

AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DOS DETETORES IODETO DE
SÓDIO NaI(Tl) EM CENTRAIS NUCLEARES

Clarindo Almeida Lima

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Prof. Maria Inês Silvani, D.Sc.

RIO DE JANEIRO RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

LIMA, CLARINDO ALMEIDA

Avaliação da performance dos detetores

Iodeto de Sódio NAI(Tl) em Centrais

Nucleares. [Rio de Janeiro] 2006

IX, 80 P, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Nuclear, 2006)

Dissertação Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Física Nuclear Aplicada
2. Deslocamento do espectro diferencial
3. Cintilador Iodeto de Sódio NAI(Tl)

I COPPE / UFRJ

II Título (série)

DEDICATÓRIA

A minha querida esposa Roberta Silva Mello Lima,
que me deu suporte psicológico, força, amor e
compreensão nos momentos difíceis desta caminhada,
e à meus filhos Milena e Fernando

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições que direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento deste trabalho:

- Ao corpo docente do programa de Engenharia Nuclear da COPPE/ UFRJ, pelos ensinamentos transmitidos na área de Física Nuclear Aplicada.
- Ao prof. Ricardo Tadeu Lopes, pela ajuda e colaboração no desenvolvimento e elaboração deste trabalho.
- Ao prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, pelo apoio, orientação e suporte técnico nas experiências realizadas no laboratório do LIN.
- Ao corpo discente do programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ, turma de 2003, pela compreensão, amizade e ajuda prestada durante o decorrer do curso.
- Aos colegas da Eletronuclear que sempre me deram força e apoio no desenvolvimento deste trabalho, com discussões e sugestões.
- Aos colegas do Serviço de Proteção Radiológica, pelo apoio técnico nas experiências.
- A gerência da Manutenção de Usina Nuclear Angra 2, pela liberação para participar do curso de Física Nuclear Aplicada na COPPE/RJ.
- Ao professor Brandi (UNIVERCIDADE), pelo incentivo, força e orientação para participar do curso de Física Nuclear Aplicada na COPPE/RJ.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc)

AValiação DA PERFORMANCE DOS DETETORES IODETO DE
SÓDIO NaI(Tl) EM CENTRAIS NUCLEARES

Clarindo Almeida lima

Março/2006

Orientador : Ricardo Tadeu Lopes

Programa : Engenharia Nuclear

Os detetores de Iodeto de Sódio [NaI(Tl)], usado no Sistemas de Monitoração de Radiação em Centrais Nucleares, são sistemas se mostra muito importantes em usinas nucleares, provendo informações continuamente dos processos gases, líquidos e sólidos e dando informações ao pessoal da operação da Usinas Nucleares para diagnósticos de ocorrência radiológica durante a sua operação.

O sistema fornece informações afim de que inicie-se ações de segurança visando prevenir que situações de anormalidades radiológicas tomem proporções maiores. Quando altos níveis de radiação são atingidos ações automáticas são iniciadas pelo Sistema de Monitoração de Radiação, que evitam possíveis riscos de vazamentos radiológicos para o meio ambiente.

Neste trabalho foi avaliado a performance dos detetores de Iodeto de sódio NaI(Tl) usados nos sistemas de radiação. Os principais parâmetros avaliados foram tensão de operação (patamar), eficiência, resolução e calibração em energia. O tempo de avaliação dos detetores foi de 6 anos.

A avaliação dos parâmetros levam a concluir que o tempo de vida útil desses sistemas é em torno de 12 anos.

Abstract of Dissertation of thesis presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PERFORMANCE EVALUATION OF THE SODIUM IODINE DETECTORS
NaI(TL) IN THE NUCLEAR POWER PLANT

Clarindo Almeida Lima

March/2006

Supervisors : Ricardo Tadeu Lopes

Department : Nuclear Engineering

The sodium iodine detectors NaI(Tl) used in Radiation Monitored System in Nuclear Power Plant are very important systems in nuclear power plant giving continually information of the processes (gases, liquids and solids), and giving information to the operational staff of nuclear power plant for the diagnostics of the radiological occurrence during its function.

The system gives information with the purpose of initiating security actions aiming to prevent that situations of radiological abnormalities could reach large proportions. When high levels of radiation are reached, automatic actions are initiated by the radiation monitored system which prevents possible risks of radiological discharge to the environment.

In this work it was evaluated the performance of the sodium iodine detector NaI(Tl) used in the radiation systems. The main parameters evaluated were operation tension (patamar), efficiency, resolution and calibration in energy. The time of the detectors evaluation was of six years.

The parameters evaluations lead to concluding that the time of useful life of these systems is around twelve years.

Sumário

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 – Histórico	1
1.2 – Considerações sobre Detector Cintilador NaI(Tl)	2
1.3 – Transporte da Amostra e Controle	4
1.4 – Objetivo	11
1.5 – Organização	12

CAPÍTULO 2 - Fundamentos Teóricos

2.1 - Espectrometria gama com cintiladores	13
2.2 – Interação da radiação gama com a matéria	14
2.2.1 – Absorção Fotoelétrica	15
2.2.2 – Espalhamento Compton	17
2.2.3 – Produção de Pares	20
2.3 – Atenuação de um feixe de Fótons	22
2.4 – Resposta dos detetores comerciais.....	23
2.5 – Eventos que interferem na Função Resposta do detector	25
2.5.1 – Escape de Elétrons Secundários	25
2.5.2 – Escape de Bremsstrahlung	25
2.5.3 – Escape de Raio X Característico	25
2.5.4 – Interações secundárias criadas pelo decaimento radioativo	25
2.5.5 – Efeitos dos materiais envoltórios	26
2.6 – Principais Propriedades dos Cintiladores	28
2.6.1 – Resolução em Energia	28
2.6.2 – Linearidade	31
2.6.3 – Eficiência de Detecção	31
2.6.4 – Resposta em Tempo	33
2.7 – Mecanismo de Cintilação dos Cristais Inorgânicos com ativadores	34
2.8 – Geração de Sinal Elétrico	35

2.8.1 – Tubos Fotomultiplicadores	35
2.8.2 – <i>Microchannel Plates</i>	37
2.9 – Eletrônica Nuclear	38
2.9.1 – Cabos Coaxiais	38
2.9.2 – Principais elementos definidos pela Norma NIM	39

CAPÍTULO 3 – Materiais e Métodos

3.1 – Especificações Técnicas do Detectores.....	40
3.1.1 – Dados Gerais	40
3.1.2 – Dados Técnicos	40
3.1.3 – Dados técnicos do Preamplificador integrado no detector	40
3.1.4 – Condições de Operação do Detector	41
3.1.5 – Especificações Padrão das Características do detector	41
3.2 – Levantamento dos detectores instalados e suas aplicações	42
3.3 – Parâmetros de Avaliação	44
3.3.1 – Curva Característica do Cintilador	44
3.3.2 – Procedimento Experimental para determinar o Ponto de Operação	45
3.3.3 – Eletrônica Nuclear associada nos Sistemas de Detecção de radiação	49
3.3.4 – Definições, Siglas e Fontes Radioativas utilizadas no decorrer dos testes descritos na dissertação	50
3.3.5 – Calibração dos detectores e determinação dos valores de referência para inspeções periódicas	51
3.3.6 – Procedimento para Inspeções Periódicas dos detectores NaI(Tl)	55
3.3.7 – Determinar os Espectros diferenciais dos Cintiladores NaI(Tl)	56

CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussões

4.1 – Resultados da Análise das especificações Técnicas do Detector NaI(Tl)	58
4.1.1 – Análise da forma de onda do pulso gerado	58
4.1.2 – Levantamento da curva característica do detector	58
a) Determinar a Tensão de operação	59
b) Determinar a Faixa de operação	60

c) Determinar a inclinação do <i>plateau</i>	60
4.2 – Verificação da Performance dos detectores	60
4.2.1 – Ajuste de Fator de Conversão do detector	61
4.2.2 – Verificação da eficiência dos detectores	64
4.2.3 – Determinação dos valores de referência para as inspeções Periódicas ..	71
4.2.4 – Determinação da Correção de <i>background</i>	80
4.3 – Resultados das Inspeções Periódicas realizadas durante a operação dos detectores Iodeto de Sódio	81
4.3.1 – Resultados da Eficiência dos detectores com rejeição em 80 keV	82
4.3.2 – Resultados da Eficiência dos detectores com rejeição em 662 keV	83
4.4 – Resposta Espectral para análise da Resolução dos Detectores	93
 CAPÍTULO 5 – Conclusões e Sugestões	
5.1 – Conclusões	99
5.2 – Sugestões	102
 Referências Bibliográficas	 103
 ANEXO A: “Adaptador de teste usado para verificar eficiência dos detectores NaI(Tl) usados nos testes de calibração”	 104
ANEXO B: “Certificado de calibração da fonte número 223-95 dCs-137”	105
ANEXO C: “Certificado de calibração da fonte número 224-96 de Co-0”	106
ANEXO D: “Adaptador montado com fonte de teste Cs-137 – FU386”	107
ANEXO E: “Certificado de calibração da fonte FU 386 – Cs-137	108
ANEXO F: “Tratamento estatístico dos resultados para avaliação da performance em detectores NaI(Tl) usados em Centrais Nucleares”	109

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 – Histórico

O Sistema de Monitoração de Radiação numa Usina Nuclear é um dos sistemas mais importantes da planta. Ele não contribui para produção de energia elétrica, mas dá suporte para operação da unidade, provendo informações continuamente para várias pessoas quanto as condições radiológicas na planta. É um dos sistemas primários para sentir ocorrências anormais e providenciar dados a operação para ajudar no diagnóstico das causas das anormalidades radiológicas.

O sistema adverte sobre níveis anormais de radiatividade através das medidas no nível de radiação em diferentes áreas da planta em ambos os casos (gases ou líquidos), garantindo assim que as áreas na planta estejam com nível de radioatividade dentro do especificado. São sistemas providos de alarmes que alertam o pessoal quando o nível de radiatividade em locais ou processos atinja níveis que tenha sido definido com anormal. Esses valores são definidos para que dêem tempo ao pessoal que está trabalhando na área de saírem antes que a radioatividade atinja valores que venham ser prejudicial a saúde. Pela monitoração de áreas específicas na planta, a proteção física é auxiliada pelo programa ALARA. O Sistema de Monitoração de Radiação faz medidas para liberar efluentes que estejam dentro dos limites e pode alertar o pessoal da planta se os níveis de liberação excederam os limites especificados pelos requerimentos regulatórios.

O sistema pode ser usado para iniciar a engenharia de segurança na planta se a radioatividade especificada nas localizações ou processos venham aumentar para níveis onde ações automáticas devem ser iniciada, de acordo com especificações técnicas da planta, *Updated Final Safety Report* (UFSAR), e a licença da planta.

Radioatividade beta e gama são as duas formas de radiação medidas pelo Sistema de Monitoração de Radiação. Elas estão presentes em vários processos e áreas, como o resultado das reações nucleares no vazo do reator. Radiação beta e gama são produzidas pelos isótopos radioativos no refrigerante do reator e no ar da contenção, onde são estocados os combustíveis usados.

O vazo de pressão do refrigerante do primário não é estanque de vazamentos, uma pequena porção de refrigerante pode vazar para o interior da contenção, para o sistema de vapor no sistema secundário nos Reactores de Água pressurizada (PWRs) e nos outros processos conectados no sistema primário que contém refrigerante do reator. Os isótopos que são mais encontrados pelo sistema de monitoração são gases nobres como ^{133}Xe que é o mais abundante, ^{16}N gerados nas linhas de vapor principal nos Reactores PWRs (a abundância de ^{16}N é dependente do nível de potência do reator e taxa vazamento gerada para o vapor principal) , material particulado aerotransportado tal como ^{88}Rb e ^{137}Cs nos processos líquidos e ^{14}C e ^{41}Ar com menos importância.

1.2 – Considerações sobre Detetor Cintilador Iodeto de Sódio [NaI(Tl)]

Pôr volta de 1947, com o aparecimento das válvulas fotomultiplicadoras, que são capazes de converter os fótons de cintilação em elétrons que são acelerados e multiplicados pôr uma série de eletrodos denominados “dinodos”, esse processo de detecção tornou-se muito importante, sendo atualmente muito utilizado. O processo de cintilação é um dos métodos disponível para detecção e espectroscopia de várias radiações.

O contador cintilador usa processo de geração de luz para contar eventos da radiação. Ele pode medir radiação gama. Tipicamente, o elemento sensor de radiação gama é um cristal feito de Iodeto de sódio dopado com tálio [NaI(Tl)], é quase exclusivamente usado para radiação gama. A energia da gama incidente é depositada e convertida em um fóton de luz. O fóton gerado é na região azul do espectro ótico, com sua intensidade sendo proporcional a energia depositada pela radiação do raio gama incidente. Uma vantagem do cintilador é sua alta eficiência de contagem pôr raios gamas incidentes no detetor.

É importante que o cristal fique bem protegido do ambiente porque é higroscópico e absorve vapor de ar. Esse acontecimento faz com que o cristal fique inutilizado, entretanto

os mesmos são fabricados hermeticamente selados, o cristal fica dentro de uma capa de alumínio com janela de vidro. A capa efetivamente elimina a absorção das partículas beta e alfa do alcance do cristal. Os cristais ficam meio amarelos com o tempo, afetando sua eficiência e resolução. Um guia de luz é colocado entre o cintilador e a Fotomultiplicadora que serve de condutor ótico e acoplamento.

O cristal Iodeto de Sódio NaI(Tl) é sensível a radiação se exposto pôr longo tempo a altas exposições, há uma degradação na performance da cintilação, danos tem sido observado com níveis de radiação maiores de 1 GRAY (100 RADs). O cristal não deve ser exposto a radiação ultravioleta de lâmpadas fluorescentes ou similares.

O cristal Iodeto de sódio é ativado com a adição da concentração muito baixa de tálio (Tl) em torno de 0,094 gramas para cristal de 2 polegadas de diâmetro pôr 0.25 polegadas de comprimento, com peso total de 47,24 gramas. O Iodeto de tálio como material químico puro é tóxico, uma quantidade de mais de 1 grama pôr pessoa pode levar a morte. Se o compartimento é danificado, deve-se manusear com luvas de borracha e retornar o detetor danificado para o “fabricante” ou guardar em local apropriado de acordo com regulamentações federal.

Cintilador é um cristal capaz de converter a energia depositada pela radiação em fótons de luz através de processos luminescentes, os quais podem ser classificados como:

- Fluorescência : Quando sua emissão de luz ocorre durante a excitação num tempo menor que 10^{-8} segundos.
- Fosforescência : Quando sua emissão de luz ocorre depois de cessado a excitação (depois de 10^{-8} segundos) geralmente tardio e com comprimento de onda maior.
- Fluorescência Atrasada : Quando sua emissão se dá muito tempo após a excitação e no mesmo espectro da fluorescência.

O material cintilador ideal deve possuir as seguintes propriedades:

- Deve converter a energia cinética das partículas carregadas em luz com alta eficiência.
- Esta conversão deve ser linear – a luz produzida deve ser proporcional a energia depositada.
- meio deve ser transparente a luz emitida, a fim de permitir uma boa coleta de luz.

- tempo de decaimento da luminescência deve ser o menor possível.
- material deve ser de boa qualidade ótica.
- índice de refração deve ser próximo ao do vidro para permitir eficiente união do cintilador de luz com o tubo fotomultiplicador.
- pode ser obtido em diferentes tamanhos e formas.

1.3 – Transporte da Amostra e Controle

- Líquidos – usados nos processos de remoção de calor (trocadores de calor), onde um dos lados dos circuitos circulam líquidos do sistema Primário do Reator, contendo produtos radioativos gerados da reação nuclear do Urânio 235. Quando altos valores de radioatividade são atingidos nos detetores dos Sistemas de Monitoração de Radiação, algumas ações nos circuitos são tomadas, como isolamento dos sistemas até o desligamento da unidade quando necessário.
- Gases – Sistemas onde são tratados os gases gerados nos processos que interferem diretamente com o refrigerante do reator nuclear. Estes gases que foram extraídos ficam circulando em um circuito fechado, passando por filtros que reduzem a radioatividade, para que possam ser descartados posteriormente. O sistema contém um detector cintilador na entrada para medir a radioatividade dos gases que entram no sistema e um na saída para medir a radioatividade dos gases que são descartados para atmosfera.
- Aerossóis – Sistemas que monitoram possíveis vazamentos nos equipamentos que circulam refrigerante do circuito primário, com temperatura de operação em torno de 320 graus célcus e a pressão em torno de 157 bar, quando existe um vazamento de refrigerante nestas condições, há a vaporização imediata do refrigerante, aumentando a radiatividade no ar do compartimento onde houve o vazamento. O sistema é composto de uma bomba de vácuo que retira uma quantidade de ar de amostragem para ser monitorado, este passa por um filtro de papel onde há a retenção do material particulado, este filtro é monitorado online pelo detector, que dá indicação do aumento na radioatividade das salas onde são retiradas as amostras.

O diagrama da figura 1.1 mostra uma configuração básica de uma linha de amostragem de gás que coleta uma amostra uniformemente através de um arranjo de tubos.

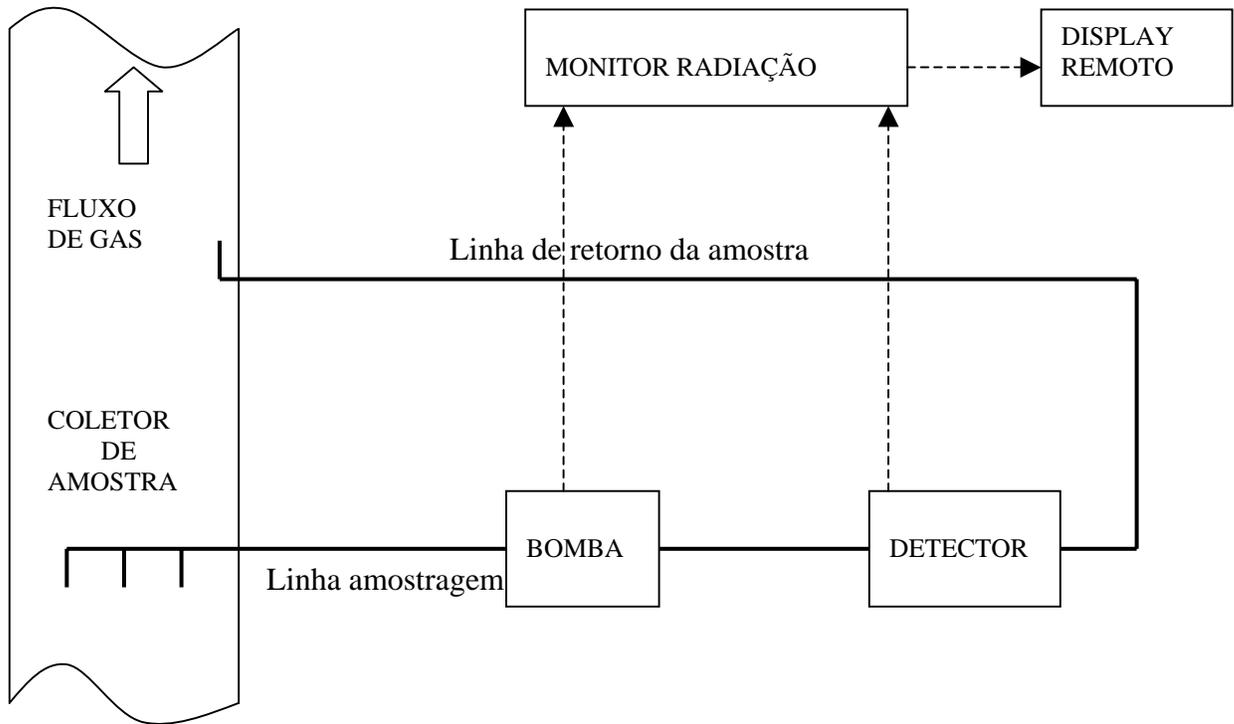


Figura 1.1 : Transporte da amostra e um sistema básico de monitoração de Radiação.

O sistema é constituído:

- Coletor de amostra
- Linha de amostragem
- Bomba
- Detector
- Linha de retorno
- Monitor de radiação
- Display remoto

O coletor da amostra pode ser um tubo, fileira de tubos ou uma tubulação que leva uma quantidade de amostra representativa para o processo em monitoração. Levando amostra de ar de um duto usando um arranjo de tubos que uniformemente coleta uma porção da amostra de diferentes posições no duto. Se um material particulado está sendo

medido pela radioatividade, cada tubo tem um bocal com tamanho definido para coletar amostra de ar de tal maneira que mantenha as partículas suspensa no ar.

O tamanho do bocal é tal que a velocidade do ar entrando no tubo é a mesma que a velocidade do ar no interior do duto principal. Esta amostragem é chamada isocinética e a fileira de tubos é igualmente conhecida como um arranjo de bocal isocinéticos. A representatividade da amostra é retirada de uma linha de processo por um ramo de tubo pequeno. As normas definem “representatividade” e “amostra” separadamente.

Representatividade é definida como: “Amostragem fiel da qualidade e característica do volume inteiro do qual a amostra é retirada”.

Amostra é definida como: “A porção representativa de uma atmosfera de interesse, ou um os mais constituintes separado de uma porção representativa da atmosfera.”

Depois da amostra ser coletada, ela é transportada para o local de montagem do detetor por uma linha de amostragem. A linha de amostragem é usualmente uma tubulação que tem tamanho um tamanho padrão e é instalada para assegurar que uma amostra representativa alcance o detetor. Em alguns casos em que a distância do transporte pode estar acima de 30 metros. A amostra do gás pode ser transportada sem interesse do tamanho ou da configuração da instalação. A linha da amostragem que transportam as partículas suspensas no ar deve ter tamanho e configuração de maneira que o depósito das partículas é minimizado. A linha de amostragem para “água” (que pode haver material suspenso) deve ter tamanho e configuração para minimizar entupimentos ou a redução no fluxo.

O local de montagem do detetor e a maneira usada de colocar o gás de amostragem, “partícula ou líquido” no campo de visão do detetor é muito importante. Para gás e líquidos, a montagem do detetor contém uma câmara de volume conhecido, onde a radiatividade na amostra é vista pelo detetor como a parte da amostra que atravessa a câmara mostrando a radiatividade presente no material particulado que é coletado pela absorção destas partículas no filtro. Este pode ser papel para material particulado ou carvão para Iodo. O filtro de papel é normalmente fixado num compartimento próximo ao campo de visão do detetor e ambos são usualmente blindados para reduzir a radiatividade de background (radiação de fundo), para permitir a detecção de níveis baixos de radioatividade na amostra.

Uma bomba é usada para puxar a amostra do coletor pela linha de amostragem e pelo detector. Em alguns processos de monitoração de radiação em líquidos, a diferença de pressão entre o ponto de coleta e o ponto de retorno da amostra é usado para retirar a amostra. A amostra é puxada do lado da sucção da bomba e retornando para o processo de fluxo corrente pela linha de retorno no lado de pressão da bomba.

Em diversos casos será necessário controlar a taxa de fluxo da amostra que poderá ser controlado por um sensor de fluxo e válvula de controle de fluxo. Isso pode ser manualmente ou automaticamente dependendo da configuração do monitor de radiação.

Uma simples forma de controle de fluxo é manualmente. Consiste da medida do fluxo que é montado na linha de amostra e uma válvula de controle de fluxo manual. A válvula manual e o sensor de fluxo são montados na linha de retorno no lado da pressão da bomba e ajustado manualmente até a taxa de fluxo requerida ser alcançada no indicador de fluxo. Periodicamente a taxa de fluxo poderá ser checada pela operação e a válvula de controle ajustada para manter o fluxo dentro da banda especificada.

O fluxo de controle automático usa um elemento sensor de fluxo e um motor operando uma válvula de controle. Um sinal de saída proporcional a taxa de fluxo é gerado pelo sensor. O transporte da amostra e os subsistemas contêm circuitos que tem que ser calibrados para conhecer a taxa de fluxo. O circuito inclui um *setpoint* para ajustar a taxa de fluxo para o valor especificado. Quando o sinal de fluxo sai da banda morta do circuito, um sinal é gerado para o motor da válvula de controle para abrir ou fechar. Isso mantém o fluxo dentro do range descrito pelo sistema.

Um display remoto provido de dispositivo para operação montado convenientemente na área de controle, para iniciar funções de controle específicas do sistema de monitoração tal como, *Check Source* e funções de purga. Pode também incluir uma interface para modificar parâmetros de acordo com dados especificados para as funções de controle de cada canal de monitoração.

O diagrama da figura 1.2 mostra um sistema básico para coleta de amostra e os subsistemas de controle para monitoração da radioatividade do processo.

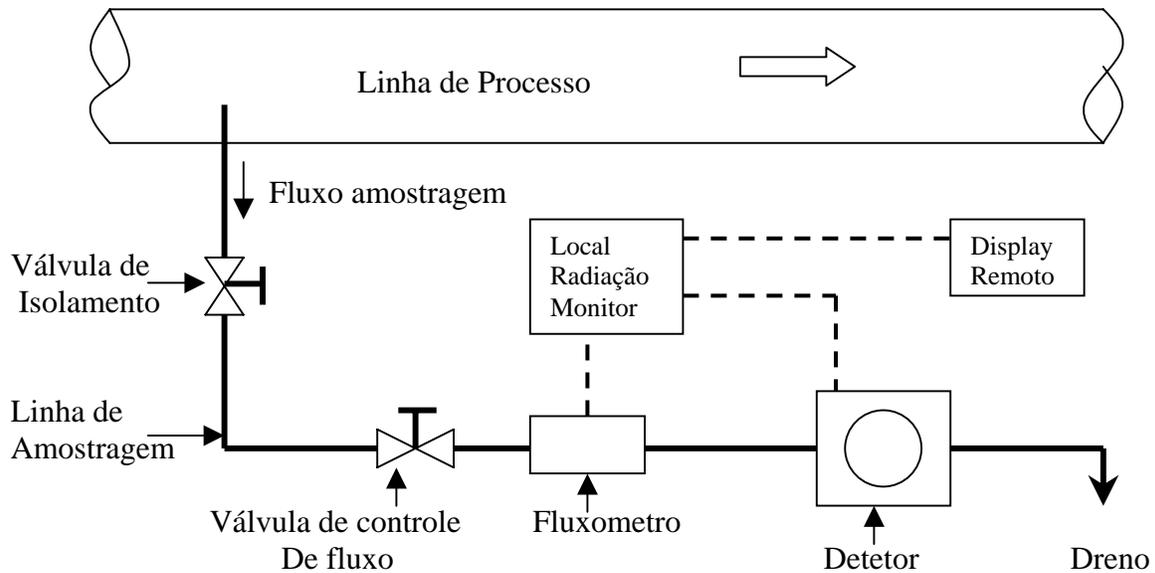


Figura 1.2 : Sistema básico para Monitoração de processo Líquido

Os componentes principais de cada subsistema são listados abaixo:

Sistema de amostragem e controle:

- Linha de amostragem
- Válvula de isolamento
- Local de montagem do Detector
- Válvula de controle de fluxo
- Fluxometro

Sistema de detecção:

- Detector
- Monitor de radiação
- Display remoto

O transporte da amostra e os subsistemas de controle consistem de uma linha de amostragem para o processo ou linha de efluente que passa pelo monitor. Num arranjo básico, o monitor de líquido utiliza a pressão diferencial para puxar uma amostra representativa do processo ou linha de efluente. O retorno da amostra é puxado para o dreno que se encontra em pressão atmosférica. Uma válvula de isolamento é incluída na linha de amostragem permitindo então o monitor ser isolado do processo ou efluente para manutenção e teste. A amostra passa pelo detector que tem conhecimento do seu volume. O local de montagem do detector é blindado com chumbo para reduzir a radiação de fundo (background), assim permitindo que o detector meça pequenos níveis de concentração de radioatividade.

Controle da taxa de fluxo da amostra consiste de uma válvula de controle de fluxo. O fluxo é ajustado usando um fluxometro com indicação local ou no monitor de radiação. O Fluxometro pode conter uma chave de fluxo que é usada para iniciar alarmes quando o fluxo estiver abaixo dos valores especificados. Isso resultará um alarme de falha no monitor de radiação e no display remoto.

O sistema de detecção é montado com um detector de cintilação gama montado dentro da estação de montagem do sistema. O detector envia um pulso para cada radiação ionizante que interage com o material cintilador. Cada pulso é transmitido por um cabo coaxial para o sistema de monitoração de radiação. No monitor os pulsos são contados por um período e a concentração é calculada. Desde que leituras variem, o monitor de radiação inclui um algoritmo que refina a contagem natural pela média das medidas realizadas com parâmetros preestabelecidos pelo programa. O cálculo dos valores é indicado e usado pelo monitor de radiação para determinar se um *setpoint* de alarme foi alcançado. Se um alarme foi alcançado, o monitor de radiação pode sinalizar com indicação visual (lâmpadas) e alarmes sonoros. A leitura da atividade calculada da amostra será também transmitida pelo sistema para sala de controle principal. Também contém circuitos lógicos que poderão acionar alarmes ou iniciar ações automáticas. Normalmente, o display remoto contém saídas analógicas que podem ser usadas para registrar o nível de atividade do processo.

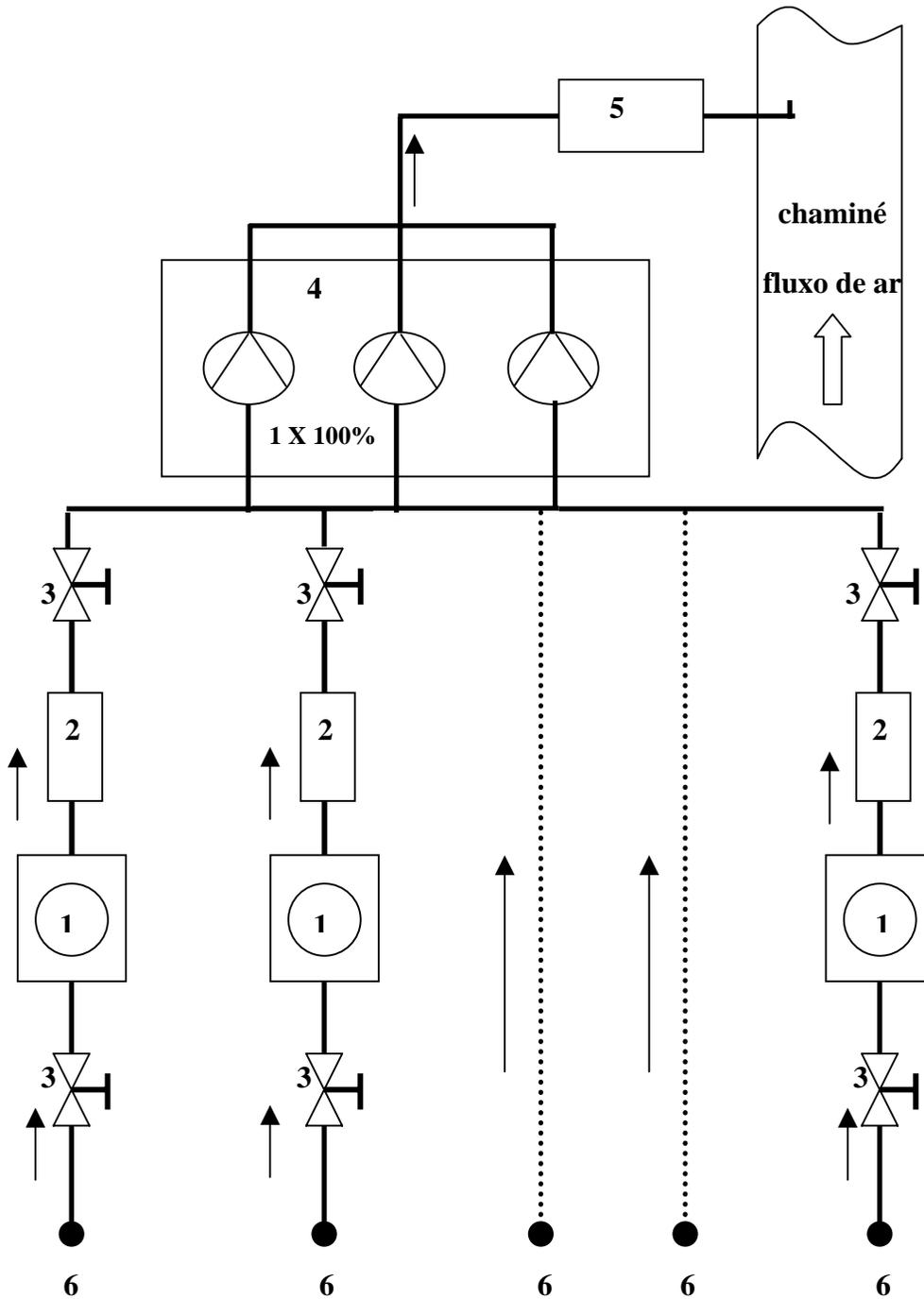


Figura 1.3: Sistema simplificado da monitoração de radiação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto “Angra 2”.

