

BR 8613425

UFPE

INIS-BR--534

Nº 37

TESE DE MESTRADO
PRONUCLEAR

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS DE
ESPECTROMETRIA GAMA.

Marluce Cavalcanti de Melo

RECIFE
JULHO DE 1985



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

Av. Prof. Luiz Freire, S/N — Cidade Universitária

CEP 50000 — RECIFE — PE — BRASIL

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS DE ESPECTRO
METRIA GAMA**


MARLUCE CAVALCANTI DE MELO

Tese apresentada ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Tecnologia Nuclear.


Prof. Orientador: HELDIO PEREIRA VILLAR

Recife - Julho de 1985

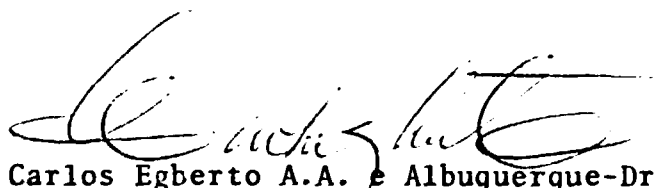
Dissertação apresentada ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, fazendo parte da Comissão Examinadora os seguintes professores:



Clemente José G. Carneiro da Silva-Dr.
Departamento de Energia Nuclear-UFPE

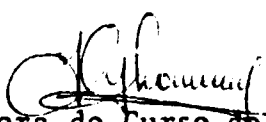


Helen Jamil Khoury-Dra.
Departamento de Energia Nuclear-UFPE



Carlos Egberto A.A. e Albuquerque-Dr.
Departamento de Eletrônica e Sistemas-UFPE

Visto e permitida a impressão
Recife, setembro de 1985



Coordenadora do Curso de Mestrado em
Ciências e Tecnologia Nuclear do De-
partamento de Energia Nuclear da Uni-
versidade Federal de Pernambuco.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO I - A DETECÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA.	
1.1 - A Detecção da Radiação.....	3
1.2 - A Interação da Radiação com a Matéria	6
1.3 - O Espectro Gama dos Detectores.....	7
1.4 - O Detector de NaI(Tl).....	10
1.5 - O Detector de (HP)Ge.....	16
CAPÍTULO II - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.	
2.1 - Fontes.....	20
2.2 - Equipamento.....	20
2.3 - Metodologia.....	21
CAPÍTULO III - RESULTADO	
3.1 - Detector a Cristal de NaI(Tl).....	23
3.2 - Detector de (HP)Ge.....	30
CAPÍTULO IV - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	
4.1 - Sistema a Cristal Cintilador.....	42
4.2 - Sistema a Semicondutor.....	45
4.3 - Forma de Pico.....	48
4.4 - Aplicações.....	50
4.5 - Conclusões.....	52
APÊNDICES	
APÊNDICE A - Obtenção das Propriedades do Fotopico.....	54
APÊNDICE B - Programa de Análise de Espectro.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

AGRADECIMENTOS

Em especial ao professor Heldio Pereira Villar pela orientação objetiva e toda dedicação para o bom andamento deste trabalho.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pela bolsa de estudo recebida.

À professora Maria oscarina Godoy pela colaboração prestada.

Ao programa de Mestrado do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco.

Aos colegas e amigos pelo apoio dado na fase final deste trabalho.

R E S U M O

A aplicação de sistemas de espectrometria gama está condicionada ao perfeito conhecimento de suas características operacionais. Dessa forma, um estudo das características mais significativas (estabilidade, linearidade, resolução e eficiência de pico) foi levado a cabo em um sistema a cristal de NaI(Tl) e em outro a detector de (HP)Ge. Fontes gama com energias de 60 a 1300 keV foram empregadas. Métodos numéricos simples foram aplicados aos dados, sendo observado o comportamento de cada sistema, com relação às características mencionadas, em várias tensões de aplicação. Ficou evidente a superioridade do sistema a (HP)Ge nos aspectos de estabilidade, linearidade e resolução, com vantagem para o sistema a NaI(Tl) na eficiência.

Nos dois sistemas os resultados obtidos foram compatíveis com os encontrados na literatura, concluindo-se que ambos estão funcionando a contento, e que a metodologia empregada presta-se para o teste de tais equipamentos.

ABSTRACT

The application of gamma spectrometers is tantamount to the perfect knowledge of their operational characteristics. Thus a study of the most significant characteristics (stability, linearity of response, energy resolution and peak efficiency) was carried out with an NaI(Tl) and an (HP)Ge systems. Gamma standards with an energy range of 60 to 1300 KeV were used.

Simple numerical methods were applied to the data, and the behaviour of each system, with regard to the aforementioned characteristics, was observed for several operation voltages.

It was evident the superiority of the (HP)Ge system in stability, linearity and resolution, whereas the NaI(Tl) system showed a greater efficiency.

The results obtained for each system were consistent with the ones found elsewhere, so that it may be concluded that both are working properly, and that the methodology proposed herein is appropriate for the test of such equipments.

I N T R O D U Ç Ã O

Qualquer ciência é baseada na observação sistemática de fenômenos. Partindo desse princípio, a ciência nuclear teve seu início quando os processos de origem nuclear puderam ser de fato observados. Dessa forma, um dos itens mais importantes da Ciência Nuclear é a Instrumentação Nuclear, que diz respeito a todos os equipamentos para estudo dos fenômenos nucleares.

A instrumentação abrange basicamente dois tipos de equipamentos: equipamentos de produção de partículas subnucleares, que vão das mais simples fontes isotópicas até os grandes cíclotrons, e equipamentos para monitoração, que incluem as câmaras de bolhas, emulsões nucleares e os variados instrumentos conhecidos como detectores de radiação.

A função primordial de um detector é indicar a presença de radiação. Para que tal ocorra, os requisitos seguintes devem ser preenchidos:

- 1 - A radiação é emitida
- 2 - Ocorre uma interação entre a radiação e o detector
- 3 - A interação provoca uma alteração possível de ser registrada no material do detector.

Torna-se assim claro que a detecção da radiação baseia-se essencialmente na interação desta com o detector. Desde que as formas de interação variam com o tipo de radiação emitida e sua energia, um detector tem em princípio condições de determinar essas duas características. Isso, somado à frequência das interações, permite:

- A identificação da fonte de radiação
- A avaliação de sua atividade

Tais, como se pode prever, são os objetivos finais dos detectores de radiação.

Neste trabalho, pretendeu-se estudar as características opera-

cionais de dois sistemas de espectrometria gama, um a cristal de NaI (Tl) e o outro a cristal semiconductor de (HP)Ge. Espera-se que os resultados obtidos mostrem de maneira clara as limitações e potencialidades desses sistemas, podendo a partir daí os usuários utilizá-los de forma adequada e assim extrair informações significativas.

CAPÍTULO I

A DETECÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA

1.1 - A DETECÇÃO DA RADIAÇÃO /2,10,12,16/

A radioatividade natural foi descoberta por Antoine Becquerel em 1896, durante seus estudos sobre fosforescência com sais de urânio. Ele ficou impressionado quando percebeu que um pedaço de sal de urânio guardado em uma gaveta enegreceu uma chapa fotográfica totalmente coberta.

A história da radioatividade mostra, então, que o primeiro detector de radiação foi o filme fotográfico. Como o efeito produzido no filme era similar ao dos raios-X, outras propriedades destes foram testadas com os raios do urânio. Assim, descobriu-se que os raios de urânio descarregavam um eletroscópio carregado e produziam fluorescência em certos cristais. Esta última propriedade levou à construção do primeiro detector prático de radiação: o "spintariscope". Por muitos anos os detectores baseados em cintilações foram os únicos que indicavam as interações de partículas individuais. Uma grande desvantagem desses detectores era a forma manual de registrar as cintilações, além da impossibilidade de se identificar as radiações e suas energias. Muitos textos em instrumentação nuclear não a levam em conta, mas a câmara de Wilson (1911), que se baseia na formação de "trilhas de ionização" foi o primeiro detector capaz de identificar radiações.

As duas propriedades em que se baseiam os dois detectores mencionados, ou seja, a produção de cintilações e de íons, são ainda hoje a base de funcionamento de todos os detectores de radiação. A ionização, por estar diretamente ligada ao movimento de cargas elétricas, teve grande ênfase com o advento dos sistemas eletrônicos de contagem, e na década de 30 os detectores Geiger-Müller e proporcionais e as câmaras de ionização levaram os cintiladores ao ostracismo. O surgimento dos tubos fotomultiplicadores na década de 40 trouxe de volta os cintiladores, visto que agora era possível o registro eletrônico das

cintilações. Os retoques finais no quadro atual dos detectores tiveram seu início no final da década de 40 com o desenvolvimento dos detectores de condução sólidos, que culminaram nos detectores semicondutores de hoje, os mais avançados em seus campos de aplicação.

Entre as várias características dos sistemas de medidas nucleares há quatro que são as mais importantes devido ao fato de interessarem mais de perto ao problema de identificação e quantificação de emissores. Elas são a resolução, a estabilidade, a eficiência de contagem e a linearidade da resposta.

O "Webster's Third International Dictionary" traz a seguinte definição para resolução:

" O ato ou capacidade de tornar distintas as partes individuais de um objeto, imagens ópticas adjacentes (como com um telescópio), comprimentos de onda de luz quase idênticos (como com um espectrôgrafo), partículas com quase a mesma energia, partículas com quase a mesma massa (como com um espectrôgrafo de massa), ou eventos ocorrendo quase ao mesmo tempo (como com um detector de radiação)".

No caso dos detectores de radiação, a resolução apresenta-se como:

- A capacidade de distinguir radiações quase simultâneas - resolução no tempo.
- A capacidade de distinguir radiações de energia ligeiramente diferente - resolução de energia.

A análise do espectro alfa ou gama de um emissor mostra que a resolução está condicionada à "largura" de cada pico. Em espectrometria gama, o fotopico é o resultado do acúmulo de pulsos resultantes de interações nas quais raios gama de uma mesma energia cederam toda sua energia; deveria assim ser formado de pulsos da mesma altura. Devido a flutuações estatísticas todo fotopico tem a forma aproximada da curva normal (9,15).

A resolução é expressa pela largura do pico a meia altura ou FWHM. Como a FWHM cresce com a energia, normaliza-se a resolução exprimindo-se a FWHM em unidades de energia e dividindo-a pela energia do raio gama:

$$R (\%) = \frac{FWHM}{E} \times 100\%$$

A estabilidade dos sistemas de espectrometria está relacionada com a estabilidade do sistema eletrônico, somada a efeitos de temperatura do cristal e do tubo fotomultiplicado, no caso do detector a cristal cintilador (2,4,9). Um sistema de espectrometria é dito estável quando a altura média dos pulsos correspondentes à energia cedida ao detector é constante no tempo. Na prática isso é equivalente à constância da posição de cada pico.

A eficiência de contagem é importante para a determinação da atividade de emissores de radiação. Entre os fatores que influenciam na eficiência de contagem, para amostras delgadas, a geometria e a eficiência intrínseca são os que têm papel preponderante. Há duas maneiras de se determinar a eficiência de um detector: a partir de cálculos que envolvem a geometria de contagem e as probabilidades de interação da radiação com o material ativo do detector ou então medindo-se fontes padronizadas. Para a espectrometria gama define-se nos dois casos duas eficiências: a eficiência total, que leva em consideração a probabilidade de qualquer interação com o cristal e a eficiência de pico, que leva em conta apenas as interações onde há absorção total da radiação gama.

Nas medidas com padrões, a eficiência total conduz a resultados imprecisos devido ao fato de muitas interações produzirem pulsos de amplitude tão baixa que podem ser sobrepostos aos ruídos termiônicos do tubo fotomultiplicador, no caso dos detectores a NaI (Tl), ou ao ruído eletrônico, no caso dos detectores a semicondutor. Já a eficiência de pico fornece resultados mais úteis para comparações entre amostras, uma vez que a área de cada pico pode ser determinada com uma precisão razoável. De posse da área S de cada fotopico e da atividade gama A_γ de cada emissor, a eficiência de pico é dada por:

$$Eff (\%) = \frac{S}{A_\gamma t} \times 100\%$$

A eficiência de pico varia inversamente com a energia de radiação gama dada a diminuição dos coeficientes de absorção do detector com a energia.

Quanto à linearidade da resposta, pode-se dizer que a altura média dos impulsos que compõem cada pico deverá ser proporcional à energia das radiações respectivas. Com isto uma reta de calibração pode ser obtida a partir de energias conhecidas e a determinação da energia correspondente a outros picos pode ser feita de maneira simples e precisa.

1.2 - A INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA /7,9,11,15/

Uma variedade de interações pode ocorrer quando raios gama penetram na matéria. Frequentemente é possível isolar esses efeitos e considerá-los separadamente. Como a faixa de interesse nas experiências de física nuclear é aproximadamente $100 \text{ keV} < h\nu < 30 \text{ MeV}$, três efeitos dominam as interações nesta faixa de energia. Esses efeitos são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e o processo de produção de pares; todos os outros efeitos combinados contribuem menos que 1% no total do coeficiente de absorção.

No efeito fotoelétrico, toda a energia do raio gama é transferida para um elétron da coroa eletrônica do átomo, fazendo com que ele seja ejetado. O efeito fotoelétrico ocorre em 80% dos casos com elétrons da camada K. O elétron lançado tem espectro de energia bem definido. A energia do fóton incidente pode ser determinada pela soma da energia cinética do fotoelétron lançado T_f com a energia de ligação do elétron W_i . O efeito fotoelétrico predomina para raios gama com energia até cerca de 250 keV:

No caso do efeito Compton um elétron livre do material é espalhado pelo fóton, que é defletido e tem sua energia original subtraída da parcela cedida ao elétron. No tratamento do efeito Compton a energia do fóton é considerada como bastante grande comparada com energia de ligação W_i ; assim, os elétrons mais externos do átomo podem ser considerados como elétrons livres. O efeito Compton assume importância quando a energia da radiação incidente for maior que 0,5 MeV.

O processo de produção de pares ocorre quando a radiação gama

incidente excede 1,02 MeV e mesmo assim com pequena probabilidade; A produção de um par pósitron-elétron é energeticamente possível, porém unicamente na vizinhança de um campo elétrico muito intenso, como próximo a um núcleo pesado. O par pósitron-elétron possui uma energia cinética igual a $(h\nu - 1,02)\text{MeV}$, onde $h\nu$ é a energia do fóton. O pósitron, ao atingir o estado de repouso, interage com um elétron também em repouso. Ambas as partículas são aniquiladas, sendo emitidos dois fótons de 0,51 MeV em direções opostas. Na produção de pares ocorre absorção total do raio gama incidente.

1.3. - O ESPECTRO GAMA DOS DETECTORES / 9,11,16/

A emissão de radiação gama consiste de fótons de energias bem definidas. Assim, seria de se supor que a interação dos fótons com um detector resultasse na produção de grupos de pulsos de várias alturas, a cada altura correspondendo cada energia da radiação gama incidente. O espectro de uma fonte ou conjunto de fontes radioativas teria a forma de conjunto de raias discretas, uma para cada energia, e a intensidade de cada raia seria proporcional ao número de fótons de uma dada energia que incidisse no detector (Fig.I.1). Mas na prática tal não ocorre e o espectro real difere sob vários aspectos do ideal. No espectro ideal há uma perfeita linearidade entre energia de radiação incidente e altura de pulso e excelente precisão na altura de pulso para cada energia. Nos detectores reais as duas características são seguidas, mas com restrições. A linearidade não é perfeita, mas é de qualquer forma muito boa, mas o mesmo não ocorre com a precisão da altura de pulso, de forma que se observa um "espalhamento" em torno de cada linha. Além dessas, mais uma característica é também preponderante nos detectores reais: a energia da radiação nem sempre é totalmente depositada no detector, de forma que pulsos de várias alturas são gerados (Fig.I.2)

Um raio gama, ao interagir com a matéria, dependendo de sua energia, poderá sofrer um ou mais dos processos de interação já citados. Se toda a energia do fóton for cedida a elétrons da matéria, dependendo do material detector, poderá haver emissão de luz ou a criação de pares de portadores. No primeiro caso a luz

L1	847 Kev
L2	1811 Kev
L3	2113 Kev

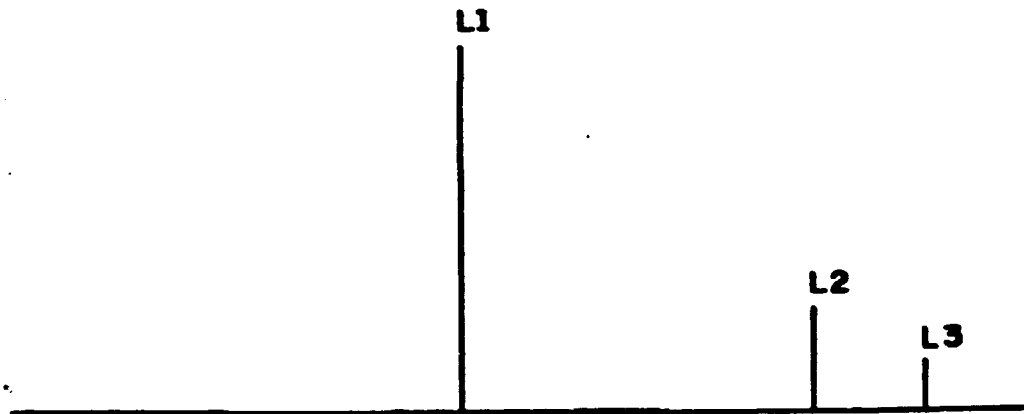


Fig.I.1 - Espectro ideal

P1	847 Kev
P2	1811 Kev
P3	2113 Kev

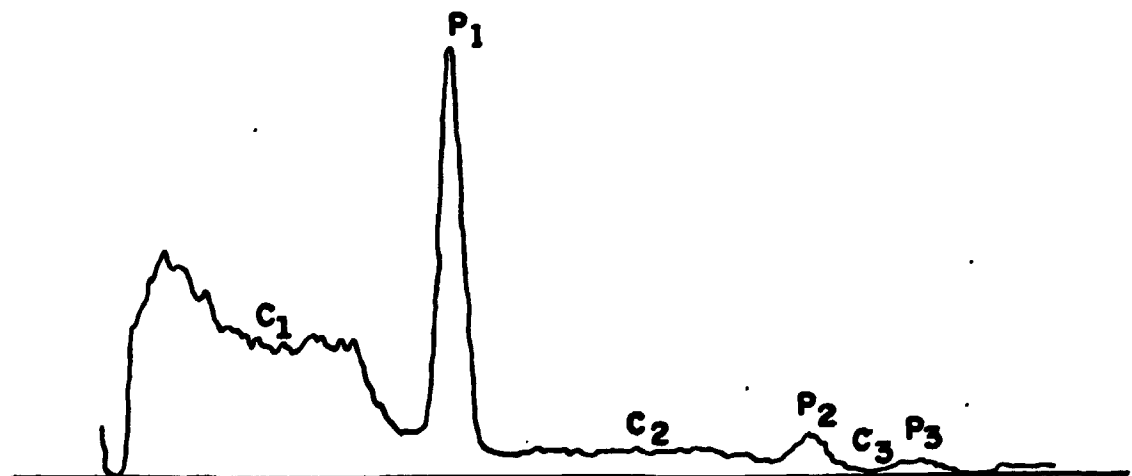


Fig.I.2 - Espectro real

dará origem a um pulso de altura proporcional à energia do fóton. No segundo caso o pulso é formado pelos pares de portadores coletados. Ocorrências similares originarão o acúmulo de contagens de pulsos dessa altura, formando o chamado fotopico. Se o fóton, após certo número de espalhamentos Compton abandonar o material detector, o pulso resultante será de altura menor que os que formam o fotopico. Os elétrons de Compton possuem energias que variam de zero a um valor máximo; as contagens que daí resultam se espalham de maneira mais ou menos uniforme do início do espectro até um pouco antes do fotopico quando caem bruscamente, definindo o chamado "Compton edge". Essa faixa é chamada de "Compton Continuum". Poderão surgir no "Compton Continuum" outros picos menores:

a) - Pico de escape de raios-X - A emissão, após o efeito fotoelétrico, do raio-X característico do material detector pode ser retardada ou pode escapar sem interagir, não contribuindo para o fotopico.

b) - Pico de "backscattering" (retroespalhamento) - Formado por alguns raios gama do emissor que não chegam diretamente ao elemento detector, mas depois de serem espalhados em blindagens ou suportes.

c) - "Two-scape peak", "one-scape peak" - Para fótons incidentes de energia $h\nu$ superior a 1,02 MeV há a probabilidade de formação de um par pósitron - elétron com energia cinética $(h\nu - 1,02)$ MeV gerando um pulso de intensidade correspondente a essa energia. O pósitron, ao atingir o repouso interage com um elétron também em repouso. O pósitron e o elétron desaparecem e são emitidos dois fótons de 0,51 MeV em sentidos opostos (radiação de aniquilação). Caso os dois fótons escapem do elemento detector sem interagir, surgirá na repetição desses eventos o pico do espectro correspondente à energia $(h\nu - 1,02)$ MeV, o chamado "two-scape peak". Se um fóton for absorvido e outro escapar, o pico resultante ficará correspondendo à energia $(h\nu - 0,51)$ MeV formando o "one-scape peak".

d) - Pico devido à produção de pares na vizinhança do detector - A subsequente aniquilação trará a emissão de dois raios gama de 0,51 MeV; como saem em sentidos opostos há a probabilidade de

apenas um a chegar ao elemento detector; surgirá então um pico correspondente a 0,51 MeV, denominado pico de aniquilação.

e) - Pico soma - formado pela interação simultânea, ou em pequeno intervalo de tempo, proveniente da absorção total de raios gama diferentes (emissor com várias energias). O pulso resultante terá altura equivalente à soma dos pulsos correspondentes às intensidades lumínicas, no caso do detector a cristal NaI(Tl), ou a soma de portadores, no caso de um detector de (HP) Ge.

