conhecendo o comprimento do cabo e o seu atraso, calcule a velocidade de propagação do sinal no cabo coaxial de 50Ω ($\sim 2.4 \times 10^8 m/s$).

1.2 Sistema típico de contagem

Equipamentos utilizados:

1. Bin ORTEC 4001C;
2. Pulsador ORTEC 419;
3. Osciloscópio Tektronix TDS 210 (60MHz);
4. Cabos coaxiais com impedâncias de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
5. Conectores “T” e “I”;
6. Cargas de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;

7. Amplificador ORTEC 460;
8. Analisador Monocanal (*Single-Channel-Analyzer-SCA*) ORTEC 551;
9. Contador ORTEC 871.

Nesta seção será apresentado uma cadeia eletrônica padrão para contagem de radiação. Este sistema inclui módulos nucleares que são utilizados na maioria dos experimentos em Física Nuclear: pré-amplificadores, amplificadores, discriminadores, analisadores monocanais, contadores e um osciloscópio.

Tais módulos eletrônicos são divididos em duas grandes classes, a saber: *módulos lineares* e *módulos lógicos*. De uma forma genérica, um módulo lógico é um dispositivo que produz um sinal lógico (sinal quadrado de amplitude constante) se um dado critério lógico for satisfeito. Exemplos simples de módulos lógicos são: discriminadores, SCAs, MCAs, MCSs e ADCs em geral. Um módulo linear é um dispositivo que produz sinais lógicos na saída, onde a forma e a amplitude destes sinais carregam informações sobre tipo de partícula detectada, energia, etc.

Procedimento 1 - Calibração do SCA

1. Monte o sistema ilustrado na Fig. 1.3;

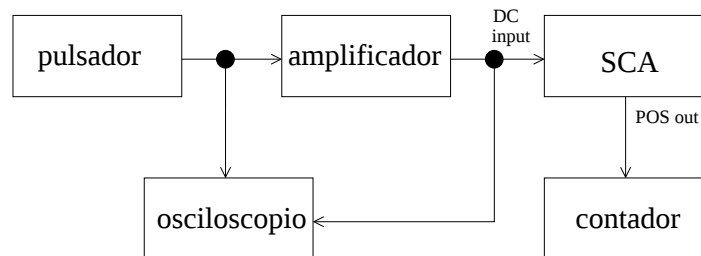


Figura 1.3: Diagrama de blocos da eletrônica padrão utilizada em um sistema de contagem típico.

2. Instale o pulsador 419, o amplificador 460, o SCA 551, o contador 871 no bin 4001C da ORTEC;
3. Conecte a saída atenuada do pulsador à entrada do amplificador com um cabo coaxial de 50Ω ;
4. Conecte a saída unipolar do amplificador à entrada do SCA;
5. Conecte a saída positiva do SCA à entrada positiva do contador;

Exercícios 1 - Calibração do SCA

1. Observando o sinal de saída do amplificador no osciloscópio, ajuste os ganhos grosso e fino do amplificador de modo que tal sinal possua amplitude de $\sim 200mV$. Faça

um gráfico em papel milimetrado do sinal observado, lembrando de anotar as escalas vertical e horizontal do osciloscópio;

2. Insira o sinal proveniente do amplificador na entrada do SCA;
3. Com o SCA em modo integral (discriminador), ajuste o *Lower-Level*(LL) em 0.0;
4. Observe o sinal lógico da saída positiva do SCA. Faça um gráfico deste sinal em papel milimetrado;
5. Insira este sinal na entrada positiva do contador, e faça os seguintes ajustes: *Time-Base*=0.1s; $N = 1$ e $M = 1$. Isto indica que o contador irá contar os pulsos provenientes do SCA por um período de 1s. Como o pulsador tem frequência de 60Hz, devemos observar aproximadamente 60 pulsos por segundo;
6. Aumente o LL até o pulsador parar de registrar contagens, e anote este valor na Tab. 1.2;

Tabela 1.2: Dados para calibração do SCA.

Amplitude do pulso do amp. (V)	Ajuste do LL do SCA
200mV	
400mV	
600mV	
800mV	
1000mV	

7. Aumente o ganho do amplificador até que o pulso possua uma amplitude de 400mV e repita o item anterior. Repita este procedimento até preencher a Tab. 1.2 completamente.
8. Faça um gráfico dos dados da Tab. 1.2 e um ajuste linear ($y = ax + b$). Esta é a reta de calibração do SCA;

Capítulo 2

Experimentos - Detecção de nêutrons

A detecção de qualquer radiação está ligada à interação desta com o volume ativo de um detector. Para as partículas carregadas (α , p , núcleos leves e pesados), os processos de interação são a ionização e a excitação dos átomos ou moléculas do material que constitui o detector. No caso de fótons, os principais processos de interação são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. Em resumo, todos estes processos de interação resultam na formação de cargas no volume ativo do detector, as quais após coletadas dão origem à um sinal elétrico.

Como os nêutrons não ionizam diretamente a matéria, estes são detectados indiretamente, ou seja, o nêutron primeiramente interage com um dado material, produz uma partícula carregada ou um fóton, o qual é detectado pelos métodos convencionais mencionados. O material com o qual o nêutron interage produzindo uma partícula carregada ou um fóton é denominado de *conversor* [4, 5]. A partícula carregada ou o fóton são resultados de reações nucleares do nêutron com um núcleo atômico presente no conversor. Se o mecanismo de reação é conhecido, informações sobre o nêutron incidente podem ser extraídas através do estudo dos produtos de reação.

2.1 Características gerais de alguns detectores de nêutrons

detectores BF_3 . São os detectores mais utilizados na instrumentação de reatores nucleares. Os BF_3 são contadores proporcionais preenchidos com o gás BF_3 (*trifluoreto de boro*) enriquecido à mais que 90% em ^{10}B . Os nêutrons são detectados via a reação $^{10}B(n, \alpha)^7Li$. Para nêutrons térmicos ($E \simeq 0.025eV$) tal reação possui $Q = 2.310MeV$ e $\sigma = 3840b$. A energia do 7Li é de $0.84MeV$ onde ocorre o primeiro degrau devido ao efeito de parede, e a da partícula- α de $1.47MeV$ onde encontra-se o segundo degrau. Pressões e tensões de operação típicas de detectores BF_3 são: $\sim 0.1 - 0.5atm$ e $\sim 1000 - 3000V$. Devido às baixas pressões do gás, os BF_3 são menos sensíveis à radiação- γ . Juntamente com o alto valor de

Q , a discriminação entre γ s e nêutrons é facilitada.