Os componentes básicos do sistema são listados abaixo:

1. Detetor de radiação

2. Fluxometro
3. Válvula reguladora de fluxo e válvula de isolamento
4. Compressores para coleta das amostras.
5. Filtros
6. Tomadas para retirada das amostras

O sistema integrado descrito na figura 1.3 é composto de uma central de compressores composta de três compressores, sendo que para manter os fluxos de amostragem das linhas dentro dos valores especificados só é preciso um compressor ligado. O sistema é projetado para troca automática entre os compressores, quando ocorrer anormalidades no compressor alinhado.

O sistema foi desenvolvido para monitorar locais independentes, que são compostos de válvulas de bloqueio, reguladoras de fluxo, fluxômetros e detectores cintiladores como é mostrado na figura 1.3. Se for necessário manutenção em alguma linha de monitoração existe a possibilidade de isolamento independente de cada linha de amostragem, sem comprometer o funcionamento das outras áreas de monitoração.

Os métodos adotados em cada linha de monitoração, é a medida integral de raios gama usando um contador cintilador Iodeto de Sódio [NaI(Tl)]. As unidades de medidas usadas são: Bq (radioatividade), Bq / m³ (concentração de radioatividade), Bq / h (taxa de radioatividade).

Os limites de discriminação dos processos são os seguintes:

- Limites de discriminação inferior em energia: 40 keV , 120 keV e 350 keV
- Limites de discriminação superior em energia: 1500 keV.

Depois de monitorados e analisados os gases são coletados e filtrados sendo posteriormente descartados para atmosfera.

1.4 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é a Avaliação da Performance dos detectores Iodeto de Sódio [NaI(Tl)], usado no Sistema de Monitoração de Radiação em Centrais Nucleares. O Sistema se mostra muito importante em usinas nucleares, provendo informações contínuas dos processos (gases, líquidos e sólidos) fornecendo informações ao pessoal da operação da usina para diagnósticos sobre causas de ocorrência radiológica na operação da usina.

O sistema fornece informações para que se iniciem ações de segurança visando evitar que situações de anormalidades radiológicas tomem proporções maiores. Quando altos valores nos níveis de radiação são atingidos, ações automáticas são iniciadas pelo Sistema de Monitoração de Radiação, que tentam isolar possíveis riscos de vazamentos radiológicos para o meio ambiente. No entanto, ações manuais são iniciadas pelo setor de proteção radiológica, que mediante informações fornecidas pelo sistema de monitoração de radiação, com indicações on-line analógicas dos processos e diferentes níveis de sinalização de alarmes, sinaliza de possíveis aumentos da taxa de radiação nos processos.

Estas ações manuais visam restabelecer as condições normais dos processos antes que possíveis isolamentos automáticos sejam iniciados.

1.5 – Organização

No capítulo 2, Introdução Teórica dos fatores que influenciam na eficiência e na resolução dos cintiladores de Iodeto de Sódio NaI(Tl).

No capítulo 3, são apresentados os procedimentos para determinar as características de operação, os procedimentos para calibração dos detetores Iodeto de Sódio NaI(Tl) na CNAAA (Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto) e as características de operação fornecida pela especificação técnica do fabricante do detetor *Crismatec*.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões obtidos na determinação dos parâmetros de operação, levantamento dos testes executados na CNAAA (Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto) sobre os testes de calibração dos detetores NaI(Tl) *Crismatec*.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões.

No capítulo 6, são apresentadas as Referências Bibliográficas.

CAPÍTULO 2

Fundamentos Teóricos

2.1 – Espectrometria Gama com Cintiladores.

O NaI(Tl) foi introduzido na era moderna da espectrometria de raio gama por ser um detector prático, que pode produzir com alta eficiência a detecção de raios gama, ao mesmo tempo, possui uma resolução em energia limitada, mas permite que as energias diferentes provenientes de radionuclídeos diferentes possam ser distinguidas entre si pela altura de pulso. Isto também permite diferenciar os fótons primários dos fótons que foram espalhados pelo efeito compton. Os fótons que sofrem difusão compton têm menos energia que os fótons primários, conseqüentemente têm altura de pulso menor.

O extraordinário sucesso do NaI(Tl) deve-se ao seu bom rendimento de luz, excelente linearidade, ao alto número atômico do Iodo e a sua alta densidade.

Fótons de raio X ou gama não possuem carga e por isso não criam ionizações ou excitações diretamente com o material que atravessam. A detecção desses fótons depende da forma da interação que pode transferir toda ou parte da energia do fóton a um elétron do material.

Como o fóton é invisível ao detector então é apenas o elétron rápido criado na interação que dá qualquer vestígio da natureza do fóton incidente. Esses elétrons tem a energia máxima igual a energia do fóton incidente e irá perder essa energia através de ionizações e excitações dos átomos dentro do material absorvedor e através da emissão de Bremsstrahlung.

Para servir para espectrometria o detector deve cumprir duas funções distintas:

1. Atuar como um meio de conversão no qual raios gama incidentes possuem uma probabilidade razoável de interação para produzir um ou mais elétrons rápidos.
2. Deve funcionar como um detector convencional para estes elétrons secundários produzidos pelo raios gamas incidentes.

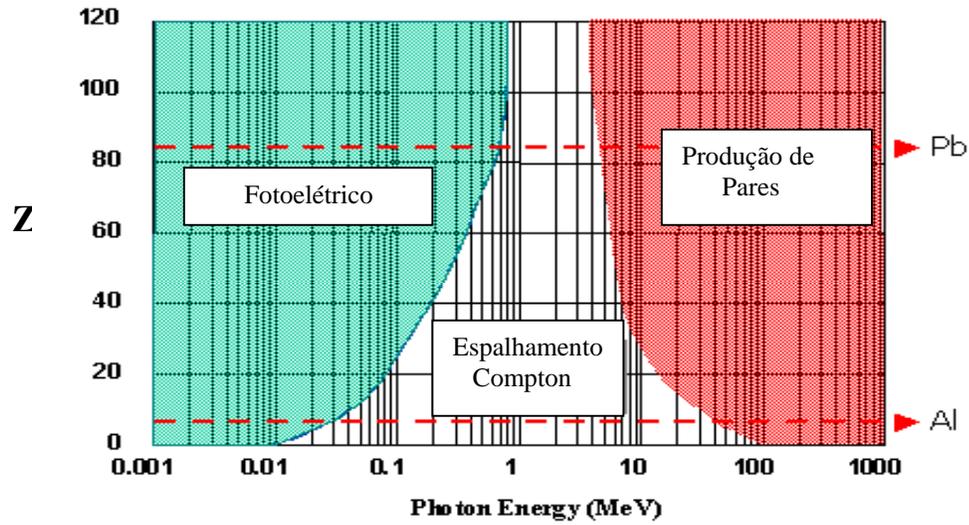
Vamos assumir que o detector é suficiente grande para que o escape dos elétrons secundários seja insignificante. Para raios gama de poucos MeV, a maioria dos elétrons secundários será criados com energia cinética de poucos MeV. O alcance desses elétrons em um detector sólido típico é em média poucos milímetros (a maioria dos fótons de Bremstrahlung gerado ao longo do caminho do elétron serão considerados pouco penetrantes). A hipótese da absorção completa dos elétrons implica em um detector cuja dimensão mínima é cerca de centímetros. Então só uma pequena parte dos elétrons secundários pode escapar.

Os requisitos para a total absorção dos elétrons secundários tornam impossível utilizar detectores a gás em espectrometria de raios gama, com a exceção daqueles com baixa energia. A penetração dos elétrons de 1 MeV em gases é de alguns metros tornando impraticável construir detectores desses tamanhos. A maioria dos pulsos gerados nos detectores a gás devido aos raios gama origina-se da interação do raio gama com a parede do detector. Nessas condições, a perda de energia dos elétrons na parede do detector não contribui para o pulso de saída e então a relação entre a energia dos fótons incidente e a energia deixada pelos elétrons dentro do detector é comprometida.

2.2 – Interação da Radiação Gama com a matéria

Três mecanismos são mais significantes na espectrometria de raios gama: Absorção Fotoelétrica, Espalhamento Compton e Produção de Pares. A absorção fotoelétrica predomina em baixas energias de raios gama (poucas centenas de keV), produção de pares predomina em altas energias (acima de 5 MeV) e o espalhamento Compton é o processo mais provável entre esses extremos de energia. O número atômico do material também possui uma grande influência nessas probabilidades de interação. A maior variação ocorre com a absorção fotoelétrica que varia com $Z^{4,5}$. Como a absorção fotoelétrica é a mais desejada escolher detectores para espectrometria com alto número atômico é a melhor opção, como podemos observar na figura 2.1.

Energia do fóton nos processos competitivos



Fótoelétrico : $E_\gamma < 200 \text{ keV}$

Compton : $200 \text{ keV} < E_\gamma < 5 \text{ MeV}$

Produção de Pares : $E_\gamma > 5 \text{ MeV}$

Figura 2.1 : Regiões de predominância das 3 formas de interação da radiação γ . As curvas indicam os valores de Z e $h\nu$ para os quais as probabilidades dos processos vizinhos são iguais. (*The Atomic Nucleus, R.D.Evans – McGraw-Hill 1955*).

2.2.1 - Absorção Fotoelétrica

Nessa interação o fóton incidente desaparece com a total transferência da energia da radiação incidente “X ou gama” a um único elétron orbital, que é expelido com uma energia cinética bem definida, como representado na figura 2.2. A energia cinética do elétron é dada pela energia do fóton incidente menos a energia de ligação do elétron da camada eletrônica.

Na maioria dos casos o fotoelétron emerge a partir da camada K, a qual possui energia de ligação de poucos keV para materiais de baixo número atômico (Z) até dezenas de keV para materiais de alto número atômico (Z).

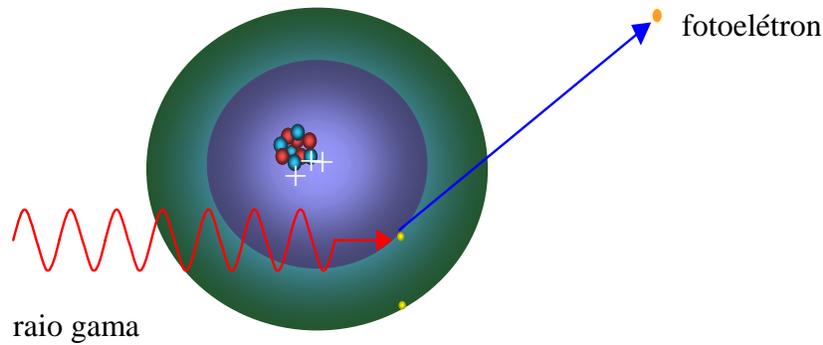


Figura 2.2: Ilustra a absorção fotoelétrica, onde o raio gama incidente cede toda sua energia para o elétron e desaparece.

- Fóton cede toda energia a um elétron (camada K) e desaparece
 $E_{ke} = (h\nu - E_B)$, onde E_{ke} é a energia cinética do fotoelétron que é expelido, $h\nu$ é a energia do raio gama incidente e E_B é a energia de ligação do elétron orbital.
- Efeito predominante para raios – X e raios γ de baixa energia (100 keV)
- A probabilidade do efeito Fotoelétrico acontecer é diretamente proporcional ao número atômico do material elevado a Quarta potência e inversamente proporcional a energia do fóton a terceira potência, podemos observar isso na equação abaixo.

$$\sigma_{\text{efeito fotoelétrico}} \propto \frac{Z^4}{E^3}$$

A vacância que é criada é rapidamente preenchida pelo rearranjo dos elétrons. Nesse processo a energia é liberada em forma de raio X característico ou alternativamente o raio X pode ser reabsorvido transferindo sua energia a um elétron das camadas mais externas do átomo que é arrancado. Esse elétron que é arrancado chamamos de “elétron *Auger*”. No iodo, o raio X característico é emitido em 88% dos casos. Os elétrons *Auger* possuem um alcance muito pequeno por causa da sua pequena energia, já os raios X característicos podem percorrer cerca de alguns milímetros antes de ser reabsorvido. Embora o escape desses raios X possa, às vezes, ser significativo.

Deste modo o efeito da absorção fotoelétrica é a liberação de um fotoelétron que carrega a maior parte da energia do fóton gama, junto com um ou mais elétrons de baixa energia correspondentes da absorção da energia de ligação dos fotoelétrons. Se nada escapa do detector, a soma das energias cinéticas dos elétrons que são criados deve ser igual à energia do fóton do raio gama incidente.

A absorção fotoelétrica é então um processo ideal se o interesse é a medida da energia do raio gama incidente. Se o raio gama é monoenergético, a energia cinética total dos elétrons será sempre igual à energia do raio gama incidente.

Nessas condições, a distribuição diferencial de uma série de absorções fotoelétrica deveria ser uma função Delta como mostra a figura 2.3, onde dN/dE e E representam respectivamente a número de pulsos em função da energia do raio γ incidente.

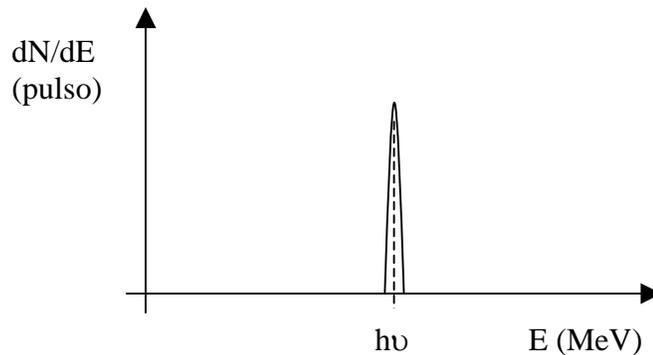


Figura 2.3: Ilustra uma distribuição diferencial de uma série de absorções fotoelétrica, (*The Radiation Detection and Mesurement , Glennf F. Knoll*).

2.2.2 - Espalhamento Compton

O resultado do espalhamento Compton é a criação de um elétron de recuo e um fóton de raio gama espalhado, a divisão de energia entre eles depende do ângulo de espalhamento.

A energia do gama espalhado é dada por:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + [(h\nu / m_0c^2) \cdot (1 - \cos \theta)]}$$

Onde θ é o ângulo de espalhamento do fóton e $m_0c^2 = 0,511$ MeV (energia de repouso do elétron).

A figura 2.4 ilustra um espalhamento compton, onde o raio gama incidente cede parte de sua energia para o elétron consequentemente aparecendo um raio gama espalhado.

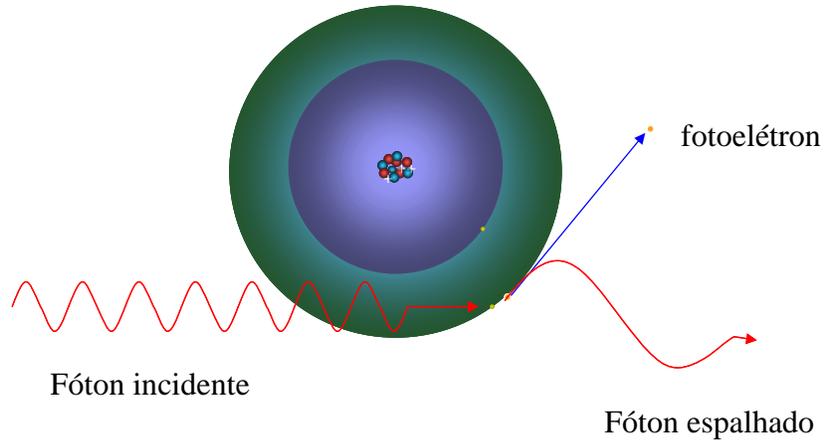


Figura 2.4: Representação do Espalhamento Compton.

A energia cinética do elétron de recuo é dada por :

$$E_e = (h\nu - h\nu') = h\nu \cdot \frac{[h\nu / m_0c^2 \cdot (1 - \cos \theta)]}{[1 + h\nu / m_0c^2 \cdot (1 - \cos \theta)]}$$

Dois extremos podem ser identificados:

- Quando $\theta \cong 0$, $h\nu' \cong h\nu$ e $E_e \cong 0$. Nesse extremo, o elétron de recuo possui uma energia muito pequena e o fóton espalhado possui praticamente a mesma energia do fóton incidente.
- Quando $\theta \cong \pi$. Esse extremo representa a energia máxima que pode ser transferida ao elétron de recuo.

$$h\nu' \Big|_{\theta = \pi} = \frac{h\nu}{(1 + 2 h\nu / m_0c^2)}$$

$$E_e \Big|_{\theta = \pi} = h\nu \cdot \frac{(2 h\nu / m_0c^2)}{(1 + 2 h\nu / m_0c^2)}$$

Em circunstâncias normais, todos os ângulos podem ocorrer. Logo, um espectro contínuo de energias pode ser transferido ao elétron.

Para qualquer raio gama de energia específica, a distribuição de energia do elétron possui a forma da figura 2.5.

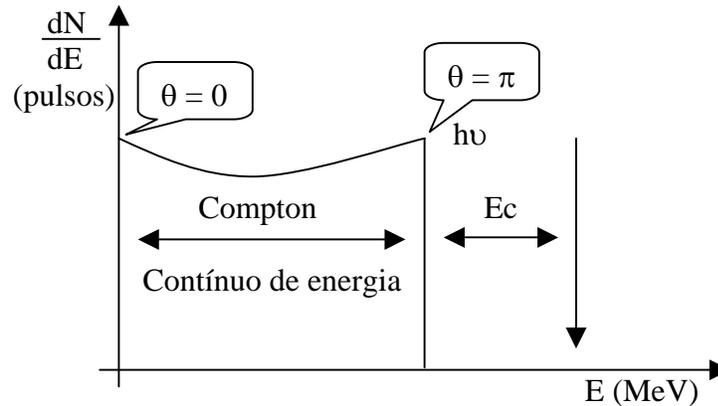


Figura 2.5: Mostra a distribuição da energia do elétron Compton de recuo, (*The Radiation Detection and Mesurement , Glennf F. Knoll*).

O *gap* de energia E_c entre a energia do elétron de recuo Compton máximo e o fóton incidente é dado de acordo com a equação abaixo:

$$E_c = h\nu - E_e \Big|_{\theta = \pi} = \frac{h\nu}{(1 + 2 h\nu / m_0 c^2)}$$

No limite que a energia do fóton incidente é grande, ou $h\nu \gg (m_0 c^2 / 2)$, essa diferença de energia tende a um valor constante igual a :

$$E_c \cong m_0 c^2 / 2 \quad (= 0,256 \text{ MeV})$$

O espalhamento Compton assume que o efeito ocorre com elétrons livres. No material dos detectores atuais, a energia de ligação dos elétrons pode afetar a forma do contínuo Compton. Esse efeito será mais notável para raios gamas incidente de baixa energia. Eles envolvem o arredondamento da subida do contínuo perto do extremo e introduz um declive finito na descida abrupta do joelho Compton. Esses efeitos são sempre

mascarados pela resolução de energia do detector mas podem ficar evidentes em espectros utilizando detectores com alta resolução.

A probabilidade de um espalhamento Compton acontecer é diretamente proporcional a Energia do fóton e inversamente proporcional ao número atômico do material , podemos ver isso na equação abaixo.

$$\sigma_{\text{esp. Compton}} \propto \frac{E}{Z}$$

2.2.3 - Produção de Pares.

O processo ocorre no campo gerado pelo núcleo e corresponde a criação de um par (elétron e pósitron) em um ponto com o desaparecimento do fóton incidente. Como uma energia mínima de $2m_0c^2$ é necessária para a criação do par, o raio gama deve ter energia mínima de 1,022 MeV para tornar possível a ocorrência deste processo. Se a energia do raio gama incidente for maior que 1,022 MeV, então, o excesso de energia aparece como energia cinética repartida igualmente entre elétron e pósitron.

A figura 2.6 ilustra o processo de formação de pares que ocorre para altas energias e material com alto número atômico.

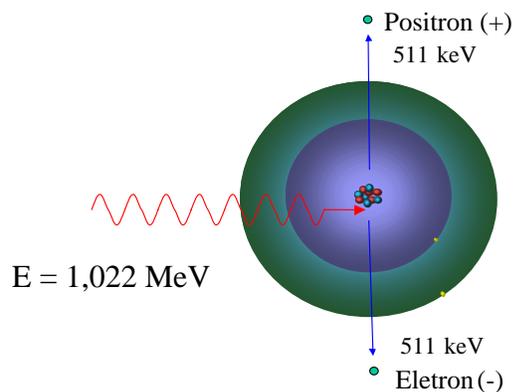


Figura 2.6: Representação da Formação de Pares.

Para energias típicas, o elétron ou o pósitron atravessam poucos milímetros antes de perder toda a sua energia no material absorvedor. Um gráfico da energia cinética total (elétron + pósitron) criada pelo fóton incidente também é uma junção delta, mas agora deslocada de $2m_0c^2$ da energia do fóton incidente, como é representado na figura 2.7.

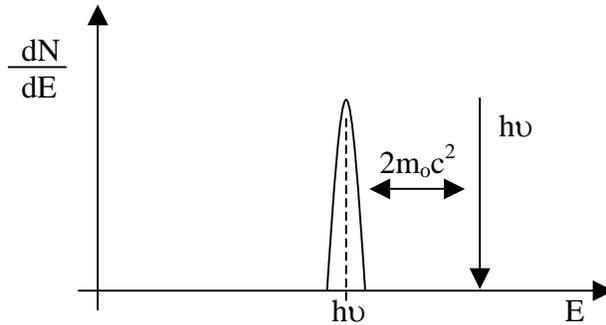


Figura 2.7: Representa a posição do pico de escape duplo no espectro de raio gama, *(The Radiation Detection and Measurement, Glenn F. Knoll)*.

A produção de par é um processo complicado porque o pósitron não é uma partícula estável. Quando a sua energia cinética se torna muito baixa, comparável com a energia térmica dos elétrons do material, o pósitron irá se aniquilar com um elétron do material. Nesse ponto, ambos desaparecem e aparece dois fótons de aniquilação com energia de m_0c^2 (0,511 MeV) cada um. O tempo necessário para o pósitron perder energia e se aniquilar é muito pequeno, então a radiação de aniquilação aparece em “coincidência” com a produção de par.

A probabilidade da produção de pares acontecer é proporcional a :

$$\sigma_{F, \text{ pares}} \propto E^2 \quad (E - 1,02 \text{ Mev})$$

2.3 – Atenuação de um feixe de fótons.

Quando um feixe de radiação λ atravessa um determinado material, podem ocorrer interações através dos 3 processos mencionados. Após uma interação qualquer, um raio λ é suprimido do feixe original (ou é absorvido completamente, ou é desviado da direção inicial do feixe). Quanto maior for a distância atravessada pelo feixe dentro do material, maior será o número de raios λ suprimidos e menor será a intensidade do feixe. Como os processos de interação são aleatórios a intensidade do feixe decai exponencialmente. Isto resulta do fato que a absorção numa espessura infinitesimal dx é proporcional à intensidade de radiação e à espessura considerada ou seja:

$$-dI = \mu I dx$$

Transportando I , obtemos:

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx$$

A partir desta relação, chamando I_0 a intensidade inicial, pode-se demonstrar que:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

onde I_0 é a intensidade do feixe inicial (número de fótons por segundo), $I(x)$ é a intensidade do feixe após atravessada uma distância x , e μ é o coeficiente de absorção total (devido aos 3 processos de interação), o qual depende do material absorvedor e da energia do raio gama. O valor do coeficiente de absorção para diversos elementos em função da energia pode ser obtido da literatura. Em geral são apresentados gráficos do coeficiente mássico (μ/ρ) de absorção, onde ρ é a densidade do material.

$$\mu = \mu_f + \mu_c + \mu_p$$

onde: μ_f é o coeficiente de absorção fotoelétrico

μ_c é o coeficiente de absorção Compton

μ_p é o coeficiente de absorção por criação de pares

2.4 – Resposta dos Detetores comerciais para diversos níveis de energia de raios gama.

O espectro para baixas energias do raio gama incidente, onde a produção de par não é significativa consiste em um contínuo Compton e um fotopico. A área relativa do fotopico aumenta com o decréscimo da energia do fóton incidente. Para energias menores que 100 keV, o contínuo Compton pode efetivamente desaparecer.

Para energias médias, a possibilidade de múltiplo espalhamento seguido de um escape do último fóton espalhado permite que a energia total depositada seja maior que a energia depositada por apenas um único espalhamento com escape do fóton espalhado. Esses eventos múltiplos podem ocupar o *gap* entre o joelho Compton e o fotopico, assim como distorcer o forma do contínuo prevista para um único espalhamento.

Se a energia do raio gama incidente é grande para formar produção de par, então os fótons de aniquilação podem escapar ou sofrer alguma interação dentro do detetor.

Se ambos os fótons de aniquilação escaparem sem interagir, então formará o pico de escape duplo, mas pode ocorrer que apenas um fóton de aniquilação escape e o outro seja totalmente absorvido contribuindo assim para o pico de escape simples que aparece no espectro com energia de $(h\nu - m_0c^2)$. Um range contínuo de outras possibilidades existe no qual, um ou os dois fótons de aniquilação podem perder parte da sua energia por espalhamento Compton e depois escapar.

A função reposta para um detetor real de raio gama irá depender do tamanho, da forma, da composição do detetor, e também dos detalhes geométricos das condições de irradiação.

Algumas propriedades da função resposta são geralmente interessantes em espectrometria. A fração de fótons é definida como a razão entre a área do fotopico (ou do pico da energia total) e a área abaixo de toda a função resposta. Essa é uma medida direta da probabilidade do raio gama depositar toda a sua energia por qualquer processo dentro do detetor.

Os picos de escape duplo ou simples são completamente parte da função resposta e podem, em algumas circunstâncias, se tornar maior que o fotopico. A razão entre a área do

pico de escape simples ou duplo e a área do fotopico é uma propriedade da função resposta que pode ajudar a interpretar espectros complexos.

Para o caso dos detetores comerciais a figura 2.8 ilustra as interações que podem afetar a função resposta do detector para baixas, médias e altas energias dos raios gama incidentes.

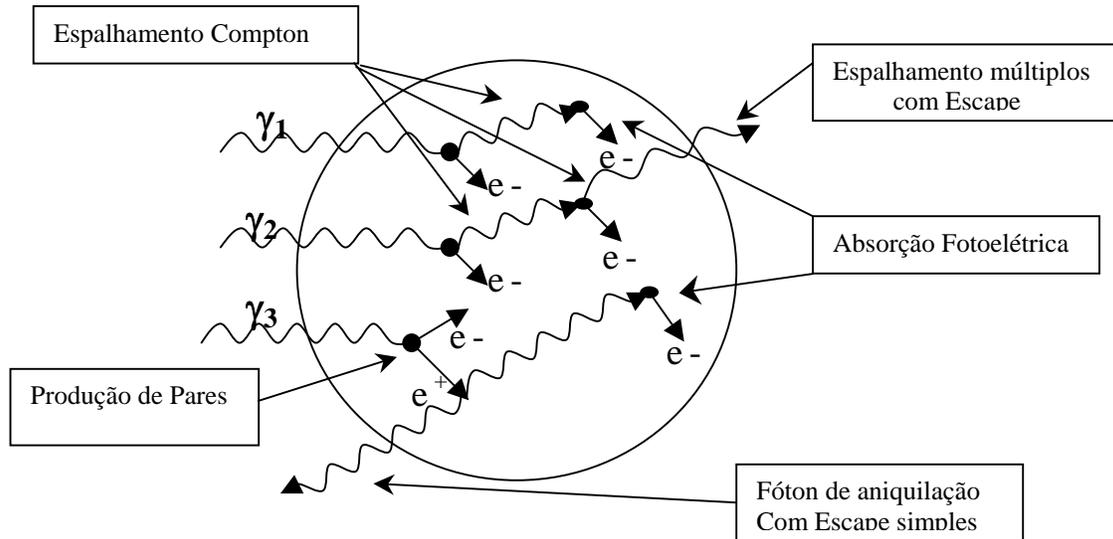


Figura 2.8: Interações na função resposta do detector, (*The Radiation Detection and Mesurement*, Glenn F. Knoll).

A figura 2.9 ilustra o comportamento dos espectros diferenciais para diferentes níveis de energia do fóton incidente para detetores comerciais.

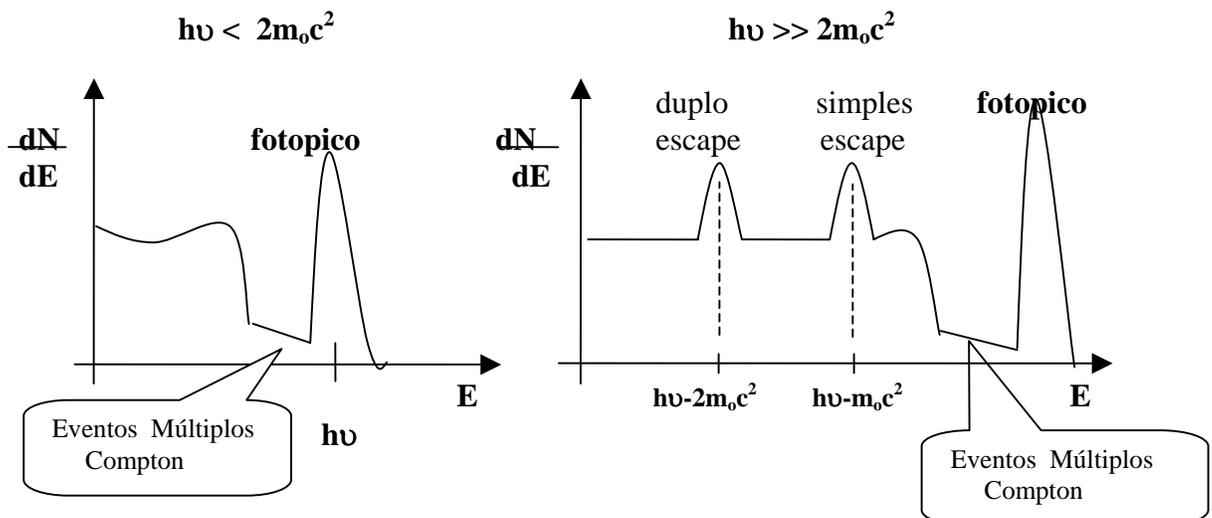


Figura 2.9: Espectros diferenciais para detetores comerciais, (*The Radiation Detection and Mesurement*, Glenn F. Knoll).

