

BR9432028  
NIS-BR--3323

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO  
PARA MONITORES DE CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DE  
SUPERFÍCIE

Simeone Koflulovich Dias

TESE 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  
E PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Aprovada por:



*Linda V.E. Caldas*

Prof.<sup>a</sup> Linda V.E. Caldas, D.Sc.

*Jader Benuzzi Martins*

Prof. Jader Benuzzi Martins, D.Sc.

*Ricardo Tadeu Lopes*

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

53.089  
D541d

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
JULHO DE 1991

**DIAS, SIMONE KODLULOVICH**

**Desenvolvimento de um sistema de calibração para monitores de contaminação radioativa de superfície [Rio de Janeiro] 1991**

**VIII, 133 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Nuclear, 1991)**

**Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**

**I. Calibração I. COPPE/UFRJ II. Título (série).**

---

**Ao Rogério, à Tatiana e  
ao Alexandre, pelo apoio,  
incentivo e carinho.**

---

### **Agradecimentos**

À Dra. Linda V.E. Caldas, pela amizade, dedicação e eficiência na orientação desse trabalho;

Ao Marcos Xavier, pela ajuda inestimável no desenvolvimento do projeto e pelo esmero na confecção das figuras;

À Dra. Olga Y. Mafra, pelo fornecimento de fontes radioativas padrões alfa;

Ao Dr. Gian M. Sordi, por proveitosas discussões;

À MSc. Maria da Penha P. Albuquerque, pelas valiosas sugestões e pelo auxílio no uso do micro-computador;

À Adriana C. de Almeida, pela presteza, capricho e auxílio na datilografia;

À Carmem, S.T. Mariano, pela paciência, dedicação e amizade demonstrada na finalização do trabalho;

À Cristianne Kodulovich, pelo carinho e incentivo constantes;

Aos meus pais, pela confiança, apoio e compreensão durante todo o desenvolvimento do trabalho;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pela oportunidade de desenvolver esse trabalho;

Ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), pela doação de fontes radioativas padrões alfa e beta;

**Ao Laboratório de Metrologia Nuclear, pelo fornecimento de fontes radioativas alfa;**

**Ao Laboratório de Desenvolvimento de Detectores Plásticos do IPEN, pelo fornecimento dos cintiladores plásticos utilizados no sistema de controle de fontes radioativas;**

**À Divisão de Oficinas do IPEN, pela confecção dos arranjos experimentais;**

**À Coordenadoria dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), pela possibilidade oferecida de realização desse trabalho;**

**À CAPES, pelo apoio financeiro.**

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO  
PARA MONITORES DE CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA DE  
SUPERFÍCIE**

**Simone Kodlulovich Dias**

**Junho de 1991**

**Orientadora: Dra. Linda V. E. Caldas  
Programa: Engenharia Nuclear**

Foi projetado e construído inicialmente um sistema de detecção de radiação alfa e beta, utilizando-se um plástico cintilador, com o objetivo de controlar a taxa de emissão das fontes padrões secundárias empregadas na calibração de monitores de contaminação de superfície. As características principais deste sistema foram determinadas para três arranjos eletrônicos distintos (envolvendo dois eletrômetros e um contador temporizador), aplicando-se os testes de repetibilidade, estabilidade a médio prazo, linearidade e dependência energética. Foram obtidos os fatores de calibração para radiação alfa ( $^{241}\text{Am}$ ) e beta ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ). O estudo foi realizado para dois cintiladores plásticos de espessuras distintas (1 e 3 mm), tendo-se verificado como o mais adequado o plástico mais fino. Apesar dos eletrômetros também terem apresentado viabilidade como sistemas de medida, optou-se pelo contador temporizador, por ser o mais prático. O desempenho de monitores de contaminação do tipo Geiger-Müller, contador proporcional e cintilador foi estudado, a seguir, em campos padrões de radiação alfa e beta, através dos mesmos testes supra-citados. Estudou-se ainda a variação da resposta dos monitores com a distância fonte-detector para diferentes fontes de radiação alfa e beta. A partir dos resultados obtidos foi desenvolvido um método para a calibração de monitores de contaminação.

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

**DEVELOPMENT OF A CALIBRATION SYSTEM FOR SURFACE RADIOACTIVE CONTAMINATION MONITORS**

**Simone Kodulovich Dias**

**June, 1991.**

**Thesis Supervisor: Dr. Linda V.E. Caldas  
Department: Nuclear Engineering**

[A system for alpha and beta radiation detection was initially designed and constructed, using a plastic scintillator, aiming at controlling the emission rate of the standard secondary sources used for the calibration of surface contamination monitors. Its main characteristics were determined for three different electronic systems (using two electrometers and a timer-counter), applying the tests of repeatability and medium term stability, linearity response and energy dependence. The calibration factors for alpha ( $^{241}\text{Am}$ ) and beta ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ) radiation were obtained. The study was performed using two plastic scintillators with different thickness (1 e 3 mm), and it was verified that the thinnest one was the most suitable.] Although the electrometers also showed viability for use as measuring systems, the timer-counter was chosen because it was the most practical system. [The performance of contamination monitors of the Geiger-Müller type, proportional counter and scintillator was studied in standard fields of alpha and beta radiation, in relation to the same already listed tests.] The response variation of the monitors was also determined in relation to the source-detector distance for different sources. From these results a method for the calibration of contamination monitors was developed.

## ÍNDICE

INTRODUÇÃO .....	01
<b>CAPÍTULO I - FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	
I-1 Considerações Gerais .....	04
I-2 Interações da Radiação com a Matéria .....	05
I-3 Contaminação Radioativa .....	10
I-4 Calibração de Instrumentos .....	13
I-5 Monitores de Contaminação Alfa e Beta .....	21
a) Detectores a Gás .....	21
a <sub>1</sub> ) Detector Geiger-Müller .....	22
a <sub>2</sub> ) Contador Proporcional .....	25
b) Detectores de Cintilação .....	29
<b>CAPÍTULO II - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE FONTES RADIOATIVAS ALFA E BETA</b>	
II-1 Introdução .....	36
II-2 Projeto e Montagem do Sistema de Controle .....	37
II-3 Materiais e Métodos .....	38
a) Sistemas de Medida .....	38
b) Sistemas de Fontes .....	41
c) Materiais Diversos .....	44
II-4 Resultados .....	44
a) Estabilidade a Curto e Médio Prazo .....	49
b) Linearidade .....	51
c) Dependência Energética .....	57
<b>CAPÍTULO III - DESEMPENHO DE MONITORES DE CONTAMINAÇÃO ALFA E BETA</b>	
III-1 Introdução .....	65
III-2 Materiais e Métodos .....	65
1) Detector Geiger-Müller .....	66
2) Contador Proporcional .....	69
3) Cintilador .....	69
III-3 Resultados e Discussões .....	70
a) Estabilidade a Curto e Médio Prazos .....	70
a <sub>1</sub> ) Detector Geiger-Müller .....	70
a <sub>2</sub> ) Contador Proporcional .....	72
a <sub>3</sub> ) Cintilador .....	72

b) Linearidade .....	75
b <sub>1</sub> ) Detector Geiger-Müller .....	75
b <sub>2</sub> ) Contador Proporcional .....	78
b <sub>3</sub> ) Cintilador .....	78
c) Variação da Resposta com a Distância .....	
Fonte-Detector .....	78
c <sub>1</sub> ) Detector Geiger-Müller .....	81
c <sub>2</sub> ) Contador Proporcional .....	91
c <sub>3</sub> ) Cintilador .....	93
d) Determinação dos Fatores de Calibração .....	93
e) Dependência Energética .....	109
e <sub>1</sub> ) Detector Geiger-Müller .....	109
e <sub>2</sub> ) Contador Proporcional .....	114
e <sub>3</sub> ) Cintilador .....	114
f) Determinação da Eficiência .....	116

#### CAPÍTULO IV - DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE CALIBRAÇÃO PARA MONITORES DE CONTAMINAÇÃO

IV-1 Controle das Fontes Radioativas .....	120
IV-2 Testes de Desempenho .....	121
a) Estabilidade a Curto e Médio Prazos .....	121
b) Linearidade .....	122
c) Variação da Resposta com a Distância .....	
Fonte-Detector .....	122
IV-3 Calibração Periódica .....	122
CONCLUSÕES .....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	127
ANEXO 1 : CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO .....	130

## INTRODUÇÃO

A presença de uma contaminação radioativa alfa e beta de superfície pode tornar possível o aparecimento de um risco radiológico, pois pode ocorrer inalação, ingestão ou absorção pela pele. Mesmo no caso de níveis de contaminação radioativa que não representam riscos à saúde, pode-se ter o aparecimento de interferências em trabalhos experimentais causando erros grandes nos resultados de contagens de níveis baixos.

Assim, deve ser realizada uma monitoração de rotina, utilizando-se instrumentos de detecção sensíveis, em qualquer área onde a possibilidade de contaminação exista.

Os detectores utilizados para monitoração de contaminação de superfície devem ser calibrados e seu desempenho deve ser verificado regularmente, de forma que suas leituras possam ser interpretadas corretamente. Para calibrar estes instrumentos de modo a se ter as medidas convertidas aos níveis de atividade (ou taxas de emissão) das fontes alfa e beta, pela aplicação de fatores de conversão corretos, é preciso considerar a energia da radiação que está sendo detectada, a geometria do conjunto fonte radioativa-detector, as características do detector e a auto-absorção da própria fonte [1]. As fontes radioativas utilizadas na calibração destes detectores devem ser padronizadas [2,3]. Devem ser utilizadas preferencialmente vários radionuclídeos emissores alfa, pois a sensibilidade dos instrumentos pode variar com a energia da radiação incidente. Esta variação depende da espessura da janela de

entrada e da profundidade do detector.

O alcance limitado das partículas alfa no ar leva à necessidade de que os instrumentos sejam calibrados e utilizados tão próximos quanto possível das fontes radioativas. Esse fato, por sua vez, faz com que a resposta dos instrumentos apresente uma grande dependência com as dimensões tanto das fontes como dos detectores [2].

Nos últimos anos, com o desenvolvimento da pesquisa em campos de radiação alfa e beta, bem como com a crescente utilização desses emissores na indústria, fez-se necessário estabelecer métodos de calibração dos monitores de contaminação.

O Laboratório de Calibração do IPEN realiza atualmente a calibração de instrumentos a nível de Proteção Radiológica com radiação gama ( $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$ ) e beta ( $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{147}\text{Pm}$ , a distâncias maiores que 10 cm), e a nível de Radioterapia com radiação-X (60 kV) no caso das câmaras de ionização do tipo superficial e com radiação gama ( $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$ ) para câmaras dedais.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de calibração de monitores de contaminação de superfície alfa e beta. Pelo fato das fontes alfa serem muito sensíveis ao manuseio, é necessária a utilização de um instrumento de transferência secundário. Para isso foi projetado e montado um sistema de controle das fontes alfa e beta, em relação à atividade delas, para ser utilizado antes da calibração propriamente dita dos monitores de contaminação. O desempenho desses monitores foi estudado a seguir através

de testes de sua estabilidade a curto e médio prazos, linearidade da resposta, variação com a distância entre fonte e detector, e dependência energética.

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### I-1 Considerações Gerais

As propriedades das partículas alfa foram investigadas por Rutherford e seus colaboradores principalmente no período de 1898 a 1914 [4]. Em 1899, Rutherford mostrou que o urânio emitia pelo menos dois tipos de radiações com valores diferentes do poder de penetração. A radiação menos penetrante, absorvida completamente por poucos centímetros de ar ou 0,04mm de alumínio, foi chamada de radiação alfa e a de maior penetração, barrada por 1mm de chumbo aproximadamente, foi chamada de radiação beta [5].

Através de experimentos de deflexão da radiação alfa do rádio e de seus produtos de decaimento em campos elétricos e magnéticos, Rutherford mostrou que a radiação alfa é de natureza corpuscular, carregada positivamente, com uma carga específica de  $(2,50 \times 10^{-4})(e/m_0)$ , onde  $e$  é a carga do elétron e  $m_0$  é a massa de repouso do elétron, e é emitida com uma velocidade inicial de 1/10 da velocidade da luz.

Em 1909, Rutherford e Royds [5] mostraram experimentalmente que as partículas alfa são núcleos de  ${}^4\text{He}$  projetados com alta velocidade pela desintegração dos átomos. Até 1930 pensou-se que as partículas alfa emitidas por um nuclídeo radioativo tinham todas a mesma velocidade e energia iniciais. Naquele ano, Rosenblum [6] mostrou através de experiências de deflexão magnética que alguns

nuclídeos emitiam na realidade grupos de partículas alfa de diferentes energias bem definidas. Após essa descoberta muitos emissores alfa naturais e artificiais foram estudados e seus espectros de energia ficaram conhecidos.

As propriedades da radiação beta foram estudadas por Becquerel, Pierre e Marie Curie e outros cientistas. Verificou-se, inicialmente, que as partículas beta apresentavam características semelhantes às dos raios catódicos, diferindo apenas na velocidade.

Os valores da razão carga/massa e da velocidade das partículas beta foram obtidos a partir de medidas dos desvios das partículas em campos elétricos e magnéticos.

Ao contrário das partículas alfa, as partículas beta não são monoenergéticas; são emitidas pelo núcleo atômico com energias variando de zero até uma energia cinética máxima. O espectro contínuo da radiação beta foi apresentado por Chadwick em 1914 [5] através de seus experimentos de deflexão magnética. Porém, apenas em 1934 através da teoria de Fermi, baseada na hipótese do neutrino, a desintegração beta pôde ser explicada.

## **I-2 Interações da Radiação com a Matéria**

A resposta característica de cada tipo de instrumento de detecção de radiação depende diretamente do tipo de interação da partícula carregada com os elementos sensíveis do detector.

Os mecanismos principais pelos quais a partícula carregada pode perder energia ao atravessar a matéria são: interações coulombianas com os elétrons e os núcleos, emissão de radiação eletromagnética (Bremsstrahlung), interações nucleares e emissão de radiação de Cerenkov.

Dentre os mecanismos citados, as interações coulombianas com os elétrons atômicos representam o principal processo de perda de energia da partícula eletricamente carregada. Como resultado dessas interações a partícula carregada perde energia continuamente até parar, após percorrer uma distância finita chamada alcance. O alcance depende do tipo de energia da partícula e do material através do qual a partícula se move. Devido à natureza estatística do processo de perda de energia, as partículas inicialmente monoenergéticas não irão percorrer a mesma distância, mas os pontos finais de suas trajetórias estarão distribuídos em torno de um valor médio. Para quantificar a definição de alcance, um arranjo experimental será discutido. Partículas alfa e beta serão tratadas separadamente.

#### **a) Partículas alfa**

Considere-se um feixe de partículas alfa monoenergéticas atingindo um certo material absorvedor de espessura variável. Do outro lado do absorvedor um detector registra as partículas alfa que o atravessam.

A partícula alfa, sendo uma partícula pesada, ao atravessar o absorvedor, não sofre desvio na sua trajetória, já que sua massa é muito maior que a dos

---

elétrons (dos absorvedores) com os quais interage.

Pode-se observar que o número de contagens permanece constante até um certo valor da espessura; após esse valor as contagens caem rapidamente a zero, como pode ser visto na Fig. 1-1. A espessura para qual o número de contagens  $N(t)$  cai pela metade do seu valor inicial é chamado de alcance médio  $R$ . A espessura para qual  $N(t)$  é praticamente zero é chamado alcance extrapolado, o qual é obtido extrapolando-se a porção linear final da curva de transmissão a zero. A diferença entre o alcance extrapolado e o médio é chamado parâmetro de dispersão do alcance.

Existem fórmulas semi-empíricas que apresentam o alcance como uma função da energia cinética da partícula. O alcance das partículas alfa no ar sob condições normais de temperatura e pressão pode ser dado por [9]:

$$R = \exp(1,61 \cdot E^{1/2}) \quad 1 \text{ MeV} < E < 4 \text{ MeV.}$$

$$R = (0,05 E + 2,85) E^{3/2} \quad 4 \text{ MeV} < E < 15 \text{ MeV.}$$

Nas equações acima  $R$  representa o alcance das partículas, em mm, e  $E$  a energia da partícula em MeV.

Se o alcance for conhecido para um dado material, ele pode ser determinado para qualquer outro material, aplicando-se a regra de Bragg-Kleeman [9]:

$$R_1 / R_2 = d_2 / d_1 \times (A_1 / A_2)^{1/2},$$

onde  $d_i$  e  $A_i$  são a densidade e o peso atômico do material.

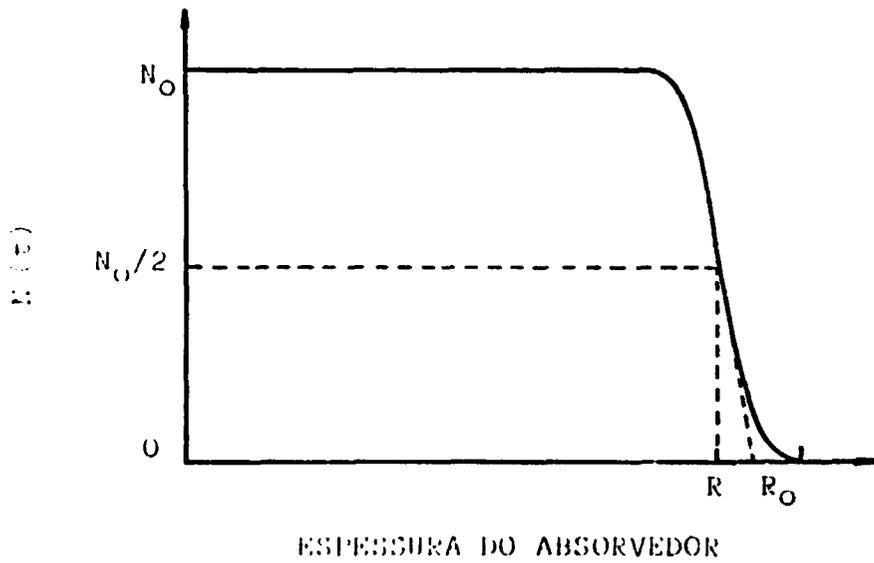


Fig. 1.1 : Número de partículas alfa transmitidas através de um material absorvedor.  
 $R$  : alcance médio;  $R_0$  : alcance extrapolado

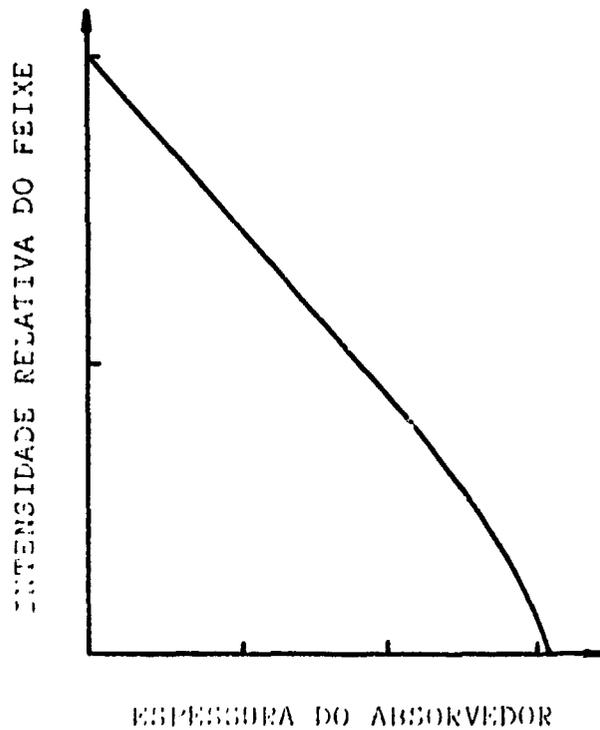


Fig. 1-2 : Curva de transmissão de partículas beta através de um material absorvedor.

## b) Partículas beta

Se a experiência de transmissão for repetida com um feixe de partículas beta, o resultado obtido pode ser visto na Fig. 1-2. Uma combinação de fatores, incluindo a distribuição contínua de energia dos elétrons, o grande número de colisões envolvidas e a mudança na direção durante cada colisão, produz o efeito da exponencial decrescente. Deve ser observado também que os elétrons, ao atingir o detector, podem ser retroespalhados, reduzindo assim a eficiência do contador.

Portanto, o número de partículas beta que atingem o detector decresce exponencialmente com a espessura do absorvedor. Numa boa aproximação, a absorção pode ser representada pela fórmula:

$$I = I_0 \times \exp(-\mu t),$$

onde  $I$  é o número de partículas beta transmitidas através da espessura  $t$ ,  $I_0$  é o número inicial de partículas beta e  $\mu$ , o coeficiente de absorção de massa.

O valor de  $\mu$  tem sido determinado exponencialmente como uma função da energia máxima ( $E_{\text{máx}}$ ), dado por :

$$\mu \text{ (cm}^2\text{/g)} = 22 (E_{\text{máx}})^{-1,33} \quad 0,5 \text{ MeV} < E_{\text{máx}} < 6 \text{ MeV. [10]}$$

$$\mu \text{ (cm}^2\text{/g)} = 17 (E_{\text{máx}})^{-1,14} \quad 0,1 \text{ MeV} < E_{\text{máx}} < 4 \text{ MeV. [11]}$$

Existem fórmulas para o alcance dos elétrons tomado aqui como a distância percorrida pela partícula de maior energia até parar, dada por [11]:

$$R = 412 E^n \quad 0,01 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV}$$

sendo  $n = 1,265 - 0,0954 \ln E$ , onde  $E$  representa a energia da partícula.

Para energias mais altas uma relação mais apropriada é dada por:

$$R = 530 E - 106 \quad 1 \text{ MeV} < E < 20 \text{ MeV} \quad [11]$$

Nas equações acima o alcance é dado em  $\text{mg.cm}^{-2}$  e  $E$ , em MeV.

### 1-3 Contaminação Radioativa

A contaminação radioativa é definida como a presença indesejável de materiais radioativos em qualquer meio ou superfície [1]. A contaminação pode ocorrer no estado sólido, em solução ou ser carregada por gás ou vapor.

Uma classificação da contaminação radioativa pode ser feita segundo a natureza do radioisótopo (partícula alfa ou beta) ou segundo a aderência da contaminação (fixa ou removível). A contaminação é fixa quando ela é presa à superfície de tal forma que não seja transferível sob condições normais de trabalho, e é removível quando ela é transferível sob condições normais de trabalho [12]:

Pode-se estimar a contaminação de superfície através de métodos diretos ou indiretos. Nos métodos diretos são utilizados monitores de contaminação de superfície, os quais

detectam contaminação de superfície fixa ou removível. A estimativa indireta é feita através de testes de esfregação onde somente a contaminação de superfície removível pode ser avaliada. Nesse trabalho só serão analisados os métodos diretos de detecção de contaminação alfa e beta.

A aplicabilidade de cada método, direto ou indireto, de acordo com seus objetivos, é fortemente dependente de circunstâncias particulares, isto é, forma física e química da contaminação, sua aderência e facilidade de acesso à superfície para medidas na presença de campos de radiação de interferência.

O objetivo das medidas de contaminação é primeiramente determinar a contaminação e sua extensão, controlando seu deslocamento de áreas de maior contaminação para as de menor contaminação ou áreas inativas e, em seguida, estimar a atividade por unidade de área, a fim de verificar se os limites estão sendo excedidos ( $3,7 \text{ Bq.cm}^{-2}$  para contaminação beta e  $0,37 \text{ Bq.cm}^{-2}$  para contaminação alfa) [13].

Essas monitorações de superfície devem ser feitas de forma rotineira em todas as áreas onde exista a possibilidade de ocorrer a contaminação.

Os instrumentos utilizados para detectar a contaminação devem ser capazes de medir níveis pelo menos 10 vezes mais baixos que o nível do limite de contaminação, com o qual os resultados das medidas de contaminação serão comparados. Normalmente eles possuem uma área

sensível de 20 a 200  $\text{cm}^2$  e são capazes de medir níveis de contaminação de superfície menores que  $0,04 \text{ Bq.cm}^{-2}$  para emissores alfa e  $0,4 \text{ Bq.cm}^{-2}$  para emissores beta em condições normais de radiação de fundo [12]:

A monitoração da radiação alfa apresenta problemas especiais por causa do curto alcance destas partículas no ar e sua completa atenuação por filmes finos líquidos ou sólidos. As partículas alfa de 5 MeV são atenuadas completamente em materiais com densidade superficial de  $5 \text{ mg.cm}^{-2}$ .

A resposta transiente de uma sonda passando sobre uma fonte é consideravelmente menor do que a resposta obtida com a sonda estacionária sobre a mesma fonte. Se o tempo de trânsito da sonda sobre a fonte for menor que a constante de tempo do monitor este pode não indicar a presença da radiação [1]

No caso da monitoração da radiação beta, a detecção de contaminação é mais fácil que da contaminação alfa devido ao seu maior poder de penetração e alcance. Deve-se observar porém que a resposta da sonda beta depende muito da energia da radiação beta. Como todos os radionuclídeos não emitem radiação beta de mesma energia, as sondas devem ser calibradas para cada radioisótopo.

A resposta da sonda também varia com a distância entre a mesma e a superfície contaminada, mas o efeito ainda é menor do que para velocidades de trânsito variáveis. Assim, para garantir a detecção de contaminação alfa ou beta por métodos diretos, a velocidade de trânsito da sonda sobre a superfície em questão deve ser menor que  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  a uma distância da superfície de 0,5 cm, no caso de radiação alfa e, entre 2,5 e 5,0 cm, no caso de radiação beta [1].

Os detectores de contaminação alfa normalmente usados são os cintiladores, os contadores proporcionais e os detectores semi-condutores. Os detectores Geiger-Müller de janela fina podem também ser usados, mas a sua eficiência é bem menor e a presença da radiação beta ou gama pode interferir nas medidas. Para a detecção da radiação beta podem ser usados monitores Geiger-Müller, cintiladores com janelas finas ( $2,0 \text{ mg.cm}^{-2}$ ) e contadores proporcionais.

#### **1-4 Calibração de Instrumentos**

Segundo as recomendações internacionais [1] e nacionais [14] de Proteção Radiológica, todo instrumento de monitoração de radiação deve ser calibrado em laboratórios regulamentados antes de ser colocado em uso ou após algum reparo e então ser recalibrado periodicamente, geralmente a cada 12 meses.

Devem ser feitos testes de rotina diários ou semanais da resposta do instrumento a uma certa fonte. Constituem os testes de funcionamento do instrumento e a sua aferição.

A calibração consiste basicamente na determinação quantitativa de um fator multiplicativo, que converte a leitura dada por um instrumento de medida de radiação ao seu valor verdadeiro, utilizando-se um padrão de referência.

Os principais objetivos de um sistema de calibração [2] são:

1. Garantir que um instrumento esteja funcionando adequadamente;
2. No caso de instrumentos sem ajuste para calibração, garantir que sejam revelados os erros nas suas medidas. Quando o instrumento apresentar a possibilidade de ajuste, este fato pode levar a um aperfeiçoamento na precisão total do instrumento;
3. Submeter o instrumento a testes, como resposta em função da energia e direção da radiação, efeitos ambientais, etc;
4. Fornecer informações aos usuários quanto às características mais importantes dos instrumentos;
5. Fornecer padrões de radiação para testes de novos detectores.

Existem basicamente duas técnicas gerais para a calibração de instrumentos utilizados em radiação X ou gama. A primeira consiste no uso de campos de radiação com propriedades bem conhecidas e portanto definidos a partir do conhecimento de certos parâmetros de uma fonte

padrão ou por medidas feitas com um padrão secundário. Na segunda técnica, utilizada quando a presença de uma grande radiação espalhada pode dificultar a especificação do campo, a calibração é feita por substituição. Um instrumento, idêntico ao instrumento a ser calibrado (instrumento-teste), é colocado no campo de radiação; em seguida, o instrumento teste substitui o primeiro. A calibração é feita pela comparação das duas leituras.

No caso de radiação alfa e beta, os padrões de referência são as próprias fontes.

Em relação à precisão da calibração do conjunto monitor-sonda os fabricantes podem fornecer apenas especificações sobre o funcionamento dos monitores mas da própria sonda isso não é possível, pois esse é função de muitas variáveis, tais como a energia da radiação incidente e a voltagem de operação aplicada ao detector. Outras variáveis que influenciam a precisão de uma medida particular inclui a distância do detector à fonte, a área da superfície contaminada e a auto-absorção da radiação no material da fonte. Esses fatores afetam a eficiência do detector, de forma que os erros de calibração são aceitáveis dentro da faixa de 30% [15].

As fontes utilizadas para a calibração dos monitores de contaminação devem ser homogêneas e não colimadas. Suas dimensões devem ser suficientes para cobrir a janela do detector. Quando fontes de tais dimensões não são disponíveis, devem ser feitas medidas sequenciais com fontes menores, distribuídas pela área ativa do detector.