detectores com deposição de ^{10}B . Detectores ^{10}B são detectores a gás proporcionais que empregam a mesma reação de conversão $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ que os detectores BF_3 , no entanto, o ^{10}B é introduzido no detector no estado sólido na forma de um revestimento de suas paredes. A utilização de ^{10}B na forma sólida tem a vantagem de possibilitar o preenchimento do detector com gases mais apropriados que o BF_3 , como por exemplo o $P10$ (90% argônio e 10% metano- CH_4). Além disso, outra vantagem é a redução da degradação química sofrida pelo BF_3 devido à exposição à altas doses de radiação- γ . Devido à utilização de gases mais adequados para coleção de cargas, as tensões de operação dos detectores ^{10}B são inferiores às dos detectores BF_3 , e estão no intervalo de 900 – 1100V.

detectores ^3He . São contadores proporcionais que utilizam a reação $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ para a detecção de nêutrons. Para nêutrons térmicos ($E \simeq 0.025\text{eV}$) esta reação possui $Q = +764\text{keV}$ e $\sigma = 5400\text{b}$. As energias dos produtos de reação são: $E(t) = 191\text{keV}$ e $E(p) = 573\text{keV}$. Assim, o primeiro degrau devido ao efeito de parede ocorre em 191keV e o segundo em 573keV . Os detectores de ^3He operam à pressões mais elevadas que os BF_3 , em torno de 4.5atm , o que o torna mais sensível. Todavia, os detectores de ^3He são mais sensíveis à radiação- γ também, e devido ao pequeno valor de Q quando comparado aos BF_3 , a discriminação entre pulsos de γ e nêutrons torna-se mais difícil.

Câmara de fissão (CF). São câmaras de ionização que detectam produtos de fissões (PF) induzidas por nêutrons. Tais fissões ocorrem em uma camada de material fissionável que envolve o detector. Algumas composições típicas são: 90% de ^{234}U (fértil) e 10% de ^{235}U (fissil), de modo que o ^{235}U é formado via a reação $^{234}\text{U}(n, \gamma)^{235}\text{U}$; ^{235}U - ^{238}U , onde o isótopo fissil ^{239}Pu é produzido via a reação de captura $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{Pu}$. Devido à intensa ionização produzida pelos PF, as CF operam com baixas tensões, na região de câmara de ionização ($\sim 200 - 500\text{V}$). Um gás típico utilizado em CF é o $P10$ (90% argônio e 10% metano- CH_4) à pressões em torno de 1atm . Devido à reação de conversão (fissão) e às baixas pressões de operação, as CF são praticamente insensíveis à radiação- γ . Uma característica das CF é a presença de pulsos devido ao decaimento- α dos materiais fissionáveis utilizados. Tais pulsos são de pequena amplitude quando comparados aos produzidos por PF, e podem ser facilmente discriminados.

Câmara de ionização compensada CIC. São detectores à gás que operam na região de câmaras de ionização. Uma CIC possui duas câmaras, uma contendo o gás BF_3 ou uma camada de boro nos eletrodos, a qual é sensível à nêutrons e fótons- γ , e outra contendo um gás sensível somente à radiação- γ . A câmara de ionização é calibrada expondo-a à uma fonte de radiação- γ apenas, e através de ajustes na pressão dos gases em cada câmara, dimensões das câmaras e tensões de operação, as correntes produzidas em cada câmara são balanceadas de modo a se anularem. Assim, quando a câmara é exposta à ambas radiações, nêutrons e γ , somente os nêutrons produzirão correntes no eletrômetro. Com a discriminação da radiação- γ , as CIC produzem correntes proporcionais ao fluxo de nêutrons.

Câmara de ionização não-compensada CINC. Como as CICs, as CINCs também são detectores à gás que operam na região de câmaras de ionização. Todavia, as CINC não possuem um câmara isolada sensível somente à radiação- γ . Deste modo, a corrente produzida por estes

detectores deve-se à presença de nêutrons e fótons- γ juntos.

Fotodiodos. Ao contrário dos detectores mencionados acima, os fotodiodos são detectores de estado sólido. São constituídos basicamente de um cristal semicondutor (silício) envolvido em uma camada de um material conversor plástico (*Mylar*, polietileno, etc.). Os nêutrons são detectados através da reação $p(n, p')n'$, onde o próton produz um sinal no semicondutor. O espectro de tais detectores pode fornecer informações sobre a energia do nêutron detectado. Os detectores fotodiodos podem ser construídos em diferentes tamanhos, com áreas efetivas que vão desde alguns mm^2 até cm^2 . O material conversor tem espessuras típicas em torno de $1.1mg/cm^2$. As tensões de operação variam de 10–100V dependendo do cristal semicondutor.

2.2 Curva característica de um BF_3

Equipamentos utilizados:

1. Bin ORTEC 4001C;
2. Osciloscópio Tektronix TDS 210 (60MHz);
3. Cabos coaxiais com impedâncias de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
4. Conectores “T” e “I”;
5. Cargas de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
6. Fonte de alta tensão ORTEC 556;
7. Detector BF_3 ;
8. Pré-amplificador ORTEC 142;
9. Amplificador CANBERRA 2024;
10. Analisador Monocanal (*Single-Channel-Analyzer-SCA*) ORTEC 551;
11. Contador ORTEC 871.

A *curva característica*[4] de um detector é obtida determinando a variação na taxa de contagem em função da tensão aplicada. Uma curva característica típica está ilustrada na Fig. 2.1. Esta curva está dividida em três regiões. A *região 1* apresenta um aumento na taxa de contagem com a elevação da tensão de operação. Nesta região, há competição entre a perda de pares de íons por recombinação, e a coleção nos eletrodos. Aumentando a intensidade do campo elétrico (aumentando a tensão de operação), a força que atua sobre as cargas individuais torna-se mais intensa, diminuindo a probabilidade de recombinação. Na *região 2* a perda de carga por recombinação é desprezível, de modo que praticamente todos os íons formados são coletados. Na *região 3*, com o aumento da tensão entre os eletrodos do detector começam a ocorrer ionizações involuntárias e descargas espúrias (faíscas). Deve-se evitar tensões próximas da região 3, pois tais efeitos diminuem a vida útil do detector.

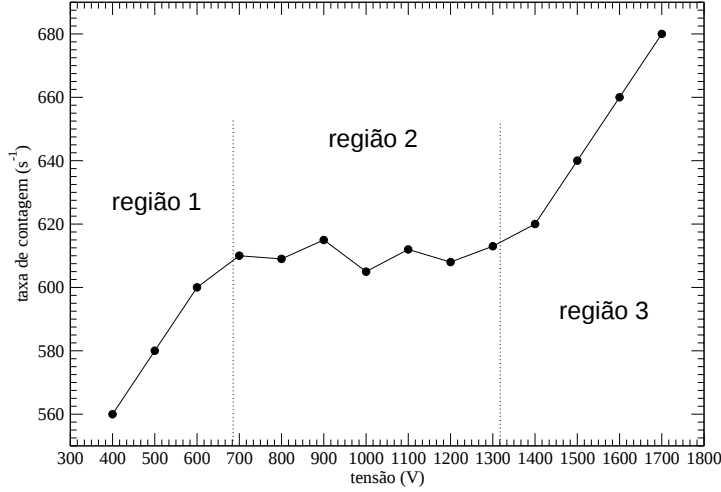


Figura 2.1: Curva característica típica de um detector BF_3 . Na região 1 ocorrem efeitos de recombinação. O patamar na região 2 indica que todas as cargas formadas estão sendo coletadas. Na região 3 devido à tensão elevada ocorrem ionizações involuntárias e descargas espúrias.

