



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**DESENVOLVIMENTO DE CONJUNTO DETECTOR
CINTILADOR COM SISTEMA DE CONTAGENS E
AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIDAS DE VAZÃO
UTILIZANDO TRAÇADORES RADIOATIVOS**

FÁBIO EDUARDO DA COSTA

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

**Orientadora:
Dra. Margarida Mizue Hamada**

**São Paulo
2001**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE CONJUNTO DETECTOR CINTILADOR COM
SISTEMA DE CONTAGENS E AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIDAS DE
VAZÃO UTILIZANDO TRAÇADORES RADIOATIVOS**

FÁBIO EDUARDO DA COSTA



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

Orientadora:

Dra. Margarida Mizue Hamada

São Paulo

2001

A minha avó Paula “ in memorian” e a minha mãe Meire pela capacidade de luta dessas mulheres.

A meu pai Américo “ in memorian” que nas suas limitações ensinou-me a viver transpondo barreiras.

E a minha esposa Patrícia que é o meu presente e meu futuro.

Um trabalho é como uma vida, muitos por ela passam, uns ficam e outros vão, mas todos fizeram parte dessa vida. Aqui ficam meus agradecimentos a todas essas pessoas.

À Dra Margarida Mizue Hamada pela orientação, amizade e todo incentivo nesta empreitada.

Ao Eng. Paulo Roberto Relá por todo incentivo e amizade.

Ao Dr. Roberto Fúlfaro, ao Físico Wanderlei de Lima e ao Eng. José Mauro Vieira por todo apoio para que eu obtivesse meu título de mestre.

A Msc. Maria da Conceição Costa Pereira pelos cristais utilizados neste trabalho.

Ao grupo de hidrologia do Centro de Tecnologia das Radiações nas pessoas do Msc. Pedro Aoki, Edmilson Bambalas, Valdir Cosmos e Wilson Bruzinga cuja dedicação e boa vontade permitiram a validação deste trabalho.

Ao Dr. Carlos Henrique de Mesquita pelo incentivo e discussões.

Ao Dr. Edy Segura Pino pelas sugestões e correções no trabalho.

Ao Msc. Hector Carlos Camilo Rocca pelas sugestões e amizade.

A todos os amigos do Centro de Tecnologia das Radiações que direta ou indiretamente tornaram possível este trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade.

DESENVOLVIMENTO DE CONJUNTO DETECTOR CINTILADOR COM SISTEMA DE CONTAGENS E AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIDAS DE VAZÃO UTILIZANDO TRAÇADORES RADIOATIVOS

Fábio Eduardo da Costa

RESUMO

A metodologia do uso de radiotraçadores é indicada para medidas de vazão em líquidos ou gases em plantas de processos industriais, permitindo a avaliação sem comprometer o sistema, interromper a produção ou introduzir derivações nos sistemas hidráulicos. A instrumentação nuclear oferece a vantagem de permitir que as investigações sejam feitas através das paredes das tubulações, sem contato físico e sem movimentos mecânicos. Neste trabalho foi desenvolvido um conjunto de detectores e contador portátil com sistema de aquisição de dados para medidas de vazão usando a técnica de velocidade de pulso. Esta técnica consiste em determinar o tempo de trânsito do traçador homogeneamente misturado ao líquido ou gás da tubulação. O conjunto compreende: a) dois cristais de CsI(Tl) constituindo os meios detectores, associados a fotodiodos de silício tipo PIN; b) unidade de amplificação e processamento de sinal; c) interface análogo digital, com contadores separados para os dois detectores mas com o mesmo eixo temporal amostrando as contagens em tempo real na tela do computador e d) disponibilidade de utilizar cabos coaxiais de 30 metros de comprimento dos detectores à unidade de amplificação e processamento de sinal. O equipamento preencheu a limitação existente principalmente em eventos de curta duração em processos com alta velocidade de trânsito. Este trabalho deu especial atenção ao desempenho do cristal de CsI(Tl), fotodiodo e eletrônica associada, no intuito de adequar o projeto às necessidades do trabalho.

**DEVELOPMENT OF A SCINTILLATOR DETECTOR SET WITH COUNTER
AND DATA ACQUISITION FOR FLOW MEASUREMENTS USING
RADIOACTIVE TRACERS**

Fábio Eduardo da Costa

ABSTRACT

The radiotracer methodology is suitable for flow measurements of liquids or gases in industrial plants process, since it enables the evaluation without compromising the system, interrupting the production or introducing derivations in the hydraulic systems. The nuclear instrumentation offers the advantage of allowing the investigations to be done without physical contact, mechanical movement and even through pipeline walls. In this work, a portable counter with a data acquisition system for flow measurements was developed, using the pulse velocity technique. This consists in determining the tracer transit time mixed homogeneously with the liquids or gases pipeline. The set comprises: a) two CsI(Tl) crystals as detection material, associated with Si PIN photodiodes; b) an amplification and pulse shaping unit; c) an analog-digital interface, which processes and displays the detectors counting separately and in the real time, but in a same temporal axis, via a computer screen and d) 30-meter coaxial cables for signals transmission from each detector to the processing unit. The equipment overcame the existing limitation, mainly in events of a short duration, in high speed processes. This work gave special attention to the crystal, photodiode and associated electronic characterizations.

SUMÁRIO

	Página
1 - INTRODUÇÃO	1
1.0 – <i>Aspectos gerais</i>	1
1.1 – <i>Medida de vazão por velocidade de pulso</i>	5
1.2 – <i>Aplicabilidade</i>	8
1.3 – <i>Objetivo do trabalho</i>	9
1.4 – <i>Considerações preliminares na elaboração do trabalho</i>	9
1.4.1 - Características do conjunto de detectores para aquisição de dados em pontos remotos.....	9
1.4.2 - Velocidade de processamento.....	12
1.4.3 - Tratamento de dados no próprio local dos ensaios.....	13
1.4.4 - Total portabilidade.....	13
1.4.5 - Distância entre detectores	14
2 – CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	15
2.1 – <i>A radiação gama</i>	15
2.2 - <i>Interação da radiação com a matéria</i>	17
2.3 - <i>Modelo de bandas de energia</i>	21
2.4 - <i>Cristais cintiladores</i>	23
2.5 – <i>Altura de pulso</i>	24
2.6 - <i>Fotodiodo</i>	25
2.7 – <i>Pré-amplificador</i>	28
2.8 – <i>Conformação do sinal, controle de supressão, amplificação e acoplamento óptico</i>	33
2.8.1 – Conformação do sinal	33
2.8.2 – Controle de supressão	36
2.8.3 – Amplificação e acoplamento óptico.....	37
2.9 – <i>Contador de pulsos</i>	39

3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 - <i>Introdução.....</i>	41
3.2 - <i>Crescimento dos cristais de CsI(Tl).....</i>	42
3.3 - <i>Estudo das características espectroscópicas – Espectro de emissão.....</i>	42
3.4 - <i>Estudo das características espectroscópicas – Altura de pulso.....</i>	43
3.5 - <i>Estudo das características espectroscópicas – Tempo de decaimento de luminescência.....</i>	45
3.6 - <i>Lapidação, polimento e montagem do conjunto fotodiodo e cristal de CsI(Tl)...</i>	46
3.7 - <i>Medida das capacitâncias dos fotodiodos em função da tensão reversa.....</i>	54
3.8 - <i>Pré-amplificadores.....</i>	56
3.9 - <i>Utilização de cabo coaxial convencional entre detectores e unidade de amplificação e processamento.....</i>	59
3.10 - <i>Unidade de amplificação e processamento de sinal.....</i>	60
3.11 - <i>Programa de comunicação, contagem e construção do gráfico de contagens pelo tempo.....</i>	62
3.12 - <i>Medida da dependência do número de contagens em função da largura de pulso do sinal dos detectores.....</i>	62
3.13 - <i>Medidas de eficiência de contagens absoluta no fotopico e eficiência absoluta total.....</i>	64
3.14 - <i>Obtenção do valor da mínima atividade detectável.....</i>	65
3.15 - <i>Utilização do equipamento desenvolvido em uma situação real na indústria.</i>	67
4 – RESULTADOS.....	69
4.1 - <i>Medidas do espectro de emissão luminosa.....</i>	69
4.2 - <i>Medidas de altura de pulso.....</i>	70
4.3 - <i>Tempo de decaimento de luminescência.....</i>	71
4.4 - <i>Medida das capacitâncias dos fotodiodos.....</i>	72
4.5 - <i>Características do conjunto detector.....</i>	73
4.5.1 - <i>Níveis de ruído associados aos tipos de acoplamento e grupo de fotodiodos utilizados.....</i>	73

4.5.2 – Características do conjunto fotodiodo, pré-amplificador e unidade de amplificação e processamento de sinal para a condição de melhor relação sinal-ruído	75
4.5.3 – Características do conjunto detector utilizando um cabo único para alimentação e sinal	77
4.5.4 – Resultado das medidas de eficiências absolutas total e no fotopico	79
4.5.5 – Mínima atividade detectável.....	81
4.6 – <i>Unidade de amplificação e processamento de sinal</i>	82
4.7 – <i>Programa de comunicação, contagem e construção do gráfico de contagens em função do tempo</i>	84
4.8 – <i>Resultados obtidos na validação do equipamento em uma situação real na indústria</i>	85
5 – DISCUSSÃO	88
6 – CONCLUSÕES	101
APÊNDICE	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1 - INTRODUÇÃO

1.0 – Aspectos gerais

A aplicação de radioisótopos na indústria como traçadores radioativos, teve seu início no fim da década de 40, incentivada pela disponibilidade de radionuclídeos serem produzidos por reatores nucleares, onde a primeira aplicação de grande porte foi na indústria petrolífera, em estudos de produção de petróleo ^[1].

A ferramenta oferecida pelos traçadores radioativos demonstrou ter um enorme potencial nos estudos das características operacionais e no diagnóstico de processos, por diminuir o tempo de paralisação da produção para obter os resultados desejados, e não alterar as condições de funcionamento, fornecendo informações precisas de parâmetros reais.

Paralelamente, como característica fundamental, a radiação emitida por um traçador radioativo, ou seja, pelo radioisótopo contido nele, não muda de comportamento por temperatura, pressão, viscosidade ou qualquer outro agente que possa afetar o material ao qual o traçador radioativo foi adicionado ^[2].

Atualmente, a utilização de traçadores radioativos na solução de problemas de engenharia é uma técnica bem estabelecida, mas em razão da sua versatilidade, tem estimulado estudos e implementações de novas aplicações potenciais de custo

relativamente baixo. Encontra-se na literatura um amplo estudo da metodologia desenvolvida no uso de traçadores em diferentes campos de aplicação [3,4,5,6].

Deve ser observado primeiramente que a escolha de materiais radioativos como traçadores em medidas de vazão são indicadas somente quando outros métodos [7,8] não forem satisfatórios. Estes outros métodos podem ser fluxômetros convencionais como tubos de Venturi, fluxômetros de palhetas ou fluxômetros por efeito Doppler entre algumas das possibilidades. Não sendo possível, existem métodos químicos como descarregar no fluxo a ser medido uma solução concentrada de sal e acompanhar sua concentração ou sua condutividade. Existem ainda métodos colorimétricos, onde um corante é injetado no fluxo e acompanhado para se inferir a vazão. Finalmente, se a resposta desses métodos não atenderem as expectativas, a utilização de radiotraçadores pode ser indicada.

Para implementação do uso de traçadores radioativos nas medidas de vazão em tubulações, diversos fatores são fundamentais, desde a escolha do traçador adequado até o sistema de medição.

As escolhas do radiotraçador, bem como detectores apropriados para cada tipo de estudo devem ser baseadas nas condições da experiência e no tipo de informação que se deseja obter [6,9]. As principais variáveis que devem ser consideradas são:

a) Tipo de radiação emitida, elemento e existência de carregador

O tipo de radiação mais adequado para aplicações industriais de traçadores é a radiação gama, que por ser uma radiação eletromagnética, tem a vantagem de maior penetrabilidade. Como consequência, muitas medições podem ser realizadas sem nenhuma

alteração das instalações e de forma contínua, uma vez que o detector pode ser colocado na parte externa da tubulação sem contato físico. Dessa forma o isótopo radioativo utilizado como radiotraçador deve ser um emissor gama e com uma energia suficiente para atravessar as paredes da tubulação e interagir com o detector.

Por sua vez, deve haver uma homogeneização do elemento ou composto químico que compõe o radiotraçador com o carregador, ou seja, o meio fluido no qual são feitos os ensaios, para assegurar que as condições assumidas no processo sejam verdadeiras ^[10].

b) Meia vida

Ao ser introduzido um traçador radioativo no fluido de uma linha industrial, sua remoção é uma condição necessária em razão da contaminação radioativa que pode gerar. Diante desta circunstância, a escolha da meia vida do radiotraçador leva em conta o tempo gasto desde a produção do radiotraçador até sua utilização, procurando conciliar estes tempos de forma que a atividade incorporada ao sistema no final do ensaio já esteja baixa e caminhe rapidamente para os valores encontrados no ambiente.

c) Sensibilidade de detecção

A sensibilidade de detecção está relacionada com o tipo e atividade do radiotraçador e com o detector utilizado. Vinculadas a esta condição de detecção existem medições do tipo amostragem e do tipo contínuas (“on-line”) ^[11]. Nas medições por amostragem, o sistema de injeção do radiotraçador tende a ser complexo, no entanto a sua detecção é mais simples. As medições por amostragem são também limitadas pelo tempo de aquisição da amostra e entre o intervalo de coleta das amostras, resultando em um processo que não é adequado para aplicar em eventos de curta duração. Para eventos de

curta duração, as medições contínuas são as mais indicadas e estas são utilizadas para monitorar a resposta de processos com injeções do radiotraçador de forma rápida no fluxo a ser investigado. Necessita de um sistema mais elaborado de medição, embora o dispositivo de injeção seja relativamente simples.

Em ambos os casos, os detectores cintiladores são os mais adequados por atenderem os compromissos de maior eficiência de contagem e menor “tempo morto”, permitindo que a atividade do radioisótopo presente no radiotraçador a ser injetado, possa ser escolhida sobre uma ampla gama de valores.

d) Aspectos dosimétricos

A taxa de exposição às radiações que os trabalhadores irão receber durante as medidas que utilizam traçadores radioativos constitui um fator limitante da quantidade de radiotraçador injetado na tubulação. Dessa forma, devem ser observadas as condições e procedimentos durante as medidas para que não sejam ultrapassadas as doses estipuladas para trabalhadores e pessoas do público. Estas condições devem ser asseguradas pelo treinamento adequado dos trabalhadores que manipulam radioisótopos de forma a minimizar o tempo de exposição ou evitar exposições desnecessárias e na medida do possível utilizar detectores de alta sensibilidade, como os detectores cintiladores, para que sejam utilizados radiotraçadores com baixas atividades.

Para trabalhadores, os limites de dose máximos admissíveis conforme norma CNEN ^[12] são 50 mSv/ano para o corpo inteiro e 500 mSv/ano para as mãos. O valor máximo permitido para as mãos foi citado por constituir a região do corpo que estará mais exposta, principalmente durante o procedimento de injeção do radiotraçador. A partir da

escolha adequada do radiotraçador e da atividade necessária ao trabalho, deverão ser calculadas as taxas de exposição que o trabalhador ficará sujeito desde a injeção do radiotraçador, assegurando que os valores da taxa de exposição estejam abaixo dos valores máximos permitidos.

1.1 – Medida de vazão por velocidade de pulso

Para medidas de vazão de líquidos ou gases nas plantas de processos industriais, deve ser utilizada uma metodologia que possibilite a avaliação destes valores sem comprometer o sistema, em alguns casos sem interromper a produção ou introduzir derivações nos sistemas hidráulicos. Do ponto de vista comercial, o uso mais freqüente de radiotraçadores na indústria é na medição de vazão. A técnica apresenta uma exatidão que é independente do perfil da velocidade do fluido na tubulação, dependendo apenas da eficiência da homogeneização do radioisótopo ao fluido ^[11].

Dentre as diversas metodologias de traçadores existentes ^[11,13,14], a técnica da velocidade de pulso, apresenta uma imediata aplicabilidade, utilizando o tempo de trânsito do traçador misturado ao líquido ou gás na tubulação. Este é inclusive, um método padrão utilizado para aferição de medidores de fluxo ^[15,16,17]. Esse método para realização de medidas de vazão, utilizando traçadores radioativos, consiste em instalar dois detectores sensíveis a radiação, separados por uma distância adequada, na parte externa da tubulação que transporta o fluido de vazão desconhecida. O traçador radioativo por sua vez é injetado rapidamente no fluxo, na forma de um pulso curto. O primeiro detector deve estar localizado a uma distância do ponto de injeção de forma que a distância percorrida até ele

assegure a homogeneização do radiotraçador ao meio. Nestas condições, com o radiotraçador bem misturado ao fluido e este preenchendo toda a seção da tubulação investigada, estará assegurado que sua velocidade será a mesma que a velocidade média do fluido em que foi adicionado ^[10].

Seguindo o processo, o primeiro detector registrará a passagem do radiotraçador em um primeiro ponto da tubulação onde a homogeneização obtida já satisfaz as condições exigidas pela técnica utilizada e transcorrido o tempo de trânsito deste fluido na tubulação, o segundo detector registrará a passagem deste mesmo radiotraçador em um segundo ponto. Conhecendo-se o intervalo de tempo da passagem do radiotraçador entre o primeiro e o segundo detector e as características da tubulação obtêm-se a vazão. Esta técnica é exemplificada de forma esquemática na Figura 1.1.

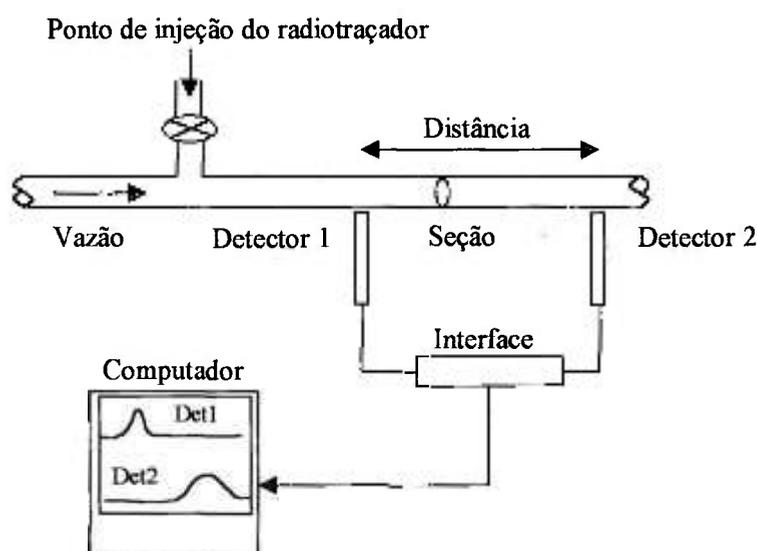


Figura 1.1 – Modelo esquemático para medição de vazão utilizando a técnica de velocidade de pulso com traçadores radioativos.

Da figura 1.1 temos como conhecidos os valores da distância entre detectores e a área da seção transversal da tubulação. Com o tempo entre pulsos inferidos na medição e o valor da distância teremos a velocidade do fluido e o produto desta pela seção nos dará o valor procurado da vazão, como na equação:

$$vazão = \frac{\text{distância}}{\text{tempo de trânsito}} \text{ seção}$$

O método de medição de tempo de trânsito com traçadores radioativos apresenta as seguintes vantagens ^[18]:

- a) O sistema de injeção é relativamente simples, onde não é necessário conhecer com precisão a atividade injetada;
- b) Apresenta resultado imediato;
- c) Não é necessária a manipulação do traçador depois da injeção;
- d) Os ensaios podem ser repetitivos, dando origem a uma boa estatística de medição;
- e) Somente um ponto de acesso ao sistema é necessário;
- f) Pode utilizar traçadores de vida curta o que atende os requisitos da proteção radiológica e do meio ambiente e
- g) Não é necessário manipular líquidos tóxicos ou perigosos.

Em contrapartida, existem as seguintes desvantagens ^[18]:

- a) Necessidade de autorização para aquisição e manipulação de materiais radioativos;

- b) Com radioisótopos de vida curta, sua utilização tem que ser programada para serem adquiridos e transportados até o local dos ensaios em tempos que não comprometam a atividade inicial desejada;
- c) Os equipamentos de medida têm um custo elevado quando comparados aos utilizados com traçadores não radioativos;
- d) O preço do radiotraçador é elevado, embora em alguns casos acabam sendo mais baratos que determinados corantes ou mesmo o preço não chega a ser relevante diante das vantagens do processo;
- e) O radiotraçador utilizado deve ser adequado de forma a permitir sua mistura ao meio fluído, gasoso ou líquido, em que é desejado medir a vazão e
- f) O meio fluído deve preencher toda a seção da tubulação na qual estão sendo feitas as medidas de vazão.

1.2 – Aplicabilidade

O IPEN, por meio do Centro de Tecnologia das Radiações vem atendendo às solicitações das indústrias para controle e identificação de falhas operacionais. No entanto, para atender estes serviços tem se deparado com a necessidade do desenvolvimento de conjuntos detectores robustos, portáteis e que possibilitem o tratamento de dados com maiores velocidades de processamento e facilidade na avaliação dos dados coletados no próprio local da prestação de serviço. Este trabalho descreve o desenvolvimento, a construção e os resultados de um equipamento que visa atender estas necessidades.

1.3 – Objetivo do trabalho

O objetivo principal do trabalho foi desenvolver e construir um conjunto detector cintilador com sistema de contagens e aquisição de dados para medidas de vazão de fluidos em tubulações, utilizando traçadores radioativos, pelo método da velocidade de pulso.

1.4 – Considerações preliminares na elaboração do trabalho

Na elaboração deste projeto, de forma a suprir as limitações apresentadas nos equipamentos convencionais, foram necessários considerar alguns fatores, os quais serão discutidos separadamente, justificando o objetivo deste trabalho.

1.4.1 - Características do conjunto de detectores para aquisição de dados em pontos remotos

Para a utilização de radiotraçadores na determinação de vazão em tubulações, os radioisótopos presentes no traçador devem ser emissores de radiação gama por ser o tipo de radiação mais apropriada para atravessar as paredes das tubulações dos sistemas. Dentre os equipamentos disponíveis para medidas da radiação gama, detectores construídos com fotomultiplicadoras acopladas a cristais de NaI(Tl) são considerados como um dos mais adequados ^[19].

As fotomultiplicadoras são conhecidas pelas suas excelentes características de baixo ruído interno e grande sinal de saída ^[11,20]. Ao mesmo tempo, uma das desvantagens reside nas elevadas tensões de polarização empregadas nas fotomultiplicadoras. Quando utilizadas em equipamentos portáteis estes requerem inversores de tensão para elevarem a tensão das baterias para as centenas ou milhares de volts necessários para a adequada polarização de seus dinodos. A estabilidade do processo de multiplicação é muito influenciada pelo estado das baterias e a flutuação de tensão pode comprometer os resultados ao longo do tempo do ensaio. Existe ainda, os riscos de conduzir tensões elevadas nos cabos, podendo sujeitar o operador a choques elétricos durante a utilização em medidas de campo. Além disso, as fotomultiplicadoras sofrem a influência de campos magnéticos que afetam o seu desempenho e são muito sensíveis à choques mecânicos.

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento e construção de detectores utilizando cristais de CsI(Tl) acoplados a fotodiodos PIN ^[21,22,23], em substituição aos detectores de NaI(Tl) acoplados a fotomultiplicadoras. Fotodiodos PIN de grande área são uma resposta tecnológica muito eficiente em substituição às fotomultiplicadoras quando utilizados com cristais cintiladores de CsI(Tl). Um conjunto detector que utilize fotodiodo no lugar da fotomultiplicadora e cristal de CsI(Tl) em substituição do cristal de NaI(Tl) apresenta as seguintes vantagens:

Vantagens dos fotodiodos de silício em relação a fotomultiplicadoras ^[21,24,25]:

- a) Grande rigidez mecânica e pequenas dimensões devido as suas características construtivas;

- b) Baixas tensões de polarização (menores que 100 V contra centenas ou milhares de volts para fotomultiplicadoras);
- c) Melhor sobreposição do espectro de eficiência quântica do fotodiodo de silício com o espectro de emissão de luminescência do cristal de CsI(Tl);
- d) Elevada eficiência quântica, de 60 a 80%, em razão da não necessidade de escape das cargas da superfície como ocorre em um fotocátodo;
- e) Ganho unitário;
- f) Baixa influência de campos magnéticos e
- g) São de baixo custo.

Vantagens dos cristais de CsI(Tl) em relação aos de NaI(Tl) ^[22,26,27].

- a) São mais resistentes e menos higroscópicos;
- b) Apresentam um rendimento de luz de 51800 fótons/MeV, enquanto o NaI(Tl) tem um rendimento de 37700 fótons/MeV e
- c) Aliadas a estas vantagens, os cristais de CsI(Tl) são produzidos rotineiramente no Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN.