2.5 - Eventos que interferem a função resposta do detector:

2.5.1 - Escape de elétrons secundários:

Se o detector não é grande comparado com o alcance dos elétrons secundários, então uma fração significativa dos elétrons pode escapar do detector e essa energia não será coletada. A forma do contínuo Compton será alterada a favor das menores amplitudes. Como alguns eventos do fotopico serão perdidos, então a Photofraction será reduzida em comparação com o caso onde não há escape de elétrons.

2.5.2 - Escape de *Bremstrahlung*:

Esse processo é mais significativo para elétrons com energia a partir de poucos MeV. Existe a possibilidade da radiação de *Bremstrahlung* escapar sem interagir com o detector. O efeito na função resposta é similar ao que acontece com o escape dos elétrons. Para ambos os processos a forma da função resposta é alterada, mas picos não são introduzidos.

2.5.3 - Escape de raio X Característico:

Na maioria dos casos a energia do raio X é reabsorvida. Mas se a absorção fotoelétrica ocorrer perto da superfície do detector, então o raio X pode escapar. Nesse caso, a energia depositada no detector diminui pela quantidade de energia do raio X que escapou. Um novo pico irá aparecer na função resposta e será localizado a uma distância igual a energia de escape do raio X característico. Esses picos são chamados picos de escape de raio X e são mais evidentes para baixas energias de raios gama incidentes e para detectores cuja razão (superfície – volume) é grande.

2.5.4 – Interações secundárias criadas pelo decaimento radioativo.

a) Radiação de aniquilação

Se a fonte de raio gama consistir em um isótopo que decai pela emissão de pósitron, então um pico adicional de 0,511 MeV no espectro é esperado devido aos fótons de aniquilação criados quando o pósitron para. A maioria dos processos monitorados possuem materiais com espessura para parar todos os pósitrons, então eles vão se aniquilando na região imediatamente envolta ao processo. Essa região, então, produz uma fonte de

0,511MeV de radiação de aniquilação, que será adicionado ao espectro gama esperado pelo decaimento dos isótopos radioativos do processo.

b) Bremsstrahlung

As mais comuns fontes de raios gama decaem por beta menos. Um material externo é utilizado para prevenir que as partículas betas depositem a sua energia no detector e complique o espectro gama. Na absorção, entretanto, algumas radiações secundárias na forma de *Bremsstrahlung* será gerada e poderá interagir com o detector, contribuindo para o espectro. O espectro de *Bremsstrahlung* pode ter energia máxima igual a energia da partícula beta, mas existe a possibilidade de energias menores. Como o espectro de *Bremsstrahlung* é contínuo, ele não cria novos picos, mas adiciona um contínuo em todo o espectro superpondo valores. Essa contribuição não pode ser subtraída como o background, então a sua inclusão pode causar erros quantitativos na medida das áreas dos picos. Para minimizar esse efeito o uso de absorvedores de beta com baixo número atômico como o Berílio é sempre recomendado.

2.5.5 - Efeitos dos materiais envoltórios:

Em situações práticas, o detector usado para espectrometria gama é envolvido por outro material que pode interagir na resposta. O detector é encapsulado para produzir uma barreira contra umidade e luz ou é montado com uma estrutura à vácuo. Para reduzir o background natural, a maioria dos detectores gama opera com blindagem. Todos esses materiais usados nas blindagens são fontes potenciais de radiação secundária. Se a radiação secundária interagir com o detector, ela pode influenciar na forma do espectro. Algumas possibilidades é mostrada na figura 2.10:

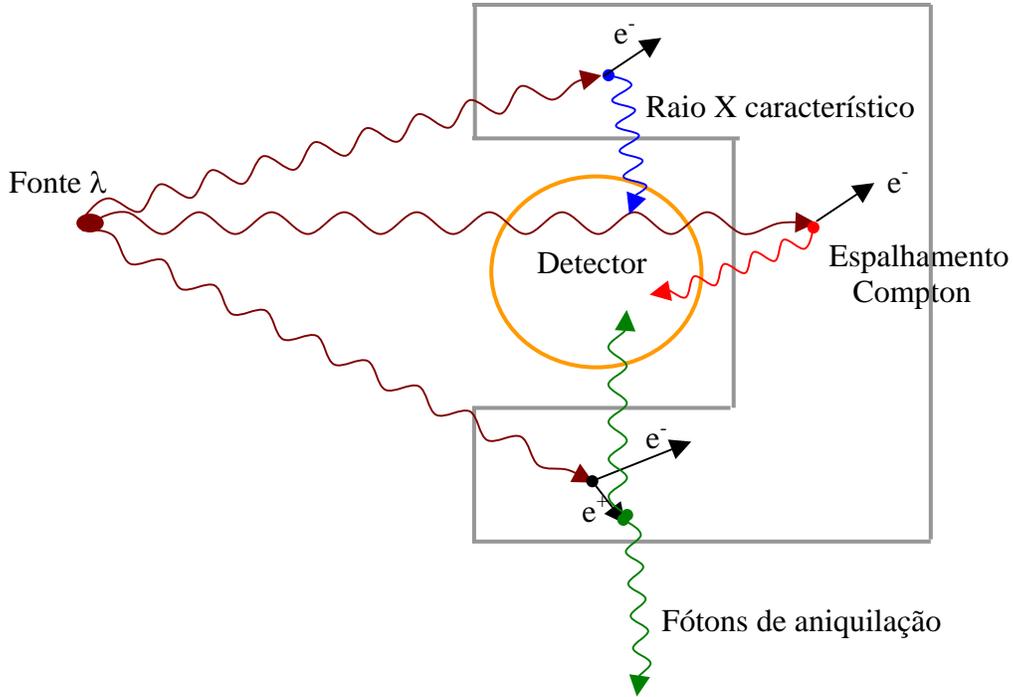


Figura 2.10: Mostra alguns tipos de interações secundárias que podem interferir na função Resposta dos detectores, (*The Radiation Detection and Measurement*, Glenn F. Knoll).

A influência dos materiais circunvizinhos na resposta do detector é mostrado no espectro de energia apresentado na figura 2.11.

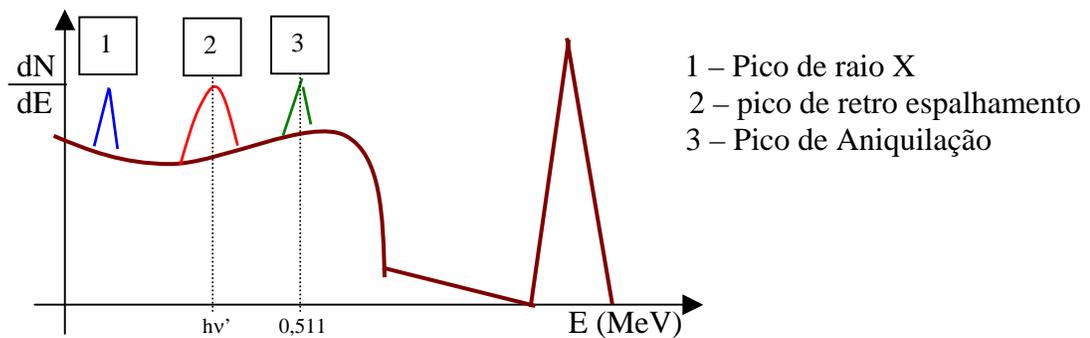


Figura 2.11: Influência da radiação secundária na resposta do detector, (*The Radiation Detection and Measurement*, Glenn F. Knoll).

2.6 – Principais Propriedades dos detectores Cintiladores.

2.6.1 - Resolução em Energia (R)

É o poder de discriminação em energia de duas partículas com energias diferentes.

Em muitas aplicações de detectores, um dos objetivos é medir a distribuição de energia da radiação. Uma propriedade importante de um detector é a resolução a uma fonte monoenergética.

$$R = \frac{FWHM}{H_0}$$

Onde: FWHM é a largura a meia altura e
H₀ é o canal central do pico

A resolução em energia dos cintiladores é limitada comparada com outros detectores usuais, e o espectro apresenta picos largos.

a) Origem da perda de Resolução

A resolução de qualquer detector pode conter contribuições devido a variação estatística de coleção de carga, ruído eletrônico, variação na resposta do detector devido ao seu volume ativo e deslocamento dos parâmetros de operação durante a medição. Para os cintiladores, a flutuação no ganho das fotomultiplicadoras de um evento para o outro pode ser adicionada a resolução. Para espectrometria gama a maior contribuição é devido a variação estatística na conversão dos fótons em elétrons no fotocátodo. A contribuição do ruído eletrônico é usualmente desprezada quando usados com cintiladores, então os preamplificadores e outros componentes eletrônicos não precisam esquemas muito elaborados para redução de ruído. Variações na coleção de luz sobre o volume do cristal pode ser um problema significativo. Nos cristais de tamanhos típicos vendidos essa não uniformidade é uma pequena parte da largura do pico. Deslocamento nos parâmetros de operação está associado a fotomultiplicadora e pode ser severo se o detector for submetido a grandes mudanças da taxa de contagem e da temperatura.

b) Variação estatística na conversão dos fótons em elétrons no fotocato da fotomultiplicadora .

A flutuação estatística é a causa mais importante da largura do pico nos cintiladores. Essa flutuação será mais significativa depois da conversão da luz de cintilação em elétrons no fotocato da fotomultiplicadora.

Exemplo: O cintilador NaI (Tl) a Eficiência é aproximadamente 12%

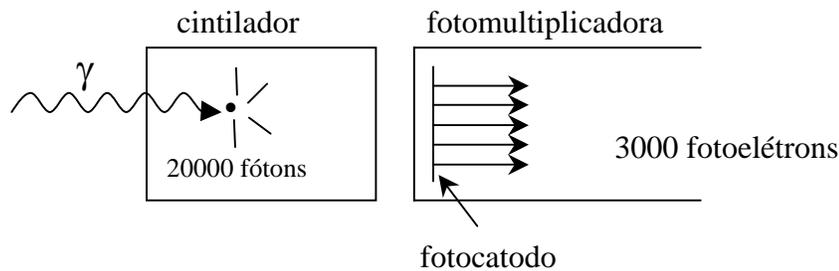


Figura 2.12: Ilustra a eficiência da conversão de luz de cintilação em elétrons no fotocato da fotomultiplicadora, (*The Radiation Detection and Measurement*, Glenn F. Knoll).

São produzidos 20000 fótons de cintilação, apenas 15000 interagem com o fotocato, mas apenas 3000 fotoelétrons são criados. Esse número é o menor sinal na cadeia de formação do pulso porque nos estágios seguintes da fotomultiplicadora ele será amplificado.

A amplitude do sinal produzida na fotomultiplicadora é proporcional a esse número de fotoelétrons. Para eventos repetidos, a mesma energia é depositada no cristal, a amplitude do pulso irá flutuar devido a flutuação estatística dos números de fotoelétrons coletados em cada evento.

Se assumirmos a estatística de *Poisson*, o desvio padrão do número de fotoelétrons deve ser a Raiz quadrada do número médio produzido.

Se assumirmos a distribuição de *Gauss*, o FWHM será 2,35 vezes o desvio padrão.

Em casos práticos, considera-se que FWHM é proporcional a raiz quadrada da energia do raio gama. A média da altura do pulso produzida é diretamente proporcional; a energia do raio gama, Então,

$$R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} = \frac{K \cdot (E)^{1/2}}{E} = \frac{K}{(E)^{1/2}}$$

c) Outros fatores que interferem na perda de resolução de Energia.

- **Resolução Intrínseca do Cristal:** Nos cintiladores modernos esse efeito é menor do que 2%, maiores flutuações aparecem por causa da condição de reflexão que existe na superfície do cristal. A não uniformidade na eficiência de coleção de luz pode introduzir um alargamento do pulso, especialmente para grandes detectores.

- **Variância introduzida pela fotomultiplicadora:** Pode ter uma contribuição significativa a uniformidade da coleção dos fotoelétrons pelo fotocatodo é um fator importante, assim como a flutuação estatística da multiplicação dos elétrons. Existe uma considerável variação na performance de diferentes tipos de fotomultiplicadora.

O componente mais sutil da resolução intrínseca do cristal origina-se da não linearidade da resposta do cintilador NaI(Tl). Se todos os raios gama incidentes interagirem e toda a sua energia forem convertidos para um único elétron, essa não linearidade não será uma fonte de perda de resolução. Entretanto, a radiação incidente pode interagir e gerar dois ou mais elétrons secundários através de um único ou múltiplos espalhamentos Compton seguidos pela absorção fotoelétrica. Além disso, mesmo se ocorrer uma simples absorção fotoelétrica, o átomo que fica excitado pode converter a sua energia de excitação na forma de elétron *Auger*. Consequentemente, um fluxo de fótons incidentes monoenergéticos irá permitir uma extensa distribuição de energia dos elétrons dentro do cristal. Se a resposta do cristal não é linear com a energia dos elétrons, o rendimento total de luz será diferente de evento para evento, dependendo dos detalhes de subdivisão de energia entre os vários elétrons que são produzidos.

Esses efeitos são significante para energias de raios gama de poucas centenas de keV, para os quais as múltiplas interações são predominantes.

É convencional usar o Cs^{137} (0.662 MeV) como padrão para relacionar o número de canais com a energia.

A resolução para detectores cilíndricos de NaI(Tl) é cerca de 6 a 7 %. Se a forma do cristal não for cilíndrica, a maior dificuldade de coleção de luz torna a resolução pior.

d) Prevenção na Perda de Resolução.

Algumas medições com cintiladores devem se estender por muitas horas, ou até dias, então, o deslocamento no ganho da fotomultiplicadora e outros componentes do circuito podem causar perda de resolução. As técnicas para minimizar esses efeitos operam melhor quando existe um único pico isolado no espectro a partir do qual um erro no sinal pode ser derivado para ajustar a variação do ganho. Se um pico grande e isolado não existir no espectro ou se a taxa de contagem for baixa, esses métodos podem ser impraticáveis.

Um método alternativo pode ser usado que é baseado na produção de uma fonte de luz de referência dentro do pacote do cintilador para produzir um pico artificial no espectro. Se os pulsos de luz possuem intensidade constante, um sinal de retorno pode ser gerado para ajustar o ganho do sistema para manter os picos em uma posição constante no espectro. As fontes de luz usadas são: Uma combinação de isótopos radioativos com um fósforo adequado, ou um sinal eletrônico.

2.6.2 - Linearidade

A eficiência de cintilação ou a quantidade de luz gerada por unidade de energia depende do tipo da partícula e de sua energia cinética. Para espectrômetros ideais a eficiência de cintilação deve ser constante, independente da energia da partícula. A resposta do cintilador deve ser perfeitamente linear.

Para elétrons no cintilador NaI(Tl), a eficiência de detecção varia suavemente com a energia dos elétrons. Para espectrometria de elétrons, alguma não linearidade deve ser esperada. Já a média da altura dos pulsos observados para raios gama é perto de ser linear com a energia dos Fótons, mas medidas de não linearidade permanecem.

2.6.3 - Eficiência de Detecção

a) Forma do Cristal

Duas formas são muito usadas para aplicação com raio gama. O cilindro circular sólido é simples de ser manufaturado e encapsulado e pode ser montado diretamente com a face circular da fotomultiplicadora. Se a razão altura – diâmetro do cilindro não for grande, as propriedades de coleção de luz são favoráveis nessa geometria. Se a razão altura – diâmetro é muito menor que 1, a resolução da altura de pulso pode ser melhorada

interpondo um tubo de luz entre o cristal e a fotomultiplicadora para espalhar a luz mais uniformemente para todo fotocatodo.

Um bom cristal é um cilindro circular bem certo, normalmente bem acabado onde ao longo do seu eixo é construído um poço. A vantagem dessa geometria é a alta eficiência de contagem que pode ser alcançada colocando amostra para ser contada no fundo do poço. Nessa posição, quase todos os raios gama, que são emitidos isotropicamente, são interceptados pelo cristal.

Para baixa contagem, a eficiência nessa geometria pode se aproximar de 100%. Para altas energias, essa vantagem pode ser perdida porque o caminho médio através do cristal é algo menor que se o raio gama incidir externamente em um cristal sólido.

b) Eficiência dos dados

Os dados de eficiência do detector são normalmente apresentados na forma de gráficos do valor da eficiência em função da energia do raio gama.

- A eficiência de detecção é o quanto o detector consegue detectar de pulsos emitidos por uma fonte, é classificada em absoluta e intrínseca. Uma especificação adicional deve ser feita, como os tipos de eventos são aceitos pelo sistema de contagem as escolhas mais comuns são eficiência de fotopico ou eficiência total.

$$\text{Eficiência Absoluta} = \frac{\text{Número partículas detectadas}}{\text{Número de partículas emitidas}}$$

$$\text{Eficiência Intrínseca} = \frac{\text{Número partículas detectadas}}{\text{Número de partículas incidentes no detector}}$$

- O tamanho e a forma do cristal têm uma grande influência na eficiência de contagem, mas a maior influência está na espessura do cristal na direção do raio gama incidente. Suaves variações com outras dimensões de detector devem ser esperadas.

- O tamanho e a natureza física da fonte também influencia na eficiência de contagem. Eficiência absoluta é sensível a distância entre a fonte e o detector, essa dependência é muito suave para eficiência intrínseca e somem totalmente se a fonte está suficientemente longe do detector.

- Qualquer absorção que ocorrer entre o ponto de emissão do raio gama e o cristal irá influenciar na eficiência de detecção

Existe dos métodos pelos quais os dados sobre eficiência podem ser gerados. A mais direta é medir a taxa de contagem de uma fonte de raios gama com uma atividade conhecida (precisão de 1%). Normalmente, o técnico deve utilizar várias fontes com diferentes energias para levantar a curva de eficiência de detecção.

Um segundo método é calcular a eficiência baseando-se no conhecimento das probabilidades de interação dos raios gama. A eficiência total é o valor das probabilidades de interação integrado para todos os caminhos.

($1 - e^{-\mu l}$) onde, μ - coeficiente linear de absorção

l – caminhos

Para geometria simples, a integração pode ser calculada analiticamente, mas em geral, muitos casos devem ser simulados pelo Método de Monte Carlo por causa das múltiplas interações e com isso a grande dificuldade de se calcular analiticamente.

Método de Monte Carlo – um experimento computacional, o resultado obtido está sujeito a incertezas estatísticas determinadas pelo número de ocorrências que foram calculadas. O resultado é específico para a geometria do detector e a energia do raio gama e não pode ser generalizado.

2.6.4 - Resposta em Tempo

O tempo de decaimento do pulso de cintilação do cristal NaI(Tl) é da ordem de 230 ns, incomodamente longo para aplicações que necessitam resposta rápida onde temos alta taxa de contagem. Na adição de produtos, uma fosforescência com tempo característico de decaimento da ordem de 0,15 segundos tem sido medido, esta contribui em 9% para o produto total da luz. Outra componente de fosforescência de vida mais longa também tem sido medida devido a constante de tempo do anodo do tubo fotomultiplicador ser usualmente muito mais curta que esses tempos de decaimento, cada fotoelétrons associado com a fosforescência é normalmente resolvido individualmente. Em baixas taxas de contagem, o resultado é então uma série de pulsos de únicos elétrons que seguem o pulso

de cintilação principal e usualmente são bem baixas as amplitudes de interesse na medição. Existem aplicações, entretanto em que a sensibilidade de um único elétron é necessária e a influência desses pulsos fosforescentes pode ser significativa. Em altas taxa de contagens, a fosforescência tenderá ser construída devido a múltiplas sobreposições de muitos pulsos precedentes. Este “brilho retardado” é freqüentemente uma indesejável característica do Iodeto de sódio usado nas aplicações para alta taxa de contagens.

2.7 - Mecanismo de Cintilação dos Cristais Inorgânicos com Ativadores:

Durante a década de 1950 começaram a ser desenvolvidos detectores de cintilação de elevada eficiência, grande rapidez de resposta (da ordem dos nano-segundos) e com uma razoável resolução em energia ($\Delta E / E \cong 0,08$ para fonte de Cs137) baseada em cristais inorgânicos. Um passo fundamental no desenvolvimento deste tipo de detectores foi a criação de tubos fotomultiplicadores capazes de detectarem sinais luminosos muito fracos (um número pequeno de fótons) e de os converterem em sinais elétricos. De fato já eram conhecidos materiais cintiladores há muitos anos, mas a impossibilidade de converter o sinal luminoso num sinal elétrico tinha até então impedido a sua utilização na detecção de radiações nucleares.

O Iodeto de sódio é um material que se pode apresentar na forma cristalina e que ao absorver radiações ionizantes emite fótons de cintilação. Na figura 2.13 abaixo está esquematizada a situação de absorção de um fóton de energia elevada ($E > 10 \text{ keV}$).

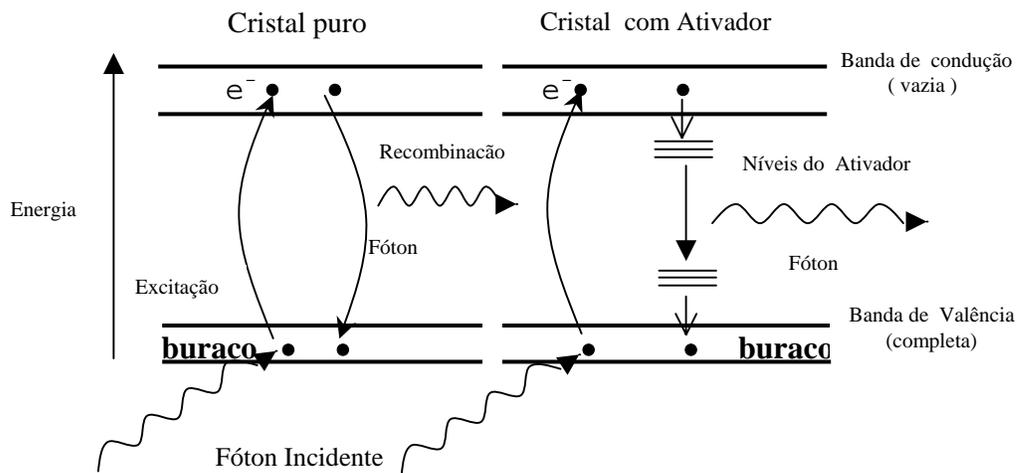


Figura 2.13: Estrutura de faixa de energia de um cristal puro e com ativador.

Num cristal puro, a energia da radiação incidente absorvida é cedida aos elétrons da banda de valência, sendo estes excitados para a banda de condução (que inicialmente se encontra vazia). Quando os elétrons da banda de condução se desexcitam emitem um fóton. Este fóton (de cintilação) tem uma energia que é igual à energia perdida pelo elétron quando transitou da banda de condução para a banda de valência. Por esse motivo pode ser absorvido por um elétron da banda de valência, que passará para banda de condução. O resultado prático deste processo é que o cristal é opaco à sua radiação de cintilação sendo pequena a quantidade de luz que sai. Para contornar esta situação utiliza-se pequenas quantidades de um material, chamado ativador (no caso do NaI é usado tálio) e cujo papel é o de criar níveis de energia ligeiramente acima da banda de valência e ligeiramente abaixo da banda de condução. Normalmente estes níveis de energia encontram-se vazios, mas quando um elétron é excitado para a banda de condução, pode agora desexcitar-se em primeiro lugar para um dos níveis abaixo da banda de condução. Em seguida o elétron pode desexcitar-se para os níveis acima da banda de valência emitindo o fóton de cintilação e finalmente regressando à banda de valência. Agora o fóton de cintilação não possui energia suficiente para fazer a transição de um elétron da banda de valência para a de condução, não podendo ser absorvido por esse processo. O cristal é transparente para estes fótons, que assim conseguem atravessá-lo chegando ao fotomultiplicador. No caso do NaI(Tl) o comprimento de onda dos fótons emitidos situa-se numa banda com o máximo nos 410 nm.

2.8 – Geração de Sinal Elétrico

2.8.1 – Tubos Fotomultiplicadores

A estrutura básica de uma fotomultiplicadora é apresentada na figura 2.14. Os componentes principais da estrutura são: o fotocatodo, a óptica de focalização de elétrons, os dinodos e o anodo. O processo de multiplicação inclui inicialmente a transferência da energia do fóton para um elétron no fotocatodo, a migração de elétron até a superfície do fotocatodo, o transporte de elétron até o primeiro dinodo. A partir daí os elétrons são conduzidos num processo de multiplicação até o anodo.

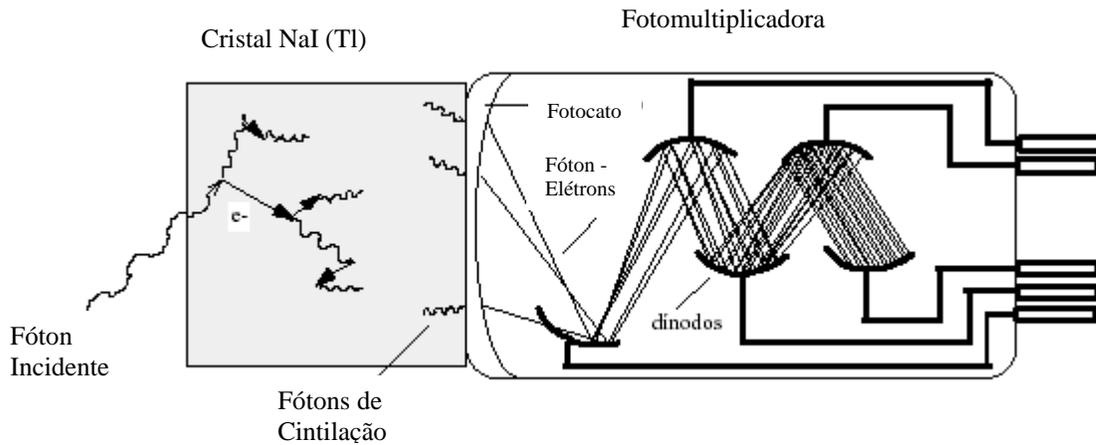


Figura 2.14 : Estrutura básica de um tubo fotomultiplicador acoplado com um cristal Cintilador NaI (Tl).

Podem-se delinear algumas características esperadas para o fotocato:

- Deve dispor de uma banda estreita para permitir a passagem de elétrons da banda de valência à banda de condução pela absorção de luz visível;
- Deve ser espesso o bastante para que o processo de absorção seja eficiente, mas fino o suficiente para que os elétrons não sejam reabsorvidos durante o percurso até a superfície do dinodo.
- Deve apresentar função trabalho baixa. Função trabalho é a energia necessária para desprender um elétron da superfície de um meio. Em metais esta energia é da ordem de 3 – 4 eV, mas pode chegar a 1,5 – 2 eV em semicondutores.

Estas características fazem do fotocato o componente crítico da fotomultiplicadora.

A óptica de focalização de elétrons é composta por eletrodos que geram um campo elétrico que guia os elétrons para a superfície do primeiro dinodo. Uma diferença de potencial é aplicada entre dinodos subsequentes, de modo que os elétrons são acelerados e geram novos elétrons nos choques com as superfícies. O material componente da superfície dos dinodos é escolhido para que cada elétron incidente provoque a emissão de vários (pelo menos mais 1) elétrons da mesma superfície. É possível que, com uma diferença de potencial de 100V aplicada entre dinodos, cada elétron produza cerca de 30 novos elétrons. Entretanto, apenas uma pequena fração destes atinge o próximo dinodo, já que muitos não

chegam a se desprender da superfície. Desde 1970 são disponíveis materiais com afinidade negativa. O tratamento da superfície dos dinodos com estes materiais (exemplo: GaP, dopado com Zn) aumenta o rendimento da re-emissão de elétrons.

A estrutura fotomultiplicadora composta pelos dinodos, portanto fornece um ganho em corrente elétrica. Com n dinodos o ganho é expresso por $G = \alpha \delta^n$, onde α é a fração de fotoelétrons coletados (próximo de um para os melhores tubos). O valor de δ é próximo de 5 para os dinodos convencionais. Seu valor depende naturalmente da tensão entre dinodos. Ganhos de ordem de $10^6 - 10^7$ são atingíveis com fotomultiplicadoras de 10 estágios.

O processo de multiplicação tem um aspecto estatístico importante. Pode ser mostrado, admitindo-se que a produção de elétrons nos dinodos siga uma distribuição de *Poisson*, que o valor médio do número total de elétrons produzidos para um elétron gerado no primeiro dinodo é δ^n , com variância $1 / (\delta - 1)$. Melhor resolução em energia é obtida com valores altos de δ .

Um outro componente necessário ao funcionamento da fotomultiplicadora, não mostrado na figura 2.14, é a chamada base. Consiste num circuito que distribui os valores de tensão a cada dinodo a partir de uma tensão de alimentação (\cong divisor resistivo). A partir da base se extrai o sinal de anodo, que traz a informação sobre o número total de elétrons gerados por fóton absorvido.

2.8.2 – *Microchannel Plates*

Vários outros tipos de fotomultiplicadoras existem, com desenhos diferentes do mostrado na figura 2.14. Dentre estas a mais interessante é provavelmente a estrutura em canal, em que o processo de multiplicação ocorre no interior de um tubo. O aspecto interessante é que os canais são na verdade micro-estruturas, que podem ser dispostas de modo a cobrir uma superfície. Tipicamente $10^4 - 10^7$ canais (ou furos) podem ser implantados numa superfície de 1 polegada de diâmetro. Estas estruturas são conhecidas como *microchannel plates*. Podem ser considerada fotomultiplicadora com sensibilidade a posição de medição.

2.9 - Eletrônica Nuclear

A indústria de eletrônica para aplicações nucleares definiu normas como dimensões, tipos de conectores e cabos, valores de tensões e tipos de pulsos de sinal, no que é conhecido como norma NIM (*Nuclear Instrumentation Modules*), onde podemos obter uma visão básica de transmissão e processamento de pulsos envolvidos na manipulação dos sinais produzidos na detecção da radiação nuclear.

2.9.1 – Cabos coaxiais

Toda conexão entre os módulos que constituem um sistema de detecção é feita com cabos coaxiais, constituídos de um fio condutor central, envolvido por um isolante (dielétrico) e depois por uma malha de fios fino trançados, que tem a função de blindar o condutor central de campos externos.

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

No caso de pulsos rápidos, principalmente a impedância característica do cabo se torna extremamente importante no acoplamento deste com os módulos que produzem e recebem o sinal. Esta propriedade é independente do comprimento do cabo, sendo definida basicamente pelas dimensões transversais do mesmo e do material dielétrico empregado.

Tabela 2.1 mostra as características mais importantes de alguns cabos coaxiais.

Tipo	Isolante	Diâmetro (mm)	Impedância (Ω)	Veloc. (v/c)	Isolação (V)
RG-58C/U	Polietileno	5.0	50	0.66	1900
RG-62/U	Polietileno	6.1	93	0.84	750
RG-174/U	Polietileno	2.5	50	0.66	1500
RG-178/U	Teflon	1.8	50	0.69	1500

2.9.2 – Principais módulos definidos pela norma NIM .