Na realidade, o patamar de qualquer detector à gás possui uma pequena inclinação, pois o volume sensível do detector aumenta com a tensão aplicada. A *inclinação percentual* é dada por:

$$\text{inclinação}(\%) = \frac{C_C - C_I}{C_M} \times 100 \quad (2.1)$$

onde: C_C é a taxa de contagem no centro do patamar; C_I é taxa de contagem no início do patamar; C_M é a taxa de contagem para uma tensão entre os pontos C_C e C_I . Um detector em bom estado de funcionamento deve possuir um patamar com extensão superior à 100V e inclinação em torno de 3%.

Procedimento 1 - Curva característica de um detector BF_3

1. Monte a eletrônica esquematizada na Fig. 2.2;
2. Será utilizada uma fonte de nêutrons de $Am - Be$ de $1Ci$, a qual produz nêutrons via a reação ${}^9Be(\alpha, n){}^{12}C^*$ com $Q = +5.71MeV$. A meia-vida desta fonte é de 458 anos (meia-vida do ${}^{241}Am$). A fonte de $Am - Be$ não é monoenergética, mas possui um espectro de nêutrons que compreende o intervalo de $\sim 1 - 10MeV$. Em média, os nêutrons produzidos por uma fonte de $Am - Be$ estão na região rápida, por isso é necessário utilizar um moderador (polietileno ou água) entre a fonte e o detector;
3. Coloque uma tensão inicial no detector de 100V. OBS: a tensão deve ser elevada lentamente afim de evitar descargas espúrias no gás;

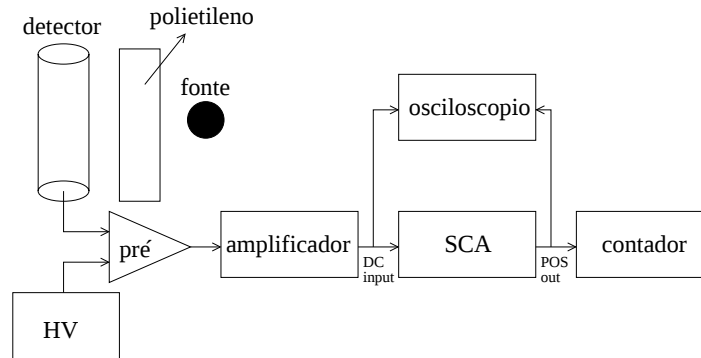


Figura 2.2: Diagrama de blocos da eletrônica utilizada para determinar a curva característica de um detector BF_3 .

4. Observe os sinais do pré-amplificador, do amplificador e do SCA no osciloscópio, afim de detectar a existência de ruídos.
5. Meça a amplitude dos ruídos de alta frequência. Com o SCA operando em modo integral, ajuste o LL do SCA de modo a eliminar os ruídos;
6. Ajuste o ganho do amplificador de modo que o pulso de saída possua amplitude em torno de $300mV$. É interessante verificar se para a mais alta tensão de operação à ser utilizada, o pulso produzido pelo amplificador não está saturado. Se o sinal estiver saturado diminua o ganho do amplificador. Durante as medidas o ganho do amplificador e o LL do SCA não devem ser alterados;
7. Ajuste o intervalo de contagem do contador em 10s;

Exercícios 1 - Curva característica de um detector BF_3

1. Faça 3 leituras seguidas do número de contagens obtidas em 10s pelo contador, com o detector operando com tensão de $100V$, e anote na Tab. 2.1;
2. Eleve a tensão de operação em $100V$ e faça novamente as três leituras de contagem anotando os valores na Tab. 2.1. Repita este procedimento preenchendo a Tab. 2.1;
3. Faça um gráfico da taxa de contagem em função da tensão de operação afim de obter a curva característica do detector;
4. Determine o comprimento do patamar em Volts;
5. Determine a inclinação percentual do patamar segundo a eq. (2.1);

2.3 Espectros de energia de detectores de nêutrons

Equipamentos utilizados:

Tabela 2.1: Dados para obtenção da curva característica de um BF_3 .

Tensão de operação (V)	cont. 1 (10s)	cont. 2 (10s)	cont. 3 (10s)	média	desvio
100V					
200V					
300V					
400V					
500V					
600V					
700V					
800V					
900V					
1000V					
1100V					
1200V					
1300V					
1400V					
1500V					
1600V					
1700V					

1. Bin ORTEC 4001C;
2. Osciloscópio Tektronix TDS 210 (60MHz);
3. Cabos coaxiais com impedâncias de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
4. Conectores “T” e “I”;
5. Cargas de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
6. Fonte de alta tensão ORTEC 556;
7. Detectores: BF_3 , 3He Centronic $31^3He380/25B$, câmara de fissão Centronic $FC4A$ 100 $U235$, fotodiodo;
8. Pré-amplificadores ORTEC 142;
9. Amplificador CANBERRA 2024;
10. Analisador Multicanal (*Multichannel-Analyzer*-MCA) ORTEC;
11. *Multichannel-BUFFER*-MCB ORTEC 918A;
12. PC para aquisição de dados (*software* MAESTRO);

Procedimento 1 - Espectro de um detector BF_3

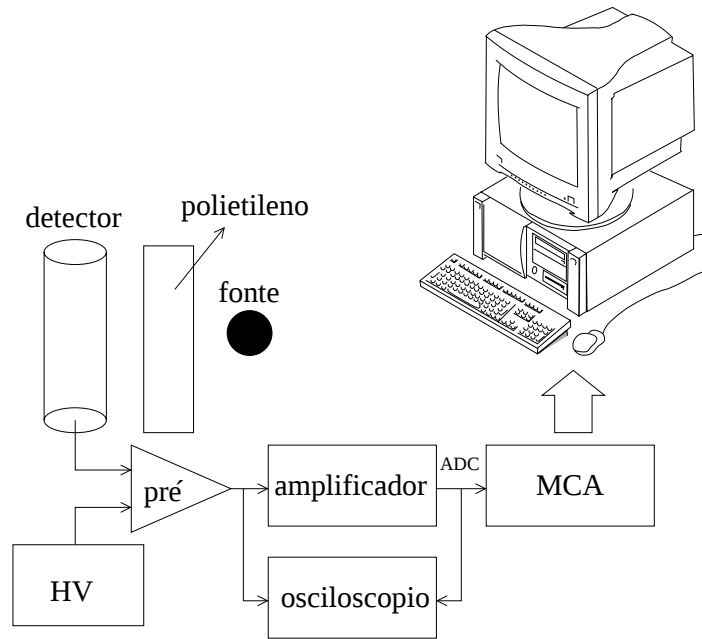


Figura 2.3: Diagrama de blocos da eletrônica utilizada para medida dos espectros de energia de detectores de nêutrons.

