

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

IEN-PI-69/

FABRICAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE
DETECTORES SEMICONDUTORES

por

Oriundo Ferreira Lemos Júnior
(Divisão de Física Nuclear)

Submetida à Faculdade Politécnica da Universidade de São Paulo em preenchimento parcial dos requisitos para o grau de Mestre em Ciências.

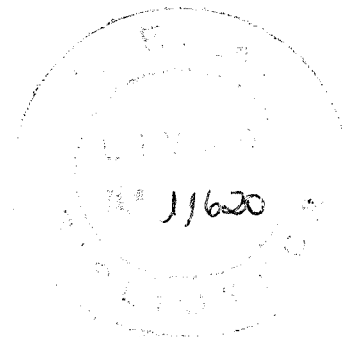
agosto, 1969

Rio de Janeiro, CB.
BRASIL

FABRICAÇÃO
E
UTILIZAÇÃO
DE
DETETORES SEMICONDUTORES

Orlando Ferreira Lemos Junior

orientado por José Goldemberg



Submetida à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em preenchimento parcial dos requisitos para o grau de Mestre em Ciências.

Maio, 1969

FABRICAÇÃO
E
UTILIZAÇÃO
DE
DETETORES SEMICONDUTORES

RESUMO

Nêste trabalho relato a montagem de um Laboratório para Fabricação de Detetores de Ge-Li e as técnicas empregadas na fabricação de um detetor Planar de Ge-Li, com $7 \text{ cm}^2 \times 5 \text{ mm}$, para o Laboratório do Acelerador Linear da Universidade de São Paulo, bem como a utilização de detetor coaxial de Ge-Li, com 22 cm^3 , para análise de raios γ de produtos de fissão no Instituto de Engenharia Nuclear.

F A B R I C A T I O N
E T
U T I L I S A T I O N
D E S
D E T E C T E U R S A S E M I C O N D U C T E U R S
R É S U M É

Ce travail décrit le montage d'un Laboratoire Destiné à la Fabrication des Detecteurs de Ge-Li et les techniques utilisées pour la fabrication d'un detecteur Planar de Ge-Li de $7 \text{ cm}^2 \times 5 \text{ mm}$ pour le Laboratoire de l'Accelérateur Linéaire de l'Université de São Paulo, ainsi que l'utilisation d'un détecteur coaxial de Ge-Li, de 22 cm^3 , pour l'analyse des rayons γ des produits de fission à "l'Instituto de Engenharia Nuclear".

F A B R I C A T I O N
A N D
U T I L I Z A T I O N
O F
S E M I C O N D U C T O R R A D I A T I O N D E T E C T O R S
A B S T R A C T

This paper describes the assembly of the equipment for the fabrication of Ge-Li drifted detectors and the technique used in the preparation of a Planar detector of $7 \text{ cm}^2 \times 0,5 \text{ cm}$ for the Laboratory of the Linear Accelerator at the University of São Paulo, as well as the utilization of a 22 cm^3 coaxial detector for the analysis of fission product gamma-rays at the Instituto de Engenharia Nuclear, Guanabara.

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer ao Dr. José Goldemberg, Diretor do Laboratório do Acelerador Linear da Universidade de São Paulo, pela orientação dos trabalhos e solicitude. Ao Prof. Arthur Gerbasi da Silva, Chefe da Divisão de Física Nuclear do Instituto de Engenharia Nuclear, por me oferecer a oportunidade do estágio e cursos na Universidade de São Paulo e cooperação na execução dos mesmos. Aos colegas Rolf. H. Töpke, Rex Nazaré Alves e Maurício Grimberg do Instituto de Engenharia Nuclear, Manoel de Abreu da Divisão de Física Nuclear do Instituto de Energia Atômica, Albert Bond e Alinka Lépine do Laboratório do Acelerador Eletrostático da Universidade de São Paulo, Yamato Miyao do Laboratório do Acelerador Linear, Yukio Ishikawa da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelas idéias e cooperação.

Aos Drs. Ivan C. Nascimento e Giorgio Moscati, do Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, pelas facilidades oferecidas no estágio no Laboratório do Acelerador Linear, e ao Dr. Raiman da Administração da Produção da Areia Monazítica na indicação e obtenção de produtos químicos.

Aos técnicos do Laboratório do Acelerador Linear Hermenegildo Borghi, José Baeta e Hélio Guimarães pelos serviços de mecânica, Aloisio e Wilson pelos serviços de eletricidade e eletrônica.

Às srtas. Genice C. Nascimento e Marília Vieira pelos serviços de datilografia na elaboração destas notas e à bolsista do Laboratório do Acelerador Linear, Suely Lopes, pela colaboração.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear e ao Instituto de Engenharia Nuclear que tornaram possível este trabalho.

Í N D I C E

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Generalidades	3
2 - TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO	10
2.1 - Material	10
2.1.1 - Germânio	10
2.1.2 - Lítio	10
2.2 - Operações mecânicas	10
2.3 - Operações químicas	11
2.4 - Equipamento auxiliar	12
2.4.1- Equipamento de vácuo	12
2.4.2- Evaporador	12
2.4.3- Sistema de aquecimento e arrefecimento	12
2.4.4- Sistema de controle de temperatura	12
2.4.5- Sistema de segurança	13
2.4.5.1 - Bomba mecânica	13
2.4.5.2 - Bomba de difusão	13
2.4.6 - Medidores de vácuo	13
2.4.7 - Sistema de "Drift"	14
2.4.8 - Fonte de tensão para "drift"	14
2.4.9 - Medidor de corrente	15
2.4.10 - Sistema de eletrodeposição de cobre	15
2.5 - Evaporação e difusão	15
2.6 - Migração do Lítio ("Drift")	16
2.6.1 - "Drift" à temperatura ambiente	16
2.6.2 - "Drift" à baixa temperatura	16
2.7 - Criostato	17
2.8 - Encapsulamento	18

	Pág.
3 - UTILIZAÇÃO	19
3.1 - Introdução	19
3.2 - Experimental	20
3.3 - Resultados	21

TABELAS

FIGURAS

BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUÇÃO

A Espectroscopia Nuclear teve, nos últimos anos, um acentuado progresso como resultado do desenvolvimento dos detetores semicondutores de Si e Ge, especialmente os de Ge-Li. Os estudos da estrutura nuclear dependem fortemente de medidas precisas de energia e intensidades. Um propósito da Espectroscopia Nuclear é obter parâmetros de decaimento nuclear que possam ser úteis na formulação ou refinamento da teoria nuclear. O estudo de esquemas de níveis nucleares são de particular importância.

A razão do uso de detetores de Ge-Li consiste principalmente na melhoria da resolução em energia. Resoluções em energia de uns poucos KeV são agora obtidas. No Brasil, os detetores de Ge-Li são bastante convenientes pela facilidade de serem produzidos e reprocessados em qualquer laboratório razoavelmente montado e desde que obtidas as matérias primas, (Ge e Li), ainda não disponíveis na indústria nacional com as necessárias especificações.

Embora o princípio de funcionamento dos detetores de estado sólido seja basicamente o mesmo das câmaras de ionização gasosas, a sua resolução e também sensibilidade são muito melhores, pois para cerca de 30eV necessários para a produção de cada elétron na câmara, são necessários cerca de 3eV no semicondutor (Ge)¹. Logo a quantidade de carga produzida por radiação incidente é muito maior no semicondutor.

A interação da radiação gama com o semicondutor, se dá da mesma forma que com outro material, através dos vários processos possíveis, dos quais os principais são: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e formação de par.

Devido à grande penetração da radiação gama os detetores semicondutores devem ser relativamente espessos, para que o fóton perca toda sua energia no interior do detetor. A técnica de fabricação deste tipo de detetores

se desenvolveu a partir de 1962¹ com os detetores de Li difundidos.

Os detetores semicondutores apresentam como vantagens: dimensões reduzidas, alta sensibilidade, linearidade e ótima resolução e como desvantagens: funcionamento a baixas temperaturas, custo e eficiência quando comparada com o NaI(Tl). Figura 8.

O detetor ideal deveria ser feito com um pedaço de Ge intrínseco, mantido a baixa temperatura, onde a concentração de portadores intrínsecos é suficientemente baixa, para dar uma corrente desprezível, quando a polarização é aplicada. À temperatura do Nitrogênio Líquido, a condutividade é da ordem de $10^{-22} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ com uma corrente desprezível para tensões e dimensões usuais.

O material usado neste trabalho foi Ge, tipo p, dopado com Ga. O Lítio atua como um doador, foi difundido (a 350°C) aproximadamente 80% no cristal de Ge, criando um excesso no número de doadores e tornando o Ge tipo n. Uma junção p-n ocorre onde o número de doadores e aceitadores é igual. Uma região intrínseca ou compensada é obtida por migração de ions de Li (pela aplicação de uma tensão de polarização) através do Ge. O processo de migração está terminado, quando uma desejada profundidade de "drift" foi obtida.

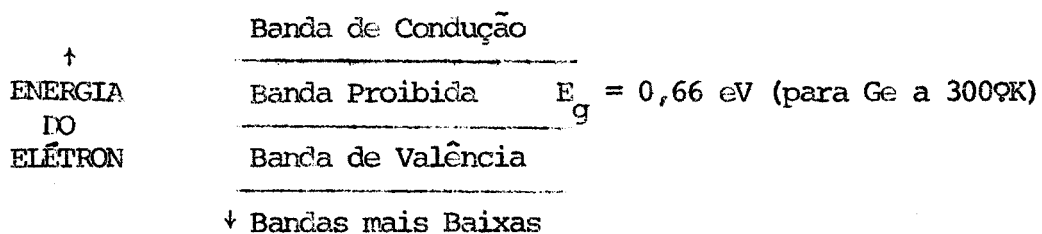
Para se coletar cargas livres da região intrínseca, a região tipo n é polarizada positivamente em relação a região tipo p, ou seja o detetor é polarizado inversamente.

Deve ficar claro que o presente trabalho não apresenta outra contribuição que não seja a montagem de um laboratório para fabricação de detetores planares de Ge-Li.

1.1. Generalidades

Um detector planar de estado sólido é simplificadaamente um bloco de um material semiconductor com eletrodos em bom contato elétrico com duas faces opostas. Figura 9 . Um potencial aplicado produz um campo elétrico capaz de carrear portadores de ambas as polaridades, negativos (elétrons) e positivos (buracos), que são produzidos em igual número para cada evento ionizante. Como o que se deseja é medir a quantidade de ionização produzida, a qual é proporcional a energia absorvida da radiação, é importante que a corrente externa do circuito seja correspondente a ionização total ou uma fração definida dela.

A radiação incidente perde energia em interações com os elétrons do material do detector semiconductor. Estas interações levam os elétrons da banda de valência ou de bandas mais profundas à banda de condução ou bandas mais elevadas. Elétrons de energias altas interagem rapidamente com outros elétrons e após certo tempo, cerca de 10^{-12} seg, Figura 10 , é obtido equilíbrio.



O campo elétrico aplicado arrasta cargas através do material de modo a ser obtido um pulso elétrico correspondendo à detecção de uma só partícula.