- Conformadores de pulso
- Pulsos NIM
- Pré-Amplificadores
- Amplificadores
- Módulos analógicos / lógicos
- Contadores, relógios e medidores de taxa
- Geradores de marca de tempo e conversores tempo - amplitude
- Outros módulos NIM

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Especificações Técnicas dos Detectores

A seguir serão apresentados os dados técnicos dos detectores Iodeto de sódio “NaI(Tl)”, utilizados na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

Os detectores são de fabricação *Crismatec* e servirão de parâmetros iniciais para avaliação da performance dos detectores.

3.1.1 – Dados Gerais:

1. Tipo : K 6 SS 4 / 2G – X/1 – ANGRA 2
2. Cristal cintilador: NaI(Tl) \varnothing 3,81 cm x 2,54 cm de comprimento
3. Photo multiplicadora: EMI 9266 B ou equivalente
4. Construção: Aço Inoxidável, banho de Níquel, banho de Cromo e Blindagem Magnética.
5. Sensibilidade de Foco: Potenciômetro tipo 3006 P protegido contra água.
6. Peso total: Em torno de 2 quilos.

3.1.2 – Dados Técnicos:

1. Temperatura para transporte e estocagem: 0° C até 60° C
2. Mudança de temperatura : Máx. 10° C/hora em operação, estocagem e transporte.
3. Qualificação do detector: IP 54, DIN 40050.
4. Qualificação das medidas: DIN 57411 parte 1.10.73 e VDE 412.
5. Sensibilidade contra campo magnético: até 0,2 mT o detector não sofrerá alteração nas especificações descritas no item 3.1.5.

3.1.3 – Dados técnicos do Preamplificador integrado no detector.

1. Impedância de Saída: cabo coaxial para 50 ohms
2. Amplitude do Sinal de saída: até 7,2 V com 50 ohms de Impedância.
3. Pulso de Saída: Positivo (negativo quando requerido). Para Amplitude de 1,2 V até 5,0 V temos:

- Tempo subida: 0,35 a 0,45 μsec
- Tempo descida: 2,5 a 3 μsec
- Tempo Total: 3,7 a 4,2 μsec

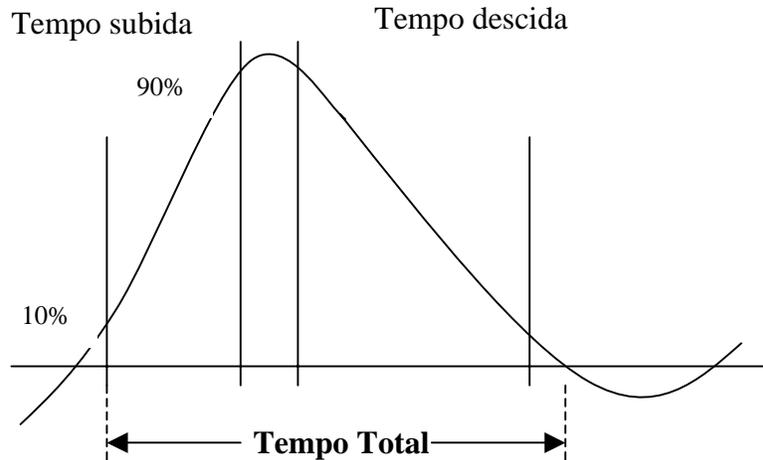


Figura 3.1: Ilustra o pulso de saída do Detector NaI(Tl) "Crismatec".

4. Entrada para Pulso de Teste:

- Pulso de Entrada: + 5 Volts
- Tempo de subida: 0,25 μsec
- Tempo de descida: 35 μsec com pulso de saída de 5,5 V com 50 ohms de Impedância.

5. Ruído Eletrônico: Ruído dos componentes do detector $\leq 30 \text{ mV}$

3.1.4 – Condições de Operações do Detector.

1. Temperatura : + 5° a + 60° C
2. Alta Tensão de Operação: 830 V a 970 V (neste range o fator de conversão mV / keV é ajustado no potenciômetro).
3. Alimentação para o preamplificador : +18V a +22V (12mA a 30mA)

3.1.5 – Especificações Padrão das Características do Detector.

1. Resolução em Energia (Cs^{137}) : FWHM = 8,5 % ou melhor
2. Fator de Conversão (Cs^{137}) : 3 mV / keV $\pm 5\%$
3. Desvio permitido da linearidade Integral (60 a 1331 keV) : $\pm 5\%$ (normalizado em 661 keV),

4. Saída (contagens / segundos), limiar de corte em 40 keV ; nas condições de geometria fornecida pelo fabricante (suporte colocado em frente ao detector).
- a) Fonte Cs¹³⁷ - atividade 33 (kBq) –Taxa de contagem 3394 (cps) – desvio permitido (±10%) – Data 01/01/95.

Cálculo da eficiência do detector com dados do fabricante:

$$E_{(abs)} = \text{Taxa de Contagens} / \text{atividade} = (3394 / 33000) \times 100\% = \mathbf{10,28\%}$$

- b) Fonte Co⁶⁰ – atividade 32,9(kBq) – Taxa de contagem 5724 (cps) – desvio Permitido (±10%) – Data 01/01/95.

$$E_{(abs)} = \text{Taxa de Contagens} / \text{atividade} = (5724 / 32900) \times 100\% = \mathbf{17,40\%}$$

Tabela 3.1 : Dados de Calibração dos detectores para limiar de corte em 40 keV(*manual Especificações Técnicas, CRISMATEC*).

Fonte nº	Nuclídeo	Atividade (kBq)	Tolerância 3σ da atividade da fonte	Data	Taxa de Contagem (pos. frente) CPS	Desvio Permitido (%)	Eficiência Absoluta Calculada (%)
302-88	Am-241	288	± 1.0 %	01/01/95	16947	± 15 %	5,88 %
252-93	Cs - 137	33	± 1.5 %	01/01/95	3394	± 10 %	10,28 %
108-94	Co - 60	32,9	± 1.5 %	01/01/95	5724	± 10 %	17,4 %

5. *Background*: Taxa de Contagem Total < 20 cps sem blindagem com taxa de dose local inferior a 0,1 mSv por mês.

3.2 – Levantamento dos Detectores Instalados e suas aplicações:

Neste item apresentamos os detectores “NaI(Tl)” instalados na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto e suas finalidades de utilização:

- Os circuitos de refrigeração de componentes são monitorados pôr um conjunto de detectores de medida gama integral (*KAA 13/23/33/43 CR001*), com atuações automáticas. O intertravamento é importante para que ocorra o isolamento do lado primário, dos refrigeradores

de alta pressão e das bombas de refrigeração do reator. Detectores tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $1E+04 / 1E+09$ (Bq / m^3), tipo K6SS4/2G-X.

2. Os trocadores de calor do sistema de água gelada são monitorados por um detector de medida gama integral (**KJM 01 CR001**), com atuações automáticas de isolamentos do barramento monitorado do sistema de água gelada. Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $1E+04 / 1E+09$ (Bq / m^3), tipo K6SS4/2G-X.

3. A descarga de rejeitos líquidos radioativos dos tanques de transferência é monitorada por um detector de medida gama integral (**KPK 29 CR001**), caso algum limite seja excedido a descarga é automaticamente bloqueada. Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $1E+04 / 1E+09$ (Bq / m^3), tipo K6SS4/2G-X.

4. A atividade de entrada do sistema de filtros de retardo é monitorada por um detector de medida gama integral (**KPL 40 CR001**). Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $1E-01 / 1E+04$ (cps), tipo K6SS4/2G-X.

5. A atividade na descarga do leito de retardo é monitorada por um detector de medida gama integral (**KPL 83 CR002**). Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $1E-01 / 1E+04$ (cps), tipo K6SS4/2G-X.

6. O vazamento entre sistemas adjacentes, para dentro do sistema de vapor auxiliar causado por falhas, é monitorado por um arranjo de dois detectores de medida gama integral (**LCN 88 CR001 , LCN 88 CR002**). Se uma dada concentração de atividade é excedida haverá mudança automática do condensado do vapor auxiliar para o sistema de rejeitos líquidos. Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $2E+03 / 1E+09$ (Bq/ m^3), tipo K6SS4/2G-X.

7. Um evento de vazamento no Gerador de Vapor (N^{16} e gases nobres) é monitorado por quatro arranjos de detectores de medida gama integral (**QUC 25/26/27/28 CR001**), um para cada Gerador de Vapor. Estas medidas iniciam medidas de segurança se um limite for excedido. Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $2E+03 / 1E+09$ (Bq/ m^3), tipo K6SS4/2G-X.

8. A concentração de atividade no efluente líquido durante a liberação, é monitorado por um detector de medida gama integral (**QUP 30 CR001**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixa de Medida $2E+03 / 1E+09$ (Bq/ m^3), tipo K6SS4/2G-X.

9. A atividade em aerossol durante a liberação de gases, é monitorado por um detector de medida gama integral (**KLK 10 CR031**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixas de Medida $6E+00 / 6E+06$ (Bq), tipo K6SS4/2G-X.

10. A atividade em aerossol no ar de exaustão filtráveis do edifício auxiliar (**UKA**), é monitorado por um detector de medida gama integral (**KLK 20 CR031**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixas de Medida $6E+00 / 6E+06$ (Bq), tipo K6SS4/2G-X.

11. A atividade em aerossol no ar de exaustão não filtrado do edifício auxiliar (**UKA**), é monitorado por um detector de medida gama integral (**KLK 30 CR031**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixas de Medida $6E+00 / 6E+06$ (Bq), tipo K6SS4/2G-X.

12. A atividade em aerossol no ar de exaustão do annulus, é monitorado por um detector de medida gama integral (**KLK 50 CR031**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixas de Medida $6E+00 / 6E+06$ (Bq), tipo K6SS4/2G-X.

13. A atividade em aerossol no ar de amostra extraída dos compartimentos de operação do edifício do Reator, é monitorado por um detector de medida gama integral (**KLK 60 CR031**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixas de Medida $6E+00 / 6E+06$ (Bq), tipo K6SS4/2G-X.

14. A atividade em aerossol na exaustão de ar, dos compartimentos de pequenos equipamentos no Edifício do Reator (**UJA**), Durante a purga o ponto de medição é trocado para o ar exaustão dos compartimentos de grandes equipamentos no Edifício do Reator (**UJA**), a monitoração é feita por um detector de medida gama integral (**KLK 70 CR031**), Detector tipo cintilador NaI(Tl), faixas de Medida $6E+00 / 6E+06$ (Bq), tipo K6SS4/2G-X.

3.3 – Parâmetros de Avaliação

3.3.1 – Curva característica do Cintilador

Consiste em verificar a variação do ritmo de contagens com a Voltagem aplicada à válvula fotomultiplicadora, isto é, o gráfico de CPS *versus* V com discriminador ajustado para o limiar de corte em 40 keV determinado pelo fabricante do detector.

A forma precisa da curva característica do cintilador depende obviamente do tipo de equipamento utilizado para o teste. Existe uma voltagem limiar, dependendo da sensibilidade do equipamento, um patamar e uma região de aumento rápido das contagens, de acordo com a tensão aplicada à válvula fotomultiplicadora.

Podemos observar as características da curva na figura 3.2, que ilustra as curvas características para um sistema cintilador com diferentes exposições de radioisótopos.

O patamar é geralmente um pouco mais inclinado, porque o ganho da fotomultiplicadora é muito mais sensível à tensão aplicada. Conseqüentemente, a estabilidade da alta tensão é um requisito muito importante para um detector iodeto de sódio “NaI(Tl)”.

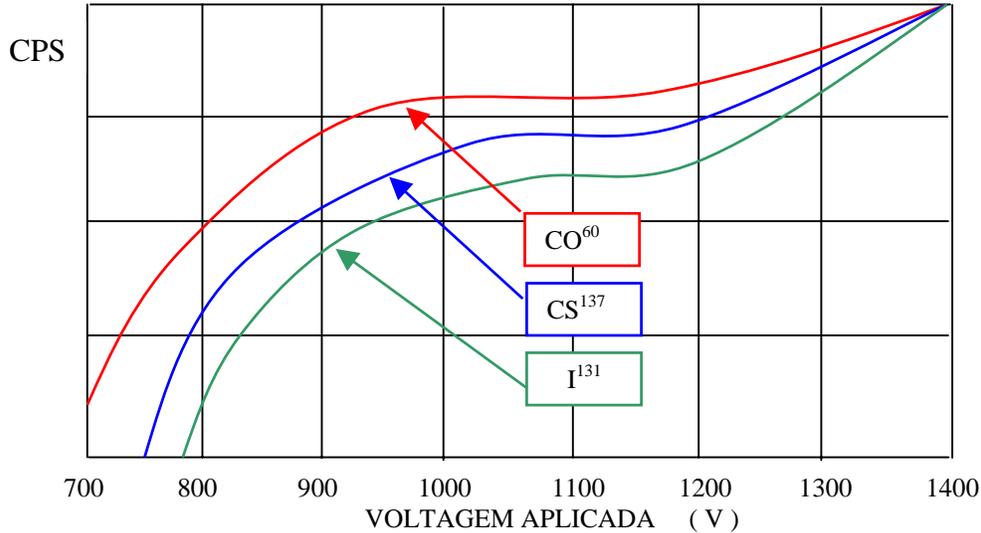


Figura 3.2: Curva Característica de um sistema Cintilador.

3.3.2 – Procedimento Experimental para determinar o Ponto de Operação.

A figura 3.3 apresenta o esquema de montagem utilizado para determinar o ponto de operação do detector tipo K6SS4/2G-X *Crismatec*.

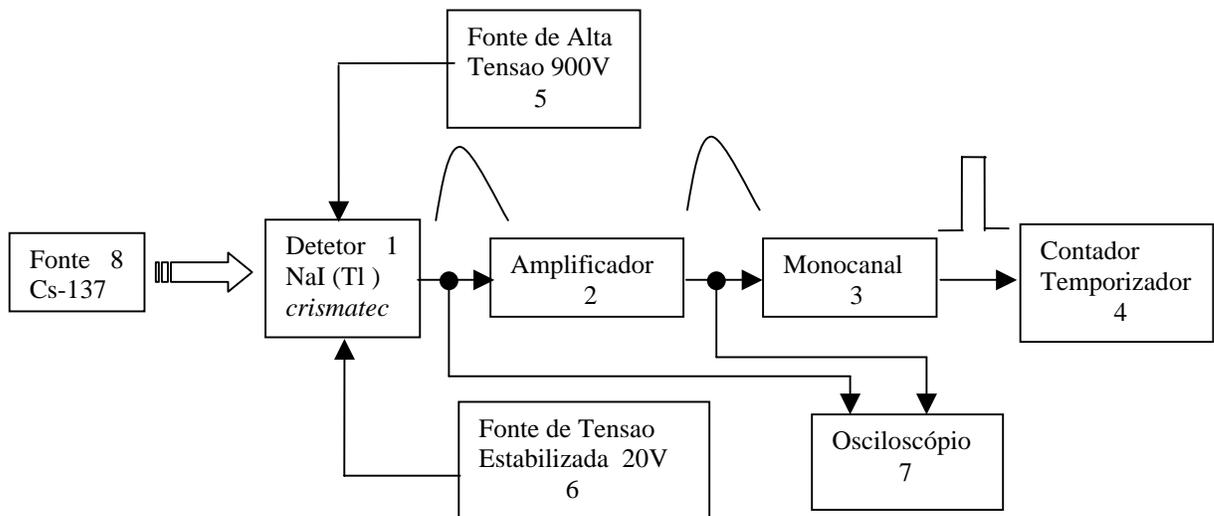


Figura 3.3 : Configuração para determinar o ponto de Operação.

- ***Equipamentos utilizados para o teste:***

- 1) Detetor NaI (TI) Crismatec modelo K6SS4/2G-X/1
- 2) Amplificador, Micronal, Mod: 4012 Saída Unipolar
- 3) Analisador Monocanal, Micronal, Mod: 4010
- 4) Contador temporizador, Micronal, Mod: 10024
- 5) Fonte de Alta tensão, Ortec, Mod. 556: Saída 0 a 3000Vcc
- 6) Fonte de tensão estabilizada Lobo Mod:213 : Saída 0 a 25Vcc
- 7) Osciloscópio Tektronix.
- 8) Fonte emissão Cs-137 , Emissão β^- , Meia Vida 10983 dias, Emissor gama Ba-137 , Energia gama de interesse 661,6 keV.

- ***Procedimento para determinar o ponto de Operação:***

- 1) Ajustar a fonte estabilizada para tensão de operação do preamplificador 20V.
- 2) Ajustar a fonte de Alta Tensão para tensão nominal do detector 900V.
- 3) Ajustar o ganho do amplificador para 1.
- 4) Ajustar através do potenciômetro no detector o sinal de saída do Preamplificador para a relação 3mV / keV especificada pelo fabricante.

$$\text{Tensão a ajustar} = 3 \text{ mV} / \text{keV} \cdot 661 \text{ keV} = 1983 \text{ mV}$$

- 5) Ajustar o valor da tensão do discriminador inferior do Monocanal para o valor equivalente a 40 keV em energia, valor limiar de corte especificado pelo fabricante do detetor.

$$\text{Tensão a ajustar} = 3\text{mV} / \text{keV} \cdot 40\text{keV} = 120 \text{ mV}$$

- 6) Ajustar o discriminador superior do monocanal para 10V, para não causar corte indevido dos pulsos emitidos pelo detetor.
- 7) Com auxílio do osciloscópio comparar os parâmetros, “tempo de subida , tempo de descida , tempo total e a forma do pulso gerado na saída do preamplificador” com os valores padrões descrito acima nas características do detector.
- 8) Depois de ajustar as condições descritas acima e verificar a forma do pulso gerado pelo detector, faremos três contagens com tempo de 30 segundos, para determinarmos *background* do sistema.

- 9) Determinar o ponto de operação do detetor variando a tensão no módulo de Alta Tensão.
- 10) Com os valores médios obtidos gerar um gráfico para determinar o ponto de operação do detetor.

A figura 3.4 apresenta os pontos (contagens x alta tensão) no início e final do plateau para determinação do ponto de operação, inclinação do plateau e a faixa de operação do detector.

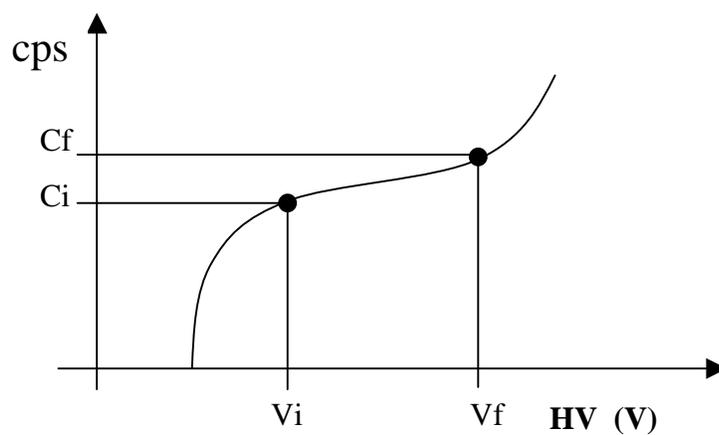


Figura 3.4: Curva padrão característica de um cintilador, com determinação dos pontos (Contagem x Alta Tensão) no Início e Final do *Plateau*.

onde: Cf = contagem no final do *plateau*

Ci = contagem no início do *plateau*

Vf = valor da tensão de operação no final do *plateau*

Vi = valor da tensão de operação no início do *plateau*

- 11) Determinar o ponto de operação (PO) através da equação abaixo:

$$\mathbf{PO = Vi + [(Vf - Vi) / 3]}$$

- 12) Calcular a inclinação do *plateau* na curva característica gerada pelo teste, de acordo com a equação abaixo:

$$\mathbf{Inclinação\ do\ plateau = \frac{(Cf - Ci) \cdot 10^4}{Ci \cdot (Vf - Vi)}}$$

Tabela 3.2 : Resultados experimentais obtidos para formar a curva característica do cintilador NaI(Tl) Crismatec.

Tensão aplicada	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média Leituras 1, 2 e 3	Desvio Padrão
Volts	Pulsos	Pulsos	Pulsos	Pulsos	Pulsos
400	0	0	0	0	0
450	1	1	1	1	0
500	5	5	5	5	1
550	6	8	5	7	1
600	117	101	97	105	3
630	584	553	563	567	8
660	27270	27124	26970	27121	55
690	40920	41115	41100	41045	68
720	54771	54809	54857	54812	78
750	70908	70093	70510	70504	89
780	78868	79447	78909	79075	94
810	86451	86615	86365	86477	98
840	89355	89928	89823	89702	100
870	91342	91476	91676	91498	101
900	92625	93455	92993	93024	102
930	93983	93716	94101	93933	102
960	95388	94585	95176	95050	103
990	95342	96267	95776	95795	103
1020	95803	96447	96043	96098	103
1050	96957	96461	97311	96910	104
1080	107495	108913	108655	108354	110
1110	121632	121595	121561	121596	116
1140	156523	157831	156928	157094	132

Os valores foram obtidos variando-se os valores da alta tensão aplicada em passos de “50V e 30V”, com tempo de contagem ajustado em 30 segundos.

O gráfico da figura 4.2 foi construído com os valores médios calculados através das três leituras realizadas durante o experimento, que pode-se observar na tabela 3.2.

3.3.3 – Eletrônica Nuclear associada nos sistemas de detecção de radiação.

A figura 3.5 ilustra a configuração eletrônica usada nos sistemas de monitoração de radiação na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

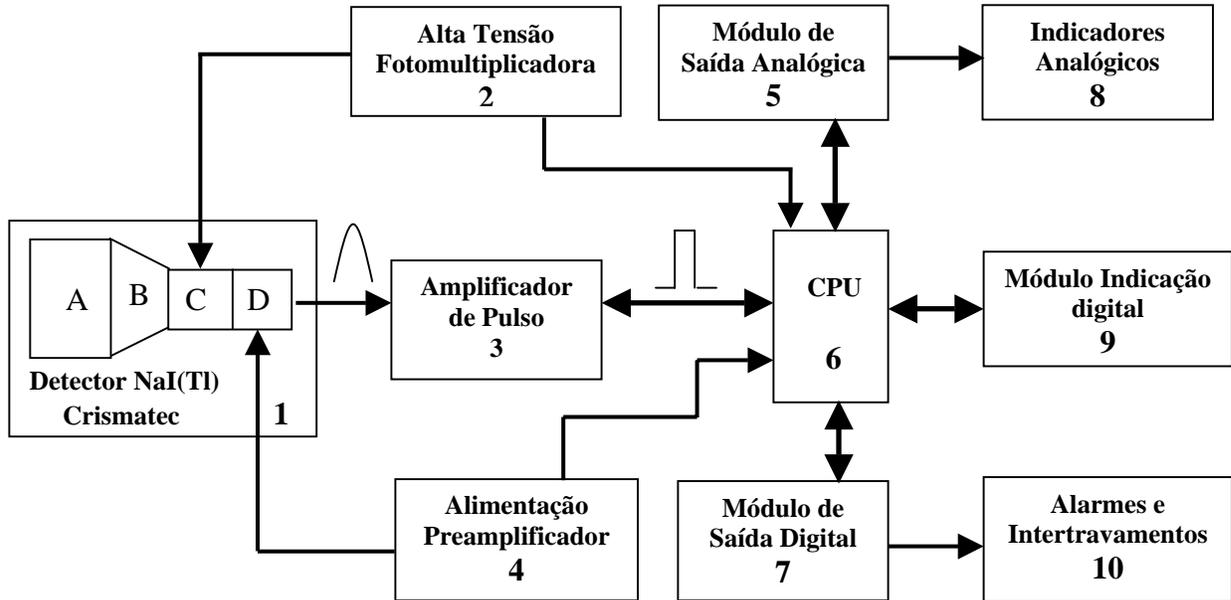


Figura 3.5: Ilustra a configuração eletrônica usada nos sistemas de monitoração de Radiação. (SINUPERM-M)

Componentes usados na configuração da figura 3.5 :

- 1) Detector NaI(Tl) , tipo K 6 SS 4 / 2G – X / 1 - *CRISMATEC*
 - 1.A) Cristal cintilador: NAI(Tl) Ø 3.81 cm x 2,54 cm de comprimento
 - 1.B) Acoplamento Ótico entre o Cristal e a Fotomultiplicadora, devido a diferença de diâmetro entre os componentes.
 - 1.C) Fotomultiplicadora
 - 1.D) Preamplificador
- 2) Módulo Gerador de Alta Tensão (HE) : Corrente de saída (0,1 mA e 2 mA) programado e Tensão de Saída - 0 a 1500 Vdc (positiva / negativa) programada.
- 3) Módulo Amplificador de Pulso (IV) : Sinal de saída – 0,01 a 10 V , Impedância de entrada – 50 a 120 Ω , Discriminador superior e inferior – 0,03V a 4 V , Ajuste de linha de Base +50 mV a - 50 mV e Fator de Ganho 0,3 a 36.
- 4) Módulo de Alimentação do Preamplificador (VV) : $\pm 20 \text{ V} \leq 250 \text{ mA}$

- 5) Módulo de saída Analógica (AEA) : Saída de Corrente – (0 a 20 mA e 4 a 20 mA) programado no módulo , Erro de saída $\leq 0,5 \%$ do valor do fundo de escala , Carga máxima da saída - 0 a 600Ω
- 6) Módulo Processador (PE) : CPU dedicada para uso no sistema de medições nucleares *SINUPERM-M*.
- 7) Módulo de saída Digital (BEA) : Módulo para Entrada / Saída digitais, composto de sete canais de alarmes programáveis. Corrente máxima de consumo $\leq AC/DC 0,5 A$
- 8) Registradores e Variáveis analógicas de saída do sistema
- 9) Módulo Display (apresenta os valores digitais do processo) : Módulo de interface Operador / Variáveis do processo .
- 10) Alarmes visuais e sonoros que são atuados quando os valores limites são excedidos.
- 11) Módulo de Alimentação $\pm 24 V / + 5 V$, não está apresentado na configuração acima.

3.3.4 – Definições, siglas e Fontes radioativas utilizadas no decorrer dos testes descritos na Dissertação .

1. Definições:

- **Taxa de contagem Total** – É a taxa de contagem derivada da medida com a fonte de teste.
- **Taxa de contagem zero** – É a taxa de contagem derivada da medida sem exposição da fonte de teste (background).
- **Taxa de contagem líquida** – É a diferença entre a taxa de contagem derivada da medida com a fonte de Teste e sem a fonte de Teste.
- **Taxa de contagem de referência** – É a taxa de contagem determinada com um ou mais detectores ou arranjos de medições do mesmo tipo. Esta taxa de contagem é requerida para verificar a operação dos detectores ou arranjos de medições. Podendo ser a taxa de contagem líquida ou a média de várias taxa de contagem líquida.
- **Taxa de contagem atual** – É a taxa de contagem líquida determinada durante comissionamento ou durante a calibração do sistema.
- **Taxa de contagem especificada** – É a taxa de contagem calculada em relação a taxa de contagem de referência fornecida no procedimento de teste, este cálculo deve ser

feito no dia da execução do teste e comparada com a taxa de contagem atual encontrada.

- **DISU** – Limiar inferior de corte (discriminação inferior).
- **DISO** – Limiar superior de corte (discriminação superior).

2. Abreviações

- **BU1** - Ponto de medição da altura de pulso gerado pelo detector no módulo amplificador de sinais.
- **BU3** – Ponto de medição do pulso TTL na saída do módulo amplificador de sinais do sistema “SINUPERM- M”.
- **NEK** – Parâmetro de configuração do sistema “SINUPERM- M” para correção do background.

3. Fontes radioativas usadas nos testes.

Tabela 3.3 : Apresenta as fontes radioativas usadas para execução da pesquisa proposta pela dissertação.

Nuclídeo	Número	Meia- Vida	Atividade	Data
Cs-137	FU386	10983 dias	91,1 kBq	01/01/1998
Cs-137	223-95	10983 dias	43,1 kBq	01/01/1997
Co-60	224-96	1925 dias	27,99 kBq	01/01/1997

- Nos anexos A e D, são apresentados os adaptadores usados nos testes descritos na dissertação.
- Nos anexos B, C e E , são apresentados os certificados de calibração das fontes radioativas usadas nos testes descritos na dissertação.
- No anexo F , é apresentado o tratamento estatístico usado nos cálculos de propagação de erros dos resultados encontrados na dissertação.

3.3.5 – Calibração dos detetores e determinação dos valores de referência para inspeções periódicas (comissionamento).

Equipamentos utilizados para o teste:

1. Contador Universal HP
2. Calculadora

3. Osciloscópio
4. Unidade de parametrização (Laptop) com interface de comunicação.
5. Adaptador de Teste

Calibração em Energia “ajuste do fator de conversão do detector (3mV / keV)”.

- Configurar o sistema com a unidade de parametrização para operar no módulo janela.
- Ajustar os discriminadores no amplificador de pulsos para resultar numa janela de energia de $\pm 5\%$ do pico do Cs-137.
- Conectar o contador de pulso na saída TTL do amplificador de pulso (BU3).
- Remover qualquer fonte radioativa da vizinhança do detector.
- Remover o pluge de chumbo e posicionar a fonte de Cs-137 requerida para o teste(FU386).
- Ajuste o potenciômetro do detector até a máxima taxa de contagem ser alcançada no contador de pulso.
- Uma contagem mínima de 20000 pulsos é requerida no teste após o ajuste do fator de conversão.
- Restaurar as condições iniciais dos discriminadores no amplificador de pulso.
- Reconfigurar o sistema com a unidade de parametrização para operar no modo integral.

Verificar a sensibilidade do detector (Eficiência).

a) Determinar o Background (Taxa de contagem zero).

- Retirar o detector da blindagem de chumbo na sala de medição e colocar o adaptador de teste para detector tipo K6SS4/2G – X/1 “anexo A” na posição de teste sobre o detector.
- Conectar o contador de pulso no módulo amplificador de pulso (conector Bu3) pulso TTL e medir a taxa de contagem zero.
- A interrupção da contagem pode ser feita logo que 10000 pulsos tenham sido alcançados no contador de pulso.
- Calcular a taxa de contagem zero do sistema (contagem / tempo de contagem).

b) Determinar a Taxa de contagem atual.

- Coloque a fonte de teste (Cs-137 número 223-95 e Co-60 número 224-96) na posição de teste.
- Conectar o contador de pulso no módulo amplificador de pulso (conector Bu3 pulso TTL), medir a taxa de contagem atual.
- Uma contagem mínima de 20000 pulsos é requerida para cada fonte de teste.
- Calcule a taxa de contagem total para cada fonte de teste (contagem / tempo de contagem).
- Calcule a taxa de contagem atual (Taxa de contagem total menos Taxa de contagem zero).
- Calcule a taxa de contagem especificada para a data do teste de acordo com a equação de decaimento abaixo e compare com os valores da taxa de contagem atual, obtidos durante o teste, desvios de $\pm 15\%$ são permitidos.

$$N_2 = N_1 \cdot \text{EXP} [- \ln 2 \cdot T^{-1} \cdot (T_{21} - T_{11})]$$

onde:

N₂ - Taxa de contagem especificada

N₁ - Taxa de contagem de referência da fonte

T - Meia vida do radionuclídeo em teste (10983 dias Cs-137 e 1925 dias Co-60).

T₁₁ - Data de referência da medida

T₂₁ - Data do teste

Determinar os valores de referência para as inspeções periódicas.