1. Monte o esquema ilustrado na Fig. 2.3;
2. Será utilizada a mesma fonte de $Am - Be$ mencionada na sec. 2.2;
3. A tensão de operação do BF_3 é de $1100V$, e o pré-amplificador a ser usado é o 142 da ORTEC;

Exercícios 1 - Espectro de um detector BF_3

1. Ajuste o multicanal para converter os pulsos do amplificador em 4096 ou 8192 canais;
2. Ajuste o ganho do amplificador de modo que todo o espectro do detector esteja dentro da janela do multicanal;
3. Ajuste o *Live Time* do MCA em $\sim 10min$ e adquira o espectro. Anote o valor do tempo morto;
4. Identifique os dois patamares com inícios em $0.84MeV$ e $1.47MeV$ devido ao efeito de parede do BF_3 ;
5. Identifique também o pico referente a energia máxima coletada ($0.84+1.47 = 2.31MeV$);

Procedimento 2 - Espectro de um detector 3He

1. Será utilizado a mesma eletrônica esquematizada na Fig. 2.3;

2. A tensão de operação do detector de 3He é de 1400V, e o pré amplificador a ser usado é o 142 da ORTEC;

Exercícios 2 - Espectro de um detector 3He

1. Faça os mesmos ajustes no MCA descritos no **Exercício 1** para a aquisição do espectro do BF_3 ;
2. Observe que devido à alta pressão de 3He o efeito de parede é minimizado neste tipo de detector. Os patamares devem estar localizados em 191keV e em 573keV;
3. O pico de máxima energia deve estar em $191keV + 573keV = 764keV$;

Procedimento 3 - Espectro de uma câmara de fissão

1. Será utilizado a mesma eletrônica esquematizada na Fig. 2.3;
2. A tensão de operação da CF é de 250V, e o pré amplificador a ser usado é o 142 da ORTEC. Observe que a tensão de operação da CF é mais baixa pois esta opera na região das câmaras de ionização, enquanto os detectores BF_3 e He_3 na região dos contadores proporcionais;

Exercícios 3 - Espectro de uma câmara de fissão

1. Faça os mesmos ajustes no MCA descritos no **Exercício 1** para a aquisição do espectro do BF_3 ;
2. Identifique o nível de discriminação para eliminar as partículas- α ;
3. Devido à espessura relativamente grande da camada de material físsil/fissionável, o *straggling em energia* sofrido pelos produtos de fissão ao atravessarem tal camada, faz com que nenhum pico seja observado no espectro (ref. [3] pg. 512);

Procedimento 4 - Espectro de um fotodiodo

1. Será utilizado a mesma eletrônica esquematizada na Fig. 2.3;
2. A tensão de operação do fotodiodo é de 10V, e o pré-amplificador à ser utilizado é o 142A da ORTEC;

Exercícios 4 - Espectro de um fotodiodo

1. Faça os mesmos ajustes no MCA descritos no **Exercício 1** para a aquisição do espectro do BF_3 ;

2. Na reação (n, p) , o ângulo máximo de espalhamento é 90° e o mínimo 0° (colisão frontal). Na colisão frontal, toda a energia do nêutron é transferida para o próton. O próton por sua vez, deposita tal energia no fotodiodo;
3. Para energias do nêutron até 14MeV , a reação de espalhamento (n, p) é isotrópica no sistema de centro-de-massa. Sendo o processo isotrópico, a probabilidade do próton adquirir qualquer energia entre 0 e E_n (energia do nêutron incidente), é constante. Assim, o espectro de um fotodiodo é constante no intervalo de 0 até E_n , onde apresenta um queda bem definida;

Capítulo 3

Experimentos - Espectroscopia γ com um detector HPGe

Nesta seção serão estudados espectros γ adquiridos com um detector HPGe (germânio hiper-puro) e a cadeia eletrônica associada. Serão apresentados os mecanismos de interação dos fótons com a matéria, e o resultado de tais mecanismos na função resposta do detector.

3.1 Interação de fótons com a matéria

A radiação γ pode interagir de várias maneiras com a matéria, no entanto somente três mecanismos de interação são significantes na espectroscopia- γ [2, 3]: *efeito fotoelétrico*, *efeito Compton* e *produção de pares*.

Efeito fotoelétrico. Este mecanismo de interação é predominante em baixas energias (até algumas centenas de $keVs$). Neste mecanismo um fóton γ de energia $h\nu$ interage com um elétron ligado com energia E_b sendo completamente absorvido. Este elétron é ejetado do átomo com energia cinética $E_{e-} = h\nu - E_b$. A seção de choque fotoelétrica varia com Z^4 ou Z^5 , o que indica que o efeito fotoelétrico é mais provável em materiais com maior número atômico.

Efeito Compton. Predominante na região entre $\sim 1MeV$ à $\sim 5MeV$. O espalhamento Compton consiste no espalhamento de um fóton γ de energia $h\nu$ por um elétron livre. Após a interação o fóton γ emerge com energia $h\nu' \leq h\nu$, e o elétron com energia $E_{e-} = h\nu - h\nu'$.

Produção de pares. Este mecanismo é predominante na região de altas energias (acima de $5 - 10MeV$). Este processo ocorre devido ao intenso campo elétrico próximo aos prótons do núcleo alvo, e corresponde ao desaparecimento do fóton γ incidente seguido da criação de um par elétron-pósitron. A energia cinética do par $e^- - e^+$ é dada por: $E_{e-} + E_{e+} = h\nu - 2m_0c^2$. A seção de choque para a produção de pares depende de Z^2 , de modo que este processo é mais provável em materiais de maior número atômico.

3.2 Funções resposta

A Fig. 3.1 ilustra os diversos processos que podem ocorrer em um sistema típico de espectroscopia- γ [3]. Nem todas as estruturas apresentadas nesta figura são observadas em um único espectro. Cada estrutura surge nos espectros dependendo do tipo e do tamanho do detector utilizado.