Essas medidas devem cobrir toda área da janela ou pelo menos frações representativas desta.

A resposta do monitor deve ser determinada também para circunstâncias especiais, já que o instrumento apresentará um tipo de resposta para "manchas de contaminação" diferente da observada para uma fonte extensa [1]. Nesse caso são utilizadas fontes de pequenas áreas ativas, que podem reproduzir bem a geometria do detector em relação à "mancha".

As fontes de referência para a calibração de monitores de contaminação de superfície [3] podem ser de dois tipos:

**Classe 1:** Fonte de referência calibrada em termos da taxa de emissão de superfície, num laboratório padrão nacional.

**Classe 2:** Fonte de referência calibrada em um laboratório credenciado, em termos de taxa de emissão de superfície através de um instrumento de transferência, a eficiência do qual é medida pela calibração com uma fonte de referência classe 1 do mesmo radionuclídeo e da mesma forma geral, usando a mesma geometria.

Segundo a norma ISO 8769 [3], as fontes de referência de classe 1 e 2 devem ser preparadas com os seguintes radionuclídeos:  $^{241}\text{Am}$  (emissor alfa) e  $^{14}\text{C}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{204}\text{Tl}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  (emissores beta).

A atividade de uma fonte de referência classe 1, com dimensões adequadas, deve ser tal que forneça uma taxa de

emissão superficial de 2000 a 10000  $s^{-1}$ , para otimização entre erros de radiação de fundo, tempo morto e erros estatísticos. A atividade deve ter sido obtida pelo fabricante de forma controlada pelos padrões nacionais de medida com uma incerteza menor que 10%. A taxa de emissão superficial deve ser medida por um laboratório padrão nacional com incerteza menor de 3%. A uniformidade da fonte de referência de classe 1 em termos de taxa de emissão de superfície deve ser de aproximadamente 10% [3].

A atividade de uma fonte de referência classe 2, com dimensões adequadas, deve estar de acordo com as necessidades do usuário e dependerá do tipo de instrumento a ser calibrado. A atividade dessa fonte deve ter sido obtida por padrões nacionais de medida com incerteza menor que 10%. A taxa de emissão de superfície deve ser determinada através de um instrumento de transferência de referência com uma incerteza menor que 6%. A uniformidade da fonte de referência classe 2 em termos de taxa de emissão superficial deve ser menor que 10% [3].

Deve-se observar que enquanto a contaminação de superfície é tomada normalmente em termos de atividade por unidade de área, a taxa de contaminação medida por um instrumento é relacionada diretamente com a radiação emitida pela superfície e não com a atividade contida sobre ou dentro da superfície.

Para uma dada atividade por unidade de área, o número de partículas que emergem de uma superfície por unidade de tempo depende da quantidade de auto-absorção e retroespalhamento da fonte. Enquanto a auto-absorção irá

diminuir o número de partículas emergentes, o retroespalhamento irá aumentar. Devido a variações nas propriedades de absorção e espalhamento das superfícies, não é possível relacionar diretamente atividade e taxa de emissão.

Assim, há uma clara necessidade de se calibrar os detectores de contaminação de superfície em termos de eficiência do instrumento, isto é, com base na taxa de emissão de uma fonte, e de se especificar fontes de referência tanto em termos da atividade como da taxa de emissão [12].

O fator de calibração em termos da taxa de emissão é muito menos dependente da construção da fonte. A calibração de monitores de contaminação de superfície baseando-se na taxa de emissão, ao invés da atividade da fonte, permite a comparação dos instrumentos em relação à sensibilidade.

Uma fonte padrão de trabalho deve ser calibrada em termos da taxa de emissão usando-se um instrumento de transferência secundário. Tais fontes são utilizadas pelos usuários para aferir monitores empregados em medidas diárias de contaminação de superfície.

As fontes de trabalho requerem cuidados específicos, que devem ser de responsabilidade do usuário [3]. Os seguintes pontos devem ser considerados:

- 1) Estas fontes devem ser fornecidas na quantidade e variedade de tamanho de acordo com a necessidade

do usuário, em relação à aferição de rotina desses monitores de contaminação;

- 2) As fontes devem ser marcadas com a taxa de emissão na data de referência, o radionuclídeo e o número de série; devem também estar acompanhadas por uma declaração detalhando a geometria para a qual elas foram calibradas, que é a mesma em que devem ser usadas;
- 3) As fontes devem ser suficientemente robustas para suportar seu manuseio diário;
- 4) As fontes devem completar tanto quanto possível os requisitos especificados para as fontes de referência.

A taxa de emissão superficial de uma fonte de trabalho deve estar de acordo com a necessidade do usuário. A atividade de uma fonte de trabalho deve ser estabelecida pelo fabricante e rastreada por padrões nacionais de medida; a taxa de emissão superficial deve ter sido medida por um instrumento de transferência de referência calibrado por uma fonte de referência do tipo classe 1 ou classe 2 de mesma forma. A taxa de emissão superficial das fontes de trabalho deverá ser conhecida com uma incerteza especificada pelos regulamentos apropriados do instrumento de calibração. A uniformidade da fonte de trabalho deve ser preferencialmente a mesma especificada para uma fonte de referência do tipo classe 2.

Um instrumento de transferência de referência deve ter uma eficiência maior que 0,5 dentro de um intervalo de energia considerado para a norma ISO 8769 [3]. Este deve ser de tamanho tal que a variação na resposta sobre uma área de medida de 100 x 150 mm possa ser ignorada. O

tipo de instrumento de referência recomendada é um detector proporcional (fluxo contínuo de gás) de grande área, com uma janela condutora com densidade superficial de  $1 \text{ mg.cm}^{-2}$ . Um instrumento de transferência de referência deve ser calibrado antes de sua primeira utilização e após intervalos regulares, de acordo com os requisitos regulamentares, códigos de prática ou outras recomendações [3]. Esse tipo de instrumento existe no Laboratório de Metrologia Nuclear do Departamento de Proteção Radiológica do IPEN. São sistemas de medida absoluta de atividade utilizados na padronização de radionuclídeos.

Assim, o processo de calibração de um monitor utilizado para medir contaminações radioativas [16] envolve os seguintes estágios (ou alguns deles): fontes padrões nacionais, um instrumento de transferência de referência, fontes padrões secundárias, um instrumento de transferência secundário e fontes padrões de trabalho.

Um instrumento de transferência secundário, mais simples e prático, foi desenvolvido nesse trabalho para um controle de rotina da atividade das fontes padrões (Cap. II).

## I-5 Monitores de Contaminação Alfa e Beta

### a) Detectores a Gás

O funcionamento dos detectores a gás baseia-se no princípio da ionização do gás pela radiação incidente.

Em geral, tem-se um cilindro cheio de gás, ou uma mistura de gases, a uma pressão relativamente baixa, com um eletrodo central bem isolado das paredes do cilindro. Aplica-se uma diferença de potencial entre a parede do cilindro e o fio coaxial (Fig. 1-3). Quando a radiação ionizante passa através do gás, ocorre a ionização dos seus átomos; os pares de íons são coletados, dando origem a uma corrente elétrica, correspondente à intensidade da radiação incidente.

Dos detectores a gás, os mais utilizados para a detecção de contaminação de radiação alfa e beta são os detectores Geiger-Müller e os contadores proporcionais.

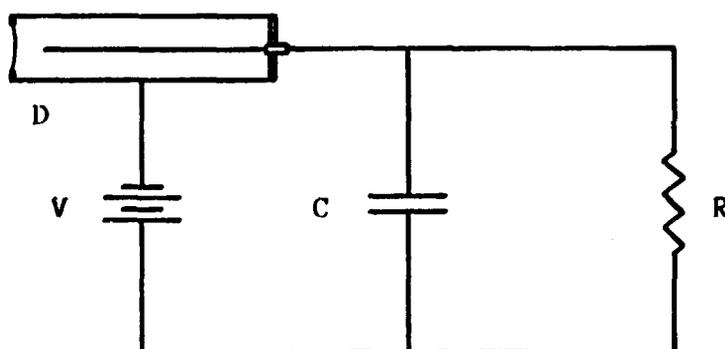


Fig. 1-3 : Esquema de um detector a gás.

D : Detector

V : Fonte de tensão

C : Capacitor

R : Resistor

## **a<sub>1</sub>) Detector Geiger-Müller**

O contador Geiger-Müller (GM) é um dos tipos mais antigos de detector de radiação existente; foi introduzido por Geiger e Müller em 1928. Devido à sua simplicidade, baixo custo e facilidade de operação, ele ainda é muito utilizado [17]. Esse detector pode ser empregado com qualquer tipo de radiação ionizante mas com diferentes níveis de eficiência. Para as partículas alfa e beta a eficiência é aproximadamente de 90% e para a radiação gama, a eficiência é aproximadamente de 1%, sendo a resposta dependente da energia da radiação em todos os casos.

Dado que os tamanhos dos pulsos no tubo GM são independentes da ionização primária, não se pode medir a energia da partícula nem é possível discriminar tipos diferentes de radiações através da sensibilidade da resposta.

### **Princípio de Funcionamento**

A radiação ionizante, ao atravessar o contador, forma um certo número de pares de íons. Devido ao forte campo elétrico em torno do filamento central, os elétrons são acelerados e no seu percurso produzem além de novas avalanches de elétrons, uma considerável excitação dos átomos e das moléculas do gás. No processo de decaimento desses átomos são gerados fótons que, por sua vez, podem arrancar elétrons do catodo por efeito fotoelétrico. Assim, a avalanche localizada originalmente próxima ao filamento central propaga-se rapidamente pelo volume do

detector (Fig. I-4).

Durante todo o processo, os íons negativos formados caminham para o anodo, enquanto que os íons positivos com mobilidade menor vão formando uma blindagem eletrostática entre os eletrodos, diminuindo o campo elétrico e conseqüentemente cessando a descarga.

Os íons positivos, ao atingirem o catodo, podem arrancar elétrons secundários de sua superfície, os quais começam nova avalanche, independente da radiação incidente. Para evitar isso, pode-se usar um circuito eletrônico que extingue a avalanche ou usar um gás poliatômico.

### **Curva Característica do Detector Geiger-Müller**

O patamar característico de um tubo GM pode ser visto na Fig. I-5. A região aproximadamente horizontal da curva é o patamar de operação; para uma dada voltagem, todos os pulsos produzidos são de mesma amplitude. Essa região se estende do "joelho" do patamar até o limite superior, a partir do qual uma descarga contínua é desencadeada.

O patamar apresenta uma pequena inclinação porque o volume sensível do detector aumenta um pouco quando a tensão é aumentada. Além disso, a probabilidade de haver pulsos espúrios, por falta do sistema de auto-extinção, aumenta.

Um bom detector apresenta um patamar com extensão superior a 100V e uma inclinação pequena, da ordem de, no

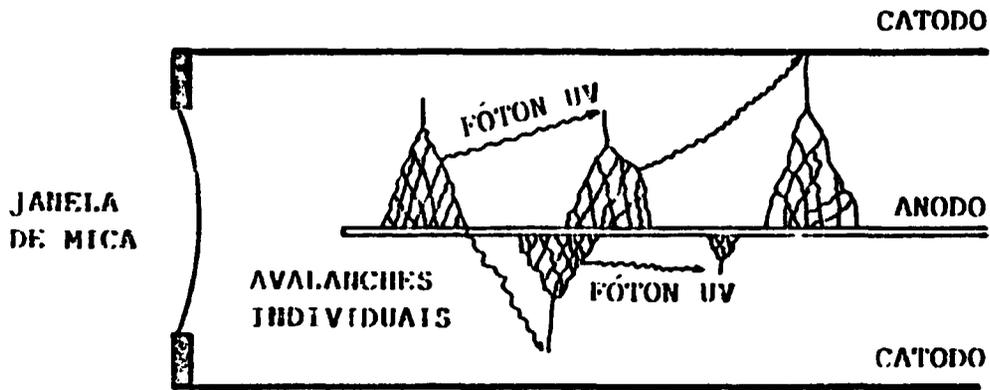


Fig. 1-4 : Esquema de uma descarga em um detector Geiger-Müller.



Fig. 1-5 : Curva característica de um detector Geiger-Müller.

máximo, 3% por 100 V.

### **Forma de Pulso e Tempo Morto do Detector GM**

O sinal de um detector GM resulta da soma das contribuições de todas as avalanches de íons produzidos através do volume do contador. A forma e a altura dos pulsos do detector não são importantes, pois apenas indicam a presença da partícula e não suas características.

Durante a formação do pulso, o campo elétrico no contador é muito reduzido, devido à presença de íons produzidos em torno do anodo. Se a partícula incidir no contador nesse período, nenhum pulso será formado, pois o contador estará insensível. Essa insensibilidade dura um certo período, chamado "tempo morto" do contador. Os valores típicos de tempo morto estão entre 100 a 300  $\mu$ s.

### **3.2) Contador Proporcional**

O contador proporcional constitui um tipo de detector a gás introduzido em 1940 [17]. Em relação ao detector Geiger-Müller, esse instrumento apresenta algumas vantagens. Entre elas podemos citar a possibilidade de medir contagens de fontes de altas atividades, com correções desprezíveis de tempo morto, e ainda discriminar tipos diferentes de radiações.

Geralmente esse instrumento é usado na medida da radiação alfa, beta e de campos neutrônicos, podendo ser utilizado em campos de radiação cujos níveis estão na ordem da radiação de fundo ou mesmo em altas taxas de

contagem. Mas uma das aplicações mais importantes do contador proporcional é na espectroscopia de raios-X de baixas energias, baseada na absorção total dos fotoelétrons formados pelas interações dos fótons dentro do gás.

Esse detector, porém, possui limitações implícitas em seu projeto, uma vez que a medida é dependente da tensão aplicada aos eletrodos e ainda sofre influências causadas pelas condições atmosféricas como umidade e temperatura .

### **Princípio de Funcionamento**

O funcionamento do contador proporcional está baseado no fenômeno da multiplicação dos pares de íons originais criados dentro do gás. Na região de operação desse instrumento, conhecida como região de proporcionalidade, a multiplicação da ionização primária ocorre por um fator constante. Assim, o sinal de saída é proporcional à energia depositada no contador. Geralmente, os contadores proporcionais possuem uma geometria cilíndrica que possibilita a obtenção de um campo elétrico alto, necessário para a multiplicação dos pares de íons, sem a necessidade de uma voltagem muito alta. Eles podem ser do tipo pulso, onde o gás permanece dentro da câmara, ou do tipo fluxo, onde o gás circula pelo volume da câmara.

Os gases utilizados nesse contador dependem da radiação a ser detectada. Os gases nobres, em particular o argônio, são normalmente empregados. Uma pequena porcentagem de gases orgânicos são adicionados para reduzir o efeito dos processos secundários. As misturas mais empregadas nesses detectores são: 90% de argônio e

10% de metano ou 4% de isobutano e 95% de hélio. A pressão do gás no contador proporcional do tipo pulso é menor que 1 atm e igual à pressão ambiente no tipo fluxo.

### **Curva Característica do Contador Proporcional**

Como no detector GM, o contador proporcional apresenta um patamar na sua curva característica onde a região de operação é delimitada (Fig. 1-6). A diferença fundamental, porém, é que no contador proporcional são obtidos patamares separados quando tipos diferentes de partículas são detectadas. A existência desses patamares é uma consequência da diferenciação da ionização produzida pelas partículas.

Estudos realizados [18] mostram que a inclinação positiva encontrada nas curvas características dos contadores proporcionais demonstram um aumento da eficiência desses detectores.

### **Forma de Pulso**

A forma de pulso do contador proporcional é similar à do pulso do detector Geiger-Müller. A maioria da carga induzida é decorrente do movimento inicial dos íons positivos. O uso de circuitos com constante de tempo pequena, comparada com o tempo de coleta dos íons, produz pulsos pequenos, sendo a altura desses pulsos proporcional à ionização primária.

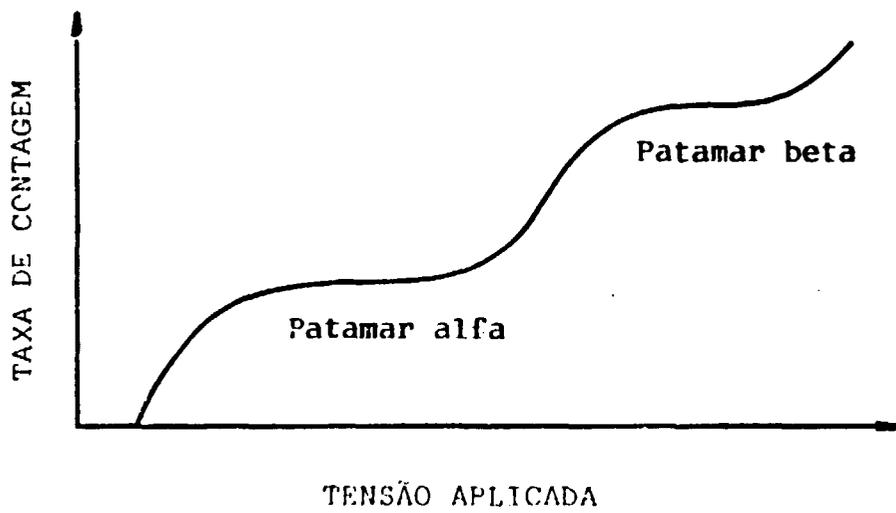


Fig. I-6 : Curva característica de um Contador Proporcional.

## **b) Detectores de Cintilação**

A detecção da radiação ionizante pela produção de cintilações em certos materiais é uma das técnicas existentes mais antigas. Em 1910, Rutherford e seus colaboradores [18] utilizaram esse método nos experimentos de espalhamento alfa. Embora os princípios básicos permaneçam os mesmos, as técnicas utilizadas mudaram muito com o desenvolvimento da eletrônica. Em 1944, Curram e Baker [19] idealizaram um esquema de contagem das medidas através de um tubo fotomultiplicador, onde a corrente era amplificada por emissão secundária.

Os cintiladores possuem muitas vantagens em relação aos detectores a gás; eles indicam não somente a presença da partícula como registram sua energia com alta eficiência e pequeno tempo morto.

Geralmente, esses instrumentos são utilizados nas medidas de campos de radiação cujos níveis são da ordem da radiação de fundo, uma vez que são detectores bastante sensíveis. Também são muito empregados na espectroscopia gama.

### **Princípio de Funcionamento**

Os detectores de cintilação baseiam-se na propriedade de fluorescência. A fluorescência ou cintilação é o fenômeno que pode ser observado em certas substâncias que emitem luz quando expostos a um feixe de radiação ionizante.

O princípio de funcionamento (Fig. 1-7) desse detector

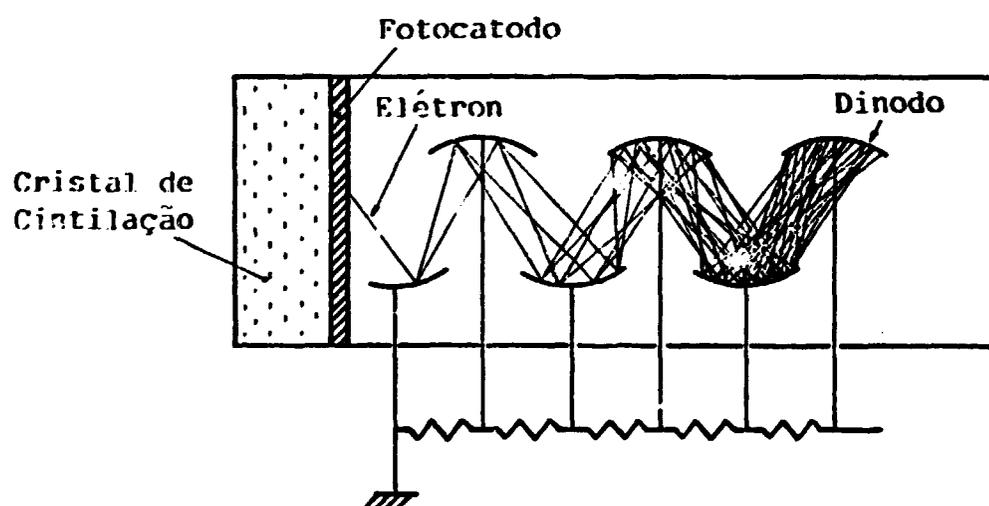


Fig. I-7 : Esquema do funcionamento de um Detector de Cintilação.

pode ser resumido nos seguintes estágios consecutivos: a absorção da radiação no cintilador resulta em ionização e excitação, ocorrendo a conversão da energia dissipada no cintilador em energia luminosa através do processo de luminescência. Os fótons de luz são atraídos para o fotocatodo da fotomultiplicadora sendo lá absorvidos, com emissão de fotoelétrons. Ocorre a seguir o processo de multiplicação dos elétrons dentro do tubo fotomultiplicador e finalmente o pulso de corrente fornecido pelo tubo é analisado através do equipamento eletrônico.

Os cintiladores podem ser classificados em: orgânicos, inorgânicos e gasosos. A escolha de cada detector depende do tipo de radiação, do intervalo de energia e das características próprias da sua resposta física. Os cintiladores sólidos, como os cristais (orgânicos e inorgânicos) e os plásticos são os mais utilizados nas medidas das radiações ionizantes.

A eficiência da conversão da energia da partícula em energia luminosa é uma função do tipo da radiação incidente e de sua energia. A forma pela qual essa variação ocorre depende do tipo de cintilador empregado.

Os cintiladores orgânicos podem ser classificados segundo seu estado de agregação, como os cristais, as soluções líquidas e os plásticos. Suas propriedades fluorescentes são essencialmente definidas pela estrutura molecular da substância cintiladora e conseqüentemente são independentes do seu estado de agregação. As substâncias cintiladoras orgânicas contêm principalmente átomos leves e têm pequena densidade. Portanto, em relação aos

cintiladores inorgânicos, são menos eficientes para a detecção da radiação gama.

Entre os cristais orgânicos mais utilizados estão o antraceno e estilbeno. Os cristais antracenos possuem uma densidade de  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$  e a maior eficiência de conversão de energia entre os cristais orgânicos.

Os cintiladores orgânicos líquidos consistem de uma mistura de um solvente com um ou mais solutos. São muito utilizados em medidas onde um detector de grande volume é necessário para aumentar a eficiência, como por exemplo nas contagens de emissores beta de baixa energia e na detecção de raios cósmicos.

Os cintiladores plásticos são soluções sólidas obtidas pela adição de compostos orgânicos fluorescentes em matrizes poliméricas. São comumente utilizados em medidas com radiações ionizantes. Entre as vantagens oferecidas por esse tipo de cintilador estão: rápida resposta luminosa (2ns), boa estabilidade térmica, resistência mecânica, grande estabilidade à radiação, não são higroscópicos e podem ser obtidos em diversos tamanhos e formatos com pequeno custo de fabricação.

A maioria dos cintiladores inorgânicos são cristais de metais alcalinos, em particular os iodetos, que possuem uma pequena concentração de impurezas. Essas impurezas ou ativadores são responsáveis pela luminescência do cristal. Os mais utilizados são: NaI (Tl), CsI (Tl), LiI (Eu) e  $\text{CaF}_2$  (Eu). Devido ao alto número atômico, os cintiladores NaI (Tl) e CsI (Tl) apresentam grande eficiência para a radiação gama,

enquanto que o cintilador  $\text{CaF}_2$  (Eu), com baixo número atômico, apresenta maior eficiência para partículas beta e raios-X de baixas energias. O cintilador  $\text{LiI}$  (Eu) é um detector eficiente para nêutrons térmicos.

### **Tempo Morto de um Contador de Cintilação**

O tempo morto ou tempo de resolução de um contador de cintilação é igual à soma de três intervalos de tempo [18]. São eles:

1. Tempo observado para a produção da cintilação, igual ao tempo de decaimento do cintilador;
2. Tempo necessário para a multiplicação dos elétrons na fotomultiplicadora, da ordem de 20 a 40 ns;
3. Tempo necessário para ampliar o sinal e ser registrado pelo contador.

O tempo de recuperação dos contadores comerciais é da ordem de  $1\mu\text{s}$ . O tempo para amplificação e discriminação é desprezível. Assim o tempo morto resultante é da ordem de 1 a  $5\mu\text{s}$ . Esse tempo é muito menor que o tempo morto dos detectores a gás, que é da ordem de 10 a  $100\mu\text{s}$ .

### **Forma de Pulso**

A forma de pulso do cintilador é dada basicamente pelo tempo de decaimento do cintilador e a constante de tempo RC do circuito do anodo, onde R é a resistência e C a capacitância do circuito. Quando o objetivo é obter uma boa resolução da altura de pulso, a constante de tempo deve ser

maior que o tempo de decaimento do cintilador. Assim, cada pulso de elétron é integrado pelo circuito do anodo para produzir um pulso de tensão cuja amplitude é igual a  $Q/C$ , razão entre a carga coletada e a capacitância do circuito do anodo. Mas no caso em que se têm taxas de contagem altas, a constante de tempo do circuito do anodo deve ser bem menor que o tempo de decaimento do cintilador. Assim, um pulso muito mais rápido é obtido, porém com menor resolução e amplitude.

Uma característica importante dos cintiladores consiste em se poder diferenciar partículas distintas através de uma análise da altura dos pulsos produzidos nesse detector, dado que a altura de pulso varia com a natureza da partícula incidente (Fig. 1-8). Essa propriedade dos cintiladores é que possibilita seu emprego no campo da espectroscopia .

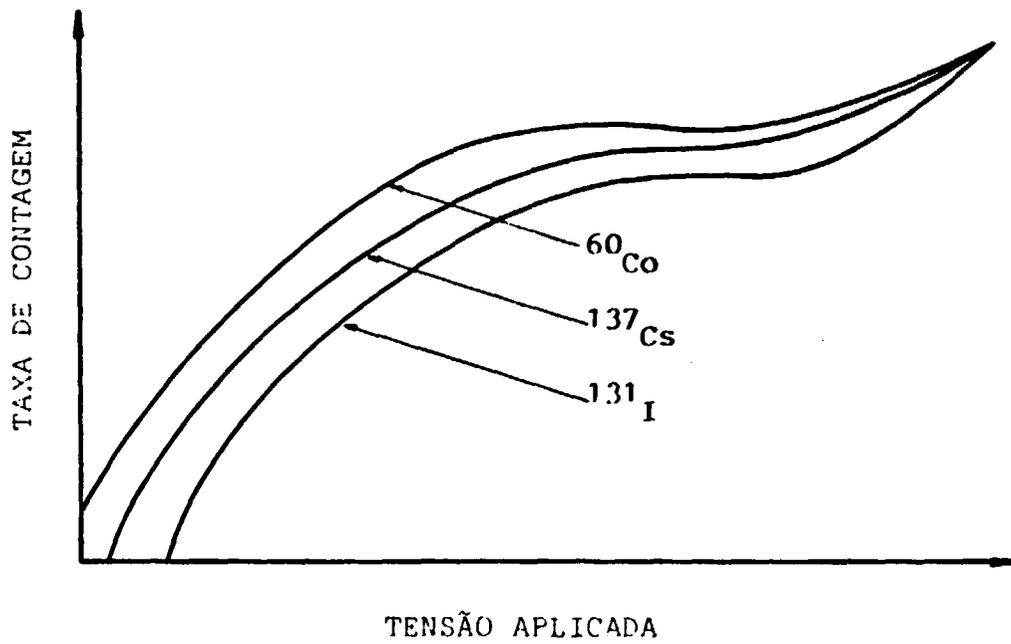


Fig. 1-8 : Curvas características de um sistema cintilador para diferentes radionuclídeos.

## CAPÍTULO II

### DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE FONTES RADIOATIVAS ALFA E BETA

#### II-1 Introdução

A calibração dos monitores de contaminação, realizada pelos laboratórios credenciados, é feita com fontes padronizadas. Essas fontes devem seguir rigorosamente as características definidas pelas normas internacionais [3].

As fontes devem apresentar um pequeno fator de retroespalhamento e de auto-absorção. No caso da radiação alfa, devido ao seu pequeno alcance, as fontes devem ser tão finas quanto possível e não seladas, isto é, não devem ser cobertas com nenhum tipo de material protetor. A absorção das partículas alfa pela fonte é fundamentalmente uma função da espessura e do material da fonte [22]. Sendo então as fontes alfa não seladas, são fisicamente mais sensíveis e, portanto, requerem maior cuidado no seu manuseio.

Foi desenvolvido, assim, um sistema de controle de fontes radioativas, com o objetivo de aferir as fontes regularmente e constatar qualquer alteração em suas taxas de emissão.

## **II-2 Projeto e Montagem do Sistema de Controle**

O sistema de detecção é constituído basicamente de um cintilador plástico, um guia de luz, uma fotomultiplicadora e um divisor de tensão.