A média das medidas individuais é definida como valor de referência para as inspeções em serviço, no caso dos pontos de medidas que apresentam geometria de teste idêntica. Os valores dos pontos de medidas individuais são registrados e calculados a média para este propósito.

a) Determinar o valor para inspeções em serviço, discriminação Inferior (DISU) ajustado para (40 keV , 80 keV e 350 keV) conforme sistema de medição.

- Conectar contador de pulso no conector (Bu3) pulso TTL no módulo amplificador de sinal.

Determinar o Background (taxa de contagem zero).

- Instalar o detetor na blindagem de chumbo do sistema em teste.
- Remover qualquer fonte radioativa da vizinhança de instalação do Detector.

- Registrar a taxa de contagem zero (Contar um mínimo de 1000 pulsos).

Determinar a taxa de contagem atual.

- Posicionar a fonte de teste (FU386) para teste.
- Registrar a taxa de contagem total (Contar um mínimo de 10000 pulsos).
- Calcular o valor de referência para o discriminador inferior (DISU) para inspeções em serviço.

Valor de Referência = Taxa de contagem total menos taxa de contagem zero

b) Determinar o valor para inspeções em serviço, discriminação Superior (DISO) ajustado para (662 keV) conforme sistema de medição.

- Configurar o sistema para que o limiar de discriminação seja trocado de (limiar inferior 60mV / 120mV / 350mV) para (limiar superior 993mV).

Determinar o Background:

- Remover a fonte de teste (FU386) e fechar o ponto de teste com pluge de chumbo.
- Meça a taxa de contagem zero por um tempo mínimo de 1000 segundos e registre.

Determinar a taxa de contagem atual.

- Posicione a fonte de teste na posição de teste (FU386).
- Registre a taxa de contagem total (contagem mínima acima de 10000 pulsos).
- Calcule o valor de referência (DISO) para inspeções em serviço.
- Remova a fonte de teste (FU386) e feche o ponto de teste com o pluge de chumbo.
- Restabelecer as condições de operação normal do sistema.

Determinar o background para definir o parâmetro de correção do Background.

- Remover todas as fontes radioativas das proximidades dos arranjos de medidas antes de iniciar a medida para determinar o background, que define o parâmetro de correção.
- O valor de background encontrado é definido como parâmetro de correção do background (NEK), e inserido no programa com a unidade de parametrização.

3.3.6 – Procedimento para Inspeções Periódicas dos detectores NaI(Tl).

O teste é executado através da medição da taxa de contagem gerada por uma fonte de teste radioativa com periodicidade de três meses.

Documentos e Equipamentos auxiliares requeridos para os testes:

- 1) Calculadora
- 2) Pluge de simulação
- 3) Contador de pulso universal
- 4) Fonte de teste Cs-137 (FU386)
- 5) Osciloscópio
- 6) Multímetro
- 7) *Laptop* com programa do sistema SINUPERM-M

Condições Operacionais, Observações e Pre-Condições para execução do teste:

São as condições que possibilitam e garantem que a execução do teste não cause nenhuma anormalidade no funcionamento dos sistemas que estão associados ao teste.

Execução do teste

- 1) Antes do início do teste
 - Ler o valor real medido no *display* e anotar na tabela de teste.
- 2) Determinar a taxa de contagem sem fonte de teste na saída do analisador da altura de pulso - Limiar inferior de corte (DISU)
 - Conectar o contador de pulso ao soquete de saída (BU3) do módulo amplificador de pulso.
 - Contar 100 pulsos e ler o tempo de medição.
 - Calcular a taxa de contagem = número de pulsos dividido pelo tempo de medição. Anotar a taxa de contagem nas tabelas de teste respectivas.
- 3) Transferir o canal de medição para o estado de teste.
 - Condicionar o sistema para a condição de teste.
- 4) Remover o plugue de chumbo e colocar a fonte de teste na posição de teste.
- 5) Determinar a taxa de contagem com fonte de teste na saída do analisador de altura de pulso – para o limiar inferior de corte (DISU).
 - Contar 20000 pulsos e ler o tempo de medição

- Calcular a taxa de contagem (DISU) = números de pulsos dividido pelo tempo de medição.
 - Anotar a taxa de contagem nas Tabelas de Teste respectivas
- 6) Determinar a taxa de contagem Líquida na saída do analisador de altura de pulso – para o limiar inferior de corte (DISU).
- Determinar a taxa de contagem Líquida (DISU) = taxa de contagem total (DISU) com a fonte radioativa de teste menos a taxa de contagem (DISU) sem a fonte radioativa de teste e registrar na tabela de teste respectiva.
- 7) Determinar a taxa de contagem com fonte de teste na saída do analisador de altura de pulso – para o limiar superior de corte (DISO).
- Condicionar o sistema de medição para o discriminador de corte superior (DISO).
 - Contar 10000 pulsos e ler o tempo de medição.
 - Calcular a taxa de contagem total para o discriminador de corte superior (DISO) = números de pulso dividido pelo tempo de medição. Anotar na tabela de teste respectiva.
- 8) Remover a fonte de teste e inserir o pluge de chumbo na blindagem do detector em teste.
- 9) Determinar a taxa de contagem sem fonte de teste na saída do analisador de altura de pulso – para o limiar superior de corte (DISO).
- Contar 100 pulsos e ler o tempo de medição.
 - Calcular a taxa de contagem (DISO) = números de pulso dividido pelo tempo de medição. Anotar na tabela de teste respectiva.
- 10) Determinar a taxa de contagem Líquida na saída do analisador de altura de pulso - para o limiar superior de corte (DISO).
- Calcular a taxa de contagem Líquida (DISO) = taxa de contagem total (DISO) com a fonte radioativa de teste menos a taxa de contagem (DISO) sem a fonte radioativa de teste e registrar na tabela de teste respectiva.
- 12) Calcular a taxa de contagem de Referência e comparar com a taxa de contagem Líquida (DISU e DISO) encontrada durante os testes de inspeção em serviço.
- A seguinte fórmula se aplica para o cálculo da taxa de contagem de Referência.

$$N2 = N1 \cdot \text{EXP} [- \ln 2 \cdot (T1/2)^{-1} \cdot \Delta t]$$

Onde:

N2 - Taxa de contagem especificada

N1 - Taxa de contagem de referência da fonte

T 1/2 – Meia vida da fonte de referência.

Δt – Tempo entre a medição de referência e o teste.

- Calcular as taxas de contagem de referência (DISU e DISO) e anotar na tabela respectiva.
- Verificar se os desvios estão dentro dos limites admissíveis.
- Se os desvios estiverem dentro dos limites admissíveis, encerrar o teste e condicionar o sistema para a condição de operação.
- Se os desvios estiverem fora dos limites admissíveis, ajustar o fator de conversão do detector para 3mV/keV de acordo com o item 3.3.5 (ajuste do fator de conversão do detector).

3.3.7 – Determinar os Espectros Diferenciais dos cintiladores NaI(Tl).

Equipamentos requeridos para determinar os espectros diferenciais:

- Fonte de Cs-137 (FU386)
- MCA8000A *Multichannel Analyzer* (AMP TEK).

Execução do teste

- Conectar a saída do Analisador Multicanal na entrada do pulso no soquete de saída (BU1) do modulo amplificador de pulso.
- Ajustar as configurações do Analisador Multicanal para as seguintes condições.
 - 1) Ajustar o número de canais do analisador: 2048 canais.
 - 2) Tensão máxima de entrada: 5V
 - 3) Limiar de discriminação: 40 keV
- Formar o Espectro diferencial com tempo suficiente para verificar a resolução do detector, e ajustar o fator de conversão do detector (3 mV / keV) se necessário.
- Salvar o espectro.
- Desconectar o Analisador Multicanal do módulo amplificador de sinais do sistema.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Resultados da análise das especificações técnicas do Detector.

Foi analisado a forma de onda do pulso do detector *Crismatec*, tipo K6SS4/2G – X/1, cristal cintilador NaI(Tl) - (\varnothing 3,81cm x 2,54cm de comprimento) com Fotomultiplicadora tipo EMI 9266 B, para comparação com os parâmetros fornecidos pela *Crismatec*.

4.1.1) Análise da forma de onda do pulso gerado pelo detector.

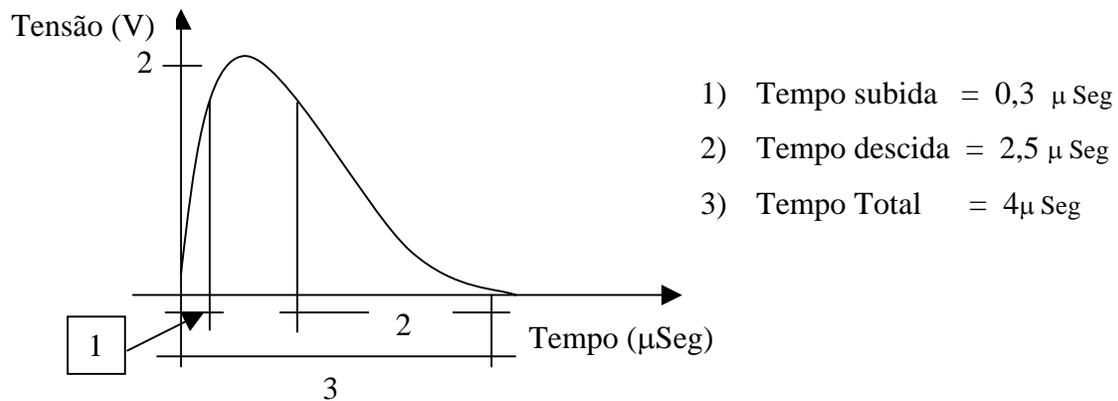


Figura 4.1 : Forma de onda do pulso gerado pelo detetor NaI(Tl) Crismatec.

Analisado a forma de onda do pulso de saída do preamplificador em vários detectores instalados na planta, observa-se que os tempos (subida, descida e total) medidos se mantiveram dentro dos valores especificados pelo fabricante. Constatando-se que após cinco anos de operação ininterruptamente, os tempos analisados se mantiveram dentro dos valores especificados pelo fabricante.

4.1.2 - Curva característica do detector *Crismatec*, tipo K 6 SS 4 / 2G-X/1, cristal cintilador NaI(Tl) - (\varnothing 3,81cm x 2,54cm de comprimento) com Fotomultiplicadora tipo EMI 9266 B .

A figura 4.2 apresenta a curva característica do detector NaI(Tl) Crismatec, levantada com os resultados experimentais obtidos e registrados na tabela 3.2 do capítulo 3.

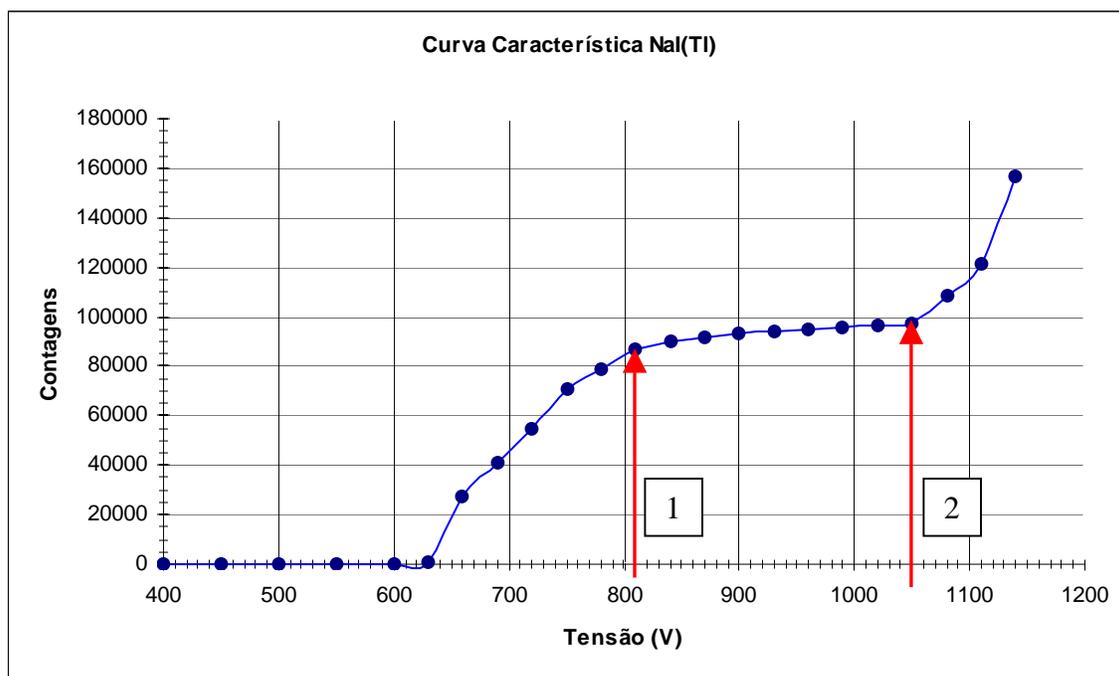


Figura 4.2: Curva Característica levantada experimentalmente com o Detector Cintilador NaI(Tl), *Crismatec*.

Os Pontos para análise das características de operação como (Tensão de operação, Faixa de operação e Inclinação do plateau) foram retirados da curva característica da figura 4.2.

Ponto 1 – Início do plateau $V_i = 810V$ e $C_i = 86477$ contagens

Ponto 2 – Fim do plateau $V_f = 1050V$ e $C_f = 96910$ contagens

a) Determinação da Tensão de operação (V)

$$V = [(1050 - 810) / 3] + 810 = 890V$$

É definido na configuração do sistema tensão de operação igual a 900V.

De acordo com os resultados obtidos na curva característica da figura 4.2, encontramos o valor de operação igual a 890V. Com isso foi observado que o ponto de operação definido pelo fabricante encontra-se dentro da faixa de operação do detector, observado na curva característica da figura 4.2 do detector tipo K 6 SS 4 / 2G – X/1, detector cintilador NaI(Tl), *Crismatec*.

b) Determinação da Faixa de operação do detector

Faixa de Operação = 810V até 1050V

De acordo com as condições de operação do detector, que especifica o range de operação da Tensão aplicada a Fotomultiplicadora entre 830V até 970V , onde dentro desses valores se mantém a relação de mV / keV especificada pelo fabricante.

Com os valores encontrados no teste verificou-se que o plateau da curva característica abrange completamente a faixa de operação determinada pelo fabricante, garantindo assim os valores especificados para operação dos sistemas.

c) Determinação da Inclinação do plateau (I)

$$I = \frac{(C_f - C_i) \cdot 10^4}{C_i \cdot (V_f - V_i)} = \frac{(96910 - 86477) \cdot 10^4}{86477 \cdot (1050 - 810)} = 5,02 \%$$

Pelos cálculos o valor da inclinação do plateau de 5.02% encontrado nos resultados dos testes executados acima, atendem perfeitamente as expectativas de operação dos detectores Iodeto de Sódio instalados no Sistema de Monitoração de Radiação em Usinas Nucleares.

4.2 - Verificação da performance dos detectores.

Os resultados obtidos foram retirados dos Procedimentos de Teste usados na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (1- JYK 18 , 1 – JYK 11.2 , 1 – JYK 15.2 , 1 – JYK 81.2 , 1 – JYK 83.2).

Levantou-se os resultados em 7 detectores que formam um grupo de detectores com geometria de medição e característica de instalação idênticas, os resultados obtidos com este grupo de detetores representam uma amostra contundente para análise e conclusões a respeito da Avaliação da Performance dos detectores de Iodeto de Sódio usados no sistema de Monitoração de Radiação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

Os sistemas escolhidos para avaliação estão descritos nos itens abaixo:

1. Os circuitos de refrigeração de componentes:

KAA13CR001 , KAA23CR001 , KAA33CR001 , KAA43CR001 – detector tipo K6SS4/2G-X

2. Os trocadores de calor do sistema de água gelada:

KJM01CR001 - detector tipo K6SS4/2G-X

3. Monitoração da descarga de rejeitos líquidos radioativos dos tanques de transferência.

KPK29CR001 - detector tipo K6SS4/2G-X

4. Monitoração da concentração de atividade no efluente líquido durante a liberação.

QUP30CR001 - detector tipo K6SS4/2G-X

4.2.1 - Ajuste do fator de conversão do detector 3mV / keV (Calibração em Energia).

Levantou-se os resultados das calibrações realizados durante o comissionamento dos sistemas descrito acima, pois trata-se do ajuste inicial para garantir que os resultados dos valores de Eficiência e os valores determinados para as Inspeções em Serviço estejam corretos. Se estes ajustes fossem feitos incorretamente comprometeriam todos os resultados obtidos para inspeções em serviço dos Sistemas de Monitoração de Radiação da Usina.

A figura 4.3 ilustra o diagrama em blocos do amplificador de sinais usado no sistema de Monitoração de Radiação. O cálculo da tensão de ajuste dos discriminadores é determinada pelas características operacionais de cada sistema.

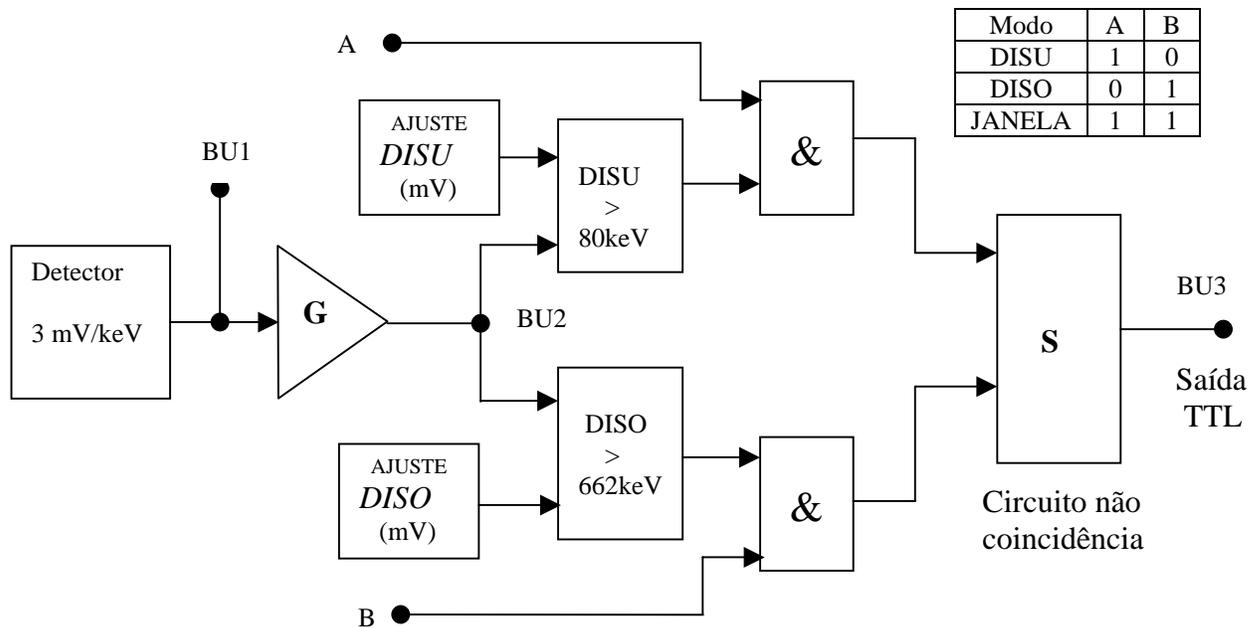


Figura 4.3: Diagrama em bloco do amplificador de sinais “SINUPERM-M”

As características operacionais dos sistemas avaliados são:

$$G = 0,5$$

$$\text{Fator de conversão do detector} = 3 \text{ mV / keV}$$

Calculo do valor em (mV) = E (keV) • G • fator de conversão

Para energia de 662 keV tem-se:

$$\text{Valor em (mV)} = 662 \text{ keV} \cdot 0,5 \cdot 3 \text{ (mV / keV)} = 993 \text{ mV}$$

Para energia de 80 keV tem-se:

$$\text{Valor em (mV)} = 80 \text{ keV} \cdot 0,5 \cdot 3 \text{ (mV / keV)} = 120 \text{ mV}$$

Tabela 4.1 : Resultados obtidos da Instrução de Comissionamento **A-JYK-18**, com tempo de contagem de 100 segundos.

Ponto de Medição	Número do Detector	Taxa de contagem máxima na janela de energia do Cs-137 $\pm 5\%$ (943 mV e 1043mV).
KAA13CR001	6888	395 cps ± 2 cps
KAA23CR001	6898	394 cps ± 2 cps
KAA33CR001	6901	394 cps ± 2 cps
KAA43CR001	6902	390 cps ± 2 cps
KJM01CR001	6887	397 cps ± 2 cps
KPK29CR001	6909	407 cps ± 2 cps
QUP30CR001	6910	407 cps ± 2 cps

A taxa máxima de contagem obtida com janela de energia de 5% em relação a energia do Cs-137 (662 keV) foi encontrada de acordo com os cálculos abaixo:

Para Cs-137 com emissão gama de 662 keV, $\pm 5\%$ de janela de discriminação equivale a faixa de 628,9 keV a 695,1 keV, calculando os valores de acordo com as características dos sistemas temos a seguinte faixa de discriminação.

Para 628,9 keV temos:

$$\text{Valor em mV} = 628,9 \text{ keV} \cdot 0,5 \cdot 3 \text{ mV / keV} = 943 \text{ mV}$$

Para 695 keV temos:

$$\text{Valor em mV} = 695,1 \text{ keV} \cdot 0,5 \cdot 3 \text{ mV / keV} = 1043 \text{ mV}$$

Estes são os valores ajustados no Amplificador de sinais (discriminador inferior e discriminador superior) para realizar os ajustes do fator de conversão do detector, os resultados obtidos estão descritos na tabela 4.1. Garantindo assim o fator de conversão determinado nas especificações técnicas do detector NaI(Tl) .

O ajuste do fator de conversão do detector é feito variando-se a alta tensão aplicada aos dinodos da Fotomultiplicadora, variando-se assim o campo elétrico aplicado entre os dinodos, com o crescimento do campo elétrico conseguiremos manter os valores do fator de conversão especificado pelo fabricante e a proporcionalidade do sinal de saída da Fotomultiplicadora .

Como visto esta janela de discriminação da uma variação total de energia igual a 66,2 keV . Como o detector tem uma resolução máxima de 8,5% para Cs-137 de acordo com as especificações técnicas do detector, temos uma largura a meia altura (FWHM) = $0,085 \cdot 662 \text{ keV} = 56,27 \text{ keV}$, podemos observar que o ajuste feito para acertar o fator de conversão está bem definido, já que a janela determinada no teste abrange quase todo o pico do Cs-137, garantindo assim que quando obtivermos a máxima contagem dentro da janela ajustada o sistema estará calibrado em energia .

Podemos observar isto na curva de cor preta no gráfico 4.4, onde todo o pico do Cs-137 se encontra dentro da janela de discriminação ajustada, garantindo que o ajuste do fator de conversão determinado está dentro do valor especificado do sistema.

Um aumento excessivo no ajuste da tensão entre os dinodos da Fotomultiplicadora causará um ganho maior no fator de conversão do detector, ocasionando uma contagem menor dentro da janela de discriminação, isto pode ser observado na curva de cor verde no figura 4.4.

Uma diminuição excessiva no ajuste da tensão entre os dinodos da Fotomultiplicadora causará um ganho menor no fator de conversão do detector, ocasionando uma contagem menor dentro da janela de discriminação, isto pode ser observado na curva de cor laranja no figura 4.4.

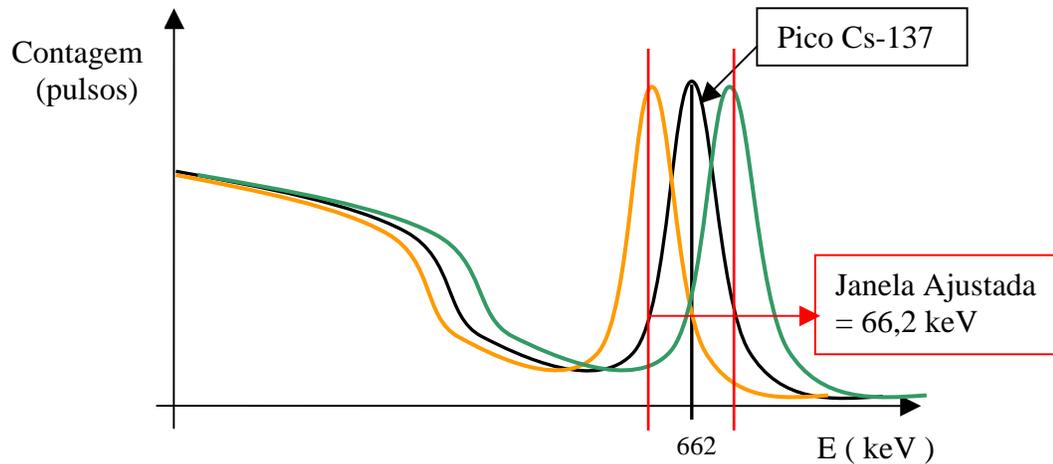


Figura 4.4 : Espectro Energia para um detector NaI(Tl) com uma fonte padrão de Cs-137.

Como pode-se observar, este ajuste é muito importante para verificar a eficiência do detector e determinar os valores para inspeções periódicas dos sistemas, já que erros nos ajustes poderiam comprometer todos os valores determinados para as inspeções, comprometendo assim toda a calibração do grupo de detectores avaliados, o que ocasionaria medidas errôneas dos valores de radioatividade do processo monitorado.

4.2.2 Verificação da Eficiência dos detectores do grupo em avaliação.

Os resultados apresentados abaixo foram realizados após o ajuste do fator de converção dos detetores avaliados, para comparação com os valores especificados pelo fabricante. Os testes foram realizados com exposição em duas diferentes posições, e adotado como valor a média dos valores encontrados.

Os testes foram realizados com duas fontes radiotivas (Cs-137 e Co-60), os dados de calibração dessas fontes para os detectores tipo K6SS4/2G-X/1 com limiar de corte em 80 keV estão descrito abaixo.

- **Fonte de Cs-137 , número 223-95 , atividade 41,01 kBq em 01/03/1999.**
Taxa de contagem especificada em 01/03/1999 igual a 3906 cps.
Eficiência absoluta especificada = $(3906 / 41010 * 100) = 9,52 \%$
- **Fonte de Co-60 , número 224-96 , atividade 21,07 kBq em 01/03/1999.**
Taxa de contagem especificada em 01/03/1999 igual a 3530 cps.
Eficiência absoluta especificada = $(3530 / 21070 * 100) = 16,75 \%$

A seguir serão apresentados os resultados obtidos após a execução do procedimento de teste A- JYK-18 e comparados com os valores especificados acima.

O tempo de contagem usado para os testes abaixo foi padronizado em 100 segundos que é suficiente para garantir os parâmetros especificados no procedimento A – JYK – 18.

Os valores de desvios especificados foram calculados de acordo com o tratamento estatístico das medições – Anexo F.

Sistema KAA13CR001

Data do teste 18/04/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6888

Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95

Taxa de contagem zero (background) = 56,50 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3799,82 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3657,5 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3728,66cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3728,66 - 56,50) = 3672,16 \pm 3,03$ cps

Incerteza da medida = $(3,03 \div 3672,16) \times 100 = 0,08$ %

Taxa de contagem especificada para o dia 18 / 04 / 2000 = **3806 cps**

Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 3,51 %**

Atividade calculada para o dia 18 / 04 / 2000 = **39,95 kBq**

Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3672,16 / 39950 * 100\% = 9,19$ %

Resultados para fonte de Co-60 número 224-96

Taxa de contagem zero (background) = 56,50 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3081,26 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3054,1cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3067,68 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3067,68 - 56,50) = 3011,18 \pm 2,74$ cps

Incerteza da medida = $(2,74 \div 3011,18) \times 100 = 0,09$ %

Taxa de contagem especificada para o dia 18 / 04 / 2000 = **3041 cps**

Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 0,98 %**

Atividade calculada para o dia 18 / 04 / 2000 = **18,15 kBq**

Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3011,18 / 18150 * 100\% = 16,59$ %

Sistema KAA23CR001**Data do teste 19/04/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6898****Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95**

Taxa de contagem zero (background) = 80,11 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3955,4 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3896,72 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3926,06 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3926,06 - 80,11) = 3845,95 \pm 3,17$ cpsIncerteza da medida = $(3,17 \div 3845,95) \times 100 = 0,082\%$ Taxa de contagem especificada para o dia 19 / 04 / 2000 = **3806 cps**Desvio permitido pelo teste $\pm 15 \% = 1,05 \%$ Atividade calculada para o dia 19 / 04 / 2000 = **39,95 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3845,95 / 39950 * 100\% = 9,62 \%$ **Resultados para fonte de Co-60 número 224-96**

Taxa de contagem zero (background) = 80,11 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3223,46 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 33195,48cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3209,47 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3209,47 - 80,11) = 3129,36 \pm 2,87$ cpsIncerteza da medida = $(2,87 \div 3129,36) \times 100 = 0,09 \%$ Taxa de contagem especificada para o dia 19 / 04 / 2000 = **3040 cps**Desvio permitido pelo teste $\pm 15 \% = 2,9 \%$ Atividade calculada para o dia 19 / 04 / 2000 = **18,14 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3129,36 / 18140 * 100\% = 17,25 \%$

Sistema KAA33CR001**Data do teste 20/04/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6901****Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95**

Taxa de contagem zero (background) = 86,18 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3967,02 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3771,83 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3869,42 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3869,42 - 86,18) = 3783,24 \pm 3,14$ cpsIncerteza da medida = $(3,14 \div 3783,24) \times 100 = 0,08$ %Taxa de contagem especificada para o dia 20 / 04 / 2000 = **3805 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 0,57 %**Atividade calculada para o dia 20 / 04 / 2000 = **39,94 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3783,24 / 39940 * 100\% = 9,47$ %**Resultados para fonte de Co-60 número 224-96**

Taxa de contagem zero (background) = 86,18 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3140,44 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3125,46 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3132,95 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3132,95 - 86,18) = 3046,77 \pm 2,84$ cpsIncerteza da medida = $(2,84 \div 3046,77) \times 100 = 0,09$ %Taxa de contagem especificada para o dia 20 / 04 / 2000 = **3039 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **0,26 %**Atividade calculada para o dia 20 / 04 / 2000 = **18,14 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3046,77 / 18140 * 100\% = 16,79$ %

Sistema KAA43CR001**Data do teste 20/04/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6902****Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95**

Taxa de contagem zero (background) = 88,76 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3791,16 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3673,36 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3732,26 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3732,26 - 88,76) = 3643,24 \pm 3,09$ cpsIncerteza da medida = $(3,09 \div 3643,24) \times 100 = 0,09$ %Taxa de contagem especificada para o dia 20 / 04 / 2000 = **3805 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 4,25 %**Atividade calculada para o dia 20 / 04 / 2000 = **39,94 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3643,24 / 39940 * 100\% = 9,12$ %**Resultados para fonte de Co-60 número 224-96**

Taxa de contagem zero (background) = 88,76 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3073,12 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 33047,94 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3060,05 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3060,05 - 88,76) = 2971,29 \pm 2,81$ cpsIncerteza da medida = $(2,81 \div 2971,29) \times 100 = 0,094$ %Taxa de contagem especificada para o dia 20 / 04 / 2000 = **3039 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 2,23 %**Atividade calculada para o dia 20 / 04 / 2000 = **18,14 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $2971,29 / 18140 * 100\% = 16,38$ %

Sistema KJM01CR001**Data do teste 25/04/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6887****Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95**

Taxa de contagem zero (background) = 112,50 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3883 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3889 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3886 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3886 - 112,50) = 3773,5 \pm 3,16$ cpsIncerteza da medida = $(3,16 \div 3773,5) \times 100 = 0,084$ %Taxa de contagem especificada para o dia 25 / 04 / 2000 = **3803cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 0,77** %Atividade calculada para o dia 25 / 04 / 2000 = **39,93 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3773,5 / 39930 * 100\% = 9,45$ %**Resultados para fonte de Co-60 número 224-96**

Taxa de contagem zero (background) = 112,50 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3072,6 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3057,8 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3065,2 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3065,2 - 112,50) = 2952,7 \pm 2,82$ cpsIncerteza da medida = $(2,82 \div 2952,7) \times 100 = 0,095$ %Taxa de contagem especificada para o dia 25 / 04 / 2000 = **3033 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 2,65** %Atividade calculada para o dia 25 / 04 / 2000 = **18,10 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $2952,7 / 18100 * 100\% = 16,31$ %

Sistema KPK29CR001**Data do teste 13/01/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6909****Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95**

Taxa de contagem zero (background) = 29,5 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3833 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3853 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3843 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3843 - 29,5) = 3813,5 \pm 3,11$ cpsIncerteza da medida = $(3,11 \div 3813,5) \times 100 = 0,082$ %Taxa de contagem especificada para o dia 13 / 01 / 2000 = **3829 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **- 0,40 %**

Atividade calculada para o dia 13 / 01 / 2000 = 40,19 kBq

Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3813,5 / 40190 * 100\% = 9,49$ %**Resultados para fonte de Co-60 número 224-96**

Taxa de contagem zero (background) = 29,5 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3202 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3222 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3212 cps

Taxa de contagem líquida medida = $(3212 - 29,5) = 3182,5 \pm 2,85$ cpsIncerteza da medida = $(2,85 \div 3182,5) \times 100 = 0,09$ %Taxa de contagem especificada para o dia 13 / 01 / 2000 = **3148 cps**Desvio permitido pelo teste ± 15 % = **1,10 %**Atividade calculada para o dia 13 / 01 / 2000 = **18,79 kBq**Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3182,5 / 18790 * 100\% = 16,94$ %

Sistema QUP30CR001**Data do teste 13/01/2000, detector K6SS4/2G-X/1 número 6910****Resultados para fonte de Cs-137 número 223-95**

Taxa de contagem zero (background) = 117 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3970 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3912 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3941 cps

Taxa de contagem líquida medida = (3941 – 117) = **3824 ± 3,19 cps**Incerteza da medida = $(3,19 \div 3824) \times 100 = 0,083 \%$ Taxa de contagem especificada para o dia 13 / 01 / 2000 = **3829 cps**Desvio permitido pelo teste $\pm 15 \%$ = **- 0,13 %**

Atividade calculada para o dia 13 / 01 / 2000 = 40,19 kBq

Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3824 / 40190 * 100\% = 9,51 \%$ **Resultados para fonte de Co-60 número 224-96**

Taxa de contagem zero (background) = 117 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 1 = 3280 cps

Taxa de contagem total na face do detector posição 2 = 3289 cps

Taxa de contagem média total nas duas posições = 3285 cps

Taxa de contagem líquida medida = (3285 – 117) = **3168 ± 2,92 cps**Incerteza da medida = $(2,92 \div 3168) \times 100 = 0,092 \%$ Taxa de contagem especificada para o dia 13 / 01 / 2000 = **3148 cps**Desvio permitido pelo teste $\pm 15 \%$ = **0,63 %**

Atividade calculada para o dia 13 / 01 / 2000 = 18,79 kBq

Cálculo da eficiência absoluta do detector = $3168 / 18790 * 100\% = 16,86 \%$ **4.2.3 Determinação dos valores de referência para as inspeções periódicas.**

A seguir serão apresentados os valores de referência encontrados após a realização do ajuste do fator de conversão, estes valores serão usados para inspeções periódicas dos detectores no decorrer da operação dos mesmos. Os resultados apresentados abaixo foram retirados do procedimento de comissionamento A-JYK-18, executados durante o comissio-

namento para determinar os valores de referência para as inspeções periódicas dos sistemas avaliados.