A formação do fotopico e dos outros picos é uma característica do espectro gama. A forma similar à curva normal em vez de uma linha reta deve-se à flutuação de natureza aleatória nos vários processos que têm lugar na formação do pulso somadas a flutuações introduzidas pelo sistema eletrônico associado. A Fig. I. 3 esquematiza a produção dos vários elementos de interesse em um espectro gama.

1.4.- O DETECTOR DE NaI (Tl)

1.4.1. - FUNCIONAMENTO

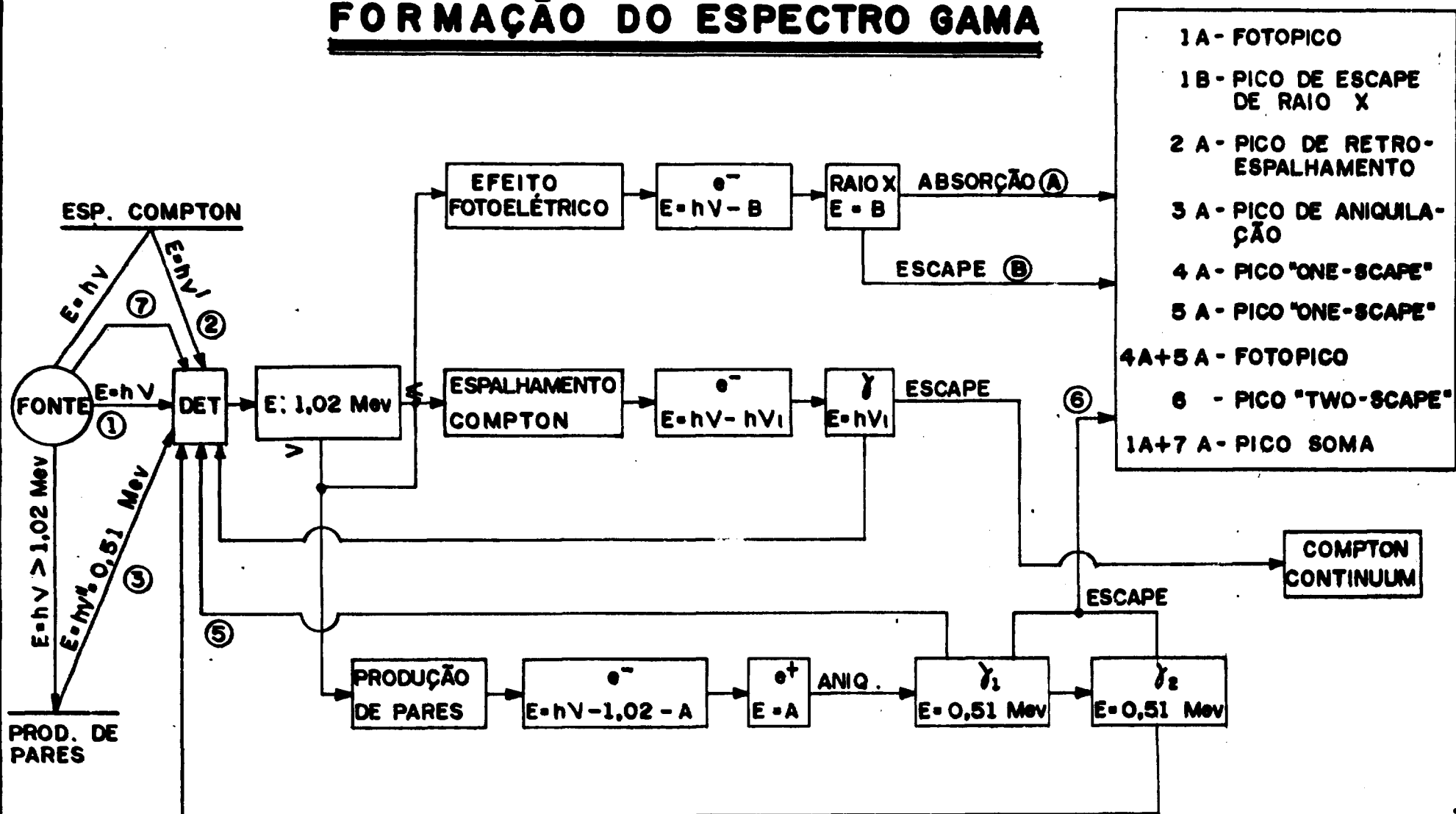
O funcionamento dos detectores de NaI (Tl) baseia-se na fotocondutividade característica dos cristais de halogenetos de metais alcalinos. Uma vez que ocorra a interação de partículas carregadas com o cristal, como, no caso da detecção da radiação gama, os elétrons emitidos no efeito fotoelétrico, no espalhamento Compton ou na produção de pares, os fenômenos seguintes têm lugar /14,15/:

- A passagem da partícula carregada produz excitações e ionizações ao longo da trajetória.

- Na ionização, um elétron da banda de valência da estrutura eletrônica do cristal adquire a energia suficiente para atingir a banda de condução (Fig. I.4), podendo caminhar livremente pelo retículo cristalino. Na banda de valência surge um buraco, também livre para caminhar pelo cristal.

- Na excitação, um elétron adquire energia suficiente apenas para atingir um dos níveis permitidos de excitação, deixando na banda de valência um buraco. Tal estrutura, denominada "exciton",

FORMAÇÃO DO ESPECTRO GAMA



④ Fig. I.3 - Formação do espectro gama

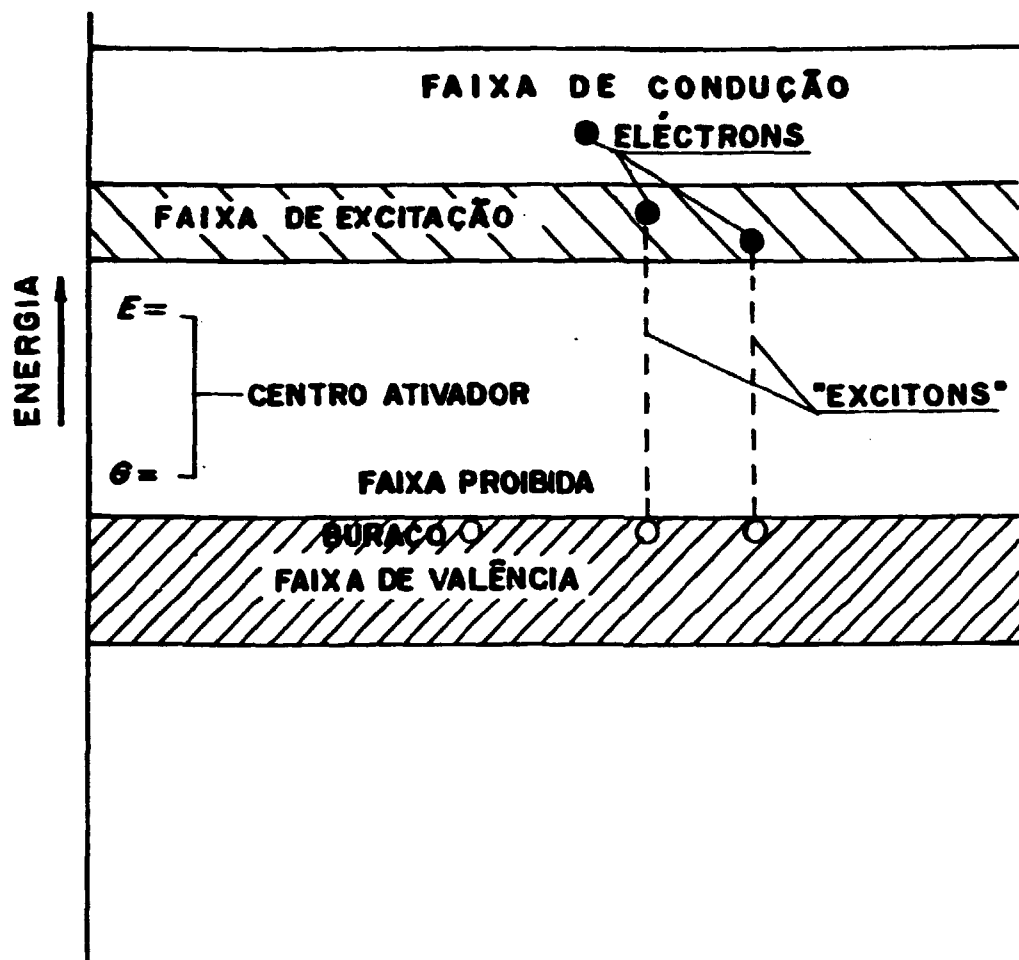


Fig.I.4 - Faixas de energias de um cristal cintilador com ativador

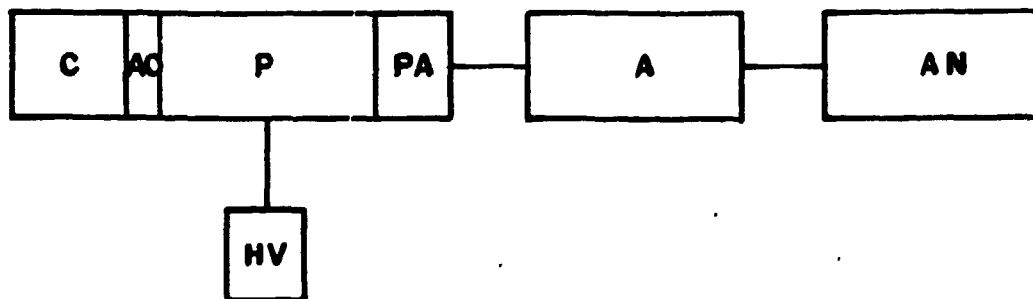


Fig.I.5 - Sistema de espectrometria gama a cristal cintilador

pode também caminhar pelo cristal.

- A captura de um elétron e um buraco (em qualquer ordem) ou do "exciton" levando à liberação da energia sob forma de fótons de luz caracteriza o cristal como "cintilador". Nos cristais "puros" de halogenetos de alcalinos, a probabilidade de emissão de luz, à temperatura ambiente, é baixa e usualmente se faz na região ultravioleta, dada a grande largura da faixa proibida (... - 6 e V). A introdução de "ativadores" (como o Tl no NaI) leva ao aparecimento de níveis permitidos dentro da faixa proibida. A captura de elétrons e buracos ou de "excitons" nos ativadores conduz a uma maior probabilidade de emissão de luz na faixa do visível, dada a menor largura da faixa proibida (~ 3 e V).

1.4.2. - SISTEMAS DE ESPECTROMETRIA GAMA A CRISTAL CINTILADOR

O sistema de espectrometria de gama é composto dos seguintes elementos (Fig.I.5).

(C) Cristal - onde ocorre a interação com a consequente emissão de luz.

(AO) Acoplamento óptico - dirige a luz produzida para o fotocátodo do tubo fotomultiplicador.

(P) Tubo fotomultiplicador - onde a luz é convertida no fotocátodo em fotoelétrons que são multiplicados pela aplicação de um campo elétrico fornecido pela fonte de tensão (HV), de maneira a obter na sua saída um pulso de tensão possível de ser analisado.

(PA) Pré - amplificador - onde ocorre a amplificação preliminar do pulso proveniente do tubo fotomultiplicador; funciona como elemento de casamento de impedância entre detector e amplificador.

(A) Amplificador linear - amplifica o pulso fornecido pelo pré-amplificador, dando-lhe uma conformação compatível com o sistema de análise empregado.

(AN) Sistema de análise - fornece informações, de acordo com os pulsos recebidos, sobre a fonte radioativa. Os sistemas de análise podem ser simples ou sofisticados como um analisador multi canal computadorizado.

1.4.3. - CARACTERÍSTICAS

O cristal de NaI (Tl) foi desenvolvido há mais de 35 anos, mas ainda é o mais empregado em sistemas para espectrometria gama. Apesar das limitações inerentes a qualquer cristal cintilador, além de outras que lhe são próprias, o NaI(Tl) possui certas vantagens que justificam seu amplo emprego.

O principal aspecto positivo dos cristais de NaI(Tl) é seu baixo custo. As técnicas de produção atuais permitem que se obtenha cristais de grande tamanho a uma fração do custo de um cristal de germânio muitas vezes menor. Para aplicações em espectrometria gama, outras vantagens fundamentais são a relativamente alta densidade ($\sim 3,5$) com a presença de um material de número atômico razoavelmente alto (o iodo, com $Z=53$), e a transparência à luz emitida, o que permite o uso de cristais grandes, melhorando a eficiência de contagem.

A linearidade da resposta dos detectores de NaI(Tl) é boa o suficiente para aplicações práticas convencionais. Desvios da linearidade foram observados para baixas energias ($\sim 80-100$ keV), sendo mais notórios em cristais grandes /15/. O tempo de resolução dos sistemas de espectrometria gama é menor que o de muitos sistemas de detecção ($\sim 10^{-6}$ s), de forma que seu emprego na medida de fontes de certa atividade é recomendado.

A mais importante deficiência dos sistemas a cristal de NaI(Tl) é sua pobre resolução em energia. Mesmo sob as melhores condições possíveis, a resolução nunca é melhor que, por exemplo, 6-7% para 662 keV /8,9/. O principal fator na má resolução do detector a NaI(Tl) é o baixo número de portadores efetivamente analisados resultantes de cada interação. No caso de um raio gama que cede toda a sua energia E keV a um cristal, apenas 13% da energia depositada será convertida em luz. Os fótons emitidos têm uma energia média de 3eV, de forma que são emitidos $40E$ fótons.

Perdas causadas por absorção ou reflexão de fótons no cristal e na interface cristal/tubo fotomultiplicador podem atingir 40%, de forma que $24E$ fótons chegam ao fotocátodo. A eficiência de conversão dos melhores fotocátodos é de cerca de 30%, o que faz com que $7E$ fotoelétrons sejam produzidos. Esse é o número de por

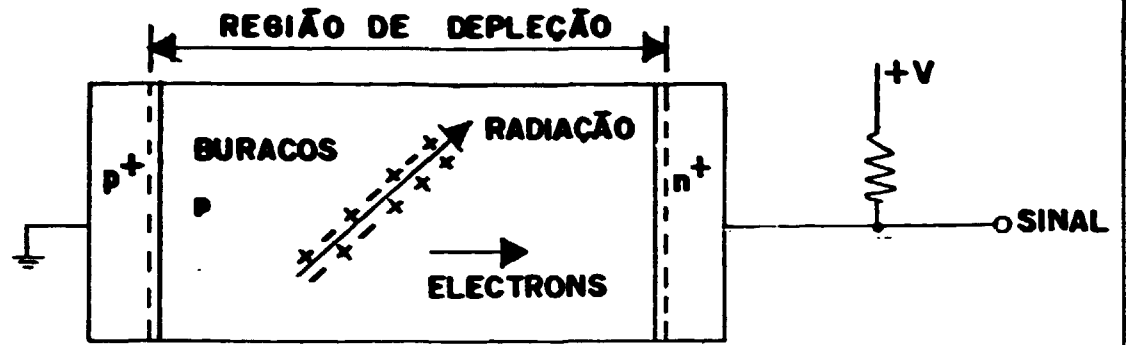


Fig. I.6 - Diagrama de um detector a diodo semiconductor

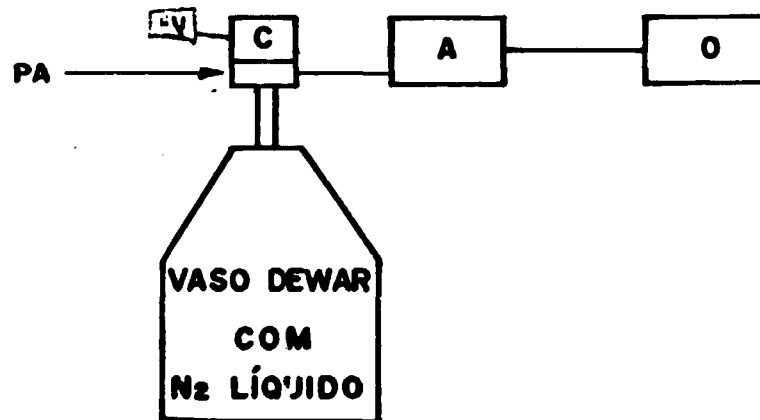


Fig. I.7 - Sistema de espectrometria gama a (HP) Ge

tadores efetivamente analisados, posto que, a partir daí, apenas processos multiplicativos terão lugar. Torna-se importante, então, conhecer a dispersão na repetição de tais eventos. A variância no número de portadores é usualmente dada por

$$s^2 = J_0 F$$

onde J_0 é o número de portadores, no caso $7E$, e F é o "Fano factor", que corresponde à relação entre a variância realmente observada e a que seria resultante da aplicação, ao processo, da estatística de Poisson (no caso, J_0) / 5/. No caso dos detectores cintiladores, $F = 1/9$ /. Com isso, a resolução intrínseca do detector será

$$R = 100 \frac{FWHM}{J_0} = \frac{100 \times 2,35 \times \sqrt{7E}}{7E} = \frac{90}{\sqrt{E}}$$

Para 662 KeV, tem-se $R = 3,5\%$. Flutuações introduzidas pelo processo de multiplicação /3/ e pelo sistema eletrônico levam a resolução ao seu valor final. Outras desvantagens incluem uma certa sensibilidade a variações de temperatura, que influem no ganho do tubo fotomultiplicador e na eficiência do fotocátodo, /2,4/ a alta higroscopicidade do cristal, exigindo o encapsulamento, e a existência de uma radiação de "background" intrínseca razoável dada a presença, difícil de ser evitada, de potássio /9/.

