



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**  
**Faculdade de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações**

## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA O REGISTRO DE SINAIS DE DETECTORES DE FÓTONS**

**Bruno Machado Junqueira**  
**Thiago de Araujo Franco da Fonseca**

Orientador: Prof. José Paulo Vilela Soares da Cunha

Co-Orientador: Prof. Marcia Begalli

Coordenador: Prof. Paulo Sérgio Rodrigues Alonso

**Outubro de 2003**

## Ficha Catalográfica

*Fonseca, Thiago de Araujo Franco da e  
Junqueira, Bruno Machado*

*Placa Protótipo para Desenvolvimento de um  
Sistema Eletrônico para o Registro de Sinais de  
Detectores de Fótons.*

*viii, 63 pp , 29,7 cm (UERJ, Engenharia Eletrônica,  
2003 )*

*Projeto de Graduação – Universidade do Estado do  
Rio de Janeiro.*

1. Introdução
2. Radiação Nuclear
3. Instrumentação Eletrônica
4. Aquisição de Dados

*I. UERJ/FEN II. Título ( série )*

## *Dedicatória*

*Aos nossos pais, Arildo Pereira Franco da Fonseca, Marina Teixeira de Araujo, Wolmer Câmara Junqueira e Elizabeth Machado Junqueira por terem nos apoiado nos momentos mais difíceis da nossa caminhada para a vida profissional.*

*Aos meus avós Arildo Sales da Fonseca e Eulina Pereira Franco da Fonseca que sempre sonharam com este momento.*

## **Agradecimentos**

*Aos Prof. José Paulo Vilela da Cunha e a Prof. Marcia Begalli, pela maneira como nos orientaram durante o desenvolvimento do nosso trabalho.*

*Aos Funcionários do Laboratório de Engenharia Elétrica que estavam sempre dispostos a nos ajudar.*

*A todo o pessoal do CBPF e especialmente o Prof. Mario Vaz, que sempre nos apoiou e incentivou ao longo de nossa jornada.*

## **RESUMO**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA O REGISTRO DE SINAIS DE DETECTORES DE FÓTONS**

Neste trabalho desenvolveu-se um sistema eletrônico de baixo custo para o processamento e o registro de pulsos analógicos provenientes de detectores de radiação. Este sistema auxiliará o estudo das características de fontes radioativas e de detectores de radiação. O sistema é baseado na contagem de pulsos provenientes de um detector de radiação, e.g., fotomultiplicadora. Os pulsos são amplificados, seus níveis são discriminados e enviados para contadores. As totalizações dos pulsos de cada faixa de amplitude são armazenadas num computador. O sistema é composto de um pré-amplificador, discriminadores integrais, contadores binários, circuitos de “interface” com o computador e um “software” para aquisição e o armazenamento dos dados.

## **ABSTRACT**

### **ELECTRONIC SYSTEM DEVELOPMENT TO SIGNALS REGISTRY FROM PHOTON DETECTORS**

On this work a low cost electronic system for process and registry of continuous pulses originated from radiation detectors is developed. This system will help on radiation sources and detectors research. The system is based on pulse counting originated from radiation detectors, e.g., photomultipliers. The pulses are amplified, discriminated by amplitude and sent to counters. The complete amount of pulses in each band is recorded in computers. The system is constituted by a pre-amplifier, integral discriminators, binary counters, computer interface circuits and an acquisition and recording data software.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 - OBJETIVOS DESTES PROJETO .....	2
1.2 - RADIAÇÃO NUCLEAR .....	2
1.2.1 - <i>Decaimento radioativo, atividade e meia vida</i> .....	4
1.2.3 - <i>Tipos de decaimento: alfa, beta e gama</i> .....	5
1.3 - DETECÇÃO DE RADIAÇÃO.....	6
1.3.1 - <i>Detecção de Radiação</i> .....	7
<b>CAPÍTULO 2 – CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE CONTAGEM DE PULSOS</b> .....	<b>9</b>
2.1 – ELETRÔNICA PARA INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR.....	9
2.1.1 - <i>Instrumentação NIM (Análogica e Digital)</i> .....	9
2.1.2 - <i>Cabos Coaxiais</i> .....	9
2.1.3 - <i>Conformadores de pulso (Pulse Shapers)</i> .....	10
2.1.4 - <i>Pulsos NIM</i> .....	11
2.1.5 - <i>Pré-Amplificadores</i> .....	12
2.1.6 - <i>Amplificadores</i> .....	12
2.1.7 - <i>Módulos analógicos/lógicos</i> .....	13
2.1.8 - <i>Contadores</i> .....	13
2.1.9 - <i>Aquisição de Dados</i> .....	13
2.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO .....	15
<b>CAPÍTULO 3 - DETECÇÃO DE RADIAÇÃO</b> .....	<b>17</b>
3.1 – FUNCIONAMENTO DA FOTOMULTIPLICADORA.....	18
3.2 - POLARIZAÇÃO DE FOTOMULTIPLICADORAS E FONTES DE TENSÃO.....	20
<b>CAPÍTULO 4 – PRÉ-AMPLIFICADOR</b> .....	<b>21</b>
4.1 – CARACTERÍSTICAS DO RUÍDO.....	23
4.2 – IMPLEMENTAÇÃO DO PRÉ-AMPLIFICADOR .....	23
4.3 – AJUSTE DO GANHO .....	26
4.4 – CONSIDERAÇÕES NO USO DOS PRÉ-AMPLIFICADORES .....	27
<b>CAPÍTULO 5 – DISCRIMINADORES</b> .....	<b>28</b>
5.1 – FUNCIONAMENTO DO DISCRIMINADOR.....	29
5.2 – TENSÕES DE REFERÊNCIA .....	29
5.2.1 – <i>Chave selecionadora</i> .....	30
5.2.2 – <i>Ajuste do Nível de Discriminação</i> .....	31
<b>CAPÍTULO 6 – CONTADORES , AMOSTRADORES E INTERFACE COM O COMPUTADOR</b> .....	<b>32</b>
6.1 – CONTADORES .....	33
6.1.1 - <i>Tempo-Morto (Dead Time)</i> .....	33
6.1.2 – <i>Grupo de contadores</i> .....	33
6.2 – AMOSTRADORES.....	35
6.2.1 – <i>Amostragem e leitura dos Dados</i> .....	36
6.3 – INTERFACE COM O COMPUTADOR .....	38
6.3.1 – <i>A Porta Paralela</i> .....	39
6.3.2 <i>Configuração da porta paralela</i> .....	41
6.4 – SISTEMA DE COMANDO.....	42
6.4.1 – <i>Funcionamento do sistema de comando</i> .....	44

<b>CAPÍTULO 7 - PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.....</b>	<b>45</b>
7.1 – FUNCIONAMENTO .....	45
7.2 – INICIALIZAÇÃO DO PROGRAMA .....	46
7.2.1 – <i>Rotina de Inicialização</i> .....	46
7.2.2 – <i>Fluxograma da inicialização</i> .....	47
7.2.3 – <i>Subrotina “Zerar Contadores”</i> .....	48
7.2.4 – <i>Subrotina “Barramento em Alta Impedância”</i> .....	48
7.2.5 – <i>Subrotina “Amostradores transparentes”</i> .....	48
7.2.6 – <i>Subrotina “Iniciar Contagem”</i> .....	48
7.3 – LEITURA DOS DADOS .....	48
7.3.1 – <i>Rotina de leitura de dados</i> .....	48
7.3.2 – <i>Fluxograma de leitura de dados</i> .....	48
7.3.3 – <i>Subrotina “Fazer Amostragem”</i> .....	49
7.3.4 – <i>Subrotina “Habilitar Amostrador”</i> .....	49
7.3.5 – <i>Subrotina “Ler Dados”</i> .....	50
7.3.6 – <i>Subrotina “Desfazer Amostragem”</i> .....	50
7.4 – ARMAZENAMENTO DE DADOS.....	50
7.5 – CONDICIONAMENTO DOS DADOS.....	50
7.5.1 – <i>Conversão dos dados</i> .....	50
7.5.2 – <i>Ajuste dos dados</i> .....	51
7.6 – ROTINA DE COMANDO .....	52
<b>CAPÍTULO 8 – ENSAIOS E TESTES.....</b>	<b>53</b>
8.1 – ENSAIOS COM O PRÉ-AMPLIFICADOR .....	53
8.2 – ENSAIOS COM O COMPARADOR .....	55
8.3 – TESTE DOS CONTADORES.....	56
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE A – GUIA DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE B - PORTA PARALELA X COMANDOS NO DELPHI .....</b>	<b>63</b>

## Capítulo 1 – Introdução

Instrumentação e técnicas nucleares são largamente utilizadas em atividades sócio-econômicas para implementar a qualidade dos produtos, otimizar processos, poupar energia e materiais, otimizar o rendimento agrícola, conservar produtos alimentares, fomentar o diagnóstico médico e a terapia, radioesterilizar produtos médicos, proteger o ambiente e defender o patrimônio cultural. A indústria é uma das maiores usuárias das técnicas nucleares destacando-se a indústria alimentícia, papel e celulose, siderurgia, automobilística, naval, aeroviária e petrolífera.

O uso das fontes radioativas permite às indústrias alcançar as exigências rigorosas do mercado externo e aumentar o valor agregado dos produtos. As novas técnicas nucleares têm possibilitado a execução de tarefas impossíveis de serem realizadas pelos meios convencionais.

Para que as fontes radioativas sejam empregadas corretamente é necessário medir as suas características, o que geralmente é feito por equipamentos eletrônicos muito onerosos.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto de um sistema eletrônico para o registro de sinais de detectores de fótons, apresentando as etapas desenvolvidas para o alcance dos objetivos previstos, bem como o de indicar o conteúdo do que foi estudado e avaliado para tornar possível a elaboração do projeto.

Pretende-se também indicar os pontos considerados mais relevantes do presente trabalho, e da mesma forma abordar as dificuldades e obstáculos transpostos para o alcance das metas.

Deste modo, foram promovidos estudos com base nas teorias e ensinamentos descritos em literaturas específicas a saber:

Em (Knoll, 1989) foram obtidas informações sobre instrumentação e radiação nuclear. Nesse livro o assunto sobre a instrumentação nuclear é apresentado de forma bastante genérica, entretanto ele nos deu subsídios para que tivéssemos um entendimento geral do funcionamento do sistema proposto.

(Tocci, 1998) aborda de uma forma prática e direta a utilização de contadores, amostradores e os outros componentes do *hardware* do projeto.

(Horowitz, 1989) apresenta uma abordagem prática sobre os pré-amplificadores, discriminadores e interfaceamento, onde foram obtidos dados relevantes para completar a implementação do projeto .

## 1.1 - Objetivos deste Projeto

Os objetivos deste trabalho são projetar, construir e testar um sistema eletrônico para o processamento e o registro de pulsos analógicos provenientes de um detector de radiação. Este sistema auxiliará o estudo sobre as características das fontes radioativas empregadas em detectores de radiação. O sistema é baseado na contagem de pulsos provenientes de um detector de radiação, e.g., fotomultiplicadora. Os pulsos são amplificados, seus níveis são discriminados e as totalizações dos pulsos de cada faixa de amplitude são armazenadas num computador. O sistema é composto de um pré-amplificador, discriminadores (comparadores), contadores, *interface* com o computador e *software* para aquisição de dados.

Este sistema destina-se a experimentos no Laboratório de Física Nuclear e Altas Energias do Instituto de Física da UERJ, tanto em pesquisas quanto em aulas de laboratório.

## 1.2 - Radiação Nuclear

### Radiações ionizantes

As radiações provenientes de desintegrações radioativas têm energias tipicamente da ordem de milhão de elétrons-volt (MeV) e são denominadas *radiações ionizantes*.

Como a sua própria designação indica, são radiações que ionizam a matéria através da qual passam, “arrancando” elétrons dos átomos que a constituem. A passagem de radiação ionizante deixa “rastros” de íons.

As características geométricas destes rastros (comprimento e espessura) dependem do tipo da radiação ionizante. Alguns componentes eletrônicos muito sensíveis, como alguns transistores, podem alterar-se devido à ionização produzida por radiações.

Além das radiações alfa, beta e gama, há outras radiações ionizantes como, por exemplo, os raios X, que, além de poderem ter origem nuclear, podem ter origem atômica: um fóton de raios X é emitido quando se dá uma transição eletrônica de um estado excitado para um estado de energia mais baixa a que corresponda uma diferença de energia da ordem dos quilo-elétrons-volt (keV). A radiação de neutrons (igualmente de origem nuclear) também tem características ionizantes. Os neutrons, por serem neutros, efetuam longos percursos na matéria, interagindo com os núcleos sobretudo quando a sua energia é pequena (neutrons térmicos). O resultado desta interação pode resultar na emissão de raios gama ou de prótons que ionizam a matéria ao atravessá-la.

O poder de penetração da radiação na matéria depende da sua energia: quanto mais energética for a radiação, maior será o seu alcance. Contudo, diferentes radiações, mesmo que tenham a mesma energia, penetram a matéria com alcances diferentes. Por ordem crescente de penetração na matéria temos: 1) partículas alfa; 2) partículas beta; 3) fótons (raios-X e gama); 4) neutrons.

O alcance das partículas alfa de 1 MeV é pequeno mas cresce à medida que a energia das partículas também aumenta. O poder de penetração depende, portanto, do tipo de radiação, da energia desta e, obviamente, do material irradiado. Na Figura 1.1 representa-se o alcance das partículas alfa em função da sua energia para diferentes materiais. Esse alcance é muito distinto no ar ou em outros materiais sólidos ou líquidos. Por isso, e por comodidade de representação, utilizou-se uma escala vertical *logarítmica*.

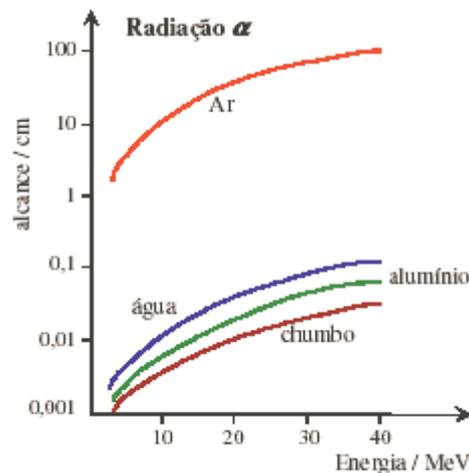


Figura 1.1- Alcance das partículas alfa em função da sua energia para diferentes materiais

O alcance das partículas no ar é cerca de mil vezes maior (ordem de grandeza) do que nos outros materiais referidos na figura. O chumbo absorve bem as partículas alfa: uma chapa com meio milímetro de espessura absorve todas as partículas alfa até 40 MeV.

As partículas alfa provenientes de uma fonte monoenergética têm um comportamento na matéria que se caracteriza por quase todas terem a mesma penetração

As partículas beta (elétrons e pósitrons de origem nuclear) têm massa muito menor do que a das partículas alfa e energias que podem ser muito maiores do que as energias típicas com que as partículas alfa são emitidas. Quando atravessam a matéria, as partículas beta têm trajetórias zigzagueantes devido justamente à sua massa diminuta. A sua massa pequena faz, por outro lado, com que tenham uma penetração maior do que as partículas alfa. Na Figura 1.2 representa-se o alcance da radiação  $\beta^-$  na água, alumínio e chumbo. Para uma melhor

comparação, representa-se na mesma figura o alcance das partículas alfa em água (a curva é a mesma da Fig. 1.1 mas deve-se notar as escalas diferentes).

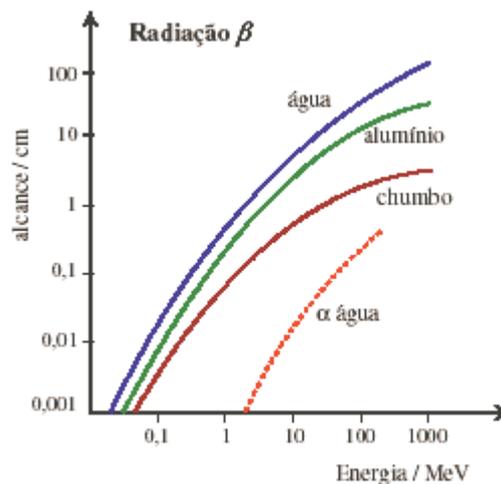


Figura 1.2 – Alcance da radiação beta

### 1.2.1 - Decaimento radioativo, atividade e meia vida

Reações e desintegrações nucleares são uma importante fonte de informações sobre a estrutura nuclear, pois são processos nos quais há um rearranjo da configuração dos nucleons no núcleo. Muitos destes processos ocorrem naturalmente e outros são produzidos artificialmente em laboratórios, aceleradores e reatores.

Alguns núcleos têm uma combinação de prótons e nêutrons que não leva a uma configuração estável. Estes núcleos são, portanto, instáveis ou radioativos. Núcleos instáveis tendem a se aproximar de uma configuração estável pela emissão de certas partículas. Estas partículas foram descobertas no final do século 19 e denominadas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). Em todos os decaimentos por emissão de partículas, os núcleos residuais podem encontrar-se num estado excitado. Na transição para o seu estado fundamental estes núcleos emitem radiação gama ( $\gamma$ ).

A *lei do decaimento radioativo* é uma função que descreve quantos núcleos radioativos existem numa amostra a partir do conhecimento do número inicial de núcleos radioativos e da taxa de decaimento.

Em 1977, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) estabeleceu o becquerel (Bq) como a unidade padrão de atividade, que corresponde a uma desintegração por segundo ( $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ ). Uma unidade ainda muito utilizada é o curie (Ci), definido originalmente como a atividade de um grama de rádio e depois padronizada como  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo (exatamente).

A *meia vida* é definida como o tempo necessário para que metade dos átomos instáveis de uma amostra decaiam. A meia vida não sofre interferências de alterações químicas ou físicas da amostra.

A *vida média* de um nuclídeo radioativo é avaliada como sendo a soma das idades de todos os átomos, dividida pelo número total de átomos.

### 1.2.3 - Tipos de decaimento: alfa, beta e gama

#### Decaimento alfa

Partículas alfa ( $\alpha$ ) são núcleos de hélio, compostas por dois prótons e dois nêutrons. Quando um núcleo emite uma partícula alfa seu número atômico  $Z$  diminui de duas unidades e seu número de massa  $A$  diminui de quatro unidades. No decaimento alfa há uma *transmutação nuclear*, sendo o núcleo resultante um novo elemento químico. O urânio-238 ( $^{238}\text{U}$ ), polônio-210 ( $^{210}\text{Po}$ ) e plutônio-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ) são exemplos de emissores alfa

#### Decaimento beta

Partículas beta ( $\beta$ ) são elétrons. Quando um núcleo emite uma partícula beta, o número atômico aumenta de uma unidade mas o número de massa não muda. A radiação beta é sempre acompanhada de uma outra partícula, o neutrino ( $\nu$ ). Por não possuir carga e ter massa extremamente pequena, o neutrino praticamente não interage com a matéria sendo, portanto, de difícil detecção. Estrôncio-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ), tecnécio-99 ( $^{99}\text{Tc}$ ) e cálcio-45 ( $^{45}\text{Ca}$ ) são exemplos de fontes de radiação beta.