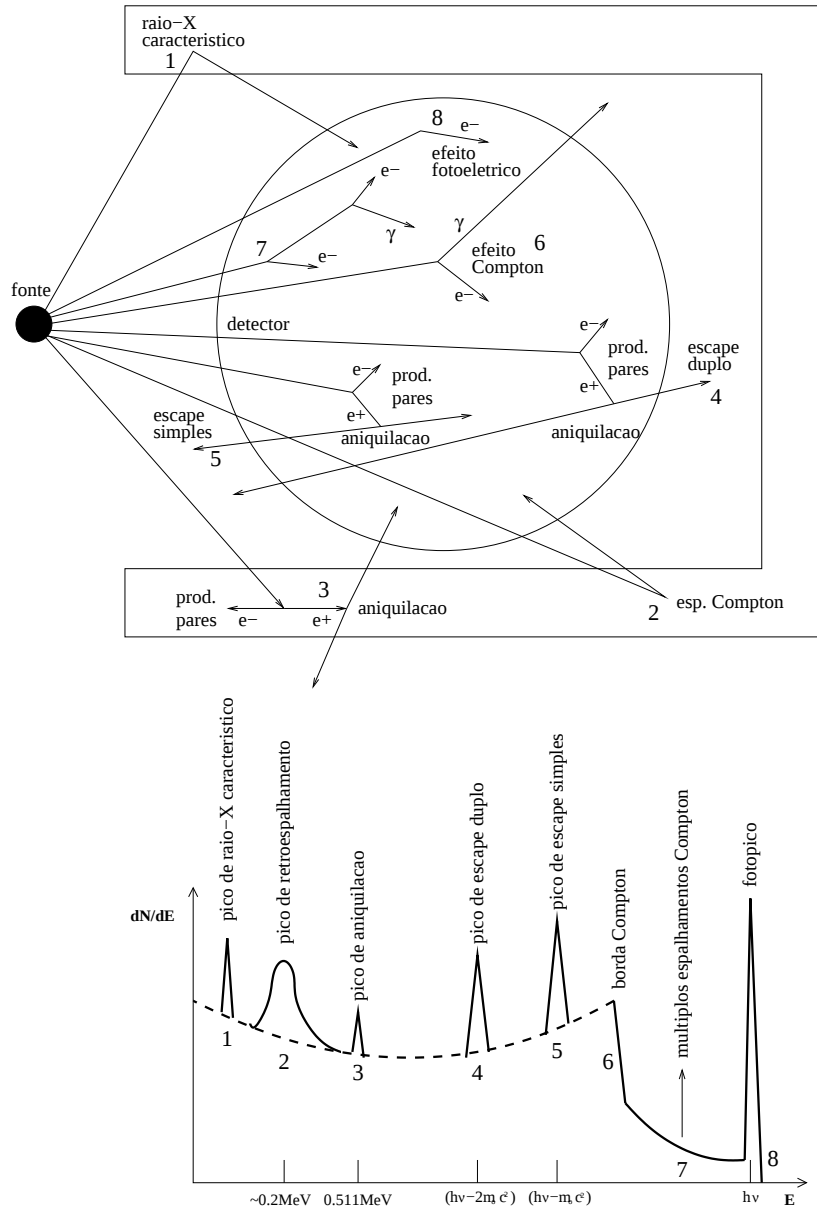


Figura 3.1: Função resposta de um detector típico para uma fonte γ monoenergética.

Fotopico. Este pico tem origem quando o fóton γ interage com o volume ativo do detector via o efeito fotoelétrico. O fotoelétron transporta praticamente toda a energia do raio- γ incidente, e a dissipa no volume ativo do detector dando origem a um pico na posição referente à energia

do fóton:

$$E_{\text{fotopico}} = h\nu = \text{energia do fóton } \gamma \text{ incidente} \quad (3.1)$$

Contínuo Compton. Este contínuo corresponde à fótons que interagem com o volume ativo do detector através do efeito Compton. Devido aos diferentes ângulos de espalhamento, o fóton transfere diferentes quantidades de energia ao elétron alvo, o qual a dissipa no volume do detector. Devido à estas diferentes energias dissipadas, não há a formação de um pico bem definido, mas sim um contínuo.

Borda Compton. A borda Compton ocorre quando o fóton γ sofre uma colisão frontal com um elétron livre do detector, sendo assim retroespalhado. Nesta colisão, o fóton transfere a maior quantidade de energia possível para o elétron. Este elétron por sua vez, dissipa esta energia limite no volume ativo do detector dando origem à borda Compton, a qual localiza-se em:

$$E_{\text{borda Compton}} = h\nu - \frac{h\nu}{1 + 4h\nu} \quad (3.2)$$

Pico de escape simples. Se a energia do fóton incidente é suficientemente alta (vários MeV), este pode interagir com o detector via produção de um par e^-e^+ . Se o volume ativo do detector é relativamente grande, além das energias do e^- e do e^+ serem depositadas no mesmo, um dos raios- γ produzidos na aniquilação do e^+ é absorvido pelo detector. O efeito desse processo é a formação do pico de escape simples localizado em:

$$E_{\text{pico de escape simples}} = h\nu - m_0c^2 \simeq h\nu - 0.511MeV \quad (3.3)$$

Pico de escape duplo. Este processo é idêntico ao que ocorre na formação do pico de escape simples, todavia se o volume ativo do detector é pequeno, ambos os raios- γ produzidos na aniquilação do e^+ são perdidos. Assim, há formação de um pico em:

$$E_{\text{pico de escape duplo}} = h\nu - 2m_0c^2 \simeq h\nu - 1.02MeV \quad (3.4)$$

Pico de aniquilação. Este pico é efeito de materiais posicionados próximos ao detector, como por exemplo blindagens. Neste processo o fóton proveniente da fonte produz um par e^-e^+ no material em torno do detector. Um dos fótons de aniquilação atinge o volume ativo do detector dando origem à um pico localizado em:

$$E_{\text{pico de aniquilação}} = 0.511MeV \quad (3.5)$$

Pico de retroespalhamento. Este pico também é um efeito de materiais posicionados ao redor do detector. O pico é formado por fótons γ que interagem via efeito Compton nestes materiais e retornam ao detector. Na maioria destas interações o fóton é praticamente retroespalhado (ângulos entre $110^\circ - 120^\circ$). Se a energia do fóton é grande suficiente ($h\nu \gg m_0c^2/2$), a posição do pico de retroespalhamento é dada por:

$$E_{\text{pico de retroespalhamento}} = \frac{h\nu}{1 + 2h\nu/m_0c^2} \simeq \frac{m_0c^2}{2} \simeq 0.25MeV \quad (3.6)$$

Pico de raio-X característico. Este é outro pico proveniente de materiais posicionados ao redor do detector. O raio- γ incidente pode ionizar ou excitar átomos dos materiais próximos ao detector. No processo de desexcitação tais átomos emitem raios-X característicos, os quais atingem o volume ativo do detector. Assim, a posição de tais picos depende da composição dos materiais em volta do detector.

Múltiplos espalhamentos Compton. Este contínuo é formado quando o fóton γ incidente sofre diversos espalhamentos Compton consecutivos até escapar do detector. Este contínuo tem início na borda Compton, onde o fóton sofre apenas um retroespalhamento, e estende-se até o fotopico, onde o fóton sofre inúmeros espalhamentos Compton dissipando toda a sua energia $h\nu$.