Dessa forma, serão construídos dois detectores constituídos de cristais de CsI(Tl) acoplados a fotodiodos PIN, que terão dimensões reduzidas, serão robustos e de boas condições de manuseio.

1.4.2 - Velocidade de processamento

Os ensaios que demandam tempos longos de trânsito ^[9] são realizados, rotineiramente, utilizando equipamentos disponíveis no mercado. Nesses ensaios a coleta de dados pode ser feita manualmente. No entanto, a realização de medidas para eventos que ocorrem ou variam em intervalos da ordem de segundos ou menos são limitados pela velocidade de processamento do equipamento ou limitados pelo operador, que não consegue coletar dados na velocidade desejada. Esta limitação pode ser superada com a aquisição simultânea dos dados dos dois detectores de forma automática e totalmente digital. Com os pulsos de cada detector digitalizados, estes serão enviados a um computador para posterior tratamento.

As contagens de cada detector serão feitas separadamente, mas com a mesma referência temporal, visando facilitar a determinação dos centróides das formas do pulso de trânsito adquiridos ^[30] sem afetar a exatidão temporal de separação entre esses pulsos.

No processo de aquisição de dados, são limitantes na taxa de aquisição de dados, as velocidades de conversão e de comunicação ^[28,29] e a largura temporal dos pulsos detectados. Paralelamente, haverá o desenvolvimento de um software que gerenciará a troca destas informações, bem como a automatização do sistema.

1.4.3 - Tratamento de dados no próprio local dos ensaios

Normalmente, os dados são coletados no campo e tratados no laboratório. Neste desenvolvimento pretende-se avaliar os resultados das medidas no próprio local do ensaio. A partir do momento que todos os dados coletados estão armazenados no computador, o seu processamento ocorre de forma rápida, obtendo resultados seguros, e possibilitando repetições e alterações dos ensaios quando necessário no próprio local.

1.4.4 - Total portabilidade

A aquisição de dados e placas conversoras analógico-digitais são de tecnologia conhecida. O mercado destas placas de interfaceamento é suprido por vários modelos. Essas podem ser facilmente alocadas em um dos barramentos internos disponíveis em qualquer computador de mesa.

Um equipamento portátil, terá como uma melhor opção o uso de computadores do tipo “lap-top” ou “note-book”. Estes em sua maioria não permitem que sejam abertos ou mesmo disponham de um barramento para uma placa de interfaceamento. Restam como opções de comunicação, as portas de comunicação paralela (“Centronix”) e a de comunicação serial (RS232 ou PS2), sendo que a paralela admite simplificações no circuito eletrônico que propiciam um custo menor para a aplicação desejada.

O sistema de alimentação será provido por baterias recarregáveis para formar juntamente com um computador portátil uma unidade totalmente autônoma para coleta, tratamento e interpretação dos dados.

1.4.5 - Distância entre detectores

A distância máxima que os detectores podem ser posicionados um do outro pode ser um fator limitante. Estas limitações podem ser de cunho meramente prático como a disposição física do sistema, onde a posição de um tanque ou parede entre os dois pontos da tubulação aumenta muito a distância dos cabos dos detectores à unidade de tratamento do sinal. Por outro lado, em vazões elevadas, distâncias maiores entre detectores irão minimizar proporcionalmente a incerteza na medida do tempo de trânsito.

O desenvolvimento do equipamento visando resolver este problema, prevê cabos de transferência de sinal dos detectores para a unidade de amplificação e processamento de sinal da ordem de 30 metros, possibilitando que se utilize de até 60 metros de distância entre detectores. Para que esta necessidade seja atendida, dois fatores foram considerados e incorporados ao conjunto: desenvolvimento de uma eletrônica que permita transmitir este sinal a distância de 30 metros sem grandes perdas, e uma segunda, o acoplamento óptico do sistema de comunicação entre o computador e o conjunto de detectores. Distâncias como estas em uma tubulação, principalmente em um meio industrial, podem propiciar que sejam encontradas diferenças consideráveis de potencial no conjunto provenientes de diferenças de aterramento. Desta forma o acoplamento óptico a ser utilizado ^[28] suportará surtos de tensão de até 7.5 kV, procurando proteger o computador ligado a ele.

2 – CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Este trabalho propõe a injeção de traçadores radioativos em uma tubulação e a detecção da radiação gama emitida para determinar a grandeza física vazão de um meio líquido ou gasoso. As considerações teóricas para o desenvolvimento desse sistema são iniciadas com a radiação gama e sua interação com a matéria para posterior detecção e segue descrevendo o conjunto detector até que o sinal possa ser processado pelo computador.

2.1 – A radiação gama

Para que a radiação emitida pelo radiotraçador possa ser detectada através das paredes das tubulações, o radiotraçador deve ser emissor de radiação gama, como justificado na introdução deste trabalho.

A radiação gama é emitida por um núcleo na tentativa de diminuir seu estado energético excitado a um mais estável [31,32]. Na natureza existem muitos elementos químicos que apresentam isótopos radioativos com a propriedade de emitir radiação gama. Existe ainda a possibilidade destes radioisótopos serem produzidos artificialmente. Esta condição é facilmente alcançada quando um radioisótopo artificial é produzido a partir do bombardeamento de um núcleo estável com nêutrons. Um nêutron excedente no núcleo do átomo desintegra-se originando uma partícula beta menos ou elétron rápido, um próton e um anti-neutrino. Após essa desintegração, o núcleo do átomo pode apresentar um estado

energético que propicie a emissão de um ou mais fótons gama até que seja atingido um estado relaxado ou de menor de energia.

Para efeitos de detecção da radiação através das paredes das tubulações, os elétrons seriam facilmente barrados e neutrinos por suas características estruturais são muito difíceis de detectar. Para esses casos é a emissão de fótons gama que viabiliza a possibilidade de detecção, interagindo com o detector.

Um núcleo instável pode também decair emitido uma partícula β^+ ou pósitron e posteriormente emitir fótons gama no processo para diminuir seu estado energético. O pósitron por sua vez pode participar de um processo mais complexo. Este, interagindo no material que o compõe ou mesmo no encapsulamento da fonte que o constitui, pode perder energia cinética o suficiente para que possa combinar-se com um elétron do material. Este processo é conhecido por aniquilamento onde o pósitron e o elétron dão origem a dois fótons gama de 511 keV, energia esta, equivalente a massa de repouso do elétron. Este processo também é de interesse para esse trabalho, devido ao valor de energia que emite.

Existe ainda a possibilidade de irradiar núcleos com partículas α , mas a emissão de fótons gama destes núcleos geralmente têm energia muito alta o que acaba dificultado a sua detecção. Por outro lado, elétrons rápidos existentes em alguns processos nucleares podem ser freados ao interagirem com a matéria dando origem a radiação de freamento ou “*bremstrahlung*”. Esta radiação situada no espectro dos raios-X possui baixa energia e pouca penetrabilidade, para a aplicação proposta, não sendo indicada para uso com esse trabalho.

2.2 - Interação da radiação com a matéria

A interação da radiação com a matéria é resultado da transferência parcial ou total da energia da radiação incidente a elétrons ou núcleos dos átomos que constituem o meio material que está sendo irradiado ^[31].

A radiação que incide sobre o meio material pode estar manifestada na forma de um elétron de alta velocidade, nêutrons, partículas eletricamente carregadas, e na forma de radiação eletromagnética como raios gama e raios-X. Devido ao efeito de alta penetrabilidade desejado, os radioisótopos utilizados neste trabalho devem emitir radiação gama. As energias envolvidas nesta faixa do espectro de energia fazem com que dentre os possíveis mecanismos de interação conhecidos, três processos sejam predominantes de ocorrer ^[31,32]: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares.

A probabilidade de interação da radiação com o meio material que está sendo bombardeado é função da energia dos fótons incidentes e do número atômico do material que interage com a radiação incidente. Este comportamento é visto na Figura 2.1, onde as regiões da figura indicam as dominâncias de cada processo em função do número atômico do meio material e da energia do fóton incidente.

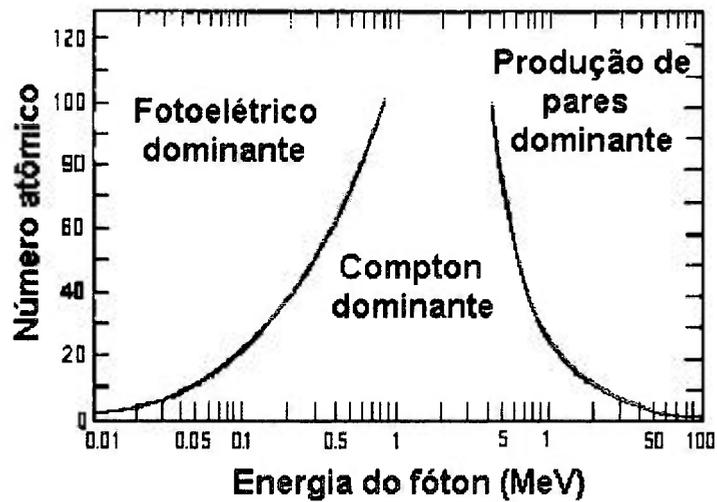


Figura 2.1 – Dominância dos efeitos de interação da radiação em função do número atômico do meio material irradiado e da energia do fóton incidente (Figura de Knoll ^[31]).

No efeito fotoelétrico, um raio gama que encontra um material com número atômico elevado, pode interagir com um átomo deste material e transferir toda sua energia, fazendo com que um elétron de uma de suas camadas internas seja ejetado. Predominantemente o processo ocorre com elétrons da camada K, e o elétron ejetado passa a possuir uma energia (E_c) dada pela diferença entre a energia da radiação incidente e a energia de ligação (E_b) da correspondente camada que o elétron pertencia naquele átomo, como na equação:

$$E_c = h\nu - E_b$$

Esse elétron com energia cinética (E_c), vai cedendo energia a outros elétrons até retornar ao seu estado fundamental, criando ao longo de seu caminho uma série de átomos ionizados.

Continuando esse processo, o átomo ionizado pode capturar elétrons livres do meio e a rearranjo dos elétrons nas camadas emite raios-X que podem ser reabsorvidos novamente através do efeito fotoelétrico ou escaparem do meio. Do ponto de vista estatístico o efeito fotoelétrico predomina para raios gama ou X de baixa energia e interações com materiais de alto número atômico.

No espalhamento Compton, o fóton interage com os elétrons livres do material. Com a interação o fóton incidente deposita parte de sua energia em um elétron que pode ser deslocado de um ângulo (ϕ) em relação a trajetória do fóton incidente, dependendo da energia que conseguiu absorver. Simultaneamente, o fóton espalhado, com energia menor que a do fóton incidente é deslocado de outro ângulo (θ) em relação a trajetória inicial. O processo pode terminar caso este fóton saia do material ou seja totalmente absorvido em interações sucessivas com outros elétrons.

A produção de pares ocorre quando a energia dos raios gama excede no mínimo duas vezes a energia de repouso do elétron, onde esse fóton de alta energia interage com o campo coulombiano do átomo, produzindo um par elétron-pósitron.

Nos diferentes processos de interação, a radiação gama sempre produz elétrons que migram pelo material e íons positivos. Alguns autores chamam a excitação por raios gama de fonte de elétrons ou simplesmente excitação por elétrons ^[33,34] em virtude dessa

propriedade de produzir elétrons livres. O comportamento destes elétrons e íons em um meio cristalino, por exemplo no cristal de CsI(Tl), é que inicia o processo de detecção usado neste trabalho.

O cristal de CsI(Tl) é um cristal inorgânico, que apresenta alta densidade e um número atômico efetivo de 54, sendo adequado para detecção de radiação gama [22,26]. Por outro lado, os radioisótopos emissores gama, mais utilizados como radiotraçadores emitem radiação gama com energias compreendidas, aproximadamente, entre 300 e 1300 keV. Como pode observado na Figura 2.1, predominantemente ocorrerá o espalhamento Compton, embora dentro de suas probabilidades energéticas podem também produzir interações por efeito fotoelétrico e de produção de pares.

O sistema de medição de vazão com traçadores radioativos proposto neste trabalho independe do tipo de interação produzida, sendo assim, para a o efeito de contagens, não é importante saber a origem dos elétrons livres produzidos no cristal, mas apenas que estes ao retornarem ao estado fundamental produzirão cintilações no cristal e que estas serão convertidas em sinais elétricos e contadas na forma como é discutido na seção 2.4.

A premissa anterior é verdadeira desde que o conjunto detector e eletrônica associada presente ao final do processamento um nível de ruído baixo comparado ao sinal detectado. Para que isto seja possível, o sinal produzido após a detecção e processamento eletrônico deve apresentar boa definição do espectro de energias para o patamar Compton e para o fotopico. Em caso contrário, o ruído do conjunto pode ter uma amplitude tão elevada que pode mascarar o sinal produzido e tornar indistinguível qualquer interação da radiação no cristal. O ruído eletrônico é discutido na seção 2.7 e os processos que

implicam nas possíveis amplitudes obtidas do sinal detectado, provenientes da interação da radiação com o cristal, são discutidos na seção 2.3

2.3 - Modelo de bandas de energia

Alguns materiais quando sofrem a incidência de radiação ionizante produzem cintilações, ou seja emissão de luz em comprimentos de onda que são definidos pela estrutura do material. Neste trabalho, no qual se busca uma unidade compacta aproveitou-se as características favoráveis entre o espectro de emissão do cristal de CsI(Tl) ^[22,26] e a elevada eficiência quântica dos fotodiodos de silício para esses comprimentos de onda ^[35].

A cintilação ou ainda a emissão de um fóton de luz ocorre quando aquele elétron que por algum dos processos de interação citados, fica livre dentro do material e retorna ao estado fundamental dentro de um átomo liberando sua energia na forma de um fóton de luz. Esta propriedade, já conhecida desde os primeiros estudos com radiação consegue associar de forma eficiente a radiação incidente a um efeito físico mensurável.

A explicação do fenômeno de emissão de um fóton de luz em um meio cristalino utiliza o modelo de bandas de energia. Em um cristal puro de CsI, um elétron ligado a um átomo está na banda de valência. Ao incidir radiação com energia suficiente para remover esse elétron, ele passará a ser um elétron livre localizado na região do modelo denominada de banda de condução. Entre estas duas bandas existe uma banda energética proibida onde o elétron não pode estar situado. Paralelamente, este elétron poderá retornar ao seu estado fundamental emitindo um fóton de luz. A diferença dos estados energéticos entre a banda

de condução e de valência em um cristal puro de CsI faz com que o fóton emitido esteja na região do ultra violeta ^[36], que não é o espectro adequado para a utilização com fotodiodos de silício.

Em alguns cristais, e no cristal de CsI, é possível adicionar uma pequena quantidade de um elemento que passa a ser chamado de ativador e que cria um estado quântico permitido dentro da banda proibida. Desta forma os elétrons livres na banda de condução ao perderem energia, encontram com maior facilidade este estado quântico intermediário. Este estado intermediário permite que estes elétrons retornem ao estado fundamental emitindo um fóton em um comprimento de onda maior que no cristal sem ativador. No CsI dopado com Tálcio, estes fótons emitidos têm um comprimento de onda mais adequados para serem detectados pelos fotodiodos de silício. A Figura 2.2 mostra o esquema do modelo de bandas de energia em um meio cristalino.



Figura 2.2 – Modelo de bandas de energia em um meio cristalino com ativador.

2.4 - Cristais cintiladores

Para que um meio cristalino seja adequado como cintilador algumas condições devem ser satisfeitas ^[31]:

- a) O cristal deve converter a energia cinética das partículas carregadas que foram produzidas em seu meio em luz detectável, no espectro de emissão desejável e com alta eficiência de cintilação. O comprimento de onda de emissão adequado depende do sensor óptico a ser utilizado, como por exemplo, no visível para detecção com uma fotomultiplicadora com janela de vidro ou ainda com o espectro de luminescência deslocado em direção ao infravermelho para detecção com fotodiodos de silício. Quanto a eficiência de cintilação, o desejado é que sejam produzidos o maior número de fótons de luz para cada fóton gama que incide no cristal;
- b) A conversão em fótons de luz deve ser linear, ou ainda, o número de fótons produzidos na luminescência deve ser proporcional a energia dos fótons gama incidentes para uma grande faixa de energias;
- c) O meio cristalino deve apresentar baixa absorção no comprimento de onda dos fótons de luz produzidos;
- d) O tempo de decaimento da cintilação deve ser o mais curto possível para que altas taxas de detecção possam ser obtidas;
- e) O cristal deve ser de boa qualidade óptica e poder ser fabricado em tamanhos práticos para o processo de detecção;
- f) O índice de refração deve ser próximo ao do vidro para permitir um eficiente acoplamento com a janela das fotomultiplicadoras ou do silício para acoplamento com fotodiodos.

Os cristais de CsI(Tl) utilizados foram produzidos pelo método de Bridgman, nas instalações do Centro de Tecnologia das Radiações – IPEN-CNEN/SP [27]. O cristal de CsI(Tl) é um dos cristais com maior probabilidade de produção de luz [31], produzindo cerca de 52000 fótons para 1MeV de energia efetivamente depositada em seu interior. Apresenta ainda uma baixa higroscopicidade [26], permite um bom acoplamento óptico e relativa facilidade para corte, lapidação e polimento. O espectro de emissão do cristal de CsI(Tl) apresenta uma banda larga que inicia-se em 250 nm para cristais puros e alcançando aproximadamente 710 nm para cristais com alta concentração de Tálcio [31, 26, 36, 37,38]

2.5 – Altura de pulso

Como descrito na seção 2.2, a radiação interage com o cristal por diversos processos e produz elétrons livres e ions positivos. Posteriormente, estes elétrons encontram os estados excitados do ativador e decaem emitindo fótons no comprimento de onda de interesse. Por sua vez, a quantidade de fótons produzidos é dependente da concentração do ativador [39] e do processo de interação, e para uma boa relação sinal-ruído do conjunto é desejável a produção de um grande número de fótons para que sejam transformados pelo fotodiodo em um sinal de grande amplitude.

No cristal de CsI(Tl) e para as energias entre 0,1 e 4MeV, há o predomínio do espalhamento Compton e portanto a maior parte dos fótons produzidos terá origem nos elétrons livres obtidos com esse tipo de interação. O espalhamento Compton propicia no seu processo de interação, a produção de elétrons com os mais variados estados

energéticos, tanto que o espectro de energia observado para este tipo de interação é um espectro contínuo. Este espectro produzirá pulsos detectados desde valores abaixo do nível médio de ruído até valores pouco antes do valor do pico de energia. No sistema detector, desenvolvido neste trabalho, a eletrônica pode suprimir o ruído eletrônico em uma faixa que se estende do zero até aproximadamente 150keV, bem como todo o sinal detectado que possa estar compreendido dentro destes valores.

Apesar da supressão do ruído ser importante para evitar contagens desnecessárias, parte do sinal originado de interações por espalhamento Compton são perdidas e não é possível recuperar estes sinais. Em razão disso, deve-se utilizar à medida do possível, traçadores radioativos que emitam raios gama com energias que não sejam baixas para serem encobertas pelo ruído, nem elevadas em demasia por apresentarem baixa probabilidade de interação com o cristal de CsI(Tl) nas dimensões disponíveis. A escolha adequada da faixa de energia do fóton gama emitido pelo radioisótopo é a que propiciará uma alta produção de luz por meio de interações sucessivas por efeito Compton ou diretamente pelo efeito fotoelétrico. Finalmente esta alta produção de luz será responsável por um número elevado de cargas produzidas no fotodiodo e portanto uma elevada altura de pulso.

2.6 - Fotodiodo

O fotodiodo é uma junção de material semicondutor, neste trabalho em particular o silício, onde em um mesmo substrato são adicionadas impurezas trivalentes de um lado e pentavalentes do outro, formando as chamadas regiões tipo *p* e *n* da junção. Nesta junção,

aparecerá um potencial que se auto-ajusta para que a corrente resultante seja zero. Este potencial gera um campo elétrico dirigido de tal forma que repele os portadores de carga majoritários existentes em cada região impedindo a circulação de corrente através da junção. Esta situação é verdadeira desde que o fotodiodo esteja aberto e não iluminado.

Com a incidência de luz sobre a superfície do fotodiodo, a energia depositada produz portadores majoritários de carga, e como a barreira de potencial permite a passagem destes portadores pela junção, os portadores minoritários aumentam a circulação de corrente no sentido inverso tentando reduzir a corrente total sobre a junção. Para que a corrente de minoritários aumente, o campo elétrico sobre a junção deve ser reduzido e nos terminais do fotodiodo aparece uma tensão exatamente igual aquela que diminuiu na barreira de potencial ^[40].

A utilização do fotodiodo com cristais de CsI(Tl) no processo de conversão de fótons em sinais elétricos apresenta alta eficiência devido a boa sobreposição do espectro de emissão do cristal com o de eficiência quântica dos fotodiodos de silício. Na Figura 2.3 podem ser vistos esses espectros, tomando como exemplo o fotodiodo S3590 que é usado neste trabalho.

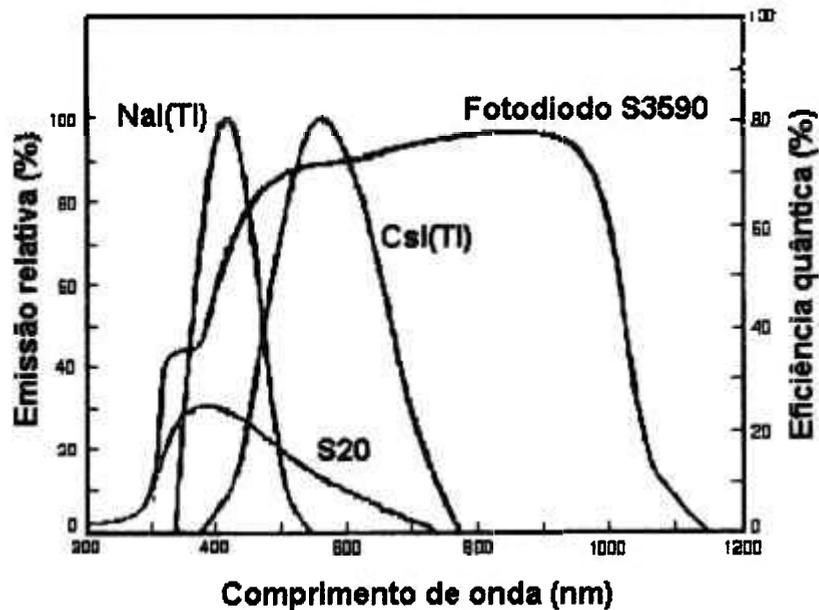


Figura 2.3 – Espectro de emissão normalizados dos cristais de NaI(Tl) e CsI(Tl), eficiência quântica do fotodiodo de silício S3590 e de um fotocátodo S20 em função do comprimento de onda (Figura adaptada de Knoll ^[31] e de Hamamatsu ^[35]).

O uso de fotodiodos também apresentam desvantagens ^[31,35,41], que eventualmente podem ser limitantes para a aplicação desejada. Estas desvantagens são descritas a seguir:

- Em um fotodiodo que está reversamente polarizado, uma pequena quantidade de corrente consegue fluir mesmo na mais completa escuridão. Esta corrente, chamada de corrente de fuga, é uma das causas de ruído e pode limitar, em algumas aplicações, a energia mínima a ser detectada e a resolução do conjunto detector;
- Como em todo semicondutor, a temperatura diferente do zero absoluto, são produzidas vibrações na rede gerando portadores de carga livres os quais são responsáveis também na formação do ruído;

- c) A capacitância existente em uma junção é uma característica inerente, que pode ser reduzida com polarização reversa, mas não eliminada. Esta capacitância será responsável pelo aumento do ruído no estágio pré-amplificador como será discutido na seção 2.7;
- d) As dimensões dos fotodiodos comerciais encontram-se na faixa de 1 a 4 cm² de área ativa e os problemas citados nos itens anteriores são proporcionais ao aumento desta área. Adequando às dimensões dos cristais crescidos em nossos laboratórios, foram utilizados os fotodiodos S3590 da Hamamatsu com 1 cm² de área ativa.

Neste trabalho foram utilizados fotodiodos tipo PIN. A sigla PIN tem origem no substrato de silício intrínseco (I), ou seja com um baixo índice de contaminantes e alta resistividade, no qual se inicia a construção do fotodiodo. A parte superior deste substrato que estará em contato com o cristal de CsI(Tl) recebe eletrodos de Alumínio, em uma disposição com formato de rede, que formarão a região tipo *p* (P) do fotodiodo. A extremidade oposta, por difusão ou contato com um material pentavalente, dará origem a região tipo *n* (N).