1.5 - O DETECTOR DE (HP)Ge.

1.5.1. - FUNCIONAMENTO

O detector de (HP)Ge está classificado entre os detectores semicondutores de junção e, como tal, baseia-se na criação da "região de depleção" na junção n-p. Ao se aplicar à junção uma tensão de polarização inversa, tal região se amplia. Tem-se assim uma faixa livre de qualquer portador de corrente e suficientemente extensa para ter utilidade na detecção de radiação. O funcionamento do detector torna-se assim análogo ao de uma câmara de ionização a gás (Fig. I.6):

Ocorre a interação da radiação com o material do detector (di

retamente, se partícula carregada, ou indiretamente, como os elétrons produzidos na interação da radiação gama].

- Desde que a radiação possua energia superior a uns poucos ev (como é sempre o caso), pares elétrons-buracos são criados no semicondutor.

- O campo elétrico aplicado impede a recombinação e proporciona a coleta de elétrons e buracos, que possuem grande mobilidade no material, com a formação de um pulso de altura proporcional ao número de pares formados.

Observa-se que o ponto básico para o funcionamento de um detector a semicondutor é a existência de uma região de depleção livre de quaisquer portadores. No caso do Ge, isso significa operação a baixa temperatura, pois à temperatura ambiente os elétrons de valência do Ge adquirem energia suficiente para atingir a banda de condução ($\sim 0,7$ ev). Além disso, deve-se ter no material um grau de pureza bastante elevado, de forma que sua resistividade seja alta o suficiente para que, a uma tensão que permita a formação de uma região de depleção razoável, a corrente produzida seja muito inferior à resultante da interação da radiação. Um menor número de impurezas conduz também a uma menor concentração de "armadilhas" ("traps"), que tendem a reter elétrons e buracos, reduzindo assim a carga total coletada.

Nos primeiros detectores de Ge as condições ideais para o funcionamento eram conseguidas através de um processo denominado "lithium drifting", em que lítio era, através de um processo físico-químico complexo, tornado parte da estrutura cristalina do Ge, criando uma região quase que exatamente "compensada". Métodos de depuração modernos conduziram ao germânio hiper-puro, ou (HP) Ge, onde a região de depleção pode atingir uma espessura comparável à do cristal tratado com lítio, ou Ge (Li) ($\sim 10-15$ mm).

A grande vantagem do (HP)Ge sobre o Ge(Li) é que o primeiro só precisa ser resfriado no momento de aplicação da tensão de operação, ao passo que o Ge(Li) deve ser mantido continuamente a baixa temperatura (~ 80 K) para que seja mantida a estabilidade da compensação.

1.5.2. - SISTEMAS DE ESPECTROMETRIA GAMA A (HP)Ge.

O sistema de espectrometria gama é composto dos seguintes elementos (Fig. I.7):

C - Cristal detector de germânio hiper-puro

HV- Fonte de alta tensão

D - Vaso "Dewar" com N₂ líquido, para manutenção da baixa temperatura (77K)

PA- Pré-amplificador

A - Amplificador

AN- Dispositivo de saída

1.5.3. - CARACTERÍSTICAS

Desde sua introdução, no início dos anos 60, os detectores de Ge vêm ocupando um espaço cada vez mais significativo entre os detectores para radiação gama. Isso se deve à sua característica mais marcante: sua excelente resolução.

A notável resolução dos detectores de germânio se deve quase que exclusivamente a um fator: ao elevado número de pares produzidos a cada interação. Como o "Fano factor" para o Ge é 0,119, tem-se, seguindo o mesmo raciocínio usado para o NaI(Tl),

$$R (\%) = \frac{2,35 \times \sqrt{0,1 J_0}}{J_0} \times 100 = \frac{74}{\sqrt{J_0}} \%$$

onde J₀ é dado por

$$J_0 = \frac{1000 E}{2,96} = 340 E$$

desde que 2,96 eV é a energia média necessária para a criação de um par no germânio. Daí,

$$R = \frac{74}{\sqrt{340E}} = \frac{4}{\sqrt{E}} \%$$

Para 662 KeV, tem-se R= 0,16%, um valor que sofre apenas o acréscimo do ruído eletrônico, atingindo usualmente valores inferiores a 0,25%.

Outras vantagens dos detectores de germânio são o baixo tempo de resolução (~ 10⁻⁸s) e a excelente linearidade da resposta numa larga faixa de energias.

Seus aspectos negativos são o elevado preço, a necessidade de refrigeração, a deterioração com o uso e, mesmo podendo atingir volumes ativos superiores a 200 cm^3 na configuração coaxial, sua baixa eficiência, comparado a cristais de NaI(Tl) de mesmas dimensões.

CAPÍTULO II

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. - FONTES

As fontes empregadas na elaboração do presente trabalho eram fabricadas pela New England Nuclear e tinham as características apresentadas na tabela II.1:

TABELA II.1.

EMISSOR	ENERGIA DE INTERESSE (keV)	ATIVIDADE GAMA (s ⁻¹ *)
²⁴¹ Am	59,54	7,38 x 10 ⁴
¹⁰⁹ Cd ^{109m} Ag	88,03	3,57 x 10 ²
⁵⁷ Co	122,08	79,0
¹³⁷ Cs ^{137m} Ba	661,66	2,75 x 10 ⁴
⁵⁴ Mn	834,84	2,06 x 10 ²
²² Na	1274,54	6,85 x 10 ³

*Em 24.08.84

2.2 - EQUIPAMENTO

2.2.1. - SISTEMA A CRISTAL CINTILADOR

Este sistema possuía os seguintes componentes:

- 1- Detector a cristal cintilador NaI (Tl) de 1 1/2" x 1" (3,76 x 2,54cm), com tubo fotomultiplicador e pré-amplificador acoplado, de marca CANBERRA.
- 2- Um amplificador linear CANBERRA
- 3- Um analisador multicanal com 4096 canais de marca CANBERRA série 40.
- 4- Um terminal impressor DIGITAL LA-34

2.2.2 - SISTEMA A SEMICONDUTOR

Este sistema possuía os seguintes componentes:

- 1- Detector a semicondutor de (HP) Ge (volume ativo: 49cm³) com pré-amplificador acoplado da marca ORTEC.
- 2- Um amplificador linear CANBERRA
- 3- Um analisador multicanal com 1024 canais de marca NORLAND modelo IT 5300
- 4- Um terminal impressor DIGITAL LA-34.

2.3 - METODOLOGIA

Neste trabalho foram estudadas as principais características funcionais de sistemas de espectrometria gama: estabilidade, linearidade da resposta, resolução em energia e eficiência de contagem. Cada um dos procedimentos descritos a seguir foi executado para os dois sistemas em estudo.

2.3.1 - ESTABILIDADE

O sistema era ligado com uma fonte de ¹³⁷Cs já na posição ideal e sendo mantida a mesma geometria. Eram feitas várias medidas até que o sistema atingisse a estabilidade. Os resultados eram levados a um gráfico (canal de pico x tempo). Este procedimento foi seguido para várias tensões.

2.3.2 - LINEARIDADE

Uma vez atingida a estabilidade, o número do canal de pico era obtido para cada uma das fontes. Através de um procedimento numérico era obtida a determinação precisa do canal de pico (Ver Apêndice A). Isso foi feito para várias tensões e os gráficos energia x canal para cada tensão foram traçados. Por meio de um programa de regressão linear simples era feito o ajustamento dos dados. O coeficiente de regressão fornecia o fator de calibração do sistema em keV/canal e o coeficiente de correlação permitia a aferição da linearidade da resposta.

2.3.3 - RESOLUÇÃO EM ENERGIA

A resolução em energia, definida como:

$$R (\%) = \frac{FWHM}{E} \times 100\%$$

onde;

FWHM = largura do pico na metade da altura

E = energia do raio gama,

foi determinada a partir da retificação da curva normal correspondente a cada pico (ver Apêndice A). As curvas resolução x energia para cada tensão eram assim obtidas.

2.3.4 - EFICIÊNCIA DE CONTAGEM NO PICO

A área de cada pico era obtida a partir da área da curva normal correspondente (ver Apêndice A). Como as atividades de cada amostra eram conhecidas (Tabela II.1), as eficiências correspondentes a cada energia foram calculadas através de:

$$E_{ff} = \frac{S}{A_{\gamma} t}$$

S = área do pico (contagem)

A_γ = atividade gama (s⁻¹)

t = tempo de contagem (s)

2.3.5 - RELAÇÃO PICO-COMPTON

Foi obtida a relação Pico-Compton como o quociente entre as contagens do canal de pico e as contagens do canal correspondente ao "Compton edge".

NOTA DO ORIENTADOR

O leitor dotado de um senso de observação mais apurado irá certamente estranhar o emprego de um analisador multicanal de 4096 canais com um detector de baixa resolução, bem como o uso de um analisador de 1024 canais com o detector de melhor resolução já construído. Antes que o leitor comece a levantar suspeitas sobre a competência do orientador, ele deve ser esclarecido sobre um aspecto importante: o detector de (HP)Ge pertencia a um grupo e o analisador de 4096 canais a outro. Quando o orientador solicitou o acoplamento dos dois, foi-lhe informado pelos "donos" do analisador que, se ele fosse levado para a sala do detector, de lá jamais retornaria, vindo fatalmente a ser danificado pelos "donos" do detector; já os "donos" do detector jamais permitiriam o empréstimo do precioso equipamento aos "donos" do analisador, e pelos mesmos motivos. Apanhados no meio de tal guerra fria, orientador e aluno tiveram de se sujeitar à lei do "direito de propriedade", e realizar o trabalho com o equipamento disponível. Isso de forma alguma invalida o trabalho, mas sem dúvida serve para mostrar um dos obstáculos que o pesquisador sério deve enfrentar em certas instituições científicas do País.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 - DETECTOR A CRISTAL DE NaI (TI)

3.1.1 - ESTABILIDADE

Os resultados para cada tensão estão na figura III.1. Foi feita uma normalização já que o canal inicial não é o mesmo para as várias tensões.

3.1.2 - LINEARIDADE DA RESPOSTA

A figura III.2 mostra a reta de calibração energia X canal para cada tensão aplicada. A tabela III.1 apresenta a inclinação e o coeficiente de correlação da reta para cada tensão aplicada. Na figura III.3 pode-se ver como a inclinação da reta de calibração varia com a tensão aplicada.

TABELA III.1

ESTUDO DA LINEARIDADE DA RESPOSTA

TENSÃO (V)	INCLINAÇÃO (keV/canal)	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO
600	63	0.9996
700	21	0.9999
800	9,6	0.9999
900	4,8	0.9999
1000	2,5	0.9999

3.1.3 - RESOLUÇÃO

A tabela III.2 mostra a resolução para várias tensões. A figura III.4 apresenta a variação da resolução com a energia.

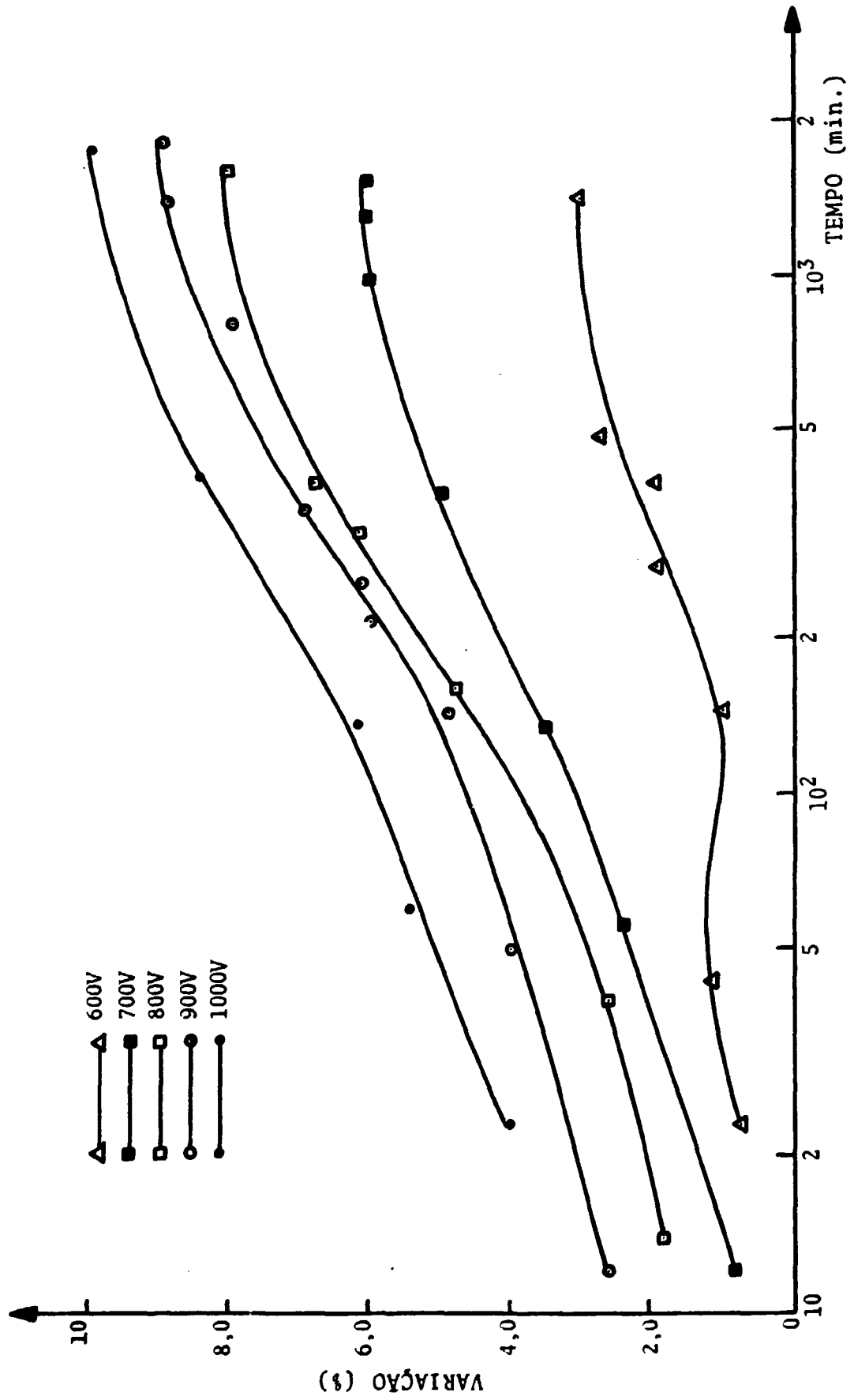


FIGURA III.1 - Variação da posição do fotopico com o tempo

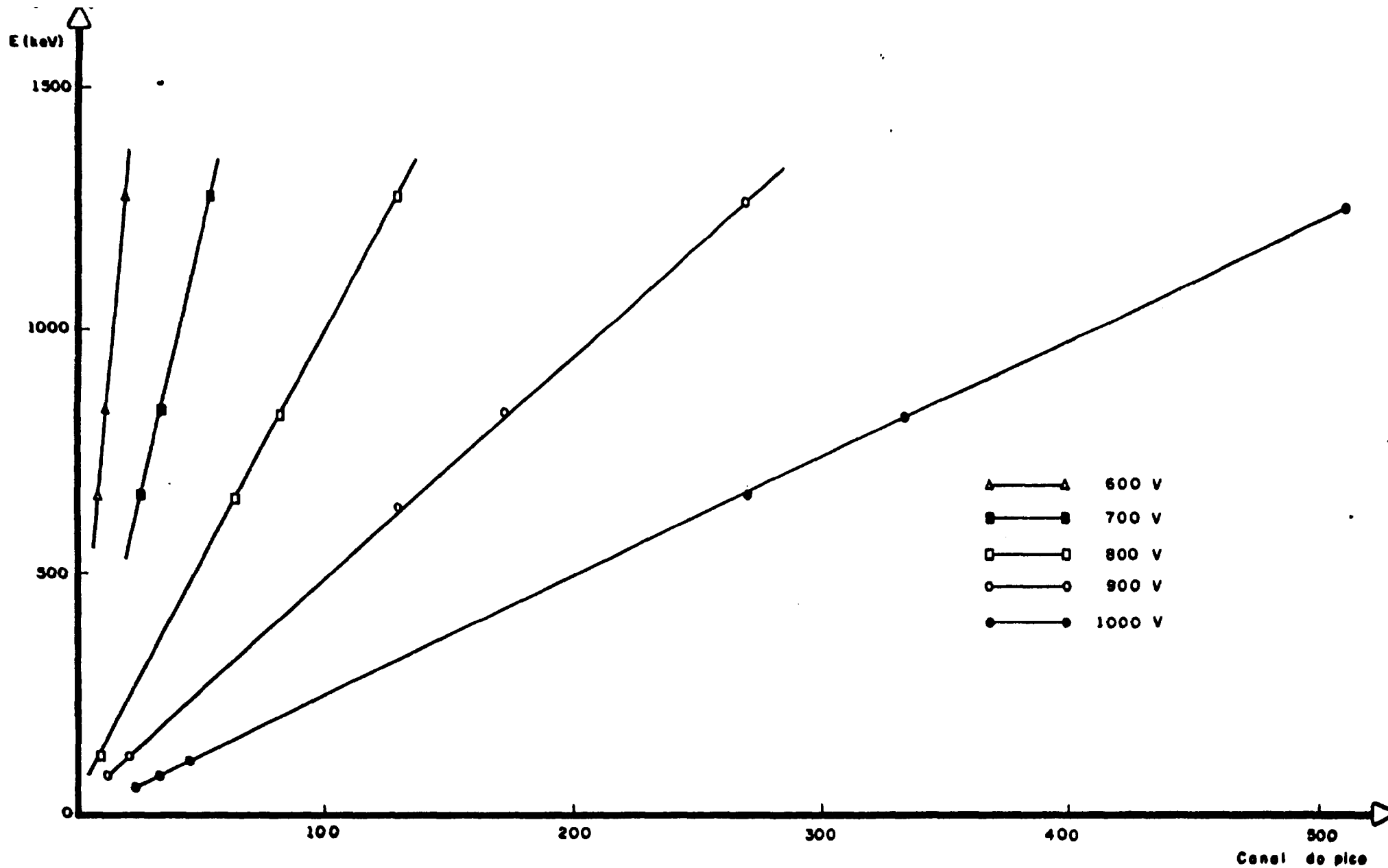


FIGURA III.2 - Retas de calibração para várias tensões - Detector a cristal de NaI(Tl)