#### Decaimento gama

Radiação gama ( $\gamma$ ), de natureza eletromagnética, é emitida em transições do núcleo atômico e não provoca transmutação nuclear (mudança no número de prótons ou nêutrons). A radiação gama pode ser produzida em decaimentos radioativos e em reações nucleares, onde é emitida para retirar o excesso de energia dos núcleos, geralmente após algum outro tipo de decaimento. O cobalto-60 ( $^{60}\text{Co}$ ), o céscio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) e o sódio-22 ( $^{22}\text{Na}$ ) são exemplos de elementos que emitem raios gama (além de outros tipos de radiação). As probabilidades para as transições por emissão gama dependem da diferença de energia entre os dois estados envolvidos, o número de massa dos núcleos e a mudança no spin. Não é possível distinguir raios gama de

raios-x com a mesma energia. A diferença na denominação está associada à origem: raios gama são emitidos do núcleo e raios-x são emitidos da eletrosfera e em outros processos de aceleração e desaceleração eletrônica (*bremstrahlung*).

### 1.3 - Detecção de Radiação

#### Interação de íons com a matéria

A detecção de partículas carregadas (prótons, partículas alfa e íons pesados) se dá através da interação dessas partículas com o meio detector. Os processos de interação nuclear não são exatos, devido à sua baixa probabilidade. O processo dominante é o de colisões íon-átomo, com transferência de energia do íon para o meio, em processos de ionização e excitação dos elétrons atômicos. Devido a grande diferença de massas, a transferência de energia do íon para os elétrons se dá em pequenas quantidades e um enorme número de colisões é realizado até que o íon seja totalmente freado. Um íon altamente energético adquire um alto estado de ionização quando penetra em um meio material, independente de seu estado inicial antes de atingir o meio. À medida que o íon perde velocidade, a probabilidade de captura de elétrons orbitais aumenta e o íon é gradualmente neutralizado. Quando a velocidade do íon é bastante baixa, os processos de ionização e excitação de átomos do meio já não são mais importantes e as perdas de energia por colisões elásticas com os átomos do meio começam a ser dominantes, dando origem a espalhamentos de ângulos grandes e desvios significativos da trajetória inicialmente reta são então observados.

Os processos de perda de energia por colisões inelásticas com elétrons (freamento eletrônico) e por colisões elásticas com o núcleo atômico (freamento nuclear) são basicamente independentes, de modo que a taxa de perda de energia por unidade de comprimento pode ser expressa como a soma das duas contribuições

Embora os mecanismos de freamento sejam bem conhecidos e estudados desde o início do século XX, ainda hoje não há boas previsões teóricas quantitativas para o chamado freamento eletrônico. Previsões para este fenômeno são portanto baseadas em modelos semi-empíricos com base em um grande número de medidas experimentais.

## Interação de fótons com a matéria

Raios gama interagem com a matéria por basicamente três mecanismos: absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares. Todos estes processos terminam por transferir, total ou parcialmente, a energia do fóton para um elétron. Contrário ao que sucede no caso das partículas carregadas, essas interações são bruscas e toda energia é transferida ao elétron no caso da absorção fotoelétrica e produção de pares. No caso do espalhamento Compton embora apenas uma fração da energia seja transferida, há em geral uma mudança no momento e energia do fóton.

### 1.3.1 - Detectores de Radiação

#### Detectores a gás

Tanto no caso de fótons, como no caso de partículas carregadas, o processo de interação, produz um ou mais elétrons carregando parte (ou toda) energia da radiação. No caso da radiação gama, processos secundários de ionização e excitação irão transferir a energia recebida pelo elétron, para outros átomos e elétrons do meio. Se toda a energia da radiação fosse transferida ao meio por processos de ionização e se a energia de ionização fosse constante, o número final de pares elétrons-íons produzidos seria exatamente proporcional à energia da radiação incidente. A coleta de toda esta carga eletrônica produzida seria então uma medida da energia.

Tipicamente, a coleta desta carga envolve a aplicação de um campo elétrico no material detector e o fato de que as cargas (pelo menos os elétrons) tenham uma grande mobilidade no meio detector. Gases rarefeitos constituem um desses meios sendo por isto, muito utilizados em diversas formas de detectores. Nos gases, elétrons têm mobilidade muito maior que os íons e são os mais importantes para a detecção. O tempo de coleta de carga corresponde a uma característica muito importante dos detectores.

A utilização desta informação, envolve em geral um tratamento eletrônico complexo, no qual ocorre a conversão desta corrente num sinal de tensão. Esta conversão é feita por um pré-amplificador, caracterizado por sua resistência e capacitância equivalente de entrada.

## Detectores Cintiladores

Detectores cintiladores são também largamente empregados na detecção e medida da energia da radiação, especialmente para raios gama. Os detectores a gás são em geral somente utilizados na detecção de partículas carregadas, devido à baixa densidade do gás e portanto baixa probabilidade de interação com fótons de alta energia. Já os cintiladores, principalmente os que envolvem elementos pesados como I, Ba e Bi são bastante utilizados na detecção de raios gama. Cintiladores plásticos, numa montagem conhecida como *phoswich* tem sido muito utilizados na detecção de partículas carregadas. Nos detectores de cintilação, uma série de processos sucessivos é desenvolvida até a obtenção final de um pulso de carga, proporcional à energia depositada pela radiação no detector. A radiação interage com o material, produzindo no mesmo excitações e ionizações que, ao decair produzem radiação na faixa de frequências da luz visível. Esta radiação é absorvida por efeito fotoelétrico no fotocátodo de uma fotomultiplicadora e os elétrons livres produzidos são multiplicados na fotomultiplicadora até resultarem em corrente de intensidade suficiente para produzir pulsos de dezenas a centenas de mV de amplitude numa carga resistiva.

Um dos tipos mais comuns de cintiladores são moléculas orgânicas em geral dissolvidas em soluções que posteriormente são polimerizadas para a produção de um sólido (plástico). Eventualmente estas soluções podem também ser utilizadas na forma líquida. Outra classe importante de materiais cintiladores é a dos cristais de haletos alcalinos, como NaI, CsI (dopados com Tl) e de outros materiais inorgânicos, entre eles o germanato de bismuto e fluoreto de bário.

Uma das características importantes dos cintiladores é o tempo de decaimento dos estados excitados que produzem o pulso de luz. Cintiladores orgânicos comerciais tem tempo de decaimento bastante curtos (alguns ns), característica que os fazem muito importantes em aplicações onde a determinação do instante de emissão da radiação é necessário. Cintiladores inorgânicos usuais têm constante de tempo de decaimento muito maiores, de centenas de ns.

Outra característica importante dos materiais cintiladores é a fração de energia depositada no detector que é efetivamente transformada em luz.

A utilização dos cintiladores envolve, como foi mencionado, a conversão dos fótons produzidos pelo cintilador em elétrons e a multiplicação dos elétrons por um dispositivo denominado fotomultiplicadora. A estrutura básica da fotomultiplicadora está detalhada no capítulo 3.

## Capítulo 2 – Concepção do Sistema de Contagem de Pulsos

### 2.1 – Eletrônica para Instrumentação Nuclear

#### 2.1.1 - Instrumentação NIM (Analogica e Digital)

A indústria de eletrônica para aplicações nucleares definiu normas com dimensões tipos de conectores e cabos, valores de tensões e tipos de pulsos de sinal no que é conhecido como a norma NIM (*Nuclear Instrumentation Modules*).

#### 2.1.2 - Cabos Coaxiais

Todas conexões entre os vários elementos que constituem um sistema de detecção é feita com cabos coaxiais, constituídos de um fio condutor central envolvido por um isolante (dielétrico) e depois por uma malha de fios finos trançados, que tem a função de blindar o condutor central de campos externos. Estes elementos são envolvidos por um envoltório plástico isolante. Cabos coaxiais são caracterizados principalmente pela velocidade de propagação dos pulsos e pela impedância característica. Outras características importantes são a tensão máxima de utilização, a capacitância por unidade de comprimento e a atenuação (perdas ôhmicas/unidade de comprimento).

Para os cabos típicos utilizados, o tempo de trânsito do sinal é da ordem de 5ns/metro. Pulsos com tempo de subida grande em relação ao tempo de trânsito num cabo são denominados pulsos lentos e, no caso contrário, pulsos rápidos. No caso de pulsos lentos, o cabo se comporta basicamente como um condutor normal e suas propriedades mais importantes são então a capacitância e resistência em série. Exceto para cabos muito longos (várias dezenas de metros), as perdas são, para fins práticos desprezíveis. A capacitância só é importante nas ligações entre os detectores e os pré-amplificadores, quando podem deteriorar as características dos mesmos e portanto procura-se utilizar o menor comprimento de cabo possível para reduzir a capacitância e, conseqüentemente, a constante de tempo RC do sistema detector -cabo - pré-amplificador.

Principalmente no caso de pulsos rápidos, a impedância característica do cabo se torna extremamente importante no acoplamento deste com os módulos que produzem e recebem sinal. Esta propriedade é independente do comprimento do cabo, sendo definida basicamente pelas dimensões transversais do mesmo e do material dielétrico empregado. Especialmente para cabos longos, deve-se observar a resistência característica que deve ser usada na terminação do cabo na

extremidade que recebe o sinal. Se esta resistência é igual à impedância característica do cabo, toda a energia do pulso é transferida ao elemento final. Caso contrário haverá reflexão parcial do sinal. Dependendo da impedância da terminação, a reflexão será com inversão de fase (impedância menor que a característica) ou sem inversão (impedância maior), mas de qualquer forma podendo apresentar problemas. A norma NIM emprega cabos de impedância característica de  $50\Omega$  para conexão de sinais rápidos e de  $93\Omega$  para sinais lentos.

Osciloscópios normalmente empregados na observação de pulsos ao longo das conexões entre módulos tem alta impedância efetiva de entrada (em geral  $1M\Omega$ ). Por isso deve ser sempre utilizado um terminador de  $50\Omega$  na observação de sinais rápidos.

Basicamente 3 tipos de conectores são atualmente utilizados em cabos NIM. Conectores do tipo BNC foram amplamente utilizados para sinais de baixa tensão ( $<1000V$ ), quando cada módulo continha um único elemento. Mais recentemente, com o aumento da densidade nos módulos, que podem conter até 8 elementos idênticos, são utilizados conectores menores, denominados LEMO. Nas ligações de alta tensão, como polarização de detectores, o conector SHV é o mais empregado, embora atualmente comece também a se utilizar conectores semelhantes ao LEMO.

### 2.1.3 - Conformadores de pulso (*Pulse Shapers*)

No processamento de pulsos de detectores de radiação algumas vezes é necessário modificar a forma dos pulsos para utilização em diferentes instâncias. Os pulsos produzidos pelos detectores, caracterizados por uma rápida subida e decaimento exponencial lento, algumas vezes não são adequados para análises posteriores, como a de altura de pulso, que permite obter a energia da radiação detectada. Pulsos de mesma altura, correspondentes a eventos de mesma energia se superpõem à cada um dos anteriores, fazendo com que suas amplitudes efetivas sejam diferentes. Um sistema de tratamento de pulsos que elimina a cauda e produza novos pulsos com amplitude igual ou proporcional à amplitude original dos pulsos se faz então necessário. Isto é normalmente realizado com circuitos diferenciadores e integradores RC. Em ambos os circuitos, a constante de tempo definida pelo produto  $\tau=RC$  tem um papel importante. Circuitos RC diferenciadores são na verdade filtros passa-altas. Os integradores são filtros passa-baixas. A associação inversa dos elementos RC constitui o filtro integrador ou passa baixas.

Na seqüência de pulsos provenientes de um detector, a diferenciação reconstrói a amplitude original, uma vez que ao se originar um novo pulso, a cauda do anterior tem amplitude praticamente constante e, portanto, sua derivada é zero. Entretanto, para que o pulso

efetivamente resultante seja utilizável, é necessária uma série de posteriores integrações. Se um diferenciador é seguido por uma série de integradores, é produzido um pulso com forma aproximada de uma curva gaussiana. Na prática são necessários três a quatro integradores para a obtenção de formas aproximadamente Gaussianas.

O pulso de forma aproximadamente Gaussiana produzido após a diferenciação e integrações posteriores é perfeitamente adequado para a maioria das aplicações que envolvem, principalmente, a determinação de seu valor máximo, correspondente à energia da partícula detectada. Entretanto, algumas aplicações exigem a posterior diferenciação do pulso Gaussiano, produzindo um pulso bipolar, onde o cruzamento por zero corresponde ao instante em que a tensão máxima do pulso unipolar (Gaussiano) é atingido.

#### 2.1.4 - Pulsos NIM

A norma NIM (*Nuclear Instrumentation Modules*) define diversos tipos de pulsos a serem empregados em módulos com funções lógicas e analógicas. Os pulsos lógicos são de dois tipos. Os NIM positivos são análogos à definição de lógica TTL, onde 5V corresponde ao valor lógico 1 (maior que 4V para o módulo que produz o pulso e maior que 3V para o que recebe), e 0V corresponde ao valor lógico 0 (menor que 1V para o que produz e menor que 1,5V para o que recebe). Os chamados pulsos lógicos NIM negativos ou rápidos são mais adequados para utilização com circuitos integrados que usam famílias lógicas ECL. Embora estes pulsos sejam definidos em termos de corrente, uma vez que são sempre usados em impedâncias de  $50\Omega$ , é mais prática a utilização dos valores correspondentes de tensão. O valor lógico 1 corresponde a uma tensão de  $-0.7V$  ( $-0.6V$  para o receptor) para o valor lógico 1 e 0V (até 0.2V para o que recebe) para o valor lógico zero. Por serem pulsos de corrente, a visualização destes pulsos em osciloscópios de alta impedância requer sempre o uso de terminadores. A largura dos pulsos NIM não é especificada na norma. Módulos lógicos NIM em geral produzem pulsos de largura variável entre cerca de 10ns até  $10\mu s$ . O tempo de subida dos pulsos NIM rápidos é menor que  $\sim 5ns$  e nos lentos é cerca de 100ns.

Pulsos analógicos também são agrupados em duas categorias. Pulsos rápidos, usados normalmente em associação com circuitos destinados a temporização, onde a precisão na determinação da energia do evento (altura do pulso) não é crítica, são normalmente unipolares. Nos circuitos destinados a medir a energia dos eventos, são empregados os pulsos lentos. Estes podem ser tanto do tipo unipolar quanto bipolar, sendo que os unipolares são os mais utilizados, por apresentarem em principio uma melhor relação sinal/ruído. A largura de um pulso rápido

analógico é de dezenas a centenas de nano-segundos, enquanto que para os lentos é de vários micro segundos. O valor máximo da altura é de cerca de 10V.

#### 2.1.5 - Pré-Amplificadores

Exceto para os detectores do tipo Geiger-Muller, onde a quantidade de carga produzida num evento é suficientemente grande para produzir um pulso de tensão de amplitude apreciável, o primeiro elemento utilizado no tratamento de pulsos são os pré-amplificadores, localizados tão perto quanto possível dos detectores, de modo a aumentar a relação sinal-ruído. A função básica dos pré-amplificadores é transformar a carga coletada no processo de detecção, num pulso de tensão, cuja amplitude é proporcional à carga total coletada no detector. Por esta razão, estes pré-amplificadores são denominados “sensíveis à carga”. Em alguns casos, os pré-amplificadores têm incorporado o circuito necessário para aplicar a tensão de polarização (bias) no detector, bem como para se aplicar um pulso de teste na entrada do mesmo, para verificação do funcionamento.

#### 2.1.6 - Amplificadores

Vários tipos de amplificadores são utilizados na norma NIM. Basicamente podem ser agrupados como amplificadores lentos (circuitos de medição de energia) e amplificadores rápidos (circuitos geradores de marca de tempo).

São denominados amplificadores espectroscópicos, os módulos que produzem um pulso de forma aproximadamente Gaussiana (unipolar) e sua derivada (bipolar), a partir do pulso gerado por um pré-amplificador. Em geral, estes módulos incluem ganho variável (~10-500), diferentes constantes de tempo do diferenciador e dos integradores (em combinações pré-fixadas, que produzem o pulso final com larguras entre 0.5-10 $\mu$ s). Pode-se ainda ajustar o cancelamento de pólo-zero e em alguns modelos introduzir, um atraso temporal na saída de pulso unipolar. Os amplificadores aceitam tanto pulsos negativos quanto positivos na entrada, mas a saída padrão é sempre positiva. A faixa de tensão útil na saída vai até 10V. Características típicas incluem estabilidade térmica no ganho e não-linearidade integral. Constantes de tempo menores (0.5-2 $\mu$ s) são usadas quando as taxas de eventos nos detectores é grande.

Os amplificadores com limiar (*biased amplifiers*) pertencem a uma outra classe de amplificadores lentos, nestes amplificadores, a saída é proporcional à entrada, acima de um certo valor ajustável (*bias*).

Nos amplificadores rápidos, as constantes de tempo, principalmente de integração são pequenas (dezenas a centenas de nano segundos) e por isso não têm grande precisão na medida da carga total produzida no detector. Entretanto, produzem pulsos muito mais adequados para a obtenção de informações referentes ao instante de ocorrência de eventos no detector.

#### 2.1.7 - Módulos analógicos/lógicos

O analisador denominado monocanal (*SCA –single channel analyzer*) consiste de um circuito capaz de gerar um sinal lógico padrão cada vez que os sinal de entrada estiver entre determinados valores (modo diferencial ou janela) ou acima de um valor mínimo (modo integral). Os SCA também podem ser usados para determinar o instante em que o pulso foi produzido. O pulso na saída é gerado, por exemplo, no instante em que o pulso bipolar em sua entrada cruza o zero. A faixa de valores de tensão, que define o intervalo de valores que produzirá pulsos na saída, é ajustado com potenciômetros de precisão: o intervalo de tensão de 10V atingido com 10 voltas no potenciômetro, dividido em 10 partes grandes e 10 finas (potenciômetro helicoidal). A sensibilidade é portanto de 0,01V. Um potenciômetro semelhante é também disponível para se poder variar o instante em que o pulso lógico é emitido. A faixa de variação é em geral de 0 a 10 $\mu$ s.

#### 2.1.8 - Contadores

Um sistema de medição poderia ser constituído de um detector, pré-amplificador, amplificador, analisador multicanal e um contador, com um relógio associado, de modo que a contagem do numero de eventos que têm pulsos com amplitude dentro da janela do SCA possa ser feita num período de tempo pré-fixado. Este tipo de instrumentação é usado em controle e monitoração de experimentos. Assim, um arranjo como este com o SCA ajustado para corresponder a uma faixa de energias de interesse, pode ser utilizado para se ter uma idéia da estatística acumulada no experimento, permitindo ao experimentador decidir quando terminar a medida.