2.7 – Pré-amplificador

As características e a configuração do pré-amplificador são funções diretas do detector a ele associado. No detector desenvolvido, o elemento que converte os fótons produzidos no cristal de CsI(Tl) em cargas elétricas é o fotodiodo e suas características são fundamentais na elaboração do pré-amplificador.

O fotodiodo como detector é um elemento predominantemente capacitivo de impedância muito alta [35]. Ele irá produzir a partir dos fótons que incidem sobre sua superfície um pulso de cargas elétricas. Para uma eficiente coleta destas cargas, o estágio pré-amplificador deve estar ligado o mais próximo possível do fotodiodo. A proximidade tem os seguintes objetivos:

- a) Reduzir ao máximo a capacidade elétrica associada aos terminais que ligam o fotodiodo ao pré-amplificador. Como o fotodiodo produz cargas elétricas e o valor equivalente em tensão é inversamente proporcional ao valor da capacidade, quanto menor a capacidade, maior a tensão produzida;
- b) O fotodiodo como detector é um elemento de alta impedância e para uma melhor transferência de energia, o pré-amplificador também deve ter alta impedância de entrada. Devido a esta impedância elevada, o pré-amplificador fica facilmente vulnerável a interferência eletromagnética e portanto é prudente utilizar a menor distância possível entre as conexões;
- c) Os pré-amplificadores utilizam transistores de efeito de campo para o elemento de entrada por suas características de alta impedância. Estes transistores apresentam nível de ruído proporcional ao valor da capacidade de entrada, o que obriga que as conexões sejam as mais curtas possíveis para minimizar esta capacitância adicional.

Uma característica dos detectores semicondutores que apresentam junção, como o fotodiodo, é a variação de sua capacidade em função da tensão reversa de polarização. Com o aumento da tensão reversa sobre a junção, ocorre um aumento da espessura da região de depleção, reduzindo a capacidade do fotodiodo. Como descrito anteriormente, é condição determinante para a obtenção de baixo ruído eletrônico que esta capacitância seja

baixa e portanto a polarização reversa sobre diodos detectores é uma técnica amplamente utilizada.

A eletrônica do pré-amplificador foi desenvolvida no modelo de amplificador sensível a carga ^[35,42]. Nesta configuração, a realimentação para a entrada de um amplificador de alto ganho é capacitiva e o sinal de saída é dado pela razão entre a carga produzida no fotodiodo e a capacitância de realimentação, sendo este sinal quase que totalmente insensível as variações de capacitância do detector. Uma representação esquemática desta configuração é mostrada na Figura 2.4.

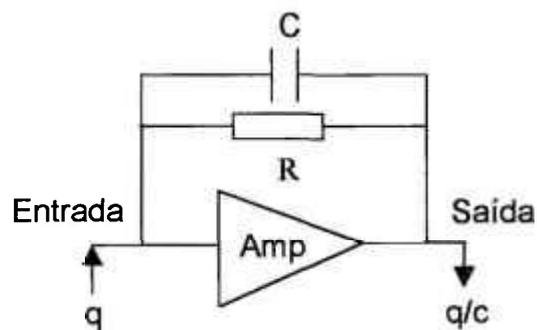


Figura 2.4 - Configuração básica de um amplificador sensível a carga.

Adicionalmente ao elo de realimentação existe um resistor R de valor elevado. A finalidade deste resistor é prover a descarga do capacitor C que em condições ideais, ou seja sem correntes de fuga no circuito, iria se carregar indefinidamente levando o amplificador à saturação ^[42]. Com o resistor R e o capacitor C, o pulso de carga q produzido no fotodiodo, após a amplificação irá decair exponencialmente na forma $e^{-t/RC}$.

Simultaneamente este resistor R também produzirá ruído no estágio de pré-amplificação ^[42]. Este ruído varia conforme a curva da Figura 2.5 ultrapassando o ponto

máximo da curva em direção a grandes valores de R . Os valores práticos levando em conta que o decaimento do pulso não deve ser longo para não comprometer o desempenho do detector, ficam situados na faixa de 50 a 100M Ω .

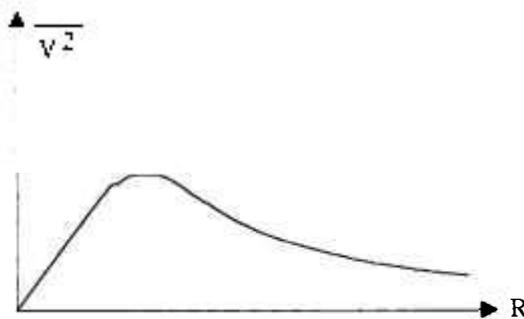


Figura 2.5 - Valor quadrático médio do ruído gerado pelo resistor R na entrada do pré-amplificador.

O ruído também será incrementado pelo resistor (R_a) que conduz a polarização reversa ao fotodiodo e pelo capacitor de acoplamento (C_a) que isola a tensão de polarização do sinal para a entrada do pré-amplificador, Figura 2.6. Desta forma, sendo possível acoplar o fotodiodo diretamente ao pré-amplificador existe a possibilidade de se diminuir o ruído do conjunto ^[31,42,43]. Como esta última configuração nem sempre é possível de ser construída, pois a polarização reversa através do fotodiodo poderá afetar a polarização de entrada do pré-amplificador, neste trabalho foi estudado o comportamento do fotodiodo com e sem polarização como mostrado esquematicamente na Figura 2.7.

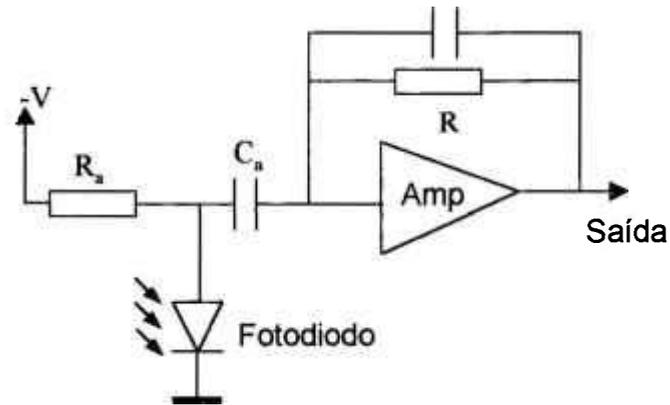


Figura 2.6 – Esquema simplificado do circuito de polarização reversa e acoplamento do sinal do fotodiodo ao pré-amplificador.

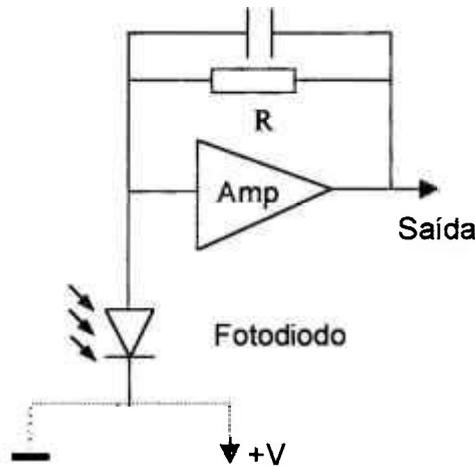


Figura 2.7 – Esquema simplificado do fotodiodo acoplado diretamente ao pré-amplificador. Em pontilhado são mostradas as ligações possíveis do fotodiodo, diretamente ao terra ou com polarização reversa.

O pré-amplificador concluído teve como objetivo final adequar a alta impedância do fotodiodo e seu baixo sinal a uma linha de baixa impedância que é a saída, apresentando um ganho próximo de 1 (u_m), onde procurou-se minimizar os ruídos produzidos neste circuito.

2.8 – Conformação do sinal, controle de supressão, amplificação e acoplamento óptico

O sinal proveniente do pré-amplificador não tem ainda um formato adequado para aplicações em detecção de radiação, nem apresenta amplitude suficiente para o aproveitamento direto deste sinal. Nesta seção serão abordados os circuitos que processam este sinal e o entregam em uma forma adequada.

2.8.1 – Conformação do sinal

A conformação do sinal detectado têm os seguintes objetivos ^[42]:

- a) Obter a melhor relação sinal ruído;
- b) Permitir altas taxas de contagem sem degradar a resolução em energia e
- c) Fazer com que o pulso de saída tenha uma estabilidade temporal, mesmo com as flutuações do tempo de subida do pulso do detector.

Estes objetivos são obtidos da combinação de circuitos diferenciadores que reduzem a amplitude de sinais em baixa frequência e integradores que reduzem os de alta frequência. Estes circuitos consistem de circuitos RC (resistor-capacitor) que limitam a banda passante do amplificador, reduzindo o ruído e limitando a largura temporal dos pulsos detectados. Uma configuração ideal de um circuito diferenciador, seguido de um integrador é mostrado na Figura 2.8.

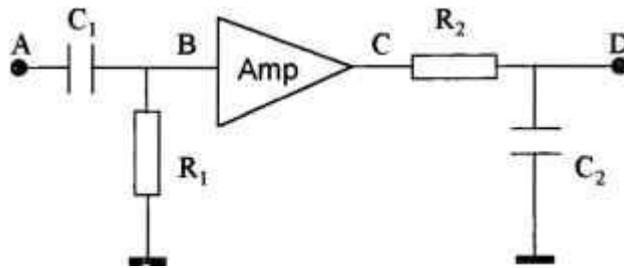


Figura 2.8 – Modelo de um circuito diferenciador seguido um circuito integrador isolado por um amplificador.

O circuito da Figura 2.9 é uma representação esquematizada de um diferenciador constituído de C_1 e R_1 e de um integrador R_2 e C_2 . Este circuito é uma consideração puramente teórica e só irá diferenciar e integrar com a constante de tempo dada pelo produto RC se os pontos A e C forem pontos de impedância nula e B e D de impedância infinita. Na prática diferenciadores ou integradores poderão ser usados em série até obter-se a forma do pulso desejado.

A limitação da banda passante ou largura temporal com o circuito da Figura 2.9 sobre o pulso injetado em A proveniente do pré-amplificador produz um pulso finito em D que reduz a probabilidade de sobreposição entre pulsos, ao mesmo tempo que melhora a relação sinal ruído. Em amplificadores utilizados na área nuclear, as constantes de tempo dadas pelo produto RC do circuito diferenciador e integrador são geralmente da mesma ordem de grandeza e com uma constante de tempo algumas vezes maior que a utilizada no pré-amplificador.

As características do conjunto diferenciador e integrador são estudadas assumindo que os pulsos provenientes do pré-amplificador são funções retangulares com o tempo. Na

situação real, o pulso a ser conformado apresenta tempos de subida e descida finitos. Esta condição faz com que, após o circuito da Figura 2.8, seja possível encontrar uma forma de onda distorcida do pulso desejado, como é visto na Figura 2.9.

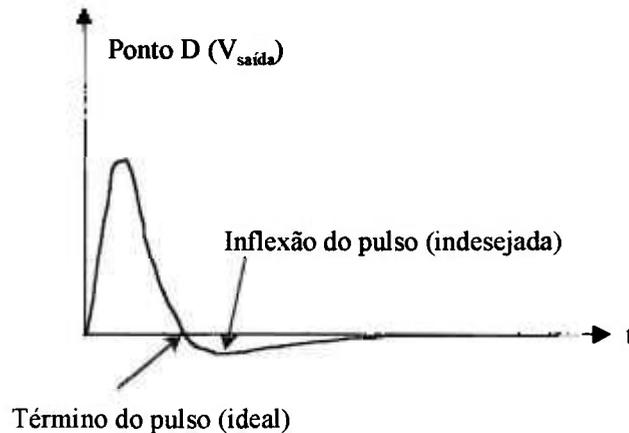


Figura 2.9 – Forma de onda distorcida em razão das características finitas de subida e descida do pulso efetivamente conformado.

O pulso ideal, após a diferenciação e integração, deveria terminar sem a inflexão sobre a linha de base. Este problema é particularmente prejudicial ao sistema detector, na eventual possibilidade de ocorrer um segundo pulso detectado no instante desta inflexão. Nesta situação, este pulso teria sua amplitude subtraída do valor da amplitude da inflexão reduzindo a resolução em energia do sistema. Considerando ainda uma situação onde a radioatividade detectada produz uma série de pulsos, e a sobreposição sobre inflexões dos pulsos anteriores torna-se uma regra, pode provocar no circuito o deslocamento da própria linha de base que acaba não alcançando seu valor fundamental. Estes problemas são de suma importância quando é exigido do conjunto detector e amplificador altas taxas de contagem e boa resolução. Nestas situações, circuitos de cancelamento de pólo zero e restauração de linha base devem ser adicionados ao circuito ^[31].

2.8.2 – Controle de supressão

Como neste trabalho, temos por necessidade utilizar um radiotraçador com a menor atividade possível e portanto detectar uma baixa taxa de pulsos, uma eventual restauração da linha de base ou a supressão da parte indesejada do pulso são realizadas de modo satisfatório pelo circuito que controla a supressão. Este circuito de supressão é um amplificador com ajuste de limiar que permite escolher a partir de que tensão o circuito deixa o sinal passar e permite sua amplificação ^[40], Figura 2.10.

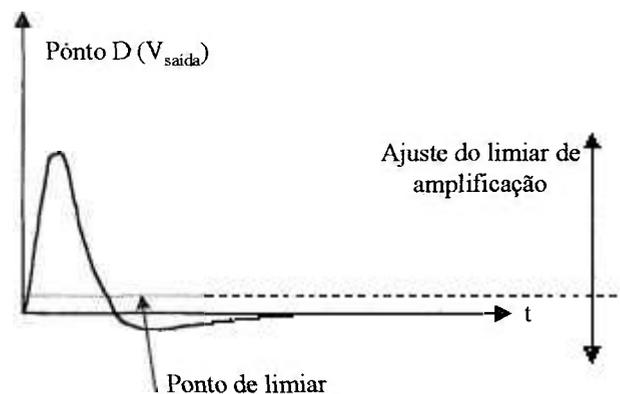


Figura 2.10 – Efeito do controle de supressão. A linha de limiar permite apenas que sinais acima deste valor sejam amplificados, removendo a parte indesejada.

A utilização de um amplificador com controle de limiar permite também remover pulsos de baixa amplitude como o ruído gerado no fotodiodo e pré-amplificador, contagens indesejadas com baixa amplitude de pulso e remover um eventual nível de tensão contínua presente no sinal vindo do pré-amplificador. O controle de supressão é um amplificador operacional com controle de limiar, onde sua entrada não inversora recebe uma tensão de referência ajustável condicionando a este valor de tensão o ponto de limiar de amplificação, Figura 2.11.

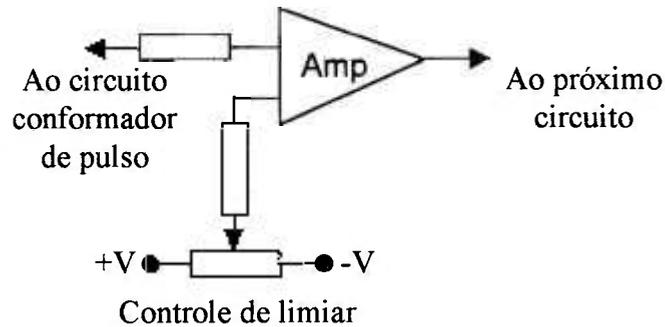


Figura 2.11 – Amplificador operacional na configuração de amplificador de limiar.

2.8.3 – Amplificação e acoplamento óptico

Após o controle de limiar, o sinal na forma desejada, pode novamente ser amplificado, obtendo já na saída deste amplificador amplitude suficiente para fornecer sinal a um analisador multicanal ou fazer a excitação de um circuito que constitui o acoplamento entre o amplificador e o computador para efetuar a contagem dos pulsos detectados.

A amplitude dos sinais na saída deste último amplificador está entre valores de 0 a 10V, dependendo da energia do fóton gama detectado e é entregue em baixa impedância facilitando a conexão com o multicanal. Como o intuito deste trabalho não é a espectroscopia gama, esta é uma saída apenas disponível para ser usada e o sinal efetivamente utilizado é dirigido ao circuito integrado que faz o acoplamento óptico entre o amplificador e o computador.

Este circuito integrado de acoplamento começa a conduzir para qualquer valor de sinal acima de 0,6V, chaveando opticamente seu transistor interno que está ligado a entrada do computador. Além da indiscutível vantagem do acoplamento óptico entre computador e conjunto detector, este circuito acaba fazendo a quadratura da forma de onda do sinal detectado, pois qualquer sinal acima de aproximadamente 0,6V leva o transistor interno à condução chaveando o estado lógico na entrada do computador.

A condução de sinais para valores acima de 0,6 V que a princípio pode parecer uma limitação, já não constitui problema neste ponto do circuito. Como será visto, o ruído proveniente do conjunto detector e pré-amplificador supera a ordem de 1V, que é equivalente as energias acima de 100keV. Assim, na situação real, iremos por meio do controle de supressão, recortar parte da amplitude deste ruído para evitarmos contagens de fundo desnecessárias e permitir a contagem dos fótons detectados de energias maiores que correspondem a valores maiores de tensão do sinal amplificado. O estágio final de amplificação e o acoplamento óptico são vistos na Figura 2.12.

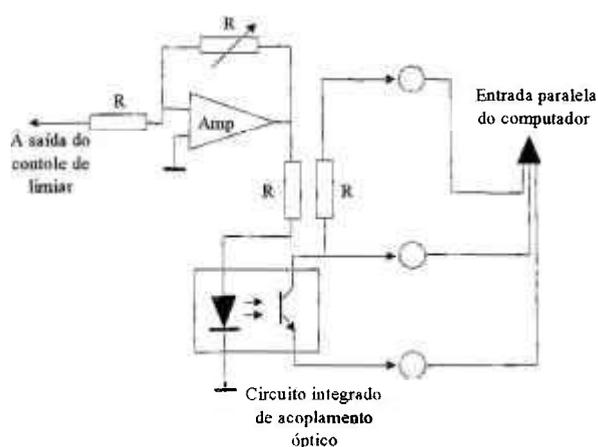


Figura 2.12 – Estágio final de amplificação e acoplamento óptico. Na figura pode ser observada a não existência de ligação elétrica, apenas óptica, entre o último estágio amplificador e o computador.

2.9 – Contador de pulsos

As considerações teóricas discutidas até o item 2.8 descreveram como o conjunto detector entrega um pulso elétrico, na forma digital para a entrada do computador. Como o trabalho desenvolvido possui dois canais de detecção, dois sinais estarão chegando ao computador para serem processados.

Os computadores pessoais apresentam a possibilidade de comunicação, sem a adição de placas de interface, pela porta de impressora, que é uma porta de dados paralela, comumente chamada de porta “Centronix”. Esta porta paralela pode manipular simultaneamente 8 estados lógicos de saída e 5 estados lógicos de entrada ^[44,45,46,47], que podem ser reconhecidos por programas que incluam em sua linguagem a leitura ou escrita sobre a porta paralela.

Sendo assim, o estágio final deste trabalho, que é o contador de pulsos detectados, é obtido apenas da elaboração adequada do programa de leitura da porta paralela. Neste trabalho, a porta paralela é lida e a mudança de seus estados lógicos como função dos pulsos detectados, são armazenados em endereços de memórias que fazem a somatória destes pulsos durante períodos determinados. Estes períodos de tempo previamente escolhidos pelo operador do equipamento, juntamente com a somatória de pulsos detectados no período, são amostrados simultaneamente na tela do computador como dois gráficos de contagens em função do tempo.

O acompanhamento do material radioativo que está se deslocando pela tubulação e sendo mensurado pelos detectores de radiação irá produzir os dois gráficos de contagens em função do tempo que constituirão os pulsos de trânsito do radioisótopo na tubulação.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Introdução

O equipamento desenvolvido neste trabalho é apresentado de forma resumida no diagrama de blocos da Figura 3.1. Os procedimentos contidos nesta seção irão descrever os procedimentos e ensaios que foram necessários para a construção e validação do Conjunto Detector Cintilador com Sistema de Contagens e Aquisição de Dados para Medidas de Vazão Utilizando Traçadores Radioativos proposto neste trabalho.

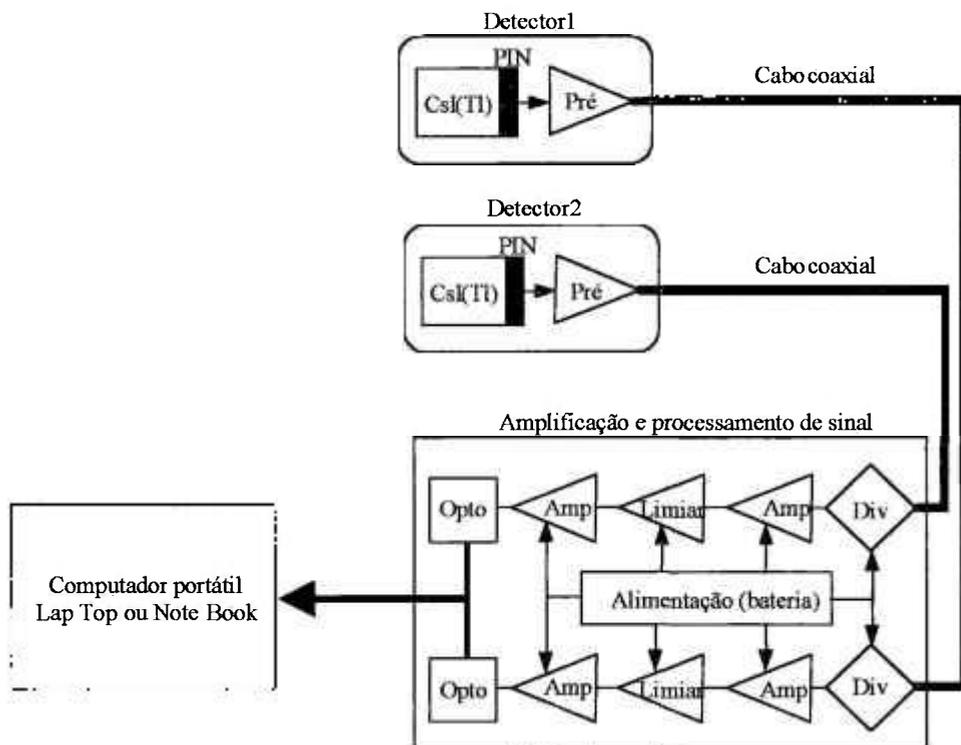


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do Conjunto Detector-Cintilador com Sistema de Contagens e Aquisição de Dados para Medidas de Vazão Utilizando Traçadores Radioativos.

3.2 - Crescimento dos cristais de CsI(Tl)

Os cristais de CsI(Tl) utilizados neste trabalho foram produzidos pelo método de Bridgman, utilizando tubo de quartzo em vácuo (10^{-6} mmHg). O sal com pureza de 99,99% foi adquirido da Metal Gesellschaft K. K., Alemanha. Para a escolha da concentração de tálio no cristal de CsI que apresentasse as melhores características espectroscópicas foram produzidos cristais com as seguintes concentrações de tálio: 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} e 10^{-6} M. Cada cristal foi usinado na forma de um cilindro com base de 2 cm de diâmetro e altura de 2,5 cm. Os cristais receberam polimento apenas nas bases, e com exceção da base em contato com a fotomultiplicadora, toda a superfície de cada cristal foi envolvida em fita Teflon para formar uma superfície refletora aos fótons de luz produzidos no interior do cristal.

3.3 - Estudo das características espectroscópicas – Espectro de emissão

Os equipamentos utilizados nas medidas dos espectros de emissão dos cristais foram:

- Fotomultiplicadora com janela de quartzo modelo R3235 da Hamamatsu;
- Fonte de alta tensão modelo 554 High Voltage Power Supply da Ortec;
- Amplificador modelo 472 Timing Filter Amplifier da Ortec;
- Discriminador de fração constante modelo 463 Constant Fraction Disc da Ortec;
- Contador modelo 776 Counter e Timer da Ortec;
- Monocromador, modelo MC-10L com obturadores para uma resolução de 20nm;

- Fonte radioativa de ^{22}Na .