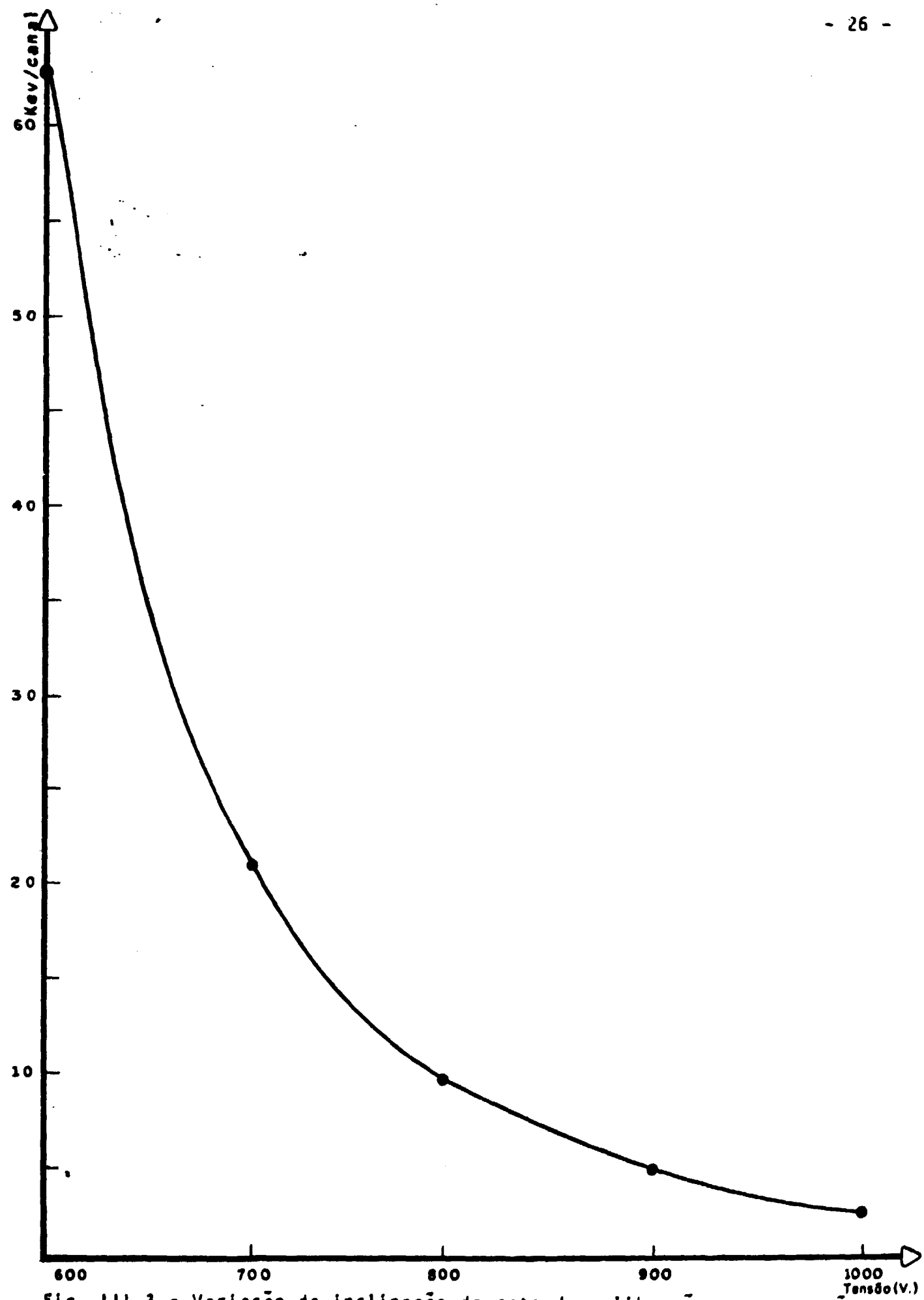


Fig. III.3 - Variação da inclinação da reta de calibração com a tensão aplicada

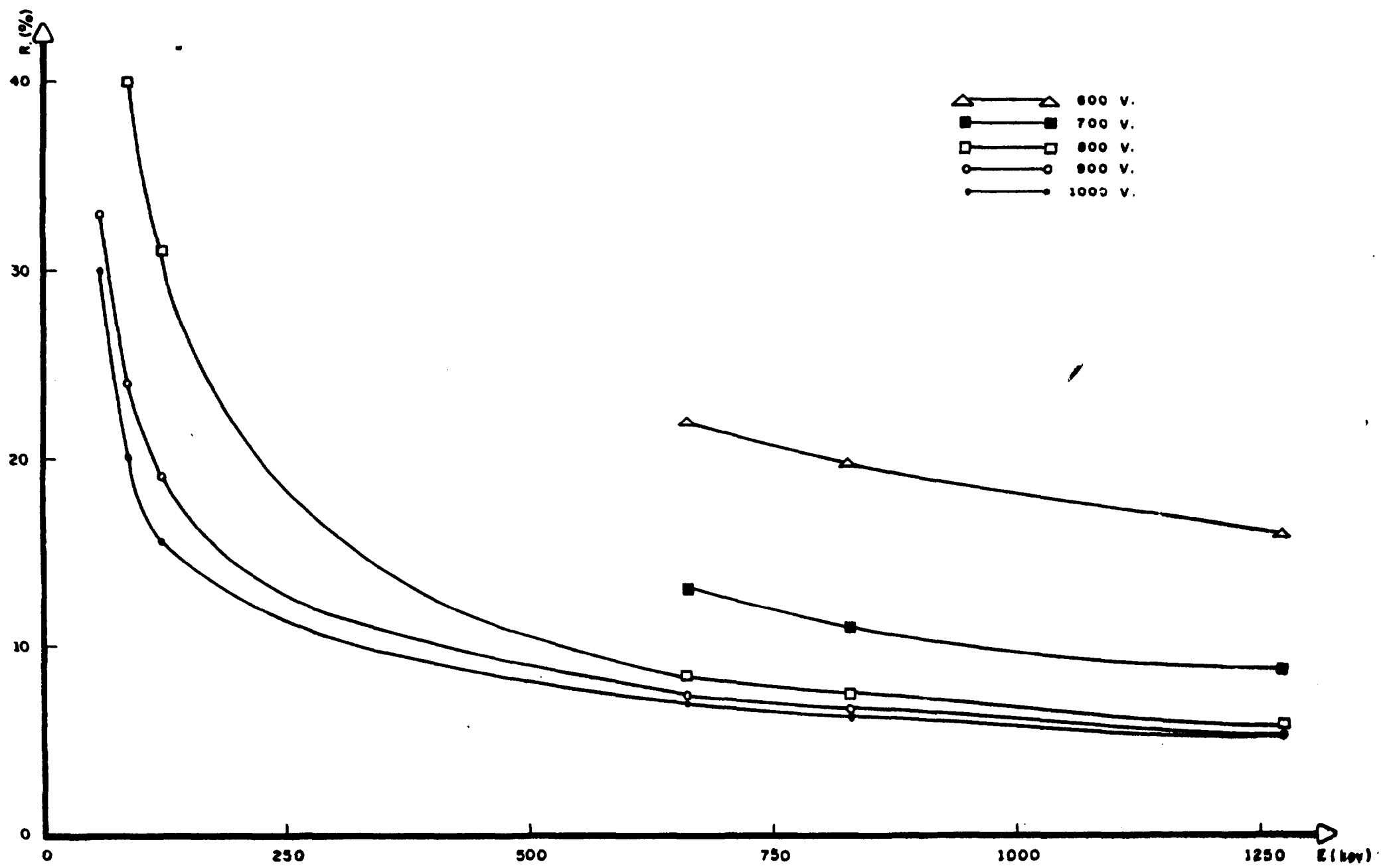


Fig. III.4 - Variação da resolução com a energia - Detector de NaI(Tl)

TABELA III.2
RESOLUÇÃO EM ENERGIA - DETECTOR NaI (T1)

E (keV)	600 V		700 V		800 V		900 V		1000 V	
	FWHM	R	FWHM	R	FWHM	R	FWHM	R	FWHM	R
59,54	ND	ND	ND	ND	ND	ND	20	33	18	30
88,03	ND	ND	ND	ND	35	40	21	24	18	20
122,06	ND	ND	ND	ND	38	31	23	19	20	16
661,66	144	22	84	13	56	8,5	48	7,3	46	6,9
834,84	171	20	96	11	63	7,5	54	6,5	53	6,3
1.274,54	204	16	112	8,8	72	5,6	68	5,3	68	5,3

OBS: a) FWHM em keV, R em %
b) ND: não determinado

3.1.4 - EFICIÊNCIA

A figura III.5 mostra a variação da eficiência de pico com a energia, segundo os resultados mostrados na tabela III.3. Os valores foram calculados para 1000V. Discrepâncias entre eficiências calculadas para várias tensões não foram significativas.

TABELA III.3
EFICIÊNCIA DE CONTAGEM NO PICO - DETECTOR NaI (T1)

E. (keV)	Eff (%)
59,54	21
88,03	37
122,06	35
661,66	3,4
834,84	2,7
1.274,54	1,1

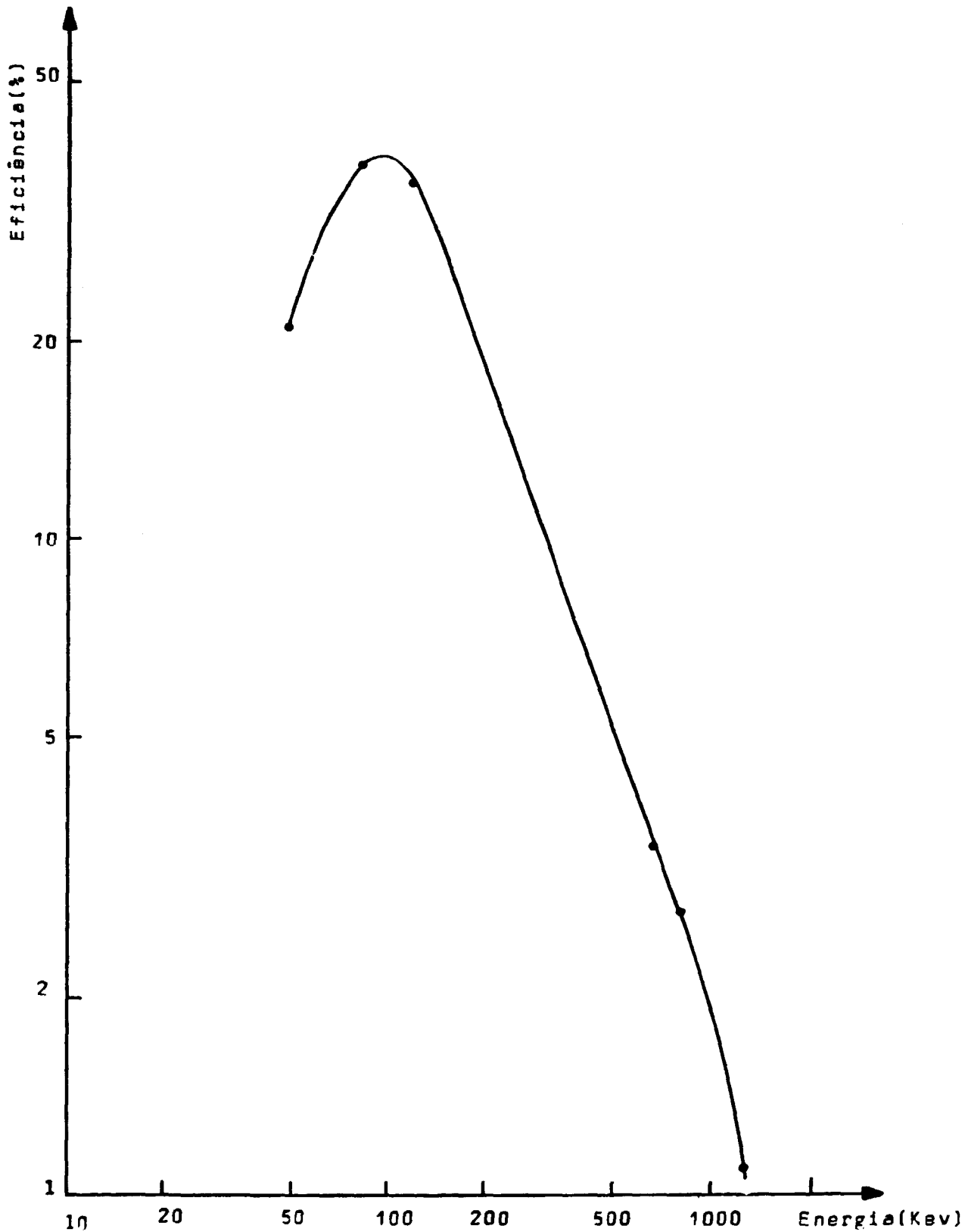


Fig. III.5 - Variação da eficiência com a energia
Detector a cristal de NaI(Tl)

3.1.5 - RELAÇÃO PICO-COMPTON

A figura III.6 apresenta a variação da relação pico-Compton com a tensão aplicada:

3.1.6 - FORMA DO PICO

A figura III.7 mostra a composição do fotopico para 662 KeV com a tensão de 1000V.

3.2 - DETECTOR DE (HP) Ge.

3.2.1 - ESTABILIDADE

A figura III.8 mostra os resultados para cada tensão.

3.2.2 - LINEARIDADE

A figura III.9 mostra a reta de calibração para a tensão de 4500V. As retas para as outras tensões não foram mostradas para evitar a superposição, posto que as inclinações eram virtualmente as mesmas.

3.2.3 - RESOLUÇÃO

A tabela III.4 apresenta a resolução determinada para várias tensões. A figura III.10 mostra a variação da resolução com a energia e a tensão aplicada. Apenas as curvas correspondentes a 500V e 4500V foram mostradas, pois acima de 1500V elas praticamente se superpõem.

TABELA III.4

RESOLUÇÃO EM ENERGIA - DETECTOR (HP)Ge.

E (keV)	500 V		1500 V		2500 V		3500 V		4500 V	
	FWHM	R	FWHM	R	FWHM	R	FWHM	R	FWHM	R
59,54	2,2	3,7	1,0	1,7	0,81	1,4	0,78	1,3	0,79	1,3
88,03	2,0	2,3	1,0	1,1	0,80	0,91	0,82	0,93	0,82	0,93
122,06	2,0	1,6	1,0	0,82	0,84	0,69	0,83	0,68	0,82	0,67
661,66	4,1	0,62	1,7	0,26	1,6	0,24	1,5	0,23	1,5	0,23
834,84	4,4	0,53	1,9	0,23	1,7	0,20	1,7	0,20	1,7	0,20
1.274,54	4,6	0,36	2,4	0,19	2,2	0,17	2,1	0,16	2,1	0,16

OBS: FWHM em keV, R em %

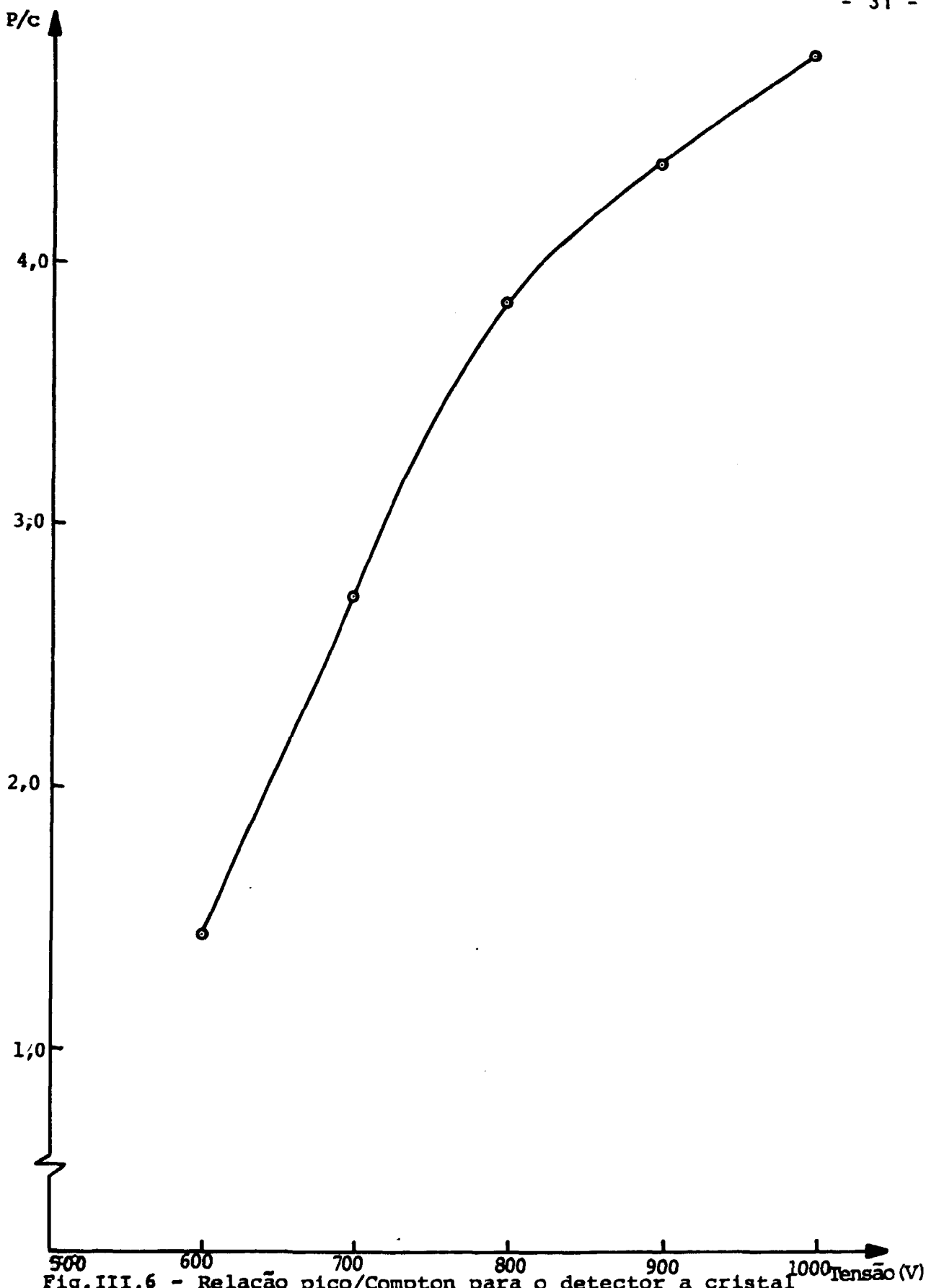


Fig.III.6 - Relação pico/Compton para o detector a cristal de NaI(Tl)