As razões básicas ⁷ para uso de detectores semicondutores são:

- a) Excelente resolução em energia (que é dada aproximadamente pelo número de pares elétrons-buraco formados), figura 7, comparado com NaI.
- b) Considerável aumento do poder frenador dos sólidos em relação a ga-

As condições para um determinado material ser um bom detetor de radiação gama depende de vários fatores:

a) O material do detetor deve ter alto número atômico (Z), pois a absorção fotoelétrica aumenta aproximadamente com Z^5 , o Ge é preferível ao Si.

b) Um baixo valor da energia da faixa proibida (E_g) é necessário, e isto afeta diretamente o poder de resolução do dispositivo.

c) Os pares elétron-buraco devem ser coletados antes da recombinação. São necessários portadores de carga com alta vida média. Uma alta mobilidade de elétrons e buracos depende consideravelmente da perfeição cristalina.

d) Para satisfazer os itens acima é necessário aplicar um campo elétrico através do volume sensível do detetor, sem aparecimento de uma corrente de fuga substancial, cujas flutuações obscurecem a medida dos pulsos formados pela radiação.

Existem três configurações de detetores de Ge mais usadas atualmente. O detetor planar, o detetor coaxial propriamente dito e o detetor coaxial de cinco lados. O detetor planar consiste de uma fatia de um bloco de Ge com seção reta trapezoidal ou circular, tendo nas partes superior e inferior junções ni e ip respectivamente, Figura 9. Para o detetor coaxial propriamente dito, o Li é difundido em torno da superfície lateral de um lingote cilíndrico e a compensação de Li é obtida pela migração radial através contatos colocados no centro de ambas as extremidades do cilindro, ou é feito um furo no eixo do cilindro e o contato passa através o mesmo. Para o detetor coaxial de cinco lados, a geometria do lingote de Ge é de seção reta, circular ou trapezoidal, e o Li aplicado sobre a superfície lateral e uma das bases. A compensação do Li se processa por migração radial e coaxial através um contato no centro da outra base protegida. Neste trabalho relatamos a fabrica-

ção de detetor do tipo planar.

A figura 9 mostra uma seção de um detetor tipo planar. A radiação gama interage com o cristal e pares elétron-buraco são formados. Os elétrons são coletados na região tipo n e os buracos na região tipo p. A velocidade de elétrons e buracos é cerca de $1,1 \times 10^7$ cm/seg correspondendo a um tempo de coleção de carga de 9 ns/mm. Assim o tempo total de coleção de carga em um detetor de 10mm, que não apresente armadilhas para elétrons ou buracos é cerca de 45ns para pares de carga criados no centro da região de 10mm e 90ns para cargas criadas próximo as junções²⁷.

No Ge, uma faixa proibida estreita e a mobilidade dos ions de Li são responsáveis pela maioria de restrições sobre a operação de detetores de Ge(Li). Os detetores devem ser resfriados à temperatura do Nitrogênio Líquido também para manter a estrutura p-i-n. A esta temperatura os ruídos térmicos são reduzidos e o sinal deve ser processado por amplificadores eletrônicos de baixo ruído.

Propriedades importantes do material (segundo F. S. Goulding)¹:

1) A Energia Média - ϵ , necessária para produzir um par elétrons-buraco deve ser a menor possível. Uma parte de ϵ é usada para elevar elétrons da banda de condução à banda de valência e o resto é desperdiçado em perdas térmicas no sólido.

2) Os Portadores Livres do material devem ser poucos à temperatura de operação, pois a coleção pelos eletrodos destes portadores iriam mascarar o sinal desejado. Para um material ter interesse deve produzir correntes térmicas no volume do detetor menores que 10^{-7} A.

3) O Material deve ter o mínimo de Impurezas. O material usado não deve conter um número significante de armadilhas capazes de aprisionar elé-

trons ou buracos produzidos pelo evento ionizante. O processo de aprisionamento é caracterizado pela meia vida de aprisionamento de um portador τ_t que é o tempo médio que um portador existe em estado livre antes de aprisionado.

4) A Recombinação de Elétrons e Buracos. Durante o processo de coleta deve ser pequena, ela é caracterizada pela meia vida de recombinação dos portadores, τ_r , e é desejável que seja grande comparado com o tempo de coleta de carga.

5) Tempo de Detecção de Portadores. τ_c . Deve ser curto, o que leva a que os elétrons e buracos sejam altamente móveis na estrutura cristalina. Os dois efeitos anteriores estão a êle relacionados. O material deve ser capaz de suportar alto campo elétrico sem ionização secundária, em geral efeitos de superfície limitam mais a voltagem do que efeitos no corpo do cristal.

6) O número atômico alto do Material deve ser para melhorar as propriedades de interação.

Dois materiais conhecidos aproximam-se dos requisitos acima citados são êles o Si e o Ge. A tabela I dá algumas propriedades físicas e químicas de ambos. À temperatura muito baixas êstes materiais são isolantes pois todos os elétrons de valência estão ligados à estrutura e não há elétrons disponíveis para tomar parte na condução elétrica. Na teoria das bandas de energia, elétrons são excitados termicamente da banda de valência à banda de condução. A quantidade de pares elétron-buraco depende sobretudo da temperatura e do intervalo da faixa proibida.

Sob condições normais o número de elétrons de condução, n_i , no material é dado por:¹

$$n_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2KT}}$$

onde

A é constante para um dado material

T é a temperatura absoluta em $^{\circ}\text{K}$

E_g é a largura da faixa proibida

K é a constante de Boltzmann

Se um elétron está na banda de condução é influenciado por um campo elétrico, aplicado ao cristal, em campos normais esta influência é pequena comparada com efeitos devido aos campos produzidos por átomos do próprio lattice, mas o campo aplicado causa uma leve migração ordenada dos elétrons enquanto os efeitos dos átomos são randômicos.

O movimento dos elétrons em um campo aplicado é caracterizado por uma mobilidade μ_e definida pela relação $V_e = E \mu_e$ onde V_e é a velocidade de migração média do elétron na direção do campo e E é o campo elétrico.

Um buraco, carregado positivamente, deixado na estrutura de valência está livre também para se mover no campo elétrico. Este movimento é caracterizado por uma mobilidade μ_h definida por $V_e = E \mu_h$. A resistividade ρ do material é dada por:

$$\rho = \frac{1}{q (n_e \mu_e + n_h \mu_h)}$$

onde

n_h é o número de buracos/cm³

n_e é o número de elétrons/cm²

e q é a carga elétrica

Para material intrínseco, cada elétron excitado para a banda de condução produz um buraco tal que $n_e = n_h = n_i$

e

$$\rho_i = \frac{1}{qn_i (\mu_h + \mu_i)}$$

Usando os valores da tabela I achamos:

$$\rho_i = 47 \text{ ohm.cm (Ge a } 300^\circ\text{K)}$$

$$\rho_i = 230.000 \text{ ohm.cm (Si a } 300^\circ\text{K)}$$

Na prática, não são disponíveis materiais semicondutores de suficiente pureza para serem considerados intrínsecos, particularmente a temperatura baixas. Genêricamente falando, o termo intrínseco é usado para sugerir que a condução elétrica é dominada por pares elétron-buraco excitados termicamente. Assim podemos nos referir a qualquer semicondutor a temperatura altas como intrínseco. No caso do Ge, é possível purificar o material até graus onde o material é intrínseco à temperatura ambiente. As impurezas eletricamente ativas devem ser reduzidas abaixo de 10^{13} átomos/cm³.

As impurezas eletricamente ativas mais comuns introduzidas deliberadamente são elementos de valência 3 ou 5 que podem substituir átomos do lattice. Comumente são usados como impurezas de valência 3, Boro, Alumínio, Gálio e Índio e com valência 5, Fósforo, Arsênio, Antimônio.

Em termos do modelo de ligação de valência podemos olhar um átomo de valência 5 que substitui um átomo de Ge no lattice, como suprimindo elétrons para completar a estrutura da ligação covalente enquanto o quinto elétron associado com o átomo de pureza é só fracamente ligado ao seu átomo pai pela atração Coulombiana. Esta atração é muito pequena em parte devido ao fato que o átomo está embebido em um meio de alta constante dielétrica. Para temperaturas normais o elétron extra está termicamente excitado na banda de condução tal que temos um elétron livre e uma carga positiva localizada embebida

no latice na vizinhança do átomo impureza. Tais impurezas são chamadas doadores e a condução no material é denominada por portadores de carga negativa, e o material é dito tipo n.

Um átomo intersticial pode atuar como um doador ou aceitador dando buracos livres ou elétrons. Um bom exemplo disto é o Li que atua como um doador intersticial "superficial" no Ge. O termo superficial implica que o nível introduzido pela impureza é próximo à banda de condução (doador) ou a banda de valência (aceitador).

Na fabricação de detetores de Ge-Li um outro fator importante são as características do cristal de Germânio (tipo p) usado, um cristal conveniente deve ter: meia vida o mais alto possível (superior a 100 μseg) deve ter uma baixa concentração de oxigênio (menor que $10^{15}/\text{cm}^3$), resistividade de 10 a 30 Ωcm e o mínimo de deslocações (pits/cm^2) 1 .

2. TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO

2.1. Material

2.1.1. Germanio

O cristal de Germanio (*) usado para a confecção do detetor foi obtido de um lingote de seção reta trapezoidal, da Sylvania Company, Towanda Pensilvania, tamanho número 4, tipo p, dopado com Gálio, com uma resistividade de 10 a 13 Ohm-cm, meia vida de portadores de minoria maior do que 100 micro-segundos, densidade de deslocações 2300 a 3000 pits/cm² e crescimento horizontal na orientação (111).

2.1.2. Lítio

O Lítio usado para a difusão estava na forma metálica, e foi obtido da Lithium Corporation of America. Do pedaço original foram retiradas pequenas lascas e mantidas em óleo mineral até o momento da evaporação.

2.2. Operações mecânicas

O lingote do cristal de Germanio foi colocado sobre uma base de alumínio e foi cortada com serra de diamante de alta velocidade, uma fatia de 7,5mm de espessura paralelamente ao plano (111) em operação lenta para evitar danos ao cristal.

Para remover danos causados pelo corte como mostra a figura 3 foram usadas lixas d'água de números 240, 320, 400 e 600. Durante a operação de lixar foi evitado o aquecimento e ao passar de uma granulação para outra foram feitas lavagens com água corrente, para impedir ranhuras nas superfícies do Cristal por grãos maiores na lixa seguinte.

(*) Cedido pela Divisão de Física Nuclear do Instituto de Energia Atômica.

O polimento final foi feito com Al_2O_3 (Alumina em pó) dissolvida em água sobre uma flanela limpa. Cuidados devem ser tomados, pois superfícies mal polidas oferecem um caminho fácil para os portadores, conseqüentemente aumentando a corrente de fuga de superfície durante a operação.

2.3. Operações químicas

Após lavar o cristal com água e detergente, o mesmo foi submetido a um desengorduramento por fervura em solução de NaOH em água (5% a 10%). Para evitar choques no cristal, devido à formação de bôlhas na solução aquecida foram usadas pérolas de vidro. Após o desengorduramento, a solução foi diluída em água destilada até a retirada total do NaOH. Nestas operações para segurar o cristal, foi sempre usada uma pinça de aço inoxidável com as pontas protegidas por teflon.

Nos ataques químicos levados a cabo depois da evaporação e difusão do Lítio, usou-se, sobre a face n^+ , (onde foi feito o depósito de Lítio) uma fita adesiva resistente a tais reagentes. A fita usada foi a número 470 obtida da Minnesota Mining Corporation, USA. Para tais ataques foi necessário a utilização de becher plástico, porque o cristal foi levado a um ataque em solução ácida de 5 volumes de HNO_3 , 1 volume de HF, denominada solução de ataque.