Pico soma. Para fontes que emitem mais do que um fóton- γ , como o ^{22}Na que emite um fóton com $E_{\gamma}^1 = 0.511\text{MeV}$ e outro com $E_{\gamma}^2 = 1.274\text{MeV}$, há uma certa probabilidade de que os dois fótons atinjam o detector em coincidência, ou seja, dentro do tempo de resolução do detector. Se isto ocorre, as energias dos dois γ são somadas, dando origem ao pico soma. No caso do ^{22}Na o pico soma localiza-se em $E_{\text{pico soma do } ^{22}\text{Na}} = 0.511 + 1.274 = 1.785\text{MeV}$. Assim, a localização do pico soma é dada por:

$$E_{\text{pico soma}} = E_{\gamma}^1 + E_{\gamma}^2 \quad (3.7)$$

3.3 Calibração em energia

Equipamentos utilizados:

1. Bin ORTEC 4001A;
2. Osciloscópio Tektronix TDS 210 (60MHz);
3. Cabos coaxiais com impedâncias de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
4. Conectores “T” e “I”;
5. Cargas de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
6. Fontes γ : $^{137}\text{Cs}(10.98\mu\text{Ci})$, $^{60}\text{Co}(11.63\mu\text{Ci})$ e $^{133}\text{Ba}(11.01\mu\text{Ci})$;
7. Detector HPGe ORTEC coaxial (inclui cristal, criostato, dewar e pré-amplificador);
8. Amplificador ORTEC 672;
9. Fonte de alta-tensão ORTEC 659;
10. Multicanal ORTEC;
11. PC para aquisição (Software MAESTRO ORTEC);

Procedimento 1 - Calibração em energia

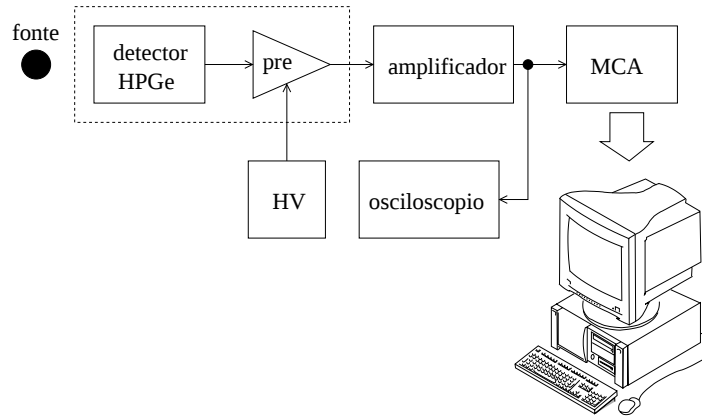


Figura 3.2: Diagrama de blocos da eletrônica utilizada para espectroscopia- γ de alta resolução com detector HPGe.

1. O esquema eletrônico utilizado para espectroscopia- γ está ilustrado na Fig. 3.2;
2. Coloque a fonte de ^{137}Cs ($E_\gamma = 0.662\text{MeV}$) na gaveta 7;
3. Ajuste o MCA para converter os pulsos do amplificador em 8192 canais;

Exercícios 1 - Calibração em energia

1. Adquira o espectro do ^{137}Cs por um período longo suficiente ($LT \sim 10\text{min}$) afim de determinar a posição do fotopico e da borda Compton, como indicado na Fig. 3.3. Anote o valor do tempo morto;

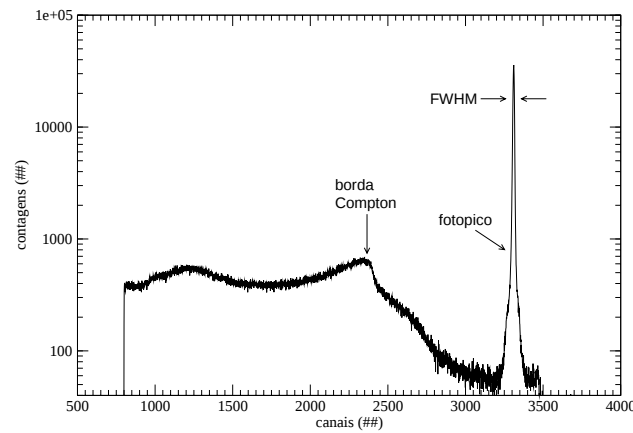


Figura 3.3: Espectro γ do nuclídeo ^{137}Cs adquirido com um detector HPGe.

2. Repita o mesmo procedimento para a fonte de ^{60}Co ($E_\gamma^1 = 1.17\text{MeV}$ e $E_\gamma^2 = 1.33\text{MeV}$)

e determine as posições dos dois fotopicos e das duas bordas Compton, como indicado na Fig. 3.4;

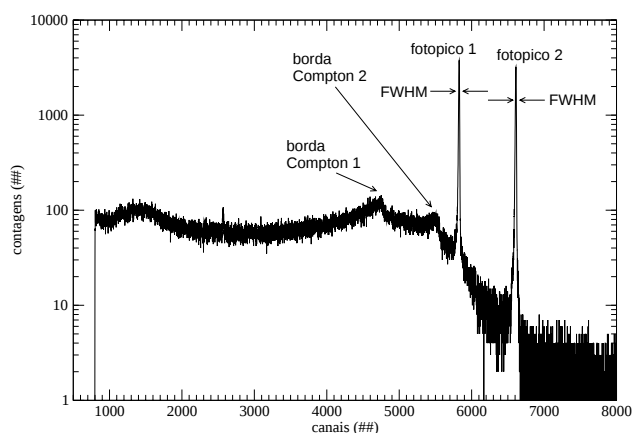


Figura 3.4: Espectro γ do nuclídeo ^{60}Co adquirido com um detector HPGe.

- Através da eq. (3.2) calcule a posição em MeV das bordas Compton do ^{137}Cs e do ^{60}Co ;
- Realizadas as medidas e os cálculos complete a Tab. 3.1;

Tabela 3.1: Dados para obtenção da curva de calibração do sistema de espectroscopia- γ .

evento	energia(MeV)	# do canal
fotopico ^{137}Cs	0.662	
fotopico ^{60}Co 1	1.17	
fotopico ^{60}Co 2	1.33	
borda Compton ^{137}Cs		
borda Compton ^{60}Co		
borda Compton ^{60}Co		

- Com os dados da Tab. 3.1 faça um gráfico da energia (MeV) dos eventos em função do # do canal do MCA em que este é registrado;
- Realize um ajuste linear ($y = ax + b$) dos dados obtidos. A reta ajustada é denominada de *reta de calibração* do sistema de espectroscopia- γ ;
- Acumulando espectros de outras fontes- γ , podemos adicionar mais pontos na reta de calibração;

3.4 Resolução em energia

Equipamentos utilizados:

1. Bin ORTEC 4001A;
2. Osciloscópio Tektronix TDS 210 (60MHz);
3. Cabos coaxiais com impedâncias de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
4. Conectores “T” e “I”;
5. Cargas de 50Ω , 75Ω e 93Ω ;
6. Fontes γ : $^{137}\text{Cs}(10.98\mu\text{Ci})$, $^{60}\text{Co}(11.63\mu\text{Ci})$ e $^{133}\text{Ba}(11.01\mu\text{Ci})$;
7. Detector HPGe ORTEC coaxial (inclui cristal, criostato, dewar e pré-amplificador);
8. Amplificador ORTEC 672;
9. Fonte de alta-tensão ORTEC 659;
10. Multicanal ORTEC;
11. PC para aquisição (Software MAESTRO ORTEC);

A *resolução* de um sistema de espectroscopia é a medida da capacidade deste resolver dois picos suficientemente próximos em energia. Dois picos são ditos resolvidos quando suas centróides estão separadas por um intervalo de energia maior que suas larguras à meia altura[2]. A resolução R é dada em porcentagem segundo a seguinte equação:

$$R(\%) = \frac{\delta E}{E} \times 100 \quad (3.8)$$

onde: δE é a largura total do pico à meia altura (*Full Width at Half Maximum*-FWHM), dado em canais ou energia; E é a centróide do pico expressa em canal ou energia. Por exemplo, se um determinado fotopico tem a centróide no canal 280 e FWHM de 32 canais. Da eq. (3.8), a resolução do sistema é de 11.5%.

A resolução do sistema de espectroscopia- γ determinada acima, compreende duas componentes: a *resolução do detector*, $R(d)$, e a *resolução da eletrônica*, $R(e)$. Esta última envolve a resolução de todos os módulos da cadeia eletrônica, como: pré-amplificador, amplificador, MCA, etc. A resolução do sistema de espectroscopia- γ pode então ser escrita como:

$$R = \delta E = FWHM = \sqrt{R(d)^2 + R(e)^2} \quad (3.9)$$

Existe um limite inferior teórico para $R(d)$ o qual depende do processo estatístico de interação do fóton- γ com o detector. Este limite inferior é dado por:

$$R(d)(keV) = K\sqrt{F \cdot E_\gamma(MeV)} \simeq 1.35\sqrt{E_\gamma(MeV)} \quad (3.10)$$

onde: K é uma constante; E_γ é a energia do fóton- γ em MeV ; e F é um fator estatístico denominado de *fator de Fano* [1, 2]. Para detectores HPGe e outros detectores semicondutores, $F < 1$. Um fator de Fano menor que a unidade implica em uma melhor resolução do detector.

Procedimento 1 - Resolução em energia

1. Será utilizado o espectro do ^{137}Cs adquirido na sec. 3.3;

Exercícios 1 - Resolução em energia

1. Por intermédio da eq. (3.8), calcule a resolução $R(\%)$ do sistema de espectroscopia- γ a partir do fotopico do ^{137}Cs ;
2. Através da eq. (3.10), estime o limite inferior para a resolução do detector HPGe em keV ;
3. Conhecendo as resoluções $R = R(\%) \times E(keV)/100$ e $R(d)$, calcule $R(e)$ utilizando a eq. (3.9). Observe que o valor obtido para $R(e)$ é um limite superior;

Apêndice A

Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento capaz de medir tensões com variações rápidas. Basicamente, um osciloscópio analógico consiste de um *tubo de raios catódicos* (TRC) como o ilustrado na Fig. A.1, onde um filamento aquece o catodo que emite elétrons pelo processo de *termoionização*. Tais elétrons termo-iônicos são acelerados por uma tensão de 1 à $3kV$ aplicada no ânodo do TRC. O TRC possui também dois pares de eletrodos em formas de placas, os quais controlam os movimentos horizontais e verticais do feixe de elétrons. Como indicado na Fig. A.1, aos eletrodos verticais é aplicado o sinal que se deseja observar, por exemplo uma onda senoidal. Nos eletrodos horizontais é aplicada uma onda tipo “dente de serra” que faz com que o feixe percorra a tela do TRC na direção horizontal, desenhando o sinal senoidal aplicado aos eletrodos verticais. Logicamente, para que o sinal senoidal seja traçado corretamente, deve haver uma sincronização entre os eletrodos verticais e horizontais.

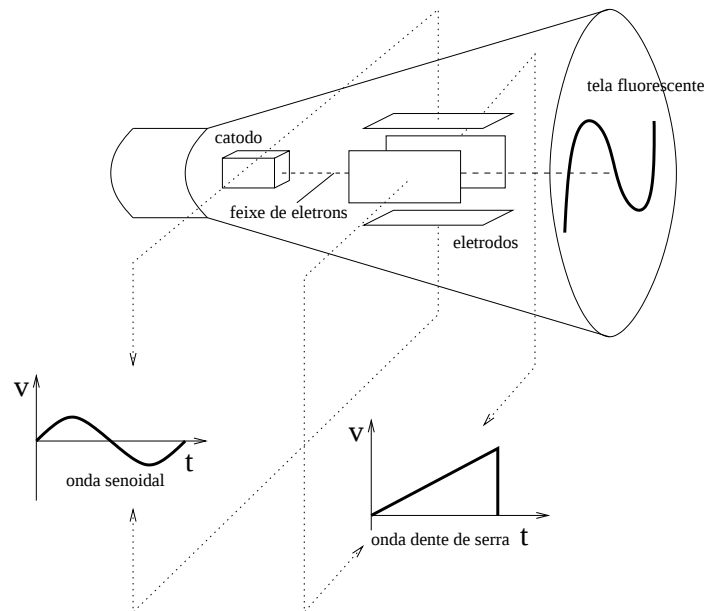


Figura A.1: Esboço de um tubo de raios catódicos utilizado em um osciloscópio.

A.1 Largura de banda e tempo de subida

A Fig. A.2 mostra um esquema eletrônico simplificado de um osciloscópio. A principal característica de um osciloscópio é a largura de banda do amplificador do sinal de entrada (aplicado nos eletrodos verticais). Este parâmetro governa o quão rápido um sinal pode ser aceito e interpretado corretamente pelo osciloscópio sem apresentar distorções.