A Figura 3.2 apresenta esquematicamente o diagrama utilizado para as medidas do espectro de emissão. Os pontos das curvas foram obtidos de 5 em 5 nanômetros, com as contagens em cada comprimento de onda adquiridas durante 30 segundos

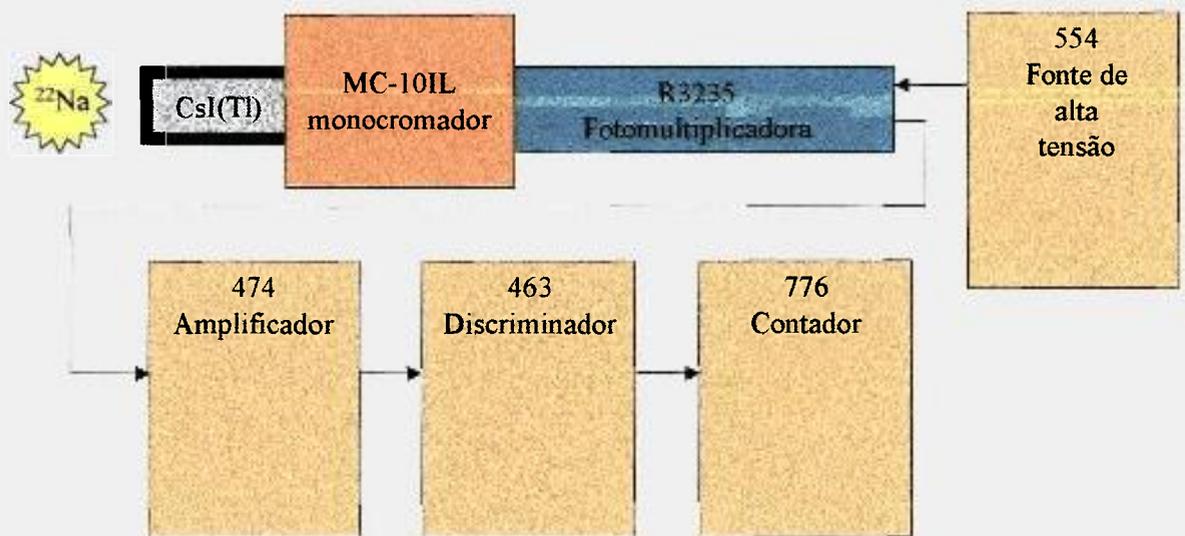


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do arranjo para obtenção dos espectros de emissão dos cristais de CsI(Tl).

3.4 - Estudo das características espectroscópicas – Altura de pulso

Os equipamentos utilizados nas medidas de altura de pulso foram:

- Fotomultiplicadora com janela de vidro modelo 8575 da RCA;
- Fonte de alta tensão modelo 554 High Voltage Power Supply da Ortec;

- Amplificador modelo 450 Research Amplifier da Ortec;
- Conversor Analógico-Digital modelo 918 ADCAM da Ortec;
- Fonte radioativa de ^{137}Cs .

A Figura 3.3 apresenta o diagrama de blocos do arranjo utilizado para as medidas de altura de pulso. Os espectros de energia foram medidos durante 300 segundos para cada cristal e os valores da altura de pulso obtidas a partir do número do canal do centróide em cada fotopico.

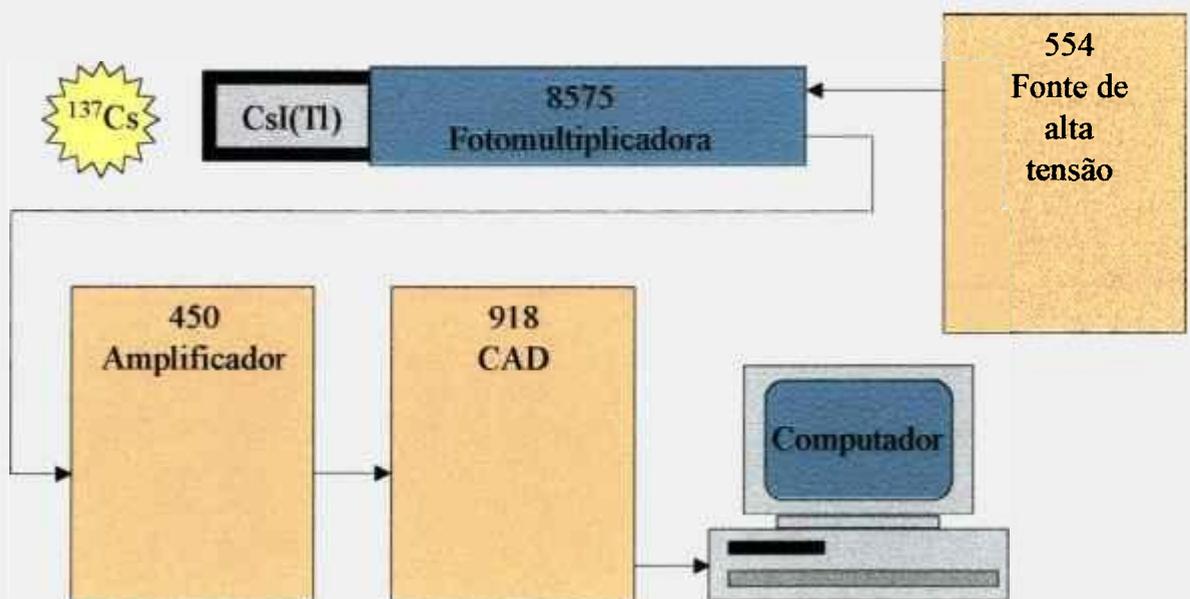


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do arranjo para obtenção das medidas de altura de pulso.

3.5 - Estudo das características espectroscópicas – Tempo de decaimento de luminescência

Os equipamentos utilizados nas medidas de tempo de decaimento de luminescência foram:

- Fotomultiplicadora com janela de vidro modelo R329 da Hamamatsu;
- Fonte de alta tensão modelo 554 High Voltage Power Supply da Ortec;
- Osciloscópio com largura de banda de 1GHz e impedância de entrada de 50Ω modelo 784A da Tektronix;
- Fonte radioativa de ^{22}Na .

A Figura 3.4 apresenta o diagrama esquemático utilizado para as medidas dos tempos de decaimento de luminescência que são inferidos a partir das curvas de decaimento. Estas foram obtidas a partir da média de 10.000 pulsos processados e digitalizados pelo próprio osciloscópio e salvos em arquivos do tipo “.dat”.

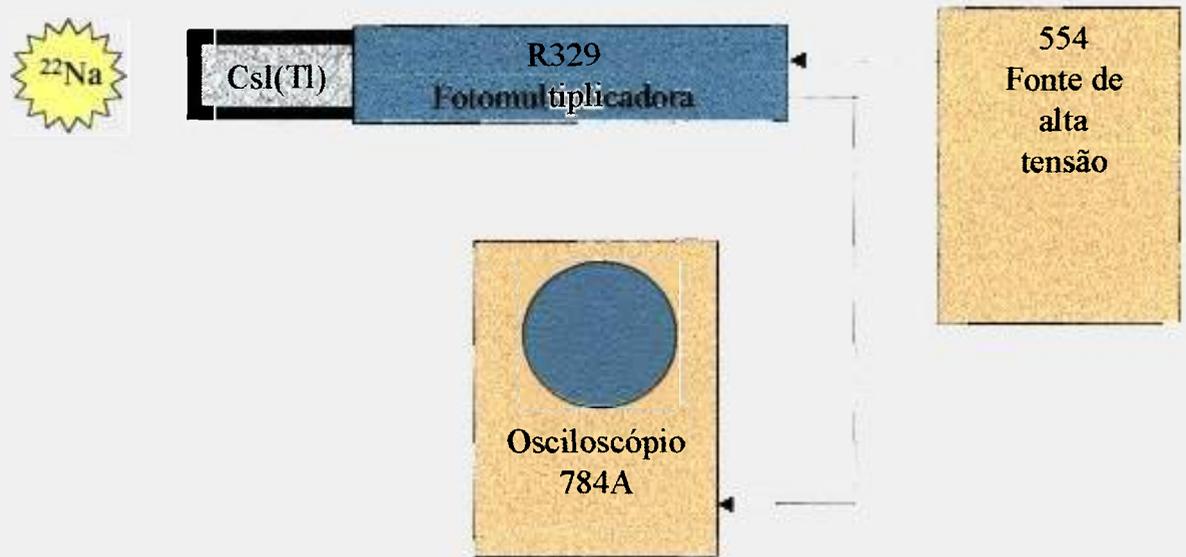


Figura 3.4 – Diagrama de blocos do arranjo para obtenção das formas de onda de decaimento de luminescência.

Os tempos de decaimento das formas de onda foram obtidos da relação:

$$\tau(\text{tempo de decaimento}) = \frac{0,693}{\lambda(\text{constante de decaimento})}$$

Onde a constante de decaimento λ é a inclinação da curva.

3.6 - Lapidação, polimento e montagem do conjunto fotodiodo e cristal de CsI(Tl)

O processo de lapidação, polimento e montagem do conjunto detector constituído do cristal de CsI(Tl) e fotodiodo foram realizados por uma série de procedimentos feitos manualmente. Os materiais utilizados foram:

- Álcool iso-propílico;
- Lixa de metal resinada de granulação 200 ou 400;
- Lixa de metal resinada de granulação 600;
- Papel alumínio de uso doméstico;
- Pano de uso doméstico do tipo Perfex;
- Graxa de silicone de 0,5 Stokes da Down Corning;
- Fita Teflon do tipo utilizada em vedação de tubulações;
- Fita isolante preta;
- Algodão de uso doméstico.

Seqüência do processo:

- 1) A Figura 3.5 mostra o cristal de CsI(Tl), no formato do crescimento e após usinagem e polimento. Esta forma foi usada, na avaliação de suas características espectroscópicas, durante a seleção do cristal adequado a este trabalho.

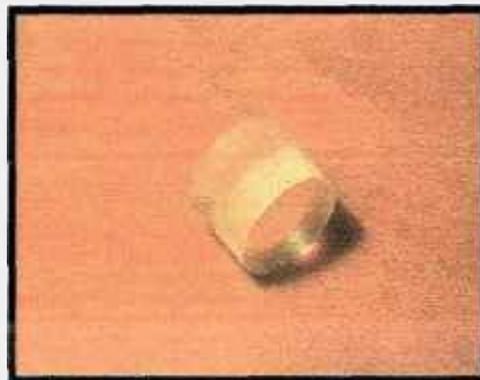


Figura 3.5 – Cristal de CsI(Tl) no formato de crescimento e após a usinagem e polimento.

- 2) Como primeiro procedimento, o cristal foi cortado em serra de disco ou lixado com lixa de granulação 200 ou 400 para ser obtida a forma de paralelepípedo de 1 x 1 x 2,5 cm, Figura 3.6.

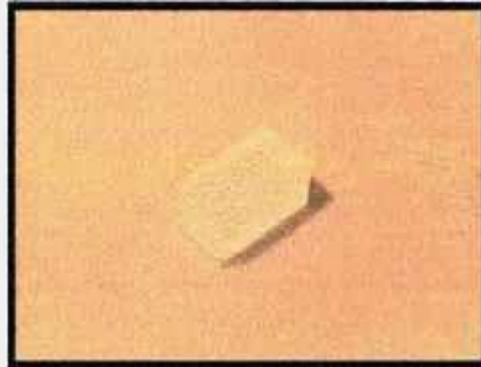


Figura 3.6 – Cristal de CsI(Tl) cortado em seu formato definitivo para acoplamento com o fotodiodo.

- 3) Antes da lapidação foi produzido um pequeno degrau sobre a superfície do cristal, Figura 3.7, com auxílio do lado abrasivo da lixa, com cerca de 1 mm de largura. Este cuidado foi tomado para evitar que o cristal ao ser apoiado sobre os contatos do fotodiodo possa não ficar totalmente em contato com a superfície ativa do fotodiodo.

Este procedimento pode ser dispensado caso seja utilizado o fotodiodo S3590-8, pois o mesmo possui um filme que reveste tanto os contatos como a superfície ativa do fotodiodo, formando uma superfície plana onde o cristal pode ser apoiado sem restrições.

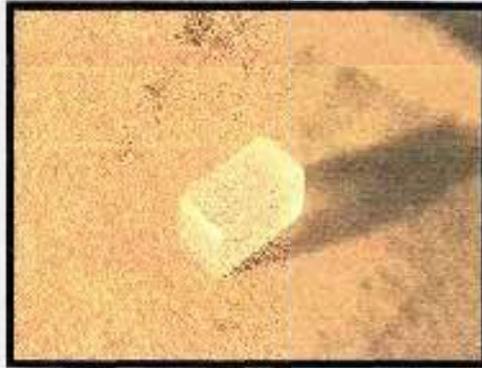


Figura 3.7 – Aspecto do chanfro que deve ser produzido no cristal para evitar o contato da superfície deste com os terminais do fotodiodo.

4) A lapidação do cristal foi feita em duas partes. A primeira parte foi feita com lixa de metal resinada de granulação 600 embebida em álcool iso-propílico, Figura 3.8, até ser obtido o encaixe perfeito com o fotodiodo.



Figura 3.8 – Primeira parte da lapidação sendo feita com lixa de metal resinada embebida em álcool iso-propílico.

A segunda parte foi feita utilizando a parte posterior da lixa como meio abrasivo, Figura 3.9, que também deve estar embebida em álcool, até que seja obtido um melhor

acabamento das superfícies. Os melhores resultados de planicidade foram obtidos com este procedimento sendo realizado na forma de um caminho de um oito imaginário sobre a lixa e pouca pressão sobre o cristal.



Figura 3.9 – Segunda parte da lapidação sendo feita com a parte posterior da lixa de metal resinada também embebida em álcool.

5) O polimento foi feito manualmente, Figura 3.10, utilizando papel alumínio de uso doméstico. Esta etapa é feita sobre uma superfície lisa, onde um pano do tipo Perfex é usado como forro para receber o papel alumínio. Este último é utilizado seco, preferencialmente do lado menos brilhante, por apresentar menor liberação de alumínio que se agrega a superfície do cristal durante o polimento. Caso isto ocorra, a remoção do alumínio é feita com algodão embebido em álcool iso-propílico.



Figura 3.10 – Polimento com papel alumínio seco da face em contato com o fotodiodo e a oposta.

Apenas a face que fará contato com o fotodiodo e a oposta necessitam ser polidas. As demais faces foram apenas lapidadas, pois não foi observada diferença na altura de pulso do detector, devido a reflexão especular ou difusa destas superfícies, simplificando dessa forma o trabalho de polimento do cristal.

6) Posteriormente, a face em contato com o fotodiodo foi besuntada com graxa de silicone de 0,5 Stokes da Down Corning que constitui a interface para um melhor acoplamento óptico entre o cristal e o fotodiodo, diminuindo as reflexões entre as superfícies ^[48, 49], Figura 3.11 e 3.12.

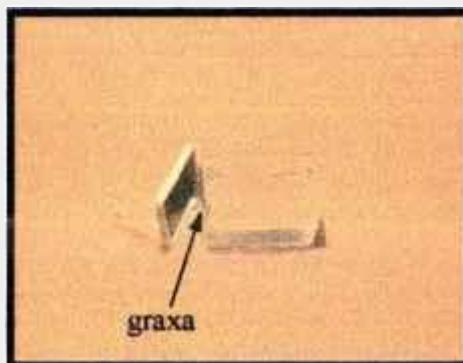


Figura 3.11 – Fotodiodo e cristal de CsI(Tl) onde é observada a face no cristal que deve ser besuntada com graxa de silicone.

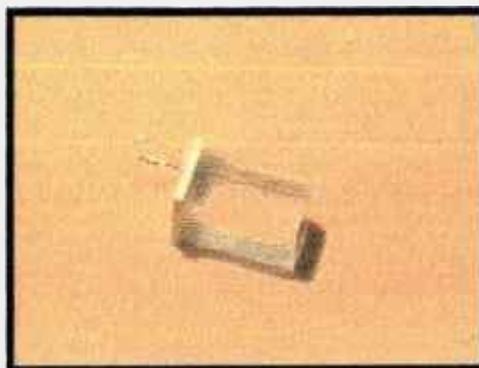


Figura 3.12 – Disposição final do acoplamento entre fotodiodo e cristal de CsI(Tl).

Retornando ao procedimento visto na figura 3.7, o pequeno degrau produzido no cristal deve estar alinhado com os contatos internos do fotodiodo por ocasião da conexão entre eles. Apesar desta altura ser mínima, com o passar do tempo, a graxa de silicone pode ser deslocada de forma não uniforme entre a superfície do cristal e do fotodiodo, e esta não uniformidade do contato entre essas superfícies, compromete a longo prazo a eficiência do detector.

7) Como o processo de cintilação ocorre emitindo fótons em todas as direções, foi necessária a utilização de um elemento refletor ao redor do cristal para evitar que os fótons de luz produzidos escapem do cristal e não atinjam o fotodiodo. O refletor^[50] foi feito com fita Teflon, envolvendo todo o cristal e que também serviu como elemento de fixação entre o cristal e o fotodiodo, como mostrado na Figura 3.13. Nesta parte da montagem é conveniente assegurar que a graxa de silicone utilizada seja apenas a necessária para fazer o contato óptico entre fotodiodo e cristal, não vazando em direção ao Teflon. A fita entrando em contato com a graxa torna-se transparente, perdendo suas propriedades reflexivas.

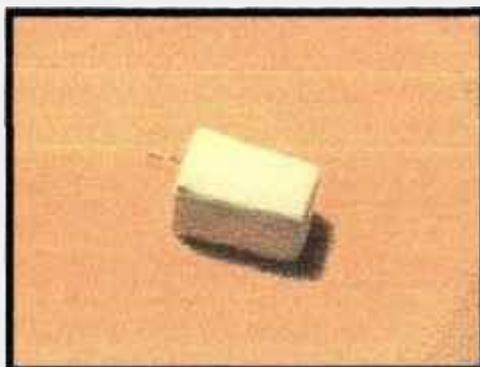


Figura 3.13 – Fotodiodo e cristal de CsI(Tl) envoltos em fita Teflon, que constitui o meio refletor e de fixação entre as partes.

8) Na última etapa, o fotodiodo e cristal envoltos com Teflon, foram cobertos com fita isolante preta, para assegurar completa vedação à luz ambiente ^[23], Figura 3.14.

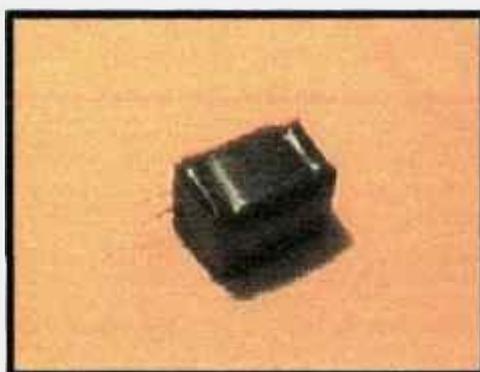


Figura 3.14 – Fotodiodo e cristal de CsI(Tl) cobertos com fita isolante preta para evitar incidência de luz ambiente sobre o conjunto detector.

3.7 - Medida das capacitâncias dos fotodiodos em função da tensão reversa

As medições das capacitâncias dos fotodiodos teve como objetivo obter os valores do comportamento capacitivo dos fotodiodos sob diferentes valores de polarização reversa. Os equipamentos para obtenção dos valores destas capacitâncias foram:

- Freqüencímetro de 100MHz com precisão de 5 ppm modelo Max 100;
- Fonte de tensão regulável de 0 a 25V modelo CC185 da CCSon;
- Diversos capacitores entre 2,2 a 150 pF;
- Oscilador em torno de 3,5MHz com transistor de efeito de campo no circuito de entrada;
- Resistores com os mesmos valores dos resistores R5 e R6 do esquema elétrico da Figura 3.16;
- Capacitor com o mesmo valor do capacitor C6 do esquema elétrico da Figura 3.16 e
- Fita isolante de cor preta.

A Figura 3.15 apresenta o diagrama esquemático utilizado para se obter os valores das capacitâncias dos fotodiodos que simulou a situação real na qual o fotodiodo foi submetido. Dessa forma, o circuito formado pelos resistores R5, R6 e pelo capacitor C6 é idêntico ao utilizado no pré-amplificador pela rede de filtragem da tensão de polarização reversa; por sua vez, o circuito oscilador utiliza um transistor de efeito de campo com a finalidade de apresentar alta impedância de entrada ao fotodiodo como também é utilizado internamente no circuito integrado do pré-amplificador do detector.

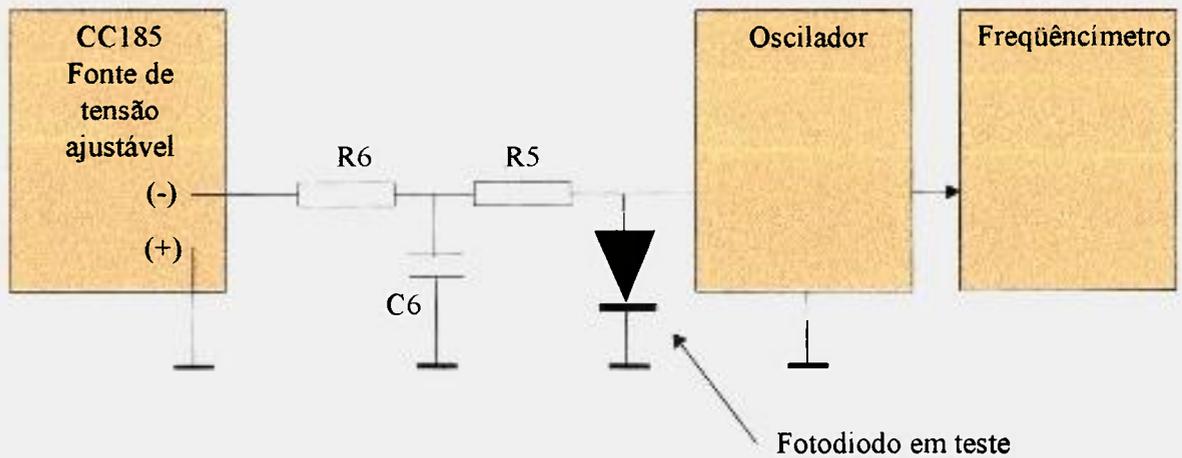


Figura 3.15 - Diagrama esquemático utilizado para medir a capacitância dos fotodiodos em função da tensão reversa de polarização.

A curva de calibração foi obtida substituindo o fotodiodo do diagrama da Figura 3.15 por capacitores de diversos valores e associando a cada valor de capacitância a frequência obtida. Como os demais componentes permanecem no circuito, os valores lidos de frequência incluem o valor da capacidade residual do circuito e portanto este valor não precisa ser considerado.

Feita a curva de calibração, capacitância pela frequência, o fotodiodo retornou ao circuito da Figura 3.15 e com auxílio da fonte de tensão ajustável foi obtida a curva de tensão pela frequência para o fotodiodo em estudo. Substituindo os valores de frequência obtidos na curva de calibração, encontramos a curva desejada de tensão reversa em função da capacitância. Como o fotodiodo é um elemento sensível a luz, ele foi mantido em completa escuridão durante os ensaios, utilizando fita isolante de cor preta sobre sua superfície ativa.

3.8 - Pré-amplificadores

Para a realização deste trabalho foi desenvolvido um primeiro pré-amplificador, mostrado esquematicamente na Figura 3.16, cujo projeto procurou otimizar a relação sinal-ruído e a resolução para o conjunto cristal e fotodiodo. Partindo dos valores dos componentes e das características construtivas deste pré-amplificador otimizado foram desenvolvidas outras duas versões de pré-amplificadores que incorporaram modificações na saída de sinal como serão discutidas na seção 3.9. As Figuras 3.17 e 3.18 mostram os esquemas elétricos dos pré-amplificadores que incluíram as modificações que permitiram reduzir o número de cabos de ligação entre cada pré-amplificador e a unidade de amplificação e processamento de sinal com os dois circuitos utilizados de polarização dos fotodiodos.

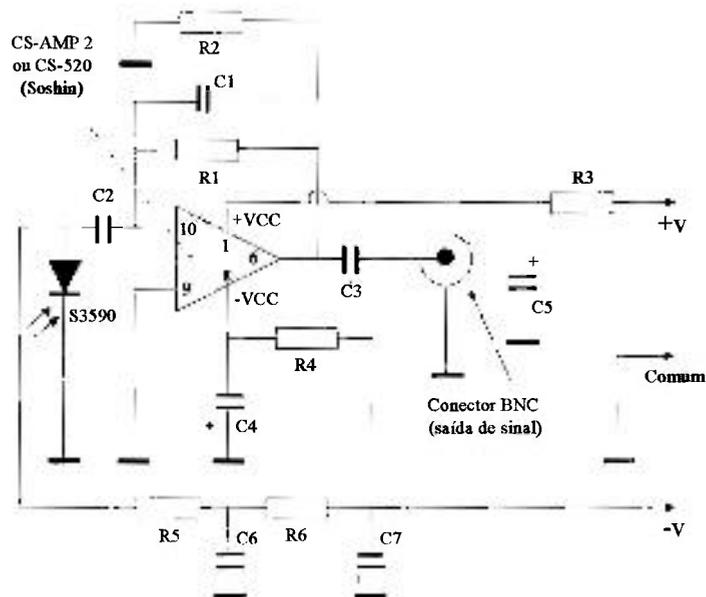


Figura 3.16 – Pré-amplificador e fotodiodo na configuração que obteve os melhores resultados na relação sinal-ruído e de resolução.