O cristal assim preparado ficou durante 1 a 2 minutos na solução de ataque e suas cinco faces expostas foram atacadas tornando-se espelhadas. Água destilada em abundância foi adicionada, evitando-se o contato com o ar, para impedir a formação de óxidos de caráter isolante, até a total diluição do ácido. Foi verificado se o aspecto das diversas faces do cristal apresentavam boas condições e prosseguimos com o processamento.

2.4. Equipamento auxiliar

Foram construídos e utilizados vários equipamentos auxiliares para a fabricação dos detetores.

2.4.1. Equipamento de vácuo

O laboratório contava com uma bomba de vácuo mecânica, com velocidade de bombeamento de 160 l/min e uma de difusão, refrigerada a água, de 425 l/seg.

Projetamos um sistema de vácuo versátil, que fosse capaz de atender as necessidades de encapsulamento, reprocessamento de detetores, testes de Crios_{tato} bem como a difusão do Li.

As figuras 11 e 4 mostram os esquemas e aspectos da montagem.

2.4.2. Evaporador

Foi elaborado um sistema que fosse capaz de evaporar o Lítio. O evaporador cujo sistema é mostrado na figura 11, consiste de um cilindro ôco de aço inoxidável, fechado nas duas extremidades por tampas do mesmo material e apresenta um orifício na superfície lateral do cilindro.

A corrente necessária à evaporação foi da ordem de 150A, obtida com a utilização de um Variac e de um transformador.

2.4.3. Sistema de aquecimento e arrefecimento

Para a difusão foi necessário que o cristal atingisse a temperatura de 350°C e a seguir pudesse ser resfriado em alguns minutos. Para tal foi construído um sistema de Cobre constituído por uma base circundada por tubo. O aquecimento foi obtido pela utilização de uma resistência de 1000 watts e o arrefecimento, pela passagem de ar e água pelo tubo.

2.4.4. Sistema de controle de temperatura

Foram usados um termo-par de alumel-cromel e um controlador eletrônico de temperatura ENGRO modelo 300.

O sistema é capaz de manter a temperatura constante durante a difusão do Li. A figura 13 mostra o esquema do sistema usado nesta operação.

2.4.5. Sistemas de segurança

Devidos às constantes e imprevistas faltas de força e água no Campus, foram projetados dois sistemas de proteção para o equipamento, um para a bomba de difusão e outro para a bomba mecânica mostrados na figura 14 A e B.

2.4.5.1. Bomba Mecânica

Foi utilizado um relé que não permitiu a re ligação da bomba com a volta da força, evitando desta forma que em períodos de ausência de pessoal houvesse Patinação da correia de transmissão da bomba com aquecimento e danos.

2.4.5.2. Bomba de Difusão

Como a bomba de difusão é refrigerada à água, a falta do líquido sem a falta de força poderia provocar um super-aquecimento e conseqüente queima de óleo além de sérios danos ao corpo da bomba. Foram usados uma válvula feita na oficina do Departamento que sob pressão d'água acionava a chave elétrica, que liga o aquecedor da bomba, e em caso de falta d'água o aquecedor seria simultaneamente desligado.

2.4.6. Medidores de vácuo

No sistema de vácuo foram usados dois medidores do tipo Vacuum Gauge Tube type DV-1M obtidos da VEECO, capazes de dar indicação de pressão até a ordem de 10^{-3} mm, de Hg, um medidor do tipo Cold Cathode Discharge Gauge Type DG 2 também da VEECO, capaz de dar indicação de vácuo até a ordem de 10^{-5} mm de Hg. A figura 11 mostra a localização de tais medidores. Todas as soldas

dêstes sistemas de vácuo foram feitas com solda prata a (35%) capaz de resistir a temperatura altas e de boas características para vácuo. No criostato posteriormente foi definitivamente instalado um medidor DV - 1M em substituição ao DG 2.

Na fase de encapsulamento foi usado um Leak Detector MS 12 da VEECO para fazer vácuo no criostato e detetar as possíveis fugas. Os vazamentos encontrados foram da ordem de 3×10^{-9} torr l/seg.

2.4.7. Sistema de "drift"

Para atender a necessidades do trabalho foi preparado um sistema de "Drift". Para esta fase adquirimos um balão com três saídas. Uma central mais larga e duas laterais. Pela mais larga entrava a suspensão do detetor composto por hastes de Níquel ligadas a uma moldura retangular de teflon onde dois parafusos de Níquel o mantêm fixo. Um termômetro em escala centígrada para contrôle de temperatura no éter de petróleo e um condensador para os vapores produzidos foram adaptados as outras saídas.

Para evitar possível rutura o balão cheio de C_5H_{12} . P.A. líquido cujo ponto de ebulição é de aproximadamente 40°C fica dentro de um recipiente maior contendo água. A finalidade do éter é dissipar o calor gerado de detetor. Os materiais imersos, Níquel e Teflon, foram escolhidos justamente por não serem atacados. A figura 6 mostra êste sistema.

2.4.8. Fonte de tensão para "drift"

Foi usada uma fonte capaz de dar tensão variável continuamente até 840 volts.

A figura 12 mostra o esquema da fonte usada.

2.4.9. Medidor de corrente

No circuito do detetor foi intercalado um miliamperímetro que dá a corrente que circula no mesmo.

2.4.10. Sistema de eletrodeposição de Cobre

Consiste em um becher no qual é introduzida uma haste de cobre ligado ao polo positivo de uma fonte de tensão e o polo negativo ligado à face p do cristal. O Cobre deposita na parte p preferencialmente a face p é mascarada pela fita adesiva, obtendo-se o depósito só na junção.

2.5. Evaporação e difusão

Uma vez feitos os testes no sistema de evaporação e difusão, o Germânio, já polido e desengordurado, foi colocado sobre uma fina camada de mica, para evitar choques térmicos. As superfícies laterais foram pintadas com uma suspensão de pó de Grafite em Dissilicato de Sódio, a fim de evitar a deposição de Lítio sobre as superfícies laterais. Assim feito, colocamo-lo sobre o aquecedor.

O sistema de vácuo foi fechado e o ar retirado até a pressão de 10^{-3} mm Hg com a bomba mecânica, com a bomba de difusão e vácuo foi levado até 10^{-5} torr. O vácuo foi então melhorado colocando-se nitrogênio líquido na "trap". Por meio de termopar a elevação da temperatura foi controlada até atingir os 350°C, atingida tal temperatura, uma corrente crescente de 0 a 150A foi feita circular pelo cilindro de aço que contém o Lítio metálico que foi lançado por evaporação pelo orifício lateral sobre a região do aquecedor e, portanto, sobre uma das superfícies de seção trapezoidal do Germânio. Feita a evaporação foi mantido o detetor durante 20 minutos à temperatura de 350°C.

O resfriamento foi produzido inicialmente pela passagem de ar pelo sis

tema de arrefecimento seguido da circulação de água após a temperatura ser inferior a 100°C. Ao atingir a temperatura ambiente, o detetor foi retirado e lavado em água corrente para remoção do excesso de Lítio e da Grafite.

O detetor foi então polido com lixa d'água número 600 em todas as suas faces e desengordurado em solução de NaOH. As faces trapezoidais foram protegidas com a fita adesiva e foi feito um ataque químico com a solução de ataque 1 a 2 minutos. Foi feita a diluição dos ácidos com água destilada, retirada a fita, imerso em H₂O₂ a 30%, em seguida em C₂H₅OH (etanol) e em CH₃OH (metanol) para remoção da água, finalmente um banho com CCl₄ (tetracloreto de carbono) para remoção do álcool. O detetor ficou pronto para o "Drift".

2.6. Migração do Lítio ("Drift")

2.6.1. "Drift" à temperatura ambiente

Os contatos elétricos para o "Drift" foram feitos usando uma liga eutética de In-Ga (ponto de fusão 159°C) obtido da "The Indium Corp. of America" (24,5% In, 75,5% Ga) permitindo facilidade de aplicação e remoção, e ótimo contato elétrico. A liga eutética foi pintada em toda a extensão das duas faces trapezoidais.

O detetor foi colocado na armação de teflon com a face p em contato com o polo negativo da fonte de tensão e a face n no polo positivo. Colocamo-lo no balão de "Drift" imerso em éter de petróleo suficiente, para cobrir todo o detetor. O potencial foi aplicado e controlada a corrente que circula. Com o aumento da tensão nota-se o aparecimento de bolhas pela ebulição do éter nas superfícies de contato cobertas com o In-Ga.

2.6.2. "Drift" à baixa temperatura (Cold drift)

O "Cold drift" difere do anterior por ser feito a uma temperatura de

09C a 59C, obtida, colocando-se o sistema de Drift dentro de uma câmara frigorífica.

Esta fase corrige as irregularidades na compensação, isto porque à baixa temperatura a mobilidade do Li é razoavelmente alta, enquanto a corrente é uma fração do valor inicial.

2.7. Criostato

Devido a relativamente grande corrente de fuga e alta mobilidade do Lítio em Germânio à temperatura ambiente é necessário que os detectores de Germânio operem à baixa temperatura abaixo de 1509C. É necessário, portanto, um receptáculo que o mantenha à baixa temperatura e em vácuo, e o proteja da luz. Para isto utiliza-se um CRIOSTATO. Figuras 1, 2 e 15.

O criostato consiste de uma base de alumínio para o detector, ligada à carcaça e uma mola de prata está ligada por um fio a um conector do tipo VACUUM FEEDTHROUGH número 53-551/37 da Microdot Inc. A mola tem também a finalidade de fixar o detector. A base de Alumínio está unida por rêsca a um tarugo de Cobre cuja função é o contato térmico do Nitrogênio Líquido com o detector no interior do criostato. A carcaça do criostato é composta por duas partes, uma inferior de aço inoxidável de forma cilíndrica com diâmetro externo de uma polegada e de paredes com espessura de 400 μ . A razão de se usar o aço inoxidável é devida à resistência à oxidação (umidade, calor, produtos químicos, Nitrogênio Líquido, etc) e a má condutibilidade térmica o que evita altas perdas de Nitrogênio Líquido.

A parte superior é composta de uma tampa de alumínio em forma de "cartola" com diâmetro externo na menor seção de 4,7cm e com paredes de espessura igual a 200 μ . A razão de usar-se alumínio deve-se ao fato do baixo Z deste

material evitando desta forma possível formação de radiação de frenamento, ("Bremsstrahlung") e baixa absorção. A parte inferior do cilindro de aço é soldada a um disco de latão e ao "dedo frio" de Cobre e a superior a um cilindro de latão com diâmetro externo de 7,2cm e onde se localizam as três entradas do criostato, para o ar do exterior, para o medidor de pressão e para o sinal elétrico.

Externamente ao cilindro de aço existe uma luva que permite regular a porção do tubo que deve entrar no "dewar" que contém o Nitrogênio Líquido.

A posição do detetor no interior do criostato é vertical e foi escolhida em função da sua utilização.

A saída do vácuo para o criostato está ligada a uma válvula tipo FL, "High Vacuum bellows Sealed" da VEECO CORPORATION.