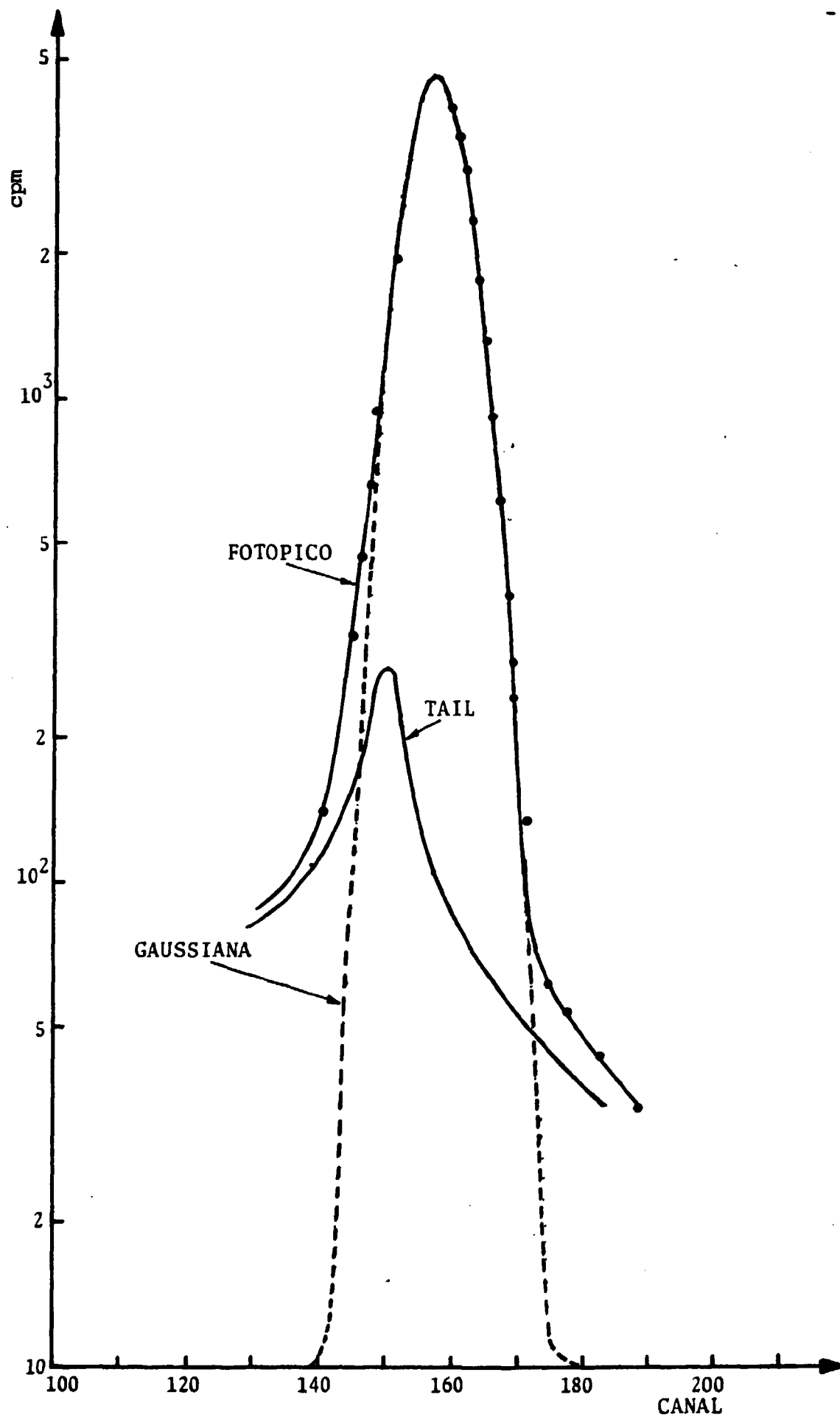


FIG. III.7- Composição do fotopico

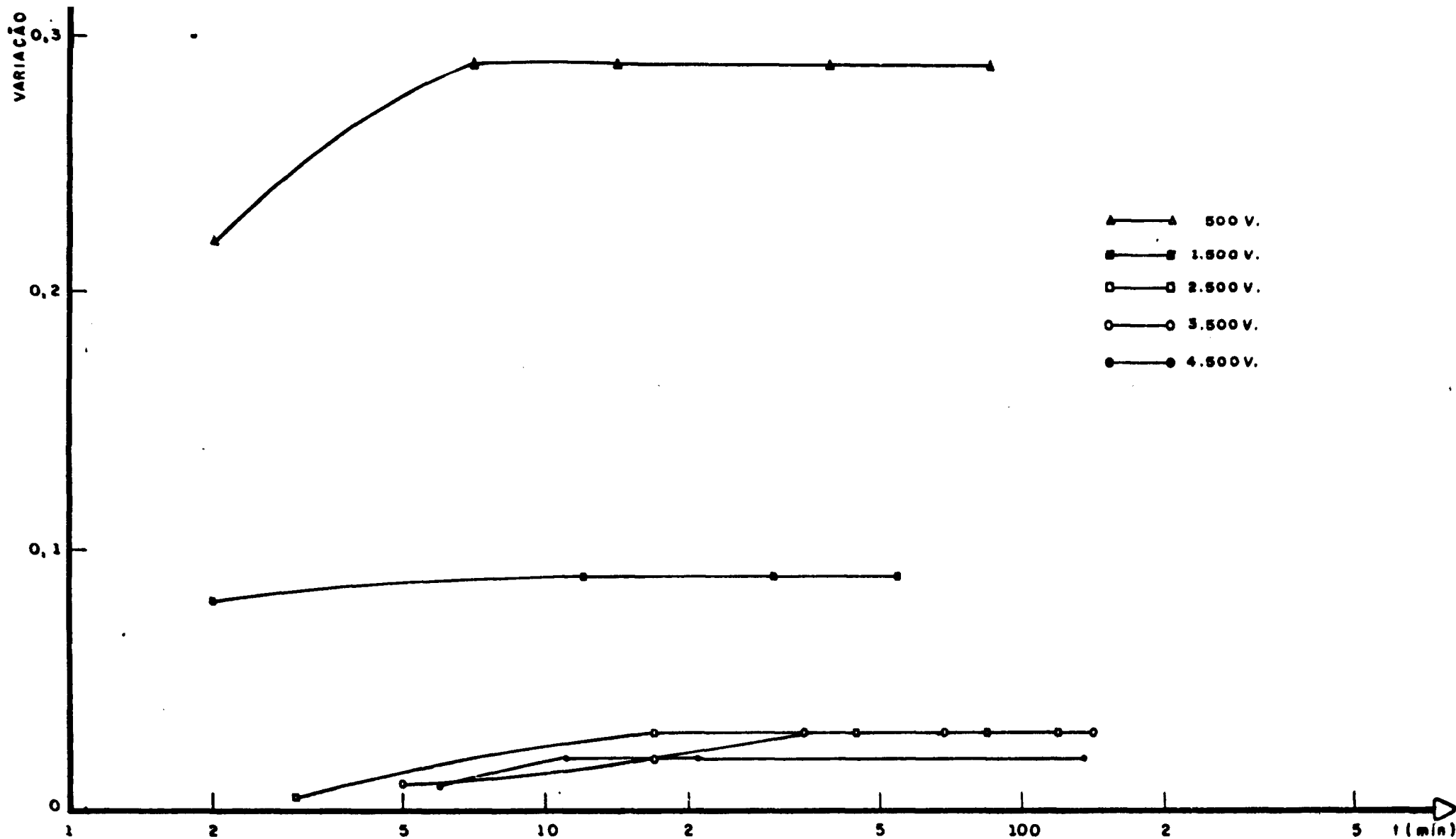


FIGURA III.8 - Flutuação da posição do pico de 662 KeV com o tempo - Detector (HP)Ge

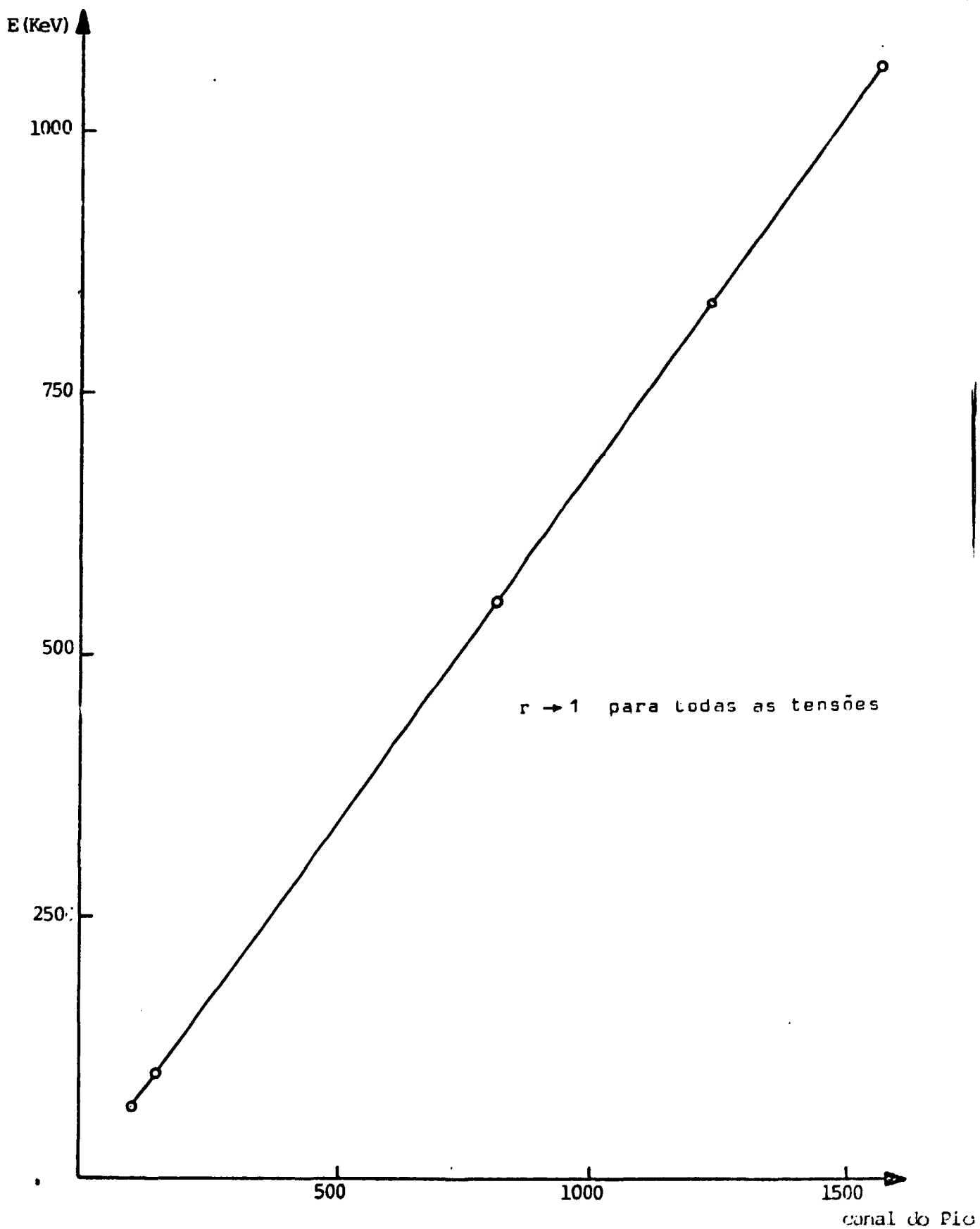


Fig. III. 9 - Reta de calibração energia x canal
detector de (HP) Ge. -4500 V

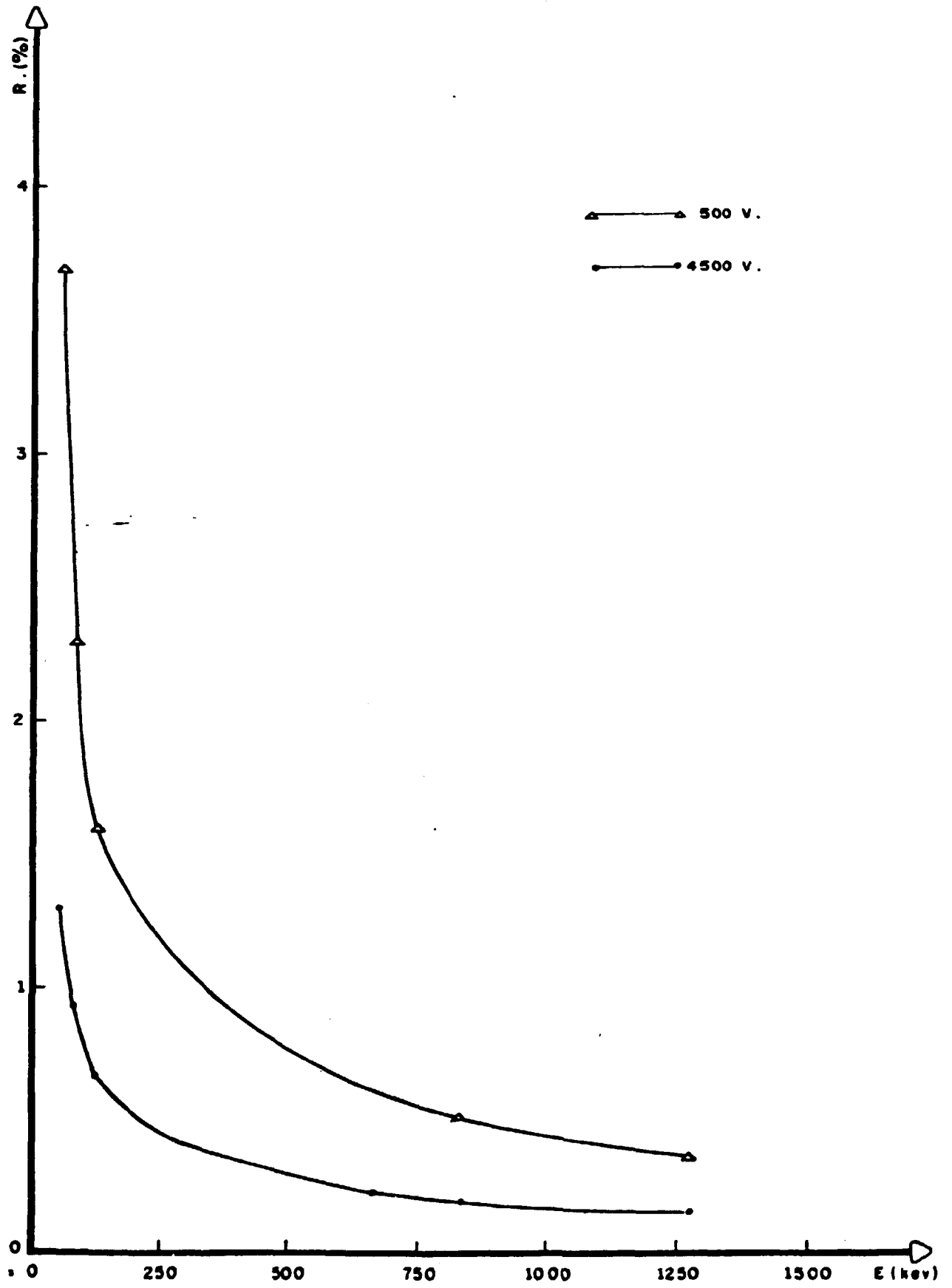


Fig.III.10 - Variação da resolução com a energia - detector (HP)Ge

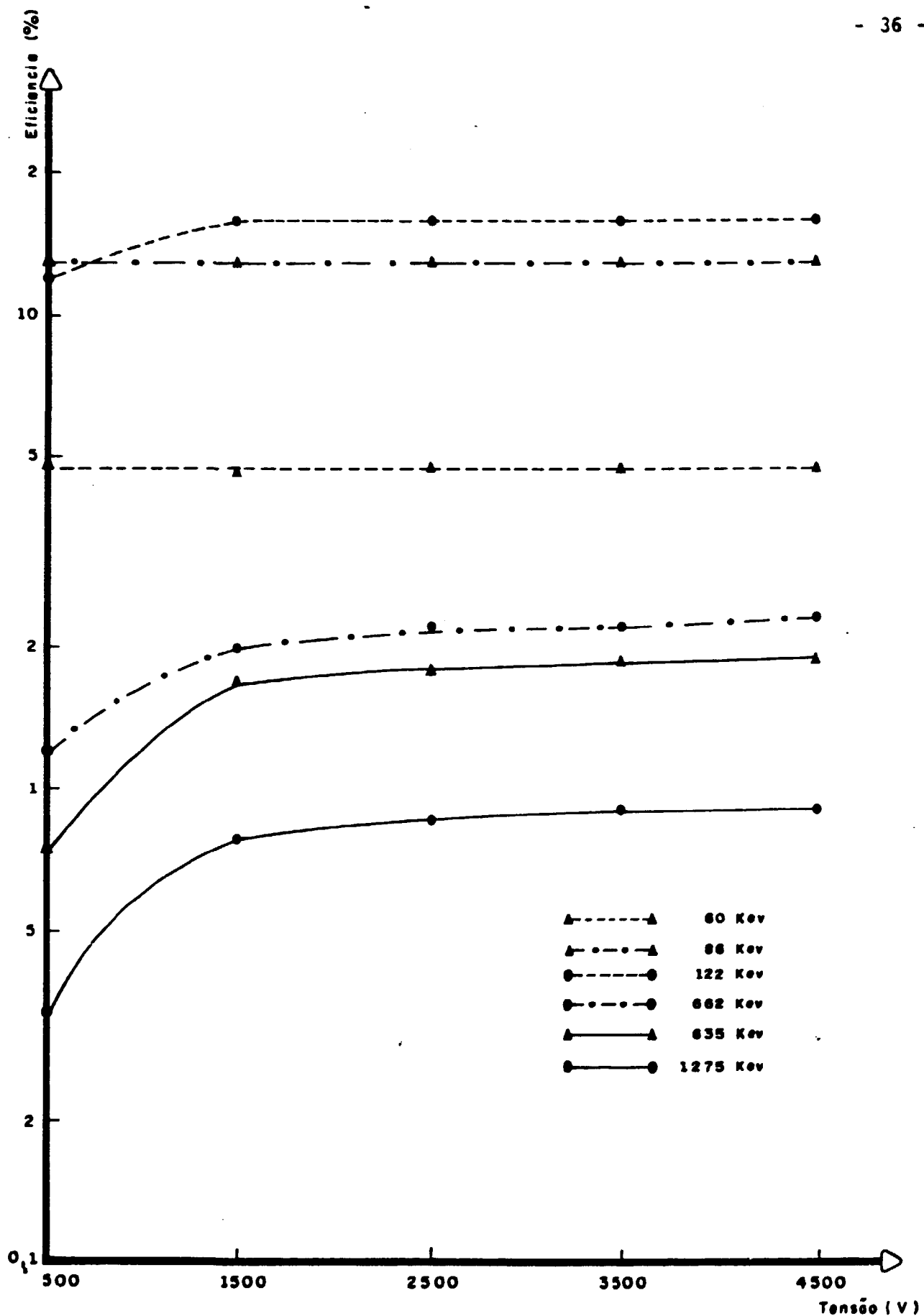


FIGURA III.11 - Variação da eficiência de contagem com a tensão aplicada.