O cintilador plástico, confeccionado pelo Laboratório de Desenvolvimento de Detectores Plásticos do IPEN, foi produzido à base de polímero de estireno purificado, adicionado dos cintiladores PPO (1,4 difenil - oxazol) e POPOP (1,4 di - 2 (5 - fenil - oxazol)) - benzeno por Hamada e Mesquita [21].

Com o objetivo de se evitar perdas de luz, uma das faces do cintilador foi coberta por uma camada fina de alumínio de  $30 \mu\text{g.cm}^{-2}$  de densidade superficial. Esse material reflete, através do cristal, a luz que eventualmente seria dissipada. Entre o cintilador plástico e o fotocatodo foi colocado um guia de luz de lucite, o qual possibilitou um melhor acoplamento óptico.

O fotocatodo deve ser protegido de uma exposição excessiva de luz. Portanto a fotomultiplicadora foi coberta por uma capa de alumínio posicionada de forma fixa numa caixa de cloreto polivinílico (PVC) revestida de feltro, do tipo "gaveta". O cintilador, o guia de luz e a fotomultiplicadora encaixam-se adequadamente na parte superior da caixa de PVC. A fonte radioativa, ao ser posicionada na gaveta, irradia o cristal frontalmente.

Inicialmente, utilizou-se como sistema detector um cintilador plástico aluminizado com 3 mm de espessura e 3

polegadas de diâmetro, denominado plástico 1.

Durante os testes preliminares verificou-se que o sistema detector apresentava uma taxa de contagem maior que a esperada para radiação de fundo. Nos testes subsequentes com uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  observou-se que esse cintilador apresentava alta sensibilidade para radiação gama, o que dificultava as medidas com radiação alfa.

Assim, com o objetivo de diminuir a taxa de contagem devido à radiação de fundo e aumentar a eficiência do sistema detector para a radiação alfa, utilizou-se um novo cintilador plástico aluminizado com as mesmas características químicas, porém com espessura menor (1mm), denominado plástico 2. O esquema de detecção está representado na Fig. II-1. Na Foto II-1 pode-se observar o sistema de detecção e as fontes alfa e beta posicionadas nos suportes especiais de PVC (descritos no item II-3c).

Os plásticos 1 e 2 foram estudados neste capítulo com a finalidade de comparação de seus desempenhos.

## **II-3 Materiais e Métodos**

### **a) Sistemas de Medida**

O sistema de controle de fontes radioativas foi testado com os seguintes instrumentos de medida:

1. Um eletrômetro Keithley Instruments, Inc., modelo 616, EUA, com bloqueio de display, associado por meio de

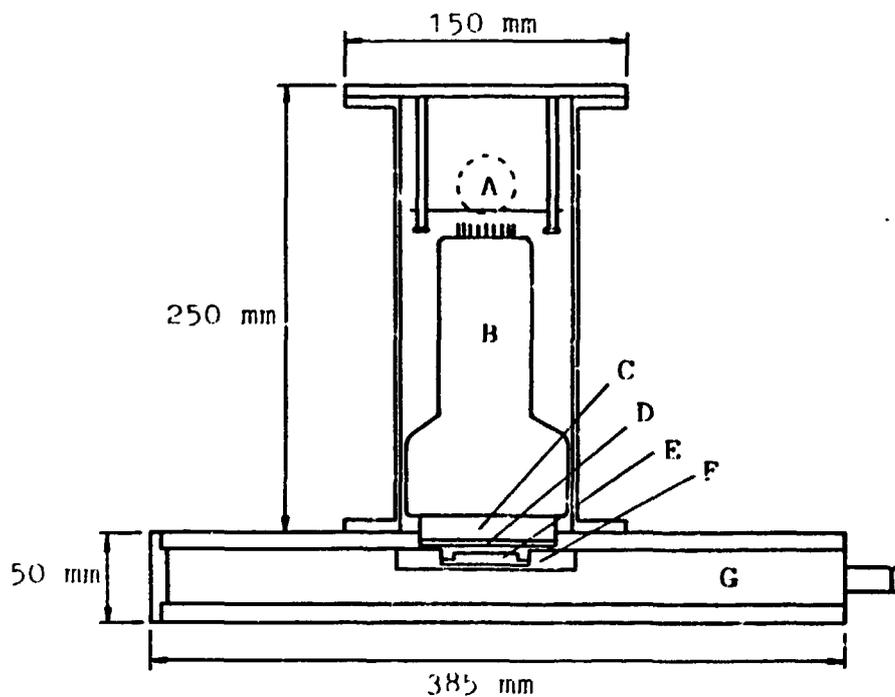


Fig. II-1 : Esquema do sistema de detecção de radiação alfa e beta.

A : Divisor de tensão

B : Válvula fotomultiplicadora EMI

C : Guia de luz (Lucite: diâmetro de 3 pol. e espessura de 12 mm)

D : Detector plástico cintilador (diâmetro de 3 pol e espessura de 1 mm)

E : Fonte radioativa

F : Suporte de fonte (PVC)

G : Gaveta

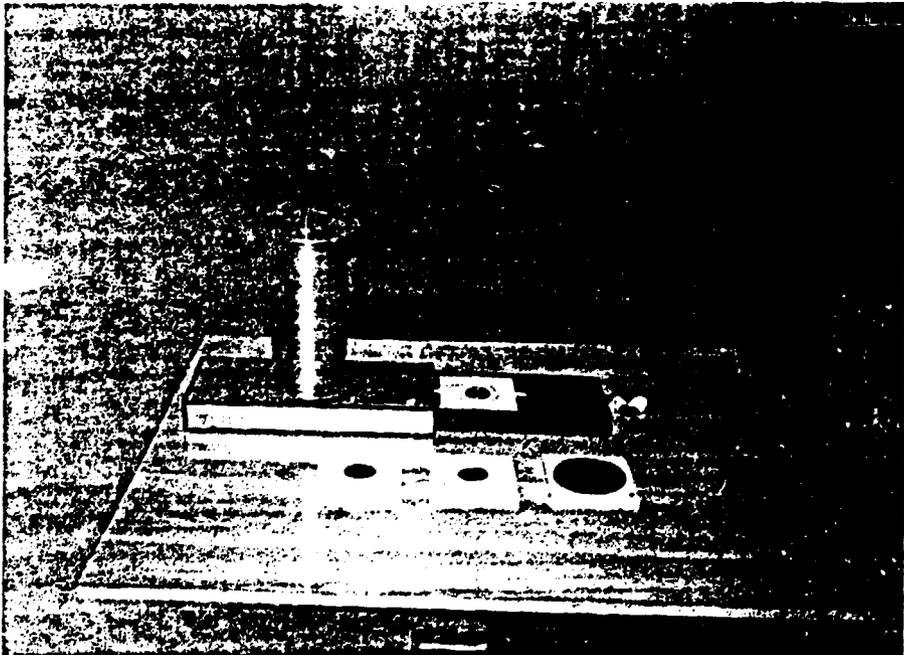


Foto 11-1 : Sistema de controle de fontes radioativas alfa e beta. As fontes estão posicionadas nos suportes de PVC.

uma interface a uma impressora Dismac, modelo 122 MPV, Brasil. Os valores foram registrados pela impressora, tanto na forma de carga como corrente;

2. Um eletrômetro Keithley Instruments, Inc., modelo 610C, EUA, que acoplado a um multímetro Triel, modelo MTR 4410, Brasil, permitiu a tomada das medidas em carga de forma digital;
3. Um contador temporizador duplo IPEN, modelo PM 515, com um amplificador IPEN, modelo PM 321, um analisador monocanal IPEN, modelo PM 431, e uma fonte de alimentação IPEN, modelo PI 122, Brasil. Os resultados foram obtidos em número de contagens por minuto. Nesse caso, o divisor de tensão teve que ser trocado para permitir as medidas de pulsos.

Os conjuntos de medida descritos foram respectivamente denominados 1, 2, 3 quando acoplados com o sistema detector. As Fotos II-2, II-3, II-4 apresentam os sistemas 1, 2 e 3 respectivamente.

#### **b) Sistemas de Fontes**

O sistema padrão no caso da radiação alfa é constituído por fontes calibradas de  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{233}\text{U}$  e  $^{241}\text{Am}$ , com certificado de calibração do Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants (LMRI) e de fontes de  $^{241}\text{Am}$  confeccionadas e calibradas pelo Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN. Estas fontes são denominadas, conforme descrito no item I-4, fontes padrões secundárias segundo a norma

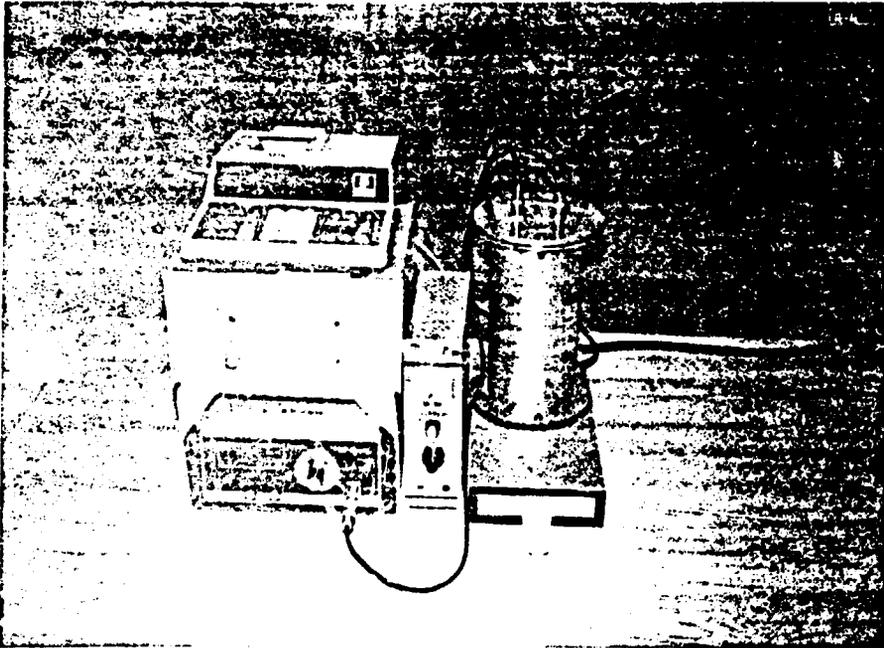


Foto 11-2 : Sistema de controle nº1. Detector de cintilação acoplado ao eletrômetro Keithley, modelo 616.

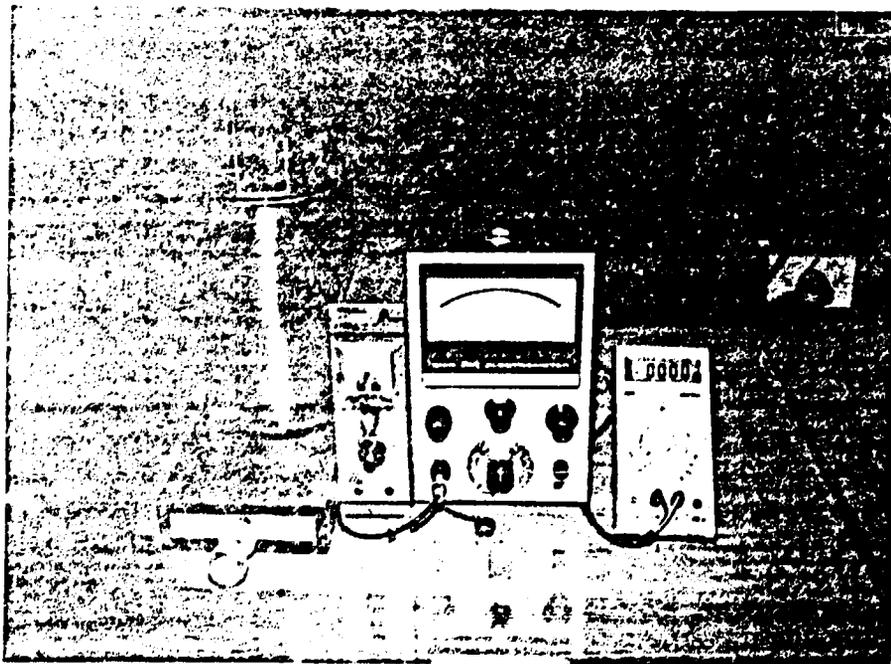


Foto 11-3 : Sistema de controle nº2. Detector de cintilação acoplado ao eletrômetro Feithley, modelo 610C.

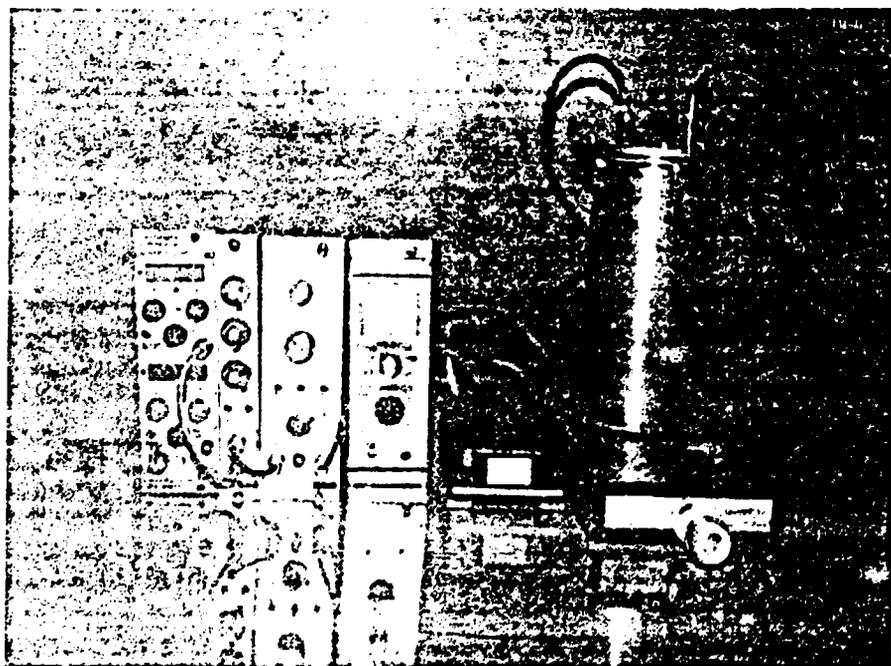


Foto 11-4 : Sistema de controle nº 3. Detector de cintilação acoplado ao contador temporizador.

ISO 8769 [3].

No caso da radiação beta, o sistema padrão secundário é constituído por fontes calibradas LMRI de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{36}\text{Cl}$ .

As características dos sistemas padrões alfa e beta estão apresentadas nas Tabelas II-1, II-2 e II-3.

### **c) Materiais Diversos**

Foram construídos suportes de PVC para as fontes alfa e beta com 122 x 122 mm de área e 10 mm de espessura. Esses suportes possibilitam manter a fonte numa posição fixa, centrada e reproduzível em relação ao sistema de detecção (Foto II-1).

Devido às diferenças de dimensões das fontes, os suportes foram construídos com rebaiços diferentes. Para as fontes alfa LMRI, o diâmetro do rebaixo é de 50,2 mm, e para as fontes alfa LMN, é de 40,5 mm. Para as fontes beta, este diâmetro é de 101,0 mm. O rebaixo do suporte destas fontes é de 8 mm, 1 mm e 4 mm respectivamente. O esquema desses suportes pode ser visto na Fig. II-2.

## **II-4 Resultados**

Inicialmente foi realizado um teste para se verificar a influência do tempo de aquecimento da fotomultiplicadora nas medidas experimentais. Esse teste consistiu na tomada de 8 séries de 10 medidas com intervalos de 1 hora. Verificou-se que após uma hora de estabilização do equipamento o desvio

TABELA II-1

CARACTERÍSTICAS DOS RADIONUCLÍDEOS EMISSORES ALFA  
Fontes Padrões Secundárias confeccionadas e calibradas no  
Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants  
(LMRI)

Radionuclídeo	Taxa de Emissão (s <sup>-1</sup> )	Energia (MeV)	Meia-Vida (anos)
<sup>233</sup> U	171,8	4,783 4,824	(1,592 ± 0,002).10 <sup>5</sup>
<sup>237</sup> Pu	165,3	5,105 5,143 5,156	(2,411 ± 0,003).10 <sup>4</sup>
<sup>237</sup> Pu	2110	5,105 5,143 5,156	(2,411 ± 0,003).10 <sup>4</sup>
<sup>238</sup> Pu	183,5	5,456 5,499	(87,74 ± 0,09)
<sup>238</sup> Pu	1140	5,456 5,499	(87,74 ± 0,09)
<sup>241</sup> Am	153,8	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)
<sup>241</sup> Am	167,2	5,442 5,406	(432,7 ± 0,5)
<sup>241</sup> Am	1773	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)
<sup>244</sup> Cm	142,1	5,666 5,763 5,805	(18,11 ± 0,02)
<sup>244</sup> Cm	1700	5,666 5,763 5,805	(18,11 ± 0,02)

TABELA II-2

CARACTERÍSTICAS DOS RADIONUCLÍDEOS EMISSORES ALFA  
Fontes Padrões Secundárias confeccionadas e calibradas no  
Laboratório de Metrologia Nuclear do IPEN  
(LMN)

Radionuclídeo	Taxa de Emissão (s <sup>-1</sup> )	Energia (MeV)	Meia-Vida (anos)
<sup>241</sup> Am	3,5	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)
<sup>241</sup> Am	160,0	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)
<sup>241</sup> Am	496,5	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)
<sup>241</sup> Am	2305,9	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)
<sup>241</sup> Am	11100,0	5,442 5,486	(432,7 ± 0,5)

TABELA II-3

CARACTERÍSTICAS DOS RADIONUCLÍDEOS EMISSORES BETA  
Fontes Padrões Secundárias confeccionadas e calibradas no  
Laboratoire des Rayonnements Ionisants  
(LMRI)

Radionuclídeo	Taxa de Emissão ( $s^{-1}$ )	Energia (keV)	Meia-Vida (anos)
$^{14}C$	2946	156,6	(5730 $\pm$ 40)
$^{137}Cs$	3465	511,5	(30,15 $\pm$ 0,06)
$^{90}Cl$	3092	709,5	(3,01 $\pm$ 0,03) $\cdot 10^3$
$^{90}Sr + ^{90}Y$	2930	546,0 2274,0	(28,15 $\pm$ 0,10)

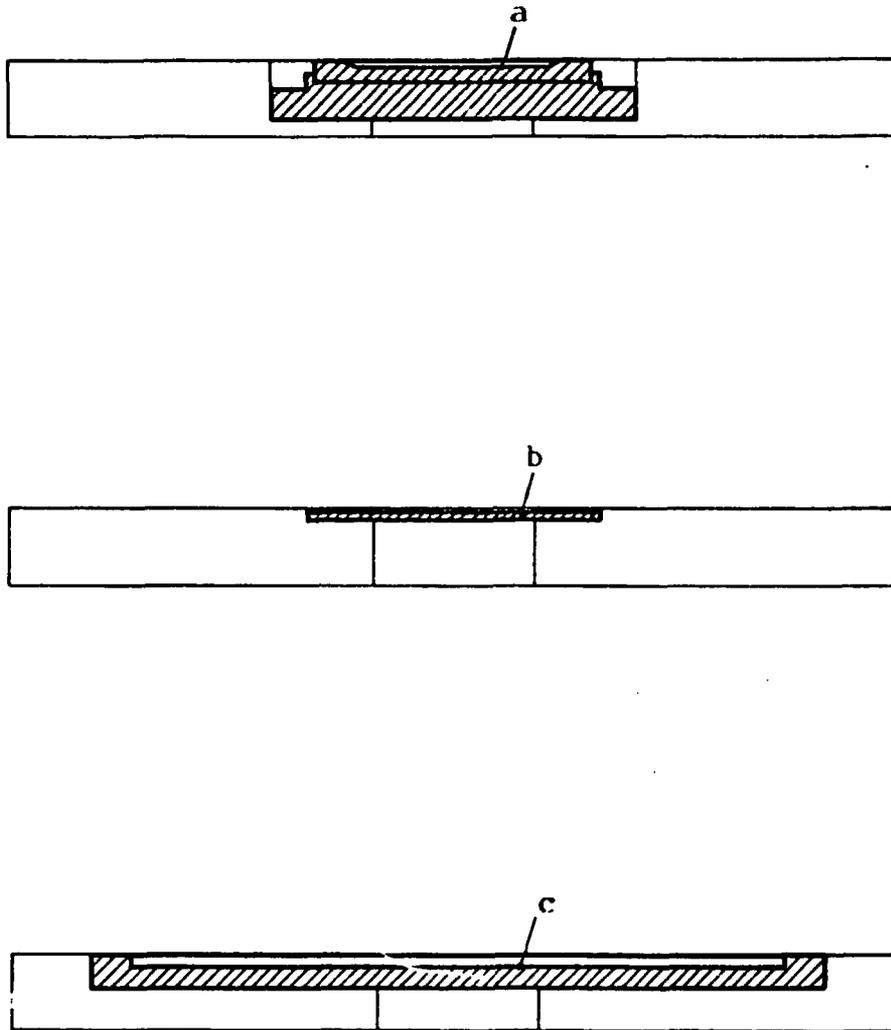


Fig. II-2 : Esquema dos suportes de PVC para:

**a** : Fontes alfa LMRI

**b** : Fontes alfa LMN

**c** : Fontes beta LMRI

padrão percentual das medidas foi de 0,2%. Assim, para todos os testes subsequentes, manteve-se o equipamento estabilizando por uma hora antes de se iniciar as medidas. A tensão aplicada foi de 1300V. O valor da radiação de fundo foi descontado de todas as medidas.

### a) Estabilidade a Curto e Médio Prazos

O teste de estabilidade a curto prazo (repetibilidade) foi realizado com uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $2305 \text{ s}^{-1}$ ) posicionada de forma reprodutível dentro da "gaveta" do sistema de controle. Foram tomadas 30 medidas consecutivas no caso do sistema 1 e 2, e 10 medidas consecutivas no caso do sistema 3. Repetindo-se esta experiência ao longo do tempo, sob as mesmas condições geométricas, tem-se o teste de estabilidade a médio prazo. Nas Tabelas II-4 e II-5 pode-se observar os valores dos desvios percentuais obtidos para os cintiladores plásticos 1 e 2 respectivamente, que têm espessuras de 3 e 1 mm.

Os resultados obtidos com o cintilador plástico 1 demonstram que o sistema 3, constituído pelo contador temporizador, apresenta, em relação aos outros dois sistemas, melhor estabilidade a curto e médio prazos. No teste de repetibilidade o desvio padrão da média máximo foi de 0,13%. Para o teste de estabilidade a médio prazo, obteve-se um desvio padrão da média de 0,15%, tomando-se como valor de referência a média de 10 medidas, sendo que cada medida corresponde à média de uma série de leituras realizadas diariamente.

Uma resposta similar foi obtida para o plástico 2, onde

TABELA II-4

ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DOS SISTEMAS DE  
CONTROLE DE FONTES ALFA E BETA  
PLÁSTICO 1 (3 mm de espessura)

Sistema	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média(%) Mínimo	Desvio Padrão da Média(%) Máximo	
1	0,56	0,88	0,28
2	0,05	0,25	0,12
3	0,06	0,13	0,15

TABELA II-5

ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DOS SISTEMAS DE  
CONTROLE DE FONTES ALFA E BETA  
PLÁSTICO 2 (1 mm de espessura)

Sistema	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média(%) Mínimo	Desvio Padrão da Média(%) Máximo	
1	0,51	0,95	0,18
2	0,13	0,19	0,14
3	0,05	0,11	0,14

o sistema 3 apresentou um desvio padrão da média máximo de 0,11% para o teste de repetibilidade e um desvio padrão da média de 0,14% para o teste de estabilidade a médio prazo, o que representa 18% e 7% a menos dos valores obtidos para o plástico 1 nos testes de repetibilidade e estabilidade a médio prazo, respectivamente.

Quanto aos eletrômetros utilizados, o eletrômetro Keithley 610C apresentou a melhor resposta para os testes em estudo.

#### **b) Linearidade**

O teste de linearidade foi realizado utilizando-se uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  e variando-se o tempo de medida até um total de 300s. Foi observado, para os cintiladores plásticos 1 e 2, um comportamento linear para os três sistemas de medida : Fig. II-3, II-4 e II-5.

O mesmo estudo foi feito utilizando-se fontes de  $^{241}\text{Am}$  com diferentes taxas de emissão (entre 55,3 e 11.100  $\text{s}^{-1}$ ). A Fig. II-6 apresenta a resposta do sistema 3 (contador temporizador) em função da taxa de emissão para os cintiladores plásticos 1 e 2, obtendo-se comportamentos lineares.

Nas Tabelas II-6 e II-7 pode-se observar os resultados obtidos para o teste de linearidade com várias fontes no caso dos sistemas 1 e 2 respectivamente. Os resultados representam a média de 30 medidas consecutivas para cada fonte de  $^{241}\text{Am}$ . Tomando-se a razão entre o valor medido e a taxa de emissão da fonte pode-se verificar que o

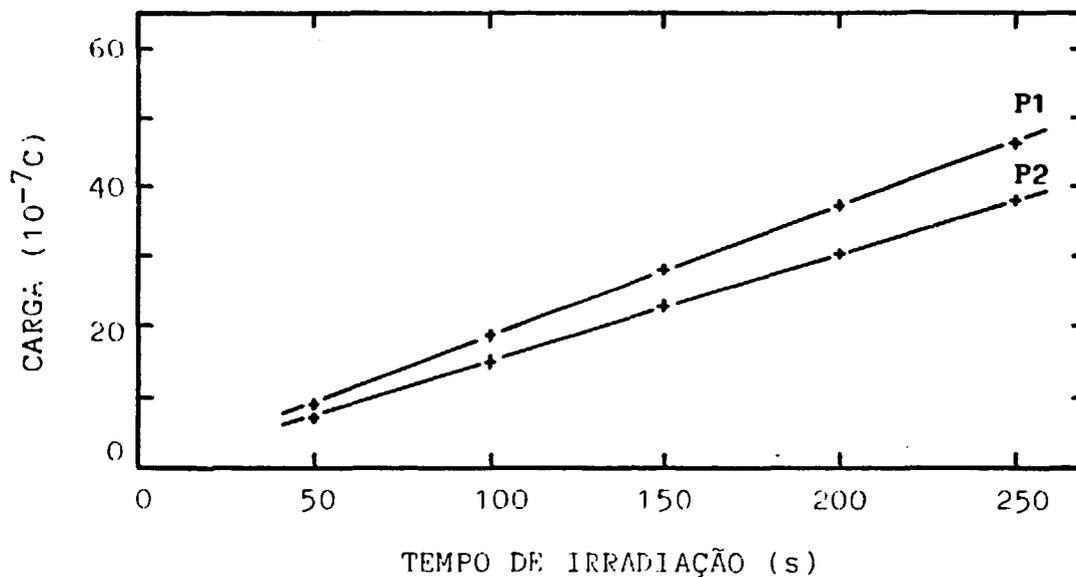


Fig. II-3 : Linearidade da resposta do sistema 1 (detector de cintilação acoplado ao eletrômetro Keithley 616) em função do tempo de irradiação com fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $153,8 \text{ s}^{-1}$ ), no caso dos plásticos 1 (P1) e 2 (P2). O desvio padrão percentual máximo dos medidores foi de 1,12% e 1,55% para os plásticos 1 e 2 respectivamente.

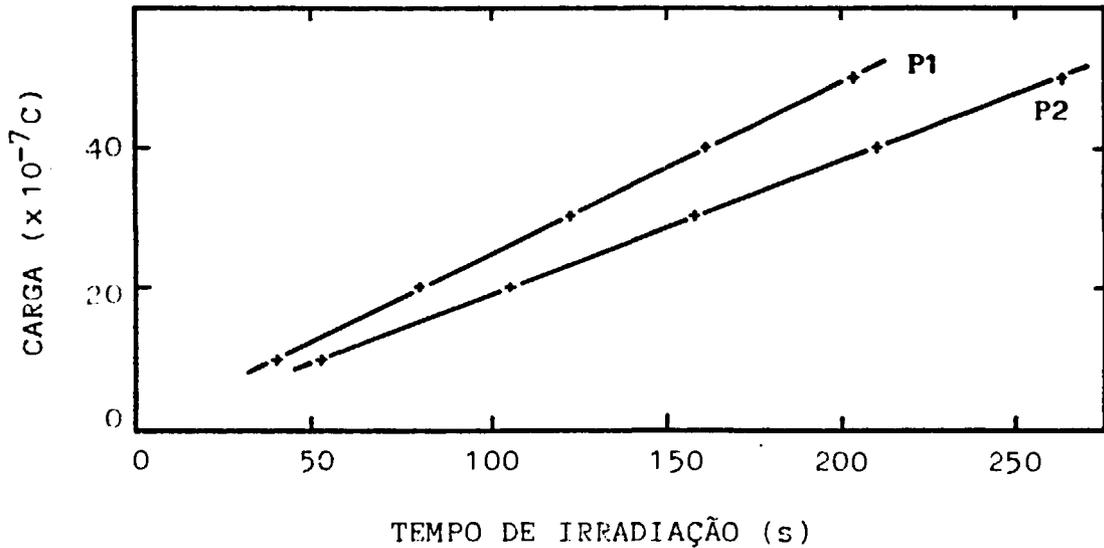


Fig. II-4 : Linearidade da resposta do sistema 2 (detector de cintilação acoplado ao eletrômetro Keithley 610C) em função do tempo de irradiação com fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ ) no caso dos plásticos 1 (P1) e 2 (P2). O desvio percentual máximo das medidas foi de 1,99% e 5,20% para os plásticos 1 e 2 respectivamente.