Dentre as propriedades elétricas de um criostato inclui-se uma baixa capacitância para prevenir degradação da razão sinal-ruído. A resistência do conector usado no criostato é da ordem de $10^{12} \Omega$. Para medir tal corrente foi usado um eletrômetro Keithley modelo 610.

O teste final do criostato foi feito utilizando um detetor de fuga MS12 da VEECO e acusou vazamentos inferiores a 10^9 torr l/seg.

2.8. Encapsulamento

Para verificação das características do detetor após o "Cold Drift" usamos um "Transistor curver Tracer" tipo 575 Tektronix e obtivemos curvas como as da figura 16.

Foi feito um último processamento químico com a solução de ataque seguido de um banho de H_2O_2 . Em seguida o detetor foi colocado em uma câmara com umidade relativa 50% onde permaneceu durante 40 minutos, no fim dos quais

passamos In-Ga no centro das faces trapezoidais e colocamos o detetor com a face p voltada para a base do seu suporte no criostato, e a face n para a mola de prata ligada ao conector elétrico.

Entre a base e o detetor colocamos uma fôlha fina de tântalo que evita choques térmicos no detetor no resfriamento através o dedo frio e protege a base de alumínio contra a corrosão pela liga In-Ga.

O criostato foi fechado e verificadas as condições do circuito elétrico e imerso o dedo frio em uma garrafa com Nitrogênio Líquido.

No ato de encapsulamento foi introduzido um recipiente cilíndrico de paredes perfuradas, entre o dedo frio e o tubo de aço, contendo uma carga de carvão ativado. A finalidade deste carvão é, uma vez fechado o criostato, feito o vácuo e imerso em nitrogênio líquido, servir como uma criobomba.

3. UTILIZAÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Análises de produtos de fissão tem sido levadas a efeito por separação química e espectroscopia γ . A primeira requer habilidade e tempo o que torna a análise de produtos de fissão com vida curta muito difícil. O segundo método é mais simples por apresentar melhor resolução.

Nos últimos anos os detetores de Ge-Li tem sido usados como espectrômetros de γ com alta resolução, que permite o estudo do espectro de raios γ diretos com muito mais detalhes que com espectrômetros com NaI. O detetor de Ge-Li é considerado como uma poderosa ferramenta para o estudo de espectrometria de produtos de fissão.

Espectro de raios γ de produtos de fissão já foram obtidos por cálculo

³² e por medidas diretas ³³ com espectrômetros de NaI e com detetores de Ge-Li ^{30,31}.

Descrevo aqui a análise do espectro de raios γ e de produtos de fissão 86 dias após a última irradiação. Para tal utilizamos uma placa de elemento combustível do reator Argonauta do Instituto de Engenharia Nuclear. Posteriormente um estudo detalhado dos espectros obtidos de diversas barras será feito com objetivo de se ter a distribuição do fluxo de neutrons no "caroço" do reator; migração de produtos de fissão e "burn-up", o que fornecerá dados para comparação com os existentes na Divisão de Reatores.

Neste trabalho somente apresento os resultados obtidos em uma placa e uma faixa de energia bem estreita, focalizando a região do pico do ¹⁴⁴La de especial interesse para a Divisão de Reatores.

Nesta faixa usamos como fontes de Calibração o ¹³⁷Cs e o ⁸⁸Y com os fotopicos de 662 KeV e 898 KeV respectivamente.

Os resultados obtidos para as energias dos raios γ , estão em concordância com os obtidos em outros trabalhos como podemos ver na Tabela III.

Na faixa de energia estudada foram encontrados os fotopicos correspondentes ao decaimento do ^{137m}Ba, ¹⁴⁴Pr, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁴⁰La, ¹⁰⁶Rh. Tabela II.

3.2. EXPERIMENTAL

Os espectros de raios γ foram estudados com um detetor de Ge-Li coaxial com 22 cm³ adquirido da Ortec acoplado a: um préamplificador, FET, modelo 118A da Ortec, um amplificador linear, modelo 410 da Ortec, um amplificador polarizado, modelo 408 da Ortec, um analisador de 400 canais, modelo 404C da TMC. Fig. 20. A FWHM para o fotopico de 662 KeV do ¹³⁷Cs foi cerca de 6,0 KeV.

A placa de combustível usada foi a de número 302 do conjunto número 6 do reator Argonauta. A placa é de Urânio natural com enriquecimento de 20% revestida com Al e foi fabricada pela Divisão de Metalurgia do IEA.

3.3. RESULTADOS

A primeira parte deste trabalho, montagem do laboratório que tornasse possível a confecção de detetores de Ge-Li, foi bem sucedida pois no mesmo processei o primeiro detetor para o Laboratório do Acelerador linear. Este detetor foi montado e levado para testes aos laboratórios do Instituto de Energia Atômica onde apresentou uma resolução insatisfatória, posteriormente foi novamente encapsulado e testado nos Laboratórios do Acelerador eletrostático, ainda não apresentava boas características, um terceiro e quarto encapsulamento foram feitos, no último apresentou uma resolução de 40 KeV no pico de 1,33 MeV do Co-60, embora não satisfatória tive que passar aos bolsistas e pesquisadores do Laboratório do Acelerador linear a tarefa de outros reencapsulamentos para melhorias na resolução.

Na parte de utilização de detetores de Ge-Li foi estudado inicialmente o espectro de raios γ de energias até 2,0 MeV de barras dos elementos combustíveis do reator Argonauta. Apresento aqui os resultados obtidos, figura 19, na análise da barra 302 do elemento número 6 na faixa de energias de 662 KeV a 898 KeV, o tempo decorrido desde a última irradiação nesta barra foi de 86 dias e os picos obtidos foram os que eram esperados e mais o pico do ^{106}Rh (873 KeV). Tabelas II e III.

TABELA I

PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

- Germânio -

Crystal structure		face-centred cubic (diamond type)
Lattice constant (298°K)	A	a = 5.6575
Atomic number		32
Atomic weight		72.60
Density (298°K)	g/cm ³	5.323
Atoms/cm ³		4.42 x 10 ²²
Volume compressibility	cm ² /dyne	1.3 x 10 ⁻¹²
Melting point	°C	937
Boiling point	°C	2830
Specific Heat (0 to 100°C)	cal/g.°C	0.074
Latent heat of fusion	cal/mol	8100
Heat of vaporization (1150°K)	cal/mol	8900
Linear thermal expansion coefficient (293°K)	cm/°C	6.1 x 10 ⁻⁶
Brinell hardness		190
Mohs hardness		6
Refractive index (2 to 15 microns)		4.1
Magnetic susceptibility (293°K)	ogs	-0.105 x 10 ⁻⁶
Dielectric constant		15.7
Energy-gap (300°K)	eV	0.67
Density of carriers (300°K)	cm ⁻⁶	np=5.5 x 10 ²⁶ (*)
Electron drift mobility (300°K)	cm ² /V.s	3800 (*)
Hole drift mobility (300°K)	cm ² /V.s	1820 (*)
Intrinsic resistivity (300°K)	ohm-cm	47
Electron diffusion constant (300°K)	cm ² /s	101 (**)
Hole diffusion constant (300°K)	cm ² /s	49 (**)
Thermal conductivity (300°K)	W/cm.°C	0.7

Referências: (*) F.J. Morin & J.P. Maite
Phys. Rev. 94, vol 6, 1954, p.1525

(**) Proc.I.R.E. Aug. 1961, p.1292

TABELA I

Continuação ...

- Silício -

Crystal structure		face-centred cubic (diamond type)
Lattice constants (298°K)	A	a = 5-4307
Atomic number		14
Atomic weight		28.09
Density	σ/cm^3	2.33
Atoms/cm ³		4.96×10^{22}
Volume compressibility	cm^2/dyne	0.98×10^{-12}
Melting point	°C	1410
Boiling point	°C	2477
Specific heat (0 to 100°C)	cal/g.°C	0.18
Latent heat of fusion	cal/mol	11950
Linear thermal expansion coefficient (293°K)	cm/°C	2.3×10^{-6}
Brinell hardness		240
Mohs hardness		7.0
Refractive index (299°K)		3.4
Magnetic susceptibility (290°K)	cgs	-0.111×10^{-6}
Thermal conductivity (300°K)	W/cm.°C	1.3
Energy-gap (300°K)	eV	1.1
Density of carriers (300°K)	cm^{-6}	$n_p = 2.2 \times 10^{20}$ (*)
Electron drift mobility (300°K)	$\text{cm}^2/\text{V.s}$	1300 (*)
Hole drift mobility (300°K)	$\text{cm}^2/\text{V.s}$	500 (*)
Intrinsic resistivity (300°K)	ohm-cm	230000
Electron diffusion constant (300°K)	cm^2/s	35 (**)
Hole diffusion constant (300°K)	cm^2/s	13.1 (**)

Referências: (*) F.J. Morin & J.P. Maita
Phys. Rev. 96, vol. 1, 1954, p.28

(**) Proc. I.R.E. Aug. 1961, p. 1292.

TABELA I

Continuação ...

- Índio -

Crystal structure		tetragonal
Lattice constants	Å	a = 4.583 c/a = 1.0770
Atomic number		49
Atomic weight		114.76
Density	g/cm ³	7.310
Atoms/cm ³		3.89 x 10 ²²
Melting point	°C	156.2
Boiling point	°C	2000
Specific heat (20°C)	cal/g.°C	0.057
Latent heat of fusion	cal/g	6.8
Latent heat of vaporization	cal/g	483
Linear thermal expansion coefficient (20°C)	cm/°C	56 x 10 ⁻⁶
Electrical conductivity referred to standard copper	%	19.5
Electrical resistivity (20°C)	ohm-cm	9 x 10 ⁻⁶
Magnetic susceptibility (18°C)	ccgs	-0.10 x 10 ⁻⁶
Thermal conductivity (20°C)	cal/cm.s.°C	0.057

- Gálio -

Crystal structure		Pseudotetragonal orthorhombic
Lattice constants	Å	a = 4.5167 b = 4.5107 c = 7.6448
Atomic number		31
Atomic weight		69.72
Density at 29.6°C (s) at 29.8°C (I)	g/cm ³	5.904 6.095
Melting point	°C	29.75
Boiling point	°C	1983
Specific heat	cal/g.°C	
0 - 16°C (s)		0.039
16 - 24°C (s)		0.092
29 - 127°C (I)		0.098
Latent heat of fusion	cal/g	19.16
Latent heat of vaporization	cal/g	1014