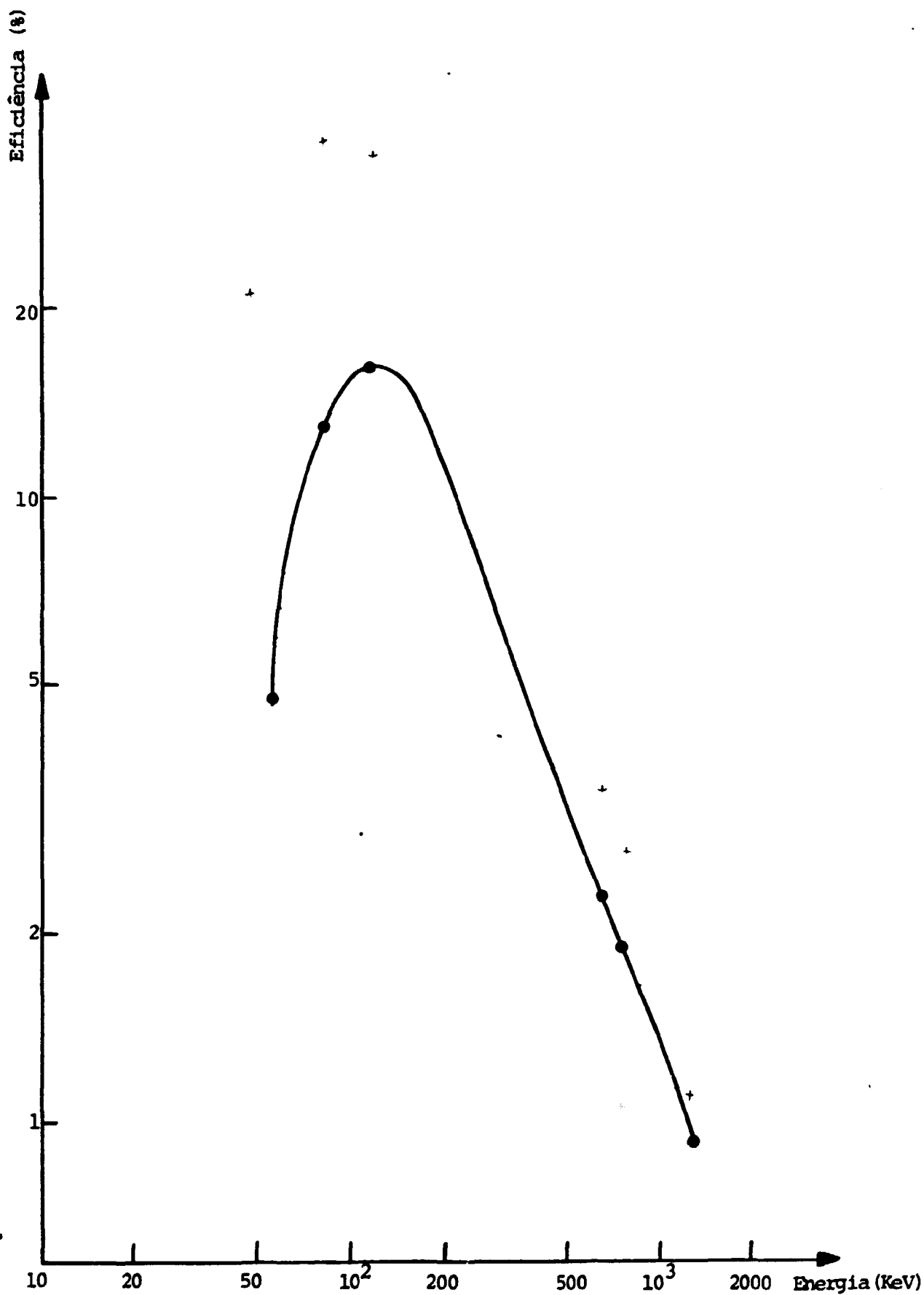


Fig.III.12 Variação da eficiência de pico com a energia - Detector (HP) Ge.

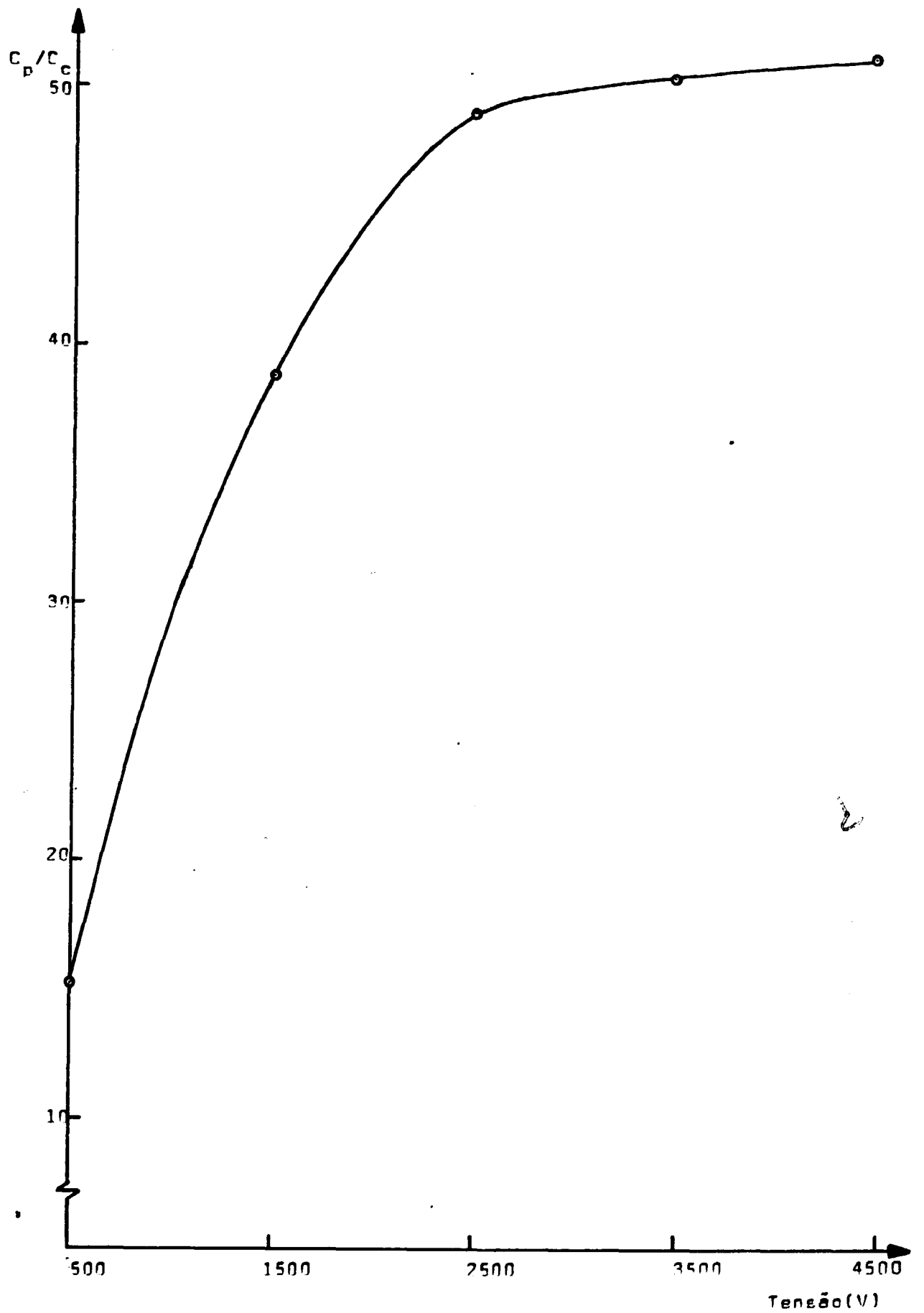


Fig. III.13 - Variação da relação pico/Compton com a tensão para 662 keV - Detector (HP) Ge

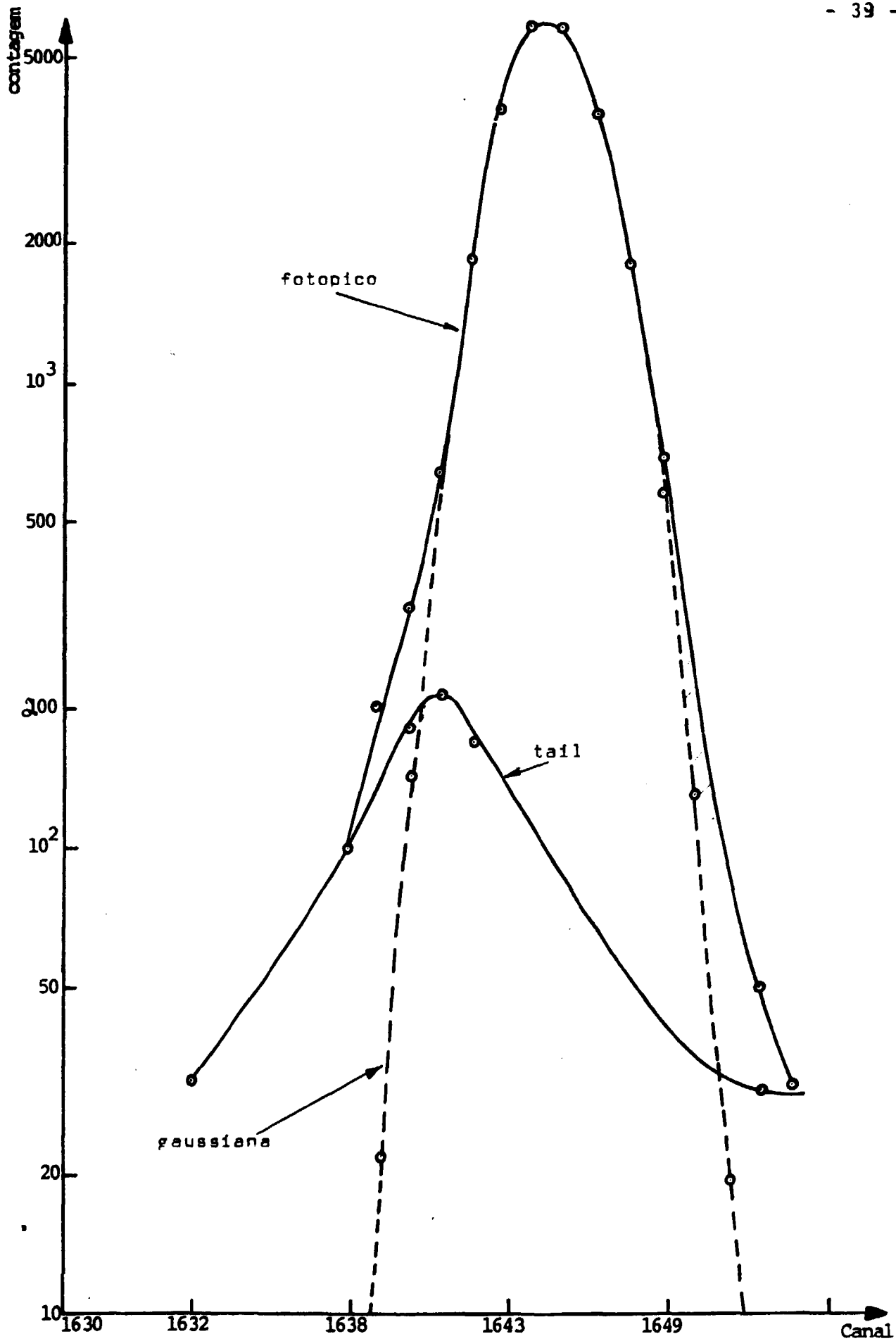


Fig. III.14 - Composição do fotopico de 662KeV para 4500V -
- Detector (HP) Ge.

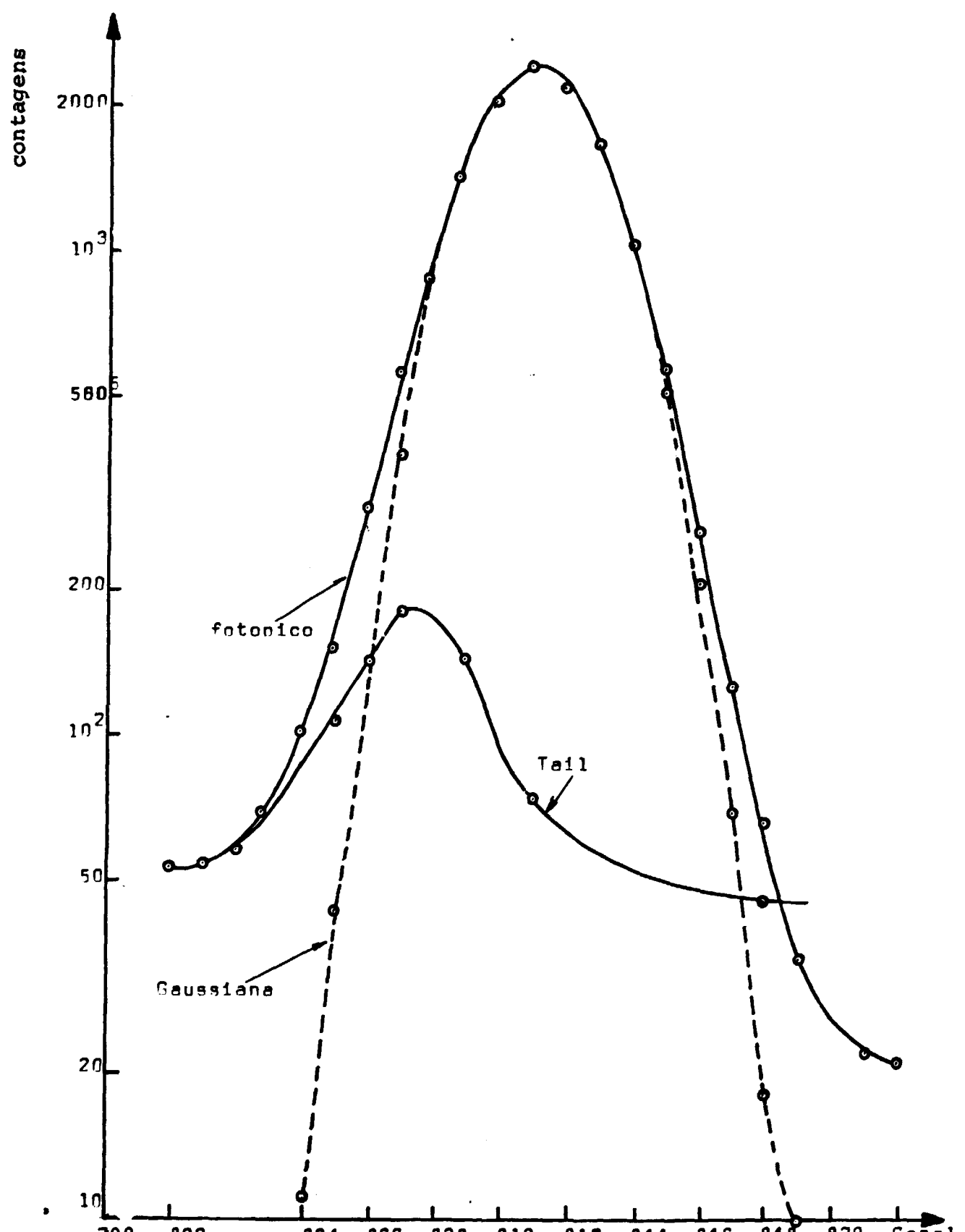


Fig.III.15 -- Composição do fotonico para 68Zn - Detector (HP)Ge
Tensão : 500V

3.2.4 - EFICIÊNCIA

Os resultados para a eficiência de pico estão indicados na tabela III.5. A figura III.11 mostra a variação da eficiência com a tensão, e a figura III.12 a variação da eficiência, a 4.500 V, com a energia.

TABELA III.5

EFICIÊNCIA DE CONTAGEM NO PICO (%)
DETECTOR (HP)Ge.

E(keV)	500V	1500V	2500V	3500V	4500V
59,54	4,9	4,7	4,8	4,9	4,8
88,03	13	13	13	13	13
122,06	12	16	16	16	16
661,66	1,2	2,0	2,2	2,2	2,3
834,84	0,75	1,7	1,8	1,9	1,9
1.274,54	0,34	0,79	0,87	0,91	0,91

3.2.5 - RELAÇÃO PICO-COMPTON

A figura III.13 apresenta a variação da relação Pico-Compton com a tensão.

3.2.6 - FORMA DO PICO

As figuras III.14 e III.15 apresentam a composição do fotopico para 662 keV para 500V e 4500V.

CAPÍTULO IV

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

4.1. - SISTEMA A CRISTAL CINTILADOR

Os resultados obtidos para o sistema a NaI(Tl) estão perfeitamente compatíveis com o que se obtém na literatura. O fenômeno da flutuação do ganho é conhecido há vários anos, sendo atribuído a efeitos térmicos e de carga espacial produzidos pela corrente de elétrons no tubo fotomultiplicador /4,9/. Tais efeitos seriam logicamente mais *notados* a tensões mais altas, de forma que maiores flutuações seriam aí observadas. Isso está confirmado na figura III.1. A influência do fenômeno em espectrometria é óbvia, especialmente quando se emprega sistemas monocanais de análise. Métodos baseados em fontes de luz /9/ ou em fontes gamma padrões /17/ podem ser utilizados. A segunda alternativa já foi empregada com sucesso em análise por ativação /6/.

Como esperado, a linearidade da resposta dentro da faixa de energia do trabalho (~60-1300 keV) foi muito boa (figura III.2). Ficou evidente a influência de variações, mesmo pequenas, da tensão aplicada na declividade da reta de calibração (figura III.3), fato já reconhecido anteriormente /19/.

A resolução em energia na tensão de operação (1000V) foi compatível com a de sistemas semelhantes /8/. A variação da resolução com a tensão é bastante acentuada a baixas tensões e tende a um valor constante para tensões mais altas (fig. III.4). Fica claro que tensões superiores a 1000V em pouco melhorariam a resolução (fig. IV.1), vindo a acrescentar efeitos negativos associados à carga espacial no tubo fotomultiplicador e mesmo descargas entre dinodos. A figura IV.2 mostra as diversas formas do fotopico de 662 keV nas várias tensões empregadas, com resultados similares aos encontrados na literatura /1/.