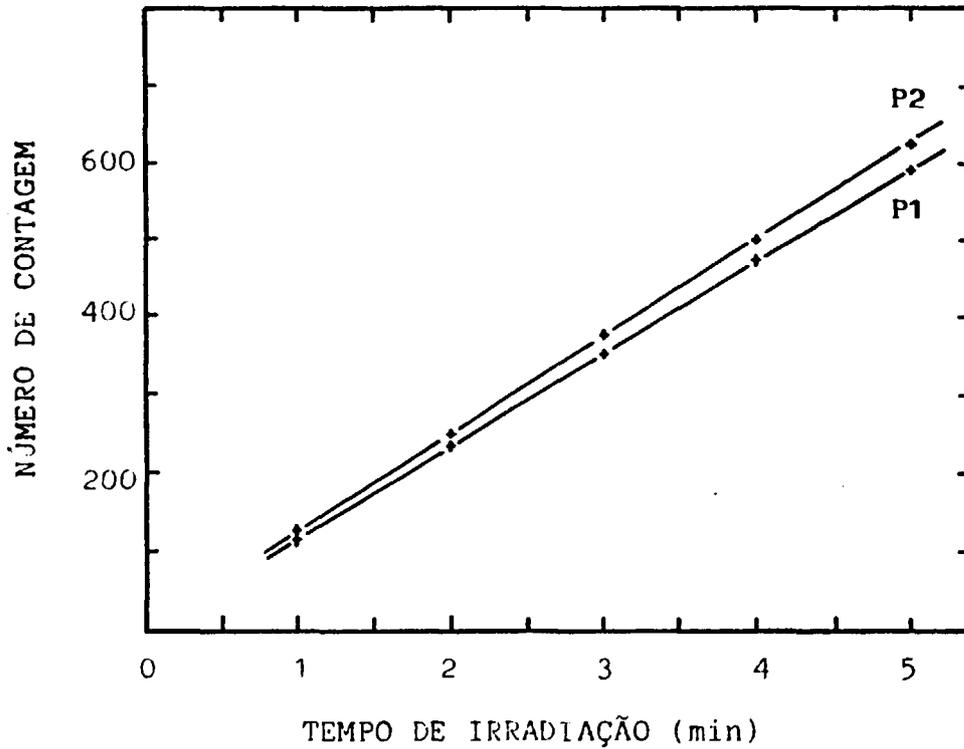


Fig. 11-5 : Linearidade da resposta do sistema 3 (detec-  
tor de cintilação acoplado ao contador tempo  
rizador) em função do tempo de irradiação  
com fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ ), no caso dos  
plásticos 1 (P1) e 2 (P2). O desvio padrão  
percentual máximo das medidas foi de 0,43% e  
0,28% para os plásticos 1 e 2 respectivamente.

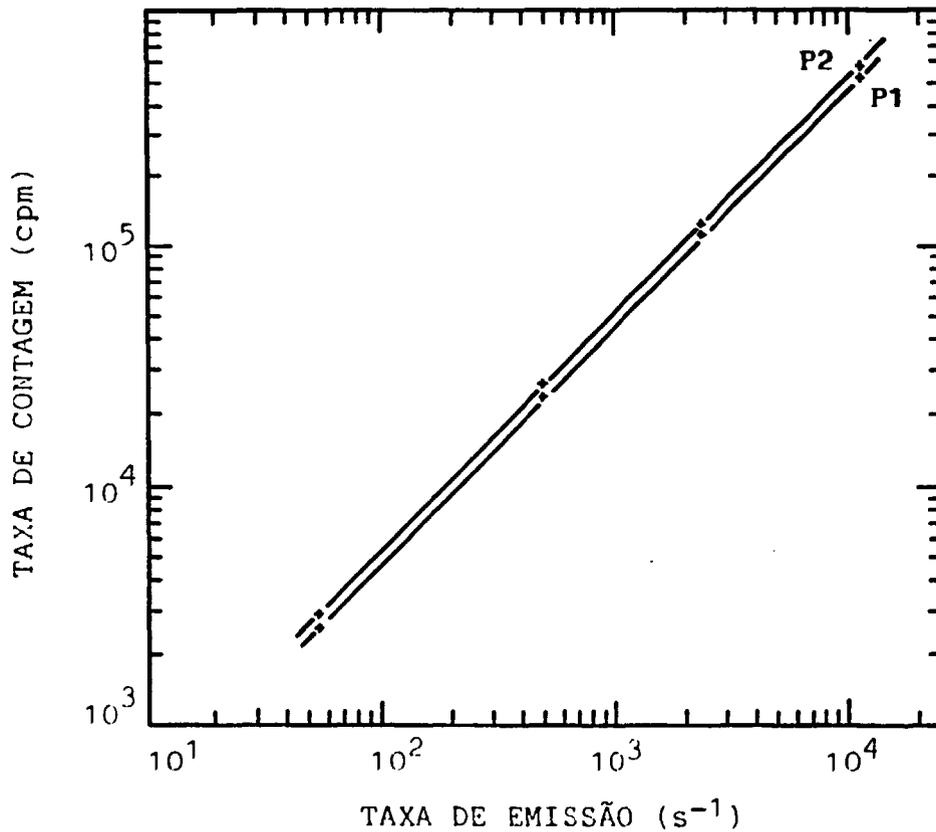


Fig. 11-6 : Linearidade de resposta do sistema 3 (detector de cintilação acoplado ao contador temporizador) em função da taxa de emissão de fontes  $^{241}\text{Am}$ , no caso dos plásticos 1 (P1) e 2 (P2). O desvio padrão percentual máximo das medidas foi de 3,05% e 2,41% para o plástico 1 e 2 respectivamente.

TABELA II-6

RESPOSTA (I) DO SISTEMA 1 (ELETRÔMETRO 616) A FONTES DE  $^{241}\text{Am}$  COM DIFERENTES TAXAS DE EMISSÃO

Taxa de Emissão ( $\text{s}^{-1}$ )	I ( $10^{-10}$ A)	
	Plástico 1	Plástico 2
153,8	$1,350 \pm 0,009$	$1,214 \pm 0,001$
167,2	$1,469 \pm 0,006$	$1,286 \pm 0,007$
1773,0	$15,033 \pm 0,139$	$13,660 \pm 0,126$

TABELA II-7

RESPOSTA (I) DO SISTEMA 2 (ELETRÔMETRO 610C) A FONTES DE  $^{241}\text{Am}$  COM DIFERENTES TAXAS DE EMISSÃO

Taxa de Emissão ( $\text{s}^{-1}$ )	I ( $10^{-10}$ A)	
	Plástico 1	Plástico 2
153,8	$1,572 \pm 0,004$	$1,228 \pm 0,004$
167,2	$1,664 \pm 0,006$	$1,373 \pm 0,003$
1773,0	$17,118 \pm 0,009$	$14,661 \pm 0,014$

sistema 1 mostrou-se linear para ambos os plásticos com uma diferença percentual máxima na resposta de 3,6% para o plástico 1 e de 2,6% para o plástico 2. No caso do sistema 2 essa diferença foi de 5,9% para o plástico 1 e de 3,6% para o plástico 2.

### c) Dependência Energética

A resposta de cada um dos sistemas detectores foi medida para as fontes de radionuclídeos diferentes, com o objetivo de calibrar o sistema e de estudar a sua dependência energética, tanto para radiação alfa como para beta.

As Tabelas II-8 e II-9 apresentam os fatores de calibração dos sistemas de controle para  $^{241}\text{Am}$  ( $167,2 \text{ s}^{-1}$ ) e  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  ( $2930 \text{ s}^{-1}$ ) respectivamente. Estes fatores foram determinados tomando-se a razão entre a taxa de emissão e a leitura do instrumento detector.

Para o estudo da dependência energética os resultados obtidos com os plásticos 1 e 2 para radiação alfa podem ser vistos nas Tabelas II-10 e II-11 respectivamente, e para radiação beta nas Tabelas II-12 e II-13. No caso das fontes alfa, os fatores foram normalizados para  $^{241}\text{Am}$  e no caso das fontes beta, para  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ .

No caso do plástico 1, para energias compreendidas entre 4,804 e 5,745 MeV obteve-se uma dependência energética para radiação alfa de 32,8% para o sistema 1, de 41,4% para o sistema 2, e de 10,5% para o sistema 3, enquanto que, para o plástico 2, nessa mesma faixa de

TABELA II-8

FATOR DE CALIBRAÇÃO (Fc) DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE FONTES ALFA E BETA PARA  $^{241}\text{Am}$  ( $167,2 \text{ s}^{-1}$ )

Sistema	Fc ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{ue}^{-1}$ )	
	Plástico 1	Plástico 2
1	$(1,14 \pm 0,03) \cdot 10^2$	$(1,30 \pm 0,04) \cdot 10^2$
2	$(1,01 \pm 0,02) \cdot 10^2$	$(1,22 \pm 0,02) \cdot 10^2$
3	$(2,14 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$	$(1,86 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$

Obs.: Sistemas 1 e 2: 1 ue =  $10^{-10}\text{A}$   
 Sistema 3 : 1 ue = cpm

TABELA II-9

FATOR DE CALIBRAÇÃO (Fc) DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE FONTES ALFA E BETA PARA  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  ( $2930 \text{ s}^{-1}$ )

Sistema	Fc ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{ue}^{-1}$ )	
	Plástico 1	Plástico 2
1	$(0,933 \pm 0,056) \cdot 10^2$	$(6,07 \pm 0,24) \cdot 10^2$
2	$(0,882 \pm 0,037) \cdot 10^2$	$(5,82 \pm 0,25) \cdot 10^2$
3	$(2,79 \pm 0,11) \cdot 10^{-2}$	$(2,98 \pm 0,12) \cdot 10^{-2}$

Obs.: Sistemas 1 e 2 : 1 ue =  $10^{-10}\text{A}$   
 Sistema 3 : 1 ue = cpm

TABELA II-10

DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE PARA  
FONTES ALFA

PLÁSTICO 1 (3mm de espessura)

F: Fator de Correção para Dependência Energética  
Normalizado para  $^{241}\text{Am}$ 

Fonte	Energia (MeV)	F		
		Sist.1	Sist.2	Sist.3
$^{235}\text{U}$ ( $171,8\text{s}^{-1}$ )	4,783 4,824	$1,284 \pm 0,020$	$1,404 \pm 0,022$	$1,105 \pm 0,018$
$^{237}\text{Pu}$ ( $165,3\text{s}^{-1}$ )	5,105 5,143 5,156	$1,180 \pm 0,016$	$1,269 \pm 0,020$	$1,094 \pm 0,018$
$^{238}\text{Pu}$ ( $183,5\text{s}^{-1}$ )	5,456 5,499	$1,015 \pm 0,016$	$1,094 \pm 0,017$	$1,075 \pm 0,017$
$^{241}\text{Am}$ ( $167,2\text{s}^{-1}$ )	5,442 5,486	1	1	1
$^{244}\text{Cm}$ ( $142,1\text{s}^{-1}$ )	5,666 5,763 5,805	$0,967 \pm 0,015$	$0,993 \pm 0,016$	$1,049 \pm 0,017$

TABELA II-11

DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE PARA  
FONTES ALFA

PLÁSTICO 2 (1mm de espessura)

F: Fator de Correção para Dependência Energética  
Normalizado para  $^{241}\text{Am}$ 

Fonte	Energia (MeV)	F		
		Sist.1	Sist.2	Sist.3
$^{239}\text{U}$ ( $171,8\text{s}^{-1}$ )	4,783 4,824	$1,190 \pm 0,019$	$1,285 \pm 0,020$	$1,036 \pm 0,017$
$^{237}\text{Pu}$ ( $165,3\text{s}^{-1}$ )	5,105 5,143 5,156	$1,129 \pm 0,018$	$1,149 \pm 0,018$	$1,040 \pm 0,016$
$^{230}\text{Pu}$ ( $183,5\text{s}^{-1}$ )	5,456 5,499	$1,005 \pm 0,016$	$1,040 \pm 0,017$	$1,053 \pm 0,017$
$^{241}\text{Am}$ ( $167,2\text{s}^{-1}$ )	5,442 5,486	1	1	1
$^{244}\text{Cm}$ ( $142,1\text{s}^{-1}$ )	5,666 5,763 5,805	$0,908 \pm 0,014$	$0,934 \pm 0,015$	$1,052 \pm 0,017$

TABELA II-12

DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE PARA  
FONTES BETA

PLÁSTICO 1 (3mm de espessura)

F: Fator de Correção para Dependência Energética  
Normalizado para  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 

Fonte	Energia (keV)	F		
		Sist.1	Sist.2	Sist.3
$^{14}\text{C}$ (2946 s <sup>-1</sup> )	156,6	12,077±0,674	12,418±0,685	1,965±0,108
$^{137}\text{Cs}$ (3465 s <sup>-1</sup> )	511,5	1,901±0,107	1,892±0,105	0,912±0,050
$^{90}\text{Cl}$ (3092 s <sup>-1</sup> )	709,5	2,105±0,174	2,053±0,113	0,985±0,054
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (2930 s <sup>-1</sup> )	546,0 2274,0	1	1	1

TABELA II-13

DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE PARA  
FONTES BETA

PLÁSTICO 2 (1mm de espessura)

F: Fator de Correção para Dependência Energética  
Normalizada para  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

Fonte	Energia (keV)	F		
		Sist.1	Sist.2	Sist.3
$^{14}\text{C}$ (2946 s <sup>-1</sup> )	156,6	2,463±0,135	2,427±0,133	1,972±0,108
$^{137}\text{Cs}$ (3465 s <sup>-1</sup> )	511,5	1,196±0,067	1,140±0,063	1,122±0,062
$^{60}\text{Co}$ (3092 s <sup>-1</sup> )	709,5	1,103±0,061	1,050±0,063	1,045±0,057
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (2930 s <sup>-1</sup> )	546,0 2274,0	1	1	1

energia a dependência energética máxima foi menor para os três sistemas, obtendo-se 31,0% para o sistema 1, 37,6% para o sistema 2 e de apenas 5,3% para o sistema 3. Os resultados obtidos (Tabelas II-10 e II-11) demonstram que o plástico 2 apresenta a menor dependência energética para radiação alfa.

No caso da radiação beta, o plástico 1 apresentou a maior dependência energética para os sistemas 1 e 2. Entre as energias do  $^{137}\text{Cs}$  e do  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ , a dependência energética foi muito alta para os sistemas 1 e 2, enquanto que para o sistema 3 foi de apenas 9,6%. No caso do plástico 2 na mesma faixa de energia citada obteve-se uma dependência energética de 19,6% para o sistema 1, 14,0% para o sistema 2 e 12,2% para o sistema 3. Comparando os três sistemas, verifica-se que o sistema 3 apresentou para ambos os plásticos a menor dependência energética.

No caso do plástico 1, Tabela II-12, para a energia do  $^{137}\text{Cs}$  pode-se observar valores menores do que para  $^{36}\text{Cl}$ , provavelmente decorrentes da contribuição da radiação gama deste radionuclídeo. Neste plástico 1 a espessura de 3 mm possibilita a detecção da contribuição gama, o que não ocorre para o plástico 2 (de espessura 1 mm).

A eficiência do sistema de controle foi determinada através da razão entre a taxa de contagem medida pelo sistema 3 e a taxa de emissão da fonte. Verificou-se que o plástico 1 apresenta uma eficiência de 83,5% para radiação alfa e 59,8% para radiação beta, enquanto que, o plástico 2 apresenta uma eficiência para radiação alfa de 91,8% e 55,9% para radiação beta.

Os resultados obtidos com o cintilador plástico 2 demonstram que, em relação ao plástico 1, esse detector é o mais apropriado para constituir o sistema de controle de fontes radioativas alfa e beta.

## **CAPÍTULO III**

### **DESEMPENHO DE MONITORES DE CONTAMINAÇÃO ALFA E BETA**

#### **III-1 Introdução**

Atualmente existe uma grande variedade de monitores de contaminação de superfície disponíveis comercialmente. Esses instrumentos apresentam grandes diferenças de custo e aplicação. Sendo assim, algumas considerações devem ser feitas para se poder selecionar o instrumento mais adequado ao programa de monitoração a ser realizado.

Dentre os requisitos que os monitores de contaminação devem preencher encontram-se: reprodutibilidade de resposta, amplitude de escala adequada e rápida resposta à radiação. Esses monitores devem ainda apresentar sistemas de alarme sonoro que possam ser ajustados para qualquer ponto dentro de sua escala [23].

O desempenho de monitores de contaminação foi então estudado quanto à estabilidade a curto e médio prazos, linearidade de resposta, variação com a distância fonte-detector, dependência energética à radiação alfa e beta e eficiência.

#### **III-2 Materiais e Métodos**

Os monitores de contaminação testados no presente trabalho foram dois detectores do tipo Geiger-Müller com janela fina (tipo "pancake"), um contador proporcional e um

cintilador. O valor da radiação de fundo foi descontado de todas as medidas.

Nos testes operacionais foram utilizadas as fontes padrões de radiação alfa e beta apresentadas nas Tabelas II-1, II-2 e II-3 e ainda uma fonte extensa de  $^{241}\text{Am}$ , confeccionada e calibrada pela Amersham Buchler GmbH & Co, Alemanha. Essa fonte apresenta uma taxa de emissão de  $1631 \text{ s}^{-1}$  e uma área ativa de  $304,8 \text{ cm}^2$  (Diâmetro=19,7 cm). No teste de homogeneidade da fonte realizado no IPEN obteve-se um desvio padrão da média percentual de 2,2%, onde foram tomadas em oito posições distintas 5 medidas de 1 minuto.

Para o teste de variação da resposta com a distância fonte-detector foi utilizado o arranjo experimental apresentado na Fig. III-1 e na Foto III-1. Deste arranjo faz parte um calibrador traçador vertical Mitutoyo adaptado, modelo 940.101 (Brasil), de escala móvel e com leitura de 0,1 mm.

### **1) Detector Geiger-Müller**

Os monitores de contaminação Geiger-Müller (GM), Eberline, modelo HP 210AL, Patr. 31899 (EUA) e IEN modelo 7A003, nº de série 018 (Brasil), denominados respectivamente neste trabalho de HP 210AL e IEN 018, foram testados acoplados primeiramente a um contador temporizador IPEN modelo PI-31, Patr. 31319 (Brasil), o qual, associado a um cronômetro Technos, possibilitou a tomada de medidas em contagens por minuto de forma digital. Em seguida, os testes foram realizados com o medidor

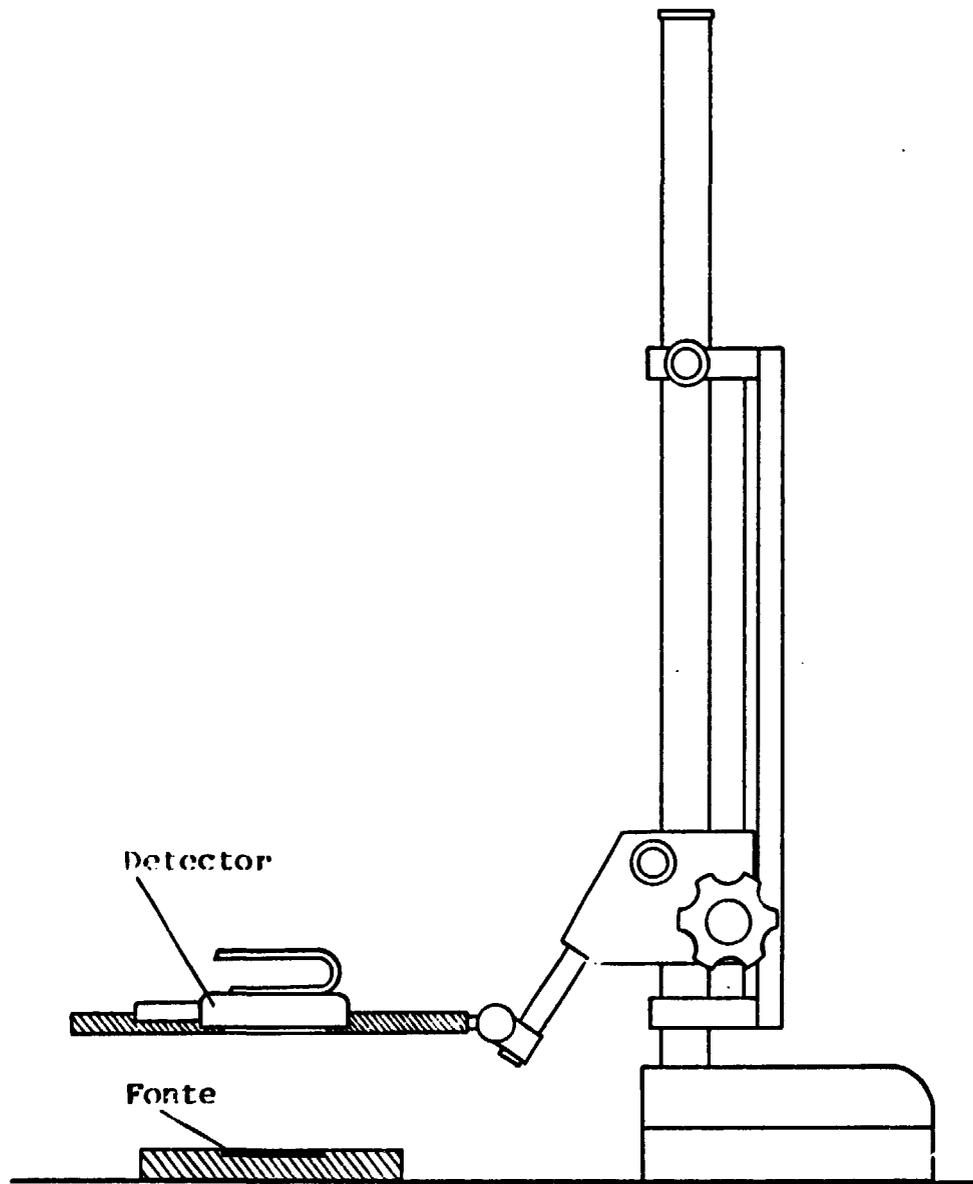


Fig. III-1 : Arranjo experimental utilizado para a calibração de monitores de contaminação com radiação alfa e beta.

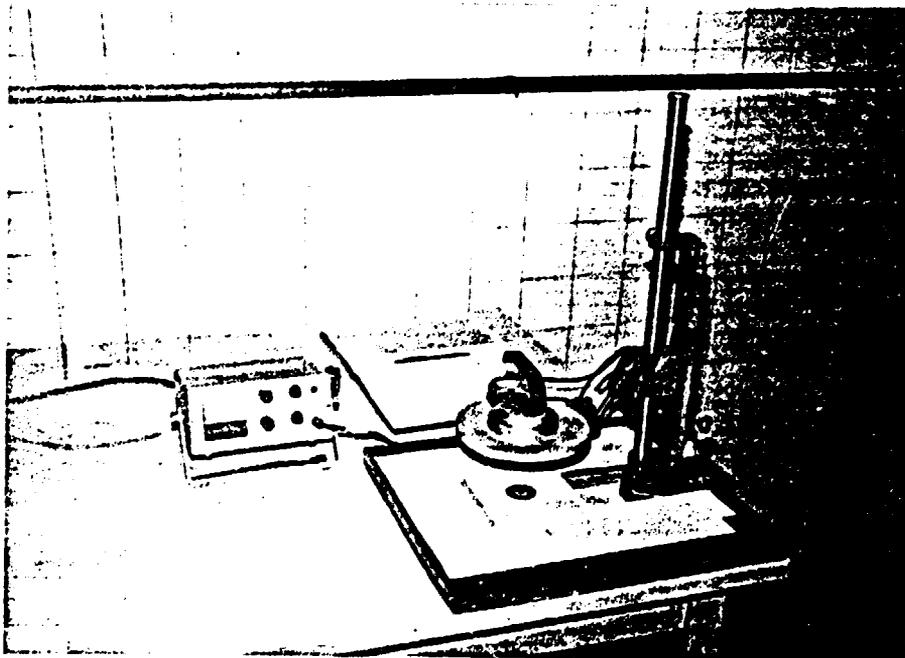


Foto III-1 : Calibração de monitores de contaminação com radiação alfa e beta:

IEN, modelo 7013, nº de série 024 (Brasil), que forneceu medidas em contagens por minuto de forma analógica.

A tensão de operação de ambos os detectores foi de 900V, o tempo morto de  $50\mu\text{s}$  e a espessura da janela de mica de 1,4 a  $2,0\text{ mg.cm}^{-2}$ . A abertura da malha no caso da sonda HP 210AL é de 4 mm e no caso da sonda IEN 018 é de 0,42 mm.

## **2) Contador Proporcional**

O contador proporcional IEN modelo PA-01B, nº de série 006 (Brasil), foi testado acoplado ao medidor IEN, modelo 7018 e nº de série 006 (Brasil), que possibilitou a tomada de medidas em contagens por minuto de forma analógica.

A sonda detectora apresenta uma geometria retangular com 230 x 60 mm. A espessura da grade da janela do detector é de 2 mm. A tensão de operação foi de 1760 V. Devido à extensão da área ativa do detector ( $78\text{ cm}^2$ ), o estudo foi feito para as três regiões que compõem o detector.

## **3) Cintilador**

A sonda alfa cintiladora Nardeaux modelo SIA 7-1, nº de série 3211 (França), consiste de uma fotomultiplicadora, modelo XP 2008 e de um cintilador de  $\text{SZn(Ag)}$  com 70 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. A parte sensível do detector, com  $30\text{ cm}^2$ , é recoberta com uma folha de alumínio de 3 a  $4\ \mu\text{m}$  de espessura.

O cintilador foi acoplado ao medidor Nardeaux, modelo IPAB 7-1, nº de série 4152 (França), o qual fornece as medidas em contagens por segundo de forma analógica.

### **III-3 Resultados e Discussões**

#### **a) Estabilidade a Curto e Médio Prazos**

##### **a<sub>1</sub>) Detector Geiger-Müller**

Posicionando-se em arranjos especiais de PVC os detectores de forma reprodutível em relação a uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ ), a uma distância de 0,34 mm, foram tomadas 10 medidas consecutivas para o teste de estabilidade a curto prazo (repetibilidade). O teste de estabilidade a médio prazo consistiu na repetição dessa experiência 10 vezes em dias diferentes, sob condições idênticas. A média dos valores obtidos foi tomado como valor de referência (Tabelas III-1 e III-2).

Os testes foram realizados utilizando-se medidores IPEN PI-31 e IEN 7013. Sendo o medidor PI-31 um integrador de contagens, os desvios percentuais obtidos, para ambos os testes, foram menores que os resultados obtidos com o medidor IEN 7013.

Verifica-se também que no teste de repetibilidade a sonda IIP 210AL apresentou para os dois tipos de medidores (PI-31 e 7013) um desvio percentual menor do que a sonda IEN 018.

No caso do medidor 7013 a experiência foi repetida

TABELA III-1

ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DOS DETECTORES  
 GEIGER-MÜLLER; MEDIDOR IPEN PI-31  
 Fonte  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ )

Sonda	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média(%)		
	Mínimo	Máximo	do Valor de Referência(%)
HP 210AL	0,09	0,18	0,12
IEN 018	0,12	0,24	0,09

TABELA III-2

ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DOS DETECTORES GEIGER-  
 MÜLLER; MEDIDOR IEN 7013  
 Fonte  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ )

Sonda	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média(%)		
	Mínimo	Máximo	do Valor de Referência(%)
HP 210AL	0,44	0,86	0,41
IEN 018	0,59	1,13	0,39

para uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  com uma taxa de emissão menor ( $153,8 \text{ s}^{-1}$ ). Verificou-se que os desvios percentuais obtidos para o teste de estabilidade a curto e médio prazos foram bem maiores (Tabela III-3). Isso ocorre, pois para taxas de emissão menores as oscilações do instrumento são maiores.