TABLE I

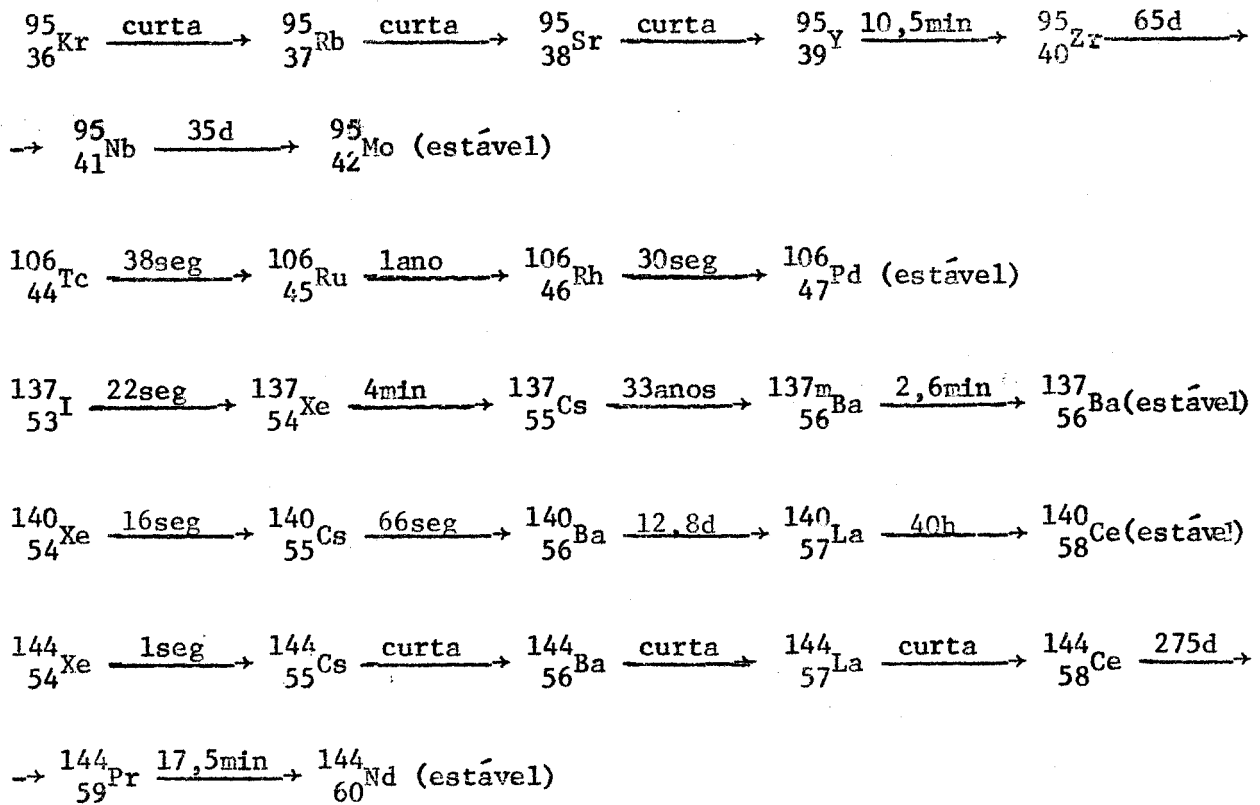
Continuação ...

Gálio (cont.)

Linear thermal expansion coefficient from 0 to 30°C at 100°C	/°C	1.8×10^{-5} 12×10^{-5}
Electrical resistivity at 20°C (s) at 46.1°C (I)	ohm-cm	56.8×10^{-6} 28.4×10^{-6}
Magnetic susceptibility	cgs	-0.24×10^{-6}
Thermal conductivity at 30°C	cal/cm.s.°C	0.07 - 0.09

TABELA II

CADEIAS DE DECAIMENTO DE PRODUTOS DE FISSÃO (**)



(*) The Radiochemical Manual
 2^a ed. Editor: B. J. Wilson (1966)
 The Radiochemical Centre, Amersham

(**) Radiochemical Studies: The fission Products
 Book 2: Part V - Mc Graw Hill (1951)
 Edited by: Charles D. Coryell and N. Sugarman

(***) Gamma-Rays of Radionuclides in order of increasing energy -
 D. N. Slater
 Butterworths - London - 1962.

TABELA III

Nuclídeos	T _{1/2} (***)	E _γ (KeV) (***)	Fission (*) Yield (%)	E _γ (encontrados) (KeV)
⁹⁵ ₄₀ Zr	65 d	722	6,3	724
		754		756
⁹⁵ ₄₁ Nb	35 d	765		766
¹⁰⁶ ₄₆ Rh	30 seg	870	1,25	873
^{137m} ₅₆ Ba	2,6 min	661,6	5,9	664
¹⁴⁰ ₅₇ La	40,22 h	815	6,3	815
¹⁴⁴ ₅₉ Pr	17,27 min	696	6,0	697

F I G U R A S

Figura	Legenda
1	- Criostato Aberto
2	- Criostato Fechado
3	- Cristal de Ge após o Corte
4	- Sistema Evaporador
5	- Equipamento Eletrônico
6	- Sistema de "DRIFT"
7	- Comparação de Resoluções de Espectrômetros
8	- Comparação de Eficiência
9	- Diagrama de Detetor de Ge-Li PLANAR
10 a	- Excitação de Elétrons em um Semicondutor Devido A Um Evento
10 b	- Excitação Residual Elétron-Buraco Após um Tempo $\approx 10^{-12}$ seg
11	- Sistema de Vácuo (esquema)
12	- Fonte para "DRIFT" (esquema)
13	- Sistema de Contrôlo de Temperatura (esquema)
14 a	- Sistemas de Segurança (esquema)
14 b	- Sistemas de Segurança (esquema)
15	- Criostato (esquema)
16	- Aspecto da Curva no Traçador
17	- Âbaco para Determinação da Espessura da Zona Compensada
18	- Coeficiente de Absorção do Ge e Li em Função da Energia da Radiação Incidente
19	- Espectro de Raios Gama de Produtos de Fissão
20	- Espectrômetro (diagrama em blocos)