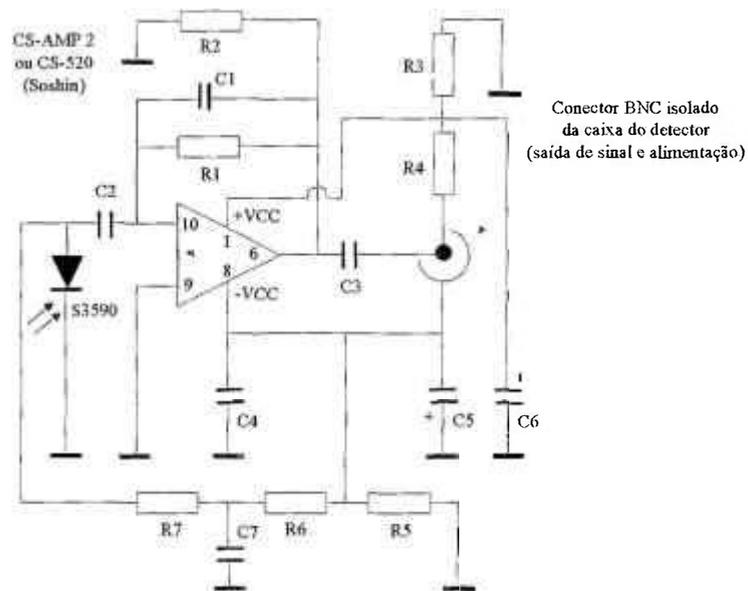


Figura 3.17 – Circuito do pré-amplificador com fotodiodo acoplado capacitivamente e com polarização reversa. Este circuito utiliza a tensão de alimentação e sinal em um mesmo cabo.

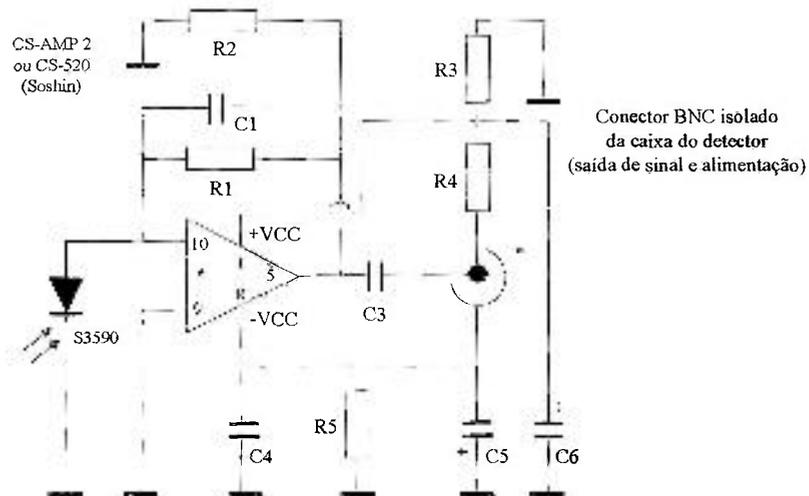


Figura 3.18 – Circuito do pré-amplificador com acoplamento direto do fotodiodo, sem polarização reversa. Este circuito utiliza a tensão de alimentação e sinal em um mesmo cabo.

Os três circuitos elétricos de pré-amplificadores e fotodiodos foram utilizados com os cristais de CsI(Tl) com 10^{-2} M de tálio que constituíram os conjuntos detectores cintiladores que foram desenvolvidos e caracterizados neste trabalho. Alguns cuidados foram considerados na construção destes pré-amplificadores quando foram montados como conjuntos detectores:

- a) A caixa de cada conjunto detector contendo o fotodiodo e o pré-amplificador foi feita de material condutor e foi ligada ao ponto de massa do pré-amplificador;
- b) O conector de engate rápido tipo BNC utilizado para a saída de sinal e entrada de alimentação foi do tipo isolado do ponto de terra com um anel isolante para os esquemas elétricos das Figuras 3.17 e 3.18. Para o detector construído com o circuito elétrico da Figura 3.16, o conector de saída de sinal utilizado foi um conector de engate rápido convencional;
- c) O conjunto cristal e fotodiodo como descrito na seção 3.4 deve ser montado junto a superfície da caixa que ficará em contato com a tubulação em que se deseja medir a vazão. Esta superfície da caixa do pré-amplificador deverá ser feita a mais fina possível, respeitando as condições de rigidez mecânica, para evitar absorção de fótons gama pela caixa;
- d) Como a caixa do pré-amplificador deve ser ligada ao ponto de terra e estes pontos não são comuns entre os dois pré-amplificadores, as caixas destes não devem ser postas em contato entre si. Desta forma, caso exista esta possibilidade, é conveniente revestir os conjuntos detectores com um filme plástico de PVC ou fita isolante para assegurar que não haja contato entre eles.

3.9 - Utilização de cabo coaxial convencional entre detectores e unidade de amplificação e processamento

Cada conjunto, detector e pré-amplificador, foi montado em uma configuração que possibilitou que o sinal de saída e a alimentação elétrica do pré-amplificador fossem compartilhados no mesmo fio de um cabo coaxial convencional. Esta simplificação dos cabos de ligação de cada detector à unidade de amplificação e processamento de sinal é mostrada esquematicamente na Figura 3.19. Desta forma a conexão entre cada conjunto detector e a unidade de amplificação e processamento de sinal foi feita com cabo coaxial convencional de 50 ou 75Ω de impedância e com aproximadamente 30 m cada.

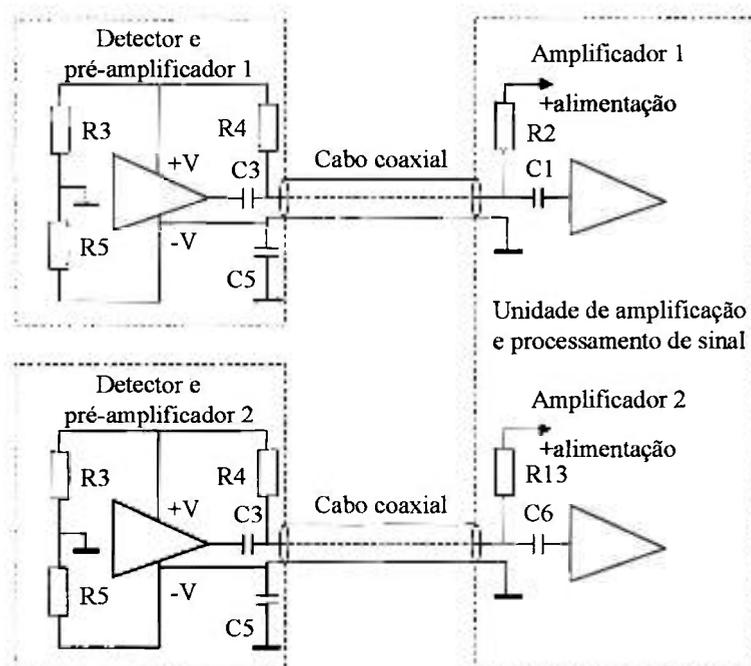


Figura 3.19 – Esquema simplificado do circuito elétrico das ligações entre os conjuntos de detectores e a unidade de amplificação e processamento de sinal.

3.10 - Unidade de amplificação e processamento de sinal

Esta unidade é a responsável pela alimentação dos detectores, conformação dos pulsos, controle de supressão, amplificação dos sinais, digitalização e entrega do sinal ao computador através da porta de comunicação de dados na forma paralela. Por ser um equipamento indicado para trabalhos em campo, a alimentação foi provida por baterias recarregáveis de níquel-cádmio. O esquema elétrico da unidade de amplificação e processamento de sinal é mostrado na Figura 3.20.

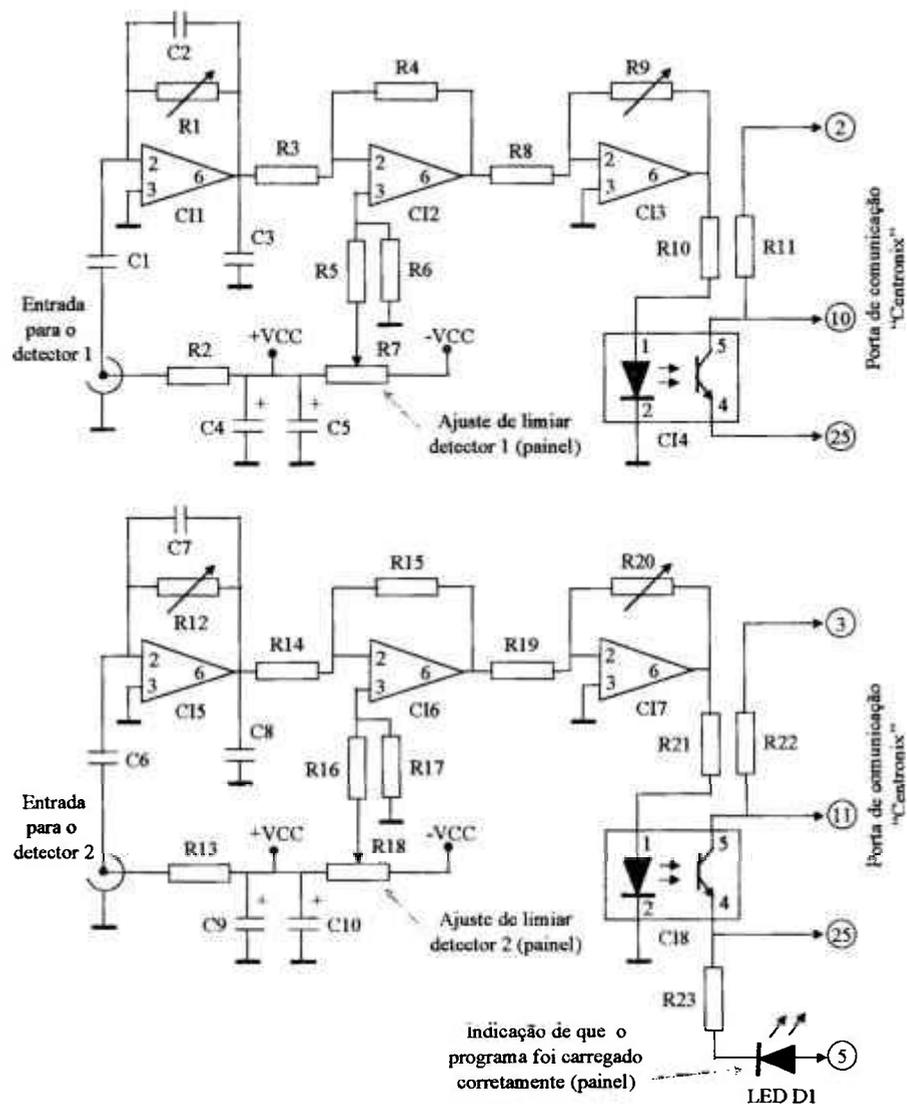


Figura 3.20 – Continua.

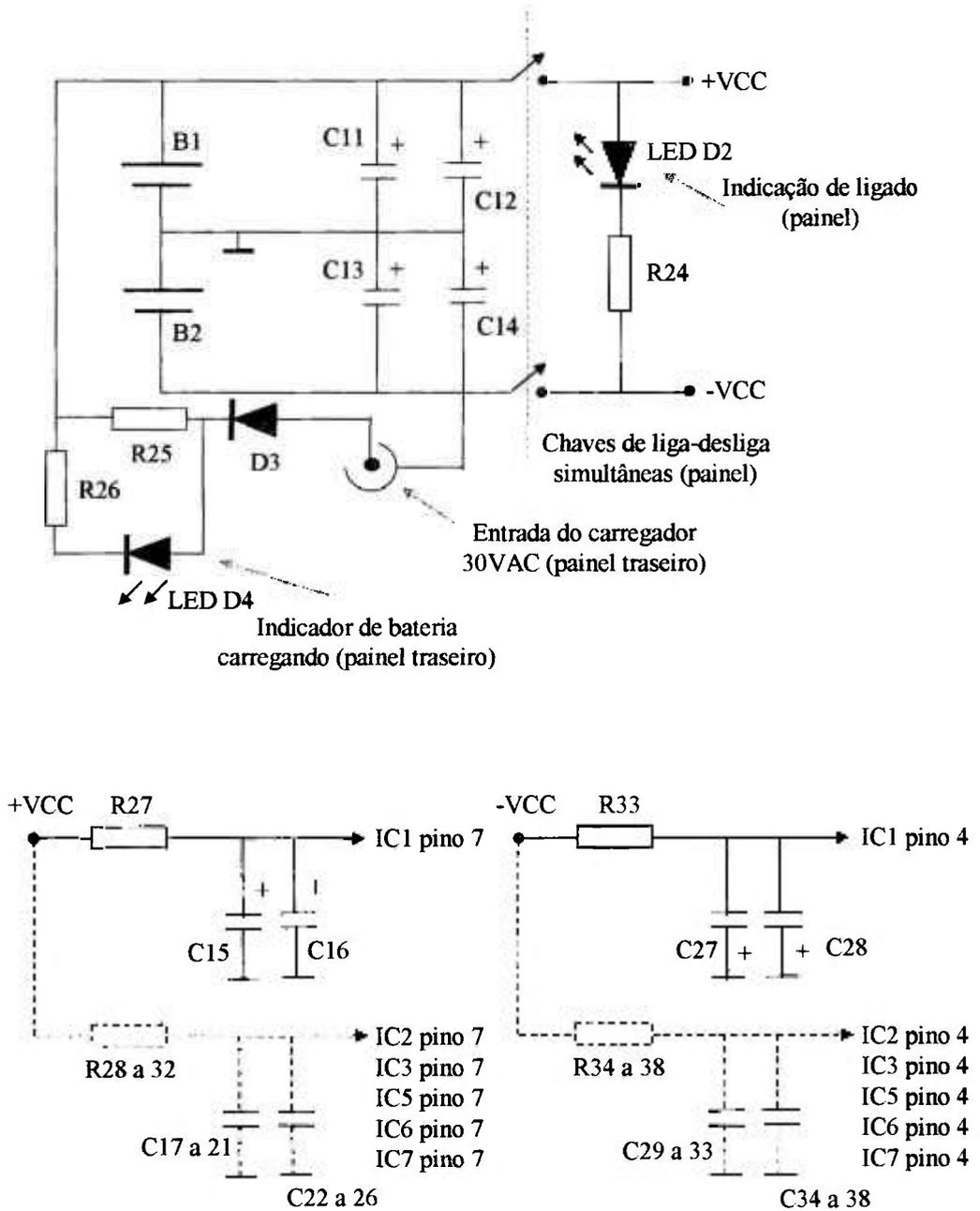


Figura 3.20 – Esquema elétrico da unidade de amplificação e processamento de sinal, numeração das interligações com a porta “Centronix”, conjunto de baterias para alimentação e descrição de elementos que devem constar nos painéis frontal e posterior.

3.11 - Programa de comunicação, contagem e construção do gráfico de contagens pelo tempo

O programa que agrega as funções de comunicação com a unidade de amplificação e processamento de sinal, contador e construção do gráfico de contagens pelo tempo foi escrito em linguagem Basic com o software Microsoft-Quick Basic, embora a interface da unidade de amplificação e processamento de sinal suporte qualquer outra linguagem que tenha comunicação com os estados lógicos da porta de comunicação de dados paralela ou “Centronix”. Os dados são salvos em arquivos “.dat” para poderem ser processados em programas do tipo Excel ou Origin. O programa está listado no Apêndice.

3.12 - Medida da dependência do número de contagens em função da largura de pulso do sinal dos detectores

Foi observado no sistema contador de pulsos, composto pelo computador e do programa de contagem e construção do gráfico de contagens pelo tempo, uma dependência do número de contagens com a largura de pulso do sinal dos detectores. Para ser aferida a largura ideal destes pulsos para que houvesse estabilidade do sistema de contagens foi montado o arranjo mostrado na Figura 3.21. O circuito eletrônico entre o gerador de pulsos e o computador é o estágio final da unidade de amplificação e processamento de sinal.

O equipamento necessário para estas medidas foram:

3.13 – Medidas de eficiência de contagens absoluta no fotopico e eficiência absoluta total

As medidas de eficiência absoluta no fotopico e eficiência absoluta total foram feitas para cada um dos detectores, separadamente, como mostrado na Figura 3.22. Os valores foram obtidos utilizando o controle de supressão da unidade de amplificação e processamento de sinal removendo todo o patamar do espalhamento Compton para as medidas de eficiência absoluta no fotopico e removendo apenas o ruído de fundo para as medidas de eficiência absoluta total. O conversor analógico-digital, ADCAM 918, associado a um segundo computador foi utilizado apenas na localização das regiões do espectro de energia dos fotopicos de cada radioisótopo utilizado para a construção das curvas de eficiência. A entrada do conversor analógico-digital foi ligada ao pino número 6 do circuito integrado CI3 ou do CI7 dependendo do canal do detector em teste na unidade de amplificação e processamento de sinal.

Os equipamentos utilizados foram:

- Fontes radioativas de diversas energias e dimensões pontuais comparadas às do cristal;
- Conversor analógico-digital modelo 918 ADCAM da Ortec;
- Conjunto detector e unidade de amplificação e processamento de sinal desenvolvidos neste trabalho;
- Programa de comunicação, contagem e construção do gráfico de contagens pelo tempo.

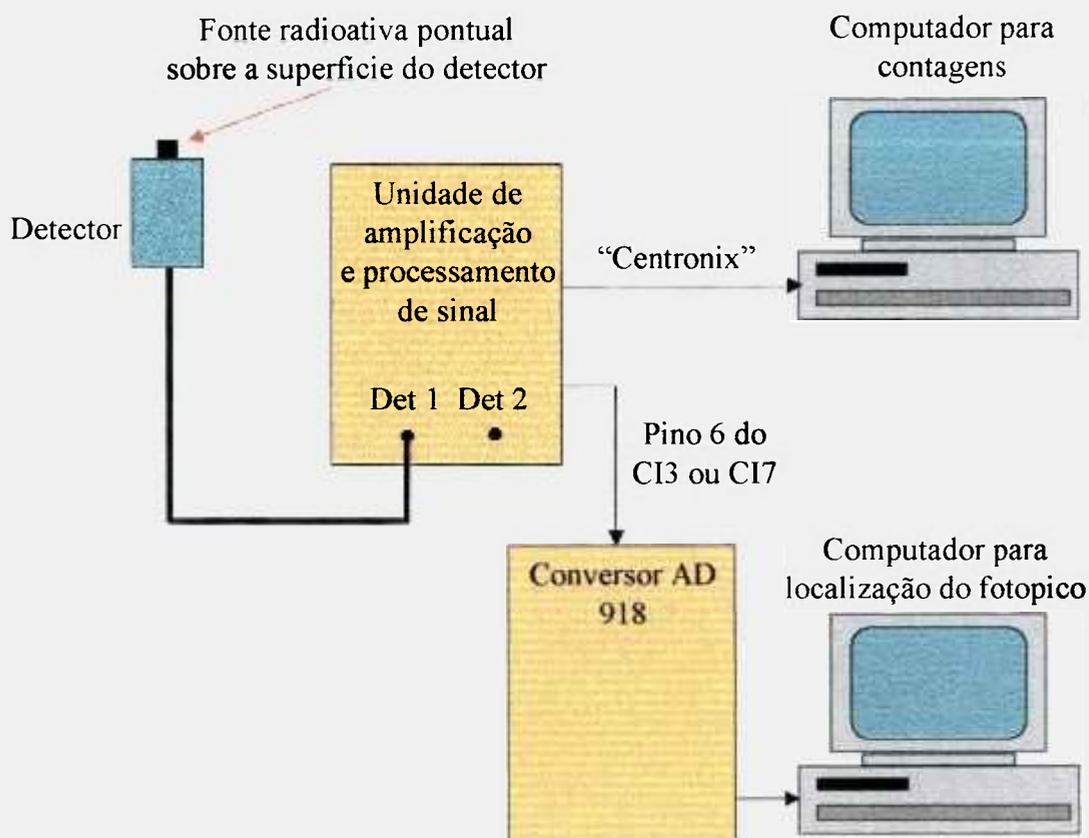


Figura 3.22 – Conjunto para obtenção das eficiências de contagens absolutas no fotopico e total.

3.14 – Obtenção do valor da mínima atividade detectável

Para avaliarmos a mínima atividade detectável, para o ^{82}Br (emissor gama com energias entre 0,5 MeV e 1,5 MeV), do conjunto detector desenvolvido neste trabalho foram pipetadas soluções com várias atividades de 10 ml de KBr com ^{82}Br . Este radioisótopo é comumente utilizado como radiotraçador ^[11,18] em meios aquosos. As soluções contendo material radioativo foram colocadas sobre o detector como é mostrado

na Figura 3.23. A partir da curva contagens pela atividade foi encontrado o ponto de mínima atividade detectável definida pela relação ^[51]:

$$mad = \text{ruído de fundo} + 3\sqrt{\text{ruído de fundo}}$$

Esta relação define a mínima atividade detectável como o número de contagens brutas significativamente diferentes ao nível de 99,7% do número de contagens do ruído de fundo, para os mesmos períodos de tempo de aquisição e integração do número de contagens bruta e do ruído de fundo.

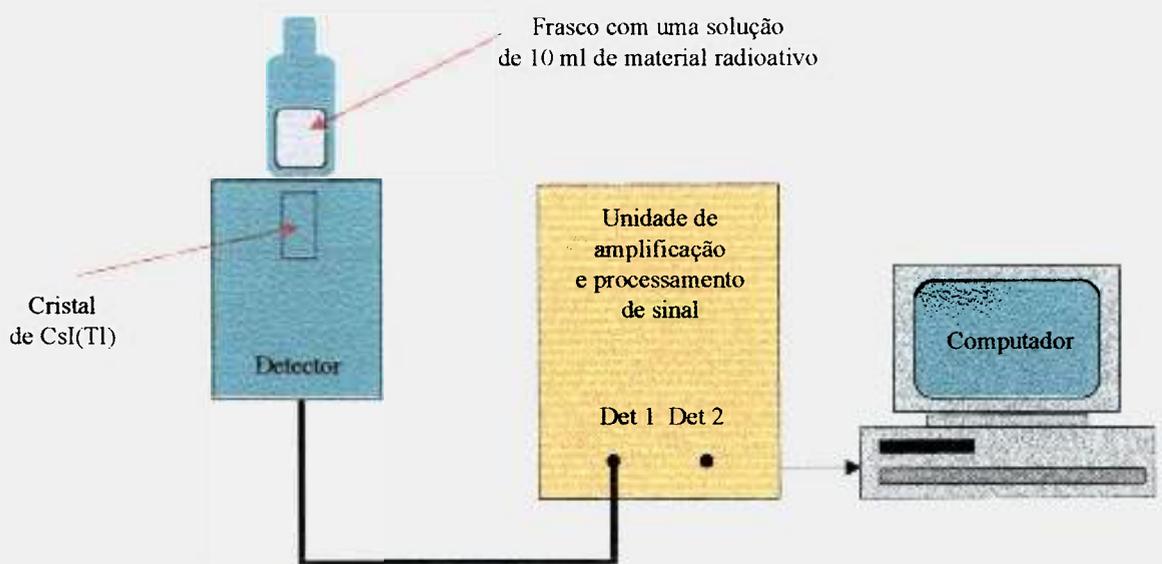


Figura 3.23 – Disposição do conjunto detector e da fonte radioativa para a obtenção do valor de mínima atividade detectável para o radioisótopo utilizado.

3.15 – Utilização do equipamento desenvolvido em uma situação real na indústria

Foi solicitado ao Centro de Tecnologia das Radiações – IPEN, avaliar a vazão em duas tubulações de uma planta industrial utilizando radioisótopos, em razão das dificuldades encontradas por outras técnicas e a elevada velocidade de fluxo. As medidas de vazão, utilizando o método da velocidade de pulso e traçadores radioativos utilizaram os seguintes materiais:

- Duas cargas do radioisótopo ^{82}Br na forma de KBr dissolvido em água com atividade de $26 \cdot 10^6 \text{Bq}$ cada uma (35,6 horas de meia vida);
- Fita adesiva para fixação dos detectores às tubulações;
- Cilindro com ar comprimido para fazer a injeção do radioisótopo na tubulação;
- Computador portátil com o programa de contagem e construção do gráfico de contagens pelo tempo e
- Conjunto de detectores cintiladores e unidade de amplificação e processamento de sinal desenvolvidos neste trabalho.

Um corte da disposição esquemática da localização da tubulação na empresa é mostrada na Figura 3.24. O procedimento para realização das medidas foi o seguinte:

- Os detectores foram colocados na maior distância possível um do outro para evitar a sobreposição temporal dos pulsos em velocidades de pulso elevadas. Na disposição física encontrada na indústria, esta distância foi de 34,5 m;
- Os detectores foram fixados na tubulação com fita adesiva;

- Com os detectores ligados a unidade de amplificação e processamento de sinal e esta ligada ao computador, o programa de contagem foi inicializado com o período de aquisição de contagens ajustado em um segundo;
- O radiotraçador foi injetado na tubulação na forma de um pulso rápido com auxílio do ar comprimido. A distância do ponto de injeção ao primeiro detector deve ser tanto maior quanto for necessária a exatidão da medida ^[30] e para esses ensaios, foi utilizada a distância de 5 metros. O conjunto detector e o computador permaneceram ligados até que foram visualizados na tela os dois pulsos de trânsito do radiotraçador injetado na tubulação;
- O programa foi finalizado e como os dados referentes a taxa de contagens dos pulsos em função do tempo foram simultaneamente armazenados em arquivos do tipo “.dat”, estes puderam ser prontamente lidos e melhor interpretados com algum dos programas gráficos disponíveis.