### **a<sub>2</sub>) Contador Proporcional**

Foi utilizada uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $153,8 \text{ s}^{-1}$ ) que, posicionada de forma reprodutível no arranjo de PVC a uma distância de 1,35 mm da região central do detector, possibilitou a tomada de 10 medidas consecutivas para o teste de estabilidade a curto prazo.

O teste de estabilidade a médio prazo consistiu na repetição ao longo do tempo dessas medidas 10 vezes, sob condições idênticas. A média dessas medidas foi tomada como valor de referência.

O detector foi acoplado ao medidor 7018. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela III-4.

### **a<sub>3</sub>) Cintilador**

A fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $1773 \text{ s}^{-1}$ ), posicionada de forma reprodutível em relação ao detector, permitiu a realização dos testes de estabilidade a curto e médio prazos.

Para as medidas de repetibilidade, consistindo na tomada de 10 medidas consecutivas, obteve-se um desvio padrão da média máximo percentual de aproximadamente 1%.

TABELA III-3  
ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DOS DETECTORES  
GEIGER-MÜLLER; MEDIDOR IEN 7013  
Fonte  $^{241}\text{Am}$  ( $153,8 \text{ s}^{-1}$ )

Sonda	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média (%) Mínimo	Máximo	Desvio Padrão da Média do Valor de Referência (%)
HP 210AL	1,00	1,72	0,47
IEN 018	1,67	2,78	1,19

TABELA III-4

ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DO CONTADOR  
 PROPORCIONAL; MEDIDOR IEN 7018  
 Fonte  $^{241}\text{Am}$  ( $153,8 \text{ s}^{-1}$ )

Sonda	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média(%) Mínimo	Máximo	
PA 01B	1,12	2,06	0,41

TABELA III-5

ESTABILIDADE A CURTO E MÉDIO PRAZOS DO CINTILADOR  
 MEDIDOR IPAB 7-1

Fonte	Estabilidade a Curto Prazo		Estabilidade a Médio Prazo
	Desvio Padrão da Média(%) Mínimo	Máximo	
$^{241}\text{Am}$ ( $1773 \text{ s}^{-1}$ )	0,63	1,08	0,28
$^{241}\text{Am}$ ( $167,2 \text{ s}^{-1}$ )	1,44	2,65	0,50

Repetindo-se essas medidas ao longo do tempo, obteve-se o teste de estabilidade a médio prazo. Na Tabela III-5 podem ser vistos os desvios padrões da média percentuais obtidos para a média de 10 medidas, cada uma com 10 leituras (Valor de Referência).

Essa experiência foi repetida para uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  com taxa de emissão menor ( $167,2 \text{ s}^{-1}$ ). Como as oscilações do instrumento são maiores para taxas de emissão menores, os desvios percentuais obtidos com essa fonte para os testes de estabilidade a curto e médio prazos foram maiores do que os obtidos para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  com taxa de emissão de  $1773 \text{ s}^{-1}$ .

## **b) Linearidade**

### **b<sub>1</sub>) Detector Geiger-Müller**

A resposta dos detectores GM à radiação alfa da fonte LMN de  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ ) foi estudada com o medidor PI-31 até 200.000 cpm, correspondendo a um total de 5 minutos de tempo de contagem. Como se pode ver na Fig. III-2, o comportamento mostrou-se linear.

Variando - se a taxa de emissão (entre  $55,3$  e  $11.100 \text{ s}^{-1}$ ), pela utilização das diferentes fontes LMN de  $^{241}\text{Am}$ , foi obtida uma resposta linear até cerca de  $2.500 \text{ s}^{-1}$  (Fig. III-3), podendo-se a seguir observar a perda típica de eficiência dos detectores GM nesta faixa de contagem ( $10^5$  cpm). Observa-se também que a sonda HP 210A1 apresenta uma eficiência alfa maior que a

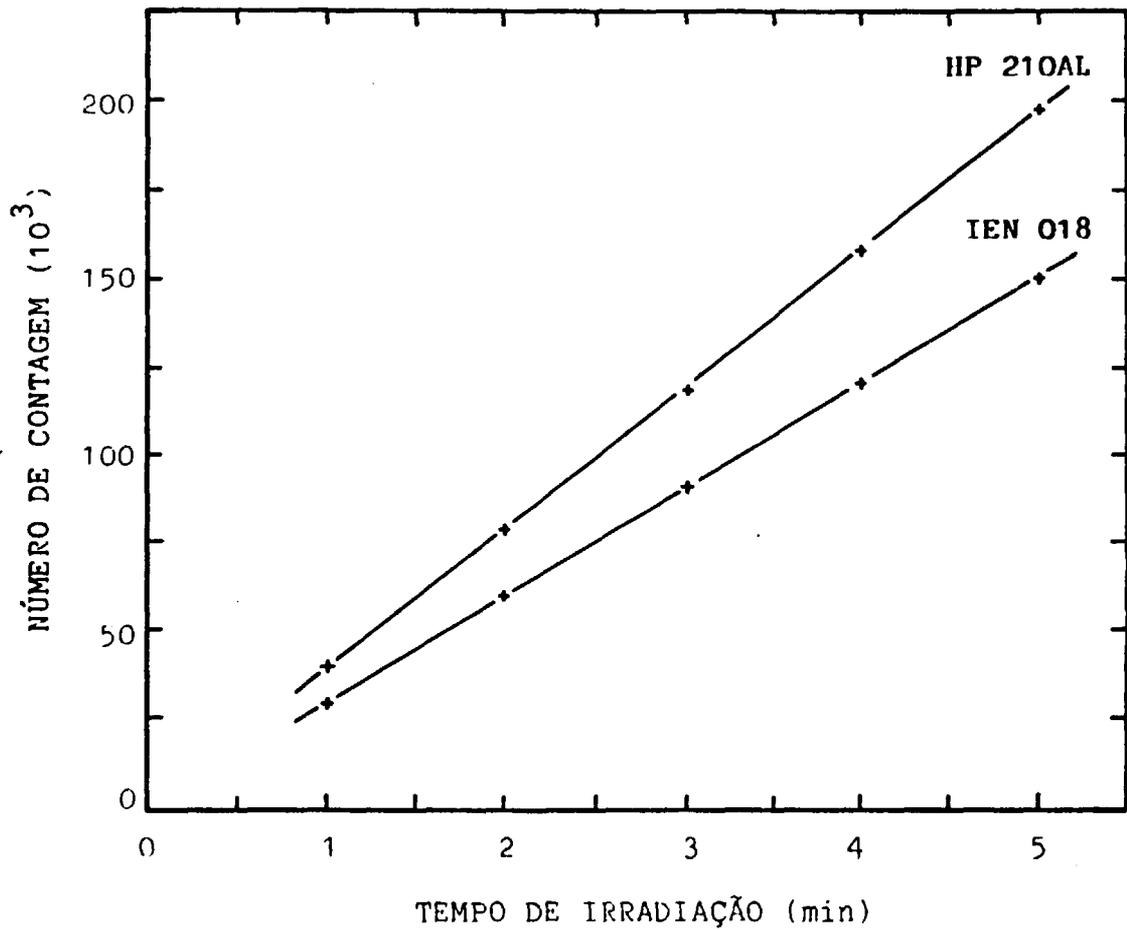


Fig. III-2 : Linearidade da resposta dos detectores GM em função do tempo de irradiação com fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $2305,9 \text{ s}^{-1}$ ).

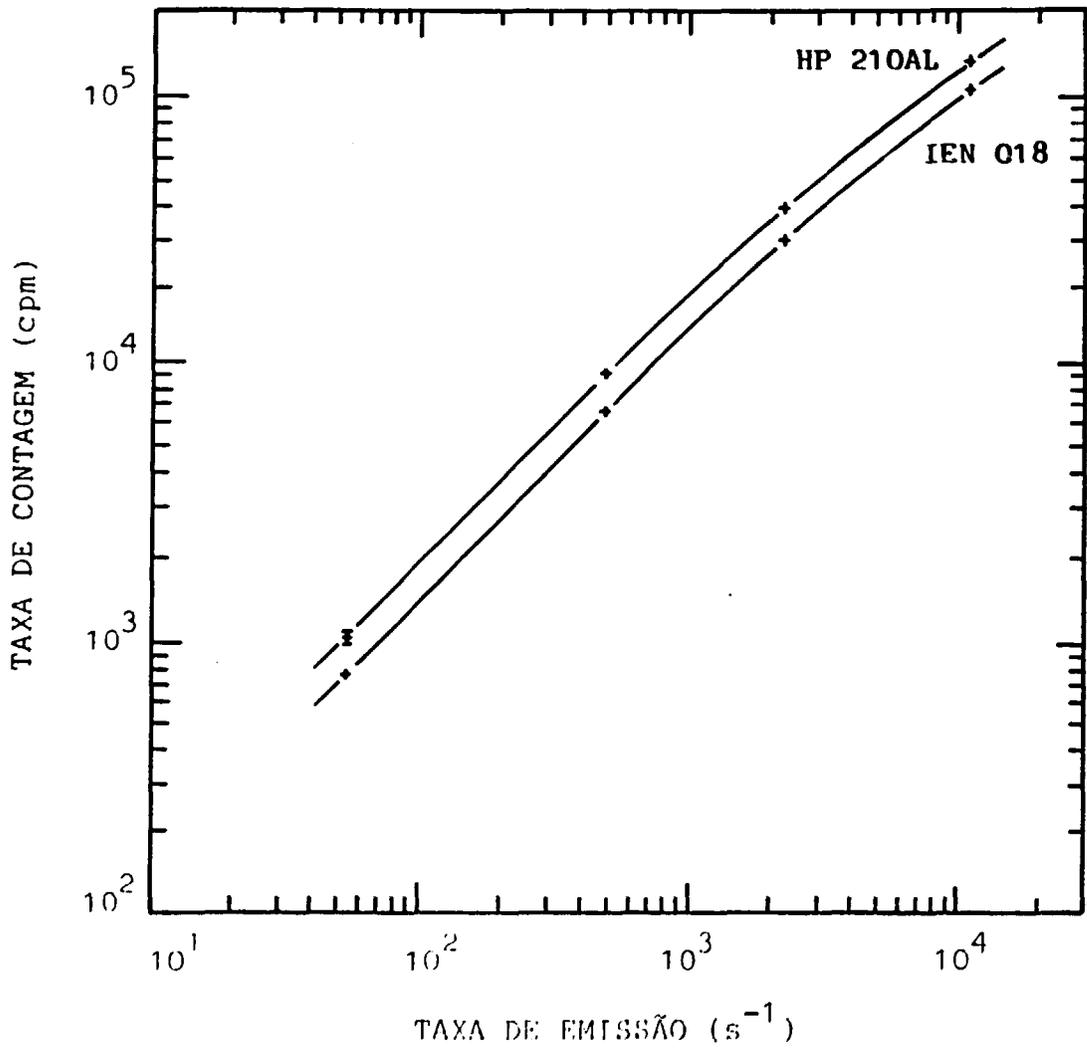


Fig. III-3 : Linearidade da resposta dos detectores GM em função da taxa de emissão das fontes LMJ de <sup>241</sup>Am.

sonda IEN 018.

Nos testes citados acima a distância entre a fonte e o detector foi de 0,35 mm. Os pontos experimentais das Fig. III-2 e III-3 representam valores médios de 10 medidas e os desvios padrões da média são os da Tabela III-1.

### **b<sub>2</sub>) Contador Proporcional**

Para o estudo de linearidade da resposta do contador proporcional foram utilizadas as fontes LMN de  $^{241}\text{Am}$  com taxas de emissão entre  $3,5 \text{ s}^{-1}$  e  $2.305,94 \text{ s}^{-1}$ . O detector foi mantido a 1 cm da fonte. Um comportamento linear pode ser observado na Fig. III-4.

### **b<sub>3</sub>) Cintilador**

O teste foi realizado com as fontes LMN de  $^{241}\text{Am}$  com taxas de emissão entre  $55,3 \text{ s}^{-1}$  e  $11.100 \text{ s}^{-1}$ . A distância entre a fonte e o detector foi de 0,35 mm. O comportamento desse detector quanto à linearidade pode ser observado na Fig. III-5.

### **c) Variação da Resposta com a Distância Fonte-Detector**

Para esse estudo foi utilizado o arranjo apresentado na Fig. III-1, com possibilidade de se variar a distância entre a fonte e o detector de forma reprodutível.

Devido à geometria das fontes (Fig. II-2) e o arranjo

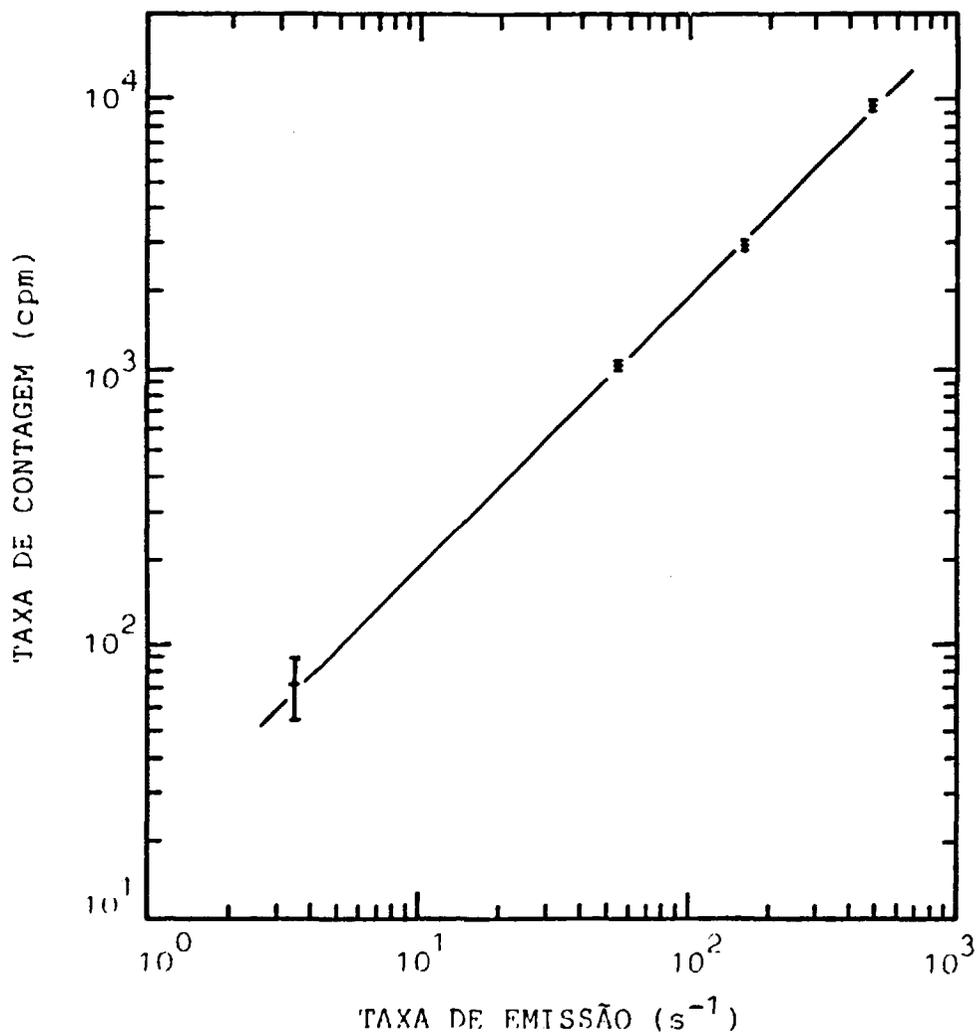


Fig. III-4 : Linearidade da resposta do Contador Proporcional em função da taxa de emissão das fontes LMN de <sup>241</sup>Am.

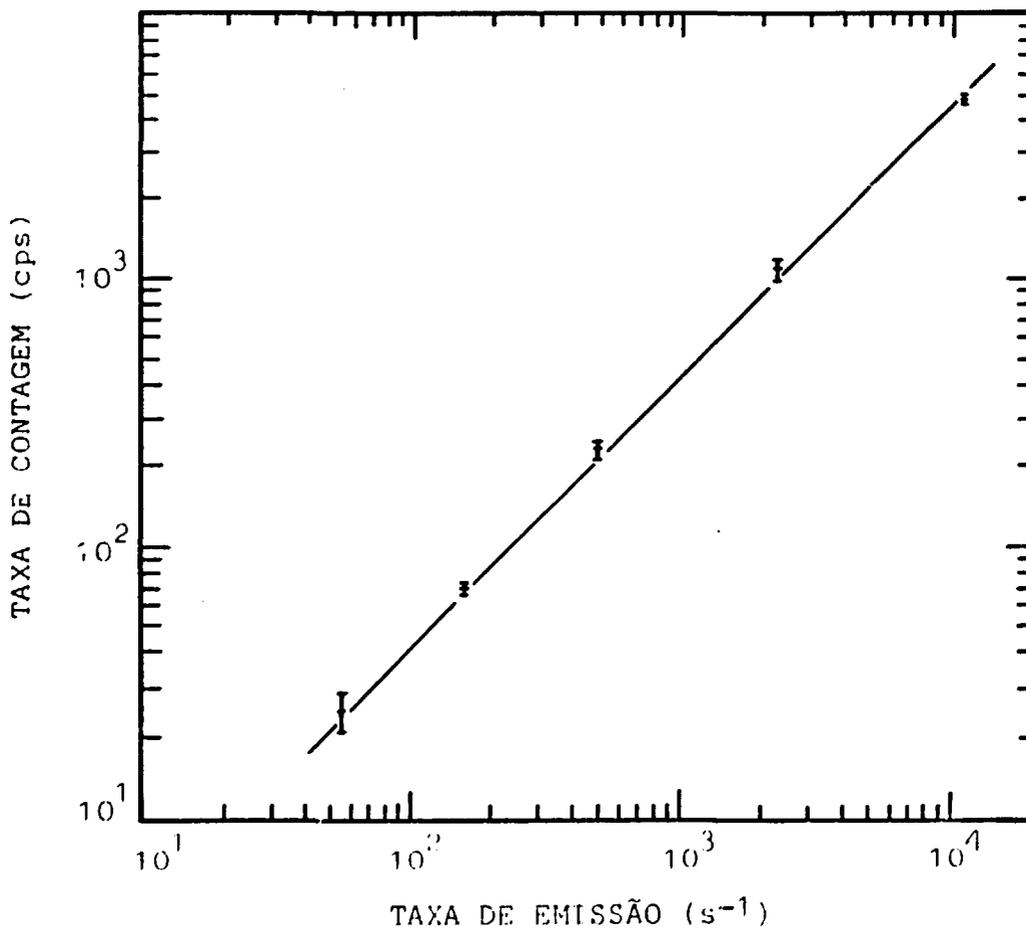


Fig. III-5 : Linearidade da resposta do Detector de Cintilação em função da taxa de emissão das fontes LMN de <sup>241</sup>Am.

experimental utilizado (Fig. III-1), a distância mínima entre as fontes alfa LMRI e os detectores foi distinta, dependendo do detector. Será descrita em cada caso a seguir.

### **c<sub>1</sub>) Detector Geiger-Müller**

Inicialmente a distância entre os detectores GM e a fonte alfa LMRI de  $^{241}\text{Am}$  ( $1773 \text{ s}^{-1}$ ) foi variada entre 2,90 mm e 32,90 mm com intervalos de 0,5 mm (Fig. III-6). Verifica-se que a partir de 22,90 mm as medidas se aproximam da radiação de fundo. A partir desses resultados fixou-se o estudo entre 2,90 e 12,90 mm com intervalos de 1 mm para as fontes alfa e entre 2,55 a 22,55 mm com intervalos de 2 mm para as fontes beta.

As medidas foram realizadas com os medidores IPEN PI-31 e IEN 7013 no caso dos emissores alfa (Tabelas II-1 e II-2) e beta (Tabela II-3). Além destas fontes foi ainda utilizada a fonte extensa de  $^{241}\text{Am}$  ( $1631 \text{ s}^{-1}$ ), já descrita no item III-2. Os resultados obtidos para as diferentes fontes podem ser vistos nas Fig. III-7 a III-14.

Deve-se ressaltar que as normas internacionais (1,2) sugerem que a monitoração de uma superfície contaminada deve ser feita com o detector a uma distância máxima de 5 mm para radiação alfa e de 20 mm no caso da radiação beta.

Com o objetivo de verificar a influência da radiação gama do  $^{241}\text{Am}$  nas medidas, a experiência de variação com a distância foi repetida colocando-se sobre a fonte LMRI, com taxa de emissão de  $167,2 \text{ s}^{-1}$ , uma folha de papel com

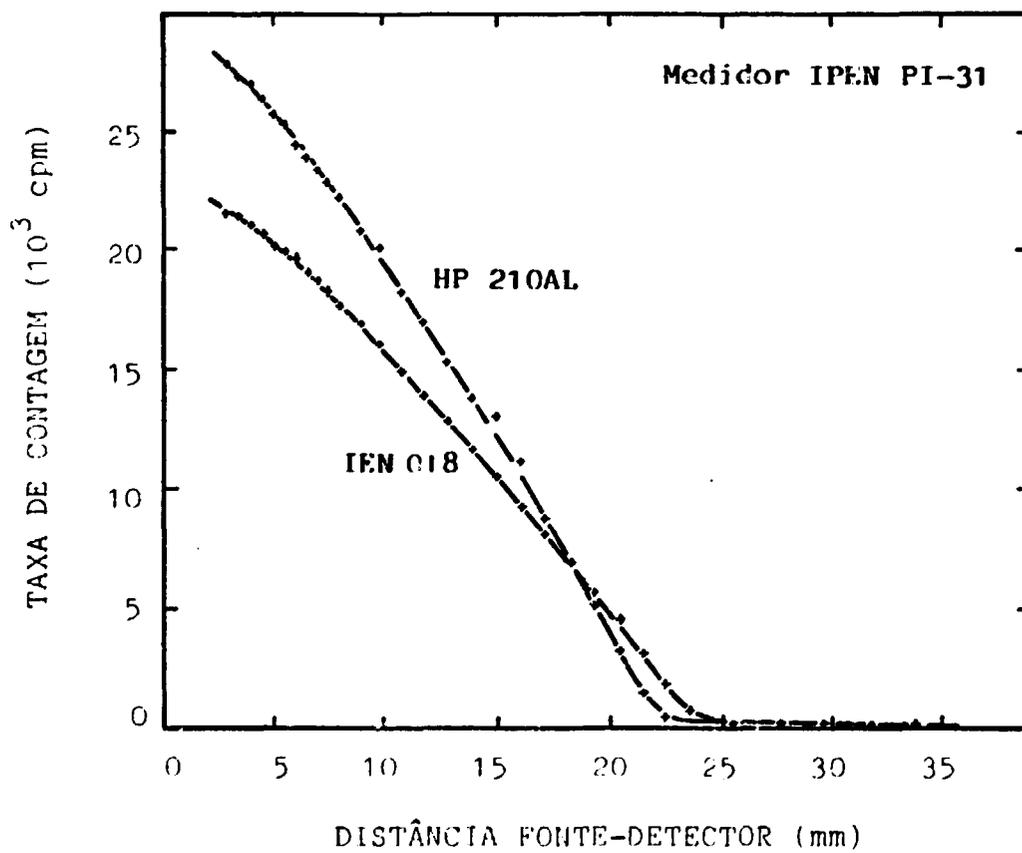


Fig. III-6 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $1773 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

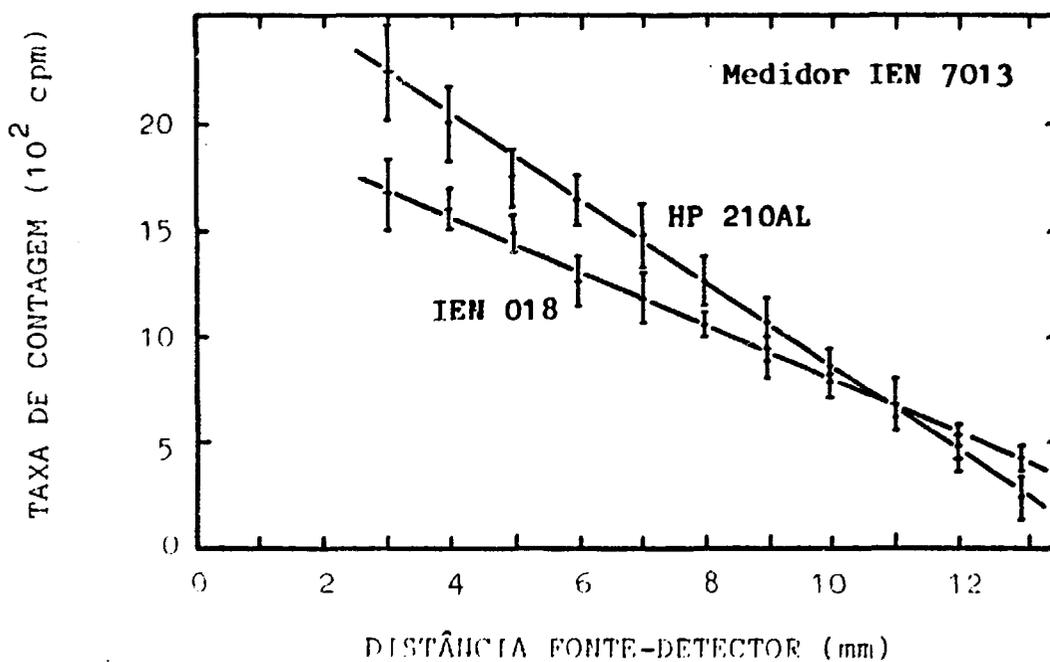
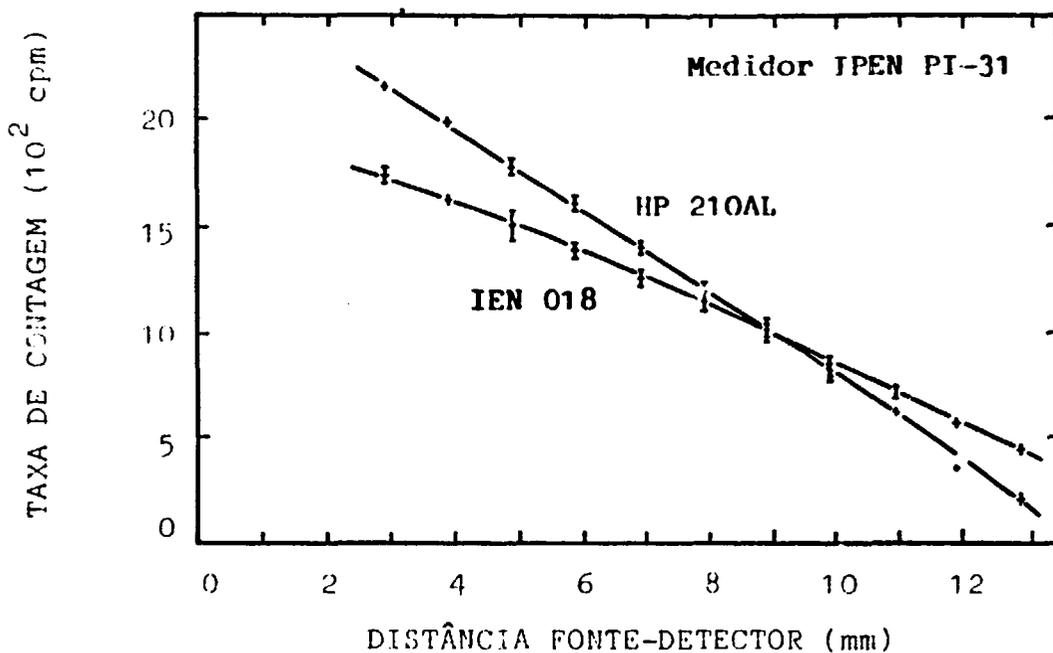


Fig. III-7 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{233}\text{U}$  ( $171,8 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