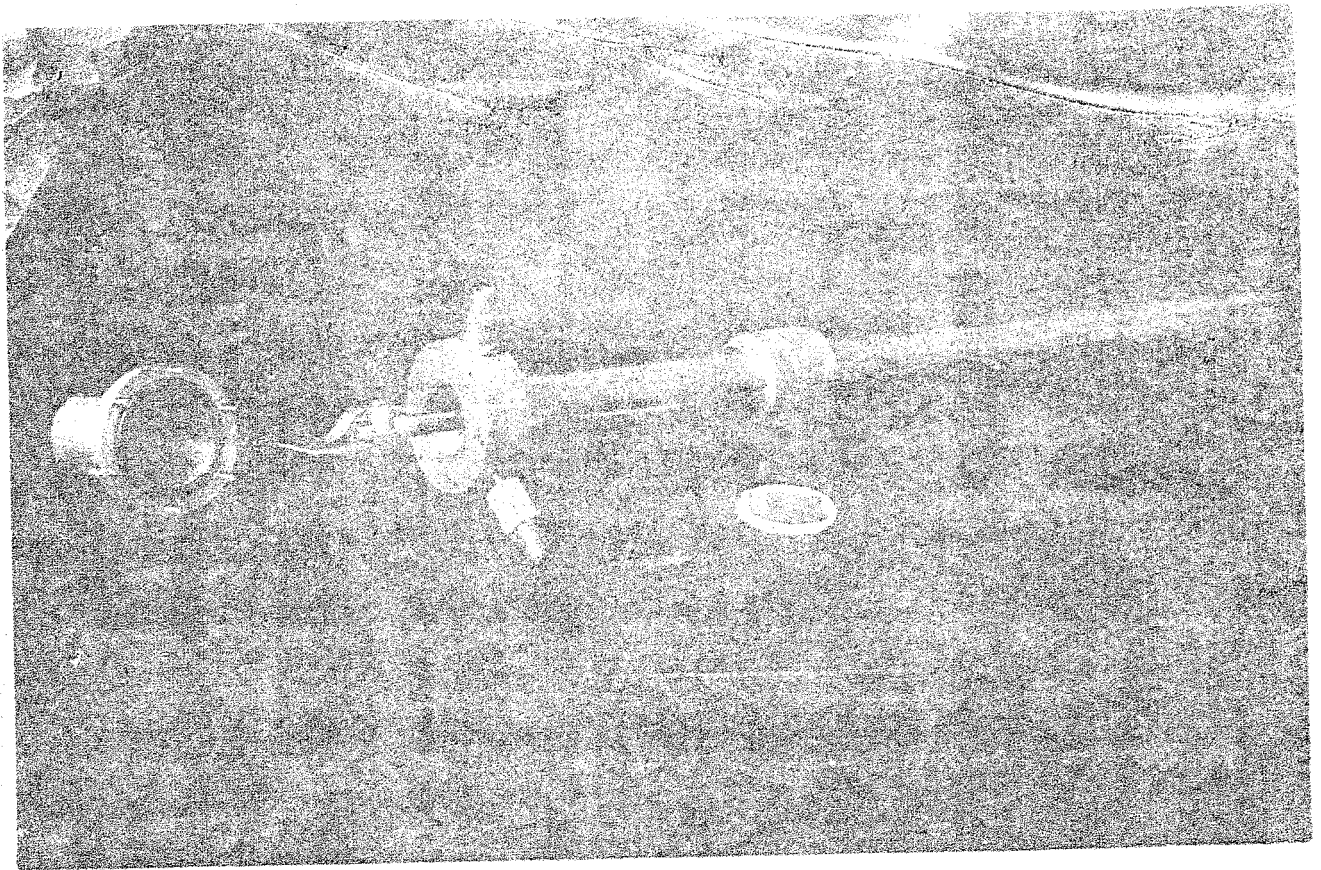


FIG. 1 - CRIOSTATO ABERTO

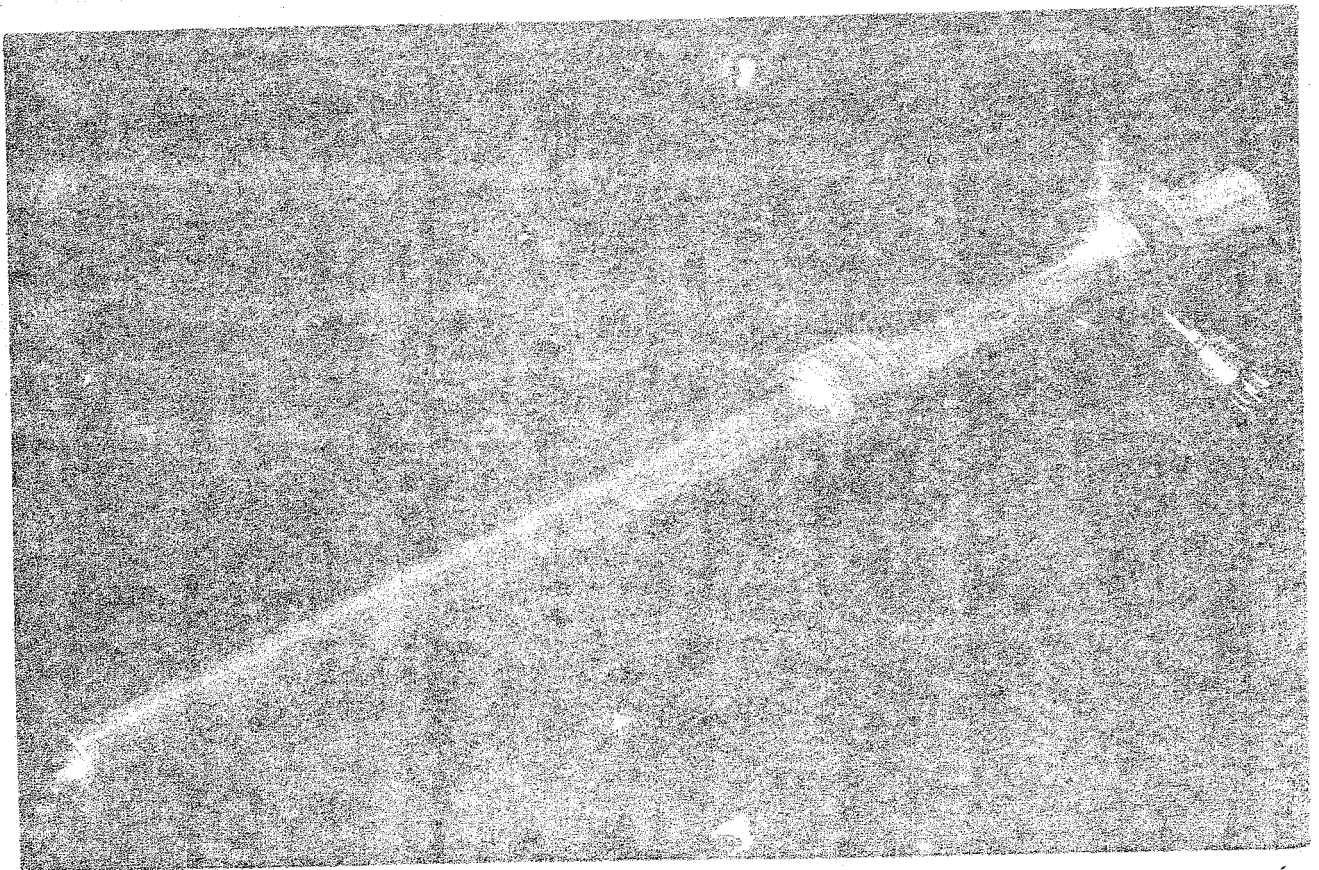


FIG. 2 - VISTA ORBITAL EXTERNA DO CRIOSTATO

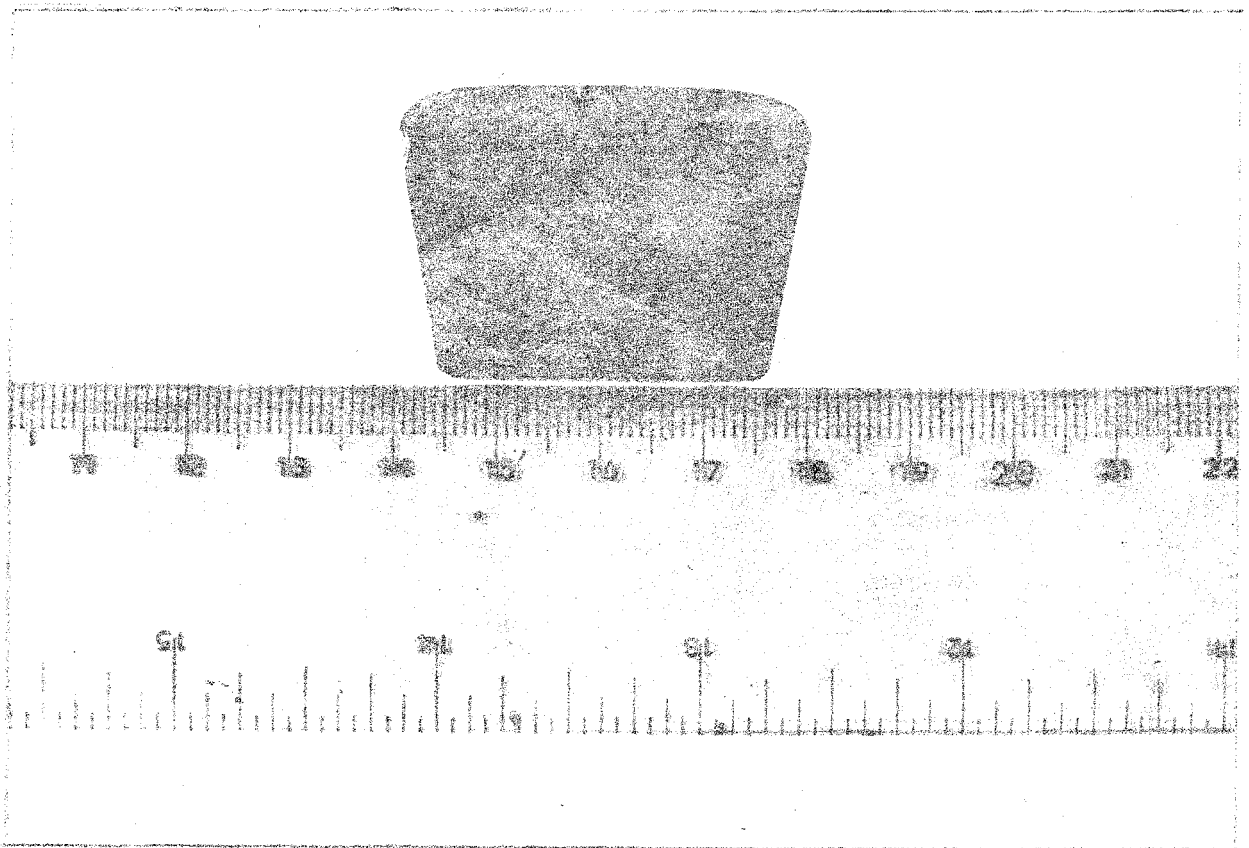


Fig.3 - CRISTAL DE GERMÂNIO

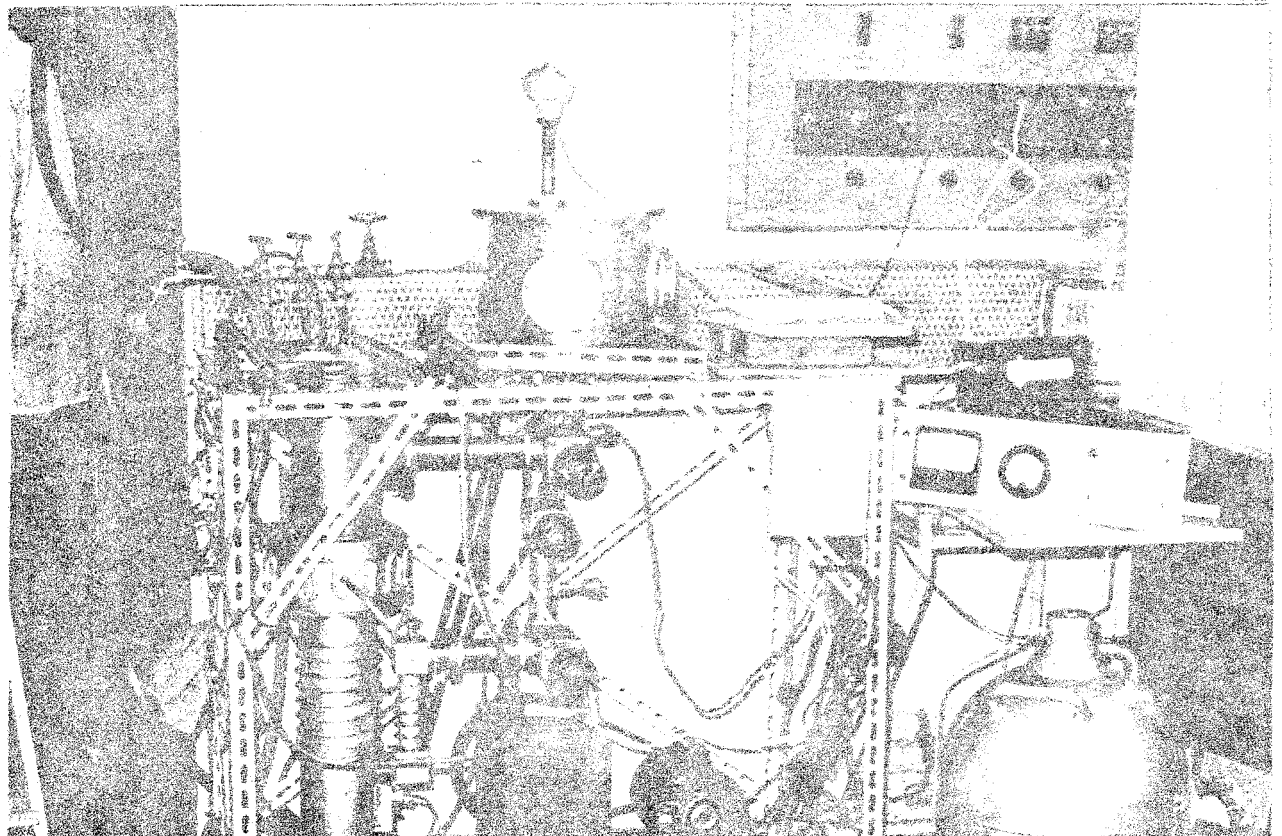
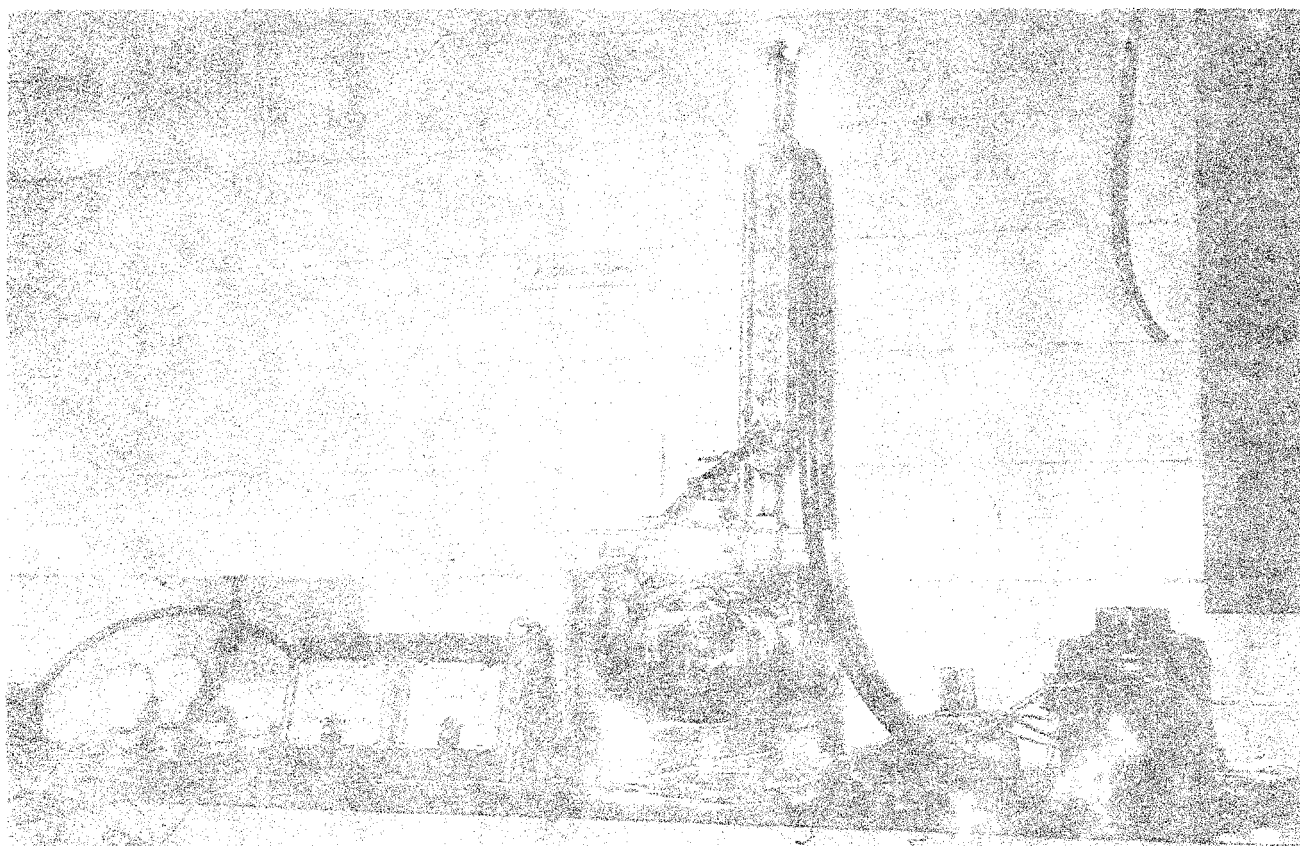




Fig.5 - VISTA DA APARELHAGEM UTILIZADA



- a - NaI
- b - Cristal de difração
- c - Espectrômetro se-
lenoide ($\Delta p/p$ 1%)
- d - Silício
- e - Germânio
- f - Espectrôgrafo de
magneto permanente
180°
- g - Espectrômetro sem
Ferro $\pi\sqrt{2}$
($\Delta p/p$ 0,07%).