#### 2.1.9 - Aquisição de Dados

Dado o caráter estatístico dos processos nucleares, milhões e as vezes até centenas de milhões de eventos devem ser coletados de um ou mais detectores, para se obter informações

úteis nos experimentos de física nuclear. A taxa de produção de eventos num detector pode variar de algumas dezenas por segundo, até cerca de  $10^6$  por segundo, no caso de detectores cintiladores. A armazenagem e a classificação destes eventos, para análise posterior, deve então ser feita por um sistema automatizado, que armazenará todas as informações relevantes ao projeto.

Com base na teoria apresentada, os capítulos seguintes estabelecem uma conexão da base de desenvolvimento do conhecimento para o projeto de um sistema de aquisição de pulsos nucleares.

## 2.2 Descrição do Sistema Proposto

O projeto consiste em dois módulos eletrônicos de instrumentação nuclear. O primeiro módulo é constituído de um pré-amplificador que estará conectado, por meio de um cabo coaxial, à saída do detector óptico de radiação.

A saída deste módulo é conectada, por meio de um cabo coaxial, a um segundo módulo de instrumentação nuclear, onde estará o *hardware* do projeto. Este módulo será responsável pelo condicionamento dos sinais e envio destes ao computador para a aquisição dos dados.

Neste módulo, estarão quatro discriminadores de tensão (comparadores), que dividirão o sinal proveniente do pré-amplificador em quatro canais distintos e farão a conversão analógico/digital do pulso recebido. Após a discriminação do pulso recebido, os pulsos gerados pelos quatro canais, serão enviados para os contadores.

Os pulsos registrados pelos contadores serão amostrados e em seguidas serão enviados via porta paralela para um computador, aonde será feito, através de um programa de computador, a visualização e armazenamento das contagens. Os dados experimentais obtidos, serão armazenados em um banco de dados, e servirão para análise da energia emitida pela fonte radioativa.

O sistema desenvolvido é descrito pelo diagrama em blocos simplificado apresentado na Figura 2.1.

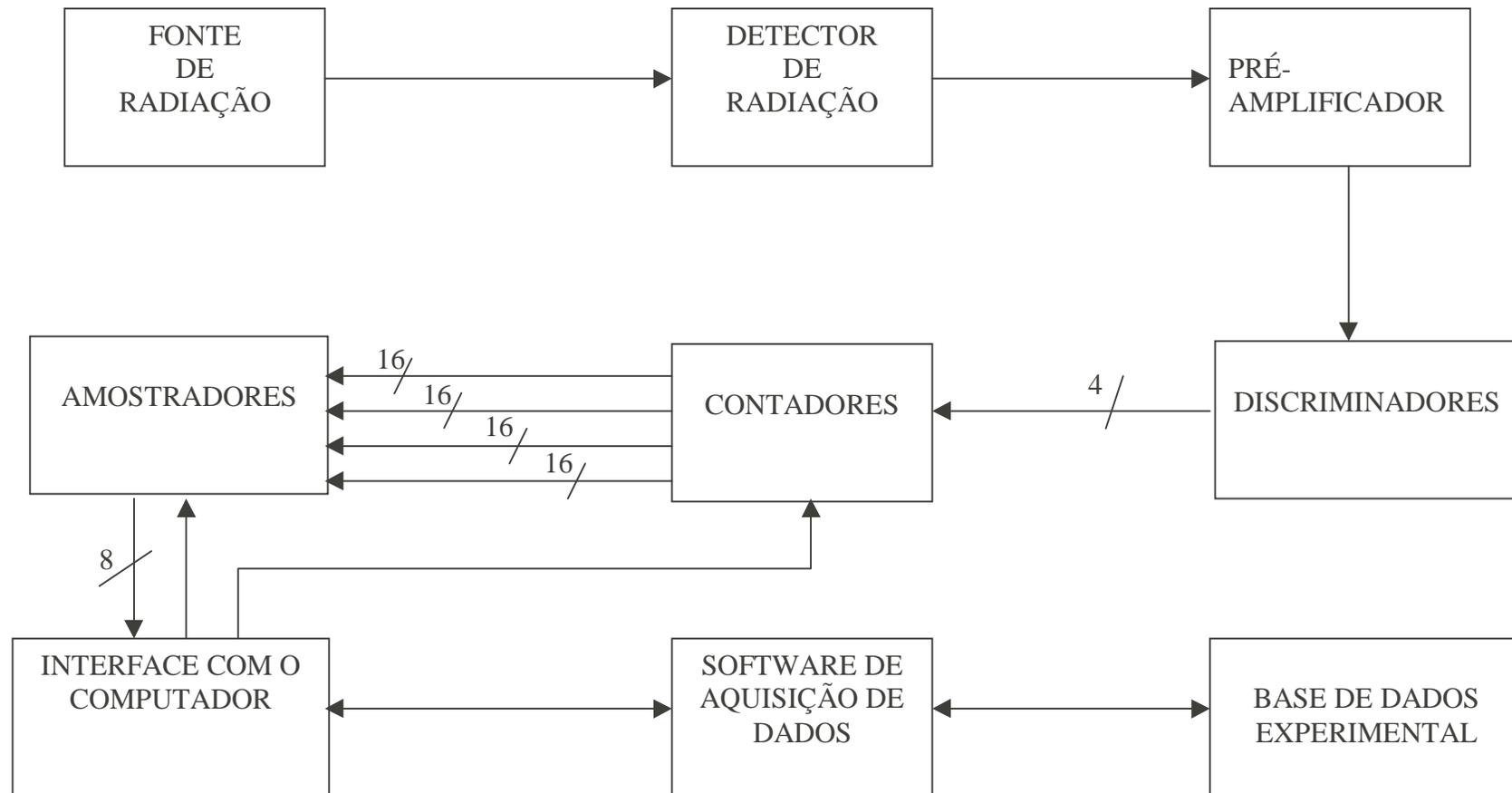


Figura 2.1: Diagrama em blocos do Sistema de Contagem de Pulsos

### Capítulo 3 - Detecção de Radiação

Segundo Knoll (1989), a massificação da “contagem por cintilação” (“*scintillation counting*”) em detecção de radiação e espectroscopia só foi possível graças aos tubos fotomultiplicadores (“*photomultiplier tubes*” - *PMT*), que convertem sinais luminosos de um pulso de cintilação em sinais elétricos. Esses sinais luminosos consistem em algumas centenas de fótons e são convertidos em pulsos de corrente sem a adição de grandes quantidades de ruído.

A estrutura de um tubo fotomultiplicador consiste basicamente de uma camada fotossensível, denominada fotocatodo, acoplada a uma estrutura multiplicadora de elétrons (“*electron multiplier structure*”). O fotocatodo serve para converter o máximo possível de fótons da luz incidente em elétrons de baixa energia. Como apenas algumas centenas de fotoelétrons estão envolvidas em um pulso típico, a carga é muito pequena para um sinal elétrico conveniente. A seção multiplicadora de elétrons do tubo possui uma geometria eficiente que funciona como um amplificador próximo do ideal que incrementa o número de elétrons, chegando a um valor de  $10^6$  elétrons. A carga agora é coletada pelo ânodo ou estágio de saída (“*output stage*”) da estrutura multiplicadora.

Os tubos fotomultiplicadores apresentam diversas formas, porém possuem a mesma estrutura. Todos consistem de um fotocatodo, um coletor de fotoelétrons entre o fotocatodo e o primeiro dinodo, uma seção multiplicadora de elétrons de vários estágios e um anodo coletor da carga amplificada. O esquema geral de um espectrômetro nuclear com cintilador e fotomultiplicadora é mostrado na figura 3.1.

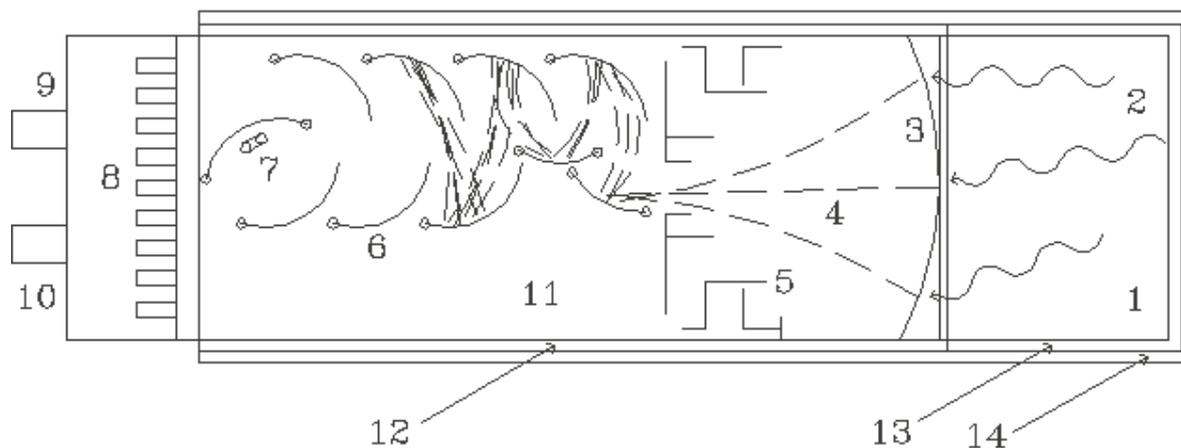


Figura 3.1. Esquema de um espectrômetro nuclear. 1. cristal de NaI(Tl); 2. fótons; 3. fotocátodo; 4. fotoelétrons; 5. eletrodos de focalização; 6. dinodos; 7. anodo; 8. base com divisores de tensão (e eventualmente pré-amplificador); 9. conector para alta tensão; 10. conector para coleção do pulso; 11. encapsulamento em vidro, em vácuo; 12. blindagem magnética; 13. material refletor de luz; 14. encapsulamento externo.

### 3.1 – Funcionamento da Fotomultiplicadora

O primeiro fenômeno a ocorrer em um tubo fotomultiplicador é a conversão dos fótons da luz incidente em elétrons. Esse processo de fotoemissão divide-se em três etapas:

1. Absorção do fóton incidente e transferência da energia para um elétron através do material fotoemissivo;
2. Migração deste elétron para a superfície;
3. Fuga do elétron da superfície do fotocátodo.

A energia que pode ser transferida do fóton para o elétron no primeiro passo é dada pela energia quântica do fóton. No segundo passo, parte desta energia será perdida no processo de migração devido às colisões entre elétrons. Finalmente, no terceiro passo, deve haver energia suficiente para o elétron ultrapassar a barreira de potencial que sempre existe nas interfaces entre matéria e vácuo.

A partir destas considerações, alguns comentários podem ser feitos levando em conta fotocátodos. Primeiro, a barreira de potencial finita do passo 3 impõe um mínimo de energia para os fótons incidentes, mesmo que todas as perdas sejam nulas. Todos os fotocátodos são insensíveis a fótons de grandes comprimentos de onda (frequências pequenas), que geralmente estão na faixa do vermelho ou infravermelho. A porcentagem de energia perdida na migração dos elétrons para a superfície deve ser pequena para maximizar a capacidade do material em

originar elétrons e que estes alcancem a superfície com energia suficiente para ultrapassar a barreira de potencial.

A barreira de potencial influencia uma outra importante propriedade dos fotocátodos, os ruídos termiônicos (“*thermionics noise*”). Conduções normais de elétrons no material fotocatodo sempre terão uma energia termo-cinética que, na temperatura ambiente (25°C), está em torno de 0,025 eV. Ocasionalmente alguns elétrons alcançam energias maiores que a barreira de potencial, e se estiverem próximos a superfície pode escapar e originar um sinal espontâneo termicamente induzido.

A parte multiplicadora do tubo fotomultiplicador é baseada no fenômeno de emissão secundária de elétrons. Cada elétron acelerado do fotocatodo colide com a superfície de um eletrodo, chamado dinodo, resultando na emissão de mais de um elétron da mesma superfície. A emissão secundária de elétrons pode ser aumentada significativamente com o uso de materiais de afinidade eletrônica negativa (NEA).

Para que se consiga ganhos da ordem de  $10^6$ , todos os tubos fotomultiplicadores utilizam vários estágios. Os elétrons que deixam o fotocatodo são atraídos pelo primeiro dinodo e produzem  $\delta$  elétrons para cada fotoelétron incidente. Esses elétrons são guiados para o segundo dinodo repetindo o processo, que pode ocorrer várias vezes. Assim: Ganho total =  $\alpha \delta^N$ , onde  $\alpha$  é a fração de todos os fotoelétrons coletados pela estrutura multiplicadora e N é o número de estágios.

Já que o tempo necessário para a fotoemissão no fotocatodo ou para emissão secundária nos dinodos é muito pequeno (0,1 ns ou menos), as características de tempo de tubos fotomultiplicadores dependem exclusivamente da trajetória dos elétrons. O tempo de trânsito do elétron em um tubo fotomultiplicador é definido como a média da diferença de tempo entre a chegada de um fóton no fotocatodo e a coleta dos elétrons no anodo. O tempo de trânsito dos elétrons nos tubos fotomultiplicadores varia de 20 a 80 ns. Em muitas aplicações esta grandeza não é um problema pois ela apenas adiciona um atraso constante no sinal. Em contrapartida, a dispersão no tempo de trânsito é uma grandeza de maior importância porque determina a duração do pulso de elétrons que chegam ao anodo.

A região entre o fotocatodo e o dinodo é crítica na determinação das propriedades de tempo. Para uma coleta uniforme a partir do fotocatodo, a distância entre o fotocatodo e o dinodo é grande se comparada às distâncias dos vários dinodos.

Normalmente as fontes de ruído mais significantes em uma fotomultiplicadora são os elétrons termiônicos emitidos espontaneamente pelo fotocatodo. O pulso gerado nesse processo corresponde a um único fotoelétron, então a amplitude é limitada ao nível mais baixo da escala.

Como a maior parte das contagens de cintilação é feita em condições em que o pulso cintilante corresponde a vários fotoelétrons, podemos eliminar o ruído térmico em grande parte dos casos apenas discriminando as amplitudes dos pulsos. Em aplicações onde são medidos baixíssimos níveis de energia ou é detectado um único fóton, o sinal real corresponde ao sinal de um fotoelétron, tornando-se indistinguível do ruído térmico. Nesse caso deve-se tentar reduzir o ruído térmico ao máximo escolhendo um tubo com o menor diâmetro possível para a aplicação.

A fotomultiplicadora deve ser mantida em ambiente escuro. A exposição do tubo à iluminação ambiente enquanto estiver alimentado eletricamente pode gerar correntes que excedem seus limites, podendo danificá-lo.

### **3.2 - Polarização de Fotomultiplicadoras e Fontes de Tensão**

De acordo com Mário e Relton(1998), uma fonte de alimentação externa deve ser conectada à fotomultiplicadora para que o fotocátodo e os diversos dinodos sejam polarizados. A polarização dos dinodos é feita por uma rede resistiva. Esta técnica apresenta a desvantagem de mesmo no escuro (corrente de anodo igual a zero) a fonte ter que fornecer energia para rede divisora. Outro problema é a flutuação das tensões entre os últimos dinodos devido um maior consumo de corrente quando há uma excitação no fotocátodo.

A fonte de tensão deve ser livre de *ripple* para evitar flutuações no ganho da fotomultiplicadora.

## Capítulo 4 – Pré-Amplificador

Segundo Knoll (1989), a saída fundamental dos detectores de radiação é uma carga que é liberada por radiações incidentes. Para várias aplicações dos contadores de cintilação, esta carga é suficientemente grande para que um pulso de tensão razoavelmente grande seja produzido pela interação desse pulso de carga com a capacitância do detector, do cabo de conexão, e pela entrada do circuito de contagem. Para a maioria dos outros detectores, entretanto, a carga produzida pela radiação incidente é tão pequena que é impraticável trabalhar com os pulsos do sinal, sem uma amplificação intermediária. O primeiro elemento no processamento de sinal é usualmente um pré-amplificador, conectado entre o detector e o processamento do pulso e nos estágios seguintes de seu processamento.

O pré-amplificador geralmente é colocado o mais perto possível do detector, para aumentar a relação sinal-ruído. Para reduzir o carregamento capacitivo no detector, evitam-se longos cabos de interconexão entre o detector e o pré-amplificador.

Uma das funções do pré-amplificador é terminar a capacitância rapidamente e portanto maximizar a relação sinal-ruído. Também serve como um casador de impedâncias, representando uma alta impedância adequada ao detector, para minimizar o seu carregamento, enquanto possui baixa impedância de saída para distribuir o sinal pelo sistema de processamento.

O pré-amplificador convencionalmente não fornece nenhuma conformação de pulso. O tempo de subida do pulso de saída é mantido tão pequeno quanto possível, consistente com o tempo de coleção de carga no próprio detector. O tempo de decaimento do pulso é feito tão grande (aproximadamente 50 ou 100 $\mu$ s) que a completa coleção de carga dos detectores com grandes tempos de coleção de carga diferentes podem ocorrer sem um significativo decaimento do pulso de saída.

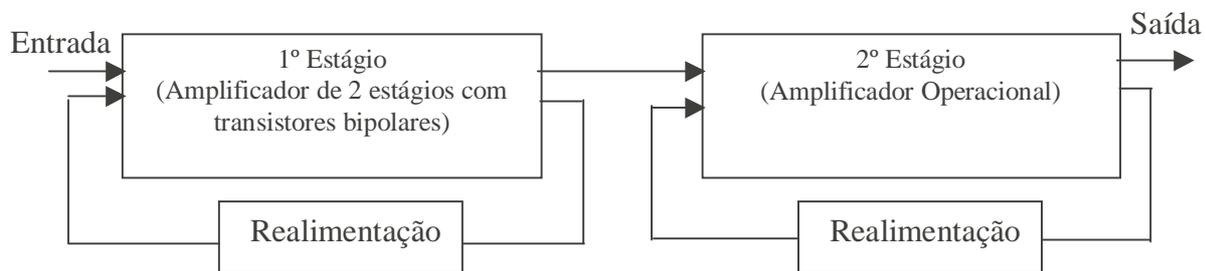


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do pré-amplificador.

A conexão do pré-amplificador com os demais sistemas é mostrada no diagrama de blocos da Figura 4.2.