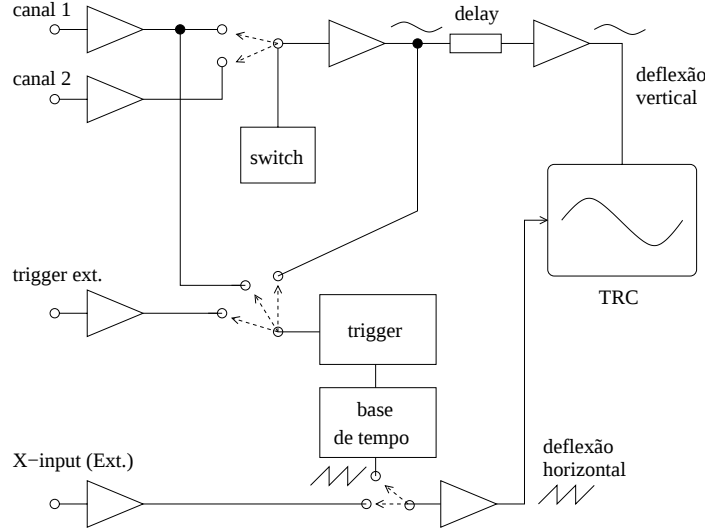


Figura A.2: Diagrama esquemático da eletrônica empregada em um osciloscópio.

Qualquer amplificador real tem uma largura de banda finita, e assim todos osciloscópios possuem um tempo de subida intrínseco t_{osc} , ou seja, se aplicarmos um sinal com tempo de subida nulo, este será mostrado pelo osciloscópio como um sinal com tempo de subida finito igual à t_{osc} . Uma relação grosseira entre a largura de banda de um osciloscópio e t_{osc} é dada pela fórmula:

$$t_{osc}(ns) = \frac{350}{f_{osc}(MHz)} \quad (A.1)$$

onde f_{osc} é a largura de banda do osciloscópio em MHz .

O tempo de subida t_{pulso} de um pulso qualquer, será mostrado pelo osciloscópio com uma contribuição de t_{osc} como:

$$t_{observado}^2 = t_{pulso}^2 + t_{osc}^2 \quad (A.2)$$

A.2 Principais controles e modos de operação

A.2.1 Acoplamento de entrada

A maioria dos osciloscópios possuem duas entradas (conectores BNC fêmeas) com impedâncias alta de $1M\Omega$, e 50Ω para sinais rápidos. Os possíveis acoplamentos são:

1. **AC.** A componente DC de um sinal é suprimida por um capacitor;
2. **DC.** O terminal de entrada é conectado diretamente ao amplificador, e todas as componentes do sinal são mostradas;
3. **GND.** O terminal de entrada é aberto e o amplificador é aterrado.

A.2.2 Trigger

Como mostrado na Fig. A.1, para que se obtenha uma figura estável de um determinado sinal no monitor do osciloscópio, é necessário que a onda dente de serra aplicada aos eletrodos horizontais esteja sincronizada com o sinal de entrada. Em outras palavras deve-se ter uma razão inteira entre o período T_s do sinal e o período T_v da tensão de varredura:

$$T_v = nT_s \quad n = \text{inteiro} \quad (\text{A.3})$$

A sincronização pode ser obtida de duas maneiras, sincronizando a frequência da onda de varredura com a do sinal de entrada, ou como mais frequentemente através do *trigger*. O circuito de *trigger* inicia a varredura horizontal somente quando certas condições são satisfeitas. Abaixo estão tais condições e modos de operação.

1. Condições de *trigger*:

Slope. Seleciona a inclinação de um sinal para a qual a varredura terá início. Normalmente, sinais positivos são disparados com inclinação positiva e negativos com inclinação negativa;

Level ou Threshold. Define o nível de tensão que deve ser atingida pelo sinal para que a varredura seja disparada. Sinais que atingirem este nível não são mostrados.

1. Origem do *trigger*:

Internal. O *trigger* é efetuado pelo próprio sinal de entrada quando satisfeitas as condições mencionadas;

External. O *trigger* é efetuado por outro sinal aplicado ao osciloscópio.

1. Modos de operação do *trigger*:

Normal. Neste modo nenhuma varredura é efetuada até que as condições de *trigger* sejam satisfeitas;

Auto. Varreduras são efetuadas continuamente mesmo que nenhum sinal de entrada esteja presente;

Single sweep. Somente uma varredura é efetuada;

External ou X-input. Neste modo a onda dente de serra interna é desconectada dos eletrodos verticais, e a varredura é controlada por um sinal externo.

A.2.3 Display

O monitor de um osciloscópio é mostrado na Fig. A.3. Alguns controles relacionados à visualização de sinais no monitor do osciloscópio são listados abaixo.

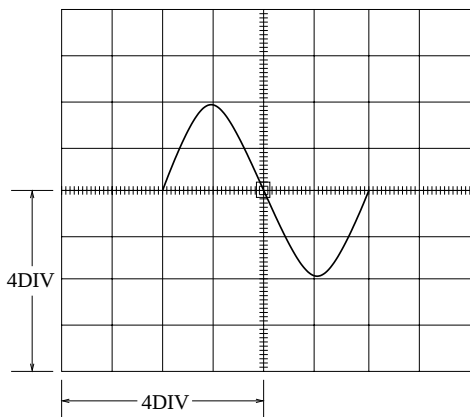


Figura A.3: Monitor de um osciloscópio.

1. **Channel 1.** Mostra somente o canal 1;
2. **Channel 2.** Mostra somente o canal 2;
3. **Alternate.** Mostra os canais 1 e 2 em varreduras alternadas, ou seja, uma varredura completa é realizada para mostrar um canal por vez;
4. **Chop.** Os canais 1 e 2 são mostrados de forma alternada em uma única varredura, geralmente com um frequência de $500kHz$;
5. **Add.** Os sinais nos canais 1 e 2 são somados e o resultado é mostrado no monitor.

Como ilustrado na Fig. A.3 o monitor do osciloscópio apresenta escalas graduadas na vertical e na horizontal. Tais escalas são ajustadas de acordo com os controles listados abaixo.

1. **Volts/Div.** Ajusta a escala vertical em voltagem por divisão;
2. **Time/Div.** Ajusta a escala horizontal em tempo por divisão.

Nas medidas de tensão de um sinal periódico, são frequentemente observado alguns parâmetros. O primeiro destes parâmetros é a *componente DC* do sinal, a qual corresponde à razão entre a área abaixo da curva definida pelo sinal em um período completo e o próprio período. Outro parâmetro a *tensão pico-a-pico*, V_{pp} , que consiste na máxima variação de tensão entre os ciclos positivos e negativos de um sinal bipolar. Tem-se também o *valor de pico* V_p , que a máxima tensão que o sinal atinge, e o *valor RMS* (*Root Mean Square*), que

corresponde ao valor de uma tensão contínua que quando aplicada à um elemento resistivo dissipa a mesma potência que um sinal alternado. O valor RMS é dado por:

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (\text{A.4})$$

Referências Bibliográficas

- [1] ORTEC Instruments; Modular Pulse-Processing Electronics. [S.l.].
- [2] W.R.LEO. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1992.
- [3] G.F.KNOLL. *Radiation Detection and Measurement*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989.
- [4] W.J.PRICE. *Nuclear Radiation Detection*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1964.
- [5] N.TSOULFANIDIS. *Measurements and Detection of Radiation*. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis, 1995.