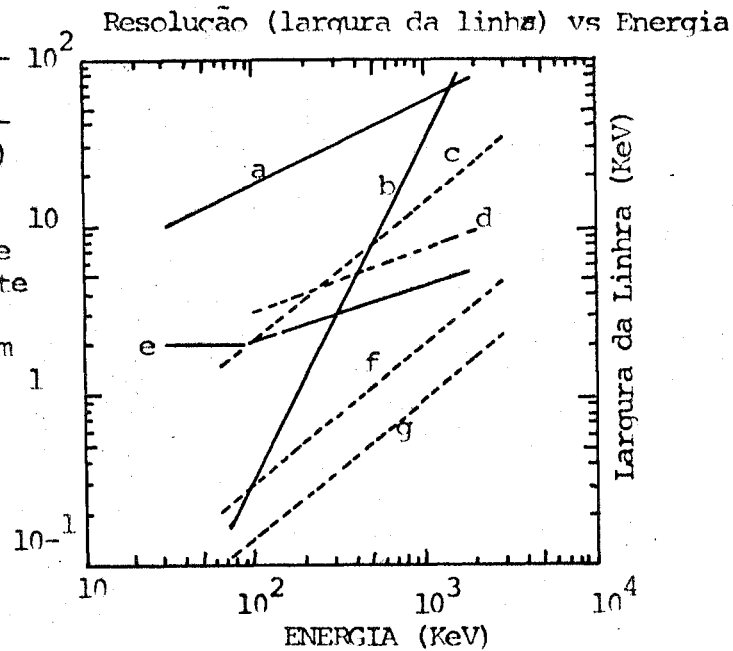


FIG. 7 Comparação da resolução em função da energia para diferentes espectrometros nucleares.

Eficiência aproximada do pico de energia total
(os ângulos sólidos estão entre parênteses)

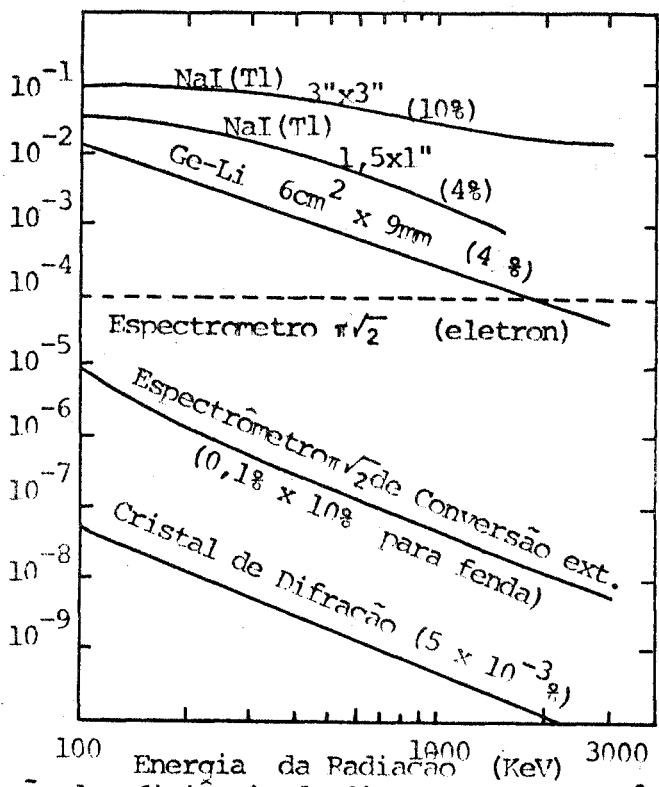


FIG. 8 Comparação da eficiência de diversos espectrômetros.

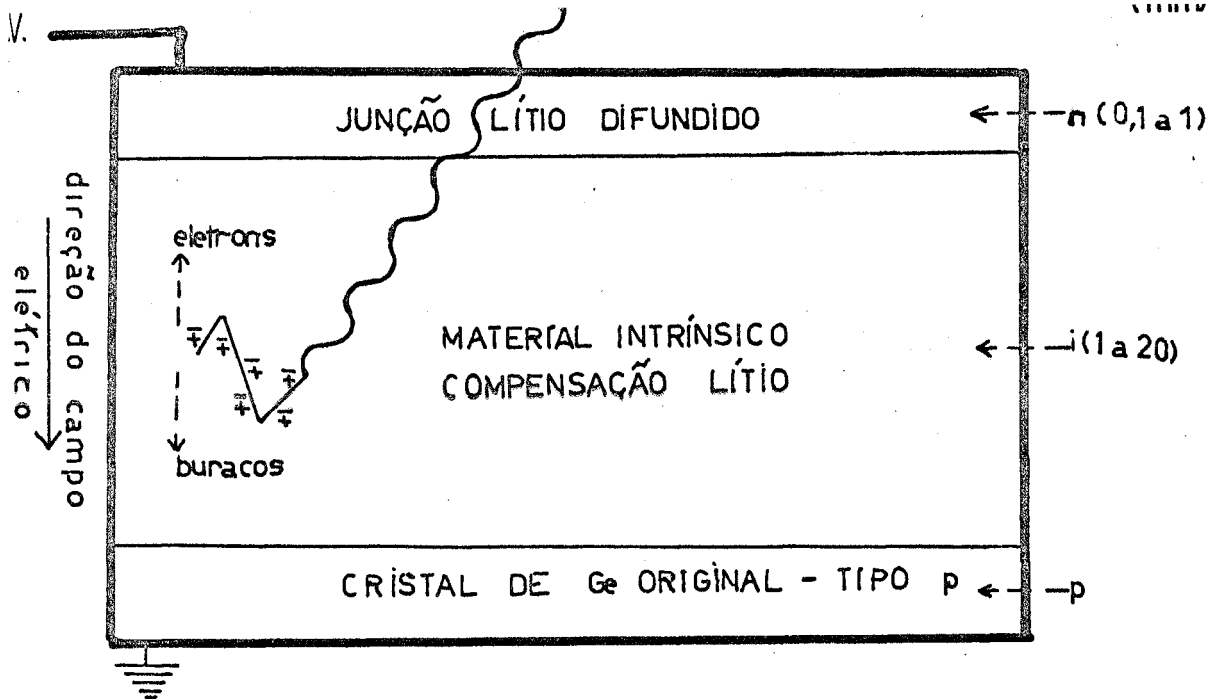


FIG. 9 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE DETETOR DE Ge - Li PLANAR