Os testes foram realizados com uma fonte de teste de Cs-137 “FU386”, os dados de calibração são apresentados abaixo:

- **Fonte de Cs-137 “FU386”, atividade 91,1 kBq, data de referência 01/01/1998.**

Sistema KAA13CR001

Data do Teste 18/04/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6888

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1068 segundos

Contagem = 10000 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 9,363 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 206243 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2062,43 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2062,43 - 9,363) = \mathbf{2053,06 \pm 4,54 \text{ cps}}$

Incerteza da medida = $(4,54 \div 2053,06) \times 100 = \mathbf{0,221 \%}$

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1111 segundos

Contagem = 1324 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 1,19 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 24740 pulsos

Taxa de Contagem Total = 247,40 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(247,40 - 1,19) = \mathbf{246,21 \pm 1,57 \text{ cps}}$

Incerteza da medida = $(1,57 \div 246,21) \times 100 = \mathbf{0,638 \%}$

Sistema KAA23CR001**Data do Teste 19/04/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6898**

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1128 segundos

Contagem = 10000 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 8,865 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 207145 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2071,45 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2071,45 - 8,865) = \mathbf{2062,58 \pm 4,55 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(4,55 \div 2062,58) \times 100 = \mathbf{0,221 \%}$

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1077 segundos

Contagem = 1253 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 1,16 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 24152 pulsos

Taxa de Contagem Total = 241,52 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(241,52 - 1,16) = \mathbf{240,36 \pm 1,55 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(1,55 \div 240,36) \times 100 = \mathbf{0,645 \%}$

Sistema KAA33CR001**Data do Teste 20/04/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6901**

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1145 segundos

Contagem = 10000 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 8,733 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 216721 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2167,21 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2167,21 - 8,733) = \mathbf{2158,47 \pm 4,65 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(4,65 \div 2158,47) \times 100 = \mathbf{0,215 \%}$

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1005 segundos

Contagem = 1163 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 1,16 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 23144 pulsos

Taxa de Contagem Total = 231,44 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(231,44 - 1,16) = \mathbf{230,28 \pm 1,52 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(1,52 \div 230,28) \times 100 = \mathbf{0,66 \%}$

Sistema KAA43CR001**Data do Teste 20/04/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6902**

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1035 segundos

Contagem = 10000 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 9,662 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 207333 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2073,33 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2073,33 - 9,662) = 2063,66 \pm 4,55$ cpsIncerteza da medida = $(4,55 \div 2063,66) \times 100 = 0,22$ %

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1000 segundos

Contagem = 1272 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 1,272 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 25329 pulsos

Taxa de Contagem Total = 253,29 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(253,29 - 1,272) = 252,02 \pm 1,59$ cpsIncerteza da medida = $(1,59 \div 252,02) \times 100 = 0,631$ %

Sistema KJM01CR001**Data do Teste 25/04/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6887**

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1000 segundos

Contagem = 8581 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 8,581 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 211050 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2110,50 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2110,50 - 8,581) = 2102 \pm 4,59$ cpsIncerteza da medida = $(4,59 \div 2102) \times 100 = 0,218$ %

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1000 segundos

Contagem = 1190 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 1,19 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 25506 pulsos

Taxa de Contagem Total = 255,06 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(255,06 - 1,16) = 253,9 \pm 1,60$ cpsIncerteza da medida = $(1,60 \div 253,9) \times 100 = 0,63$ %

Sistema KPK29CR001**Data do Teste 04/04/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6909**

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1000 segundos

Contagem = 9710 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 9,71 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 208987 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2089,87 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2089,87 - 9,71) = \mathbf{2080,16 \pm 4,57 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(4,57 \div 2080,16) \times 100 = \mathbf{0,22 \%}$

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1000 segundos

Contagem = 1050 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 1,05 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 23975 pulsos

Taxa de Contagem Total = 239,75 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(239,75 - 1,05) = \mathbf{238,7 \pm 1,55 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(1,55 \div 238,7) \times 100 = \mathbf{0,649 \%}$

Sistema QUP30CR001**Data do Teste 28/03/2000 - Detector K6SS4/2G-X/1 , número 6810**

1) Valor de referência para o discriminador inferior (DISU), ajustado para 80 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 201 segundos

Contagem = 1000 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 4,98 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 214680 pulsos

Taxa de Contagem Total = 2146,8 cps

- Taxa de contagem líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(2146,8 - 4,98) = \mathbf{2141,82 \pm 4,63 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(4,63 \div 2141,82) \times 100 = \mathbf{0,216 \%}$

2) Valor de referência para o discriminador superior (DISO), ajustado para 662 keV.

- Taxa de contagem Zero (background)

Tempo de contagem = 1000 segundos

Contagem = 920 pulsos

Taxa de Contagem Zero = 0,92 cps

- Taxa de contagem Total

Tempo de contagem = 100 segundos

Contagem = 26770 pulsos

Taxa de Contagem Total = 267,7 cps

- Taxa de contagem Líquida = Taxa de contagem de referência

Taxa de cont. total - Taxa de cont. Zero = $(267,7 - 0,92) = \mathbf{266,78 \pm 1,64 \text{ cps}}$ Incerteza da medida = $(1,64 \div 266,78) \times 100 = \mathbf{0,615 \%}$

Determinação dos valores de referência para inspeção dos sistemas avaliados.

Os sistemas possuem configurações idênticas tais como: Blindagem dos detectores, geometria usada para verificação da eficiência do detector, características de configuração, montagem dos sistemas, os processos monitorados são líquidos e a fonte padrão usada para inspeção de Cs-137 é a mesma para ambos os detetores.

Devido às configurações idênticas nos processos de monitoração, o valor de referência foi determinado pela média dos resultados encontrados individualmente para cada sistema avaliado na dissertação.

Pela equivalência dos sistemas os valores encontrados individualmente devem ter valores bem parecidos.

Se os valores encontrados individualmente estiverem com uma flutuação grande entre as medidas, causará também um desvio grande entre as medidas individuais e o valor de referência (média das medidas individuais), comprometendo assim as tolerâncias máximas permitidas nas inspeções.

Na tabela 4.2 mostra-se o resultado do valor de referência encontrado. Calculado pela média dos valores obtidos individualmente para cada sistema, e este valor será usado nas inspeções dos sistemas discriminados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Cálculo para obter os valores de referência usado para as inspeções dos sistemas de monitoração de radiação, medidas realizadas em 30/04/2000.

Ponto de Medição	Taxa de contagem discriminador inferior (DISU) 80 keV	Taxa de contagem discriminador superior (DISO) 662 keV
KAA13CR001	2053 cps	246 cps
KAA23CR001	2062 cps	240 cps
KAA33CR001	2158 cps	230 cps
KAA43CR001	2063 cps	252 cps
KJM01CR001	2102 cps	254 cps
KPK29CR001	2080 cps	239 cps
QUP30CR001	2147 cps	267 cps
Valor Médio (Valor de referência)	2095 cps	247 cps

a) Para a taxa de contagem com discriminador inferior (DISU).

O maior desvio observado entre as medidas e a média das medidas “Variância” é:

$$2158 \text{ cps} - 2095 \text{ cps} = 63 \text{ cps}$$

Eqüivale a um desvio percentual em relação ao valor de referência igual a:

$$\text{Desvio (\%)} = 63 \text{ cps} \div 2095 \text{ cps} \times 100 \% \cong 3 \%$$

b) Para a taxa de contagem com discriminador superior (DISO).

O maior desvio observado entre as medidas e a média das medidas “Variância” é:

$$267 \text{ cps} - 247 \text{ cps} = 20 \text{ cps}$$

Eqüivale a um desvio percentual em relação ao valor de referência igual a:

$$\text{Desvio (\%)} = 20 \text{ cps} \div 247 \text{ cps} \times 100 \% \cong 8 \%$$

Temos os seguintes valores para as tolerâncias máximas para as inspeções:

- Taxa de contagem para o discriminador inferior (DISU)
2095 cps “± 20 %”
- Taxa de contagem para o discriminador superior (DISO)
247 cps “+ 90 % e - 75 %”

Em comparação com os valores de tolerância requeridos nos testes, as variações encontradas entre os resultados individuais podem ser consideradas suficiente para determinar o valor de referência pela média dos valores individuais. Pode-se assumir que os resultados obtidos nos testes refletem bem a equivalência entre os sistemas, e o valor médio traduz bem o valor de referência usado para as inspeções.

4.2.4 – Determinação da Correção da Radiação de Fundo “Background”.

Na Tabela 4.3 abaixo apresentamos os resultados dos valores de background, realizado quando foi iniciado a operação dos Sistemas de Monitoração de Radiação na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. A unidade estava em comissionamento, fora de operação e não existiam processos com atividade radioativa na unidade, garantindo assim que os resultados da radiação de fundo não estavam sendo influenciados por nenhuma fonte de radiação interna. Estes resultados foram transformados em parâmetros de correção da Radiação de Fundo “Background”, que são requeridos pelo programa de operação para o cálculo da concentração de atividade da amostra analisada.

Tabela 4.3: Valores encontrados de Background dos sistemas avaliados.

Ponto de Medição Sistemas	Contagens (Pulsos)	Tempo de Contagens (Segundos)	Background (Cps)
KAA13CR001	55526	6068	9,150 ± 0,038
KAA23CR001	63668	7200	8,843 ± 0,035
KAA33CR001	60564	6780	8,933 ± 0,036
KAA43CR001	55010	5640	9,753 ± 0,04
KJM01CR001	55117	6425	8,578 ± 0,036
KPK29CR001	69080	7200	9,594 ± 0,036
QUP30CR001	1503	300	5,010 ± 0,13

4.3 - Resultados das inspeções realizada durante a operação dos detectores Iodeto de Sódio NaI(Tl).

Os resultados das inspeções apresentados a seguir foram obtidos entre 30/04/2000 a 10/01/2005. Os resultados foram pesquisados do manual de testes da Central Nuclear.

Os resultados são mostrados em forma de gráfico para serem analisadas tendências de comportamento dos resultados e para avaliação da eficiência dos detectores durante aproximadamente 6 anos de operação dos sistemas.

Os gráficos das figuras 4.4 , 4.5 e 4.6 mostram a contagem integral dos sistemas, onde serão verificados se a eficiência dos detectores estão sendo mantidas dentro dos padrões estabelecidos para operação. Nos gráficos também mostraremos linhas com os valores de desvio máximo e mínimo permitido para operação adequada dos detectores.

Segundo especificações do fabricante desvios entre $\pm 20\%$ são suficientes para garantir um bom desempenho dos sistemas avaliados.

Pelos dados requeridos no procedimento de teste, onde são feitas medidas com contagem mínima de 20000 pulsos, o Background dos sistemas apresentam valores muito menores, podemos assumir que as medidas realizadas durante os 6 anos de operação estão com desvio padrão menor que $\sqrt{20000} = \pm 141,42$ pulsos e incerteza melhor que 0,707%.

4.3.1 – Resultados da Eficiência dos Detectores com rejeição em 80 keV.

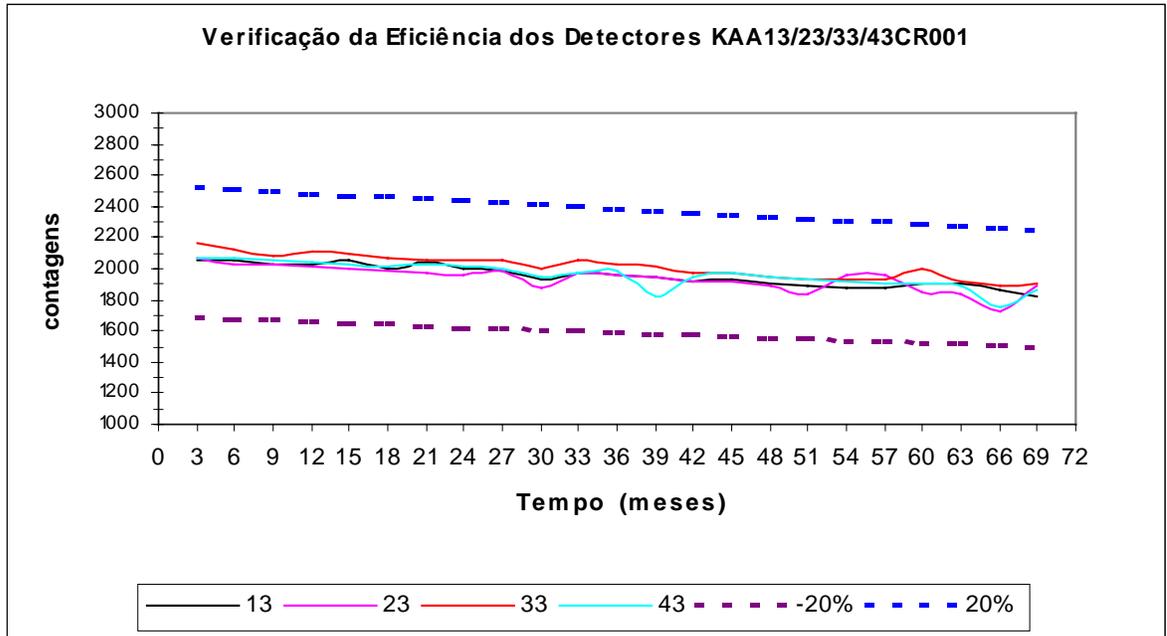


Figura 4.4 : Mostra o comportamento da eficiência durante a operação dos sistemas KAA13/23/33/43CR001.

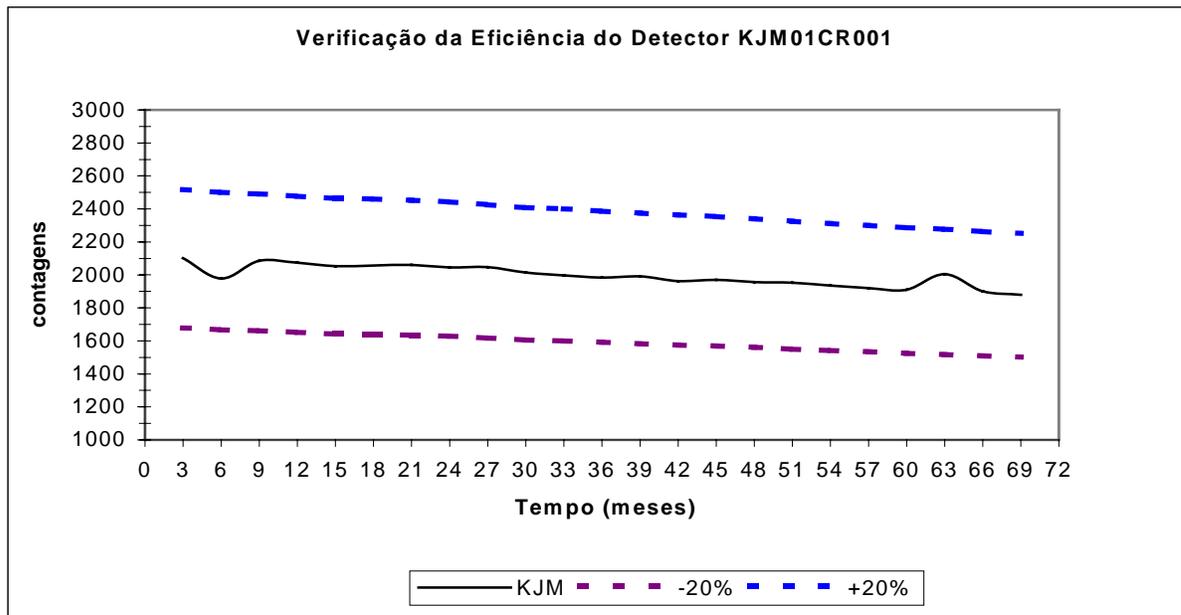


Figura 4.5 : Mostra o comportamento da eficiência durante a operação do sistema KJM01CR001.

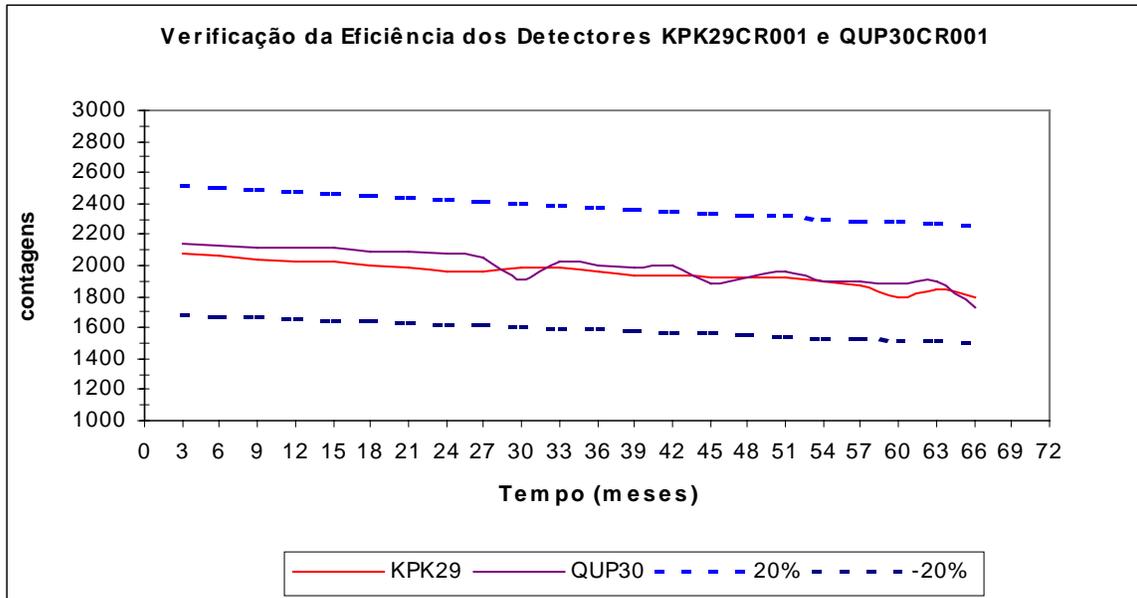


Figura 4.6 : Mostra o comportamento da eficiência durante a operação do sistema KPK29CR001 e QUP30CR001.

Analisando os gráficos formado com os valores obtidos durante as inspeções periódicas, realizados em intervalos de 3 em 3 meses na Central Nuclear, podemos afirmar que, a eficiência dos Detectores analisados tem se mantido com valores bem próximo dos valores operacionais requeridos para o detetor Iodeto de Sódio “NaI(Tl)” *Crismatec*, o que garantem uma boa regularidade, performance e confiabilidade na operação dos detectores nos sistemas de monitoração de radiação na Central Nuclear. Os desvios observados estão bem abaixo do especificado para um bom desempenho operacional dos sistemas com rejeição em 80 keV.

4.3.2 – Resultados da Eficiência dos Detectores com rejeição em 662 keV.

Os valores de referência para inspeções é determinado com sistema ajustado para rejeitar todos os pulsos inferiores a 662 keV. A este valor de discriminação denomina-se taxa de contagem superior (DISO). Este parametro é usado para verificar se a calibração em energia do detector está se mantendo dentro do valor esperado para operação do sistema. Se o valor medido estiver fora do valor esperado, reajusta-se o fator de conversão de energia - tensão do detector, mudando assim o ponto de operação através do aumento do valor de alta tensão aplicado entre o catodo e o último Dinodo da Fotomultiplicadora.

As figuras 4.7 a 4.13 representam o comportamento da calibração em energia dos detectores avaliados durante seis anos de operação em condições ininterruptas.

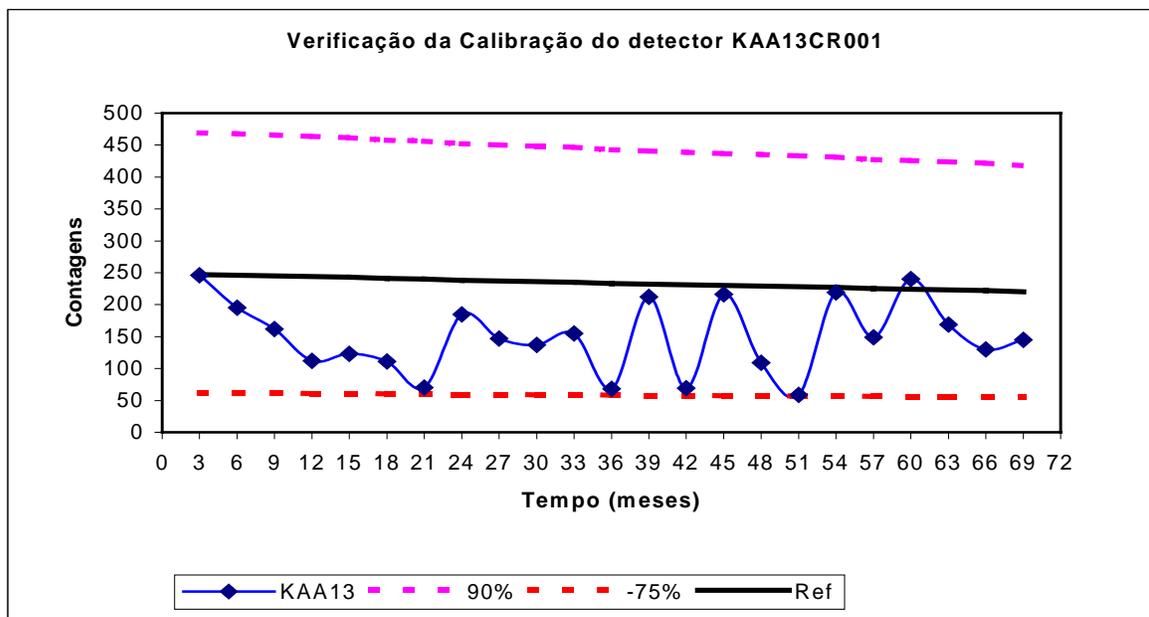


Figura 4.7: Mostra a variação das contagens durante a operação do detector KAA13CR001.

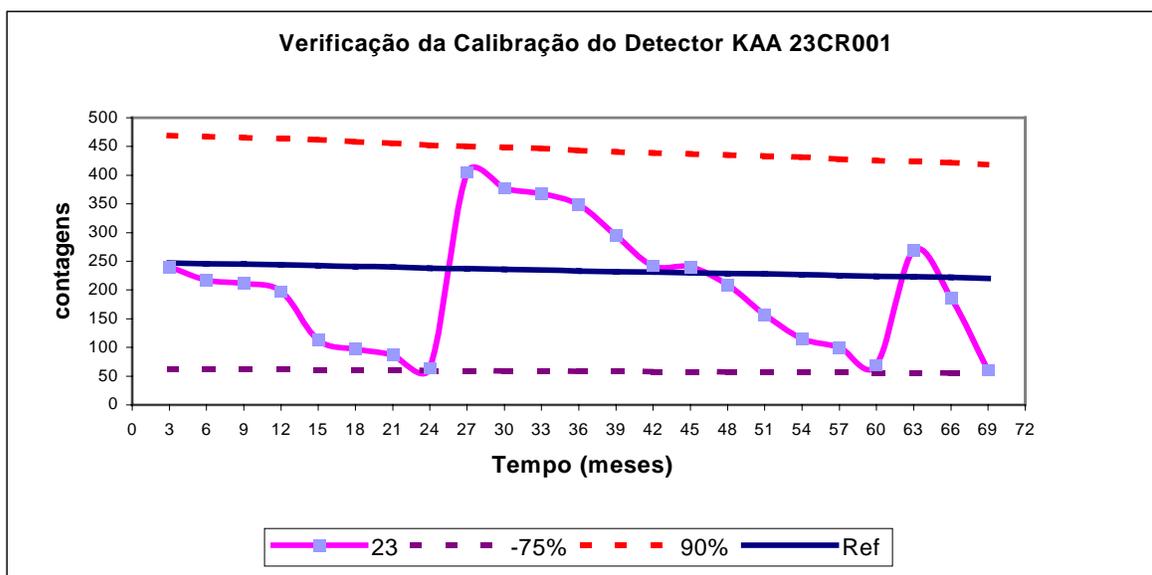


Figura 4.8: Mostra a variação das contagens durante a operação do detector KAA23CR001.

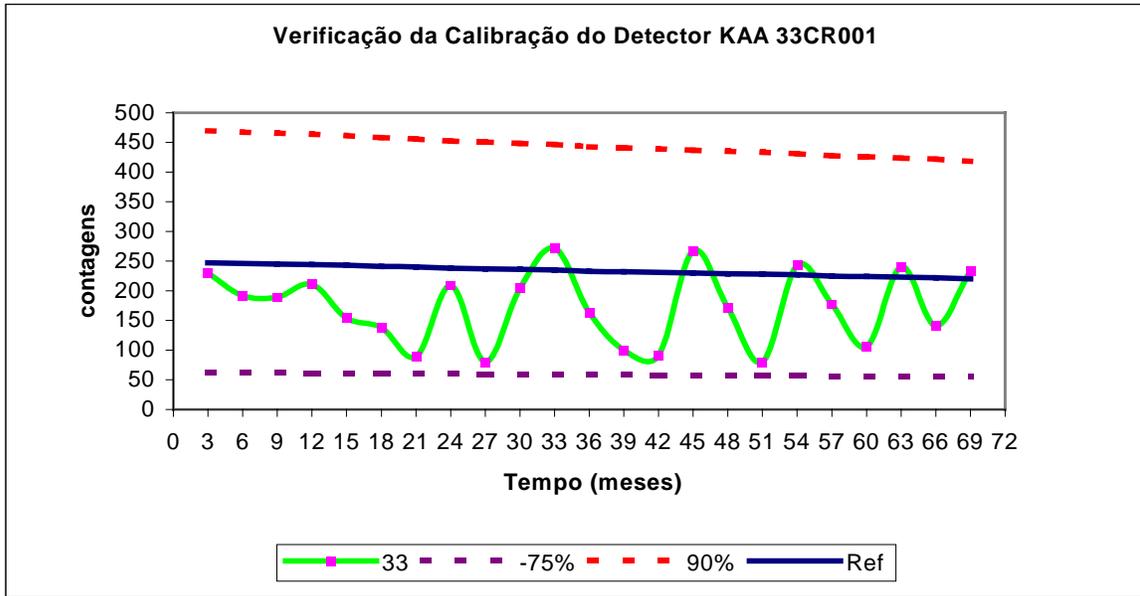


Figura 4.9 : Mostra a variação das contagens durante a operação do detector KAA33CR001.

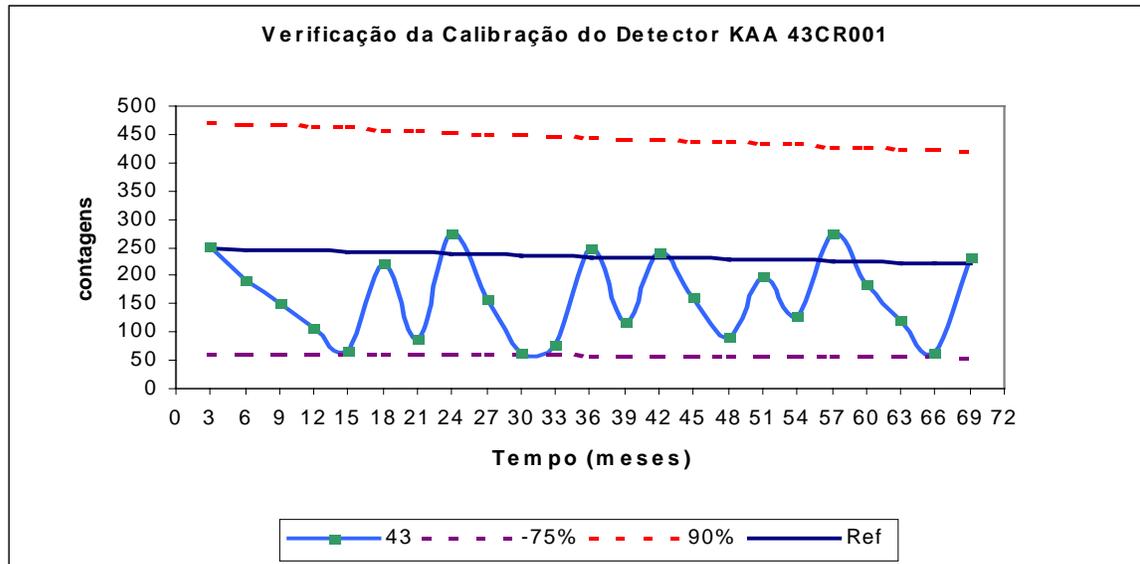


Figura 4.10: Mostra a variação das contagens durante a operação do detector KAA43CR001.