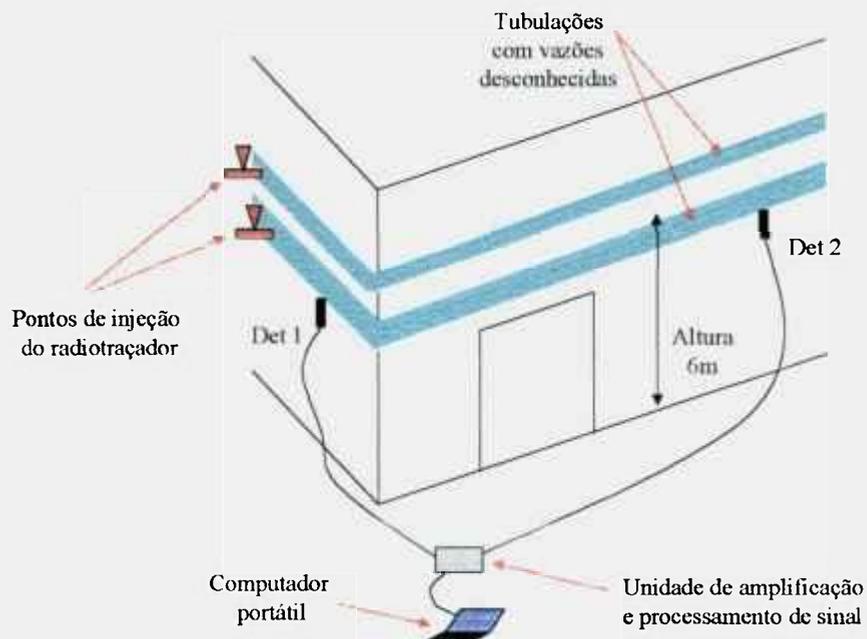


Figura 3.24 – Esquema em corte da disposição da tubulação.

4 – RESULTADOS

4.1 – Medidas do espectro de emissão luminosa

A Figura 4.1 apresenta os espectros de emissão luminosa para os cristais de CsI(Tl) para as concentrações de 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} e 10^{-2} M de tálio.

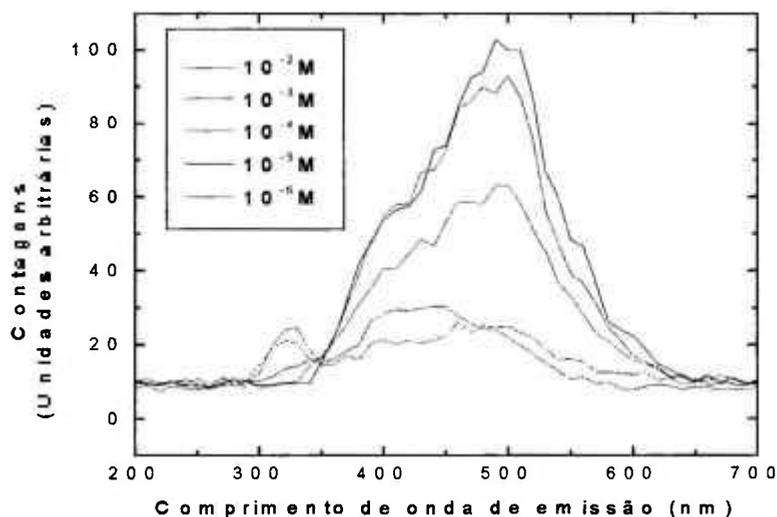


Figura 4.1 – Espectros de emissão de cristais de CsI(Tl) para as concentrações de 10^{-6} a 10^{-2} M de tálio obtidos a partir da excitação com uma fonte radioativa de ^{22}Na .

Os espectros de emissão da Figura 4.1 não foram corrigidos para a resposta espectral do sistema de detecção utilizado. Dessa figura, pode-se observar que:

- Ocorreu um aumento da intensidade de luminescência ao redor de 500nm em função do aumento da concentração de tálio e

- b) Houve uma diminuição na intensidade de luminescência ao redor de 305 a 320nm com o aumento da concentração de tálio.

4.2 – Medidas de altura de pulso

Na Figura 4.2 é mostrada a dependência da altura de pulso com a concentração molar de tálio no cristal de CsI(Tl). Como pode ser observado nessa figura, a altura de pulso aumentou com o aumento da concentração molar dentro do intervalo de 10^{-6} a 10^{-2} M de tálio.

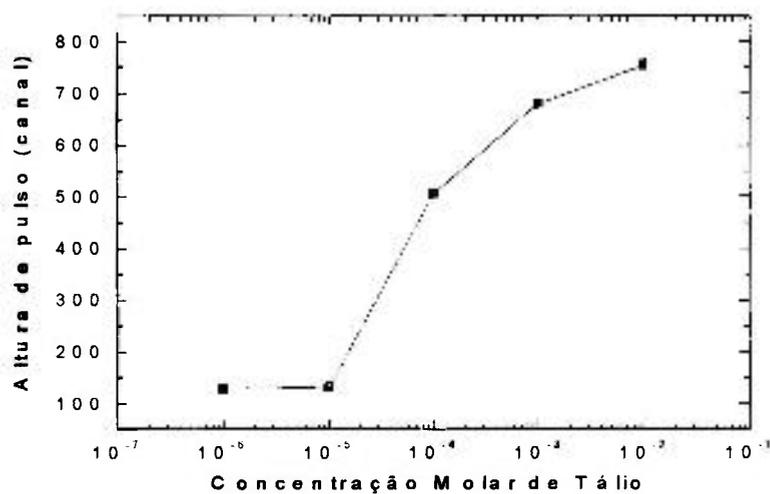


Figura 4.2 – Dependência da altura de pulso com a concentração molar de tálio no cristal de CsI(Tl).

4.3 – Tempo de decaimento de luminescência

As curvas do decaimento de luminescência dos cristais de CsI(Tl) com concentrações de 10^{-6} a 10^{-2} M de tálio são apresentadas na Figura 4.3.

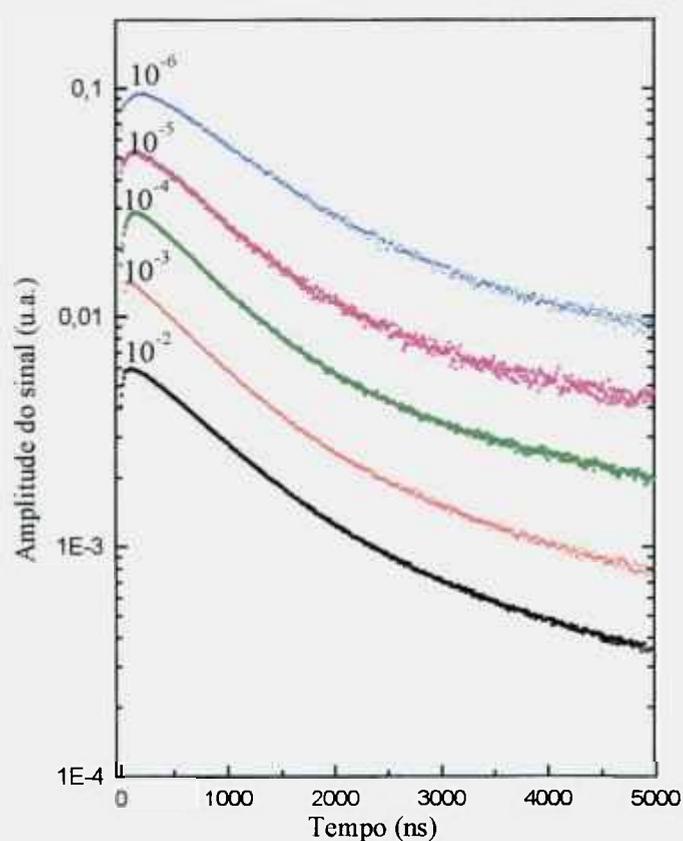


Figura 4.3 – Curvas do decaimentos exponenciais dos cristais de CsI(Tl) para cada concentração de tálio obtidos a partir da excitação com uma fonte de ^{22}Na . As curvas estão dispostas em uma posição apenas comparativa, não tendo correlação com os valores da amplitude dos sinais.

Da Figura 4.3, observar-se que as curvas apresentam comportamentos similares, com tempos de decaimento da ordem de $1\mu\text{s}$.

4.4 – Medida das capacitâncias dos fotodiodos

A Figura 4.4 apresenta os resultados das medições das capacitâncias dos fotodiodos em função da tensão reversa aplicada sobre eles. Os fotodiodos embora do mesmo modelo e lote, foram separados em dois grupos em função dos valores de capacidades encontradas.

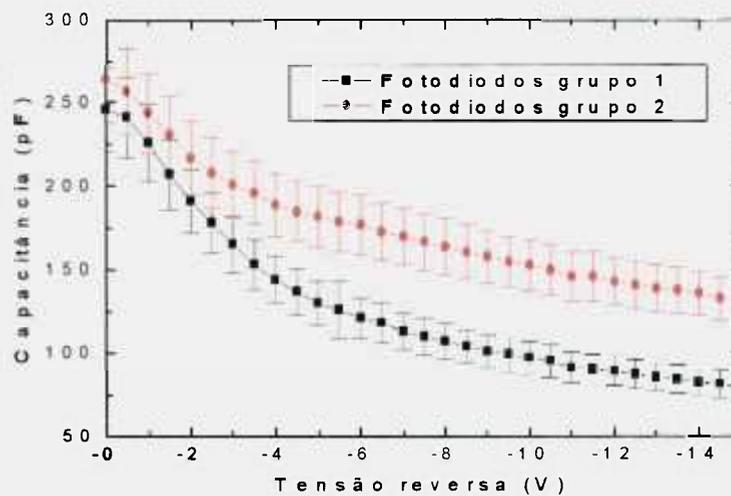


Figura 4.4 – Dependência da capacitância dos fotodiodos com a tensão reversa aplicada.

As seguintes características do conjunto de fotodiodos testados podem ser inferidas da Figura 4.4:

- Quando não existia polarização reversa aplicada sobre os fotodiodos suas capacitâncias foram semelhantes;

- b) Com polarização reversa, ao longo dos valores de tensão disponíveis para o trabalho, um grupo de fotodiodos apresentou capacitâncias menores que os demais e foram chamados de grupo 1 e os outros de grupo 2.

4.5 – Características do conjunto detector

4.5.1 – Níveis de ruído associados aos tipos de acoplamento e grupo de fotodiodos utilizados

A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para o ruído, expressos em keV, na saída analógica da unidade de amplificação e processamento de sinal, desde a inserção do pré-amplificador a cada componente que foi sendo agregado para formar o conjunto detector. A unidade de amplificação e processamento de sinal foi utilizada sem o resistor R2 e o capacitor C3. A remoção destes dois componentes teve como objetivo manter a largura dos pulsos em aproximadamente $2\mu\text{s}$, que foi o valor que permitiu melhor resolução do conjunto detector.

Tabela 4.1 – Quadro comparativo do ruído, na saída analógica da unidade de amplificação e processamento de sinal, desde a introdução do pré-amplificador até os demais componentes adicionados a ele que constituíram o conjunto detector.

Elemento inserido no circuito	Ruído (keV)
Pré-amplificador	30
Pré-amplificador, circuito de polarização reversa e capacitor de acoplamento	60
Pré-amplificador, circuito de polarização reversa, capacitor de acoplamento e fotodiodo do grupo 1	110
Pré-amplificador, circuito de polarização reversa, capacitor de acoplamento e fotodiodo do grupo 2	200
Pré-amplificador e fotodiodo do grupo 1 ou 2 sem o circuito de polarização reversa	150

4.5.2 – Características do conjunto fotodiodo, pré-amplificador e unidade de amplificação e processamento de sinal para a condição de melhor relação sinal-ruído

A Figura 4.5 apresenta os espectros de energia, a Figura 4.6 a dependência da altura de pulso com a energia e a Tabela 4.2 os valores percentuais de resolução. Estes resultados foram obtidos com o conjunto detector formado por:

- Fotodiodo do grupo 1 e cristal de CsI com 10^{-2} M de tálio;
- Pré-amplificador esquematizado na Figura 3.16 e
- Unidade de amplificação e processamento de sinal, esquematizada na Figura 3.20 onde foram suprimidos o resistor R2 e o capacitor C3. A saída do sinal analógico foi obtida no pino 6 do circuito integrado IC3, que está disponível no painel posterior do equipamento desenvolvido.

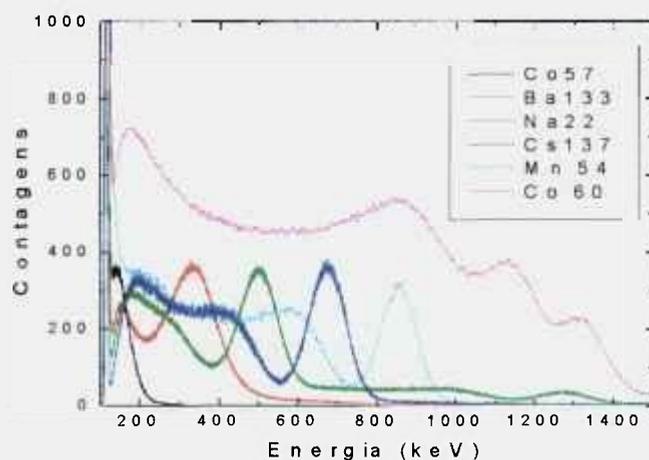


Figura 4.5 – Espectros de energia para as linhas de emissão gama de diversos radioisótopos normalizados em contagens nos fotopicos, acumulados por 300s cada, para um ou uns dos fotopicos existentes.

Dos espectros de energia da Figura 4.5, verificou-se que:

- a) O nível de ruído do conjunto, da ordem de 110keV limitou a detecção de energias menores que estas e
- b) O cristal de CsI(Tl) no volume utilizado, 2,5cm³, não foi suficiente para uma completa interação com fótons gama de energias elevadas como é visto na elevada amplitude de contagens do patamar do espalhamento Compton em relação aos fotopicos para os fótons do Co⁶⁰.

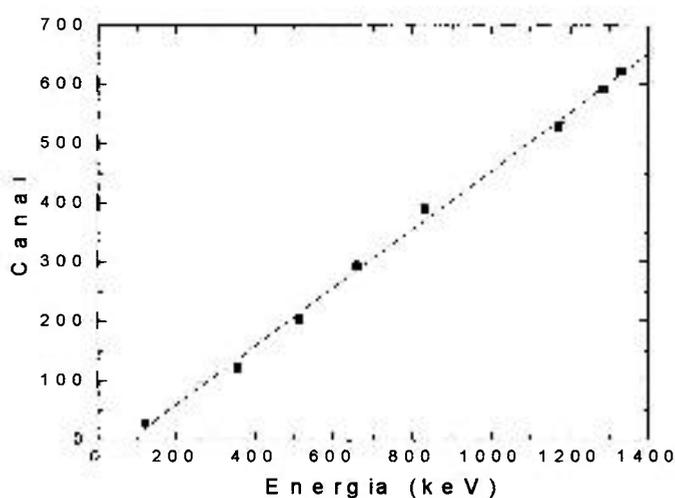


Figura 4.6 – Dependência da altura de pulso com a energia do fóton gama incidente.

Pode-se observar da Figura 4.6 que a altura de pulso do conjunto detector apresentou boa linearidade com a energia para as energias dos radioisótopos medidos.

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados da resolução para as energias dos fótons gama emitidos pelos radioisótopos ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn e ²²Na.

Tabela 4.2 – Resolução em energia para o conjunto detector, pré-amplificador e unidade de amplificação e processamento de sinal nas energias de emissão dos fótons gama de alguns radioisótopos.

Radioisótopo	Energia (keV)	Resolução (%)
^{22}Na	511	19
^{137}Cs	662	13
^{54}Mn	835	11
^{22}Na	1275	9

4.5.3 – Características do conjunto detector utilizando um cabo único para alimentação e sinal

Os conjuntos detectores esquematizados nas Figuras 3.17 e 3.18 foram projetados com uma configuração eletrônica onde o sinal de saída compartilha o mesmo cabo da alimentação do pré-amplificador, simplificando a cabeaço dos detectores à unidade de amplificação e processamento de sinal. Para estudar os efeitos de possíveis comprometimentos que estas alterações possam ter causado, foram medidos os valores de resolução para duas energias de fótons gama, utilizando o esquema da Figura 3.22. As medidas levaram em conta também o grupo de fotodiodos utilizados. A Tabela 4.3 mostra os valores de resolução obtidos para as diversas configurações do conjunto detector testadas.

Tabela 4.3 – Variação da resolução em energia do conjunto detector em função do grupo de fotodiodos e da configuração do circuito de alimentação e sinal utilizados.

Fotodiodo	Resolução em 662keV	Resolução em 835keV
Grupo 1, alimentação isolada do sinal	13%	11%
Grupo 2, alimentação isolada do sinal	24%	20%
Grupo 1, alimentação junto com o sinal	25%	18%
Grupo 2, alimentação junto com o sinal	27%	21%

Os resultados obtidos na Tabela 4.3 comparam o decréscimo em resolução antes e depois das modificações para a utilização de um cabo único para sinal e alimentação. Como as medidas foram feitas objetivando resolução, primeiramente foi retirado o capacitor C3 do circuito. Mesmo nesta configuração, a largura de pulso subiu de 2 μ s para 7 μ s com a utilização do cabo único. A utilização do capacitor C3 no circuito não alterou as medidas de resolução que apresentaram valores percentuais acima de 20%.

Dos resultados observados na Tabela 4.3 pode-se observar que:

- a) Os valores percentuais de resolução aumentaram com a utilização de um cabo único para conduzir sinal e alimentação;
- b) Os fotodiodos do grupo 2, utilizando o circuito elétrico com sinal separado da alimentação, degradaram a resolução na mesma proporção que os fotodiodos do grupo 1 utilizando um cabo único para sinal e alimentação;
- c) Com a degradação da resolução pela utilização de um cabo único, praticamente não houve diferença entre utilizar fotodiodos do grupo 1 ou 2 e
- d) Para as resoluções com valores percentuais acima de 20%, a introdução do capacitor C3 não provocou alteração nestes valores para as atividades dos radioisótopos medidos.

4.5.4 – Resultado das medidas de eficiências absolutas total e no fotopico

A Figura 4.7 mostra os valores das eficiências de contagem absoluta em várias energias para os fotopicos, enquanto a Figura 4.8, mostra as eficiências de contagem absoluta total para os conjuntos detector e pré-amplificador utilizando os cristais de CsI(Tl) com 10^{-2} M de tálio e montados a partir dos esquemas elétricos das Figuras 3.17 ou 3.18. A única diferença dos resultados entre as duas configurações de pré-amplificadores foi observada utilizando fotodiodos do grupo 1 no circuito elétrico da Figura 3.17, onde a eficiência em 120keV para o fotopico foi 50% maior.

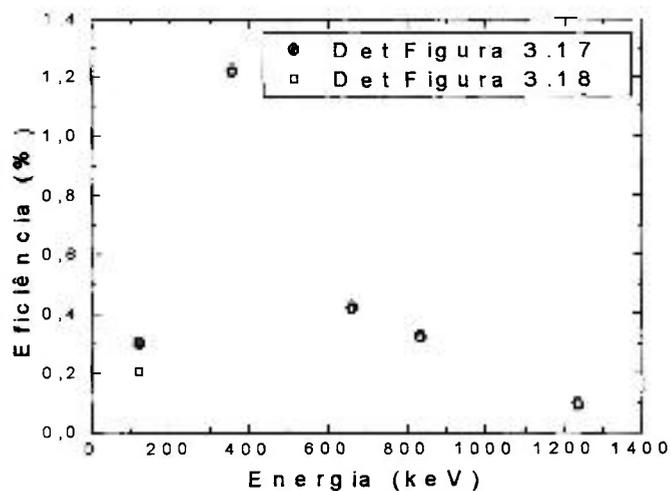


Figura 4.7- Eficiências absolutas de contagens nos fotopicos.

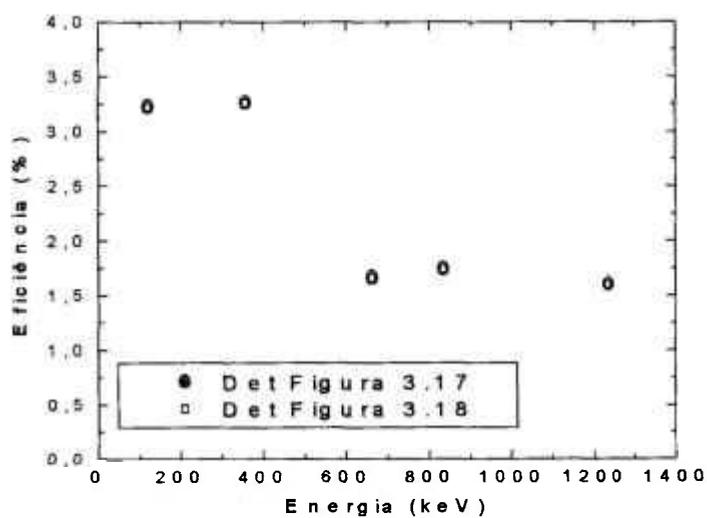


Figura 4.8 – Eficiências absolutas de contagens totais.

Neste trabalho, os valores efetivamente procurados de eficiência foram as eficiências absolutas totais, tendo sido as eficiências no fotopico úteis apenas como caracterização do conjunto detector.

A Figura 4.9 apresenta um dos conjuntos detectores finalizado com o circuito eletrônico e detector removidos para uma melhor visualização.



Figura 4.9 – Aspecto final do conjunto detector e pré-amplificador, removidos para melhor visualização. O recipiente que contém o detector é revestido internamente com espuma para proteção mecânica do conjunto.

4.5.5 – Mínima atividade detectável

A Figura 4.10 mostra a curva que possibilita inferir o resultado da mínima atividade detectável para a solução de KBr com ^{82}Br .

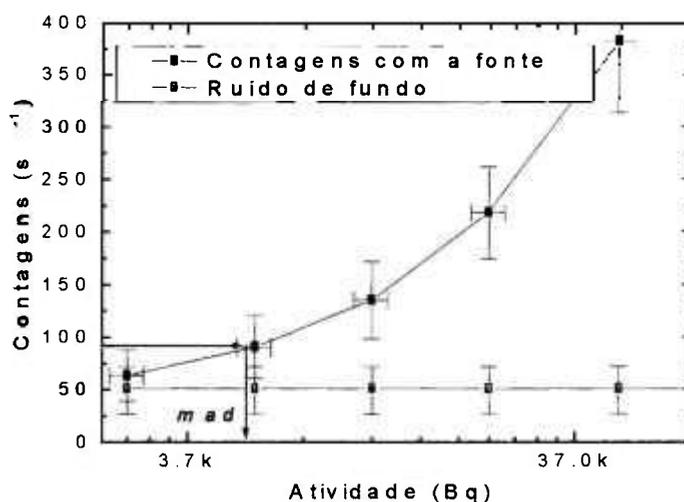


Figura 4.10 – Curva de contagens por atividade do sal de KBr, dissolvido em água e marcado com ^{82}Br , onde foi obtido o valor de 5,18 kBq para o valor de mínima atividade detectável.

4.6 – Unidade de amplificação e processamento de sinal

A Figura 4.12 mostra a unidade de amplificação e processamento de sinal juntamente com os detectores e cabos de ligação e na Figura 4.13 a unidade de amplificação e processamento de sinal aberta para uma melhor visualização da disposição interna dos componentes. Na Figura 4.13 podem ser observadas as baterias que foram fixadas na tampa inferior da caixa; a esquerda é mostrada a tampa superior que suporta toda a eletrônica, bem como os controles e conectores frontais e posteriores. Embora necessárias, somente durante os testes, foram incluídas as saídas analógicas, pinos 6 dos CI3 e CI7 na tampa posterior desta unidade para facilitar as medições, bem como uma chave interna que remove o resistor R2 e o capacitor C3.



Figura 4.12 – Unidade de amplificação e processamento de sinal, juntamente com os detectores, cabos de ligação e de comunicação que constituem o equipamento desenvolvido neste trabalho.