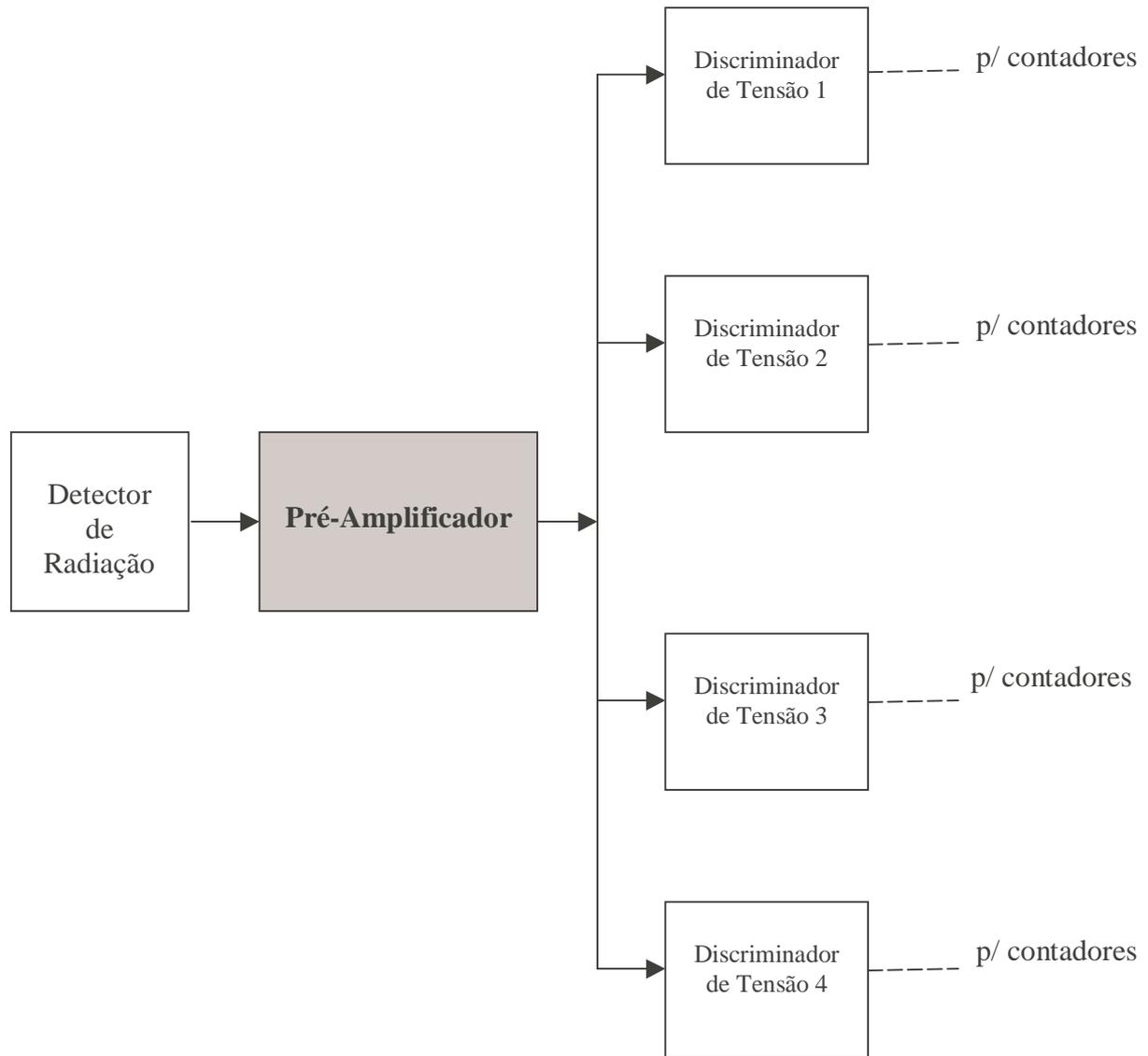


Figura 4.2 - Diagrama de blocos das conexões do pré-amplificador.

#### 4.1 – Características do Ruído

Uma das especificações mais importantes para o pré-amplificador é o ruído. O ruído é normalmente dado como a energia equivalente gerada no detector para o qual o pré-amplificador é projetado. O ruído é uma forte função da capacitância com a qual a entrada pré-amplificada é carregada.

A capacitância de entrada cresce através da capacitância do detector e da conexão entre o detector e o pré-amplificador. Deste modo, como já foi dito, é importante manter as “interconexões” dos cabos tão curtas quanto possível e escolher um detector com capacitância inerente que não seja maior do que a necessária.

#### 4.2 – Implementação do Pré-amplificador

O dispositivo pré-amplificador é baseado no circuito proposto por D. Yu. Akimov, Yu. K. Akimov, A. A. Bogdzal, A. G. Kovalenko e D. V. Matveev (2002). O circuito publicado na revista foi desenvolvido para ser usado com fotomultiplicadoras e sofreu algumas alterações. Os resistores, que originalmente eram da família de 5% de tolerância, foram substituídos pelos de 10% de tolerância, mais fáceis de ser encontrados. Também foi implementada uma forma de se variar o ganho do pré-amplificador, que antes era fixo.

No sistema desenvolvido neste projeto, as emissões de uma pastilha radioativa são captadas por um cintilador terminado em uma fotomultiplicadora, transformando emissões em pulsos elétricos para o pré-amplificador. Depois de passar pelo pré-amplificador, os pulsos são classificados por faixas de amplitude para então serem contados e registrados em computador.

Os sinais chegam ao pré-amplificador através de um cabo coaxial de 50Ω. A fim de se posicioná-lo o mais próximo possível da fotomultiplicadora, este dispositivo foi construído em uma caixa separada do resto do sistema. Assim evitam-se ruídos e capacitâncias indesejadas no cabo coaxial e na entrada do pré-amplificador e maximiza-se a relação sinal-ruído. A ligação entre o pré-amplificador e o discriminador também é feita por um cabo coaxial de 50 Ω.

Um dos problemas que o pré-amplificador enfrenta é o empilhamento (“*pull-up*”). Esse fenômeno acontece quando dois pulsos distintos muito próximos são vistos como apenas um pelo sistema eletrônico. Para evitar este problema o pulso de saída deve ser o mais estreito possível.

Um outro desafio foi a redução do nível de ruído e a linearidade de amplificação. A pré-amplificação poderia usar transistores discretos, entretanto o resultado seria um dispositivo volumoso. O uso de amplificadores operacionais de banda larga torna-se então uma opção

bastante atrativa. Por exemplo, o amplificador operacional de baixo ruído OPA643 da Burr Brown, que possui uma banda de 200 MHz. De acordo com o manual do fabricante, o OPA643 pode garantir uma corrente de saída de até 60 mA e, devido à baixa impedância de saída, pode ser conectado a um cabo de transmissão de  $50\Omega$  sem perdas significativas na amplitude do pulso.

Para construirmos um pré-amplificador rápido, com baixo nível de ruído e baixa impedância de saída optamos por uma combinação entre um estágio baseado em transistores seguido de um estágio com o OPA643. O diagrama do circuito pode ser visto na Figura 4.3a. O primeiro estágio consiste em dois transistores de alta frequência que funcionam como um conversor corrente – tensão. Os dois diodos presentes em seus terminais de entrada previnem que os transistores danifiquem-se caso ocorra um pico de tensão na entrada. O capacitor de correção  $C_{cor}$  incrementa o ganho em altas frequências e seu valor (entre 10 e 20 pF, aproximadamente), dependendo de características específicas do circuito, é selecionado experimentalmente. O segundo estágio é um amplificador não-inversor construído com o OPA643. É neste estágio que se faz a seleção do ganho do pré-amplificador.

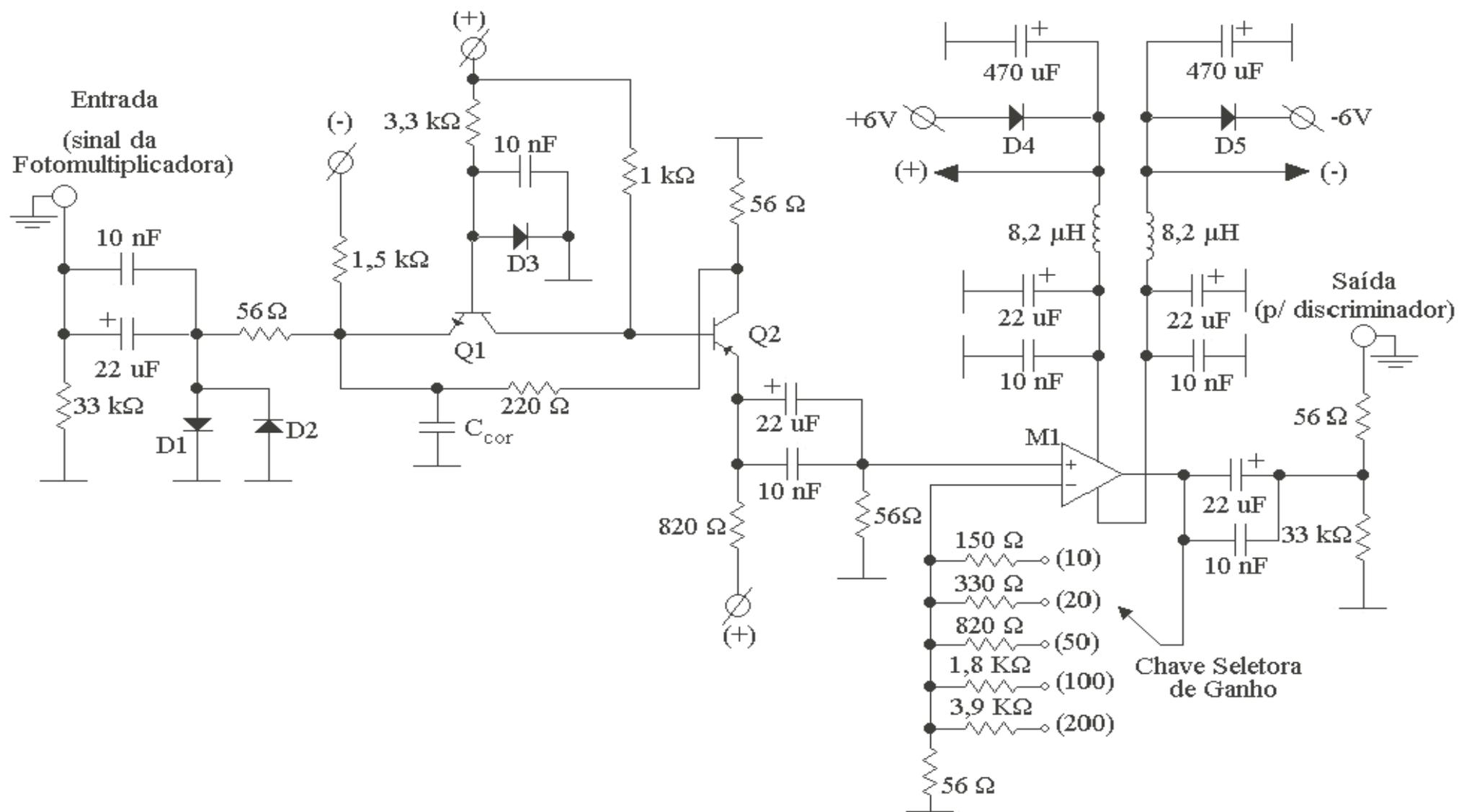


Figura 4.3 - Circuito eletrônico do pré-amplificador

### 4.3 – Ajuste do Ganho

Os sinais que chegam ao amplificador operacional já estão amplificados por um fator igual a 3 pelo amplificador discreto, assim a contribuição de ruído intrínseca ao amplificador operacional torna-se insignificante. Para uma maior funcionalidade, podemos seleccionar o ganho da malha de realimentação do amplificador operacional através de uma chave giratória, variando assim o ganho do amplificador operacional e escolhendo aquele que melhor se adapte às necessidades do usuário. Porém, ao seleccionar o ganho do pré-amplificador o usuário deve notar que quanto maior o ganho, mais estreita é a banda passante do sistema. A figura 4.3a mostra esse efeito no gráfico de ganho e fase em malha aberta do amplificador operacional.

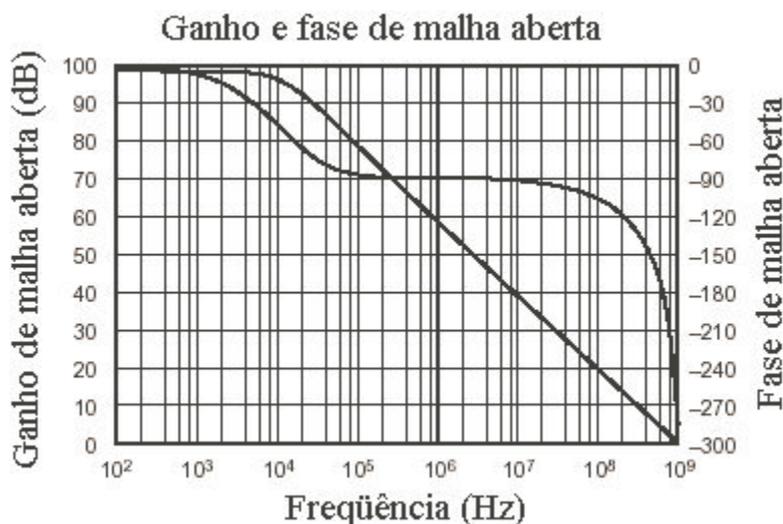


Figura 4.4 - Gráfico de ganho e fase em malha aberta do amplificador operacional fornecido pelo fabricante

Na tabela 4.1 a seguir, apresentam-se os resistores da malha de realimentação, o ganho do amplificador operacional e o ganhos totais esperados e calculados do pré-amplificador.

Tabela 4.1: Malha de realimentação do OPA643, ganhos e banda passante do pré-amplificador

Resistores		Ganhos		Banda Passante
R <sub>1</sub> (fixo)	R <sub>f</sub> (de realimentação)	Calculado	Esperado	
56 Ω	150 Ω	11,03	10	500 MHz
56 Ω	330 Ω	20,67	20	300 MHz
56 Ω	820 Ω	46,92	50	50 MHz
56 Ω	1,8 kΩ	99,42	100	35 MHz
56 Ω	3,9 kΩ	211,92	200	20 MHz

#### 4.4 – Considerações no uso dos pré-amplificadores

Os pré-amplificadores pretendidos para detectores de radiação baseados em contadores de cintilação são freqüentemente muito diferentes em relação aos pré-amplificadores para outros tipos de detectores, pois o nível de sinal de uma fotomultiplicadora é um pouco alto, as especificações requeridas para o ganho e o ruído de um pré-amplificador de cintilação geralmente não são informadas.

Embora seja possível trabalhar com contadores de cintilação sem os pré-amplificadores, é conveniente incluir um pré-amplificador para evitar mudanças que podem ocorrer na constante de tempo do circuito equivalente das fotomultiplicadoras, se for conectada diretamente a um amplificador linear ou outros circuitos de medição. Sem o pré-amplificador, o comprimento do cabo usado e a impedância de entrada dos circuitos de medição afetam a constante de tempo e podem levar para situações no qual uma constante de tempo pode ser alterada por um rearranjo dos equipamentos.

Refletindo o interesse usual, a maioria dos amplificadores comerciais são otimizados, visando a resolução da altura do pulso para pulsos derivados de um detector específico. Em algumas aplicações, entretanto, informações sobre o período do pulso são mais importantes que a precisa medida de sua amplitude, e modificações devem ser feitas no caminho, no qual o pulso detector básico é manipulado. Convencionalmente a alimentação requerida para a operação do pré-amplificador é feita através de um cabo multicondutor conectado ao chassi de um componente eletrônico subsequente, mais freqüentemente o amplificador linear. O tipo de conector e especificação do cabo de alimentação são padronizados pelo padrão NIM. Quando há uma grande separação entre o pré-amplificador e componentes subsequentes, esse longo cabo de alimentação é ocasionalmente a fonte dos problemas com ruído devido a laços de terra. Neste caso, utiliza-se uma alimentação local para o pré-amplificador.

## Capítulo 5 – Discriminadores

Neste capítulo descreveremos a parte do sistema que faz a *interface* entre a parte analógica do sistema e a parte digital. Para isso utilizamos discriminadores de tensão, que são na verdade comparadores analógicos. O diagrama em blocos dos discriminadores pode ser visto na Figura 5.1.

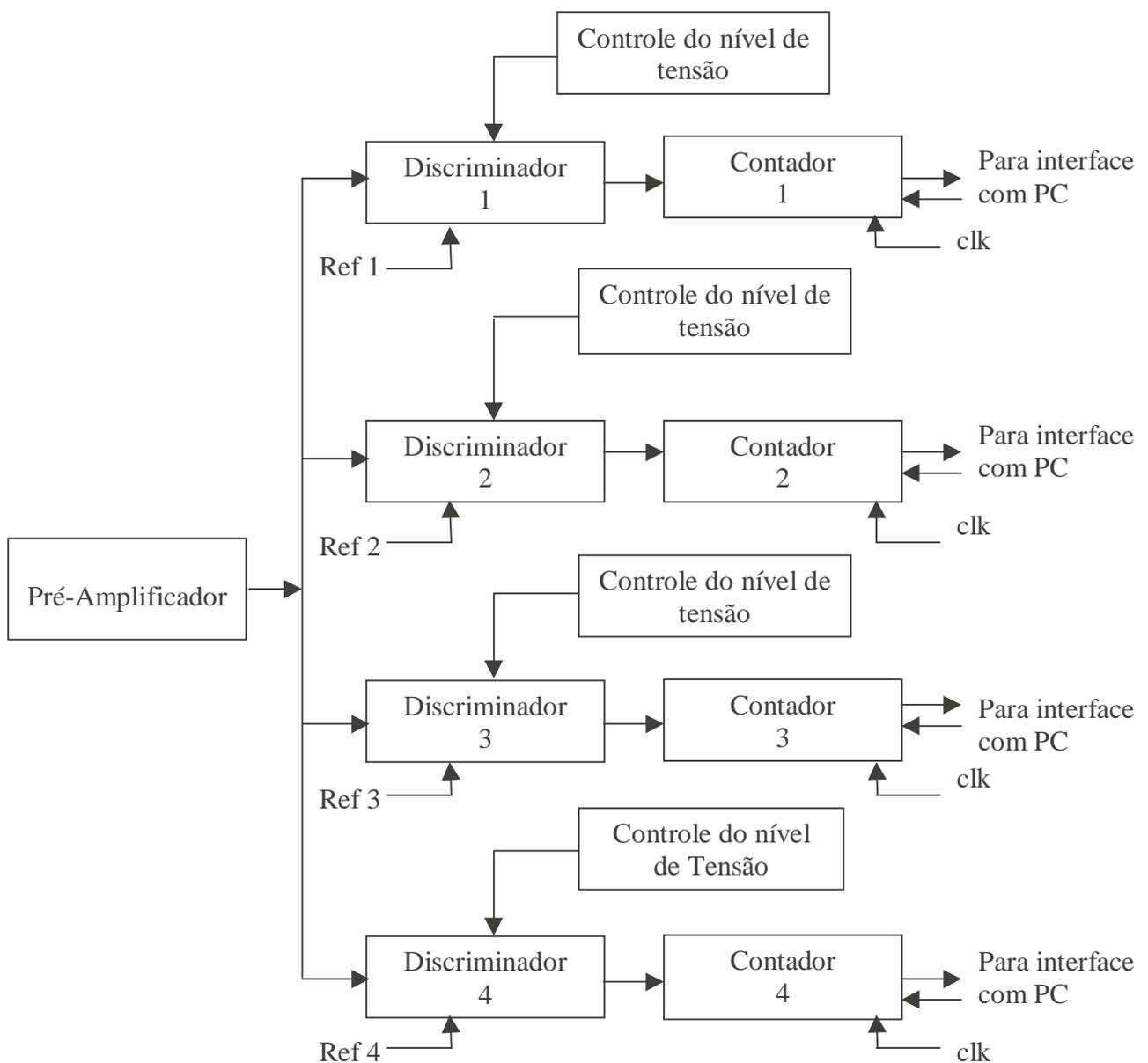


Figura 5.1 – Diagrama de blocos dos discriminadores.