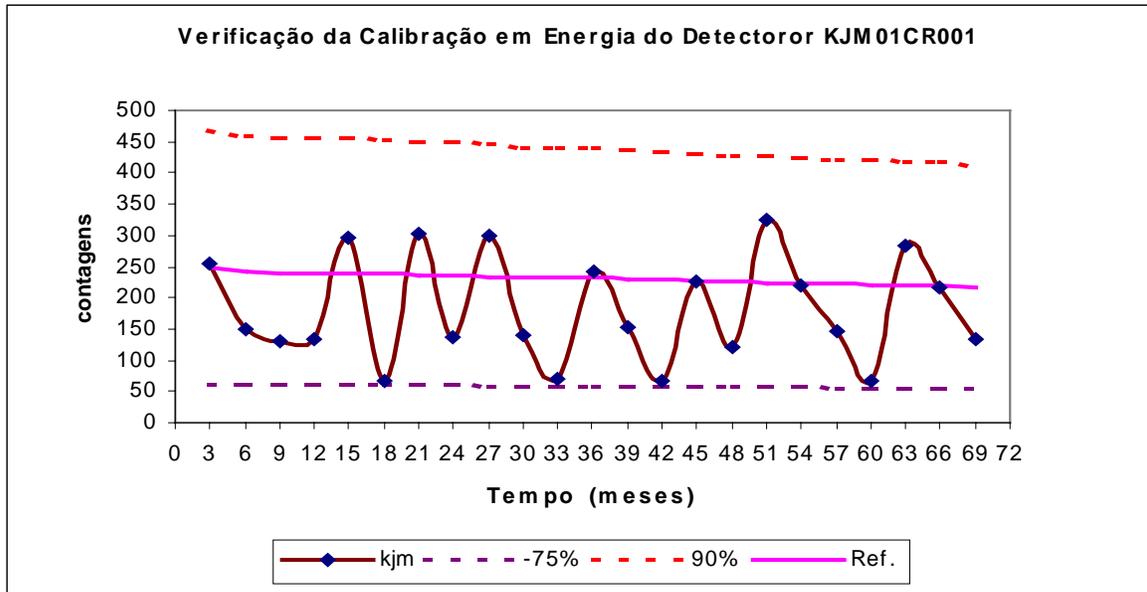


Figura 4.11: Mostra a variação das contagens durante a operação do detector KJMCR001.

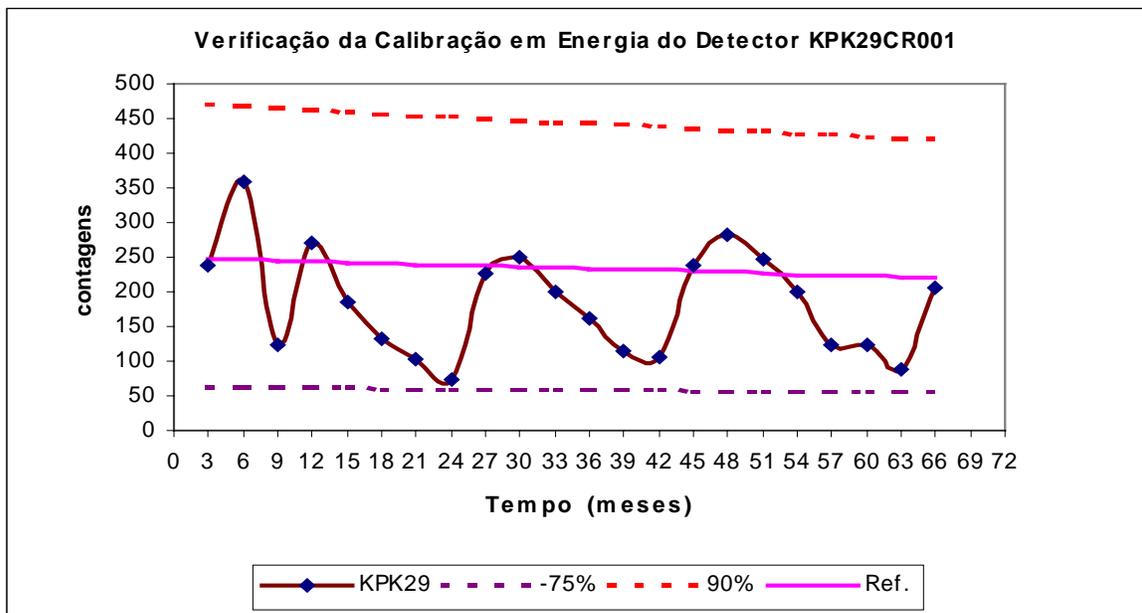


Figura 4.12 : Mostra a variação das contagens durante a operação do detector KPK29CR001.

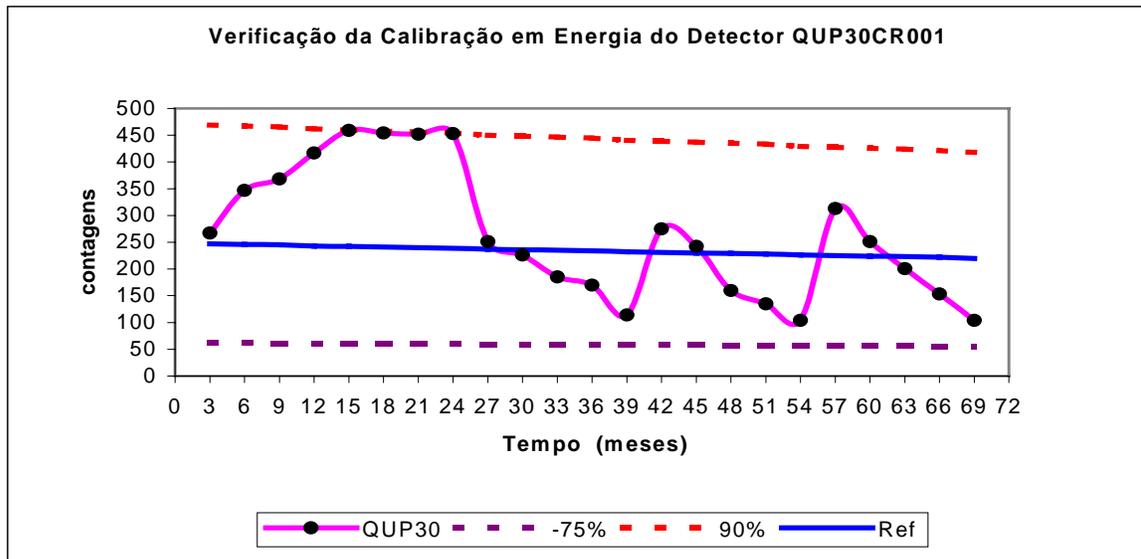


Figura 4.13 : Mostra a variação das contagens durante a operação do detector QUP30CR001.

Ajustado o sistema para rejeitar os pulsos inferiores a 662 keV e comparando com valor especificado realizado no início de operação dos sistemas, observou-se através dos resultados que a calibração em energia dos detectores está constantemente precisando ser reajustada, o fator de conversão não está se mantendo constante com o tempo de operação do detector. Causando um deslocamento do espectro diferencial diminuindo a eficiência do detector e prejudicando a calibração do mesmo.

Este fato se deve a diminuição do fator de multiplicação da fotomultiplicadora do detector, para corrigir estes desvios aumentamos a tensão entre os dinodos da fotomultiplicadora, o que ocasiona um aumento do campo elétrico aplicado entre os dinodos, resultando um aumento na emissão de elétrons e consequentemente um aumento na altura do pulso gerado pela fotomultiplicadora.

A figura 4.14 ilustra a polarização da fotomultiplicadora utilizada na construção do detector para formação do pulso gerado na saída do detector.

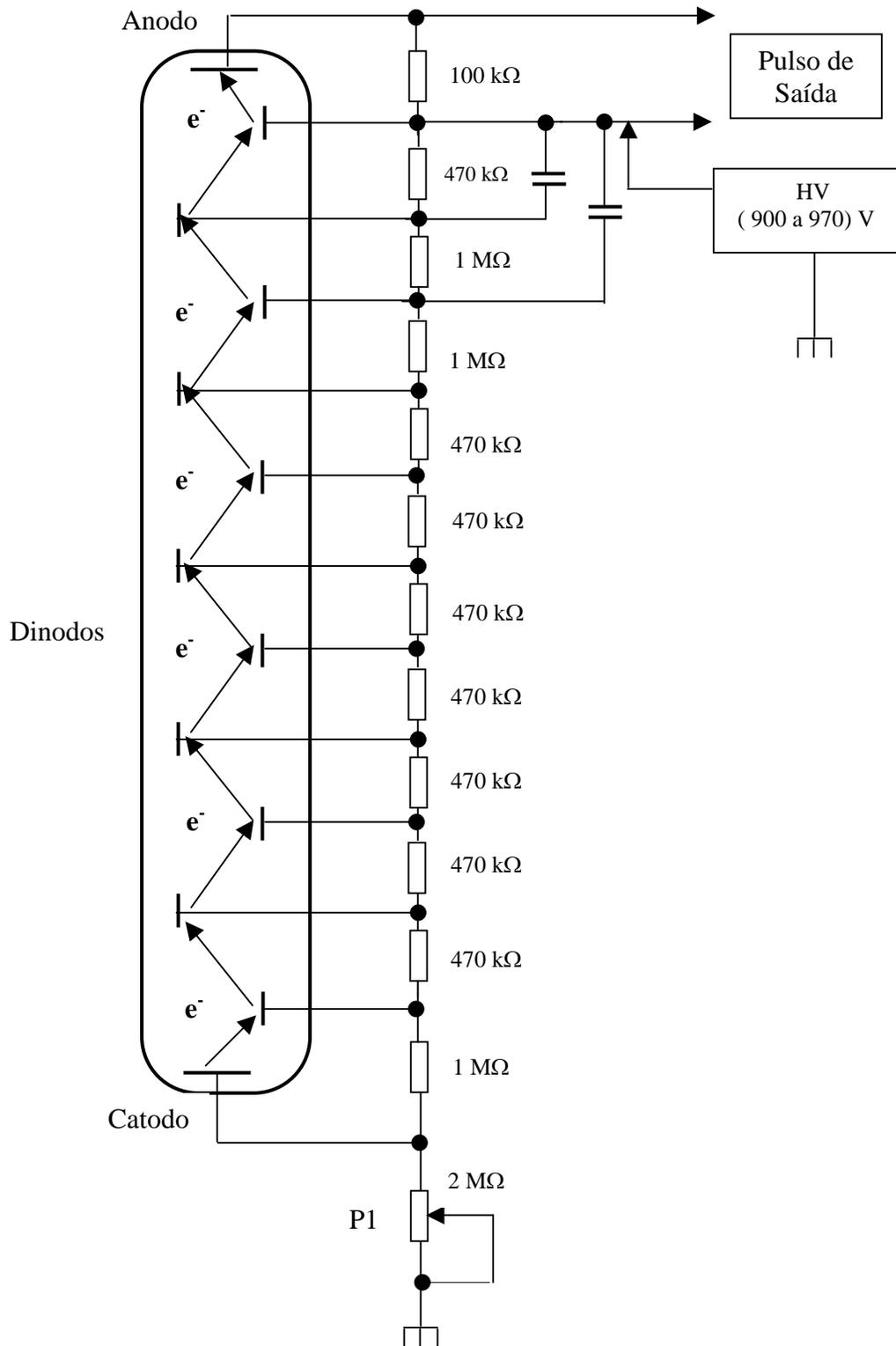


Figura 4.14 : Mostra a polarização da Fotomultiplicadora do Iodeto de Sódio.

A eficiência quântica da fotomultiplicadora não vem se mantendo constante durante a operação do detector, ocasionando uma degradação na resposta espectral como ilustrado na figura 4.15.

Quando ocorre diminuição da eficiência da fotomultiplicadora observa-se um deslocamento da calibração, em consequência parte dos radioisótopos de baixa energia serão rejeitados.

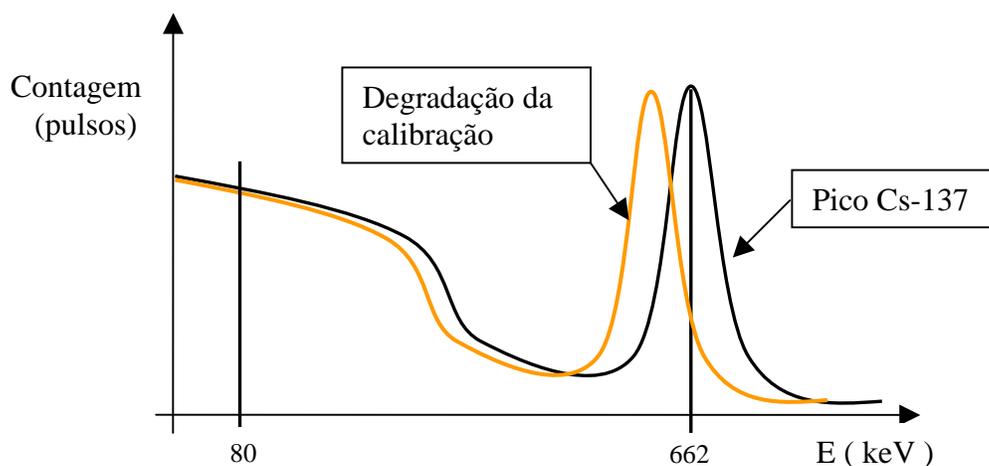


Figura 4.15 : Ilustra o deslocamento da resposta espectral do detector, devido a degradação da fotomultiplicadora.

Para reposicionar o espectro e garantir a eficiência quântica do detector, é preciso aumentar a polarização através de ajuste no potenciômetro P1 no circuito de polarização da fotomultiplicadora, com o objetivo de que na saída deste se mantenha a conversão de Energia / Tensão especificada para operação do detector. Esta degradação de eficiência da fotomultiplicadora compromete a operação contínua do sistema de monitoração.

Alguns fatores como temperatura, campo magnético, radiação, condições atmosféricas e fatores mecânicos podem contribuir de forma temporária ou permanente na operação das fotomultiplicadoras.

A representação da distribuição da tensão aplicada entre os dinodos da fotomultiplicadora é apresentada na figura 4.16, onde observa-se que a tensão aplicada entre os dinodos não é igual. Entre alguns dinodos observa-se um campo elétrico maior aplicado, devido a geometria interna de montagem entre os dinodos.

Uma distância diferente entre os dinodos ocasiona um campo elétrico diferente aplicado entre eles, afim de que os elétrons arrancados sejam acelerados de modo que todos se choquem com o próximo dinodo e assim sucessivamente.

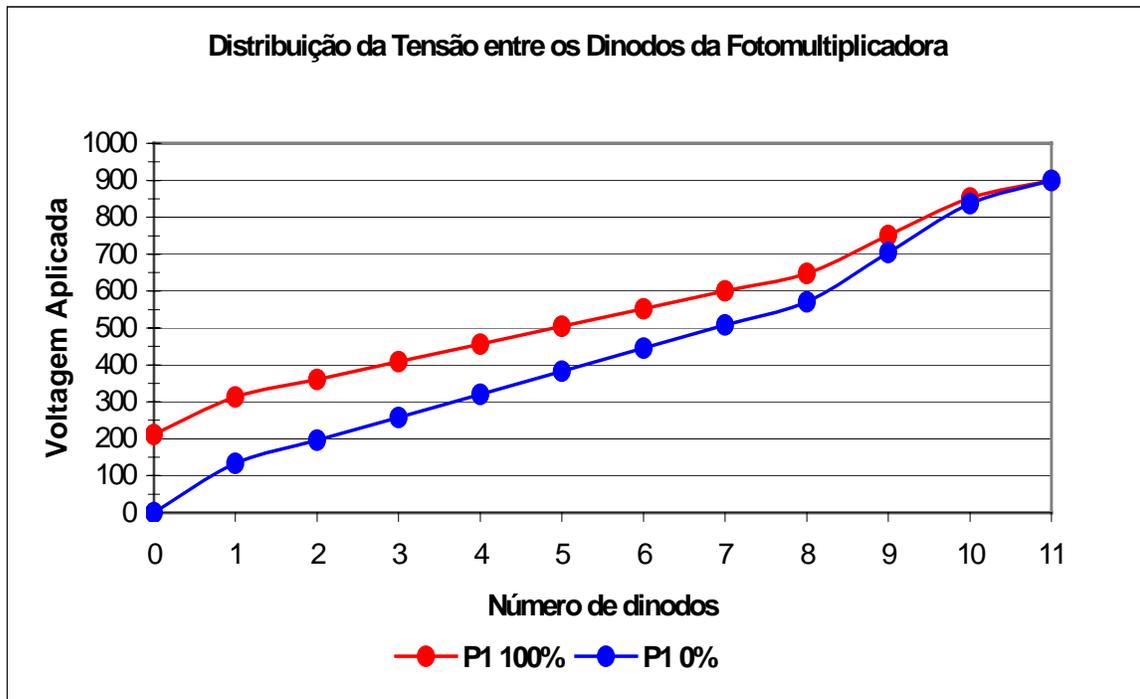


Figura 4.16: Ilustra a distribuição da tensão aplicada a fotomultiplicadora com ajuste de foco “P1” em 0% e 100%.

Durante a operação dos detetores observou-se que em cada ajuste da calibração em energia era dado em torno de uma volta completa no potenciômetro de ajuste P1 usado para polarização da fotomultiplicadora, através dessas informações foi realizado um levantamento da variação ôhmica do potenciômetro P1 pôr volta completa de ajuste, onde obtivemos os seguintes resultados apresentado na tabela 4.4:

Tabela 4.4: Valores da Resistência ôhmica pôr volta de ajuste do potenciômetro P1.

Voltas de P1	Medidas pôr volta de P1 (k Ω)	Varição entre Voltas (k Ω)
1	46,55	-----
2	171,73	125,18
3	313,6	141,87
4	456,6	143
5	604,6	148
6	756,1	151,5
7	908,9	152,8
8	1066,1	157,2
9	1219	152,9
10	1363,3	144,5
11	1514,8	151,3
12	1668,4	153,6
13	1829,1	160,7
14	1970,8	141,7
15	2065,2	-----

De acordo com os valores da aquisição da resistência entre voltas do potenciômetro P1, obtivemos um valor médio igual a 148 k Ω pôr volta de ajuste do potenciômetro P1.

Com este valor médio pôr volta desenvolvemos a figura 4.17, onde na curva azul apresenta a variação da tensão de polarização aplicada entre o catodo e o último dinodo da fotomultiplicadora em função do valor ajustado do potenciômetro P1 pôr volta de ajuste, com Tensão nominal de 900V.

Na curva de cor rosa apresenta a variação da tensão de polarização aplicada entre o catodo e o último dinodo da fotomultiplicadora em função ao valor ajustado do potenciômetro P1 por volta de ajuste, com Tensão nominal de 970V

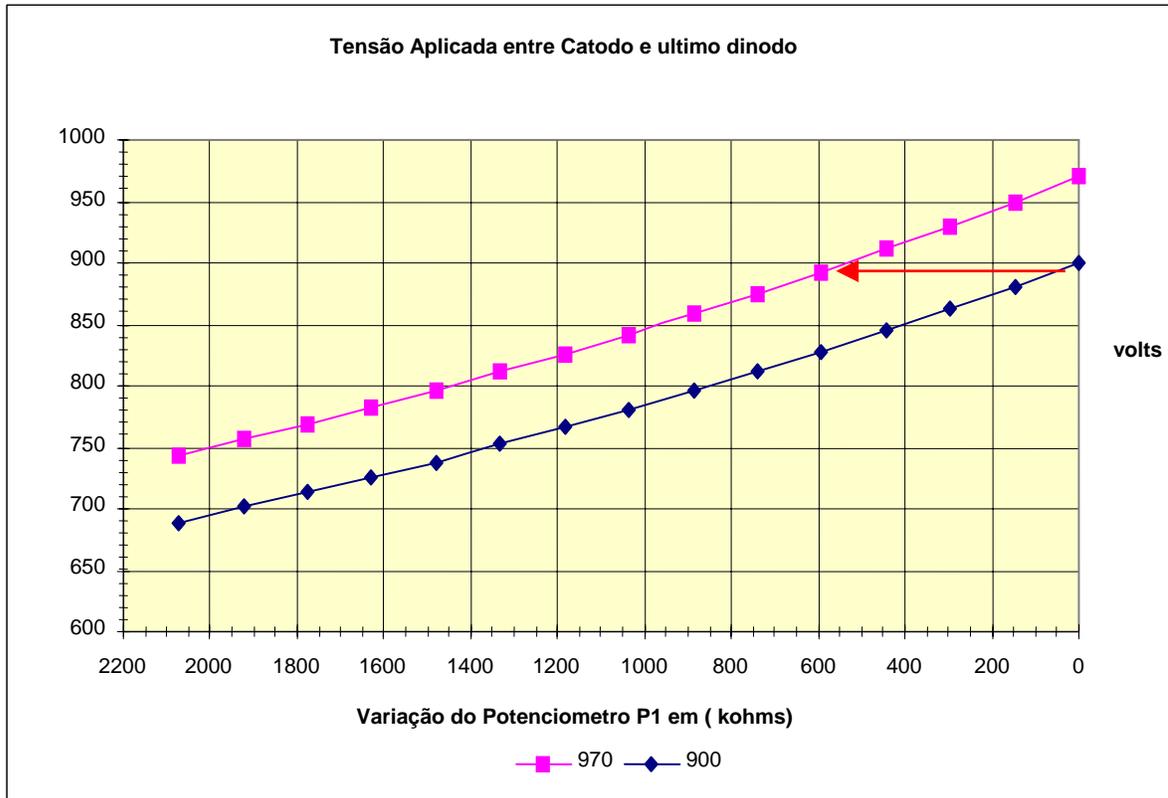


Figura 4.17: Mostra a variação de Tensão entre o catodo e o último dinodo da fotomultiplicadora em função do potenciômetro de ajuste da polarização P1, com tensão de operação de 900V e 970V.

Através do gráfico da figura 4.16 e os resultados dos testes periódicos, poderemos fazer uma previsão da vida útil média de operação dos detectores Iodeto de Sódio NaI(Tl) *Crismatec* usado nos Sistemas de Monitoração de Radiação da Central Nuclear.

Durante os seis anos de operação foi observado que em cada ajuste do espectro de energia era dado em torno de uma volta no potenciômetro de ajuste P1 (sensibilidade de foco) ilustrado na figura 4.14. Mediante estas informações foi realizado um levantamento dos valores do potenciômetro P1 com variações de 1 volta e registrado na tabela 4.4. Com estes dados plotamos o gráfico da figura 4.17 “tensão aplicada na fotomultiplicadora versus variação ôhmica do potenciômetro P1” com tensão de operação 900V e 970V.

Através dos resultados das figuras 4.7 a 4.13 que mostra a variação da eficiência para rejeição em 662 keV, foi levantado através dos resultados que durante 6 anos de operação realizou-se em média 8 ajustes com variação ôhmica de 1 volta no potenciômetro de ajuste de foco P1 em cada ajuste realizado nos detectores.

No gráfico da figura 4.17, observa-se através dos pontos marcados no gráfico que pode-se realizar com variação ôhmica de 1 volta de ajuste no potenciômetro P1 em torno de 19 ajustes que é mostrado nos pontos marcados na curva azul e na interpolação da curva azul para curva rosa quando chegar no último ponto de ajuste da curva azul. Considerando que no ajuste inicial realiza-se 3 pontos de ajustes devido a tensão de saída do detector no ponto inicial ficar em torno de 1,2V e a saída requerida é em torno de 2,0V.

Com os resultados observados na figura 4.17 pode-se afirmar que um detector NaI(Tl) *crismatec* em Centrais Nucleares permite em média 16 ajustes.

Durante os seis anos de operação realizou-se em média 8 ajustes pôr detector, então podemos afirmar que a vida útil média de um detector NaI(Tl) *crismatec* é em média 12 anos em operação ininterrupta.

4.4 – Resposta Espectral para análise da Resolução dos detectores.

Nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20 são apresentadas respostas espectrais levantadas durante os testes periódicos, onde analisaremos a resolução, eficiência e alguns parâmetros de aceitação dos testes periódicos dos detectores.

Os ajustes foram determinados de acordo com as características intrínsecas do detector, o multicanal foi calibrado para verificar o posicionamento correto do ajuste do fator de conversão do detector 3 mV / keV, o qual é requerido para garantir a operação correta do sistema.

Ajustes do Multicanal Amptek para análise da resposta espectral.

Número de canais = 2048

Tensão máxima na entrada do Multicanal = 5 Volts

Relação mV / keV do detector = 3 (mV / keV)

Radioisótopo usado nos testes = Cs-137

Tensão pôr Canal = $5000 \text{ (mV)} \div 2048 \text{ (canais)} = 2,44 \text{ (mV / canal)}$

Foram usados dois pontos para realizar a calibração do Multicanal:

1) pico do Cs- 137 \longrightarrow 662 keV no canal 814.

Tensão gerada na saída do detector = 662 (keV) x 3 (mV / keV) = 1986 (mV)

Canal do Cs- 137 = 1986 (mV) \div 2,44 (mV / canal) = 814

2) pico de retroespalhamento γ do Cs-137 no chumbo \longrightarrow 184 keV no canal 226

$$E' = E_i \div [1 + (E_i \div m_0 c^2) \cdot (1 - \cos \theta)]$$

$$E' = 662 \text{ (keV)} \div [1 + (662 \text{ (keV)} \div 511 \text{ (keV)}) \cdot (1 - \cos 180^\circ)]$$

$$E' = 184 \text{ keV}$$

Tensão gerada na saída do detector = 184 (keV) x 3 (mV / keV) = 552 mV

Canal do pico de retroespalhamento = 552 (mV) \div 2,44 (mV / canal) = 226

Foi ajustada a calibração do Multicanal com as tensões padrões geradas na saída do detector, afim de verificar a relação de conversão correta do detector. Se houver deslocamento no posicionamento do pico analisado em relação a sua energia padrão, é que a relação de conversão do detector não está coerente. Através da visualização espectral podemos atuar no ajuste do foco da Fotomultiplicadora através do potenciômetro P1, até que o pico analisado volte a se posicionar na sua energia padrão, restabelecendo assim a calibração do fator de conversão do detector.

A seguir apresentaremos alguns espectros realizados durante a execução de testes de calibração dos detectores Iodeto de Sódio “NaI(Tl)”.

A figura 4.18 apresenta um espectro diferencial formado durante um teste de inspeção periódica com Fonte padrão de Cs-137. Podemos observar através da figura 4.18 a Resolução do detector nas informações do pico no espectro, onde temos:

FWHM = 52,119 keV e Centróide = 661,31 keV.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{FWHM}}{\text{Centróide}} \times 100\% = \frac{52,119}{661,31} \times 100\% = 7,88 \%$$

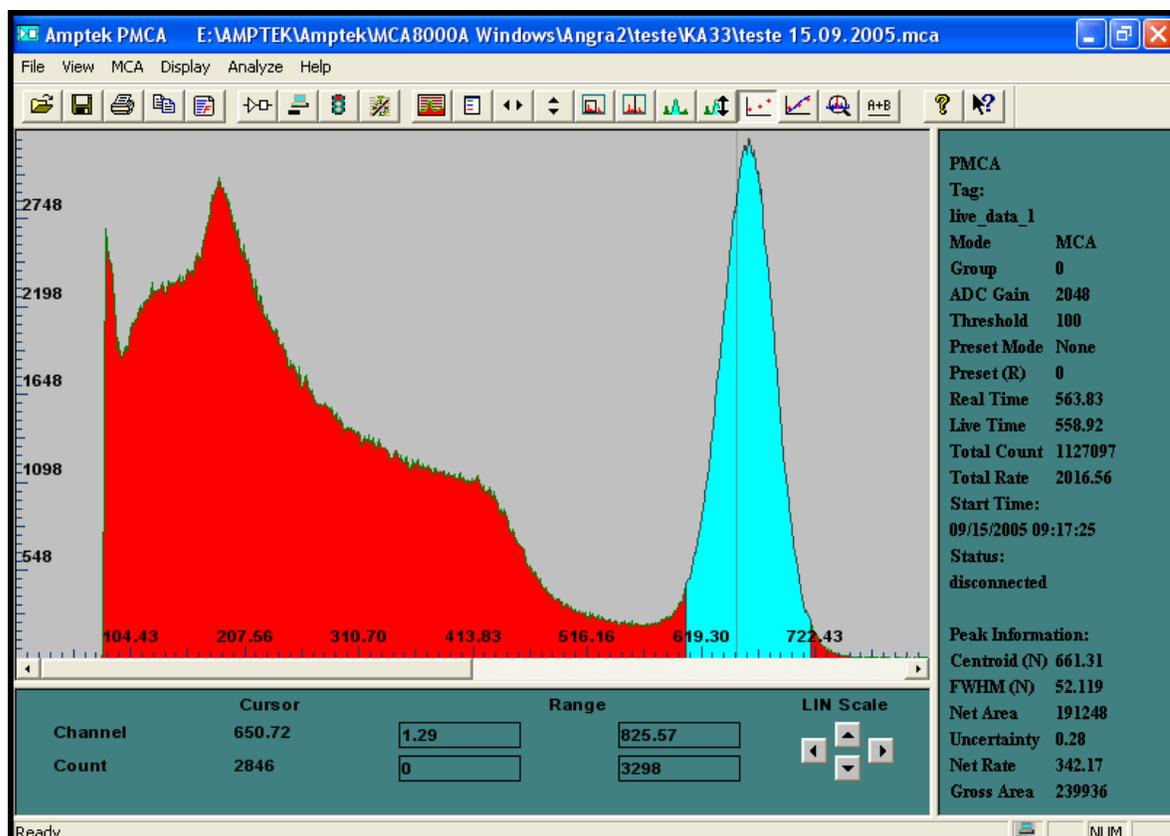


Figura 4.18 : Espectro de Energia do detector NaI(Tl) do sistema KAA33CR001 para fonte padrão de Cs-137.

Todo o espectro apresentado antes do vale do fotopico “espalhamento compton“, é referente as interações dos raios gama emitido pela fonte de Cs-137 onde não foi depositada toda a energia dos raios gama incidente no volume do cristal do detector, nas interações com materiais envolvidos na construção do detector e no suporte de construção da fonte de teste. Todos estes fatores influênciam para o crescimento da região do contínuo compton.

Através das informações do pico na figura 4.18, observamos através da Centróide que o pico do Cs-137 está posicionado na energia de 661,31 keV, concluindo assim que o ajuste do fator de conversão do detector 3mV / keV está correto, já que a energia do raio gama emitido pelo decaimento da fonte de Cs-137 é 662 keV.