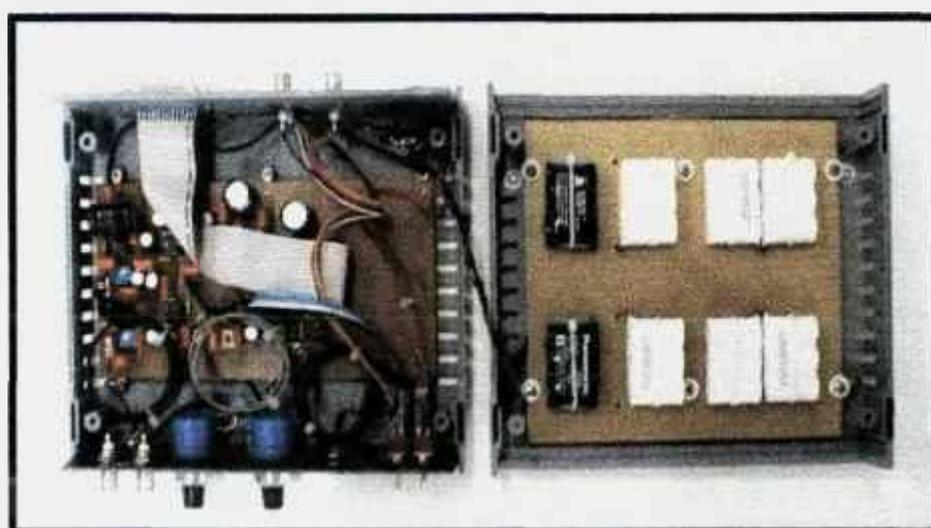


Figura 4.13 – Unidade de amplificação e processamento de sinal com a tampa superior removida para uma melhor visualização da disposição interna dos componentes.

4.7 – Programa de comunicação, contagem e construção do gráfico de contagens em função do tempo

No desenvolvimento do programa que realizou as funções de comunicação com a unidade de amplificação e processamento de sinal, contagens dos pulsos e construção do gráfico de contagens em função do tempo na tela do computador, o item que mereceu atenção especial foi a não linearidade apresentada pelo contador de pulsos. Foi observado que esta configuração de contador apresentava uma dependência do número de contagens com a largura do pulso presente na entrada da porta “Centronix” do computador. Esta dependência é apresentada na Figura 4.14.

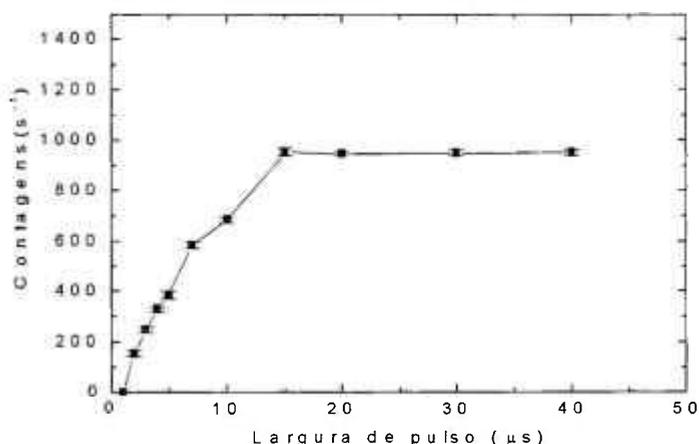


Figura 4.14 – Dependência do número de contagens para diversas larguras a meia altura do pulso na porta de entrada “Centronix” do computador. Para todas as larguras a taxa de pulsos na entrada é de 1000 pulsos por segundo.

A partir do gráfico da Figura 4.14 foi observado que o número de contagens efetuadas pelo programa deixa de ser dependente com a largura do pulso para valores de largura a meia altura maiores que 15 μs .

4.8 – Resultados obtidos na validação do equipamento em uma situação real na indústria

As Figura 4.15 e 4.16 apresentam as formas dos pulsos de trânsito do radiotraçador injetado nas tubulações para as medidas de vazão pelo método de velocidade de pulso em uma situação real como descritas na seção 3.15.

Os pulsos de trânsito do radiotraçador injetado na tubulação de $322,69 \text{ cm}^2$ são mostrados na Figura 4.15.

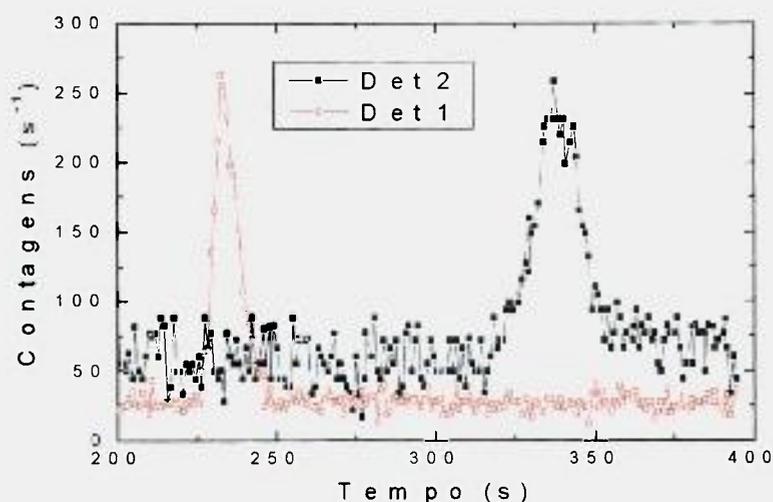


Figura 4.15 – Pulsos de trânsito do radiotraçador na tubulação de $322,69 \text{ cm}^2$.

A Tabela 4.4 apresenta um quadro comparativo com os resultados obtidos dos dois métodos utilizados neste trabalho para encontrar o tempo de trânsito na tubulação de $322,69 \text{ cm}^2$ e obter a vazão procurada.

Tabela 4.4 – Comparação entre os valores obtidos do tempo de trânsito pelo valor de pico e pelo método de integração na tubulação de 322,69 cm².

Método	Pulso 1 (s)	Pulso 2 (s)	Tempo de trânsito (s)	Vazão (l/s)
Valor de pico	233,4	337,2	103,8	10,7
Integração	235,2	341,7	106,5	10,5

Os pulsos de trânsito do radiotraçador, na tubulação de 166,0 cm² são mostrados na Figura 4.16.

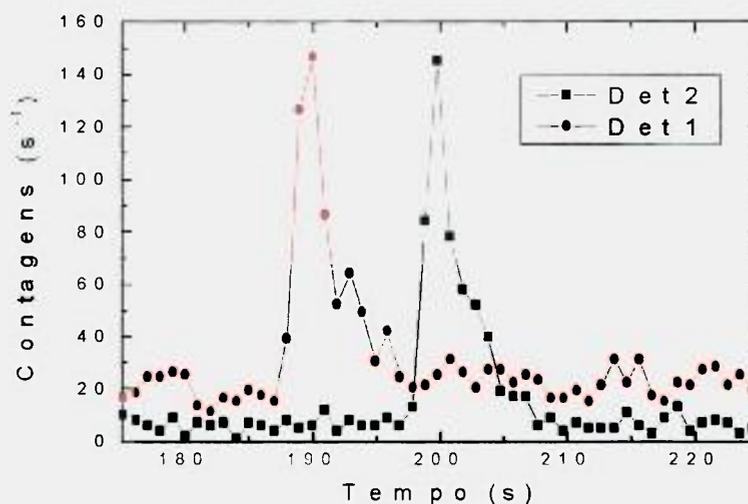


Figura 4.16 - Pulsos de trânsito do radiotraçador na tubulação de 166,0 cm².

A Tabela 4.5 apresenta um quadro comparativo com os resultados obtidos dos dois métodos para encontrar o tempo de trânsito na tubulação de 166,0 cm².

Tabela 4.5 - Comparação entre os valores obtidos do tempo de trânsito pelo valor de pico e pelo método de integração na tubulação de 166,0 cm².

Método	Pulso 1 (s)	Pulso 2 (s)	Tempo de trânsito (s)	Vazão (l/s)
Valor de pico	189,9	199,8	9,9	57,8
Integração	189,5	201,2	11,7	48,9

Como pode ser observado dos resultados da Tabela 4.4, que apresenta os resultados na tubulação com seção de 322,69 cm², o valor percentual da diferença entre o tempo de trânsito medido entre valores de pico e pelo método da integração diferiram de apenas 2,5%. No entanto, para a tubulação com seção de 166,0 cm², a diferença percentual entre os tempos de trânsito encontrados a partir dos valores de pico e utilizando o método da integração foi de 15,4%, como pode ser verificado a partir dos valores da Tabela 4.5.

5 – DISCUSSÃO

O desenvolvimento deste trabalho teve início na caracterização dos cristais de CsI(Tl) com concentrações de tálio variando de 10^{-6} a 10^{-2} M. Três bandas de luminescência centradas em torno de 315, 420 e 550nm são comumente encontradas no cristal de CsI(Tl) [52,53]. No entanto, neste trabalho a emissão ao redor de 315nm foi observada somente para cristais dopados com baixas concentrações de tálio (menores que 10^{-4} M). Para concentrações de tálio acima de 10^{-4} M a transmissão óptica do cristal abaixo de 320nm é praticamente zero. Nesses comprimentos de onda, as emissões de luminescência são absorvidas pela presença do tálio na rede cristalina, e acima de 400nm não são observadas diferenças significativas com o aumento da concentração de tálio. Resultados similares foram encontrados por Schotanus [52].

Mais duas outras bandas de emissão foram observadas a 420 e 480nm nos espectros medidos (Figura 4.1). A emissão máxima de luminescência no cristal de CsI(Tl) a 550nm não foi observada em razão da baixa eficiência quântica acima de 480nm da fotomultiplicadora utilizada. A emissão máxima de luminescência a 550nm foi encontrada por alguns autores [52,53], fazendo-se a correção com o espectro de eficiência quântica da fotomultiplicadora. Neste trabalho os espectros obtidos não foram corrigidos com o sistema de detecção utilizados (fotomultiplicadora mais monocromador). A intensidade de luminescência ao redor de 480nm, aumentou em função do aumento da concentração de tálio, para o intervalo de concentrações entre 10^{-6} a 10^{-2} M indicando não ter ocorrido saturação da concentração do dopante dentro deste intervalo, bem como absorção significativas nos comprimentos de onda ao redor de 400nm.

Da literatura ^[52,53] é conhecido que a emissão máxima a 550nm é atribuída a luminescência do Tl^+ , enquanto o pico a 420nm é originado da luminescência associada a presença da vacância I^- e outros defeitos na rede cristalina; por sua vez a emissão a 315nm corresponde a luminescência intrínseca, originada do CsI puro.

O aumento da eficiência de luminescência, com o aumento da concentração de tálio, foi comprovada no número maior de contagens obtidas nos espectros de emissão (Figura 4.1) e pelo aumento da altura de pulso, como visto no gráfico da altura de pulso (Figura 4.2).

As curvas de decaimento de luminescência (Figura 4.3) não apresentaram diferenças significativas para as várias concentrações de tálio nos cristais avaliados. Esses resultados para excitação com raios gama também foram observados por Schotanus ^[52]. A partir da inclinação das curvas de decaimento puderam ser inferidos os tempos de decaimento, situados ao redor de $1\mu s$. Desses resultados observou-se que os tempos de decaimento em função da concentração não constituíram um elemento de escolha da concentração do dopante no cristal para este trabalho.

Com os resultados das medidas de espectro de emissão (Figura 4.1), altura de pulso (Figura 4.2) e das curvas de decaimento de luminescência (Figura 4.3), o cristal de CsI com $10^{-2}M$ de tálio foi selecionado para ser utilizado com o fotodiodo por:

- a) Apresentar a melhor sobreposição entre o seu espectro de emissão com o espectro de eficiência quântica do fotodiodo;
- b) Possibilitar a obtenção da maior altura de pulso e

c) Possuir o tempo de decaimento similar aos demais cristais com outras concentrações.

Os fotodiodos S3590 da Hamamatsu utilizados neste trabalho têm um valor típico de capacidade ^[35] de 40pF com 70V de polarização reversa. Os testes revelaram dois comportamentos distintos para os detectores construídos com esses fotodiodos. Ao serem utilizados pré-amplificadores idênticos, mas com diversos fotodiodos do mesmo modelo, os resultados a nível de ruído total eram diferentes. O estudo da dependência da capacitância desses fotodiodos com a tensão reversa (Figura 4.4), mostrou que dentro de um mesmo lote de fotodiodos existiam dois grupos com características capacitivas distintas. O grupo de fotodiodos que apresentaram menores valores de capacidade com a tensão reversa foram denominados grupo 1 e os com maiores valores de grupo 2.

O grupo de fotodiodos com menores capacidades sobre polarização reversa foram os que permitiram a construção de detectores com o menor ruído total. Os valores de tensão reversa utilizados foram os mais adequados dentro das condições de portabilidade e tensão das baterias utilizadas. Como o trabalho desenvolvido não visou obter a melhor resolução, não foram estudados os valores de tensão reversa que propiciassem a menor capacidade aos fotodiodos.

O projeto eletrônico do pré-amplificador procurou obter um baixo nível de ruído para os fotodiodos disponíveis. Este estudo inicialmente levou ao desenvolvimento de um pré-amplificador e detector em uma configuração convencional (Figura 3.16), que foi sendo construído e avaliado em partes para o correto acompanhamento do comportamento do ruído produzido em cada componente que era associado ao circuito.

Nesse estudo observou-se que o circuito integrado escolhido como pré-amplificador, CS-AMP 2 ou CS-520 ambos da Soshin, juntamente com todos os estágios da unidade de amplificação e processamento de sinal são responsáveis pela produção de ruído com um equivalente em keV de 30keV. A utilização da medida de ruído em keV ^[54] possibilitou a imediata identificação do limite inferior de detecção em energia que o sistema vai obtendo diante das modificações introduzidas. Desta forma, pode-se observar que apenas o circuito eletrônico, sem qualquer elemento de detecção, já estaria limitando as energias detectadas para valores acima de 30 keV. Esta consideração é válida somente para os pulsos detectados com os cristais no volume e concentração utilizados neste trabalho, bem como para os fotodiodos S3590.

No desenvolvimento de uma configuração convencional para o conjunto pré-amplificador e detector, foi utilizado o circuito de polarização reversa para o fotodiodo e o capacitor de desacoplamento entre o fotodiodo e o pré-amplificador. Estes componentes acoplados ao pré-amplificador elevaram o ruído a 60keV. Como a entrada do pré-amplificador apresenta alta impedância, qualquer ruído presente neste ponto é amplificado. Esta situação é tão crítica que se utilizarmos em substituição das baterias, uma fonte estabilizada com circuitos integrados da série $\mu A78XX$ este ruído sobe para 80keV, mesmo tomando todos os cuidados de desacoplamento deste estabilizador sugerido pelo manual do fabricante ^[28].

Com a introdução de um fotodiodo do grupo 1 no circuito, o ruído foi elevado a 110keV e para os fotodiodos do grupo 2 a 200keV. Este ruído maior é proveniente da maior capacidade que os fotodiodos do grupo 2 apresentam em relação ao grupo 1 para a tensão reversa disponível no circuito. As medidas de capacidade também foram

confirmadas pela utilização dos fotodiodos diretamente acoplados, que apresentaram o mesmo nível de ruído para os dois grupos, concordando com o resultado apresentado de capacidades semelhantes para os fotodiodos sem tensão reversa.

As medições do nível de ruído dos fotodiodos disponíveis, mostraram para o caso no qual o detector seja construído com o intuito de se realizar espectroscopia em energia [49], que é recomendável: a) utilizar fotodiodos com a menor capacidade possível; b) prover o circuito de polarização reversa de uma boa filtragem para ruídos e c) polarizar o fotodiodo com a tensão reversa que propicie a menor capacidade, respeitando os limites máximos de tensão de ruptura do fotodiodo.

A utilização do pré-amplificador e fotodiodo do grupo 1 com polarização reversa (Figura 3.16), apresentou resultados satisfatórios para realização de espectroscopia em energia (Figura 4.5, Figura 4.6 e Tabela 4.2). Deve ser ressaltado que a tensão reversa para o fotodiodo nessas medidas, fornecida pela unidade de amplificação e processamento de sinal, é suprida por baterias e que os resultados de resolução foram obtidos com os cristais de $2,5\text{cm}^3$. A literatura apresenta resultados melhores de resolução [22,50], mas estes foram obtidos com maiores tensões reversas aplicadas aos fotodiodos, e para um mesmo sistema eletrônico desenvolvido, comparativamente cristais com menores dimensões entre si, propiciam melhores resultados na resolução.

O projeto foi desenvolvido para utilizar um cabo único para sinal e alimentação do pré-amplificador em virtude das necessidades de simplificação de manutenção e eventuais substituições do comprimento dos cabos em função do trabalho a ser realizado em campo. As medições realizadas com cabos curtos foram semelhantes às realizadas com cabos de

30 metros. Como não houve perdas no número de contagens para os comprimentos de cabos utilizados e como a largura dos pulsos detectados da ordem de $7\mu\text{s}$ são várias ordens de grandeza maiores que o tempo de propagação do pulso no cabo, estes resultados indicam a possibilidade de utilizar comprimentos de cabo ainda maiores, sem grandes perdas de sinal ou contagens indevidas em razão de ondas refletidas no cabo.

A utilização de um cabo único para sinal e alimentação ocasionou um decréscimo na resolução. Esta redução teve origem no alargamento do pulso produzido pela rede RC que separa o sinal da alimentação, da capacitância distribuída ao longo do cabo e ao ruído introduzido pela linha de alimentação. Este ruído é decorrente das correntes produzidas na polarização do circuito integrado do pré-amplificador e do sinal de saída do pré-amplificador no mesmo cabo. A presença deste sinal mesmo após a filtragem do circuito de polarização reversa na entrada do pré-amplificador obrigou a redução do valor do resistor entre a entrada e saída do pré-amplificador para evitar oscilações no circuito.

Para a utilização do pré-amplificador e detector na configuração com cabo único para sinal e alimentação foram avaliadas as versões de pré-amplificador e fotodiodo com polarização reversa (Figura 3.17) e pré-amplificador e fotodiodo acoplados diretamente sem polarização reversa (Figura 3.18). A diferença entre os dois circuitos só foi observada em energias da ordem de 120keV , onde o conjunto utilizando fotodiodo do grupo 1 com polarização reversa obteve melhor eficiência no fopico nesta região de energia. A escolha final do conjunto pré-amplificador e detector recaiu na versão com acoplamento direto do fotodiodo sem polarização reversa. As vantagens observadas nesta versão foram:

- a) Os níveis de ruído para fotodiodos do grupo 1 e 2 foram os mesmos, da ordem de 150keV, e não comprometeram significativamente as contagens para as energias do radioisótopo utilizado como radiotraçador;
- b) A não existência de polarização reversa sobre o fotodiodo fez com que a capacidade do fotodiodo não se alterasse com a diminuição da tensão das baterias durante o uso do equipamento. Este comportamento tornou a linha de contagem de ruído de fundo mais estável por um tempo maior durante a descarga das baterias assegurando melhor qualidade as medições e um maior tempo útil de uso do equipamento com as baterias.

Os resultados de eficiência absoluta total (Figura 4.8), apresentaram um comportamento esperado para cristais de pequenas dimensões e de seu número atômico médio, onde em baixas energias foram encontradas as maiores eficiências. Os resultados para a eficiência absoluta no fotopico (Figura 4.7), mostraram uma redução da eficiência para fótons com energias próximas de 120keV. Este valor foi cerca de 50% melhor nesta energia quando foram usados fotodiodos do grupo 1 e polarização reversa. Para esta faixa de energias, era esperada essa baixa eficiência no fotopico, pois o elevado ruído do conjunto se mistura ao sinal detectado e é removido pelo controle de supressão.

Os resultados observados de eficiência absoluta total foram bastante satisfatórios para cintiladores quando comparados com um cálculo teórico citado por Knoll [31], onde um cristal de NaI(Tl) de 83 cm³ acoplado a uma fotomultiplicadora pode apresentar uma eficiência absoluta máxima da ordem de 48% em baixas energias. O conjunto finalizado apresentou cerca de 3,2% de eficiência absoluta em baixas energias, o que não deixa de ser um resultado significativo, considerando o volume de 2,5 cm³ do cristal de CsI(Tl) utilizado.

O estágio pré-amplificador é sensível a carga e apresenta elevada impedância de entrada. Esta configuração torna o conjunto sujeito a ruídos microfônicos que elevam a contagem erroneamente. Este tipo de ruído foi minimizado revestindo o recipiente cilíndrico que contém o conjunto detector, internamente com espuma e mantendo o circuito eletrônico do pré-amplificador bem ao centro. Esta disposição reduziu as capacidades parasitas entre a entrada do pré-amplificador e o recipiente metálico que constitui a blindagem elétrica do detector (Figura 4.9), diminuindo os efeitos da variação desta capacidade por vibrações mecânicas no conjunto.

O circuito eletrônico da unidade de amplificação e processamento de sinal utilizou circuitos básicos como descritos na seção 2.8. No equipamento desenvolvido foram incluídas, para facilitar as medidas de espectroscopia em energia, as saídas analógicas dos dois canais de detecção e uma chave interna que remove a alimentação conjunta com o sinal e altera a constante de tempo de integração, removendo os capacitores C3 e C8 no circuito de conformação de sinal. A remoção do capacitor C3 ou C8, dependendo do canal utilizado faz com que o pulso detectado após o primeiro amplificador operacional apresente uma largura a meia altura entre 2 a 3 μ s, valores estes que propiciaram os melhores resultados na resolução. Deve ser lembrado que na configuração de um cabo único para sinal e alimentação, a largura do pulso a meia altura após o primeiro operacional fica em torno de 7 μ s reduzindo a resolução em energia do conjunto.

Para a unidade de amplificação e processamento de sinal, foram usados os amplificadores operacionais LF357 da Motorola que apresentam 20 MHz de largura de banda. Para observar o comportamento da unidade de amplificação e processamento de sinal, operando com uma largura de banda menor, estes integrados foram substituídos

pelos LF356, da Motorola com 5 MHz de largura de banda. Apesar de não ter havido aumento do ruído total, como as amplitudes do sinal diminuem com este último amplificador operacional, em baixas energias, praticamente, não é possível observar contagens e a eficiência absoluta total na detecção diminui a menos da metade dos valores obtidos com o LF357. Observou-se, também, com o decréscimo da largura de banda, a deterioração da resolução, tornando impossível distinguir qualquer fotopico.

O programa desenvolvido efetua a leitura dos estados lógicos presentes na entrada da porta de comunicação paralela do computador associando um resultado numérico para cada conjunto de estados que encontra. Este valor numérico permite ao programa identificar se ocorreram pulsos ou não e contá-los. Nos ensaios realizados foi encontrada uma dependência da largura do pulso na entrada da porta paralela com a eficiência de contagem (Figura 4.14). A partir do comportamento desta curva, foi escolhido o tempo de integração na unidade de amplificação e processamento de sinal de forma que fosse obtida a largura de pulso desejada. A unidade de amplificação e processamento de sinal produz este alargamento do pulso por meio do tempo de integração propiciado pelo capacitor, C3 ou C8 dependendo do canal de detecção utilizado, após o primeiro amplificador operacional. Com a inclusão desses capacitores, os pulsos passaram a ter uma largura a meia altura da ordem de 20 μ s, permitindo ao programa de contagem operar na sua região linear.

Essa largura de pulso elevada não comprometeu o conjunto detector quando utilizado na medida de vazão, pois como já descrito, a atividade injetada deve ser a menor possível e o número de contagens nestas situações é muito inferior ao máximo que pode ser alcançado com esta largura de pulso.

Com os detectores e a unidade de amplificação e processamento de sinal finalizados, fornecendo os pulsos detectados com larguras temporais ao redor de $20\mu\text{s}$, é que foram realizadas as medidas de eficiência absoluta total e no fotopico, e a determinação da mínima atividade detectável para um radioisótopo de ampla utilização como radiotraçador.

A mínima atividade detectável (Figura 4.10), estabeleceu uma ordem de grandeza possível de ser detectada pelo conjunto para o radioisótopo ^{82}Br , normalmente utilizado como radiotraçador. O formato volumétrico da fonte foi escolhido para simular uma fonte dispersa no meio.

O equipamento foi utilizado em uma situação real na indústria e não apresentou qualquer dificuldade para seu uso. A atividade injetada de 26.10^6Bq foi suficiente para detectar os pulsos de trânsito, onde o valor escolhido para a atividade foram valores propostos pelo grupo de hidrologia do Centro de Tecnologia das Radiações. Esses valores foram estimados para o experimento caso fossem utilizados detectores Geiger-Müller e graficadores, que são utilizados rotineiramente nesses trabalhos. O tamanho compacto dos detectores e da unidade de amplificação e processamento de sinal juntamente com o computador portátil constituíram um conjunto fácil de transportar e posicionar no local do ensaio.

Para a disposição da tubulação encontrada na indústria solicitante, a utilização de cabos de grande comprimento entre detectores e a unidade de amplificação e processamento de sinal permitiram que o acompanhamento das medidas fossem feitas do

solo em situação perfeitamente confortável e segura pelo operador, sem a necessidade de permanecer em andaimes.