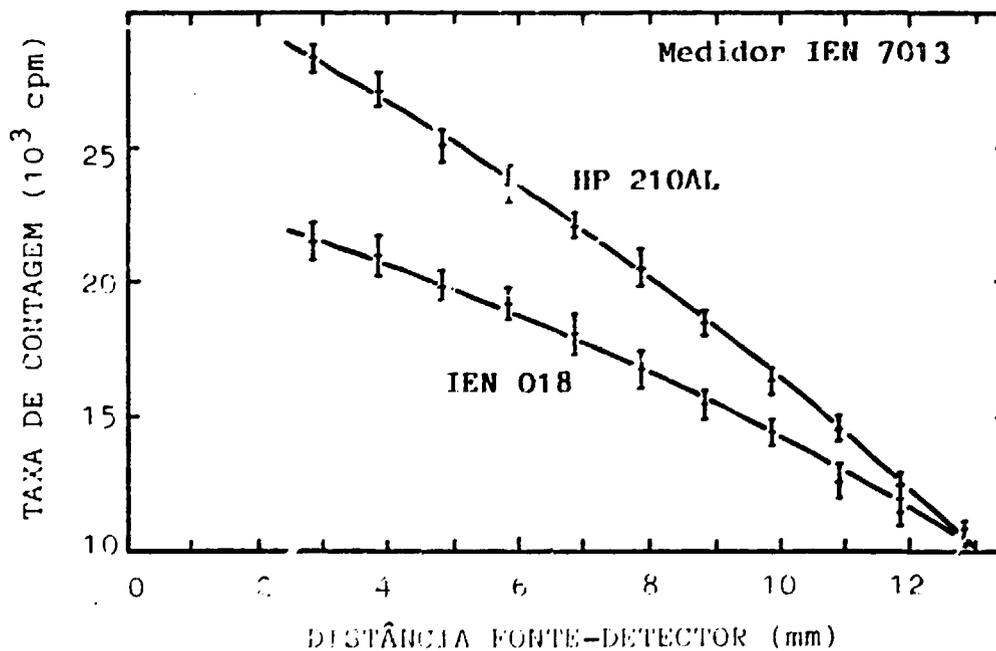
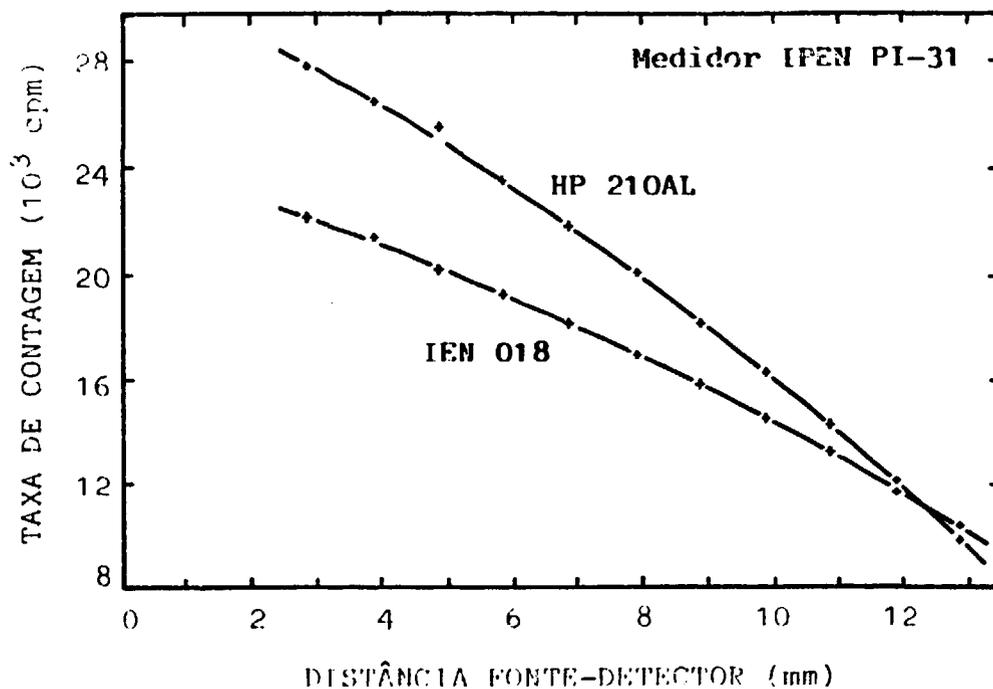


Fig. III-8 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{239}\text{Pu}$  ( $2110 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

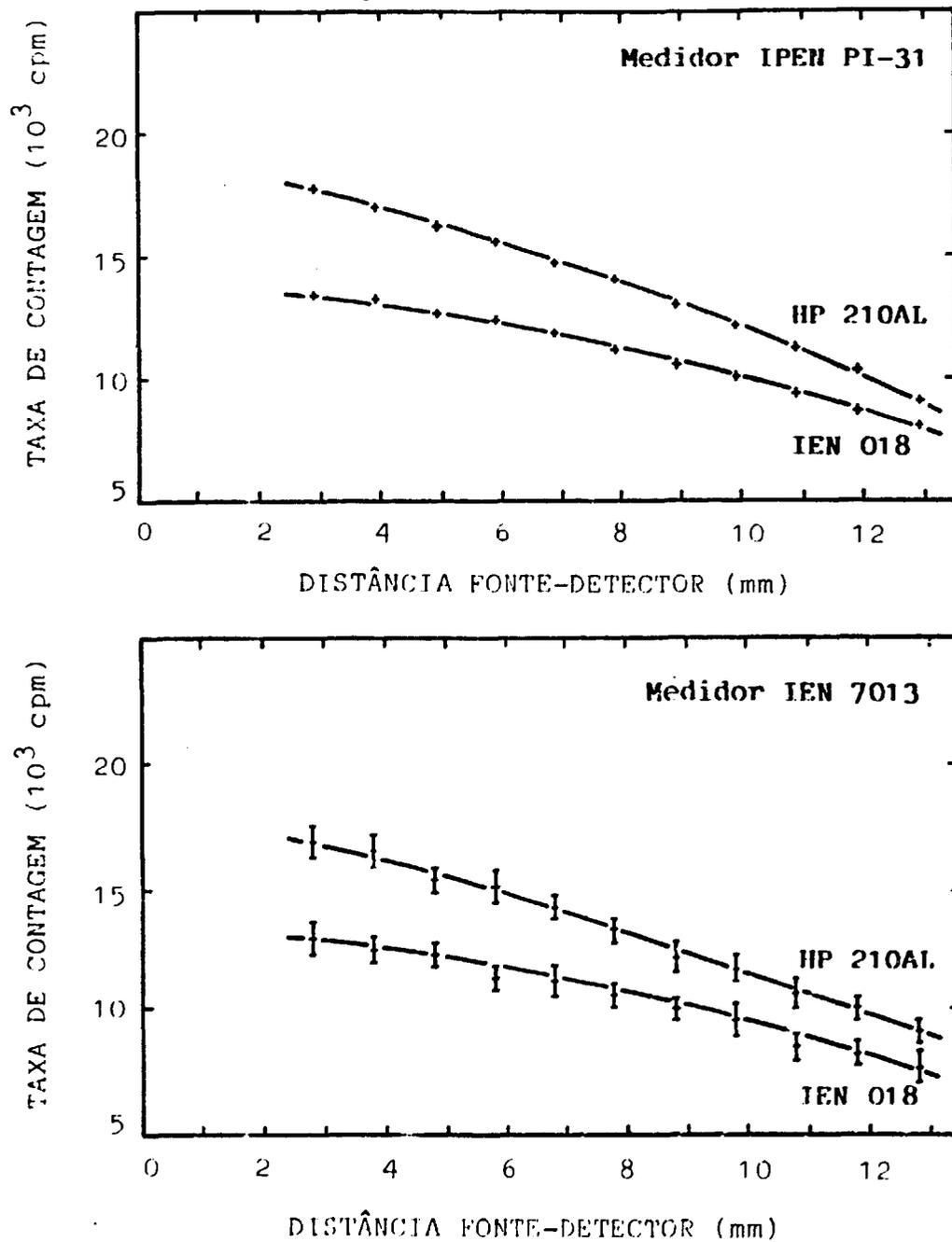


Fig. III-9 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{238}\text{Pu}$  ( $1140 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

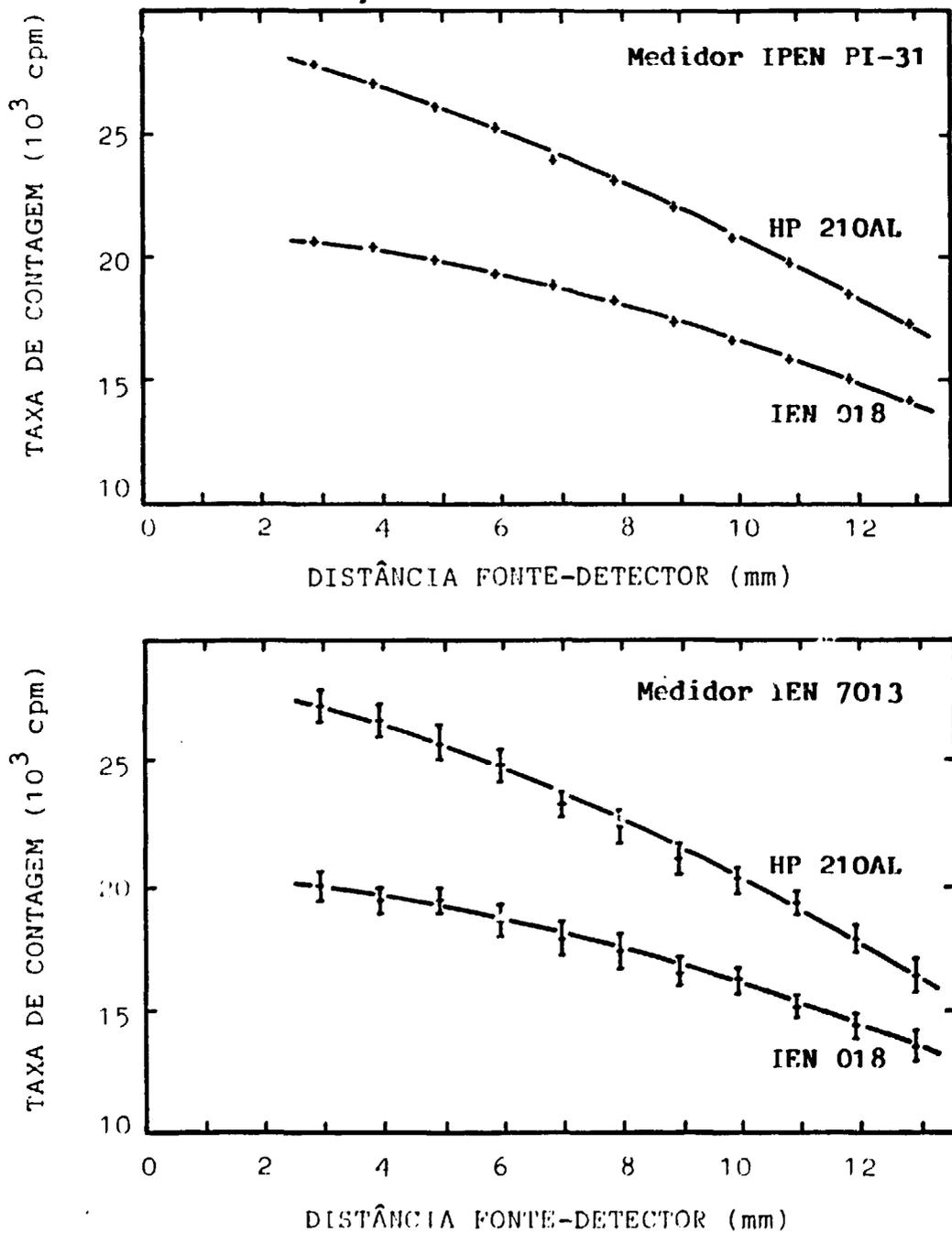


Fig. III-10 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{244}\text{Cm}$  ( $1700 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

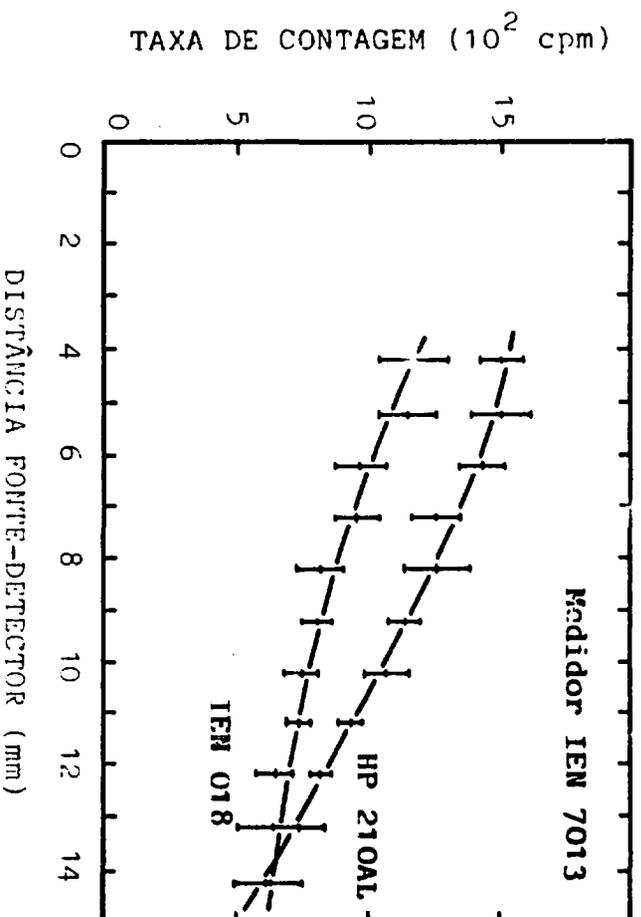


Fig. III-11 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte ex-  
tensa de  $^{241}\text{Am}$  ( $1631 \text{ s}^{-1}$ ) e as son-  
das.

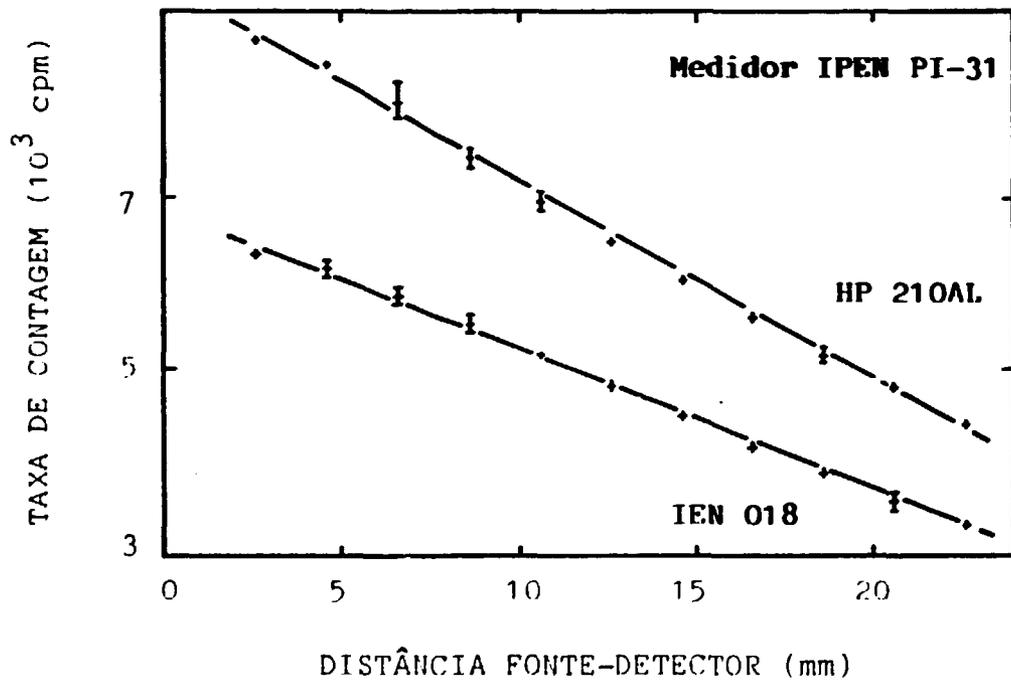


Fig. III-12 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{14}\text{C}$  ( $2946 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

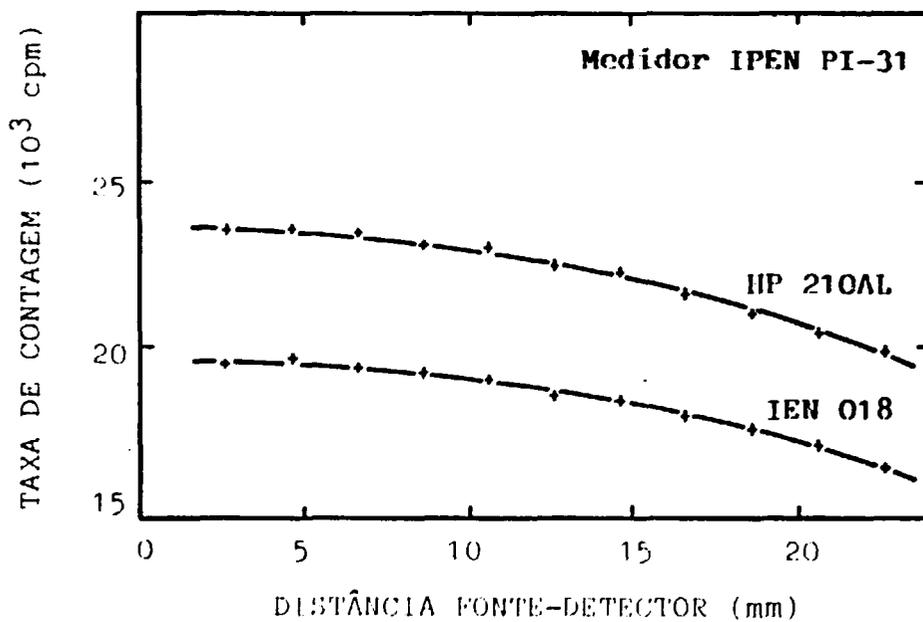


Fig. III-13 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{36}\text{Cl}$  ( $3092 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

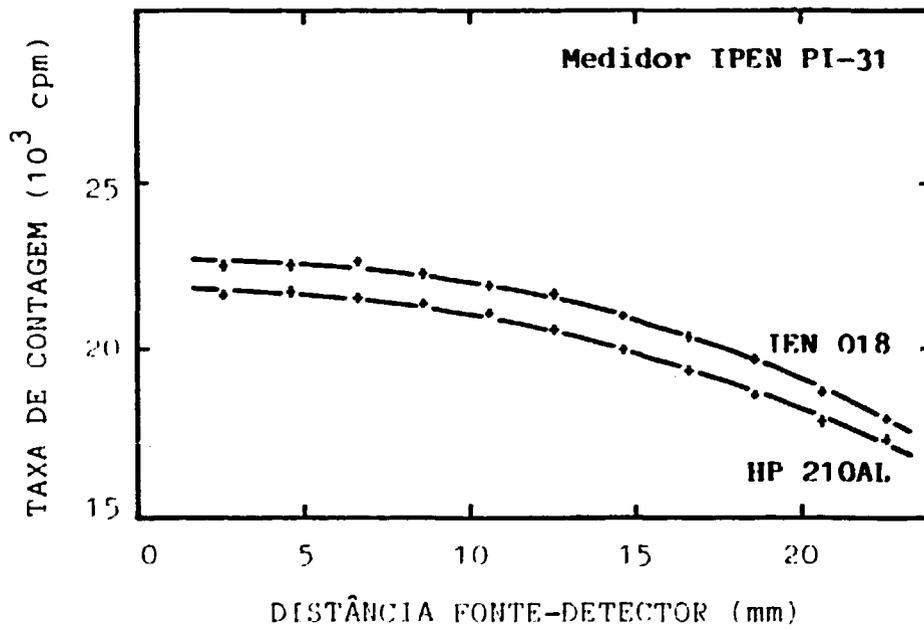


Fig. III-14 : Variação da resposta dos detectores GM com a distância entre a fonte de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  ( $2930 \text{ s}^{-1}$ ) e as sondas.

densidade superficial de  $9,5 \text{ mg.cm}^{-2}$ . Com a sonda IEN 018 acoplada ao monitor IPEN PI-31 foram tomadas para cada distância 5 medidas de 1 minuto com a fonte coberta e 5 medidas de 1 minuto com a fonte não coberta. Verificou-se que para distâncias entre 2,90 e 12,90 mm a influência da radiação gama nas medidas, obtida pela razão entre as leituras obtidas com absorvedor e as leituras obtidas sem absorvedor, foi menor que 1%.

Posteriormente esse estudo foi realizado com outros emissores alfa para as sondas IEN 018 e HP 210AL fixando a distância em 3,4 mm (Tabela III-6). A maior influência da radiação gama nas medidas foi observada para o  $^{233}\text{U}$  obtendo-se 4,8% e a menor foi observada para o  $^{239}\text{Pu}$  obtendo-se 0,18% no caso da sonda HP 210AL e 0,11% no caso da sonda IEN 018. Os desvios padrões da média das medidas variaram no caso da fonte com absorvedor entre 2,24 e 27,3% e no caso da fonte sem absorvedor, entre 0,21 e 2,01%.

## c<sub>2</sub>) Contador Proporcional

O teste de variação com a distância no caso do contador proporcional foi feito com as fontes LMRI alfa (Tabela II-1) no intervalo de 1,35 e 11,35 mm. A distância mínima de 1,35 mm foi possível porque a geometria do contador proporcional permitia colocá-lo sobre a fonte. No caso da fonte extensa de  $^{241}\text{Am}$ , a distância mínima foi de 3,20 mm.

Observou-se ao utilizar as fontes com as taxas de emissão mais baixas, que as oscilações do medidor eram

TABELA III-6

RESPOSTA (cpm) DOS DETECTORES GEIGER-MÜLLER A DIFERENTES  
FONTES DE RADIAÇÃO ALFA COM E SEM PRESENÇA DE ABSORVEDOR  
DE PAPEL ( $9,5 \text{ mg.cm}^{-2}$ )

Distância fonte-detector: 3,4mm

Medidor: IPEN PI-31

A: Fonte com absorvedor

B: Fonte sem absorvedor

Fonte	Sonda			
	HP 219AL		IEN 018	
	A	B	A	B
$^{235}\text{U}$ ( $171,8 \text{ s}^{-1}$ )	57	1185	55	1151
$^{237}\text{Pu}$ ( $2110 \text{ s}^{-1}$ )	37	19727	20	17204
$^{238}\text{Pu}$ ( $1140 \text{ s}^{-1}$ )	22	13651	22	8893
$^{241}\text{Am}$ ( $1773 \text{ s}^{-1}$ )	198	21946	172	18006
$^{244}\text{Cm}$ ( $1700 \text{ s}^{-1}$ )	87	21997	54	18028

muito grandes e conseqüentemente aumentavam o erro associado à leitura. No caso das fontes alfa com as taxas de emissão mais altas, o comportamento do detector pode ser melhor observado (Figs. III-15 a III-20). Esses resultados foram obtidos na região central do detector.

Posteriormente todas as medidas foram feitas para as três regiões do detector (Tabelas III-7). Pode-se observar que essas 3 regiões apresentam para uma mesma distância diferentes taxas de contagem. Comparando-se os resultados, verifica-se que o desvio padrão percentual varia entre 1 e 10% para cada distância considerada.

No caso das fontes testadas de radiação beta (Tabela II-3), o contador proporcional apresentou uma resposta igual à radiação de fundo.

### **c<sub>3</sub>) Cintilador**

O estudo de variação com a distância entre as fontes e o cintilador foi realizado com o mesmo arranjo utilizado no caso dos detectores GM. A distância foi variada de 2,90 a 12,90 mm para as fontes LMRI alfa (Figs. III-21 a III-26). Para as fontes beta o cintilador apresentou uma resposta igual à radiação de fundo.

### **d) Determinação dos Fatores de Calibração**

Os monitores de contaminação foram calibrados com fontes de radiação alfa e beta. No caso da radiação alfa utilizou-se a fonte extensa de  $^{241}\text{Am}$  com taxa de emissão de  $1631 \text{ s}^{-1}$  e no caso da radiação beta utilizou-se a fonte

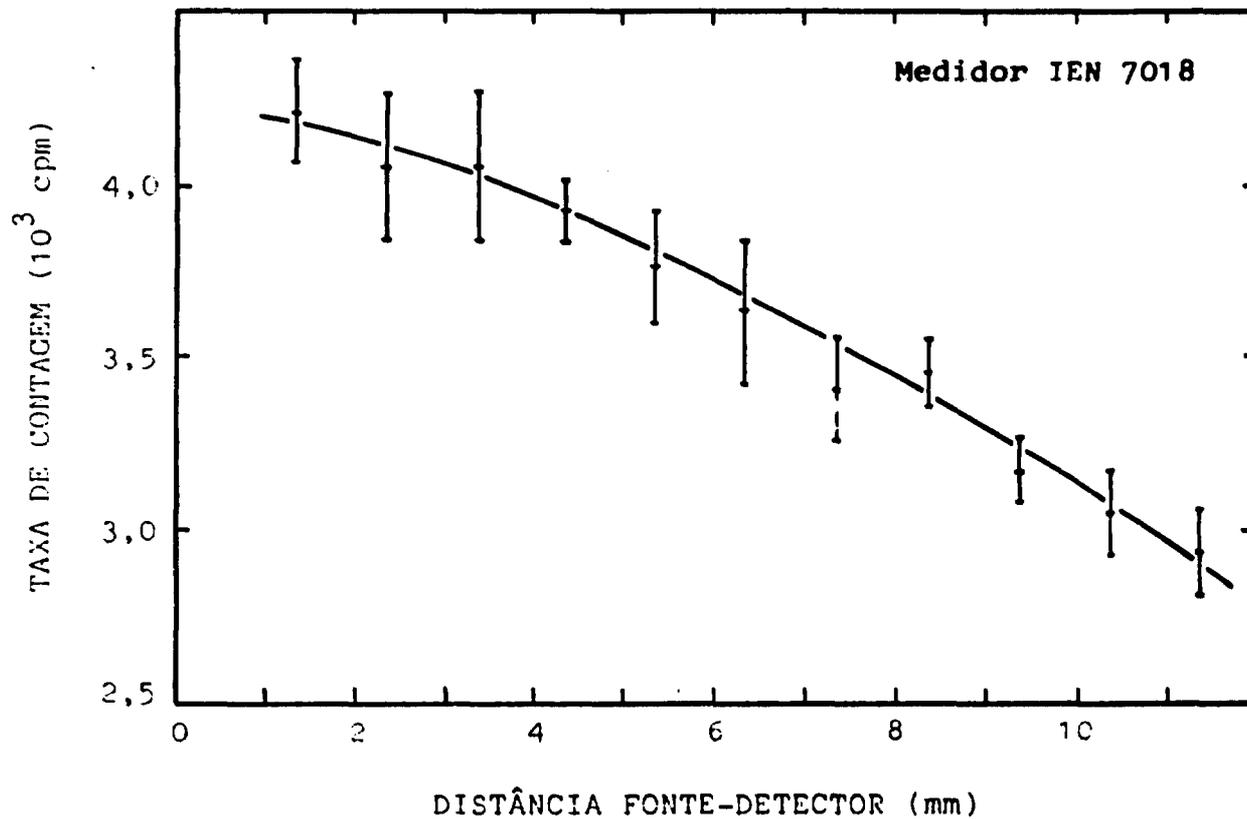


Fig.III-15: Variação da resposta do Contador Proporcional com a distância entre a fonte de  $^{233}\text{U}$  ( $171,8 \text{ s}^{-1}$ ) e a região central do detector.

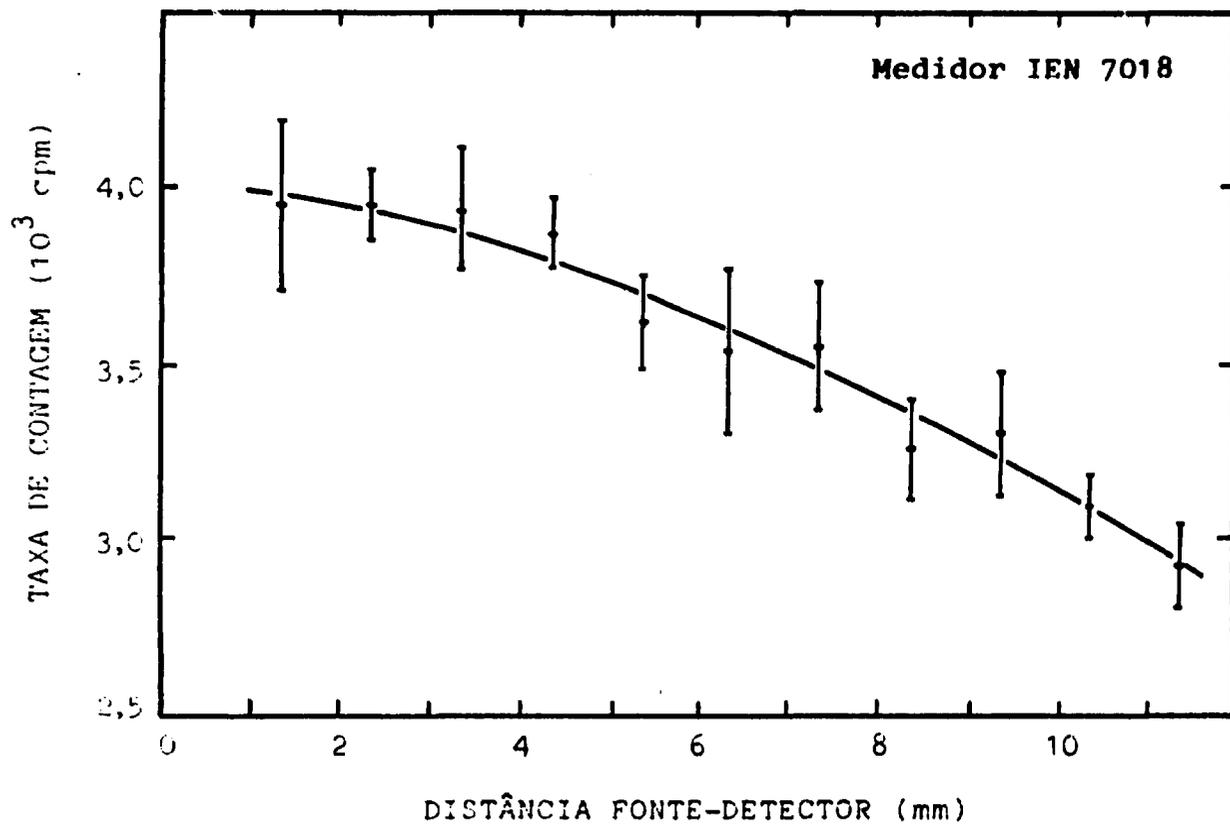


Fig. III-16: Variação da resposta do Contador Proporcional com a distância entre a fonte de  $^{239}\text{Pu}$  ( $165,3 \text{ s}^{-1}$ ) e a região central do detector.