## 5.1 – Funcionamento do discriminador

Com o objetivo de contar os pulsos propriamente, os pulsos analógicos devem ser convertidos em pulsos lógicos.

Segundo Santoro, Barreto e Vaz (1999) , um discriminador gera um pulso lógico preciso em resposta a um pulso de entrada somente se a amplitude do pulso exceder o seu nível pré-ajustado de referência ( $V_{ref}$ ). Se a amplitude do pulso de entrada estiver abaixo do nível de discriminação, nenhuma saída aparece. Os pulsos de saída são pulsos de amplitude padrão e de duração proporcional à taxa de entrada de pulsos. A saída de um discriminador pode ser utilizada para disparar (*trigger* ou gatilho) ou habilitar um sistema de aquisição de dados, em parte ou no todo. Um discriminador pode ser considerado um conversor analógico para digital (A/D) de 1 bit. Esse processo de seleção do discriminador pode ser visto na Figura 5.2.

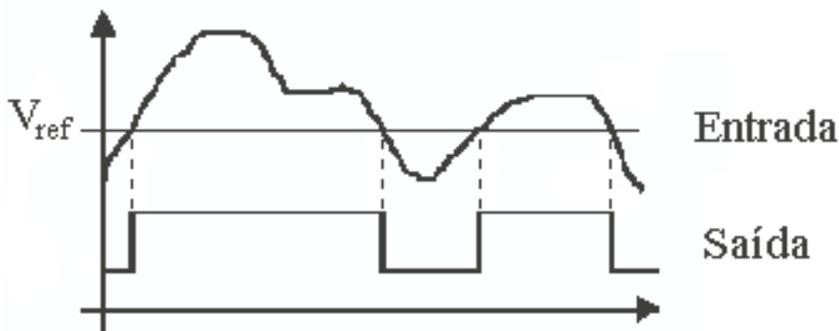


Figura 5.2 – Processo de seleção de um discriminador

## 5.2 – Tensões de Referência

As tensões de referência para os discriminadores (comparadores) são obtidas através do CI REF03, capaz de fornecer uma tensão bastante precisa, e de potenciômetros do tipo Trimpot. Os extremos do primeiro potenciômetro estão ligados no CI REF03 e na terra, e seu cursor na entrada inversora do primeiro comparador. Os extremos dos demais potenciômetros estão ligados no cursor do potenciômetro anterior e na terra, e seu cursor na entrada inversora do respectivo comparador. Desta forma, cada potenciômetro funciona como um divisor de tensão capaz de ajustar uma referência obrigatoriamente menor que a referência do canal anterior e maior que a do canal

seguinte. Deve-se notar que entre cada potenciômetro e cada comparador existe um amplificador operacional com ganho unitário (*buffer*) para garantir o casamento de impedâncias.

O sinal a ser comparado chega do pré-amplificador através de um cabo coaxial de 50  $\Omega$  e é injetado na entrada não-inversora dos comparadores.

Este circuito pode ser visto na Figura 5.3.

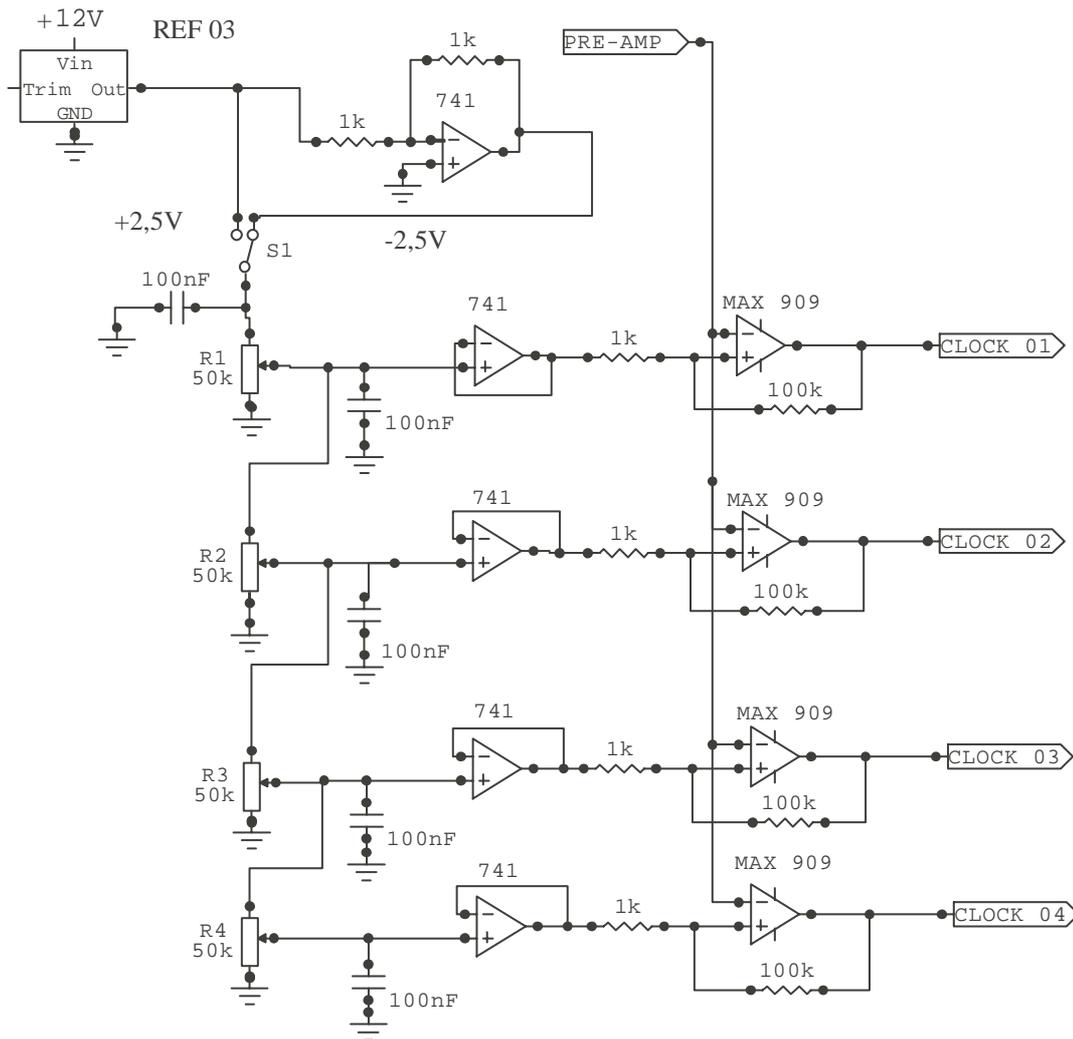


Figura 5.3 – Circuito discriminador de amplitude.

### 5.2.1 – Chave selecionadora

Em algumas fotomultiplicadoras os pulsos de saída é negativo, deste modo, para que nosso sistema tivesse a capacidade de comparar tanto pulsos positivos quanto negativos, implementamos

uma chave seletora, que pode mudar a polaridade da tensão de referência para positiva ou negativa. Para colocamos na saída da referência um amplificador inversor que torna a referência do sistema negativa como visto na figura 5.3.

### 5.2.2 – Ajuste do Nível de Discriminação

O ajuste do nível de discriminação é feito através dos quatro potenciômetros do tipo Trimpot. Para que isso possa ser feito facilmente, os potenciômetros foram instalados na parte frontal do equipamento. O ajuste deve ser feito através de uma chave de fenda, e a tensão de referência deve ser medida nos pontos de teste  $V_{Ref\ 1}$  a  $V_{Ref\ 4}$ , também disponibilizados na parte frontal do equipamento. Ajusta-se primeiro  $V_{Ref\ 1}$ , em seguida  $V_{Ref\ 2}$ , até  $V_{Ref\ 4}$ . Deve-se notar que o ajuste de  $V_{Ref\ 1}$  afeta as demais de referência. O ajuste de  $V_{Ref\ 2}$  afeta  $V_{Ref\ 3}$  e  $V_{Ref\ 4}$  e assim sucessivamente.

## Capítulo 6 – Contadores , Amostradores e Interface com o Computador

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada de todo o sistema digital de aquisição de dados, desde a contagem dos pulsos até a *interface* (conexão) ao computador. O diagrama de blocos simplificado deste sistema é mostrado na Figura 6.1.

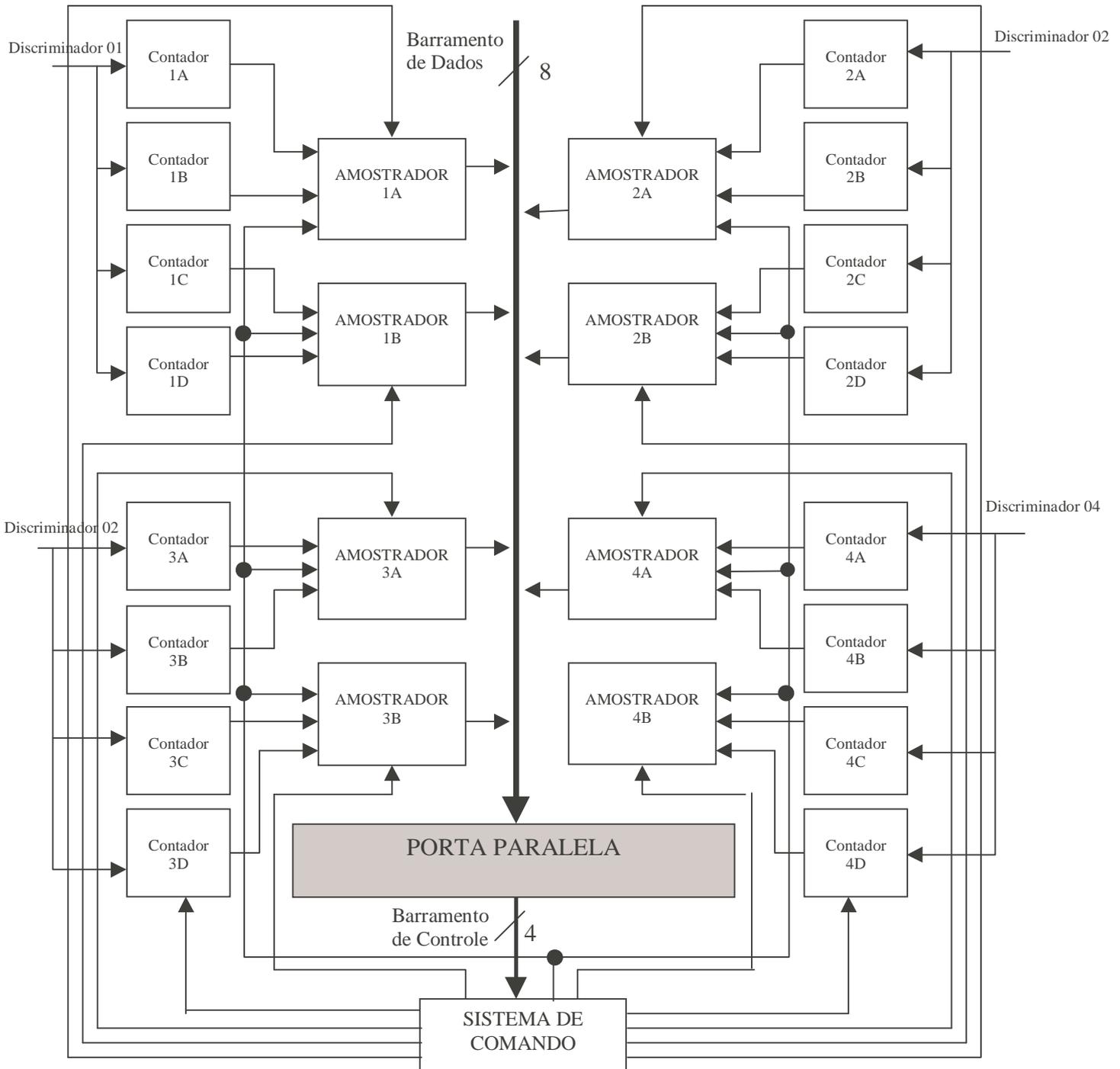


Figura 6.1 : Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados

## 6.1 – Contadores

Segundo Knoll(1989), como passo final em um sistema de contagem, os pulsos lógicos devem ser acumulados e sua contagem deve ser gravada durante um período de tempo fixado. O dispositivo usado para este propósito deve ser um contador digital, que é incrementado de uma unidade cada vez que um pulso lógico aparece na entrada. Na contagem de pulsos nucleares, tais dispositivos são costumamente denominados de *scalers*.

### 6.1.1 - Tempo-Morto (*Dead Time*)

Uma importante consideração em várias aplicações de contagem é a perda de eventos devido ao tempo morto do sistema. Para alguns detectores o próprio mecanismo detector limita o mínimo intervalo entre eventos consecutivos para o qual dois pulsos distintos podem ser contados. Frequentemente, entretanto, o detector é capaz de produzir pulsos que são separados por um tempo que é menor que o tempo morto inerente na operação de um componente eletrônico, e portanto será esse componente que determinará o tempo morto do sistema.

A validade de correções para o tempo morto perdido depende da premissa, de que ele é constante para todos os eventos. O tempo morto de unidades eletrônicas pode, algumas vezes, variar com a amplitude da forma do pulso de entrada. Assim, os passos para estabelecer o tempo morto artificialmente são garantidos em algumas aplicações críticas. Nessa aproximação, o tempo morto é padronizado por um elemento tal como um *linear gate* (atraso) no qual é mantido fechado para um período fixo de tempo seguindo cada pulso. Esse tempo é escolhido de modo a ser maior que o tempo morto de qualquer componente no sistema, e assim correções precisas podem ser feitas, mesmo sob condições as quais grandes variações na amplitude do pulso são encontradas.

O tempo morto deste elemento deve também, ser medido diretamente utilizando-se um osciloscópio.

### 6.1.2 – Grupo de contadores

Para este projeto foram desenvolvidos quatro grupos de contadores de 16 bits cada, onde cada grupo é formado por quatro contadores síncronos de 4 bits, conectados em cascata, mas com clock único. Os contadores são do tipo rápidos, 74ALS161 (Texas Instruments). Os contadores

74ALS161, foram escolhidos dentre muitos outros, por possuir um conjunto de características que se enquadrava perfeitamente em nosso projeto. Algumas dessas características são, uma frequência de clock de até 75MHz, com baixa dissipação de potência, amostras de fácil obtenção e custo zero.

Os contadores estão cascadeados conforme a Figura 6.2, de modo que sua frequência de clock permaneça a mesma com a adição de outros contadores. O clock de cada grupo de contadores é a própria saída do discriminador de tensão correspondente a cada canal. Na saída destes contadores, estão conectados *latches* de 8 bits, que são responsáveis por fazer a amostragem e o interfaceamento com o computador.

Os *clears* dos contadores são assíncronos (independem do clock) e estão todos interligados de modo que todos os canais do sistema de contagem possam ser zerados simultaneamente, eles são comandados pelo computador através do sistema de comando.

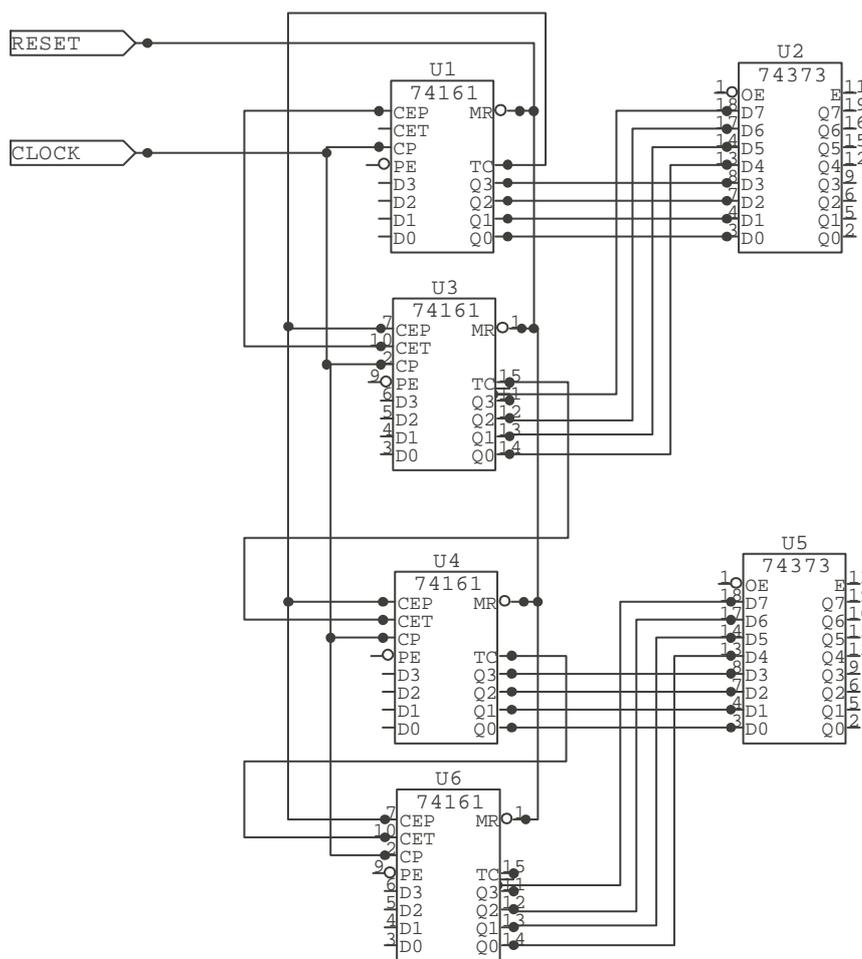


Figura 6.2 – Esquema típico de cascadeamento e ligação dos contadores. CI 74161 – 74ALS161 e CI 74373 – 74HCT373

## 6.2 – Amostradores

Durante a contagem dos pulsos, eles precisam ser enviados para o computador de modo que o programa de aquisição de dados possa mostrá-los e armazená-los. Entretanto, a porta paralela é incapaz de receber todas as contagens em um mesmo instante, pois o barramento de dados é de apenas 8 bits. A amostragem das contagens além de permitir que todos dados possam ser enviados através do barramento, permite também que o *software* faça os cálculos necessários para que os vários dados de 8 bits enviados para o computador, sejam transformados em quatro números de 16bits. O diagrama de blocos típico de um amostrador do sistema de amostragem, pode ser visto na Figura 6.3

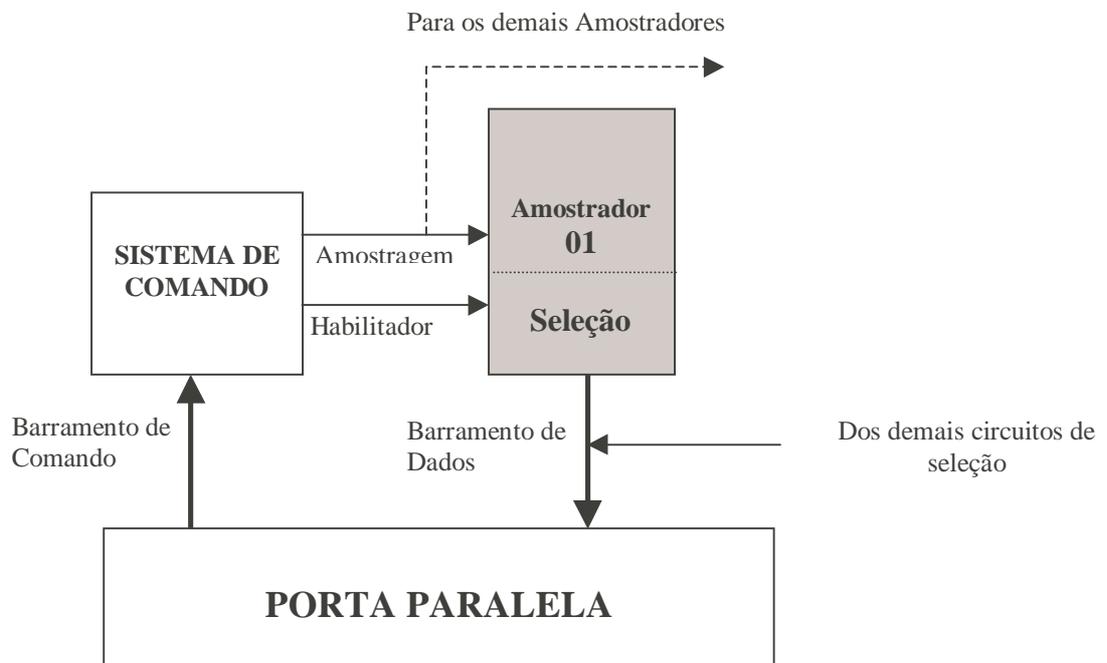


Figura 6.3 – Diagrama de Blocos típico do sistema de amostragem

### 6.2.1 – Amostragem e leitura dos Dados

A função dos amostradores é amostrar a contagem de todos os contadores simultaneamente no mesmo instante de tempo e em seguida enviar, através da habilitação e “desabilitação” da porta três estados (*tri-state*), os dados amostrados para o barramento de 8 bits. Para fazer este procedimento, implementamos oito latches *tri-state*, SN74HCT373 (*Texas Instruments*) que amostram as contagens dos quatro grupos de contadores e os enviam pelo barramento de dados até a porta-paralela. A amostragem dos contadores é comandada pelo demultiplexador que recebe o comando do computador e transmite para os latches o comando da amostragem. Todos os pinos de amostragem dos amostradores estão interligados, de modo que se possa garantir uma amostragem simultânea de todos os canais de contagem. O diagrama de tempo da figura 6.4 mostra o comportamento das saídas dos amostradores no momento da amostragem.