Quanto à eficiência absoluta de contagem de pico, a comparação com a literatura tornou-se difícil, dadas as diferenças em geometria. A eficiência relativa, por outro lado, pode ser comparada, e é representada pela forma da curva obtida (fig. III.5). Tal

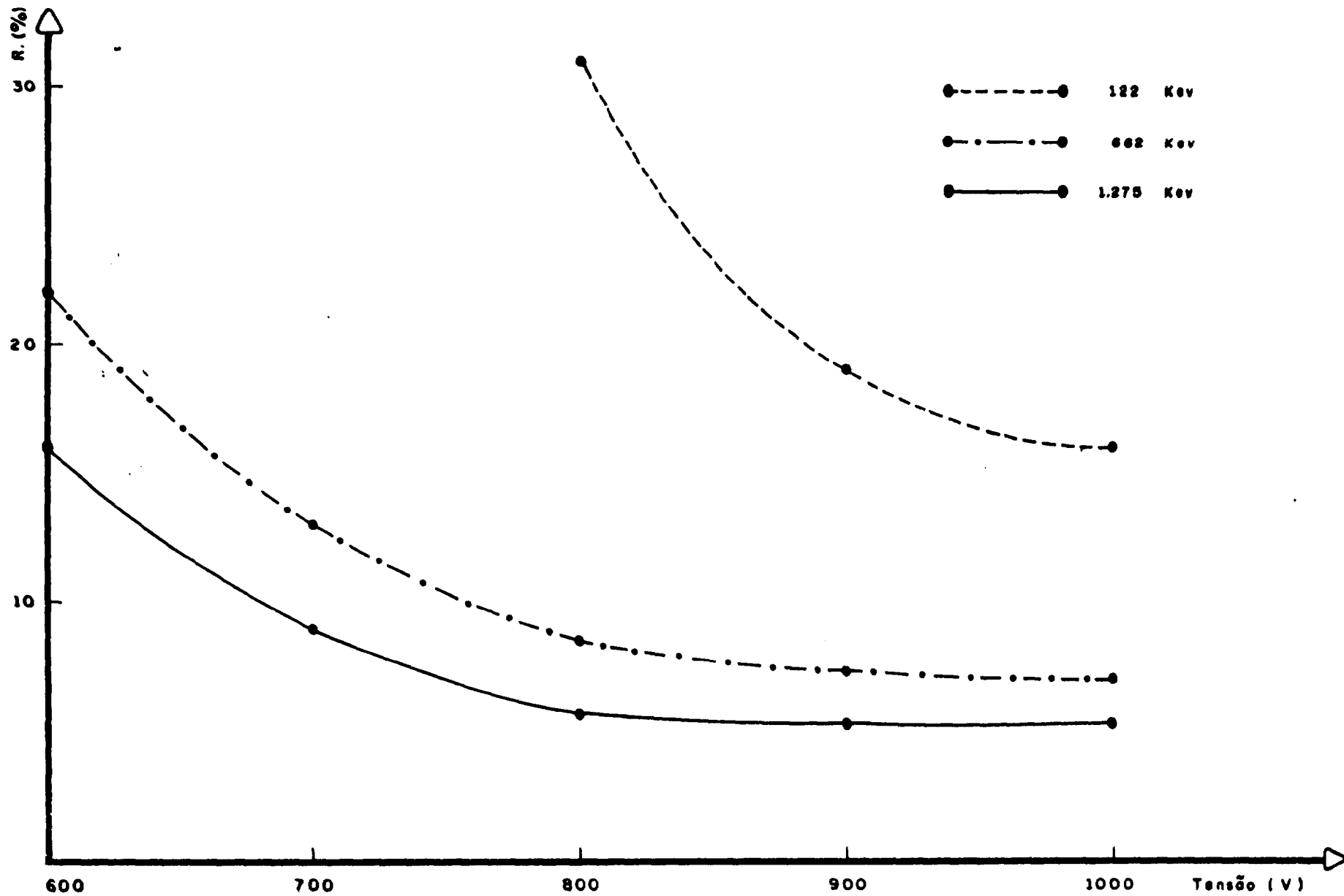


FIG. III.1 - Variação da resolução com a tensão aplicada - Detector NaI(Tl)

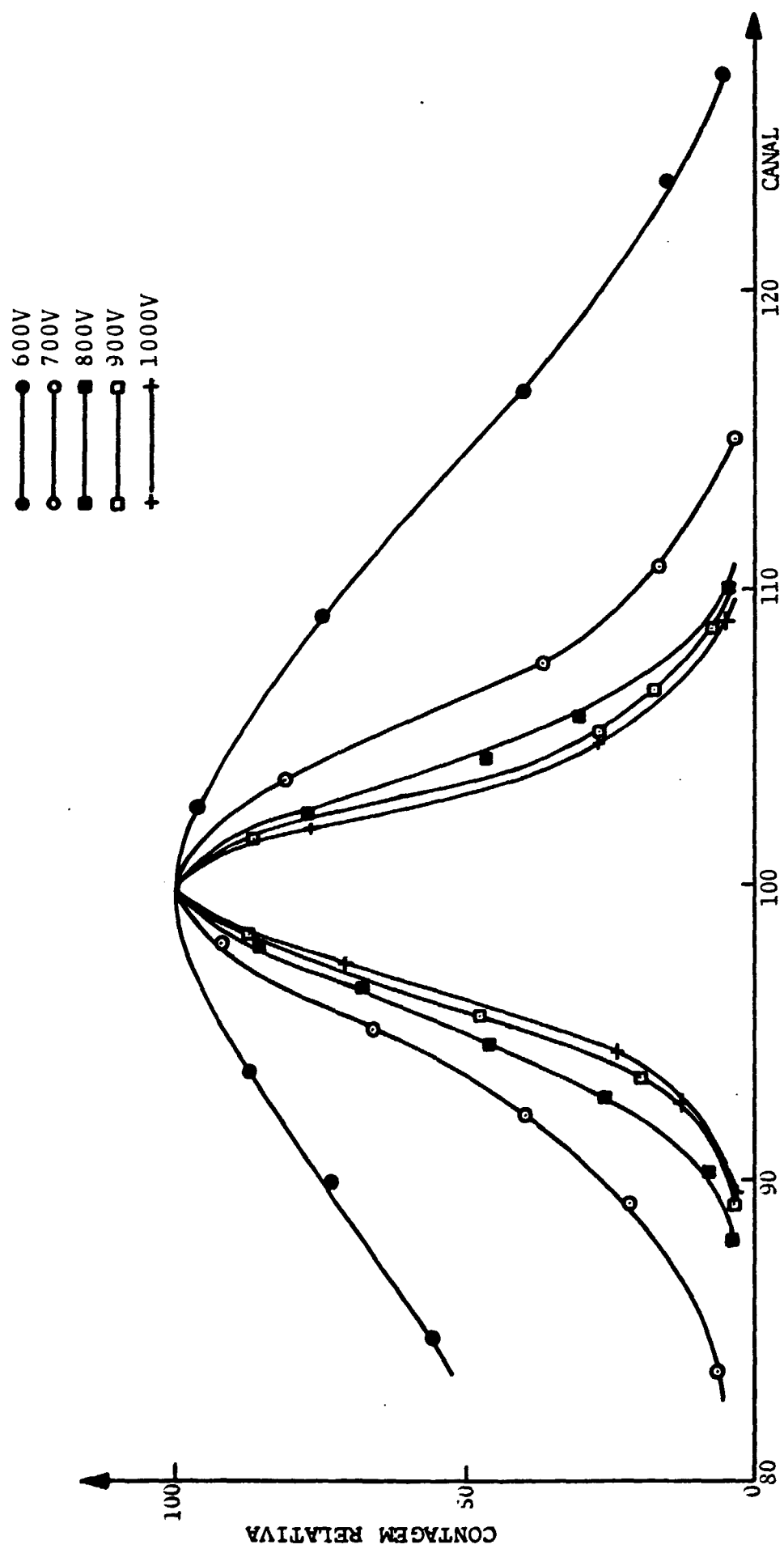


Fig. IV.2 - Variação da forma do fotopico com a tensão

curva mostra o decréscimo da eficiência de pico com a energia . A curva aponta um máximo em $\approx 100\text{keV}$. Para energias menores, a eficiência deveria crescer, mas a absorção da radiação na blindagem do detector reduz a eficiência de contagem. Não foram observadas diferenças significativas na eficiência de contagem para as várias tensões aplicadas, visto que a eficiência está ligada exclusivamente à geometria, que era a mesma em cada caso, à energia da radiação e ao tamanho do cristal.

A relação pico-Compton não é um parâmetro de grande importância para sistemas a NaI(Tl). Sua variação com a tensão reflete o estreitamento do pico com o aumento da tensão (fig.III.6). Como a área do pico se mantém para um mesmo tempo de contagem, o pico se torna mais alto à medida que sua largura diminui.

4.2. - SISTEMA A SEMICONDUTOR

A influência da tensão aplicada é muito mais significativa no caso do detector de (HP)Ge. Por se tratar de um detector a diodo semiconductor, o volume do detector aumenta com a tensão. Além disso, o aumento do campo elétrico reduz a probabilidade de "trapping" e recombinação, melhorando consideravelmente a resolução em energia.

Não foram encontrados na literatura dados referentes à estabilidade dos detectores a semiconductor. Os resultados aqui obtidos (fig.III.8) apontam para um desempenho excelente nesse aspecto: a estabilidade é alcançada em um tempo muito curto em todas as tensões estudadas.

Poder-se-ia esperar flutuações maiores para tensões mais elevadas, mas ocorre que a elevação da tensão deve ser lenta; o tempo que decorre é então longo o suficiente para que a estabilização seja alcançada, de forma que virtualmente nenhuma flutuação foi aí obtida.

A resolução para várias energias (fig.III.10) está em perfeito acordo com os dados da literatura para cristais de mesmas dimensões /9/. A variação da resolução com a tensão aplicada mostra a influência do fenômeno de "trapping" nas baixas tensões. Para os detectores a semiconductor, sua excelente resolução intrín-

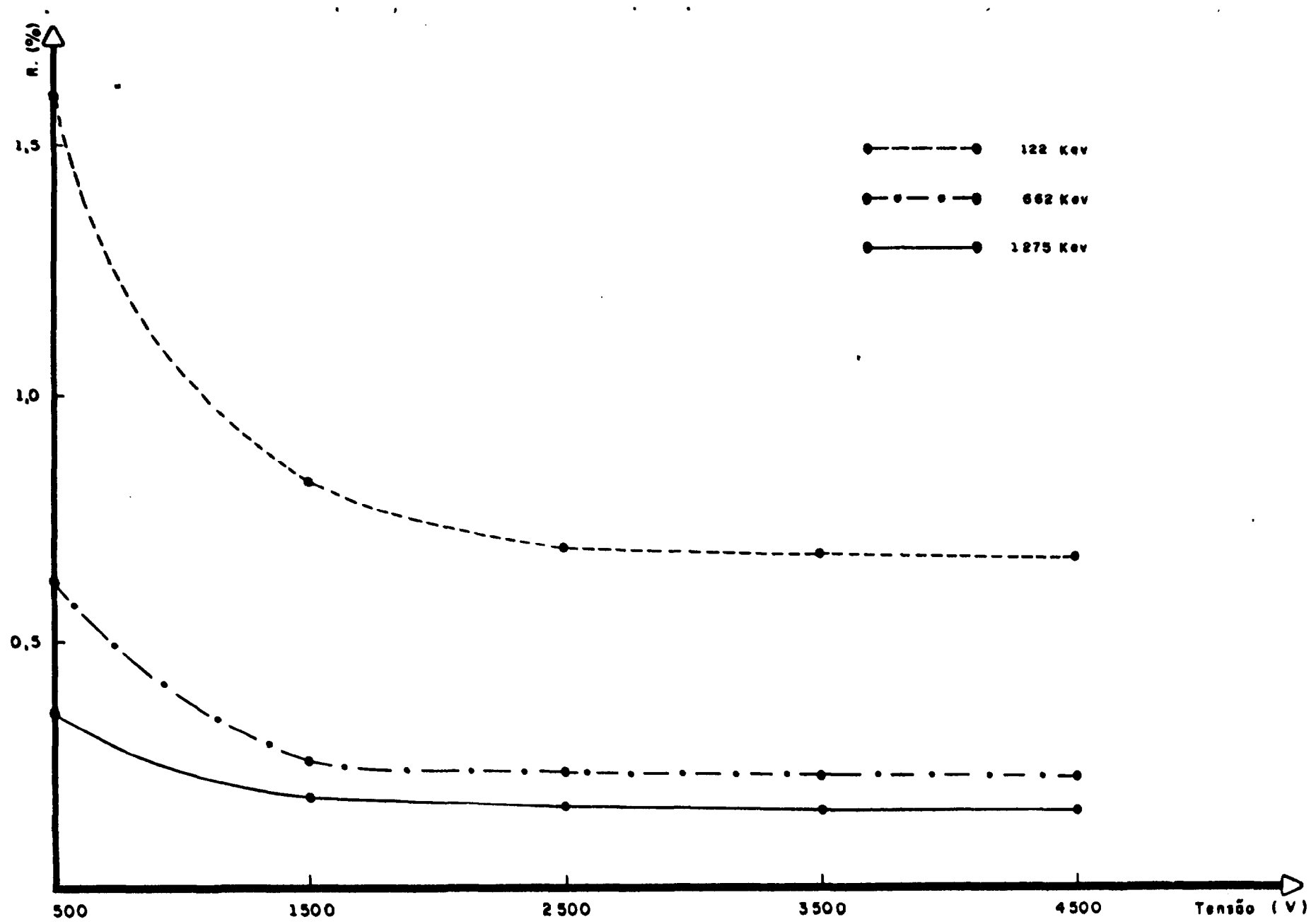
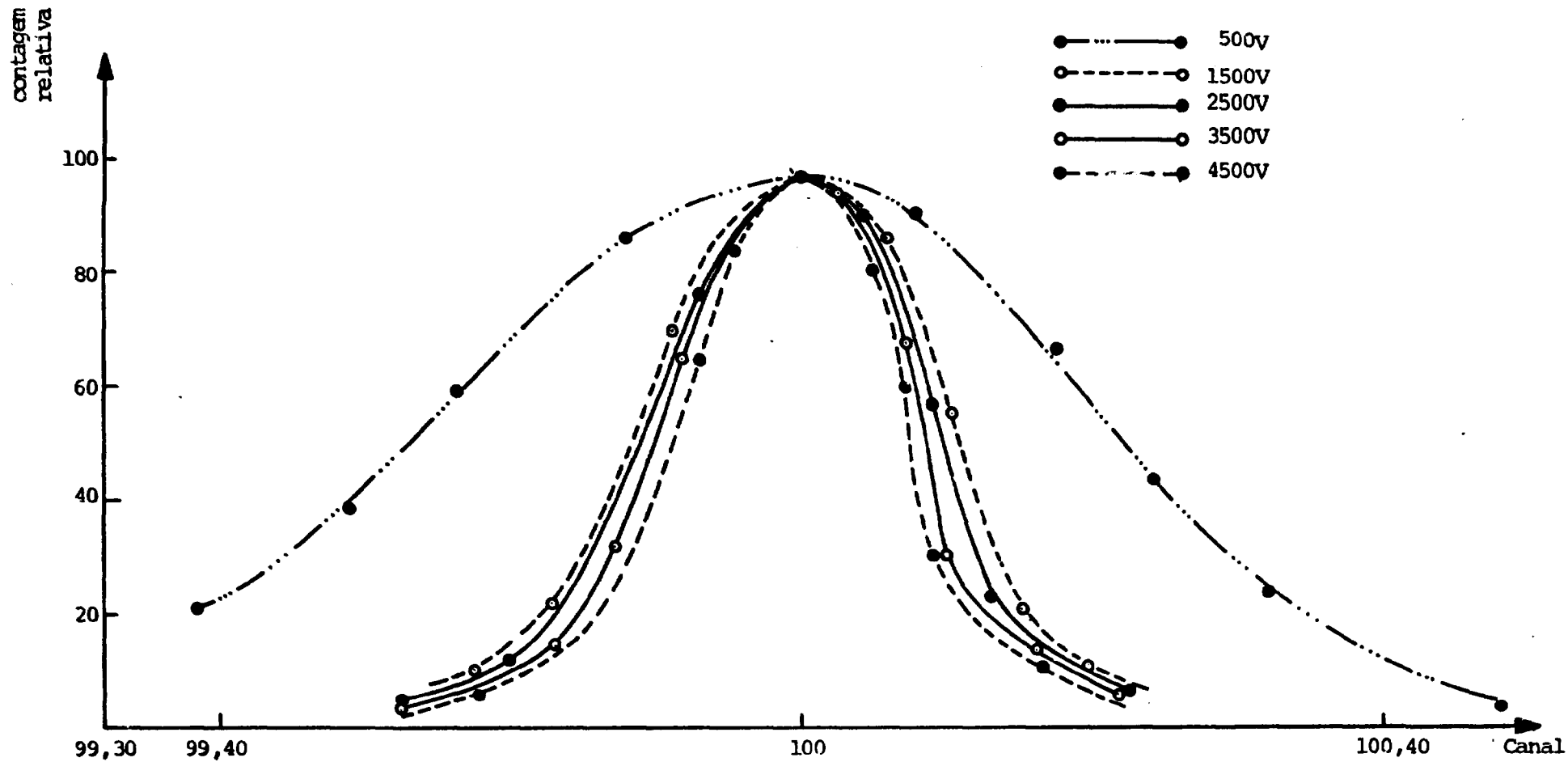


FIG. III.3 - Variação da resolução com a tensão aplicada - Detector (HP)Ge



*Fig.IV.2-Variação da forma de pico com a tensão.

Fig.IV.4

seca faz com que a partir de determinada tensão a FWHM seja quase exclusivamente dominada pela resolução do sistema eletrônico. Dessa forma, a resolução-limite do sistema de espectrometria é alcançada a tensões baixas comparadas com a tensão de operação (fig.IV.3). A figura IV.4 mostra a variação da forma do fotopico de 662 keV para as várias tensões estudadas.

A linearidade da resposta, como esperado, foi excelente, (fig. III.9). O coeficiente de correlação obtido foi descrito como "tendendo a 1", significando que $(r-1) < 10^{-8}$.

A forma da curva da eficiência de contagem (fig.III.12) é semelhante à encontrada na literatura para detectores similares/9/. A variação da eficiência com a tensão aplicada mostra claramente o aumento da região de depleção(fig.III.11); fica evidente que para 500V o volume ativo já é suficiente para obtenção da eficiência máxima para 60 e 88 keV; o mesmo ocorre a 1500V para 122 keV. Volumes ativos bem maiores são necessários para que o mesmo ocorra para energias elevadas.

A variação da relação pico-Compton para 662keV com o aumento da tensão (fig.III.13) mostra a combinação dos efeitos da melhor resolução e do maior volume ativo.

4.3 - FORMA DO PICO

O programa empregado na análise do pico gama gera uma guassiana a partir dos dados, subtraindo-a a seguir do pico obtido. O resultado é uma função complexa usualmente denominada "tail". No caso do pico de 662 keV obtido com o NaI(Tl) a função "tail" se desvanece, dada a largura do pico (fig:III.7)

No caso do detector de (HP)Ge, a função "tail" é significativa (fig.III.14), principalmente a baixas tensões, quando se evidencia o efeito de "trapping" (Fig.III.15).

A comparação do desempenho de ambos os sistemas pode ser feita por meio da fig.IV.5, que mostra a resposta ao fotopico de 662keV para sistemas de espectrometria a (HP)Ge e NaI(Tl) de mesma eficiência de contagem. As áreas de cada fotopico são idênticas,mas a superior resolução do sistema a cristal semiconductor faz com que o fotopico se sobressaia muito mais. Essa característica é fundamental na aplicação de detectores a (HP)Ge em amostras complexas ou na determinação da radioatividade ambiental /18/.