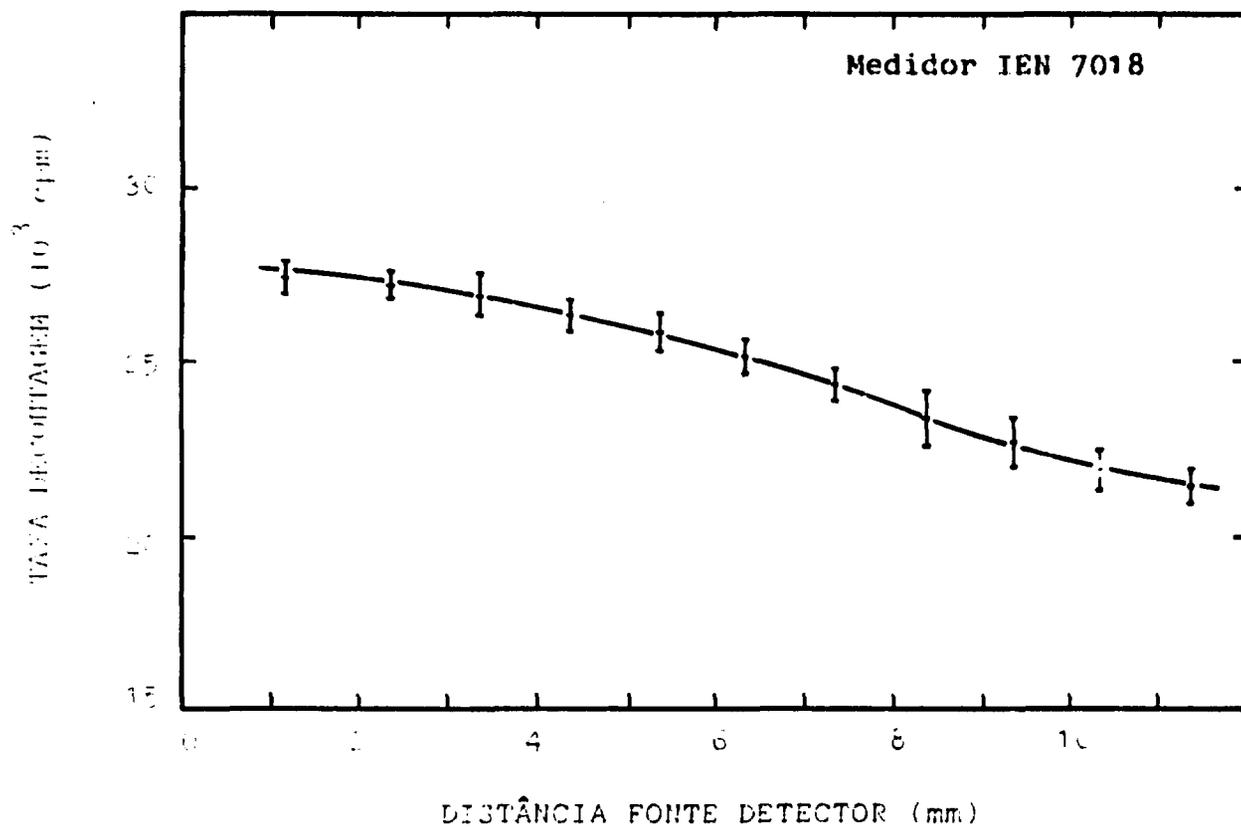


Fig. III-17 : Variação da resposta do Contador Proporcional com a distância entre a fonte de  $^{238}\text{Pu}$  ( $1140 \text{ s}^{-1}$ ) e a região central do detector.

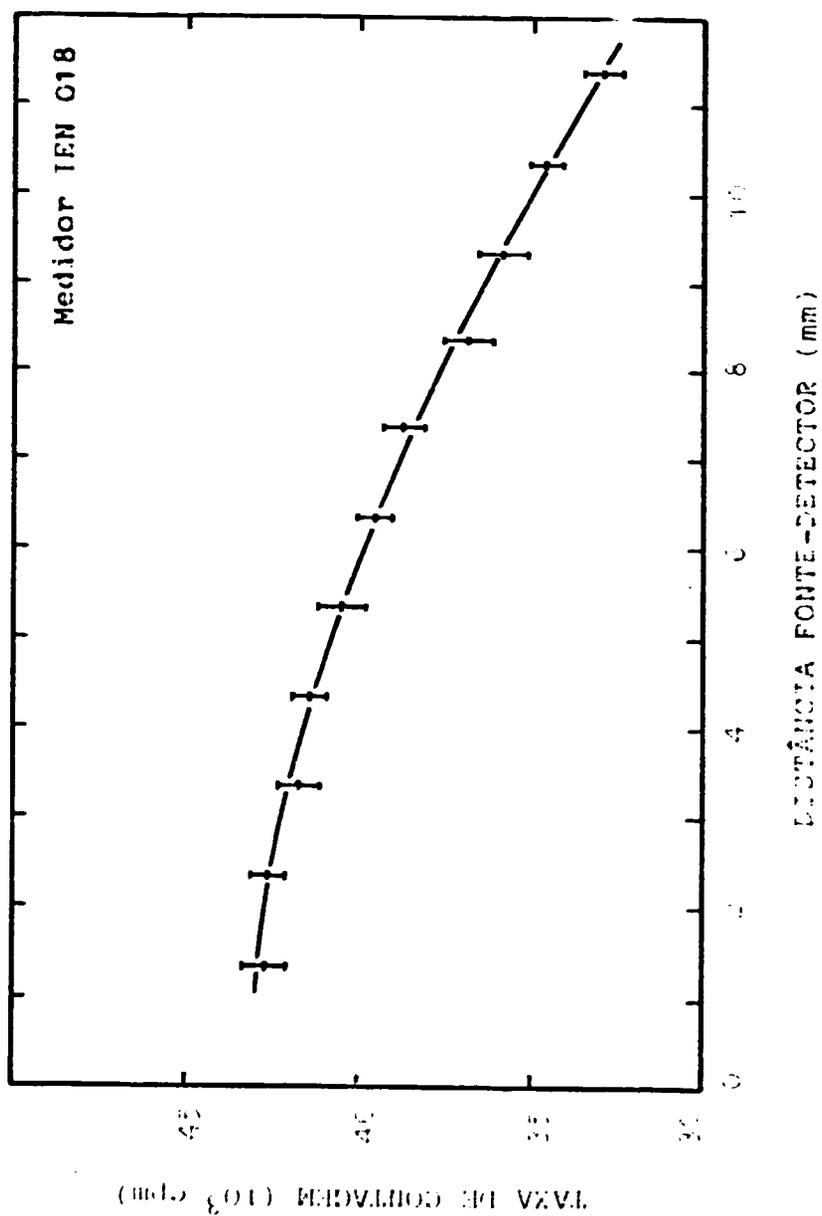


FIG. III-18 : Variação da resposta do Contador Proporcional com a distância entre a fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $1773 \text{ s}^{-1}$ ) e a região central do detector.

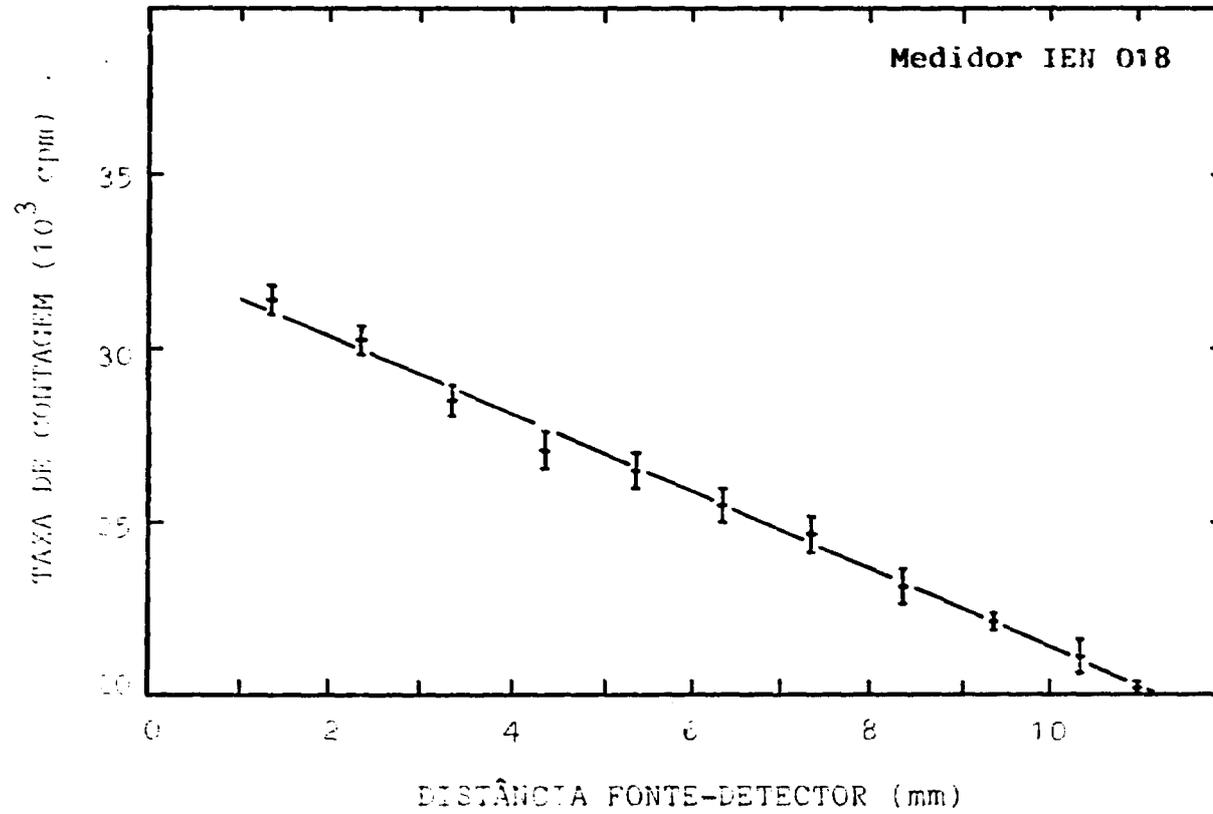


Fig. III-19 : Variação da resposta do Contador Proporcional com a distância entre a fonte de  $^{244}\text{Cm}$  ( $1700 \text{ s}^{-1}$ ) e a região central do detector.

TABELA III-7a

RESPOSTA DO DETECTOR PROPORCIONAL (cpm) PARA AS FONTES DE  
 RADIAÇÃO ALFA DE  $^{239}\text{Pu}$  E  $^{241}\text{Pu}$  A DIFERENTES DISTÂNCIAS  
 FONTE-DETECTOR  
 $C_1, C_2, C_3$ : Regiões do detector, sendo  $C_2$  a região central

$^{239}\text{Pu}$ ( $100,5 \text{ s}^{-1}$ )				$^{241}\text{Pu}$ ( $165,3 \text{ s}^{-1}$ )			
d(mm)	$C_1$	$C_2$	$C_3$	d(mm)	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1,35	4210	4220	4570	1,35	3940	3930	4140
2,35	4120	4260	4460	2,35	3940	3950	4010
3,35	4070	4200	4160	3,35	3710	3740	3950
4,35	4140	4230	4190	4,35	3540	3860	3890
5,35	3820	4100	4300	5,35	3670	3610	3970
6,35	3710	3980	4170	6,35	3380	3540	3560
7,35	3570	4010	4030	7,35	3210	3550	3630
8,35	3530	3730	3730	8,35	3060	3270	3400
9,35	3420	3700	3960	9,35	3030	3300	3450
10,35	3580	3530	3700	10,35	2900	3090	3260
11,35	3110	3470	3750	11,35	2700	2920	3240

TABELA III-7b

RESPOSTA DO DETECTOR PROPORCIONAL (cpm) PARA A FONTE DE  
RADIACÃO ALFA DE  $^{241}\text{Am}$  E  $^{244}\text{Cm}$  A DIFERENTES DISTÂNCIAS  
FONTE-DETECTOR

$C_1, C_2, C_3$ : Regiões do detector, sendo  $C_2$  a região central

$^{241}\text{Am}$ (167,2 s <sup>-1</sup> )				$^{244}\text{Cm}$ (142,1 s <sup>-1</sup> )			
d(mm)	$C_1$	$C_2$	$C_3$	d(mm)	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1,35	3980	4100	4140	1,35	3190	3320	3490
2,35	3870	4100	3970	2,35	3160	3320	3420
3,35	3680	4020	3940	3,35	3200	3260	3350
4,35	3610	3810	3890	4,35	3040	3270	3430
5,35	3460	3710	3900	5,35	2980	3050	3240
6,35	3440	3720	3740	6,35	2900	2940	3190
7,35	3420	3520	3770	7,35	2830	2970	3270
8,35	3110	3450	3710	8,35	2880	2970	3020
9,35	2960	3280	3320	9,35	2510	2660	3040
10,35	2940	3150	3470	10,35	2500	2640	2800
11,35	2770	3170	3360	11,35	2500	2480	2850

TABELA III-7c

RESPOSTA DO DETECTOR PROPORCIONAL (cpm) PARA A FONTE DE  
RADIACÃO ALFA DE  $^{235}\text{U}$  A DIFERENTES DISTÂNCIAS  
FONTE-DETECTOR

$C_1, C_2, C_3$ : Regiões do detector, sendo  $C_2$  a região central

d (mm)	$^{235}\text{U}$ ( $171,8 \text{ s}^{-1}$ )		
	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1,35	4090	4220	4110
2,35	3930	4060	4140
3,35	3860	4060	4120
4,35	3650	3930	4150
5,35	3530	3760	4050
6,35	3400	3640	3980
7,35	3230	3410	3730
8,35	3130	3450	3560
9,35	3070	3180	3540
10,35	2820	3050	3480
11,35	2610	2940	3270

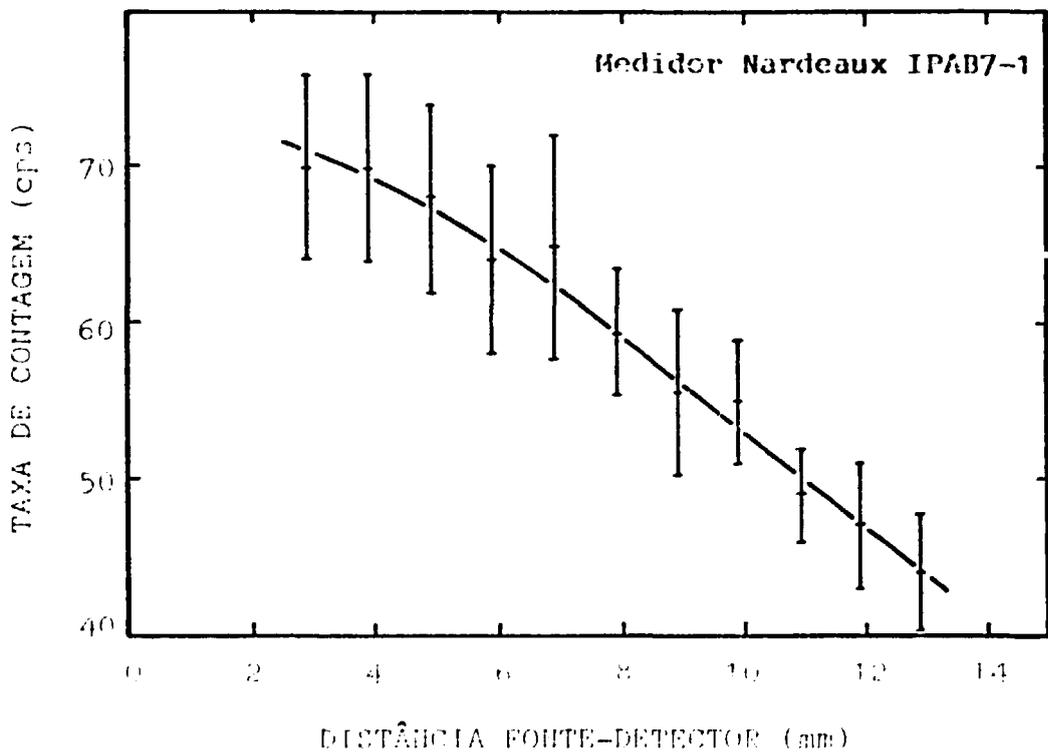


Fig. III-31 : Variação da resposta do Detector de Cintilação com a distância entre a fonte de  $^{233}\text{U}$  ( $171,8 \text{ s}^{-1}$ ) e a sonda.

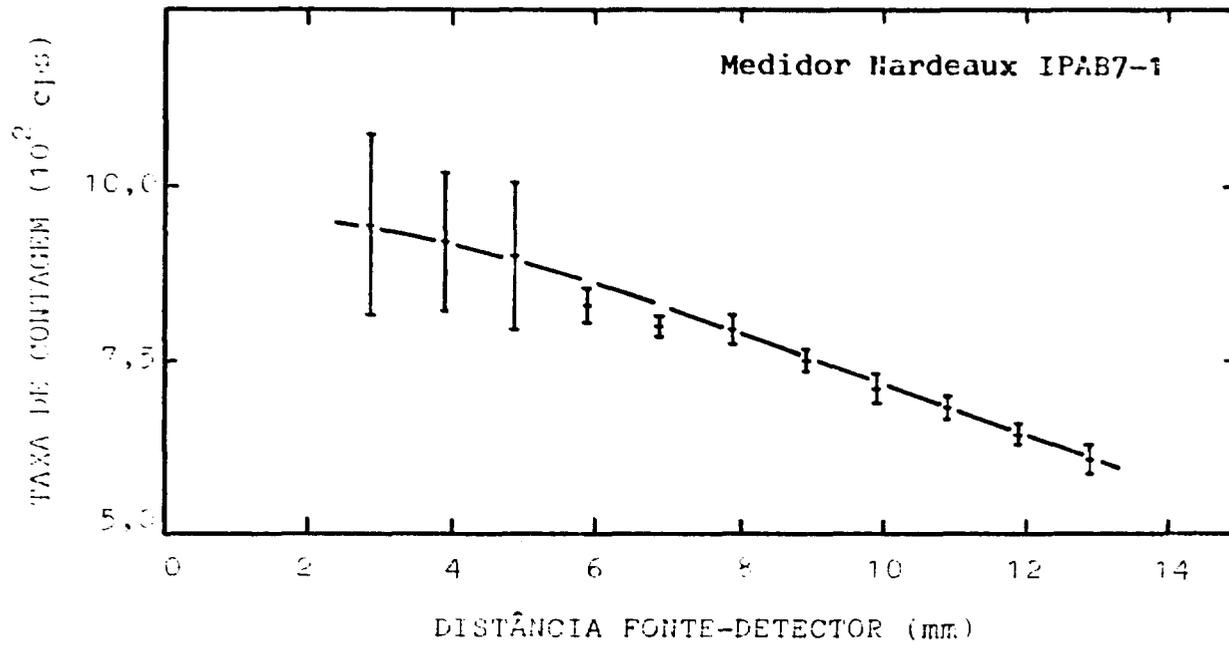


Fig. III-22 : Variação da resposta do Detector de Cintilação com a distância entre a fonte de  $^{238}\text{Pu}$  ( $2110 \text{ s}^{-1}$ ) e a sonda.

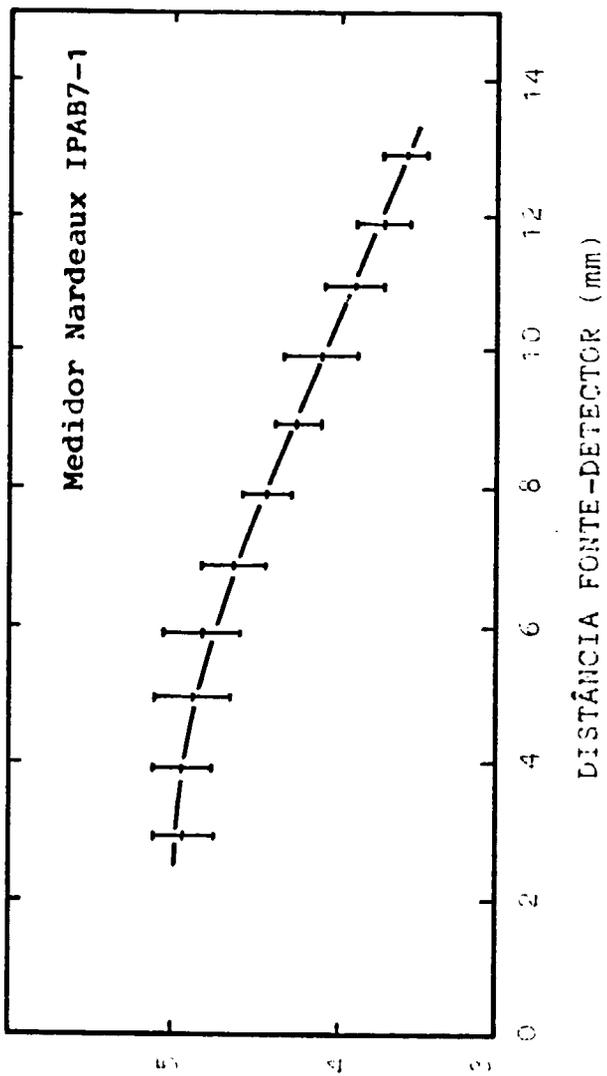


Fig. III-23 : Variação da resposta do Detector de Cintilação com a distância entre a fonte de  $^{238}\text{Pu}$  ( $1140 \text{ s}^{-1}$ ) e a sonda.

(CPM) (CONTAGEM POR SEGUNDO)

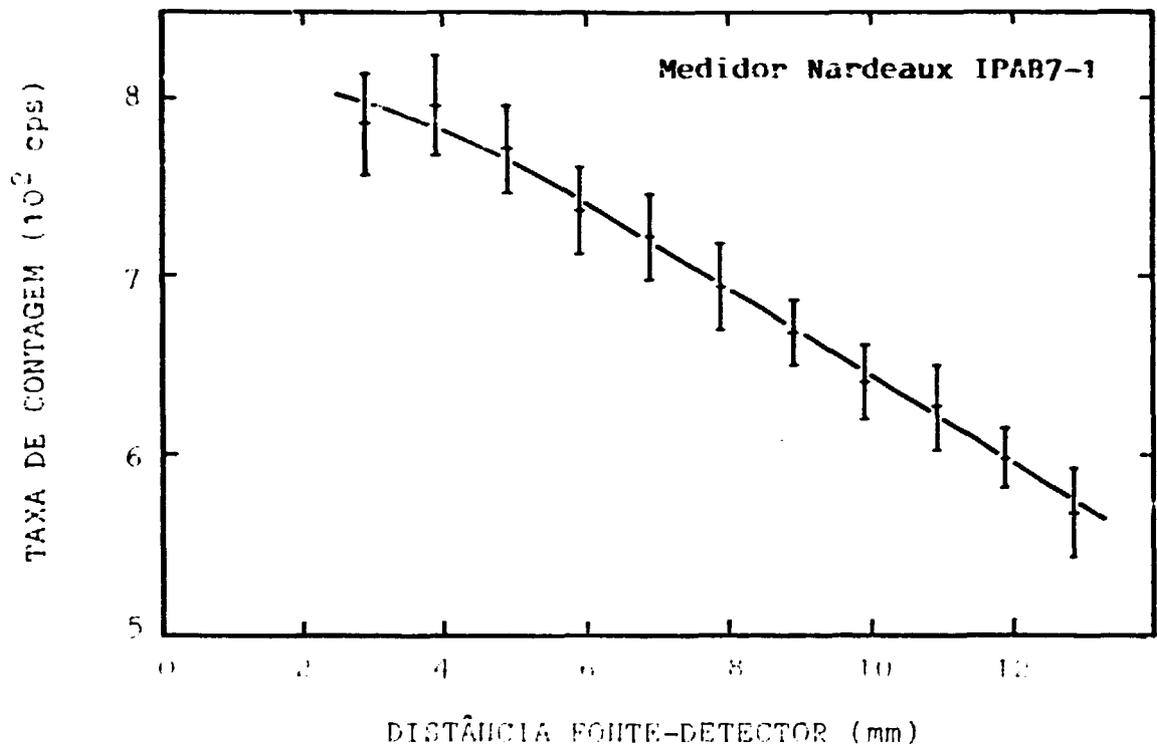


Fig. III-24 : Variação da resposta do Detector de Cintilação com a distância entre a fonte de  $^{241}\text{Am}$  ( $1773 \text{ s}^{-1}$ ) e a sonda.

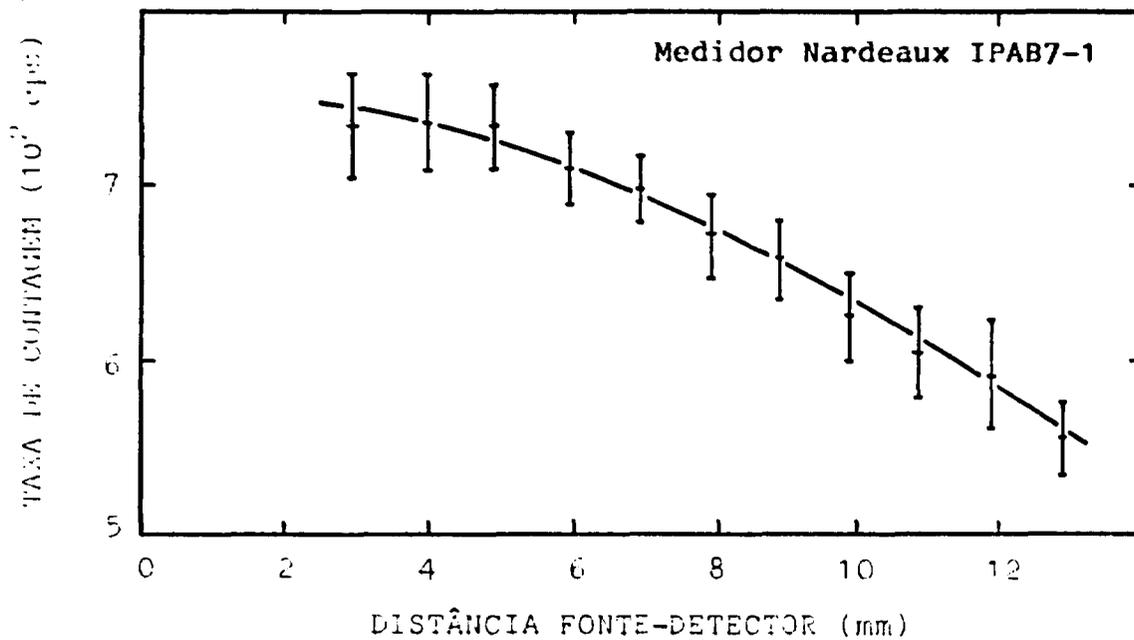


Fig. III-25 : Variação da resposta do Detector de Cintilação com a distância entre a fonte de  $^{244}\text{Cm}$  ( $1700 \text{ s}^{-1}$ ) e a sonda.