Quando o pino de amostragem (A) está em nível alto, a saída do amostrador (1Q) está no estado transparente, isto é, a entrada (1D) é igual a saída (1Q). No momento em que o pino da amostragem (A) vai para o nível baixo, a saída (1Q) fica “amostrada”, isto é, ela permanece em um nível alto ou baixo dependendo do instante em que foi amostrado. Este estado permanece até o momento em que o pino de amostragem (A) retorna ao nível alto, em seguida a saída retorna para o estado transparente.

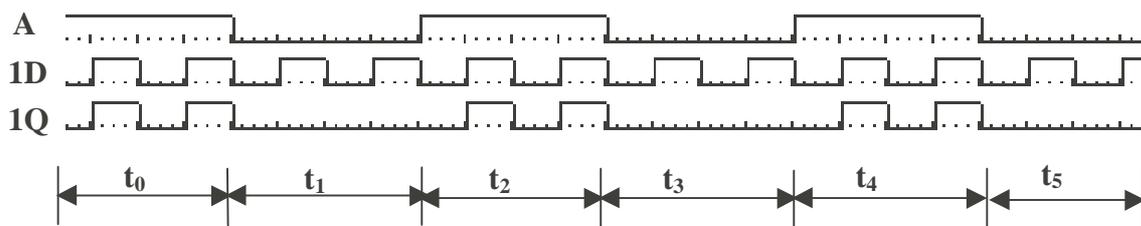


Figura 6.4 – Diagrama de Tempo da amostragem. **A** – amostragem; **1D** – Entrada de dados do amostrador (proveniente do contador); **1Q** – Saída do amostrador com destino ao barramento de dados; **t<sub>0</sub> t<sub>2</sub> t<sub>4</sub>** – Instante onde os amostradores estão transparentes (saída igual a entrada); **t<sub>1</sub> t<sub>3</sub> t<sub>5</sub>** – Instante da amostragem.

Os “habilitadores” de alta impedância, estão conectados separadamente a um decodificador, que seguindo a lógica comandada pelo programa, irá seqüencialmente habilitar e desabilitar as

saídas em alta impedância dos amostradores, permitindo assim, a leitura seqüencial dos pulsos através do barramento de 8 bits. A interligação dos amostradores pode ser vista na Figura 6.5.

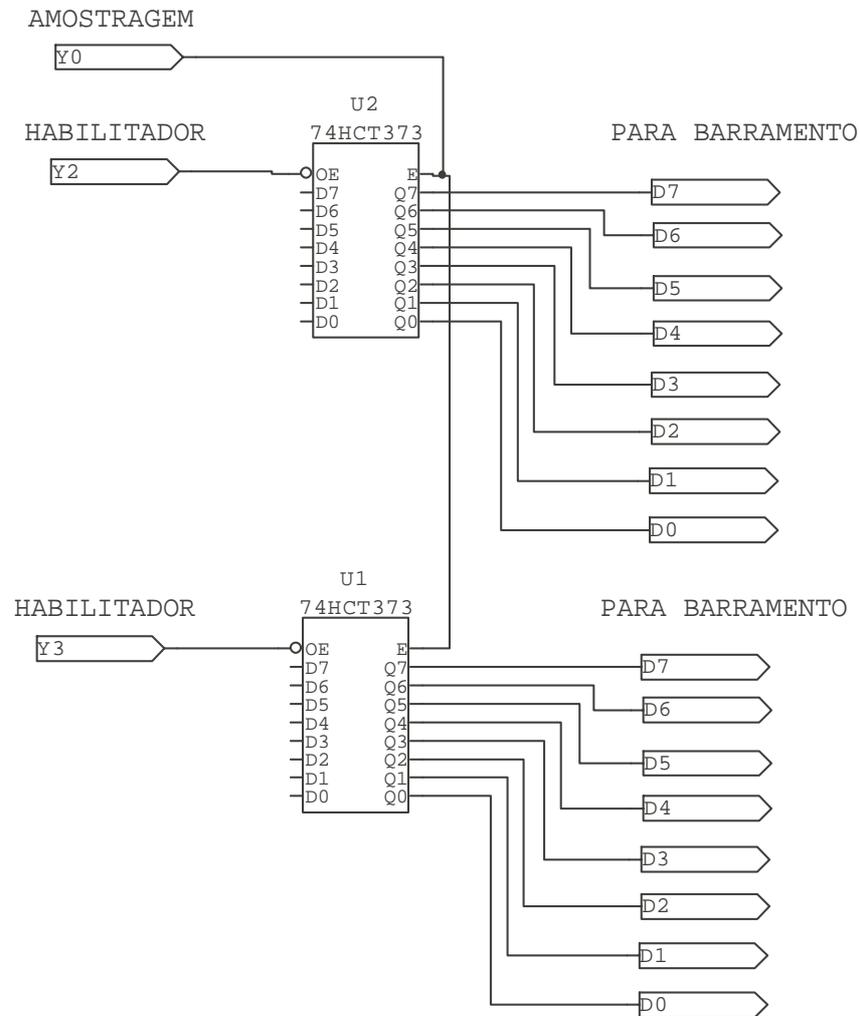


Figura 6.5 – Esquema típico de ligação dos amostradores. D0 a D7 – Barramento de dados; Y0,Y2,Y3 – Saídas do decodificador.

### 6.3 – Interface com o computador

A próxima etapa na aquisição de dados, é o envio dos dados amostrados pelos amostradores, para o computador.

O sistema de interfaceamento é composto pelas conexões entre a porta paralela, o barramento de dados (amostradores) e o barramento de controle (sistema de controle) como visto na Figura 6.6 e Figura 6.7.

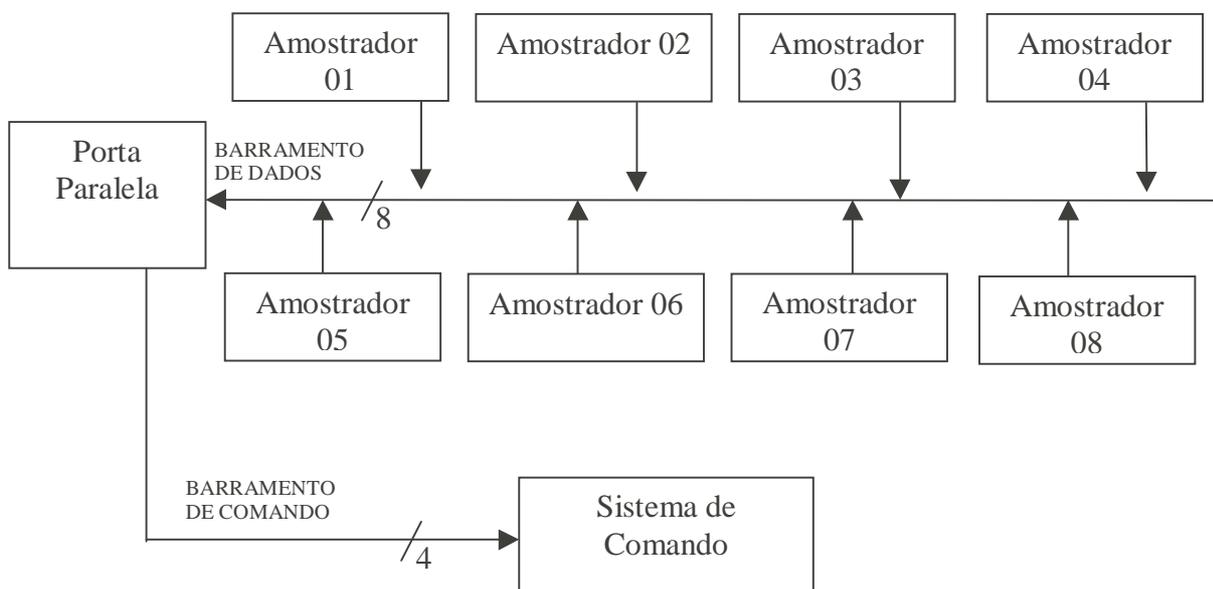


Figura 6.6 – Diagrama de blocos do interfaceamento

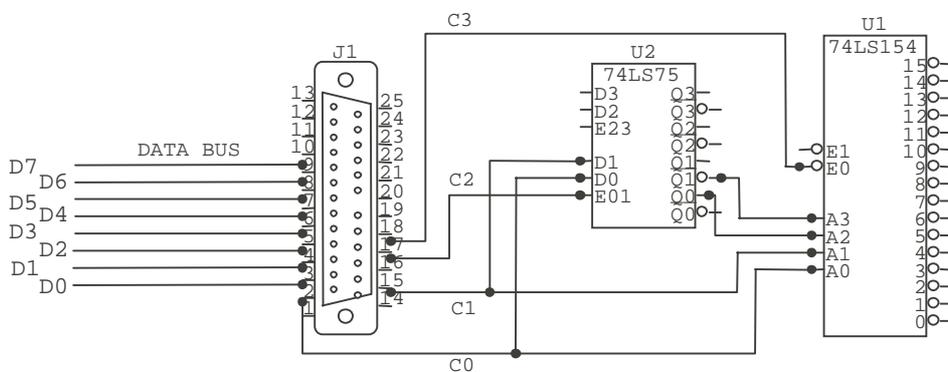


Figura 6.7 – Esquema de ligação da porta paralela

### 6.3.1 – A Porta Paralela

A porta paralela é uma interface de comunicação entre o computador e um periférico. Quando a IBM criou seu primeiro PC (*Personal Computer*) ou Computador Pessoal, a idéia era conectar a essa Porta uma impressora, mas atualmente, são vários os periféricos que utilizam-se desta Porta para enviar e receber dados para o computador (exemplos: *Scanners*, Câmeras de vídeo, Unidades de disco removível e outros). Através de uma linguagem de programação como: *C/C++/C++Builder, Pascal/Delphi* ou mesmo o *Visual Basic*, é possível desenvolver um programa que controle um periférico conectado à Porta paralela, ou um programa de transferência de arquivos entre dois computadores, utilizando um cabo paralelo como meio de transmissão.

#### 6.3.1.1 – Características da Porta Paralela

##### Transmissão Unidirecional

A porta paralela SPP (*Standard Parallel Port*) pode chegar a uma taxa de transmissão de dados a 150kB/s. Comunica-se com a CPU utilizando um BUS de dados de 8 bits. Para a transmissão de dados entre periféricos são usados 4 bits por vez.

##### Transmissão Bidirecional

A porta avançada EPP ( *Enhanced Parallel Port* ) chega a atingir uma taxa de transferência de 2 MB/s. Para atingir essa velocidade, será necessário um cabo especial. Comunica-se com a CPU utilizando um BUS de dados de 32 bits. Para a transmissão de dados entre periféricos são usados 8 bits por vez.

A porta avançada ECP (*Enhanced Capabilities Port*) tem as mesmas características que a EPP, porém, utiliza DMA (acesso direto à memória), sem a necessidade do uso do processador, para a transferência de dados. Utiliza também um buffer FIFO de 16 bytes.

## Extensão do Cabo

A extensão do cabo para interligar um computador a um periférico, é de no máximo 8m. Na prática, utiliza-se um cabo com extensão menor. Quanto maior a extensão do cabo, maior é a interferência na transmissão dos dados.

## Endereços da Porta Paralela

O computador nomeia as Portas Paralelas, chamando-as de LPT1, LPT2, LPT3 etc, mas, a Porta física padrão do computador é a LPT1, e seus endereços são: 378h ( para enviar um byte de dados pela Porta), 378+1h (para receber um valor através da Porta) e, 378+2h (para enviar dados). Em alguns PCs está disponível a LPT2, e seus endereços são: 278h, 279h (278+1h)e 37Ah (278+2h), com as mesmas funções dos endereços da porta LPT1 respectivamente.

Tabela 6.3a: Endereços de porta paralela de PCs.

Nome da Porta	Endereço de Memória	Endereço da Porta		Descrição
LPT1	0000:0408	378 HEX	888 DEC	ENDEREÇO BASE
LPT2	0000:040A	278 HEX	632 DEC	ENDEREÇO BASE

## Registradores

Utilizando a Porta Paralela conectada a uma impressora, os endereços terão nomes sugestivos, como segue abaixo:

Tabela 6.3b: Descrição dos endereços da porta paralela

Nome	Endereços LPT1	Endereços LPT2	Descrição
Registro de Dados	378h	278h	Envia um byte para a impressora
Registro de Status	379h	279h	Ler o Status da impressora
Registro de Controle	37Ah	27Ah	Envia dados de controle para a impressora

## O conector DB25

O DB25 é um conector que fica na parte de trás do gabinete do computador, e é através deste, que o cabo paralelo se conecta ao computador para poder enviar e receber dados. No DB25, um pino está em nível lógico 0 quando a tensão elétrica no mesmo está entre 0 à 0,4V. Um pino se encontra em nível lógico 1 quando a tensão elétrica no mesmo está acima de 3.1 e até 5V. A Figura 6.8 mostra o conector padrão DB25, com 25 pinos, onde cada pino tem um nome que o identifica, como mostrado na Figura 6.9:

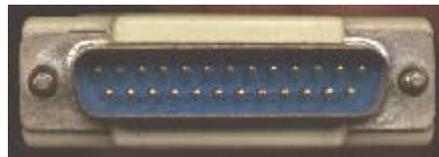


Figura 6.8 Foto do Conector DB25 macho.

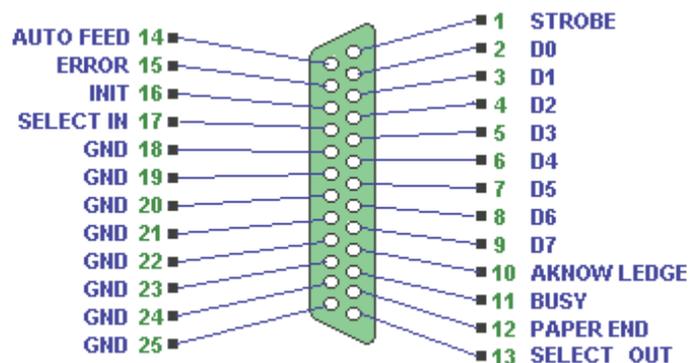


Figura 6.9 – Pinagem do conector da porta paralela.

### 6.3.2 Configuração da porta paralela

Uma característica muito importante neste projeto, é a configuração da porta paralela. Este sistema foi projetado para receber e enviar os dados através da porta paralela no modo bidirecional, mais precisamente no modo EPP, deste modo o computador a ser usado para a aquisição de dados deve ser capaz de operar neste modo.

## 6.4 – Sistema de Comando

A porta paralela funcionando no modo EPP, possui apenas 4 bits de controle (saída), criando deste modo uma dificuldade para controlar todo sistema, pois o sistema precisa de pelo menos 10 bits para funcionar corretamente. Para contornar este “problema” inserimos um sistema de controle no qual fazem parte um *latch* e um demultiplexador (decodificador) de quatro entradas e dezesseis saídas (4-16), possibilitando que o sistema passe de 4 bits de controle para 16bits, o suficiente para controlar o sistema.

A utilização do *latch* no sistema de comando serve para evitar que uma saída seja acionada acidentalmente devido às rápidas mudanças no nível lógico na saída da porta paralela.

O controle é feito através do programa de computador que com a devida lógica de comando, aciona as entradas do decodificador. O sistema de comando pode ser melhor visualizado no diagrama de blocos da figura 6.10 e no esquema de ligação mostrado na Figura 6.11.