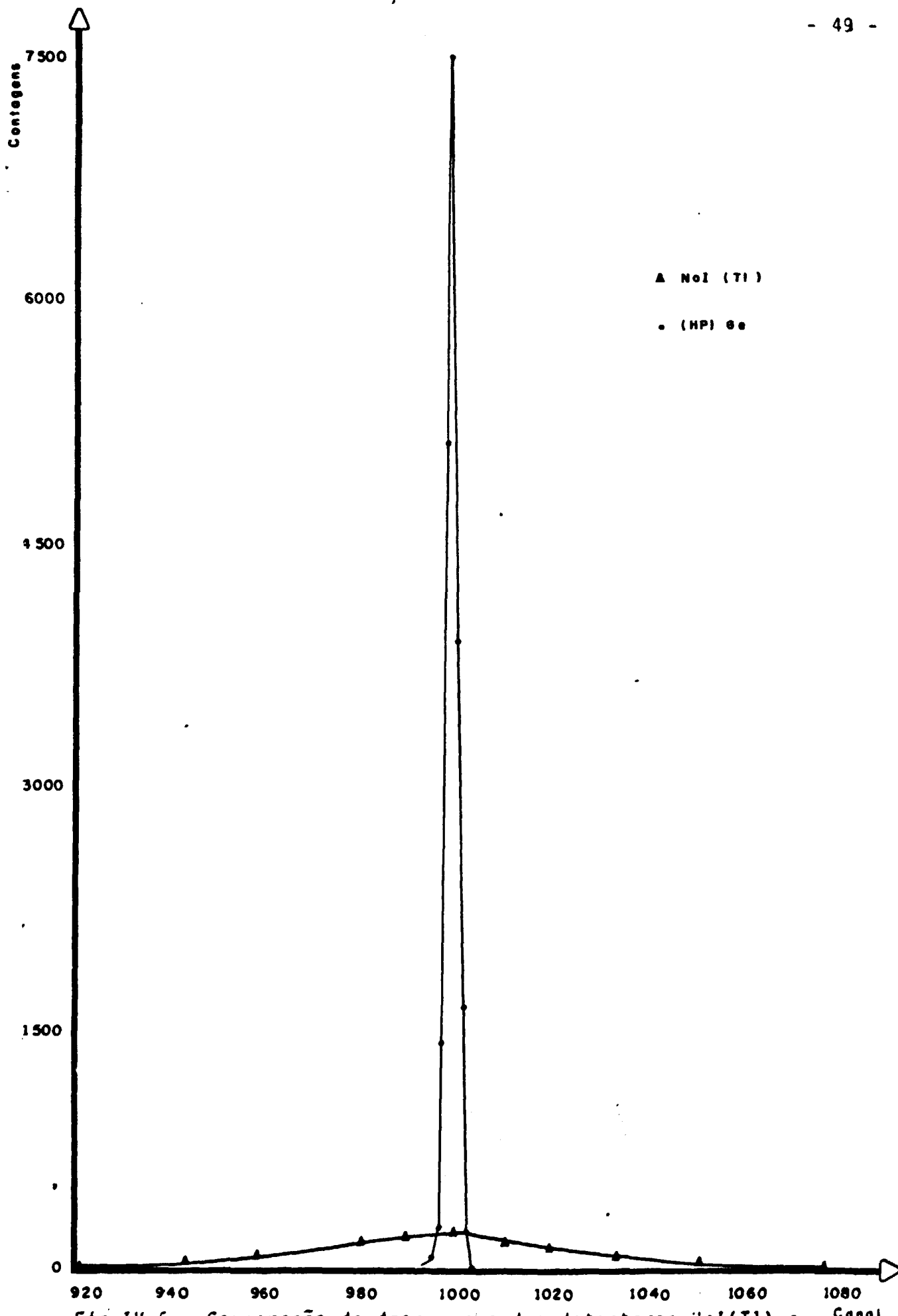


Fig.IV.5 - Comparação do desempenho dos detectores NaI(Tl) e (HP) Ge

4.4. - APLICAÇÕES

O presente trabalho, a par de sua simplicidade aparente, apresenta alguns aspectos verdadeiramente relevantes:

- Com base no estudo das características dos dois sistemas em pauta, o trabalho mostra aos usuários a influência de alguns fatores nessas características. O melhor conhecimento da forma de operação de tais sistemas trará a melhor compreensão das suas potencialidades e limitações, tornando seu emprego mais adequado e proveitoso. A conscientização de que os sistemas analisados são equipamentos de alta sofisticação que merecem um estudo aprofundado por parte dos que pretendem empregá-los foi um dos grandes objetivos do trabalho.

- A metodologia proposta para análise do espectro é simples, rudimentar mesmo, mas pode, dentro de certos limites, ser empregada em espectrometria, de forma geral.

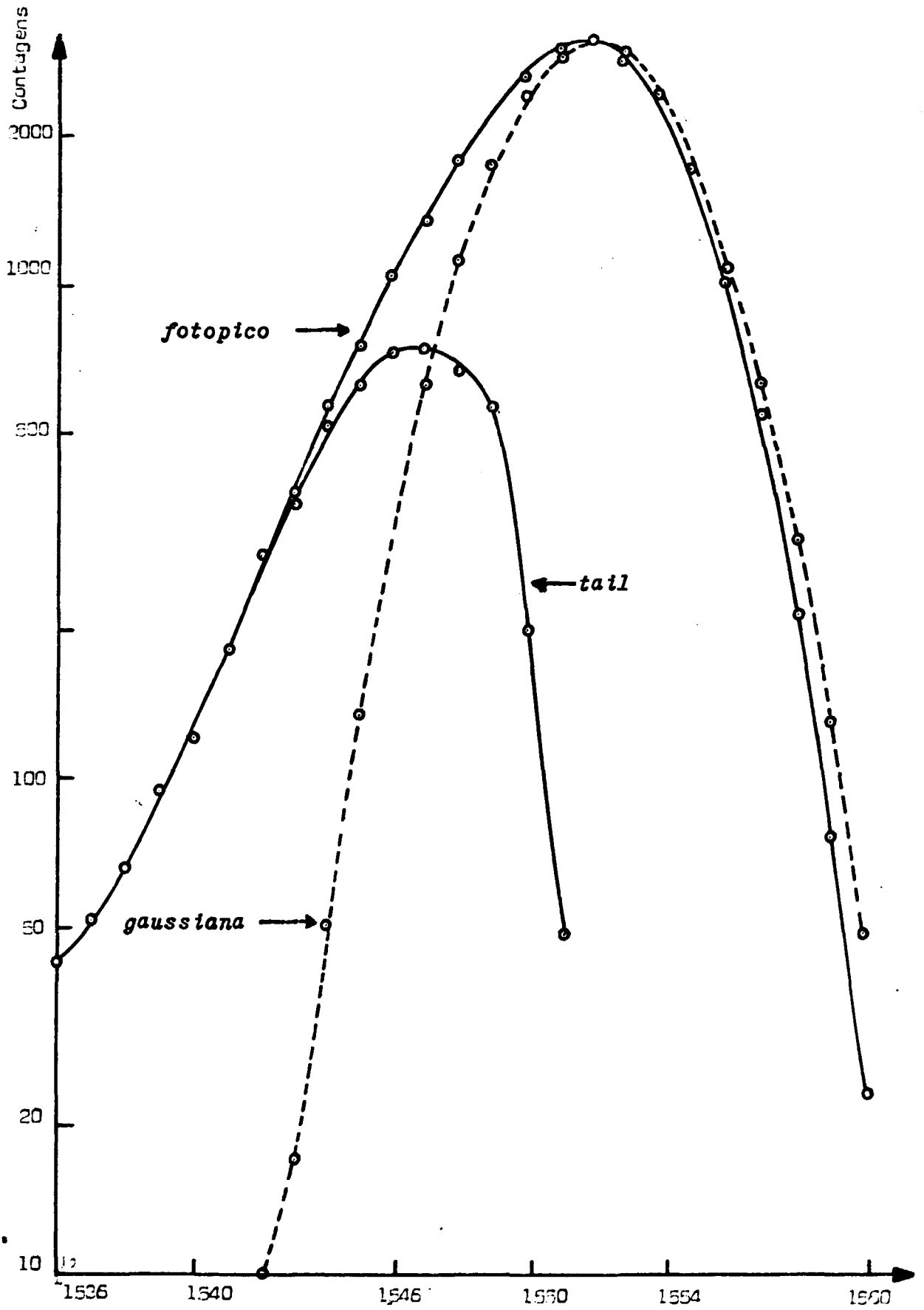
- O aspecto técnico mais significativo é a proposição de uma metodologia para teste de equipamentos. Desde que os sistemas analisados mostram-se em boas condições operacionais, eles podem servir de padrões nos ensaios de sistemas similares.

Como prova, empregou-se a metodologia aqui desenvolvida ao ensaio de um amplificador para espectrometria acoplado ao detector de (HP)Ge operando a 4500V. O pico de 662 keV obtido, com a mesma fonte do trabalho, está mostrado na figura IV.6. A comparação com o pico obtido com o sistema empregado neste trabalho (Fig.III.14) mostrou que:

- O amplificador em teste confere ao sistema uma resolução mais pobre (0,29% vs. 0,23%)

- O pico mostra uma aberrante assimetria, indicada por um "tail" muito relevante.

Isso demonstra que o amplificador testado não possuía as características requeridas para o sistema. Entretanto, vinha sendo utilizado rotineiramente com detectores de (HP)Ge e de barreira de superfície para, respectivamente, espectrometria gama e espectrometria alfa de alta resolução.



Composição do fotopico - Amplificador GATEC - Detector 1 (HP) Ge - Canal

Fig.IV.6

4.5. - CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Ambos os sistemas estão funcionando dentro das características operacionais que lhes são compatíveis.
- Existe uma natural instabilidade nas primeiras horas de operação dos sistemas a cristal de NaI (Tl) que deve ser levada em conta ao se empregar tais sistemas.
- Flutuações, mesmo pequenas, na tensão aplicada têm grande influência na operação de sistemas a cristal de NaI(Tl), de forma que uma fonte de alta tensão de grande estabilidade é um requisito básico para tais sistemas.
- A metodologia, embora limitada, tem emprego em certas aplicações de espectrometria gama, prestando-se sem restrições ao teste de sistemas.

A P E N D I C E S

APÊNDICE A

OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DO FOTOPICO

A forma ideal do fotopico é a de uma curva normal. Entretanto, a curva resultante, como observada em um analisador multicanal, não corresponde exatamente a uma gaussiana /12,13/. Dois fatores são os principais responsáveis por isto:

- A flutuação estatística das contagens por canal.
- A predominância de pulsos de altura inferior à média, causada especialmente por coleta incompleta de cargas e limitações do sistema eletrônico.

Estes fatores fazem com que a forma do fotopico seja aproximadamente a de uma curva normal com uma sensível distorção em sua metade esquerda. Dessa forma, para permitir o cálculo de parâmetros como FWHM e área, cada fotopico foi recomposto na forma de uma curva normal. Como o traçado da gaussiana é complexo, cada fotopico foi retificado através do seguinte procedimento, desenvolvido por Zimmermann/20/:

- A cada canal foi associado um parâmetro Q_i dado por:

$$Q_i = \ln \frac{C_{i-1}}{C_{i+1}}$$

onde,

C_{i-1} = contagens no canal $i-1$

C_{i+1} = contagens no canal $i+1$

Das propriedades da curva normal vem,

$$\frac{C_{i-1}}{C_{i+1}} = \exp \frac{2 (i - i_0)^2}{\sigma^2}$$

onde,

i_0 = constante

σ = desvio-padrão da distribuição

Daí:

$$\ln \frac{C_{i-1}}{C_{i+1}} = Q_i = \frac{2}{\sigma^2} i - \frac{2}{\sigma^2} i_0$$

Esta é a equação de uma reta com declividade $\frac{2}{\sigma^2}$

Com os dados extraídos do multicanal eram obtidos os vários Q_i . Num papel milimetrado, construía-se um gráfico $Q_i \times i$. Aplicando-se a regressão linear simples aos pontos que aproximadamente se alinhavam, era obtida a equação de uma reta. A intersecção dessa reta com a reta $Q_i = 0$ fornecia o canal correspondente ao pico, e sua declividade permitia o cálculo de σ .

A partir daí, a FWHM era obtida, pois $FWHM = 2,35\sigma$ e a área do pico era calculada como

$$A = 1,064 \times FWHM \times C_p$$

onde C_p = contagem no canal de pico.

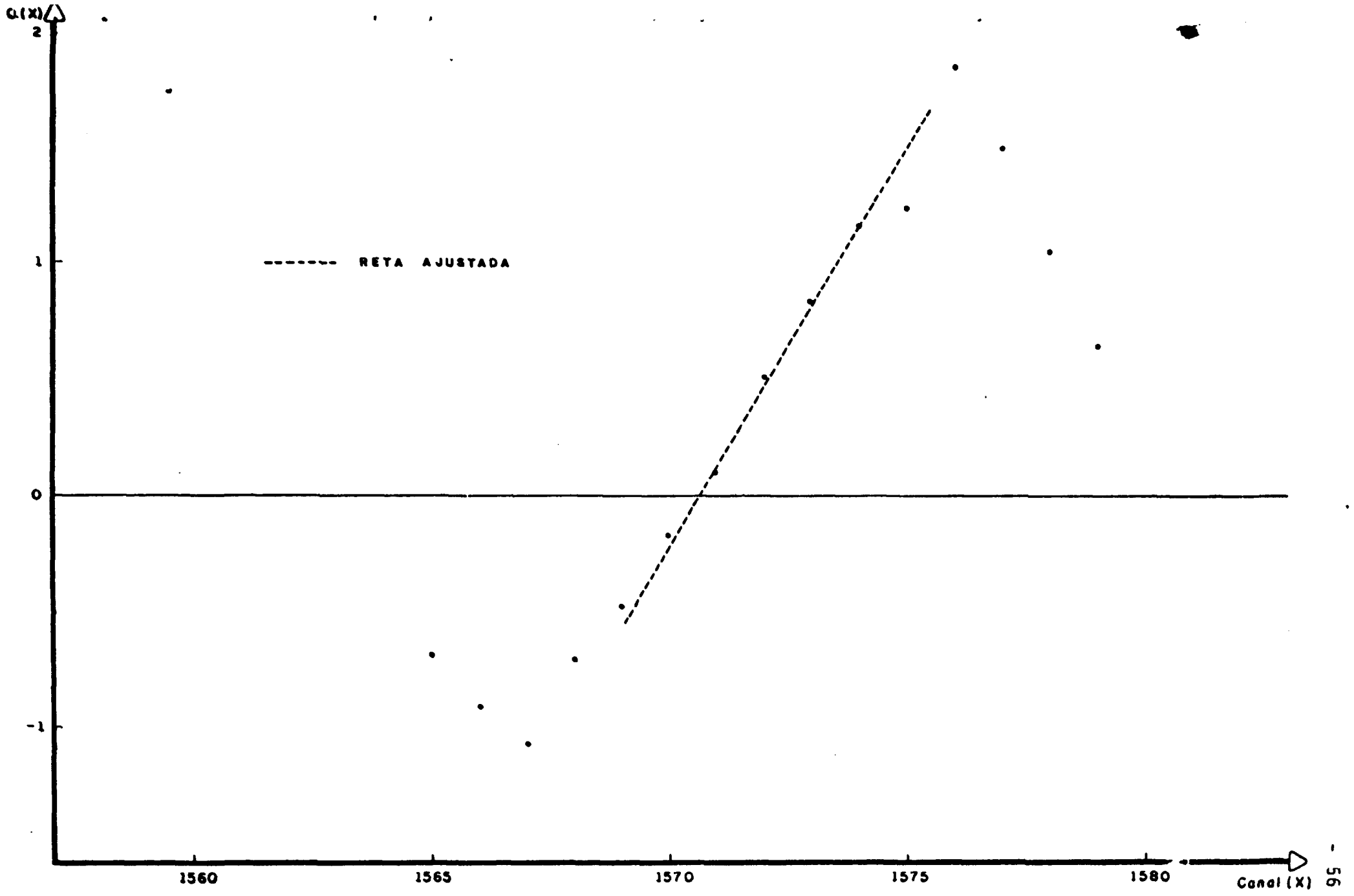


Fig.A1

APÊNDICE B

PROGRAMA DE ANÁLISE DE ESPECTRO

Um programa de computador foi elaborado para automatizar a análise de cada fotopico. A partir das contagens por canal, o programa determinava a posição do fotopico, sua FWHM, resolução e área. Ao mesmo tempo, era gerada a curva normal ajustada ao fotopico e calculado o "tail" correspondente, definido como a diferença entre as contagens de fotopico e da curva normal. A Fig. B1 mostra a forma de saída de dados do programa para o fotopico de 1275 KeV obtido com o detector de (HP)Ge a 500 V.

 PEAK CHANNEL= 1570.52
 FWHM= 5.71641
 ENERGY RESOLUTION= 0.363982 %
 PEAK AREA= 7021

CHANNEL	DATA	GAUSS	TAIL	ST DEV
1556	45	0	44	6
1557	39	0	38	6
1558	60	0	59	7
1559	46	0	45	6
1560	57	0	56	7
1561	53	0	52	7
1562	78	2	75	8
1563	88	9	78	9
1564	148	31	116	12
1565	217	87	129	14
1566	272	204	67	16
1567	502	403	98	22
1568	733	673	59	27
1569	978	949	28	31
1570	1150	1128	21	33
1571	1158	1132	25	34
1572	989	958	30	31
1573	709	684	24	26
1574	439	412	26	20
1575	238	210	27	15
1576	144	90	53	12
1577	60	32	27	7
1578	53	9	43	7
1579	39	2	36	6
1580	41	0	40	6
1581	29	0	28	5
1582	33	0	32	5
1583	33	0	32	5
1584	29	0	28	5
1585	30	0	29	5
1586	23	0	22	4

Fig. B1

TIME: 0.46 SECS.

R E F E R E N C I A S

REFERÊNCIAS

- /1/ - BHATNAHAR,S.& VERMA,S. - " Detectors to observe various radiations and their energy calibration - II: gamma ray energy spectrometer using NaI (Tl) detector and microcomputer" Indian Journal of Radio & Space Physics,10:106;1981.
- /2/ - BLANC,D. - " Détecteurs de particules" , Masson, 1959.
- /3/ - BREITENBERGER,E. - "Scintillation spectrometer statistics" Progress in Nuclear Physics 3:56, 1955.
- /4/ - CALDWELL,R.& TURNER,S. - " Gain variation of photomultiplier tubes", Nucleonics 12:47, 1954.
- /5/ - FANO,U.- "Ionization yield of radiations- The fluctuation of the number of ions ".Phys.Rev.72:26, 1947.
- /6/ - GODOY,M.O.- " Um método de análise por ativação para de - terminação dos teores de elementos de liga em aços"; tese de mestrado, Departamento de Química da Universidade Federal de Pernambuco, 1983.
- /7/ - HORNYAK,W. - " The interaction of gamma rays with matter", in " Nuclear Spectroscopy", F.Selove,ed.1959.
- /8/ - KELLEY,G.et al. - " Intrinsic Scintillation Resolution" , Nucleonics 14:53, 1956.
- /9/ - KNOLL,G. - "Radiation detection and measurement",Wiley,1979.
- /10/ - KORFF,S. - " Electron and nuclear counters",D.Van Nostrand, 1955.
- /11/ - LAPP,R.& ANDREWS,H - "Nuclear radiation physics ", Prentice Hall, 1972.
- /12/ - MOTT,W & SUTTON,R. - "Scintillation and Cerenkov counters" in " Handbuch der Physik",vol.XLV,S Flugge,ed.Springer ' Verlag,1958.
- /13/ - MUDHOLE,T.& UMAKANTHA,N.- "On the shape of the photopeak in NaI(Tl) scintillation detector",Nucl.Inst.Meth.116:401 1974.
- /14/ - MURRAY,R.B.- " Scintillation counters" in "Nuclear instru- ments and their uses" Vol.I,A.Snell.ed.Wiley, 1962.

- /15/ - PRICE,W. - " Nuclear radiation detection",Macmillan,1964.
- /16/ - VILLAR,H.P. & GODOY,M.O. - " Detectores de cintilação- I: sólidos", Comunicações nº 46 do Den/UFPE,1980.
- /17/ - VILLAR,H.P., GODOY,M.O. & MELO,M. - " A simple method to offset gain fluctuations in NaI(Tl) gamma spectrometers", Anais do XVI Congresso Latino Americano de Química,pg.77 Rio de Janeiro, 1984.
- /18/ - VILLAR,H.P. - " A distribuição de ¹³⁷Cs no solo como função de erosão e outros processos" tese de mestrado,PRONUCLEAR, 1981.
- /19/ - WALL,N. - " Charged - particle detectors" in " Nuclear Spectroscopy". F.Selove,ed. 1959.
- /20/ - ZIMMERMANN,W. - " Evaluation of photopeaks in scintillation gamma - ray spectroscopy",Rev.Sci.Inst.32:1063, 1961.