As contagens obtidas e os períodos de contagens selecionados, possibilitaram que os pulsos de trânsito (Figuras 4.15 e 4.16) fossem corretamente observados. A partir dos valores obtidos das contagens sobre o pulso de trânsito do radiotraçador e do ruído de fundo, pudemos inferir por meio das considerações da mínima atividade detectável ^[51], que uma menor quantidade do radiotraçador poderia ter sido injetada. Não houve disponibilidade de outras cargas de material radioativo para simular os experimentos com atividades menores, mas os cálculos sugerem que valores de atividade quatro vezes menores poderiam ter sido utilizadas. A indicação da possibilidade de utilizar uma atividade quatro vezes menor vem ao encontro dos objetivos de se obter a menor taxa de exposição possível aos trabalhadores.

Para o controle da quantidade de material radioativo despejado na rede de esgoto, a norma para rejeitos radioativos ^[55] permite que sejam descarregadas, no esgoto sanitário, valores de atividade de até $3 \cdot 10^8 \text{Bq/m}^3$ para o ^{82}Br solúvel em água. Admitindo que a empresa trabalhe apenas oito horas por dia e na menor vazão encontrada, a carga de radioisótopo injetada de $26 \cdot 10^6 \text{Bq}$ estará na concentração de $86 \cdot 10^3 \text{Bq/m}^3$ que é uma concentração milhares de vezes menor que o máximo permitido.

Da observação direta do intervalo entre os dois picos dos pulsos de trânsito já foi possível estimar o tempo de trânsito e obter o valor da vazão. Como a aquisição de dados é feita em dois eixos temporais distintos, o sistema propicia que seja utilizado o método da integração que apresenta uma maior exatidão ^[30]. Neste, o valor médio da linha de base é

subtraído de todas as contagens e estas são integradas ao longo do tempo. O tempo correspondente ao ponto central da rampa de subida, devida a integração do pulso de trânsito, é o ponto central que efetivamente deve ser considerado. O método da integração propicia uma maior exatidão porque encontra o ponto onde efetivamente 50% da massa do radiotraçador atravessa a seção da tubulação.

A simples observação dos picos dos pulsos de trânsito pode levar ao erro de utilizar uma região com maior concentração de radiotraçador, que proporcionaria maior número de contagens, mas não seria necessariamente o ponto central do pulso de trânsito. As tabelas com os resultados dos dois métodos utilizados no cálculo dos tempos de trânsito (Tabelas 4.4 e 4.5), mostraram a diferença entre admitir o valor de pico como ponto central e admitir o ponto central da rampa de integração como o valor central do correspondente pulso de trânsito. A menor uniformidade obtida das formas dos pulsos de trânsito na tubulação com seção de $166,0\text{cm}^2$ (Figura 4.16) mostrou que, entre os dois métodos utilizados, podem ser encontrados valores diferentes para o tempo de trânsito. Diante desse resultado, e para que seja encontrado o tempo de trânsito do radiotraçador mais corretamente, o centro do pulso de trânsito deve preferencialmente ser encontrado pelo método da integração. A literatura ^[30] demonstra que para menores atividades do radiotraçador injetado, o método da integração mantém a exatidão, no entanto, para os valores de pico medidos com esta menor atividade, há aumentos consideráveis na incerteza.

Para os ensaios realizados na indústria, o período de aquisição de contagens foi definido em um segundo. Uma melhor conformação dos pulsos de trânsito pode ser obtida reduzindo os períodos de aquisição das contagens. No entanto, essa redução no período de

aquisição apresenta duas limitações: uma primeira de caráter dosimétrico, que ao diminuir o período de aquisição de contagens, faz-se necessário aumentar a quantidade do radiotraçador injetado, para que o número de contagens possibilite uma boa conformação do pulso de trânsito. Esse aumento da atividade pode inviabilizar o trabalho diante das taxas de exposição que os trabalhadores podem vir a receber; e uma segunda de caráter tecnológico, que é definida pelo tempo de leitura do relógio interno do computador^[56]. O programa de contagens acessa o relógio interno do computador a cada 55ms, sendo assim não é possível obter intervalos de aquisição menores que este valor nem obter uma exatidão do eixo temporal melhor que 55ms.

6 – CONCLUSÕES

- a) O uso de detectores de radiação construídos com fotodiodos e cristais de CsI(Tl) é viável em medidas de vazão utilizando radiotraçadores e dentro dos limites de resolução obtidos com cintiladores, para espectrometria de energia;
- b) O conjunto demonstrou melhor robustez mecânica e a vantagem de não precisar utilizar alta tensão;
- c) O sistema com contagens independentes para cada detector, facilidade em utilizar taxas de aquisição em intervalos curtos e o uso da mesma base de tempo assegurou uma excelente separação, conformação e exatidão entre os pulsos de trânsito;
- d) A comunicação via porta paralela do computador assegurou total flexibilidade em utilizar qualquer computador disponível, portátil ou não, sem interferência em suas partes internas;
- e) A total portabilidade do conjunto mostrou-se imprescindível para trabalhos em campo, assegurando qualidade e rapidez aos ensaios e
- f) O equipamento foi validado em uma situação real de uma planta industrial.

APÊNDICE**Programa de comunicação, contagem e construção do gráfico
de contagens em função do tempo**

```
1 REM versão 20/11/2000
2 CLS : SCREEN 8: COLOR 15,0: REM Prepara a tela
5 FOR larg = 3 TO 633: PSET (larg, 11): PSET (larg, 188): NEXT larg
10 FOR comp = 11 TO 188: PSET (3, comp): PSET (633, comp): NEXT comp
25 LOCATE 2, 16: PRINT " Contador-Detector de CsI(Tl)- Fotodiodo de 2 Canais "
27 LOCATE 3, 16: PRINT "          Centro de Tecnologia das Radiações          "
28 LOCATE 4, 16: PRINT "          IPEN/CNEN-SP          "
30 LOCATE 10, 19: PRINT "Iniciando processo de reconhecimento da porta"
40 LOCATE 11, 19: PRINT "          de impressora do computador          "
50 LOCATE 13, 19: PRINT " Caso o reconhecimento esteja demorando "
60 LOCATE 14, 19: PRINT "          desligue a alimentação da unidade de          "
70 LOCATE 15, 19: PRINT "          processamento de sinal          "
80 OUT (&H378), 255: REM Envia tensão aos optoacopladores
100 a = INP(&H379): REM Efetua a leitura da porta de entrada
110 IF a = 56 THEN GOTO 1000: REM Detector 1 contando, envia para contador
(computador tipo 1)
120 IF a = 248 THEN GOTO 1000: REM Detector 2 contando
130 IF a = 184 THEN GOTO 1000: REM Os 2 detectores contando
140 IF a = 120 THEN GOTO 1000: REM Os 2 detectores aguardando
```

```
150 IF a = 63 THEN GOTO 2000: REM Detector 1 contando, envia para computador
(computador tipo 2)
160 IF a = 255 THEN GOTO 2000: REM Detector 2 contando
170 IF a = 191 THEN GOTO 2000: REM Os 2 detectores contando
180 IF a = 127 THEN GOTO 2000: REM Os 2 detectores aguardando
190 IF INKEY$ = "q" THEN GOTO 3000: REM Desvio para encerrar o programa
200 GOTO 100
1000 OUT (&H378),0: CLS : SCREEN 8: COLOR 15,0: REM Prepara a tela
1010 FOR larg = 3 TO 633: PSET (larg, 11): PSET (larg, 188): NEXT larg
1020 FOR comp = 11 to 188: PSET (3, comp): PSET (633, comp): NEXT comp
1022 LOCATE 2, 16: PRINT " Contador-Detector de CsI(Tl)- Fotodiodo de 2 Canais "
1024 LOCATE 3, 16: PRINT "          Centro de Tecnologia das Radiações          "
1028 LOCATE 4, 16: PRINT "          IPEN/CNEN-SP          "
1030 LOCATE 10, 19: PRINT "Digite o nome do arquivo (8 letras no máximo e .dat)"
1040 LOCATE 11, 19: INPUT z$
1050 LOCATE 13, 19: PRINT "Escolha o intervalo entre contagens ( >=.1 segundo)"
1060 LOCATE 14, 19: INPUT intervalo
1070 CLS : SCREEN 8: COLOR 15,0
1080 OUT (&H378), 255: REM Envia tensão aos optoacopladores
1100 OPEN z$ FOR OUTPUT AS #1: REM Cria o arquivo de dados
1200 zeratemp = TIMER: REM Inicializa a contagem de tempo
1500 CLS : FOR larg = 3 TO 633: PSET (larg, 10): PSET (larg, 100): PSET (larg, 188):
NEXT larg
1520 FOR comp = 10 TO 188: PSET (3, comp): PSET (633, comp): NEXT comp
1530 LOCATE 2, 14: PRINT " Contador-Detector de CsI(Tl)- Fotodiodo de 2 Canais "
```

```
1540 LOCATE 3, 14: PRINT "                IPEN/CNEN-SP                "
1550 LOCATE 24, 2: PRINT "detector 2"
1560 LOCATE 12, 2: PRINT "detector 1"
1570 LOCATE 3, 2: PRINT "(q) Encerrar"
1590 d1 = TIMER: REM Inicializa a contagem do intervalo
1600 a = INP(&H379): IF a = 120 THEN GOTO 1600: REM Efetua a leitura da porta de
entrada esperando a mudança de estado
1605 IF INKEY$ = "q" THEN GOTO 3000
1610 IF a = 56 THEN c = c + 1: REM Contador do detector 1
1620 IF a = 248 THEN d = d + 1: REM Contador do detector 2
1630 IF a = 184 THEN c = c + 1: REM Contador se existe pulso nos 2 detectores
1640 IF a = 184 THEN d = d + 1
1710 PSET (6 + t, 85 - d), 14: REM Coloca as contagens no gráfico
1720 PSET (6 + t, 170 - c), 12
1750 IF TIMER < (d1 + intervalo) THEN GOTO 1600
1760 t = t + 1: REM Produz a varredura da tela
1780 WRITE #1, TIMER - zeratemp, c, d: c = 0: d = 0: REM Grava as contagens e a cada
intervalo retorna os contadores a zero
1790 IF t > 625 THEN t = 0: REM Inicializa a nova varredura da tela
1800 IF t = 0 THEN GOTO 1500
1810 GOTO 1590
2000 OUT (&H378),0: CLS : SCREEN 8: COLOR 15,0: REM Prepara a tela
2010 FOR larg = 3 TO 633: PSET (larg, 11): PSET (larg, 188): NEXT larg
2020 FOR comp = 11 to 188: PSET (3, comp): PSET (633, comp): NEXT comp
2022 LOCATE 2, 16: PRINT " Contador-Detector de Csi(Tl)- Fotodiodo de 2 Canais "
```

```
2024 LOCATE 3, 16: PRINT "          Centro de Tecnologia das Radiações  "
2028 LOCATE 4, 16: PRINT "          IPEN/CNEN-SP  "
2030 LOCATE 10, 19: PRINT "Digite o nome do arquivo (8 letras no máximo e .dat)"
2040 LOCATE 11, 19: INPUT z$
2050 LOCATE 13, 19: PRINT "Escolha o intervalo entre contagens ( >=.1 segundo)"
2060 LOCATE 14, 19: INPUT intervalo
2070 CLS : SCREEN 8: COLOR 15,0
2080 OUT (&H378), 255: REM Envia tensão aos optoacopladores
2100 OPEN z$ FOR OUTPUT AS #1: REM Cria o arquivo de dados
2200 zeratemp = TIMER: REM Inicializa a contagem de tempo
2500 CLS : FOR larg = 3 TO 633: PSET (larg, 10): PSET (larg, 100): PSET (larg, 188):
NEXT larg
2520 FOR comp = 10 TO 188: PSET (3, comp): PSET (633, comp): NEXT comp
2530 LOCATE 2, 14: PRINT " Contador-Detector de CsI(Tl)- Fotodiodo de 2 Canais "
2540 LOCATE 3, 14: PRINT "          IPEN/CNEN-SP  "
2550 LOCATE 24, 2: PRINT "detector 2"
2560 LOCATE 12, 2: PRINT "detector 1"
2570 LOCATE 3, 2: PRINT "(q) Encerrar"
2590 d1 = TIMER: REM Inicializa a contagem do intervalo
2600 a = INP(&H379): IF a = 127 THEN GOTO 2600: REM Efetua a leitura da porta de
entrada esperando a mudança de estado
2605 IF INKEY$ = "q" THEN GOTO 3000
2610 IF a = 63 THEN c = c + 1: REM Contador do detector 1
2620 IF a = 255 THEN d = d + 1: REM Contador do detector 2
2630 IF a = 191 THEN c = c + 1: REM Contador se existe pulso nos 2 detectores
```

2640 IF a = 191 THEN d = d + 1

2710 PSET (6 + t, 85 - d), 14: REM Coloca as contagens no gráfico

2720 PSET (6 + t, 170 - c), 12

2750 IF TIMER < (d1 + intervalo) THEN GOTO 2600

2760 t = t + 1: REM Produz a varredura da tela

2780 WRITE #1, TIMER - zeratemp, c, d: c = 0: d = 0: REM Grava as contagens e a cada intervalo retorna os contadores a zero

2790 IF t > 625 THEN t = 0: REM Inicializa a nova varredura da tela

2800 IF t = 0 THEN GOTO 2500

2810 GOTO 2590

3000 OUT (&H378), 0: CLOSE #1: END: REM Apaga a indicação de programa carregado no equipamento

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOTT, W.E.; DEMPSEY, J. C. Review of radiotracer applications in geophysics in the United States of America. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics: proceedings of a symposium on ... held in Prague, 21-25 november, 1966*. Vienna, 1967, p. 111-113.
- [2] PETEU, G.; IVAN, C. LI. NUCLEAR TECHNIQUES IN THE ROMANIAN INDUSTRY. *National Physics Conference*, 30 NOV - 2 DEC 1995, BAIÁ MARE (ROMANIA), 1995. p. 151.
- [3] ANDRE, C.; CHARENTUS, T.; JAUZEIN, M.; MARGRITA, R. Use of radioactive tracers to study the risks of environmental pollution from iron and steel industry wastes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Applications of isotopes and Radiation in Conservation of the Environmental: proceedings of an international symposium on... held in Karlsruhe, 9-13 March, 1992*. IAEA Proceedings Series; p. 271-280.
- [4] CHARTON, J.S. Radioactive tracer technique in process optimization: applications in the chemical industry. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Tracer applications for industrial process optimization: proceedings of a advisory group meeting on ... held in Dubrovnik, 19 -23 October, 1987*. *Isotopenpraxis*, 25(4): p.130-135, 1989.

- [5] EAPEN, A.C.; AGASHE, S.M.; AJMERA, R.L.; YELGAONKAR; V.N. Radiotracer applications in steel, petroleum and maritime industries with significant economic benefits. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Assessment of economic benefits of industrial tracer applications: proceedings of a advisory group meeting on... held in Leipzig, 8-12 May, 1989*. *Isotopenpraxis*, 26(9): p. 424-9, 1990.
- [6] ROCCA, H.C.C. *Determinação de vazamentos em placas de refrigeração de altos fornos*. São Paulo, 1994. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [7] NETTO, J. M.A.; ALVAREZ, G.A. *Manual de Hidráulica*. São Paulo, S.P.: Edgard Blücher Ltda, 1977.
- [8] NOGUEIRA, G.E.C. *Extensão da faixa de velocidades mensuráveis do velocímetro doppler ultra-sônico pulsátil*. São Paulo: 1995. Tese (Doutoramento) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [9] GARDNER, R.P.; ELY, R.L. *Radioisotope measurement applications engineering*. New York, N.Y., Reinhold Pub. Corp., 1967.
- [10] EVANS, G.V.; SPACKMAN, R.; ASTON, M.A.J.; CLAYTON, C.G. Measurement of gas flow by radiotracer methods. In: PETER PEREGRINUS: *Modern Developments in Flow Measurement: Proceedings of a international conference on... held in Harwell*, 1972. London, 1972, p. 242.
- [11] FÖLDIAK, G. *Industrial Application of Radioisotopes*. Budapest, 1986.
- [12] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-NE-3.01, Diretrizes Básicas de Radioproteção*. Rio de Janeiro, DOU, 1988.

- [13] TAYLOR, G. I. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 223: 446, 1954 apud GARDNER, R. P. & ELY, R. L. *Radioisotope measurement applications in engineering*. New York, N.Y., Reinhold, 1967.
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry. Vienna 1990. In: Technical Reports Series No. 316.
- [15] KURTÉN, R., In-plant calibration of magnetic flowmeters in the pulp and paper industries, *Int. J. Appl. Radiat. Isotop.*, v. 28, p. 823-827, 1977.
- [16] KUOPPAMÄKI, R., TURTIAINEN, H., On-site calibration of liquid flow meters using the radiotracer transit time method. *Fluid Flow Measurements*. Int. Symp. Arlington, 1986.
- [17] ISO Report 2975/VII, *International Organization for Standardization*, 1977.
- [18] PLATA, A. *Isotopos en Hidrologia*. Madrid, Espanha.: Editorial Alhambra, S.A., 1972.
- [19] FIORINI, C.; LONGONI, A.; PEROTTI, F. New detectors for γ -ray spectroscopy and imaging, based on scintillators coupled to silicon drift detectors. *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res.*, v. A 454, p. 241-246, 2000.
- [20] BURLE Electron Tubes, *Photomultipliers*, 1990.
- [21] SCHOTANUS, P. Miniature Radiation Detection Instruments. *Radiation Measurements*, v. 24, n. 4, p. 331-335, 1995.

- [22] PRAT, V.; SIMON, H.; KAZANDJIAN, A.; RÉGAL, R.; SIFFERT, P. Gamma-ray spectrometry using silicon based scintillation probes. *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res.*, v. A 380, p. 209-214, 1996.
- [23] FIORETTO, E.; INNOCENTI, F.; VIESTI, G.; CINAUSERO, M.; ZUIN, L.; FABRIS, D.; LUNARDON, M.; NEBBIA, G.; PRETE, G. CsI(Tl)-photodiode detectors for γ -ray spectroscopy. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, v. A 442, p.412-416, 2000.
- [24] AIELLO, S.; ANZALONE, A.; CARDELLA, G.; CAVALLARO, S.; De FILIPPO, E.; Di PIETRO, A.; FEMINÓ, S.; GERACI, M.; GUAZZONI, P.; IACONOMANNO, M.; LANZANÓ, G.; Lo NIGRO, S.; MUSUMARRA, A.; PAGANO, A.; PAPA, M.; PIRRONE, S.; POLITI, G.; PORTO, F.; RIZZO, F.; SAMBATARO, S.; SPERDUTO, M.L.; SUTERA, C.; ZETTA, L. Light response and particle identification with large CsI(Tl) crystals coupled to photodiodes. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, v. A 369, p.50-54, 1996.
- [25] FARRELL, R.; OLSCHNER, F.; SHAH, K.; SQUILLANTE, M.R. Advances in semiconductor photodetectors for scintillators. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, v. A 387, p.194-198, 1997.
- [26] ISHII, M.; KOBAYASHI, M. Single Crystals for Radiation Detectors. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. New York, N. Y.: Pergamon Press Ltd, v.23, n.1-4, p. 245-311, 1992.
- [27] PEREIRA, M.C.C. *Desenvolvimento e caracterização do cristal cintilador de CsI(Tl) utilizado como detector de radiação*. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [28] MOTOROLA INC. *Linear and Interface Integrated Circuits*, 1985.

- [29] NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION *CMOS Databook*, 1993.
- [30] CLAYTON, C.G.; SPACKMAN, R.; BALL, A.M. The accuracy and precision of liquid flow measurement by radioactive isotopes. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY *Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics: proceedings of a symposium on... held in Prague*, 21-25 November, 1966. Vienna, 1967, p. 563.
- [31] KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. New York, N.Y.: John Willey & Sons, 1989.
- [32] KAPLAN, I. *Física Nuclear*. Rio de Janeiro, R.J.: Guanabara Dois S.A., 1978.
- [33] STOREY, R. S.; JACK, W.; WARD, A. The Fluorescent Decay of CsI(Tl) for Particles of Different Ionization Density. *Proceedings of the physical society*, v. 72, n. 463, 1958.
- [34] KUBOTA, S.; SHIRAISHI, F.; TAKAMI, Y. Decay Curves of NaI(Tl) Scintillators with Different Tl Concentrations under Excitation of Electrons, Alpha Particles and Fission Fragments. *Journal of the Physical Society of Japan*, v.68, n. 1, p. 291-297, 1998.
- [35] Silicon Photodiodes and Charge Sensitive Amplifiers for Scintillation Counting and High Energy Physics, *Hamamatsu Manual*, 1993.
- [36] HAMADA, M. M.; NUNOYA, Y.; KUBOTA, S.; SAKURAGI, S. Suppression of the slow emission component in pure CsI by heat treatment. *Nucl. Instr. And Meth in Phys. Res.*, v. 365, p. 98-103, 1995.

- [37] VALENTINE, J. D.; MOSES, W. W.; DERENZO, S. E.; WEHE, D. K.; KNOLL, G. F. Temperature dependence of CsI(Tl) gamma-ray excited scintillation characteristics. *Nucl. Instr. And Meth in Phys. Res.*, v. 325, p. 147-157, 1993.
- [38] VALENTINE, J. D.; WEHE, D. K.; KNOLL, G. F.; MOSS, C. E. Temperature Dependence of CsI(Tl) Absolute Scintillation Yield. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, v. 40, p. 1267-1274, 1993.
- [39] HAMADA, M. M., COSTA, F. E., PEREIRA, M. C. C.; KUBOTA, S. Dependence of Scintillation Characteristics in the CsI(Tl) crystal on Tl^+ Concentrations under Electron and Alpha Particles Excitations. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2001 (in press).
- [40] MILLMAN, J.; HALKIAS, C.C. *Eletrônica*. McGraw-Hill do Brasil, 1982.
- [41] NUCLEAR INSTRUMENTS AND DETECTORS COMMITTEE OF THE IEEE NUCLEAR AND PLASMA SCIENCES SOCIETY. *IEEE Standard Test Procedures for Amplifiers and Preamplifiers for Semiconductor Radiation Detectors for Ionizing Radiation*. 1976. (IEEE Std -301-1976).
- [42] GOULDING, F.S.; LANDIS, D.A. Signal Processing For Semiconductor Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, v NS-29, n 3, p. 1125-1141, 1982.
- [43] LUND, J.C.; OLSCHNER, F.; BURGER, A. IN: T.E. Schlesinger, RB. James (Eds)., *Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detectors Applications, Semiconductors and Semimetals*, vol.43, San Diego: Academic press, 1995.
- [44] PEACOCK, C. Inteface the Standard Parallel Port [on line]. *Australian Electronics Web Ring*. [cited Feb. 2001]. Available from Internet:
<<http://www.beyondlogic.org/spp/parallel.htm>.>

- [45] NUOVA ELETTRONICA. Termometro/Termostato collegato ad un Computer. Bologna: n.166, set. 1993.
- [46] ELEKTOR, ELETTRÓNICA & MICROINFORMÁTICA. Entradas/saídas paralelas para PC. Lisboa: v.16, n. 190, out. 2000.
- [47] ELETTRÓNICA PC. Controlador Luminoso Através de Centronix. Lisboa: v.1, n. 2, 1993.
- [48] RODRIGUES, E.C.; PIERONI, R.R. *Física*. São Paulo, S.P.: Clássico-Científica, 1957.
- [49] COSTA, F.E.; HAMADA, M.M.; PEREIRA, M.C.C.; MESQUITA, C.H. Desenvolvimento de Detector Contador para fins de Ensino em Instrumentação Nuclear. In: V ENAN, ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 15 -20 out., 2000, Rio de Janeiro.
- [50] HAMADA, M.M.; MADI F^o, T.; MESQUITA, C.H. Estudo do acoplamento óptico de detectores plásticos cintiladores: avaliação de diferentes produtos de silicone. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 3^o, Julho 22-27, 1990, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 1990. v.3, p. 18-24.
- [51] KEIFFER, J. *Descrição, características e desempenho de um protótipo de contador de corpo inteiro para uso clínico*. São Paulo: 1970. Tese (Doutoramento) – Faculdade de Medicina da USP.
- [52] SCHOTANUS, P.; KAMERMANS, R.; DORENBOS, P. Scintillation characteristics of pure and Tl-doped CsI crystals. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v.37, n.2, p.177-182, 1990.

- [53] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-NE-6.05, Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Nucleares*. Rio de Janeiro, DOU, 1985.
- [54] MAGALHÃES, R.R. *Espectrometria de Raios-X com Diodos de Si*. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.
- [55] BIRKS, J.B. *The theory and practice of scintillation counting*. New York, N.Y.: Pergamon, 1964.
- [56] SOCHA, J.; HALL, D. *teach yourself.. Visual Basic 3.0*. New York, N.Y.: Mis, 1994.