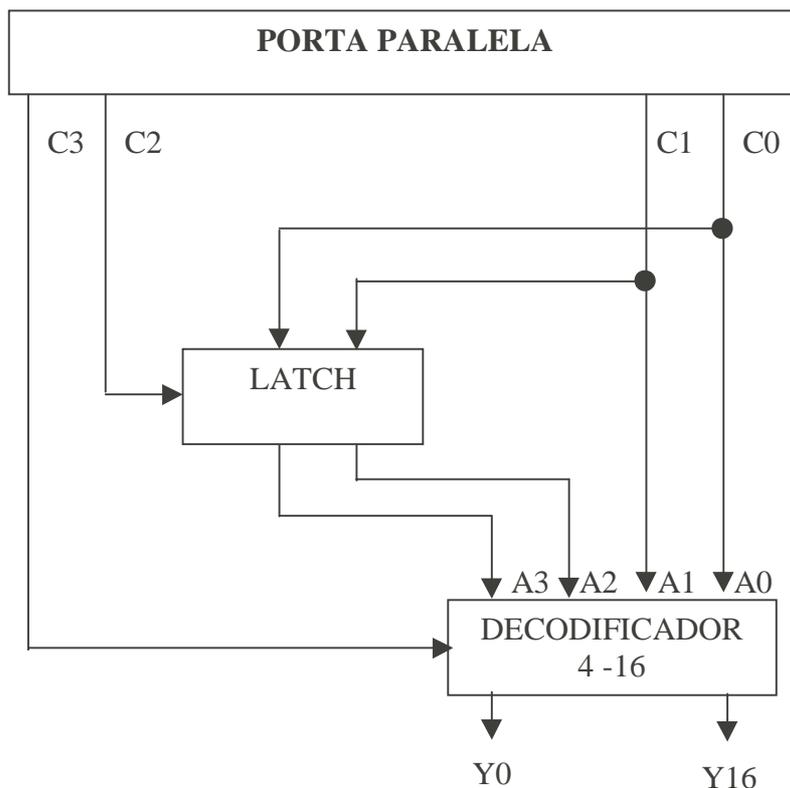


Figura 6.10 – Diagrama de blocos do sistema de comando.

A função dos pinos do decodificador pode ser visto tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Função dos pinos do decodificador

PINO NOME	PINO Nº	FUNÇÃO
LE	01	Conectado na Alimentação
A0	02	Entrada de dados
A1	03	Entrada de dados
Y7	04	Habilita leitura do Amostrador 06
Y6	05	Habilita leitura do Amostrador 05
Y5	06	Habilita leitura do Amostrador 04
Y4	07	Habilita leitura do Amostrador 03
Y3	08	Habilita leitura do Amostrador 02
Y1	09	Zera contador 01
Y2	10	Habilita leitura do Amostrador 01
Y0	11	Fazem amostragem do sistema
GND	12	Conectado ao terra
Y13	13	Zera contador 02
Y12	14	Zera contador 03
Y15	15	Zera contador 04
Y14	16	Saída não utilizada
Y9	17	Habilita leitura do Amostrador 08
Y8	18	Habilita leitura do Amostrador 07
Y11	19	Saída não utilizada
Y10	20	Saída não utilizada
A2	21	Entrada de dados conectado ao Latch
A3	22	Entrada de dados conectado ao Latch
E	23	Habilita saídas do decodificador
VCC	24	Alimentação do decodificador (5V)

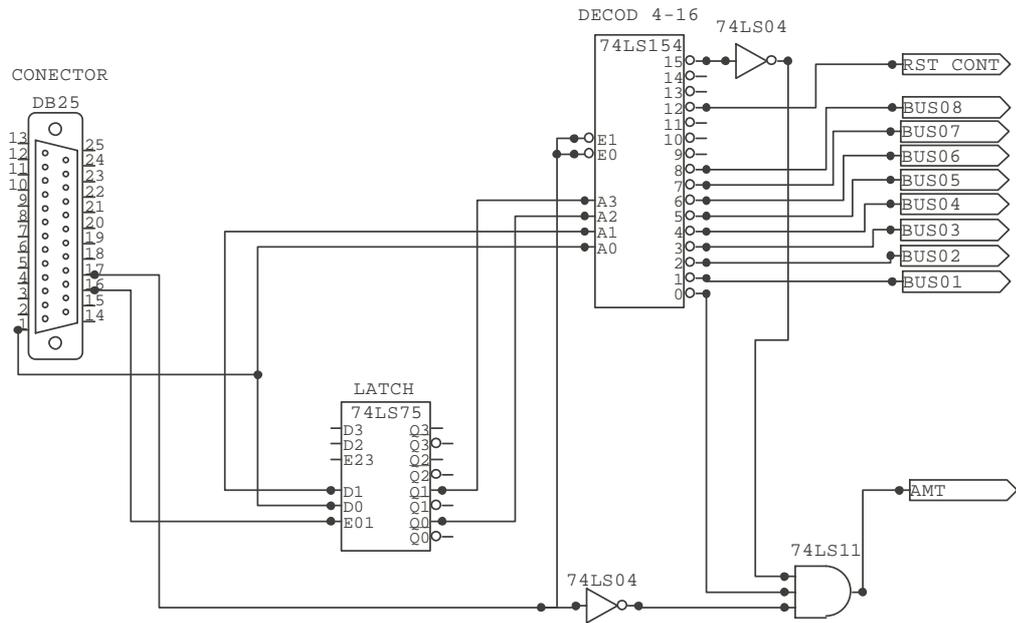


Figura 6.11 – Esquema de ligação do sistema de comando

#### 6.4.1 – Funcionamento do sistema de comando

Como dito anteriormente, a utilização do latch no sistema de controle, evita que uma saída do decodificador seja acionada acidentalmente pelo chaveamento errado da porta paralela.

O diagrama temporal do acionamento de uma saída do decodificador pode ser visto na figura 6.12.

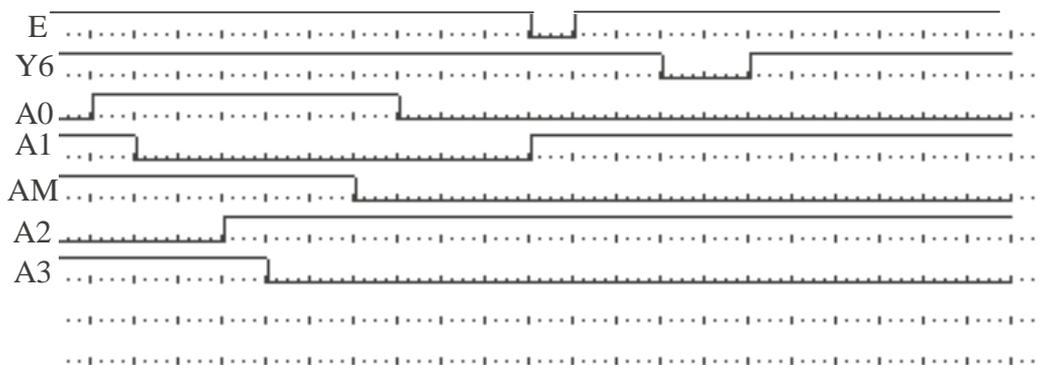


Figura 6.12 – Acionamento de uma saída do decodificador. E - Habilita saídas do decodificador; Y6 – Saída acionada; A0,A1,A2,A3 – Entrada de dados do decodificador; AM – Amostragem do latch.

## Capítulo 7 - Programa para Aquisição de Dados

O programa (*software*) de aquisição de dados, é o responsável pela aquisição de dados (diretamente da porta paralela para o computador), pela sua organização, utilização e armazenamento.

Os dados adquiridos devem ser condicionados, convertidos em unidades de engenharia adequados e armazenados em planilhas, arquivos de texto ou em um banco de dados operacional.

O software utilizado para todo o controle e aquisição dos dados do sistema é o Delphi, cuja linguagem de programação orientada a objeto é aplicável ao desenvolvimento do programa de contagem de pulsos, onde suas características são:

- Alta velocidade na apresentação dos dados
- Interface de comando através da porta paralela de fácil configuração
- Compartilhamento de Planilhas e arquivos de texto.
- Possibilidade de monitoração dos dados em tempo real
- Facilidade de Programação com interface voltada a objeto.
- Compatível com a linguagem Assembly

### 7.1 – Funcionamento

O programa principal que controla todo o sistema de aquisição dos dados, pode ser dividido em 3 partes principais: Inicialização, Rotina Principal e Subrotinas.

A inicialização é feita toda vez que o sistema é ativado, e visa preparar o hardware e estabelecer todos os requisitos para o correto funcionamento do programa

A rotina principal é o agrupamento dos comandos que funcionam continuamente de forma a permitir ao computador ler as informações analógicas passadas ao sistema de aquisição de dados.

As subrotinas são grupos de instruções que além de permitir a realização de certas tarefas, simplificando a rotina principal, funcionam como uma área de armazenagem de pequenos programas dentro do programa principal.

A lógica do programa de aquisição de dados poder ser visualizada no fluxograma da figura 7.1.

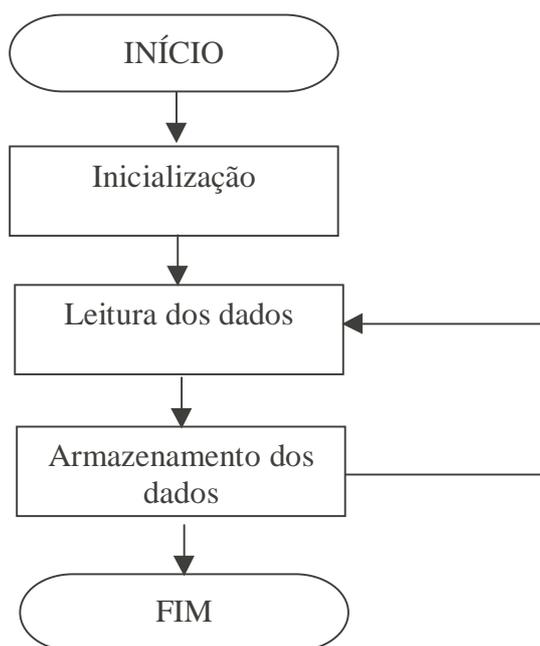


Figura 7.1 – Fluxograma do Programa de aquisição de dados

## 7.2 – Inicialização do Programa

Conforme dito anteriormente, a inicialização é a parte do programa responsável por preparar o *hardware* e estabelecer todos os requisitos para que o sistema de contagem funcione corretamente.

### 7.2.1 – Rotina de Inicialização

A rotina de inicialização do programa prepara o micro e os diversos componentes para a rotina principal, isto é feito definindo alguns valores para componentes específicos, que serão restaurados toda vez que o programa for inicializado.

As condições iniciais dos componentes podem ser vistas na tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Condições iniciais do sistema

Componente	Pino N°	Pino Função	Estado Inicial	Status
Contadores	01	Reset	L (baixo)	Contadores Zerados
Amostradores	09	Amostragem	H (alto)	Entrada = Saída
Amostradores	01	Tri-State	H (alto)	Saídas em alta impedância
Decodificador	14	Habilitar	L (baixo)	Saída desabilitada

### 7.2.2 – Fluxograma da inicialização

O fluxograma da rotina da inicialização do sistema pode ser visto na Figura 7.2.

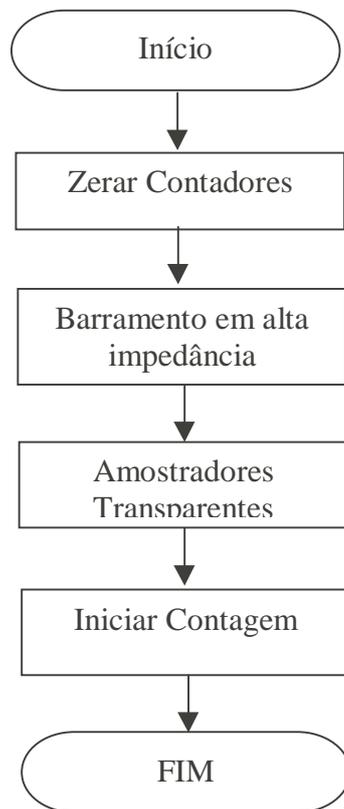


Figura 7.2. – Fluxograma da rotina de inicialização

### 7.2.3 – Subrotina “Zerar Contadores”

O objetivo desta rotina é garantir que todos os contadores iniciem a contagem do zero quando o programa for iniciado.

### 7.2.4 – Subrotina “Barramento em Alta Impedância”

Esta subrotina faz com que o barramento de dados do sistema fique no estado de alta impedância, fazendo com que nenhum dado possa ser lido.

### 7.2.5 – Subrotina “Amostradores transparentes”

Nesta subrotina todos os amostradores são colocados no modo transparente, isto é, sua saída de dados fica igual a entrada.

### 7.2.6 – Subrotina “Iniciar Contagem”

Esta subrotina habilita todos os contadores para a contagem, isto é, os contadores ficam prontos para contar os pulsos provenientes dos discriminadores.

## 7.3 – Leitura dos Dados

A leitura dos dados é o objetivo maior do programa, com a leitura poderemos visualizar a contagem de todos os pulsos do sistema e verificar o seu funcionamento.

### 7.3.1 – Rotina de leitura de dados

A rotina de leitura de dados, habilita a porta paralela, para que ela possa ler continuamente os dados armazenados pelos amostradores. Esta rotina pode ser dividida em três partes: amostragem, habilitação do barramento e leitura dos dados.

### 7.3.2 – Fluxograma de leitura de dados.

O fluxograma da rotina de leitura de dados pode ser visto na Figura 7.3

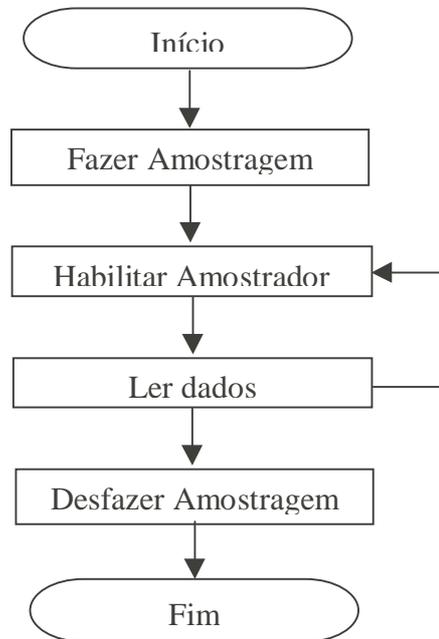


Figura 7.3 – Fluxograma da rotina de leitura de dados

### 7.3.3 – Subrotina “Fazer Amostragem”

Esta subrotina envia um comando para os amostradores que “amostra” a contagem dos pulsos, possibilitando que as leituras de todos os canais seja feita no mesmo instante de tempo.

### 7.3.4 – Subrotina “Habilitar Amostrador”

Esta subrotina habilita os amostradores um a um para que o computador possa ler seus dados amostrados através do barramento.

### 7.3.5 – Subrotina “Ler Dados”

Após a habilitação de cada amostrador esta subrotina lê seus dados amostrados e atribui este valor a uma variável do programa.

### 7.3.6 – Subrotina “Desfazer Amostragem”

Quando todos os amostradores tiverem sido habilitados e lidos, esta subrotina desfaz a amostragem do sistema para que a rotina de leitura dos dados possa se repetir.

## 7.4 – Armazenamento de Dados

Este programa se dá ao trabalho de ler os dados do sistema, armazená-los em variáveis temporárias, disponibilizá-los na tela, e gerar arquivos em modo texto (txt) fazendo uma base de dados para o sistema de contagem.

Através de utilização de planilhas de cálculos, como por exemplo o MS-Excel, podemos facilmente tratar estes dados gravados, gerar gráficos, planilha de dados e interpretar a performance do sistema.

## 7.5 – Condicionamento dos Dados

Depois da execução da rotina de leitura dos dados, os mesmos precisam ser condicionados, isto é, eles precisam ser convertidos em um formato de engenharia adequado visando facilitar a sua visualização e o seu armazenamento. Além disto, eles também precisam ser ajustados de modo a garantir uma contagem correta de todos os canais.

### 7.5.1 – Conversão dos dados

Ao final de cada ciclo de leitura de um canal, o sistema armazena em variáveis temporárias dois número de 8 bits. Entretanto desejamos que o programa nos forneça apenas números de 16bits. Para isso implementamos uma subrotina que converte os dois números de 8 bits de cada canal em números de 16 bits, assim, no final da subrotina teremos um número de 16bits para cada canal.

#### 7.5.1.1 – Subrotina “Conversão dos Dados”

Para transformar todas as duas leituras de 8bits, em um único número de 16 bits, procedemos da seguinte maneira.

Primeiramente, lemos os dois números de 8 bits nomeando-os de C1a (contagem dos bits menos significativos ), C1b (contagem dos bits mais significativos ), em seguida transformamos as contagens C1a e C1b em um único número de 16bits através do seguinte cálculo,

$$C1=((C1b \times 256) + C1a)$$

Portanto, C1 receberá a contagem do C1a e do C1b, transformando dois números de 8 bits e um único número de 16bits.

É importante ressaltar que este cálculo é realizado para as contagens dos outros canais.

#### 7.5.2 – Ajuste dos dados

Conforme visto no capítulo 5, os discriminadores geram um pulso na saída, toda vez que a tensão de entrada ultrapasse o valor da tensão referencial. Entretanto, quando um pulso é gerado em um canal com um determinado valor de tensão de referência, um pulso também será gerado em um canal com valor de tensão de referência menor, pois a tensão de entrada ultrapassará a tensão de referência em ambos os discriminadores. Este efeito, acarreta uma contagem errada nos contadores, pois o pulso gerado de entrada, é referente apenas a um canal e ele acaba atingindo além deste canal, o canal com valor de referência menor. Para que estas contagens equivocadas não aconteçam, implementamos uma subrotina no programa que elimina os pulsos contados indevidamente.

##### 7.5.2.1 – Subrotina “Ajuste dos Dados”

Sabemos que o sinal com maior taxa de discriminação é o canal que apresenta a menor tensão de referência, pois ele detecta o pulso discriminado por todos os outros discriminadores, deste modo, podemos deduzir a seguinte relação entre a tensão de referência e a taxa de discriminação:

Tensão de Referência: Canal4>Canal3>Canal2>Canal1

Taxa de discriminação: Canal1>Canal2>Canal3>Canal4

Portanto, quanto maior a tensão de referência menor será a taxa de discriminação em relação aos outros discriminadores.

Assim, podemos concluir que na contagem dos pulsos do Canal1, estarão incluídos os pulsos do Canal2, Canal3 e Canal4.

Concluimos então que para saber a quantidade de pulsos discriminados em um determinado canal, temos que subtrair a quantidade de pulsos discriminados em todos os canais com tensão de referência maior.

## 7.6 – Rotina de Comando

Conforme visto anteriormente no capítulo 6, os dispositivos do sistema são comandados através das saídas do decodificador que faz parte do sistema de controle. a rotina de comando aciona uma determinada porta do decodificador conforme o fluxograma da Figura 7.4

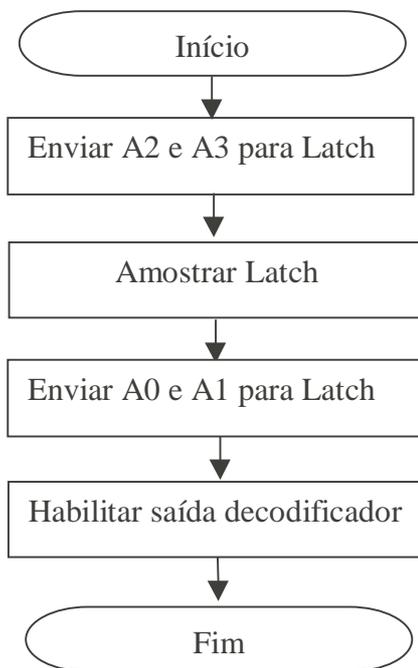


Figura 7.4 – Fluxograma da rotina de comando

## Capítulo 8 – Ensaio e Testes

Neste capítulo apresentaremos os ensaios e testes realizados com todos os módulos do sistema. Para a realização destes ensaios, utilizamos o laboratório de engenharia elétrica e seus equipamentos.