O pico maior apresentado ao lado esquerdo da resposta espectral, é proveniente do retroespalhamento do raio gama emitido pelo decaimento da fonte de Cs-137 com a blindagem de chumbo do detector, que aparece como uma parcela acima do contínuo compton.

A figura 4.19 apresenta um espectro diferencial formado durante um teste de inspeção periódica com fonte padrão de Cs-137. Podemos observar através da figura 4.19 a resolução do detector nas informações do pico no espectro, onde temos:

FWHM = 47,739 keV e Centróide = 629,82 keV.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{FWHM}}{\text{Centróide}} \times 100\% = \frac{47,739}{629,82} \times 100\% = 7,58 \%$$

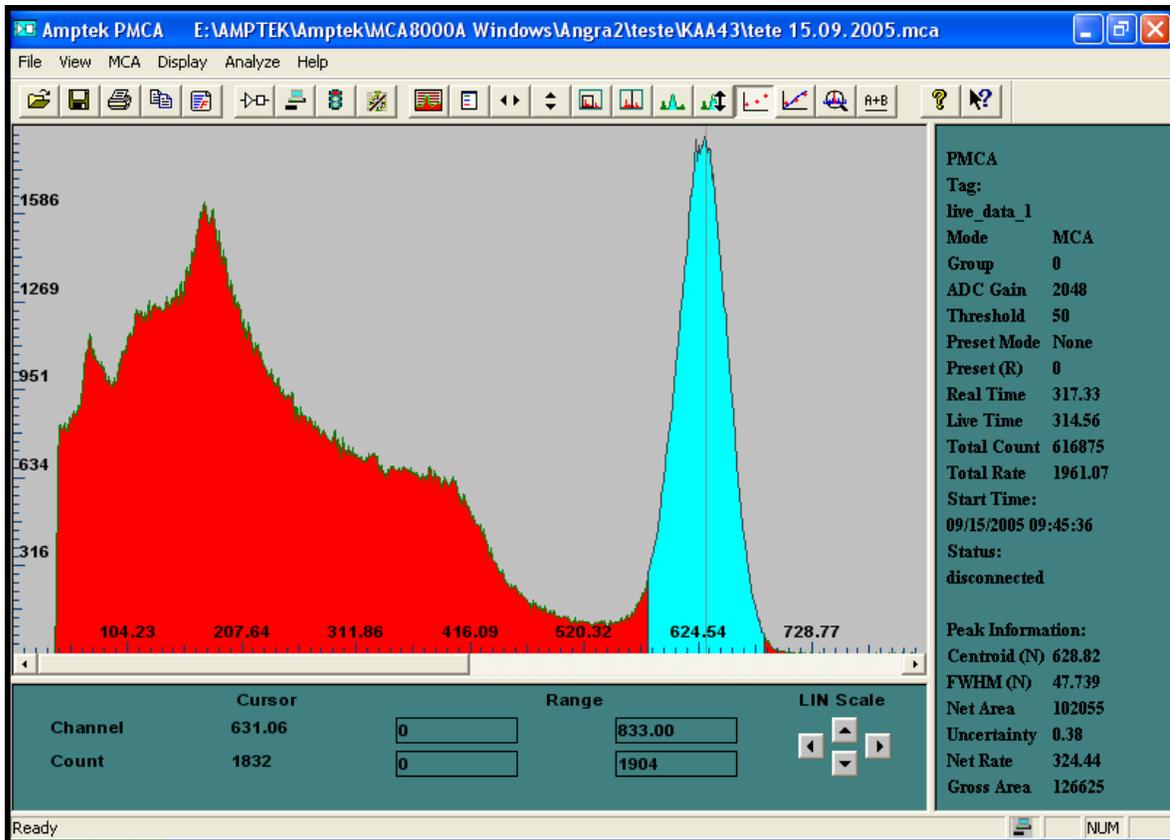


Figura 4.19 : Espectro de Energia do detector NaI(Tl) do sistema KAA43CR001 para fonte padrão de Cs-137.

Através das informações do pico na figura 4.19 , observamos através da centróide que o pico do Cs-137 está posicionado na energia de 629,82 keV, concluindo assim que o ajuste do fator de conversão do detector 3mV / keV não está devidamente correto, já que a energia do raio gama emitido pelo decaimento da fonte de Cs-137 é 662 keV. Observamos um deslocamento espectral da ordem de 32 keV que é ocasionado pela queda da eficiência quântica da fotomultiplicadora.

Para restabelecer o ganho da fotomultiplicadora e conseqüentemente a sua resposta espectral é preciso aumentar a tensão de operação do detector através do potenciômetro P1.

A figura 4.20 apresenta um espectro diferencial formado durante um teste de inspeção periódica com fonte padrão de Cs-137. Podemos observar através da figura 4.20 a resolução do detector nas informações do pico no espectro, onde temos:

FWHM = 53,194 keV e Centróide = 629,95 keV.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{FWHM}}{\text{Centróide}} \times 100\% = \frac{53,194}{629,95} \times 100\% = 8,44\%$$

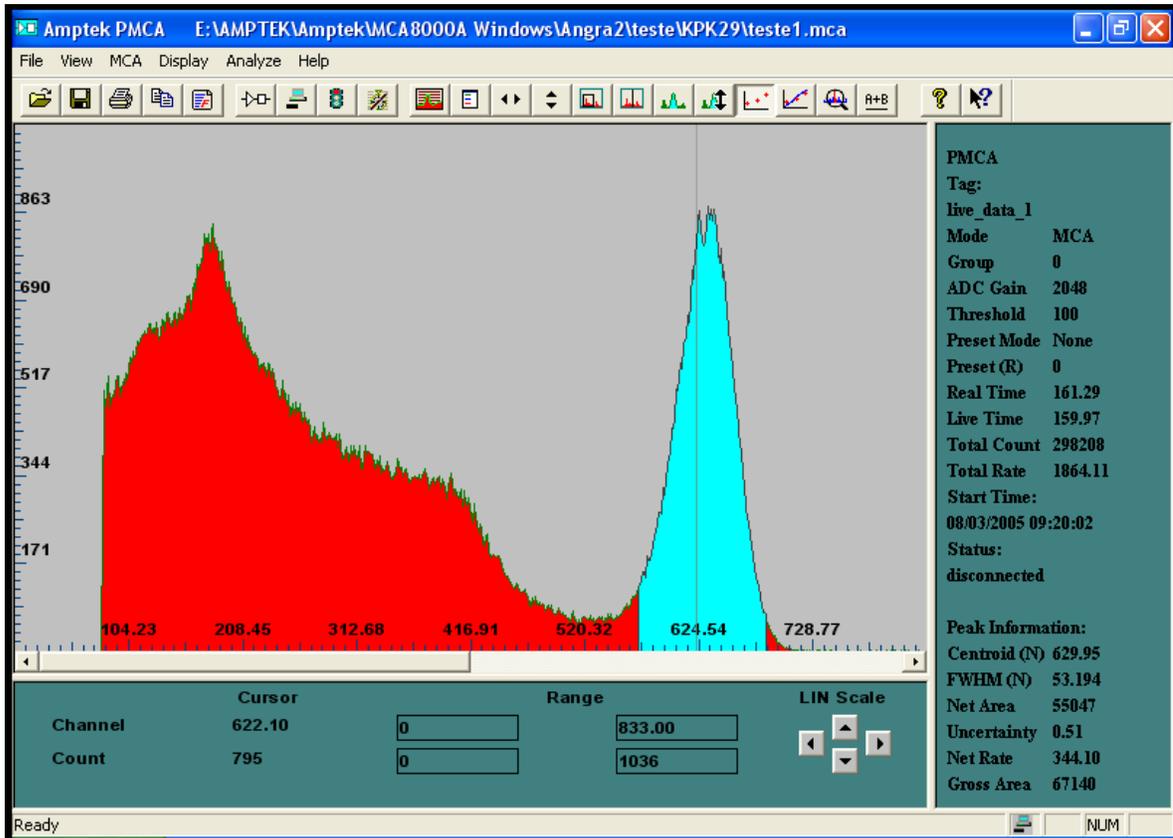


Figura 4.20: Espectro de Energia do detector NaI(Tl) do sistema KPK29CR001 para fonte padrão de Cs-137.

Através das informações do pico na figura 4.17, observamos através da centróide que o pico do Cs-137 está posicionado na energia de 629,95 keV, concluindo assim que o ajuste do fator de conversão do detector 3mV / keV não está devidamente correto, já que a energia do raio gama emitido pelo decaimento da fonte de Cs-137 é 662 keV. Observamos um deslocamento espectral da ordem de 32 keV que é ocasionado pela queda da eficiência quântica da fotomultiplicadora.

Para restabelecer o ganho da fotomultiplicadora e conseqüentemente a sua resposta espectral é preciso aumentar a tensão de operação do detector através do potenciômetro P1,

que é feita periodicamente durante a operação dos detectores iodeto de sódio “NaI(Tl) *crismatec*.”

Neste caso observamos um acréscimo na Resolução do detector, que é devido ao tempo curto de contagem para formação da resposta espectral, mas ainda assim a resolução está dentro das características técnicas do fabricante.

Foi observada também uma semelhança grande entre as respostas espectrais dos sistemas avaliados, concluindo assim uma ótima qualidade e padrão na construção dos detectores iodetos de sódio “NaI(Tl) *crismatec*.”

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões

O presente trabalho teve por finalidade avaliar o desempenho dos Cintiladores NaI(Tl) usados nos sistemas de Monitoração de radiação em Centrais Nucleares.

1) A forma do pulso gerado pelo detector “forma de sino“ está de acordo com as características fornecidas pelo fabricante, os tempos de subida, tempo de descida e tempo total estão plenamente de acordo com as expectativas esperadas do detector NaI(Tl), da ordem de 5 microsegundos. Durante seis anos de operação dos detectores observa-se que os valores dos tempos e a forma do pulso não sofreram alterações garantindo assim uma boa performance quanto a formação do pulso.

2) A faixa de operação determinada pelas especificações técnicas do detector NaI(Tl) crismatec é 830V a 970V, onde neste range de operação o fator de conversão mV/keV é ajustado via potenciômetro P1 “sensibilidade de foco”.

Através dos resultados obtidos da curva característica do detector, foi observado que a faixa de operação pode ser estendida para 830V a 1020V, porém nestas condições não é garantiria a linearidade do detector como observado nas características técnicas do detector. Mas como o modo de medição do sistema é a integração total da atividade da amostra, não a espectrometria de energia, este aumento da faixa de operação não afetará o valor total da atividade encontrada na amostra, e nos possibilitará aumentar a vida útil média de operação dos detectores NaI(Tl) crismatec.

3) A inclinação do plateau está dentro dos valores esperados dentro da faixa de operação 830V a 1050V, em torno de 5,02% o que nos permite operar com segurança até o valor máximo de 1020V de tensão aplicado a fotomultiplicadora.

4) Após a calibração em energia, onde ajusta-se o fator de conversão dos detectores 3mV/keV que é definido nas características técnicas de operação dos sistemas. Observou-se que os resultados da eficiência encontrados no comissionamento estão de acordo com as especificações técnicas do equipamento.

- Valores requeridos pelas especificações técnicas:
Para Cs-137 temos $E_{abs} = 9,52 \% \pm 15\%$
Para Co-60 temos $E_{abs} = 16,75 \% \pm 15\%$
- Valores encontrados com maior desvio durante os testes:
Para Cs-137 encontramos $E_{abs} = 9,12 \% \text{ “- 4,25 \%”}$
Para Co-60 encontramos $E_{abs} = 17,25 \% \text{ “+ 2,9 \%”}$

5) Os resultados encontramos para inspeções periódicas dos sistemas avaliados estão bem parecidos, garantindo que as medidas independentes estão com desvios pequenos entre si assim comprovando a homogeneidade dos sistemas avaliados. Este fato comprova que o ajuste inicial da calibração em energia garante a operabilidade correta dos Sistemas de Monitoração de Radiação.

O uso da média como valor de referência é uma boa opção, como mostra a tabela 4.3.

O valor de referência deve ser mantido para calibração inicial, quando for necessário substituição de algum detector pôr falhas ou defeitos apresentados.

A eficiência absoluta encontrada para inspeções periódicas nos sistemas avaliados é bem inferior a encontrada nos testes de calibração, com podemos observar:

- Com discriminador inferior ajustado para 80 keV em 30/04/2000:
Eficiência absoluta = 2,42 %
- Com discriminador inferior ajustado para 662 keV em 30/04/2000:
Eficiência absoluta = 0,28 %

Esta geometria usada para determinar os valores de referência foi elaborada para facilitar a execução do teste, não sendo preciso desmontar o detector do local de montagem para verificar a eficiência, o que acarretaria mais tempo e poderia causar danos nos sistemas quando da desmontagem do detector toda vez que fosse realizado um teste de inspeção. Esses valores de referência servirão de padrão para verificar a operabilidade dos sistemas, garantindo-se que a eficiência permaneça dentro dos desvios permitidos para operação dos sistemas.

6) Durante a operação, observou-se um desempenho regular da calibração em energia dos sistemas devido a constante degradação da fotomultiplicadora. Este fato ocasiona constante desvio no espectro de energia do detector, ocasionando constantes recalibrações

em energia como pode ser observado através das oscilações nos gráficos das figura 4.7 a 4.13.

Uma observação importante é que esta descalibração em energia constante não afeta os valores da eficiência com rejeição em 80 keV, que se mantém com valores muito próximos dos requeridos pelos detectores como pode ser observado nas figuras 4.4 , 4.5 e 4.6. Com isso concluímos que esta degradação da fotomultiplicadora é corrigida bem antes que o sistema rejeite parte do espectro de baixa energia.

7) O estudo da resposta espectral com a formação de alguns espectros, ilustrado nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20, comprovam os constantes deslocamentos do espectro de energia causado pela degradação da fotomultiplicadora, comprometendo a calibração em energia do sistema.

Quanto a resolução os valores apresentados estão dentro das características teóricas esperadas para um detector iodeto de sódio NaI(Tl):

$$\text{FWHM} = 8,5 \% \text{ ou melhor.}$$

No entanto este constante deslocamento do espectro de energia compromete a vida útil do detector NaI(Tl) crismatec. Através das constantes recalibrações em energia dos detectores, observou-se que em cada intervenção para recalibrar os detectores era reajustado em torno de 1 volta o potenciômetro de ajuste de foco P1.

Com os resultados das intervenções durante 6 anos de operação e um levantamento dos valores ôhmicos de ajuste por volta completa do potenciômetro de ajuste P1, levantou-se o gráfico da figura 4.16, onde os pontos na curva indica cada volta ôhmica completa de reajuste do potenciômetro P1 em função da tensão aplicada a fotomultiplicadora. Através da interpolação entre as curvas, do número médio de ajustes realizados durante os seis anos de operação (que foram obtidos através das inspeções periódicas) e ilustrados nas figuras 4.7 a 4.13. Concluímos, que a vida útil média dos detectores NaI(Tl) crismatec usado em Centrais Nucleares são de aproximadamente 12 anos em operação ininterrupta.

5.2 – Sugestões

Conforme analisado, devido a constante degradação da fotomultiplicadora do detector NaI(Tl) crismatec usado em Centrais Nucleares.

Sugerimos uma avaliação no procedimento de teste da Central Nuclear, para que o ajuste da calibração em energia seja realizado com maior eficiência mantendo a altura do pulso gerado pelo detector dentro das especificações técnicas descrita pela fabricante do detector.

Modificação no procedimento de teste, mudança do método feito para ajuste da calibração em energia. O procedimento usado para ajuste é pouco eficiente, a introdução de um novo modo de ajuste com auxílio de um analisador Multicanal, com a formação do espectro de energia, teríamos dados precisos para uma calibração correta, onde diminuiríamos a quantidade de vezes de intervenções nos sistemas. Com a formação do espectro de energia também teríamos dados do acompanhamento da resolução do detector e poderíamos prever possíveis degradações do detector antes que haja um defeito que necessidade a troca imediata do mesmo.

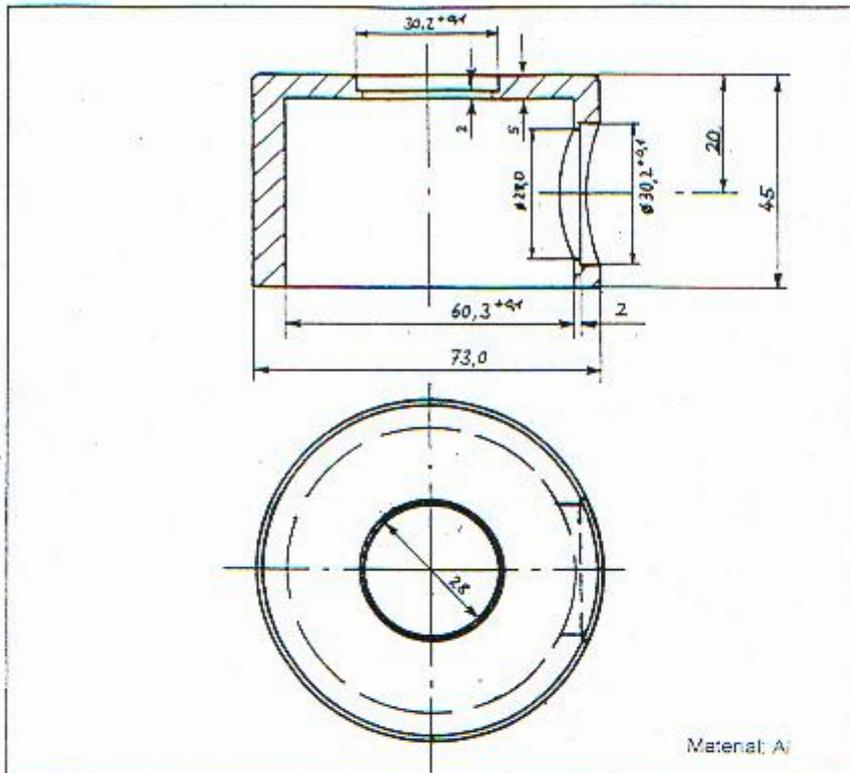
Que após dez anos de operação em condições ininterruptas se mantenha pelo menos 20% dos detectores instalados em estoque, já que observamos que a vida útil média dos detectores é de aproximadamente 12 anos. Após 10 anos de operação correremos sérios riscos dos detectores apresentarem falhas e os processos ficarem sem monitoração.

Estudo para troca dos detectores Iodeto de Sódio “NaI(Tl) *Crismatec*” instalados, pôr detectores que apresentem melhor desempenho de eficiência, resolução e menos degradação da fotomultiplicadora, o que ocasionaria poucas intervenções e maior durabilidade e disponibilidade de operação dos processos monitorados com este tipo de detector.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurements*, Third Edition. (J. Wiley & Sons, 1999)
2. EGG - Ortec – Modular Pulse-Processing Electronics and Semiconductor Radiation Detectors.
3. Kaplan – *Física Nuclear* – Segunda Edição – 1978 – Department of Nuclear Engineering Massachusetts Institute of Technology.
4. Photomultiplier Tubes Principles & applications Philips – Photonics.
5. R.V.Ribas, *Instrumentação Nuclear* – Instituto de Física , Departamento de Física Nuclear – USP – 31 / 10 / 2002.
6. O.Mafra, *Técnicas e Medidas Nucleares* – Editora da Universidade de São Paulo – 1973.
7. EPRI – Electric Power Research Institute – Radiation Monitoring Systems.
8. Comissioning Documentation Sheet NPP Angra 2 – System JYK – Radiation Monitoring System. Physical Function Testing of Aerosol Measuring Points with Scintillation Counter NaI(Tl) – A – JYK – 19.
9. Manual de Testes CNAA Angra 2, Monitoração do Sistema e do Circuito * JYK* Verificação da Calibração com Fonte Radioativa. Instruções de Teste números, 1- JYK 11.2 , 1- JYK – 15.2 , 1 – JYK – 81.2 e 1 – JYK – 83.2.
10. Specification Technique NA – CL – SP – 21 ind A 30 / 10 / 1997 Crismatec St. Pierre-les-Nemours, Detector K6SS4 / 2G – X / 1 Siemens Angra 2.

ANEXO A : Adaptador de Teste para detector *K6SS4/2G-X/1 CRISMATEC*



Material: Al

b		24.11.98	Le	Le	Typbezeichnung geändert
Q		24.10.94	Le	Le	Maße ergänzt
Zeichn.	Datum	gezeichnet	geprüft	Freigegeben	
Ursprung/Origin:			Ursprung-Zeichnungs-Nr./Origin drawing No.		Ursprung-Nr./Orig. Plan number
Projekt/Project:					EW-Nr./Part code:
					ZXX000
gezeichnet	Datum	Name	Maßstab	Skala	Skizze
gezeichnet	10.10.94	Lehmitz	1:1		
gezeichnet	10.10.94	Fickert			
gezeichnet	10.10.94	Werdecker			
Abkürzung/Code:					Wartungskennzeichen/Code
NLL2					1834
Siemens AG					940011
Unternehmensbereich KWJ					
Zeichnungsnummer/Drawing No.			NLL2-44-940011-b		
Erstellt durch/Submitted by:			Freigegeben/Supervised:		
Ident-Nr./Ident No.					

Adaptador para NaI(Tl) 3,81 x 2,54 cm - K5SS4/2G-X/1

ANEXO B : Certificado da Fonte de Teste 223-95

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 10.11.1997, Kalibrierzeichen: PTB-6.11-223-95

Gegenstand: <i>Object</i>	Aktivitätsnormal
Typ: <i>Type</i>	Punktförmiges Präparat
Kennzeichnung: <i>Serial number</i>	223-95
Radionuklid: <i>Radionuclide</i>	Caesium-137
Abdeckfolie: <i>Backing</i>	Polyethylen, beidseitig 22 mg·cm ⁻²
Kalibrierverfahren: <i>Method of calibration</i>	Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung bekannter spezifischer Aktivität auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.
Aktivität: <i>Activity</i>	(43,1 ± 0,5) kBq
Bezugszeitpunkt: <i>Reference date</i>	01.01.1997, 00:00 Uhr MEZ
Meßunsicherheit: <i>Uncertainty of measurement</i>	Angegeben ist die erweiterte Meßunsicherheit, die sich aus der Standardmeßunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß dem "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (ISO, 1995) ermittelt. Der Wert der Meßgröße liegt im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Wertintervall.
ISO-Klassifikation: <i>ISO classification</i>	ISO/C 11111 gemäß DIN 25426-1 und ISO 2919.



Appendix 01 Sheet 13 of 36
to Comm. Doc. Sheet A. 44K-19

1. Supplement

ANEXO C : Certificado da Fonte de Teste 224-96

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 2 zum Kalibrierschein vom 10.11.1997, Kalibrierzeichen: PTB-6.11-224-96

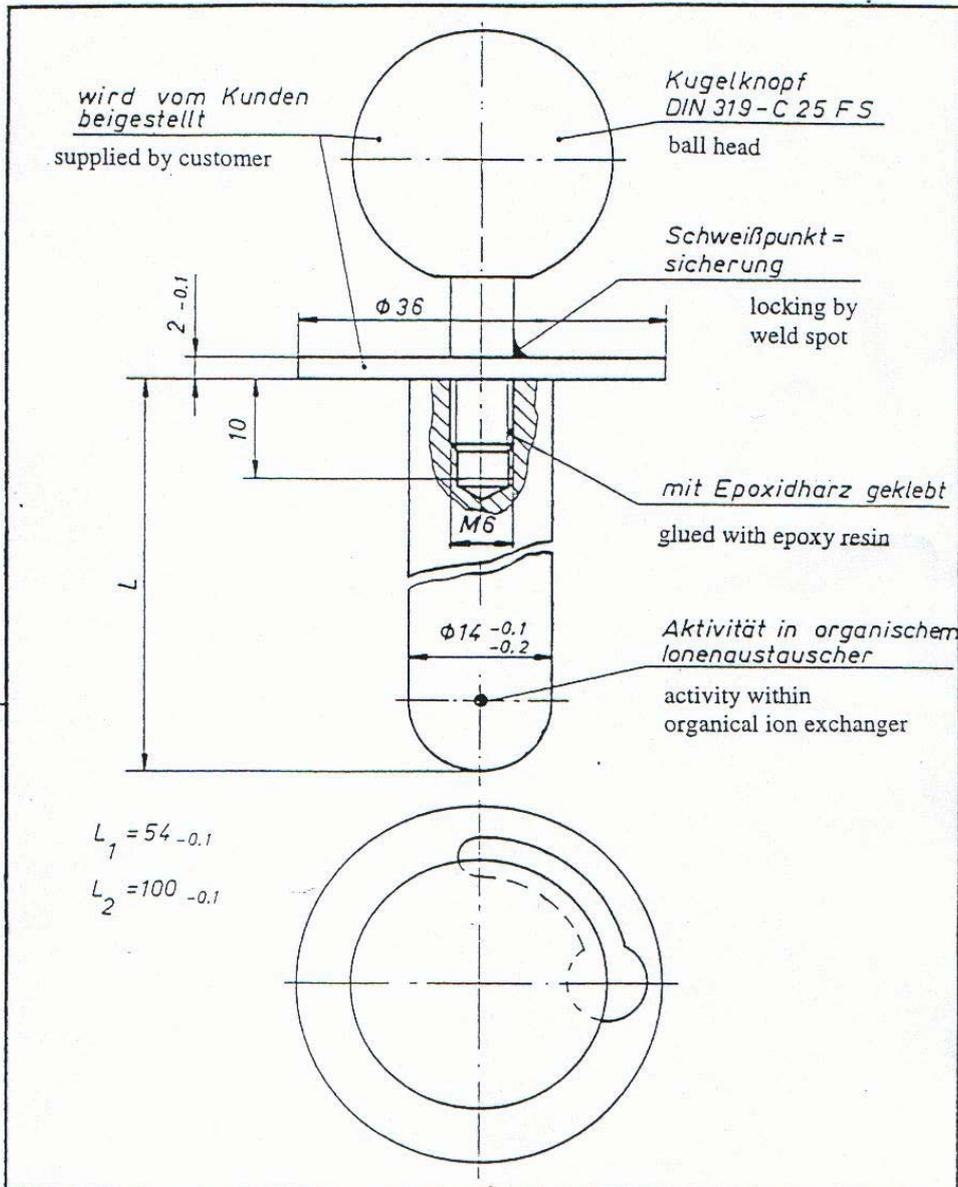
Gegenstand: <i>Object</i>	Aktivitätsnormal
Typ: <i>Type</i>	Punktförmiges Präparat
Kennzeichnung: <i>Serial number</i>	224-96
Radionuklid: <i>Radionuclide</i>	Cobalt-60
Abdeckfolie: <i>Backing</i>	Polyethylen, beidseitig 22 mg·cm ⁻²
Kalibrierverfahren: <i>Method of calibration</i>	Das Präparat wurde durch Aufbringen einer radioaktiven Lösung bekannter spezifischer Aktivität auf die Präparatunterlage mit Hilfe einer Pipette hergestellt. Die Aktivität des Präparates ergibt sich aus der spezifischen Aktivität und der Masse der aufgetragenen Lösung, die durch Wägung der Pipette vor und nach dem Aufbringen ermittelt wurde.
Aktivität: <i>Activity</i>	(27,99 ± 0,20) kBq
Bezugszeitpunkt: <i>Reference date</i>	01.01.1997, 00:00 Uhr MEZ
Meßunsicherheit: <i>Uncertainty of measurement</i>	Angegeben ist die erweiterte Meßunsicherheit, die sich aus der Standardmeßunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß dem "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (ISO, 1995) ermittelt. Der Wert der Meßgröße liegt im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.
ISO-Klassifikation: <i>ISO classification</i>	ISO/C 11111 gemäß DIN 25426-1 und ISO 2919.



Appendix 01, Sheet 14 of 36
to Comm. Doc. Sheet A.54K-19

1. Supplement

ANEXO D : Adaptador com fonte de teste FU 386



1986	Tag	Name	Fonte Gama de Referência	
Gezeichnet:	11.3.	[Signature]		
Geprüft:			Cs-137	
Maßstab:	2:1		Amersham Buchler GmbH & Co KG D-3300 Braunschweig	
Werkstoff:	Kunststoff		Zeichnungs-Nr.:	VZ-660
			Amersham	
<small>Der Inhalt dieser Zeichnung und ihrer Anlagen ist unser Eigentum. Die Zeichnung und ihre Anlagen dürfen ohne unsere schriftliche Genehmigung nicht vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden. Jede nicht autorisierte Verwendung ist widerrechtlich und wird verfolgt. Alle Rechte vorbehalten. Copyrights reserved.</small>				

ANEXO E : Certificado da Fonte de teste

13 January 1998
Page 1 of 2 pages, issue 11/97

CERTIFICATE

No. 379568

for a Sealed Radioactive Source

**Nycomed
Amersham**

Amersham Buchler
GmbH & Co KG
Gieselweg 1
D-38110 Braunschweig
Postfach 11 49
D-38001 Braunschweig
Tel. (05307) 930-0
Fax (05307) 930-293
Fax-Zentrale 930-237

Source Type: Reference Source

Product code CDRB5993
Drawing VZ-660
Source no FU 386
Nuclides Caesium-137

Measurement Data

Activity 91.1 kBq
Overall uncertainty* 3 %
Reference date 1 January 1998
Traceability* Defined on page 2
Radioactive impurities Related to Cs-137 (equal 100 %) the following radioactive impurities were detected:
none

Leakage and
Contamination Test/s

Test method/s* II and I
Test/s passed on 6 January 1998

Additional Information

ISO classification* C 11111
Remark ---

* see page 2 for explanation

Amersham Buchler GmbH & Co KG

J. A. B. J.

(Production Manager)

Appendix 01 Sheet 12 of 36
to Comm. Doc. Sheet A-74K-19

1. Supplement

Amersham Buchler
GmbH & Co KG
Sitz Braunschweig, Registergericht
Braunschweig, HRA 6021

Personlich haftende Gesellschaft
Amersham Buchler GmbH
Sitz Braunschweig, Registergericht
Braunschweig, HRB 654

Geschaftsführer
Dr. Helmut Knaulberg
Vorsitzender des Aufsichtsrats
Wolfgang Busselberg

Deutsche Bank AG Braunschweig
BLZ 251 201 00 Konto 01 25 100 000
Postfachamt Hannover
BLZ 251 100 00 Konto 01 25 100 000

ANEXO F : Tratamento Estatístico das medições.

- Propagação de erros:

$$U = U(x, y, z, \dots)$$

$$\sigma_u^2 = (\partial_u / \partial_x)^2 \cdot \sigma_x^2 + (\partial_u / \partial_y)^2 \cdot \sigma_y^2 + (\partial_u / \partial_z)^2 \cdot \sigma_z^2 + \dots$$

- Soma e subtração

$$U = X + Y$$

$$\sigma_u = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2} = (X + Y)^{1/2}$$

- Multiplicação e Divisão por uma constante.

$$U = Ax$$

$$U = x / A$$

$$\sigma_u = A \cdot \sigma_x$$

$$\sigma_u = \sigma_x / A$$

$$\sigma_u = A \sigma_x$$

- Média (M) \longrightarrow Pulsos

$$\sigma_u = (M)^{1/2} \div [n \times t(s)] \quad \text{onde: } n = \text{número de leituras}$$

$$t = \text{constante (tempo de medições)}$$

$$\text{contagens / segundos} = \text{cps}$$

$$M = [\text{cps} \times t(s)]$$