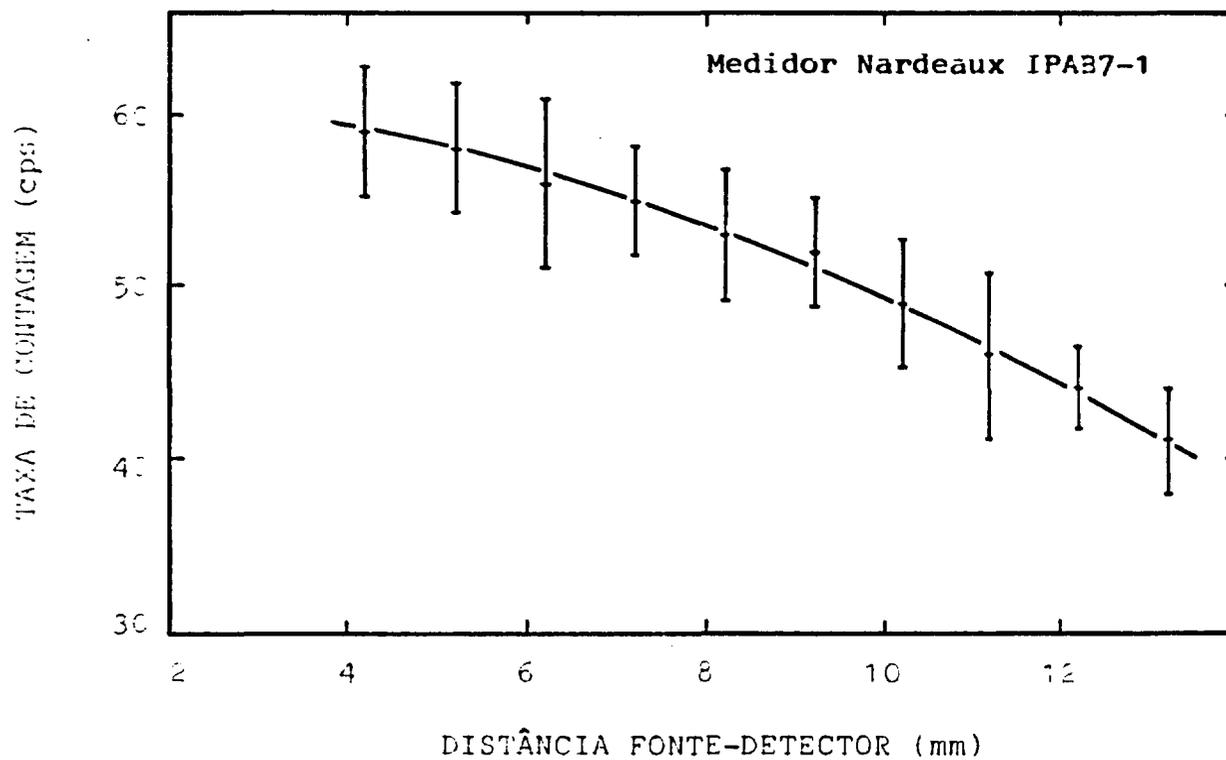


Fig. III-26 : Variação do Detector de Cintilação com a distância entre a fonte extensa de  $^{241}\text{Am}$  ( $1631 \text{ s}^{-1}$ ) e a sonda.

extensa de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  com taxa de emissão de  $2930 \text{ s}^{-1}$ . Os resultados obtidos encontram-se respectivamente nas Tabelas III-8 e III-9 . .

### **e) Dependência Energética**

Os detectores foram submetidos sucessivamente aos campos padrões das fontes LMRI alfa (Tabela II-1 e II-2) a uma distância de 1,34 mm e das fontes LMRI beta (Tabela II-3) a uma distância de 2,55 mm. Os resultados obtidos, apresentados em termos de fatores de correção para dependência energética, foram normalizados para  $^{241}\text{Am}$  no caso da radiação alfa e para  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  no caso da radiação beta.

### **e<sub>1</sub>) Detector Geiger-Müller**

Os testes de dependência energética dos detectores Geiger-Müller foram realizados com os medidores IPEN PI-31 e IEN 7013 no caso da radiação alfa e com o medidor PI-31 no caso da radiação beta. As medidas foram realizadas com os detectores posicionados de forma reprodutível no encaixe de PVC sobre as fontes.

Os estudos realizados de dependência energética demonstram que esses detectores apresentam uma dependência energética decrescente com a energia, tanto para radiação alfa como para radiação beta (Tabelas III-10, III-11 e III-12).

Nas Tabelas III-10 e III-11 pode-se observar que para energias compreendidas entre 4,804 e 5,745 MeV a

TABELA III-8

FATOR DE CALIBRAÇÃO (Fc) DOS MONITORES DE CONTAMINAÇÃO  
 PARA FONTE EXTENSA DE  $^{242}\text{Am}$  ( $1631 \text{ s}^{-1}$ )  
 ue: unidade de escala, onde:  
 cpm para os detectores GM e o contador proporcional  
 e cps para o detector de cintilação.  
 Distância fonte-detector = 0,5 cm

Tipo	Sonda	Medidor	Fc ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{ue}^{-1}$ )
GM	IEN 018	IEN 7013	$(7,23 \pm 0,77) \cdot 10^{-2}$
GM	HP 210AL	IEN 7013	$(5,66 \pm 0,45) \cdot 10^{-2}$
C.Prop.	PA-018	IEN 7018	$(5,23 \pm 0,40) \cdot 10^{-2}$
Cintilador	SIA 7-1	IPAB 7-1	$(2,76 \pm 0,22)$

TABELA III-9

FATOR DE CALIBRAÇÃO (Fc) DOS MONITORES DE CONTAMINAÇÃO  
 PARA FONTE EXTENSA DE  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  ( $2930 \text{ s}^{-1}$ )  
 ue: unidade de escala (cpm)  
 Distância fonte-detector = 0,5 cm

Tipo	Sonda	Medidor	Fc ( $\text{s}^{-1} \cdot \text{ue}^{-1}$ )
GM	IEN 018	IEN 7013	$(3,37 \pm 0,17) \cdot 10^{-2}$
GM	HP 210AL	IEN 7013	$(3,45 \pm 0,17) \cdot 10^{-2}$

TABELA III-10

## DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS DETECTORES GEIGER-MÜLLER PARA FONTES ALFA

F: Fator de Correção para Dependência Energética Normalizado para  $^{241}\text{Am}$  - Medidor IPEN PI-31

Fonte	Energia (MeV)	F	
		HP 210AL	IEN 018
$^{235}\text{U}$ (171,8 s <sup>-1</sup> )	4,783	1,253±0,021	1,188±0,020
	4,824		
$^{237}\text{Pu}$ (165,3 s <sup>-1</sup> )	5,105	1,168±0,020	1,135±0,019
	5,143		
	5,156		
$^{239}\text{Pu}$ (183,5 s <sup>-1</sup> )	5,456	1,046±0,018	1,049±0,027
	5,499		
$^{241}\text{Am}$ (167,2 s <sup>-1</sup> )	5,442	1	1
	5,486		
$^{244}\text{Cm}$ (142,1 s <sup>-1</sup> )	5,666	0,970±0,016	0,997±0,018
	5,763		
	5,805		

TABELA III-11

## DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS DETECTORES GEIGER-MÜLLER PARA FONTES ALFA

F: Fator de Correção para Dependência Energética Normalizado para  $^{241}\text{Am}$  - Medidor IEN 7013

Fonte	Energia	F	
	(MeV)	HP 210AL	IEN 018
$^{235}\text{U}$ (171,8 s <sup>-1</sup> )	4,783	1,295±0,051	1,279±0,059
	4,824		
$^{237}\text{Pu}$ (165,3 s <sup>-1</sup> )	5,105	1,153±0,038	1,167±0,069
	5,143		
	5,156		
$^{239}\text{Pu}$ (183,5 s <sup>-1</sup> )	5,456	0,987±0,034	1,098±0,055
	5,499		
$^{241}\text{Am}$ (167,2 s <sup>-1</sup> )	5,442	1	1
	5,486		
$^{244}\text{Cm}$ (142,1 s <sup>-1</sup> )	5,666	0,960±0,032	0,992±0,042
	5,763		
	5,805		

TABELA III-12

## DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DOS DETECTORES GEIGER-MÜLLER PARA FONTES BETA

F: Fator de Correção para Dependência Energética Normalizado para  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  - Medidor IPEN PI-31

Fonte	Energia (keV)	F	
		HP 210AL	IEN 018
$^{14}\text{C}$ (2946 $\text{s}^{-1}$ )	156,6	3,497±0,193	4,161±0,231
$^{137}\text{Cs}$ (3465 $\text{s}^{-1}$ )	511,5	1,126±0,020	1,511±0,084
$^{60}\text{Co}$ (3092 $\text{s}^{-1}$ )	709,5	0,995±0,055	1,263±0,070
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (2930 $\text{s}^{-1}$ )	546,0 2274,0	1	1

dependência energética para radiação alfa foi cerca de 32% para a sonda HP 210AL e cerca de 24% para a sonda IEN 018, considerando-se as incertezas associadas aos fatores.

No caso da radiação beta, obteve-se para energias entre 511,5 e 2.274 keV uma dependência energética de 12,6% para a sonda HP 210AL e de 51,1% para a sonda IEN 018 (Tabela III-12).

### **e<sub>2</sub>) Contador Proporcional**

O estudo de dependência energética do contador proporcional foi realizado com a sonda acoplada ao medidor IEN 7018. .

Os resultados obtidos, apresentados na Tabela III-13, demonstram que, em relação aos detectores Geiger-Müller, o contador proporcional apresenta dependência energética muito menor. Para a mesma faixa de energia estudada anteriormente (4,804 a 5,745 MeV), o detector apresentou uma dependência de apenas 5,1%.

No caso da radiação beta esse detector apresentou uma resposta da ordem da radiação de fundo.

### **e<sub>3</sub>) Cintilador**

As medidas de dependência energética foram realizadas com o detector posicionado no arranjo de PVC como no caso dos detectores Geiger-Müller.

TABELA III-13

DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DO CONTADOR PROPORCIONAL PARA  
FONTES ALFAF: Fator de Correção para Dependência Energética  
Normalizado para  $^{241}\text{Am}$ 

Fonte	Energia (MeV)	F
$^{239}\text{Pu}$ (171,8 s <sup>-1</sup> )	4,783 4,824	0,998 ± 0,024
$^{237}\text{Pu}$ (165,3 s <sup>-1</sup> )	5,105 5,143 5,156	1,032 ± 0,029
$^{238}\text{Pu}$ (183,5 s <sup>-1</sup> )	5,456 5,499	1,046 ± 0,025
$^{241}\text{Am}$ (167,2 s <sup>-1</sup> )	5,442 5,486	1
$^{244}\text{Cm}$ (142,1 s <sup>-1</sup> )	5,666 5,763 5,805	1,049 ± 0,036

Na faixa de energia em estudo (4,804 a 5,745 MeV), a dependência energética do cintilador foi de 12,8% (Tabela III-14).

Como no caso do contador proporcional, a resposta desse detector para radiação beta foi da ordem da radiação de fundo.

#### **f) Determinação da Eficiência**

Segundo a norma ISO 7503-1 (12), a eficiência de cada detector pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$E_i = (n - n_b) \times (E_{sc} \times W)^{-1}$$

onde

$n$  : Taxa de contagem total da fonte de referência (cps);

$n_b$  : Taxa de contagem da radiação de fundo (cps);

$E_{sc}$ : Taxa de emissão superficial por unidade de área ( $s^{-1} \cdot cm^{-2}$ );

$W$  : Área sensível da janela do detector ( $cm^2$ )

Para o cálculo da eficiência dos monitores de contaminação à radiação alfa e beta foram realizadas medidas utilizando-se respectivamente a fonte extensa de  $^{241}Am$  ( $1631 s^{-1}$ ) e a fonte extensa LMRI de  $^{90}Sr + ^{90}Y$  ( $2930 s^{-1}$ ), para as distâncias de 0,5, 1,0 1,5 cm. No caso de cada detector foram tomadas 10 leituras de 1 minuto. Os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas III-15 e III-16. Verifica-se que o cintilador apresentou a melhor eficiência para a radiação alfa. No caso da radiação beta, os detectores do tipo GM apresentaram aproximadamente a

TABELA III-14

DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DO CINTILADOR PARA FONTES ALFA  
 F: Fator de Correção para Dependência Energética  
 Normalizado para  $^{241}\text{Am}$

Fonte	Energia (MeV)	F
$^{235}\text{U}$ ( $171,8 \text{ s}^{-1}$ )	4,782 4,824	$1,029 \pm 0,042$
$^{237}\text{Pu}$ ( $165,3 \text{ s}^{-1}$ )	5,105 5,143 5,156	$1,034 \pm 0,039$
$^{238}\text{Pu}$ ( $183,5 \text{ s}^{-1}$ )	5,456 5,499	$0,986 \pm 0,031$
$^{241}\text{Am}$ ( $167,2 \text{ s}^{-1}$ )	5,442 5,486	1
$^{244}\text{Cm}$ ( $142,1 \text{ s}^{-1}$ )	5,666 5,763 5,805	$0,916 \pm 0,035$

TABELA III-15

EFICIÊNCIA DOS MONITORES DE CONTAMINAÇÃO PARA RADIAÇÃO  
ALFA DA FONTE EXTENSA DE  $^{241}\text{Am}$  ( $1631 \text{ s}^{-1}$ )

Distância Fonte-Detector (cm)	Eficiência (%)			
	IEN 018	HP 210AL	C.Prop.	Cintilador
0,5	23,0	29,5	32,0	36,3
1,0	16,2	21,0	27,0	30,8
1,5	11,4	10,0	22,9	23,9

Obs: No caso dos detectores GM, o medidor utilizado foi IEN 7013.

TABELA III-16

EFICIÊNCIA DOS MONITORES DE CONTAMINAÇÃO PARA RADIAÇÃO  
BETA DA FONTE EXTENSA DE  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  ( $2930 \text{ s}^{-1}$ )  
Medidor IEN 7013

Distância Fonte-Detector (cm)	Eficiência (%)	
	IEN 018	HP 210AL
0,5	49,5	48,3
1,0	49,2	47,8
1,5	48,0	47,6

mesma eficiência (50%).

A determinação da eficiência pode também ser feita utilizando-se as leituras obtidas com fontes de áreas menores que a área do detector. Neste caso as medidas devem ser feitas sequencialmente de forma a se levar em consideração toda a área sensível do detector.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DOS MONITORES DE CONTAMINAÇÃO**

No processo de calibração de monitores de contaminação alfa e beta os padrões secundários a serem utilizados são as fontes radioativas LMRI (Tabelas II-1 e II-3), LMN (Tabela II-2), e a fonte extensa de  $^{241}\text{Am}$  (descrita no item III-2).

O método de calibração desenvolvido baseou-se nos resultados obtidos nos Cap. II e III. Deste método fazem parte o controle da taxa de emissão das fontes radioativas, os testes de desempenho dos detectores e a calibração periódica dos instrumentos. A metodologia envolvida será discutida, a seguir, separadamente.

#### **IV-1 Controle das Fontes Radioativas**

As fontes radioativas devem ser submetidas periodicamente a um controle de qualidade a ser realizado com o sistema de controle de fontes, descrito no Cap. II. Como já discutido anteriormente, as fontes alfa utilizadas não são seladas e portanto requerem cuidados especiais no seu manuseio. O controle de qualidade tem como objetivo verificar a taxa de emissão das fontes, levando-se em conta o decaimento radioativo. Essa verificação é feita com

o sistema de detecção acoplado ao contador temporizador, com o qual são feitas 10 leituras de 1 minuto. A média destas medidas deverá ser comparada com um valor de referência para cada fonte, aceitando-se até 2% de desvio.

#### **IV-2 Testes de Desempenho**

Os testes de estabilidade a curto e médio prazos, linearidade da resposta, dependência energética e variação com a distância entre a fonte e o detector, descritos no Cap. III, constituem neste caso os testes de desempenho dos monitores. Esses testes só serão aplicados aos detectores recém-fabricados ou que foram descaracterizados por conserto, como por exemplo no caso de uma substituição de um tipo de tubo GM por um outro, ou ainda por uma solicitação especial do usuário.

##### **a) Estabilidade a Curto e Médio Prazos**

Com o monitor posicionado de forma reprodutível sobre uma fonte alfa ( $^{241}\text{Am}$ ) devem ser realizadas para o teste de estabilidade a curto prazo 10 medidas de 1 minuto. Determina-se o valor médio e o desvio padrão da média destas medidas, que não deverá ser maior que 5%. Para o teste de estabilidade a médio prazo repete-se essa experiência 10 vezes em dias diferentes sob condições idênticas, aceitando-se valores para o desvio padrão da média do valor de referência até de 2%.

### **b) Linearidade**

Para esse estudo utilizam-se fontes de  $^{241}\text{Am}$  com taxas de emissão distintas entre 55,3 e 11100  $\text{s}^{-1}$ , dependendo do monitor. Para cada fonte são realizadas, de forma reprodutível, 10 leituras de 1 minuto. A razão entre a média das leituras e a taxa de emissão de cada fonte deve ser constante, aceitando-se até 5% de variação.

### **c) Variação da Resposta com a Distância Fonte-Detector**

O detector deve ser posicionado no arranjo experimental, descrito no item III-c, que possibilita a variação com a distância fonte-detector de forma reprodutível. No caso dos detectores Geiger-Müller e do cintilador, a distância é variada entre 2,90 e 12,90 mm e no caso do contador proporcional, entre 1,35 e 11,35 mm, com intervalo de 1 mm para fontes alfa e de 2 mm para fontes beta. Para cada posição devem ser realizadas 10 leituras de 1 minuto.

## **IV-3 Calibração Periódica**

Os monitores de contaminação de superfície deverão ser calibrados anualmente ou após algum reparo (1,2). A calibração consiste em se determinar o fator de calibração e a eficiência do instrumento para emissores alfa e/ou

beta.

O procedimento da calibração periódica pode ser descrito pelas seguintes etapas:

1) Determinação da taxa de contagem da radiação de fundo através de 10 leituras de 1 minuto, calculando-se o valor médio e o desvio padrão associado;

2) Determinação do fator de calibração para radiação alfa e beta através da relação:

$$F_c = (E_{sc} \times W) \cdot (n - n_b)^{-1}$$

onde

$n$  : Taxa de contagem total da fonte de referência (ue);

$n_b$  : Taxa de contagem da radiação de fundo (ue);

$E_{sc}$  : Taxa de emissão superficial da fonte por unidade de área ( $s^{-1} \cdot cm^{-2}$ );

$W$  : Área sensível da janela do detector ( $cm^2$ ).

3) Determinação da eficiência do instrumento para uma fonte extensa (alfa ou beta) através da relação:

$$E_i = (n' - n'_b) \cdot (E_{sc} \times W)^{-1}$$

onde

$n'$  : Taxa de contagem total da fonte de referência (cps);

$n_b'$  : Taxa de contagem da radiação de fundo (cps).

Para esse cálculo são realizadas 10 leituras de 1 minuto com o detector posicionado a 0,5, 1,0 e 1,5 cm da fonte. A eficiência do detector é calculada para essas três distâncias.

No caso do usuário necessitar para o seu instrumento de um fator de calibração e de sua eficiência para uma fonte diferente das fontes extensas existentes no Laboratório de Calibração de Instrumentos, serão utilizadas as fontes com áreas ativas pequenas. Nesse caso, são realizadas medidas sequenciais de forma a se considerar toda a área sensível do detector.

Um certificado de calibração periódica para radiação alfa e beta é apresentado no Anexo I, no caso do instrumento Geiger-Müller IEN 018, modelo 7A003, utilizado no estudo do Cap.III.

## CONCLUSÕES

O sistema de controle de fontes radioativas projetado e construído neste trabalho foi testado quanto à estabilidade a curto e médio prazos, linearidade e dependência energética. Seus resultados mostraram a viabilidade de seu emprego no controle de qualidade das fontes radioativas utilizadas na calibração dos monitores de contaminação.

O projeto permite o acoplamento do sistema a três arranjos eletrônicos distintos, sendo dois tipos diferentes de eletrômetros e um contador temporizador, dependendo apenas do divisor de tensão que pode ser facilmente trocado.

Os testes foram realizados para dois cintiladores plásticos de espessuras distintas (1 e 3mm), tendo-se verificado que o plástico mais fino apresenta maior eficiência para radiação alfa (91,8%), baixa sensibilidade para radiação gama, e ainda pode ser utilizado para detecção de radiação beta com uma eficiência comparável com a apresentada pelo plástico de 3 mm.

Em relação ao arranjo eletrônico, optou-se pelo contador temporizador, devido aos melhores resultados apresentados e por ser mais prático entre os três sistemas.

Um estudo sobre o desempenho de monitores de contaminação do tipo Geiger-Müller, contador proporcional e cintilador, foi realizado em campos padrões de radiação alfa

e beta. Esses detectores apresentaram uma boa estabilidade a curto e médio prazos, obtendo-se desvios padrões da média percentuais máximos de 2,8% apenas no caso de fontes com taxas de emissão baixas. A linearidade da resposta foi verificada entre  $7 \times 10^2$  e  $1 \times 10^5$  cpm para os detectores GM, entre 70 e  $4 \times 10^4$  cpm para o contador proporcional e entre 20 e  $5 \times 10^3$  cps para o cintilador.

O estudo da variação da resposta com a distância fonte-detector foi realizado com o objetivo de se verificar a perda da eficiência à medida que o detector se afasta da fonte. No caso da radiação alfa, entre 0,5 e 1,5 cm, o valor da eficiência diminuiu mais de 50% para os detectores GM e aproximadamente 30% para o contador proporcional e para o cintilador. Entre todos os detectores, o cintilador apresentou maior eficiência para radiação alfa.

A dependência energética dos monitores de contaminação foi estudada em relação às fontes alfa de  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  e  $^{244}\text{Cm}$  e às fontes beta de  $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  e  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ . Verificou-se que o contador proporcional apresenta a menor dependência energética para radiação alfa (5,1%).

Entre os trabalhos futuros está previsto o desenvolvimento de uma câmara de ionização de volume variável (câmara de extrapolação) para detecção de contaminação radioativa alfa e beta de superfícies.

**Referências Bibliográficas**

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Monitoring of radioactive contamination on surfaces. Vienna, 1970. (Technical report series, 120).
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Handbook on calibration of radiation protection monitoring instruments. Vienna, 1971. (Technical report series, 133).
3. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Reference sources for the calibration of surface contamination monitors. 1988. (ISO Standard 8769 (E)).
4. BURCHAM, W.E. Nuclear physics, London, Longmans Green, 1963. p. 22-4.
5. EVANS, R.D. The atomic nucleus, New York, N.Y., McGraw-Hill, 1955. p. 511-64.
6. KAPLAN, I. Física nuclear. 2.ed. Rio de Janeiro, R.J., Guanabara Dois, 1978. p. 266-8.
7. BURCHAM, W.E. Nuclear physics, London, Longmans Green, 1963. p. 149-52.
8. KNOLL, G. F. Radiation detection and measurement, 2.ed. New York, N.Y., John Wiley, 1989. p. 44-5.
9. TSOULFANIDIS, N. Measurement and detection of radiation. New York, N.Y., Hemisphere, 1983. p. 125-33.

10. MAFRA, D. Y. Introdução às técnicas e medidas nucleares.  
São Paulo, S.P., Edgard Bucher, 1973. p. 14.
11. PRICE, W. J. Nuclear radiation protection. 2. ed. New York,  
N.Y., McGraw-Hill, 1964. p. 17-9.
12. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Evaluation of  
surface contamination. Part I: Beta emitters  
(maximum beta energy greater than 0.15 MeV) and alpha  
emitters. 1988. (ISO Standard 7503-1).
13. OBERHOFER, M. Radiation protection instruments for area  
monitoring. Ispra, CEC, 1983. (EUR 8616).
14. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Directrizes básicas  
de radioproteção. Rio de Janeiro, 1988. (CNEN NE-3.01).
15. STEPHENSON, J., BRUCE, G. S. A calibration jig for surface  
contamination. Harwell, Atomic Energy Research  
Establishment, UKAEA Research Group, 1969.  
(AERE-M-2201).
16. MERCER, R.A. Standards of radioactive surface contamination.  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 225 : 435-7, (1984).
17. KNOLL, G.F. Radiation detection and measurement. 2.ed.  
New York, N.Y., John Wiley, 1989. p. 160-98.
18. TSOULFANIDIS, N. Measurement and detection of radiation.  
New York, N.Y., Hemisphere, 1983. p. 176-216.

19. OUSEPH, P.J. Introduction to nuclear radiation detectors. New York, N.Y., Plenum, 1975. p. 83-III. (Laboratory instrumentation and technique, 2).
20. PRICE, W.J. Nuclear radiation protection. 2.ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 1964. p. 212-20.
21. HAMADA, M. & MESQUITA, C.H. Preparação de detectores plásticos cintiladores e caracterização de parâmetros físico-químicos. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 1988. (Publicação IPEN 216).
22. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. A handbook of radioactivity measurements procedures. Nov. 1, 1978. (NCRP - 58).
23. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Alpha, beta and alpha-beta contamination meters and monitors. 1981. (IEC - 325).

ANEXO 1

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
IPEN-CNEN/SP**

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO  
Nº 01/91**

**LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS  
DEPARTAMENTO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA  
DATA DE CALIBRAÇÃO: 10/04/91**

---

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
IPEN-CNEN/SP**

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 01/91**

**PROPRIETÁRIO : INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES, CNEN  
RUA DO MATÃO, TRAVESSA R,400  
CIDADE UNIVERSITÁRIA, SÃO PAULO**

**1 - ESPECIFICAÇÕES DO INSTRUMENTO:**

- a) Sonda:  
 Fabricante : IEN-CNEN/RJ  
 Modelo : 7A003  
 Série : 018
- b) Medidor:  
 Fabricante : IEN-CNEN/RJ  
 Modelo : 7013  
 Série : 024

**2 - FONTES PADRÕES UTILIZADAS:**

FONTE	ÁREA ATIVA (cm <sup>2</sup> )	TAXA DE EMIÇÃO (s <sup>-1</sup> )	DATA DE REFERÊNCIA	INCERTEZA (%)
<sup>241</sup> Am	0,785	55,3	29-03-90	4,6
<sup>241</sup> Am	0,785	496,5	01-06-90	1,5
<sup>241</sup> Am	0,785	2305,9	30-08-90	2,0
<sup>241</sup> Am	0,785	11100,0	29-03-90	1,0
<sup>241</sup> Am	304,8	1631,0	12-07-89	5,0
<sup>90</sup> Sr + <sup>90</sup> Y	63,61	2930,0	04-03-89	3,9

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
IPEN-CNEN/SP**

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 01/91**

**3 - LINEARIDADE:**

Foi verificada entre  $7 \cdot 10^2$  e  $1 \cdot 10^5$  cpm, utilizando-se as fontes de  $^{241}\text{Am}$  com taxas de emissão entre 55,3 e  $11100 \text{ s}^{-1}$ .

**4 - CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DURANTE A CALIBRAÇÃO:**

Temperatura : 23,3 °C  
Pressão : 93,0 kPa  
Umidade Relativa do Ar : 65%

**5 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS DE REFERÊNCIA:**

Temperatura : 20,0 °C  
Pressão : 101,3 kPa  
Umidade Relativa do Ar : 50%

**6 - FATORES DE CALIBRAÇÃO:**

Os fatores de calibração foram determinados para radiação alfa e beta para uma distância fonte-detector de 0,5 cm:

a) Radiação alfa:

Fonte:  $^{241}\text{Am}$  ( $1631 \text{ s}^{-1}$ )

$$F_c = (7,23 \pm 0,77) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \text{ue}^{-1}$$

b) Radiação beta:

Fonte:  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  ( $2930 \text{ s}^{-1}$ )

$$F_c = (3,37 \pm 0,17) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot \text{ue}^{-1}$$

onde ue: unidade de escala (cpm)

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
IPEN-CNEN/SP**

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 01/91**

**7 - EFICIÊNCIA DO INSTRUMENTO:**

FONTE	DISTÂNCIA FONTE-DETECTOR (cm)	EFICIÊNCIA (%)
$^{241}\text{Am}$ (1631 s <sup>-1</sup> )	0,5	23,0
	1,0	16,2
	1,5	11,4
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (2930 s <sup>-1</sup> )	0,5	49,5
	1,0	49,2
	1,5	48,8

**8 - RASTREABILIDADE:**

As grandezas medidas são referenciadas às fontes padrões secundárias do Laboratório de Metrologia Nuclear do IPEN (LMN), Brasil, e do Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants (LMRI), França.

**9 - RECALIBRAÇÃO:**

Esse laboratório estabelece que, devido às características do instrumento, o mesmo deverá ser recalibrado em abril de 1992.

Se, no decorrer deste período, o monitor sofrer algum dano que possa afetar sua calibração, o Laboratório de Calibração deverá ser consultado.