### 8.1 – Ensaio com o Pré-amplificador

O objetivo deste ensaio foi visualizar a resposta do pré-amplificador a aplicação de pulsos provenientes de um gerador de funções.

O pré-amplificador foi testado com uma ampla banda de frequências (1 a 10 MHz) e várias formas de pulsos (triangular, senoidal, quadrada), respondendo com estabilidade a todos os testes.

As figuras 8.1, 8.2 e 8.3 mostram alguns dos testes realizados com o pré-amplificador.

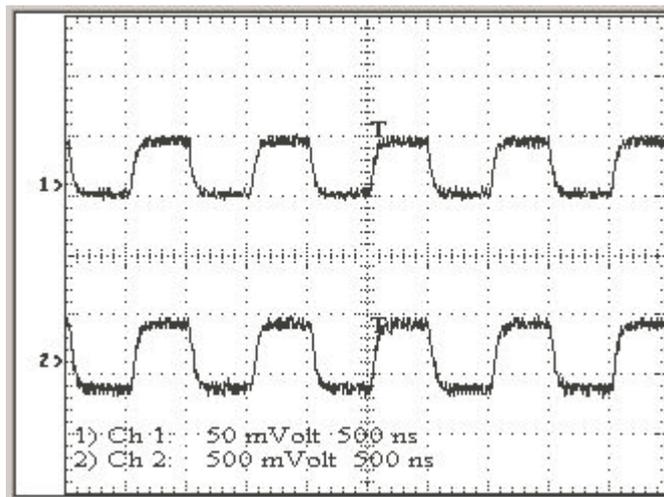


Figura 8.1 – Resposta do Pré-amplificador a pulsos de onda quadrada com a chave na posição de ganho 10.

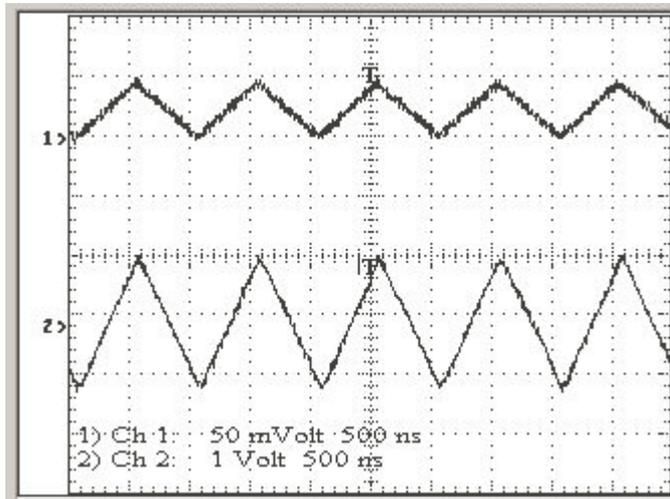


Figura 8.2 - Resposta do Pré-amplificador a pulsos de onda triangular com a chave na posição de ganho 50.

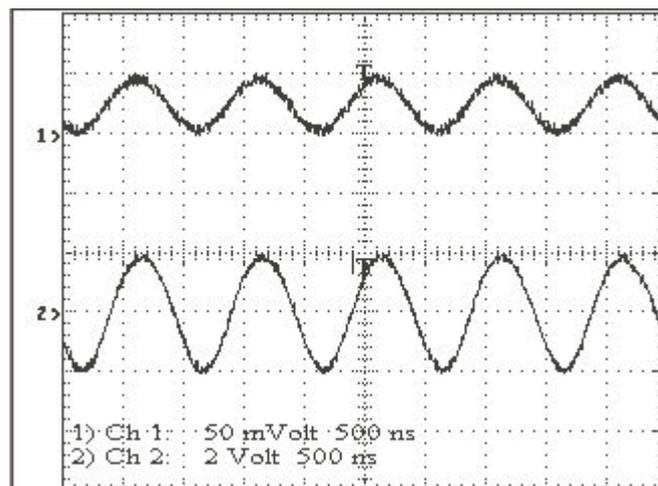


Figura 8.3 – Resposta do pré-amplificador a pulsos de onda senoidal com a chave na posição de ganho 100.

## 8.2 – Ensaio com o Comparador

O objetivo deste ensaio foi visualizar a resposta do comparador a pulsos provenientes de um gerador de função e fonte radioativa. Para os testes com o gerador de pulsos foram utilizadas várias frequências (0 a 10MHz) e formas de pulsos (triangular, senoidal e quadrada).

As figuras abaixo mostram alguns resultados obtidos com os comparadores, a frequência utilizada para os testes foi de 1MHz.

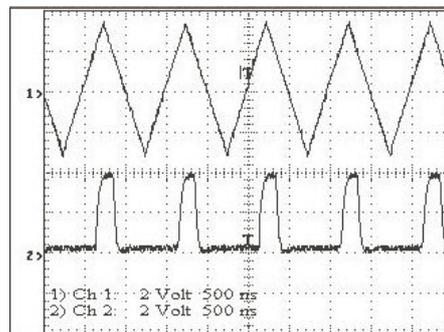


Figura 8.4 – Resposta do comparador a uma onda triangular com  $V_{Ref} = 2 \text{ V}$ .

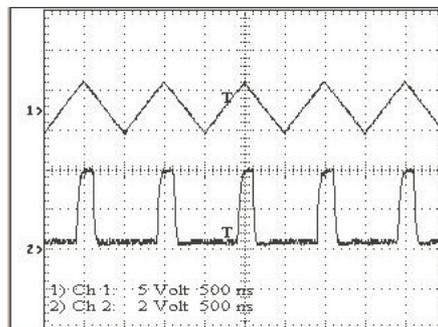


Figura 8.5 – Resposta do comparador a uma onda triangular com  $V_{Ref} = 1,5 \text{ V}$ .

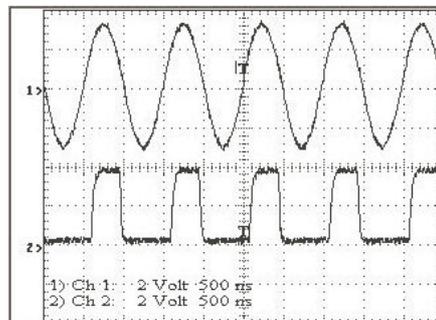


Figura 8.6 – Resposta do comparador a uma onda senoidal com  $V_{Ref} = 1,5 \text{ V}$ .

Durante os testes com os comparadores, utilizamos vários integrados diferentes visando encontrar o comparador que apresentasse o melhor desempenho. A tabela 8.1 apresenta um resumo dos comparadores testados, com os resultados obtidos.

Tabela 8.1 – Resumo do desempenho dos comparadores

COMPARADOR	FABRICANTE	RESULTADOS
TL714C, TL3016, TL3116, AD790	Texas Instruments	Resultados insatisfatórios, comparação diferente em transições positivas e negativas, provocando oscilações nas contagens.
AD8561	Analog Devices	Resultado superior aos comparadores da Texas, entretanto também apresentou resultados insatisfatórios, provocando oscilações no circuito digital para transições lentas
MAX 313	Maxim	Apresentou uma melhora significativa no sinal comparado em relação ao outros comparadores, reduziu os problemas com os comparadores, apresentando problemas na comparação de pulsos lentos
MAX 909	Maxim	Melhor desempenho entre todos os comparadores testados, foi o comparador escolhido para o protótipo, praticamente eliminou as oscilações durante as transições e reduziu o nível de ruído.

### 8.3 – Teste dos Contadores

O objetivo deste ensaio foi verificar a resposta do sistema de contagem a pulsos provenientes do gerador de funções.

Foram realizados vários testes com diversas faixas de frequência. A tabela 8.1 demonstra as contagens obtidas durante um tempo de 10 segundos para três faixas de frequência.

Tabela 8.1 – Teste dos contadores com

Frequência *	Contagem contador01	Contagem contador 02	Contagem contador 03	Contagem contador 04
100kHz	1006857	1006857	1006857	1006857
500kHz	5046213	5046213	5046213	5046213
1000kHz	10077314	10077314	10077314	10077314

- A frequência do clock está aproximada, pois durante os testes a frequência não era estável.

Um outro teste realizado com os contadores, foi a comparação do desempenho dos nossos contadores com o contador da Micronal existente no laboratório de física. Para esta comparação, conectamos nossos contadores junto com o contador da Micronal, e marcamos as contagens durante um intervalo pré-definido de tempo. O resultado obtido com este teste pode ser visto na Figura 8.4

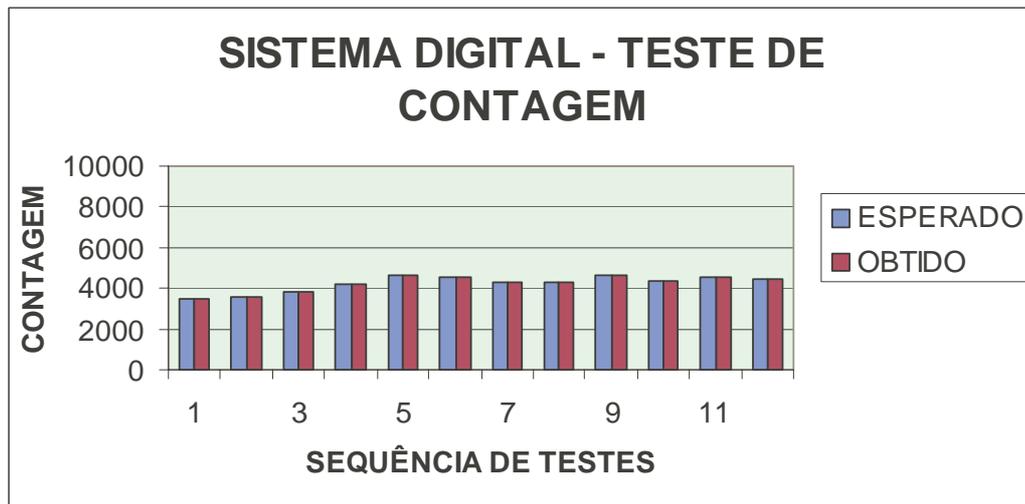


Figura 8.7 – Teste de desempenho dos contadores

## CONCLUSÃO

Neste projeto foi desenvolvido, construído e testado um sistema que faz o processamento e o registro de pulsos analógicos de alta velocidade provenientes de detectores de radiação. Este sistema é composto por um pré-amplificador rápido, quatro canais de discriminadores de tensão, um circuito digital de aquisição de dados com quatro canais de contadores de 16 bits e um programa para a aquisição dos dados que é executado em um computador pessoal (PC).

Em testes em laboratório o pré-amplificador respondeu com sucesso a diversos sinais de frequências (1~10MHz). Deve-se ressaltar, que o projeto do pré-amplificador foi feito para sinais pulsados não periódicos equivalentes a sinais de frequências muito acima de 1MHz. Entretanto não foi possível verificar as características de operação do pré-amplificador em frequências maiores por não possuímos instrumentação adequada.

O circuito digital combina circuitos integrados de diversas famílias lógicas. Verificou-se que os contadores realizaram contagens de pulsos na faixa de frequência considerada com sucesso, conforme se poderia esperar. Durante os testes dos contadores, tentamos localizar um possível problema na contagem que poderia ser causado pelos amostradores, isto é, caso o sistema fizesse a amostragem de um pulso em um mesmo instante em que o pulso estivesse transicionando, a contagem poderia acontecer de forma equivocada. Entretanto durante todos os testes este fenômeno não ocorreu.

Observamos ao longo do desenvolvimento do projeto que os comparadores foram o maior desafio em nosso projeto de graduação. Em projetos de circuitos de alta velocidade o ruído e os elementos parasitas se tornam os principais problemas nos testes dos protótipos. Deste modo, fizemos o possível para que esses problemas não interferissem significativamente no funcionamento do circuito. Com a substituição do comparador AD8651 pelo comparador MAX909, conseguimos praticamente eliminar as oscilações que estavam ocorrendo durante as transições dos pulsos, e também reduzir o nível de ruído. Entretanto, para que o ruído em projetos de alta frequência seja atenuado é necessário identificar as fontes de ruído. Isto, requer a utilização de equipamentos adequados como, por exemplo, osciloscópios com ampla banda passante. Infelizmente, só tínhamos acesso a equipamentos cujos limites de largura de banda passante (60MHz) são insuficientes para

que se possa investigar todos esses fenômenos. Tendo em vista estas limitações, nosso protótipo alcançou o melhor desempenho que pudemos obter através do uso da instrumentação disponível. Assim sendo, sugere-se que o aperfeiçoamento do desempenho dos circuitos comparadores em altas frequências seja uma linha de continuação deste trabalho.

Este projeto nos mostrou que a área de instrumentação nuclear é bastante vasta, envolvendo fenômenos até então desconhecidos para nós. Apesar de algumas limitações práticas, conseguimos aplicar diversos conhecimentos obtidos ao longo do curso de graduação para o desenvolvimento de um sistema que servirá de motivação para o surgimento de outros projetos no futuro.

### **Melhorias para o futuro**

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de instrumentação nuclear, o que foi cumprido com sucesso apesar de algumas limitações na instrumentação utilizada que resultaram num desempenho inferior ao esperado. Entretanto, como se trata de um sistema complexo, onde vários ramos da eletrônica foram abordados, algumas partes do sistema ficaram abertas à melhorias futuras.

Em relação aos circuitos digitais, uma evolução interessante, seria o uso de FPGA (*field programmable gate array*) em substituição aos contadores, amostradores e outros circuitos integrados de famílias lógicas convencionais que foram utilizados. O FPGA diminuiria as interconexões do circuito que atualmente são realizadas com fios, assim a montagem seria simplificada. Além disso, o uso do FPGA possibilitaria mais flexibilidade para a alteração da configuração do circuito. A melhoria do software também é uma boa opção para que o sistema possa evitar uma contagem equivocada, causada por um possível erro de amostragem.

Uma outra melhoria interessante seria a tentativa de eliminação dos ruídos exibidos pelos comparadores descritos no capítulo 8. Deve-se enfatizar que isto irá requerer instrumentação mais adequada.

## **BIBLIOGRAFIA**

- G.F. Knoll (1989), Radiation Detection and Measurement, second ed. (J. Wiley & Sons)
- A. Santoro, J.Barreto e M.Vaz (1999), Introdução à Instrumentação(CBPF)
- P. Horowitz and W.Hill (1983), The Art of Electronics, second ed. (Cambridge University Press)
- EGG-Ortec (91/92)– Catálogo Detectors and Instruments
- R. Tocci and N. Widmer(2000), Sistemas Digitais Princípios e Aplicações, sétima ed.(Prentice Hall)
- D. YU. Akimov, YU. K. Akimov, A. A. Bogdzal, A. G. Kovalenko,D. V. Matveev, Instruments and Experimental Techniques (vol. 45, nº2, 2002), A Low-Noise Fast Eight-Channel Preamplifier
- R. Zelenovsky(1999), Hardware e Interfaceamento, segunda ed.(MZ)

## APÊNDICE A – GUIA DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO

Este apêndice tem como objetivo, ensinar como o usuário deverá proceder na utilização do programa de aquisição de dados.

A figura A1 mostra a tela do programa de aquisição de dados

The screenshot shows a software window titled 'Form1' with a light blue background. At the top left, the time '03:07:20' is displayed. The main title is 'Sistema de Registro e Contagem de Pulsos' in blue text, with a 'Sair' button on the right. Below the title, there are two main sections: 'Cont. Livre' and 'Cont. Tempo'. The 'Cont. Tempo' section includes a 'Final da contagem às' label and a time input field '(hh:mm:ss)'. There are also buttons for 'Zerar' and 'Cont. Discriminada'. The interface is divided into four channels: 'CANAL 01', 'CANAL 02', 'CANAL 03', and 'CANAL 04'. Each channel has an 'AUTO' button and three input fields. At the bottom right, the text 'Armazenando dados 5' is visible.

Figura A1 – Tela de aquisição de dados

Contagem Livre – Neste método a contagem se processa por tempo indeterminado, parando apenas quando o usuário acionar a tecla zerar.

Cont. Tempo – Neste método, o usuário deverá primeiro estipular o intervalo de tempo a ser contado, preenchendo o campo logo abaixo da tecla Cont.Tempo. O sistema irá contar durante o intervalo de tempo estipulado, parando automaticamente ao término do tempo.

Cont.Discriminada – Neste método a contagem se procede da mesma forma que o Cont.Tempo, a única diferença é que a contagem é discriminada, isto é, o programa automaticamente faz as subtrações dos nível de cada canal.

Auto – Neste método a contagem acontece apenas com um canal por vez, mostrando além da contagem, os bits mais e menos significativos de cada canal, este método de contagem é muito útil para se descobrir uma possível falha em algum integrado.

#### Armazenamento de dados

Durante as contagens, um arquivo texto é gerado (c:\log.txt), com todas as contagens que estão ocorrendo. O número ao lado da mensagem “armazenando dados” mostra a quantidade de amostras que estão sendo geradas no arquivo log.txt.

## APÊNDICE B - PORTA PARALELA X COMANDOS NO DELPHI

A tabela A mostra os valores atribuídos aos pinos e o nível lógico presente na sua saída, os controles a serem acionados por estas saídas, foram vistos no capítulo 6.

Os pinos C5 e C4 são internos ao computador, a função destes pinos é habilitar o modo EPP (bidirecional) da porta paralela. O pinos C3,C1 e C0 da saída são ativos em zero, isto é, para colocarmos em nível lógico 1, temos que enviar um comando 0.

Tabela B.1 –Comandos X Nível na Saída

COMANDOS NO DELPHI								NÍVEL LÓGICO NA SAÍDA					
BINÁRIO						Dec	Hex	Internos		Pinos Externos			
C5	C4	C3	C2	C1	C0			C5	C4	C3	C2	C1	C0
1	0	0	0	0	0	32	<b>20</b>	1	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1	43	<b>2B</b>	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	42	<b>2A</b>	1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	41	<b>29</b>	1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	0	40	<b>28</b>	1	0	0	0	1	1
1	0	1	1	1	1	39	<b>27</b>	1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0	46	<b>2E</b>	1	0	0	1	0	1
1	0	1	1	0	1	37	<b>25</b>	1	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	36	<b>2C</b>	1	0	0	1	1	1
1	0	0	0	1	1	35	<b>23</b>	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	34	<b>22</b>	1	0	1	0	0	1
1	0	0	0	0	1	33	<b>21</b>	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	32	<b>20</b>	1	0	1	0	1	1
1	0	0	1	1	1	39	<b>27</b>	1	0	1	1	0	0
1	0	0	1	1	0	38	<b>26</b>	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	0	1	37	<b>25</b>	1	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	0	36	<b>24</b>	1	0	1	1	1	1