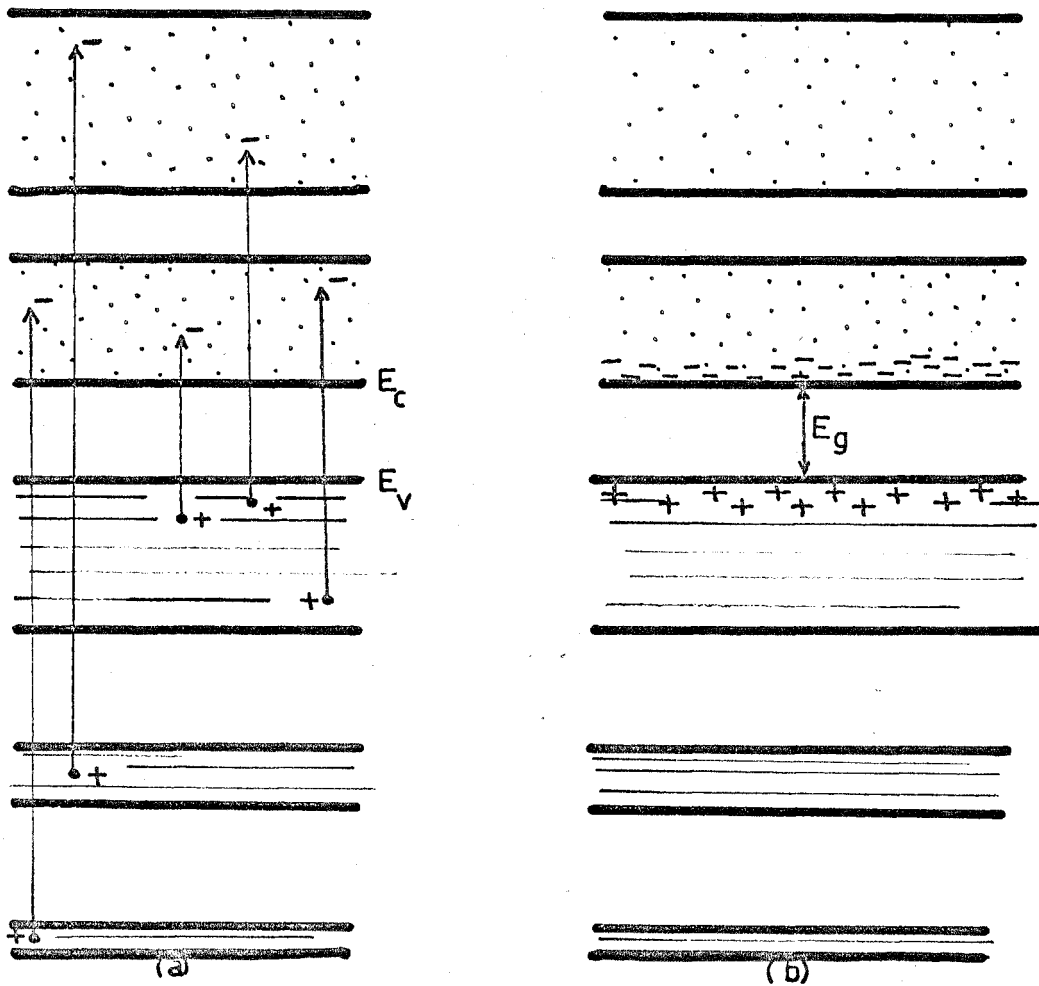


FIG. 10

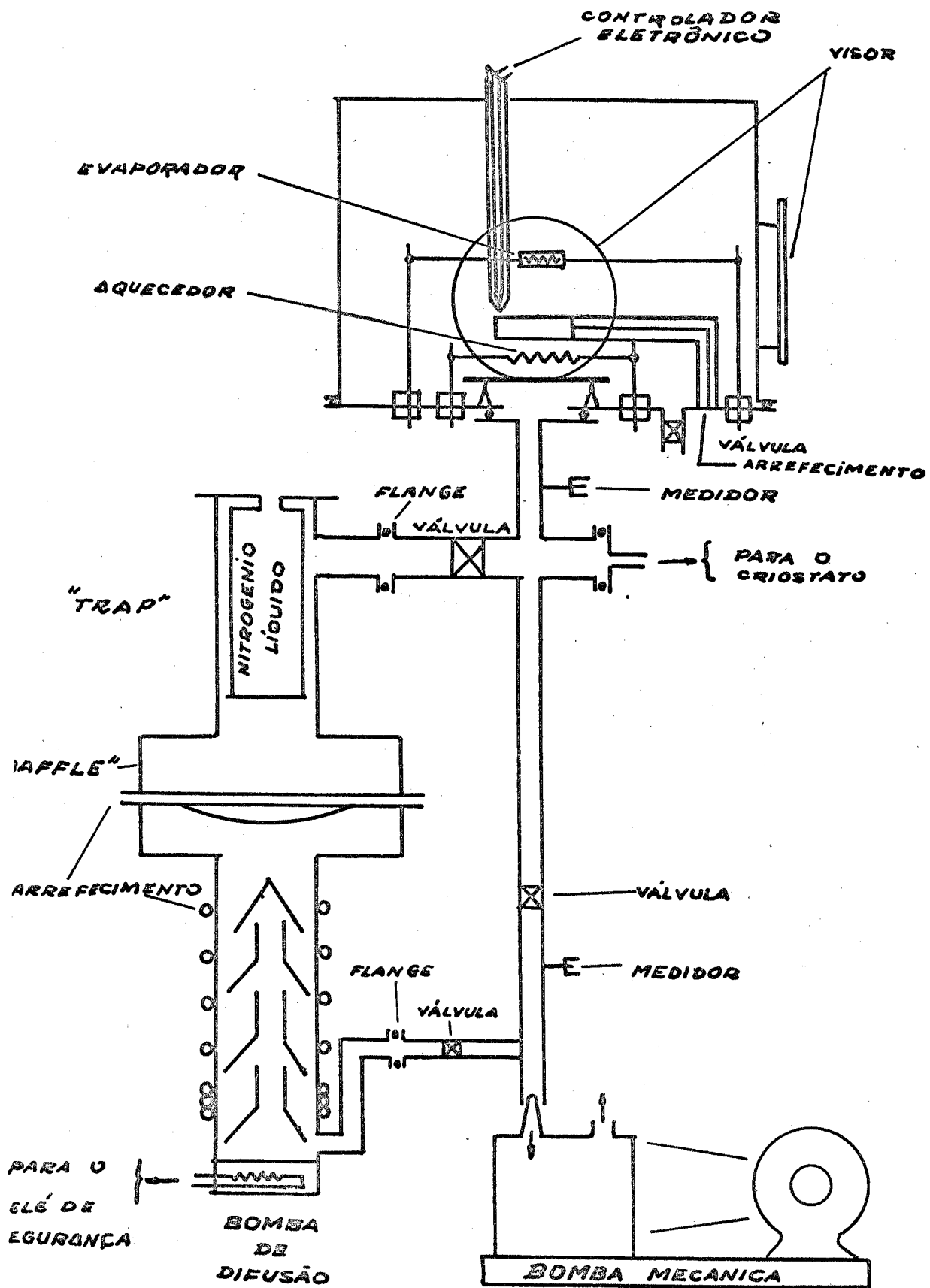


FIG. 11 SISTEMA DE VÁCUO

FONTE PARA "DRIFT"

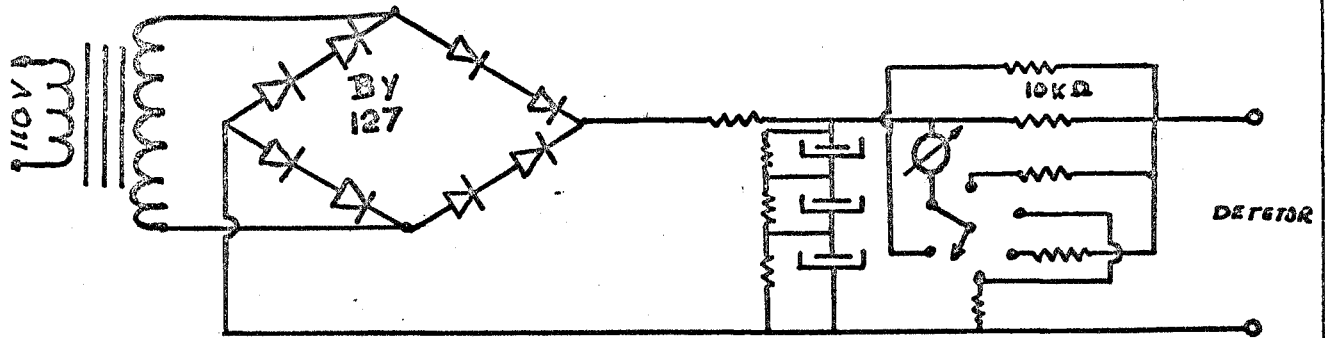


FIG. 12

SISTEMA DE CONTRÔLE DE TEMPERATURA NO AQUECEDOR

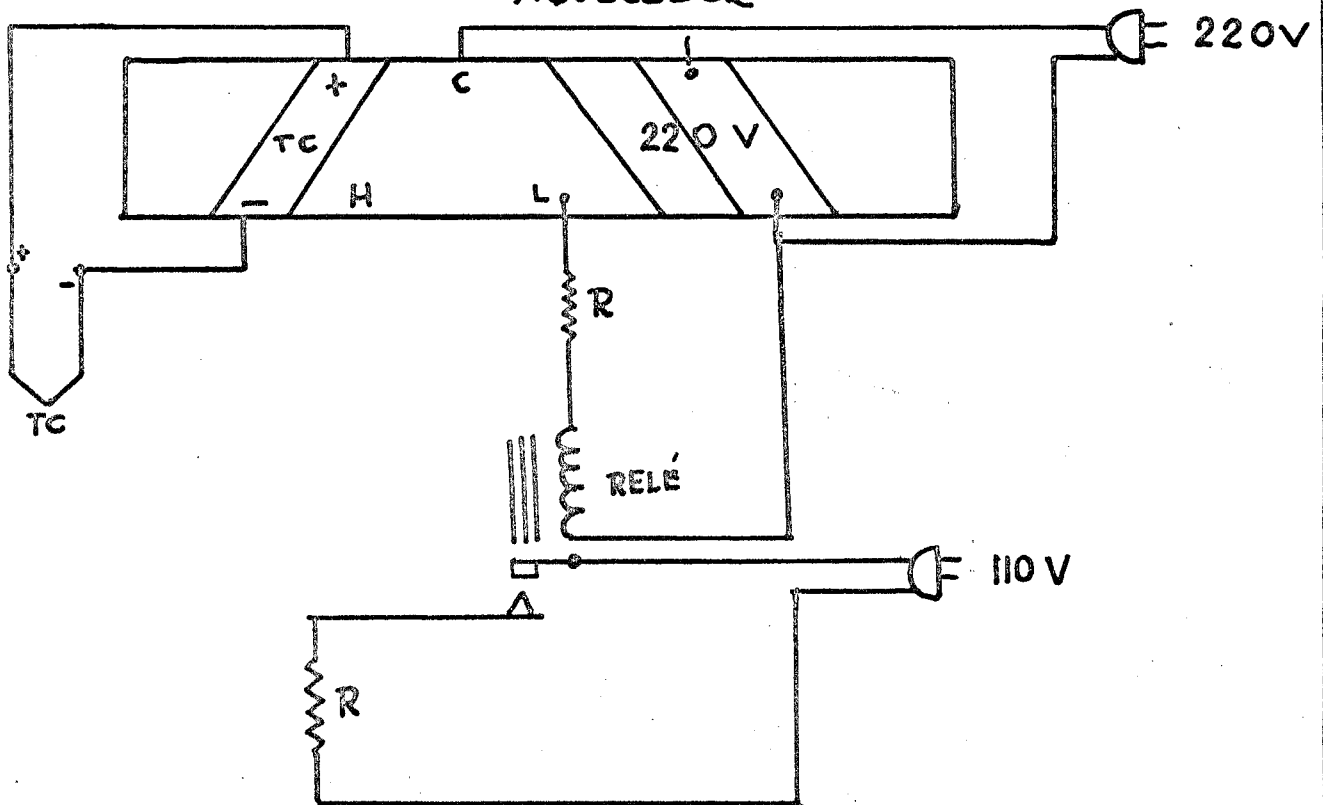
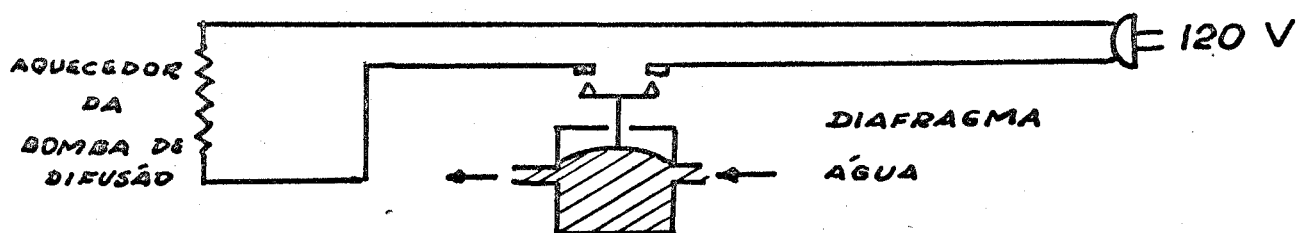


FIG. 13

A) DA BOMBA DE DIFUSÃO :



B) DA BOMBA MECÂNICA :

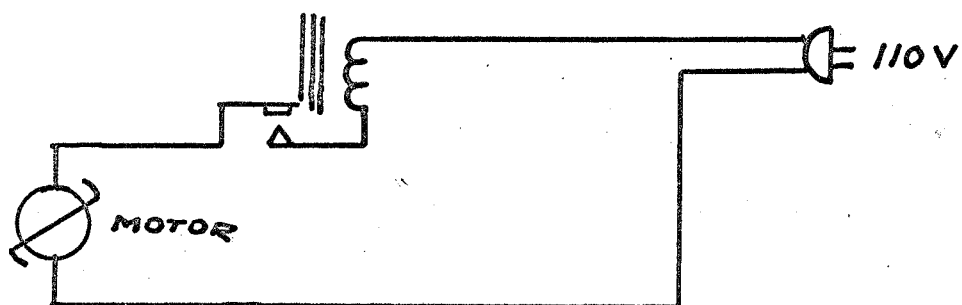


FIG. 14

VISTA GERAL DO CRIÓSTATO

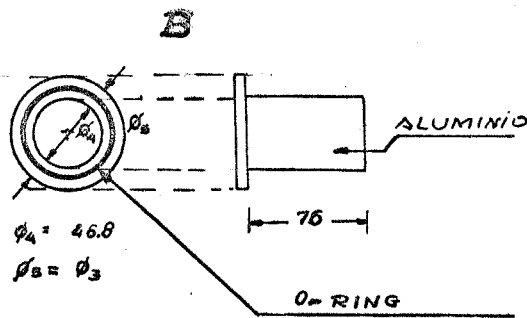
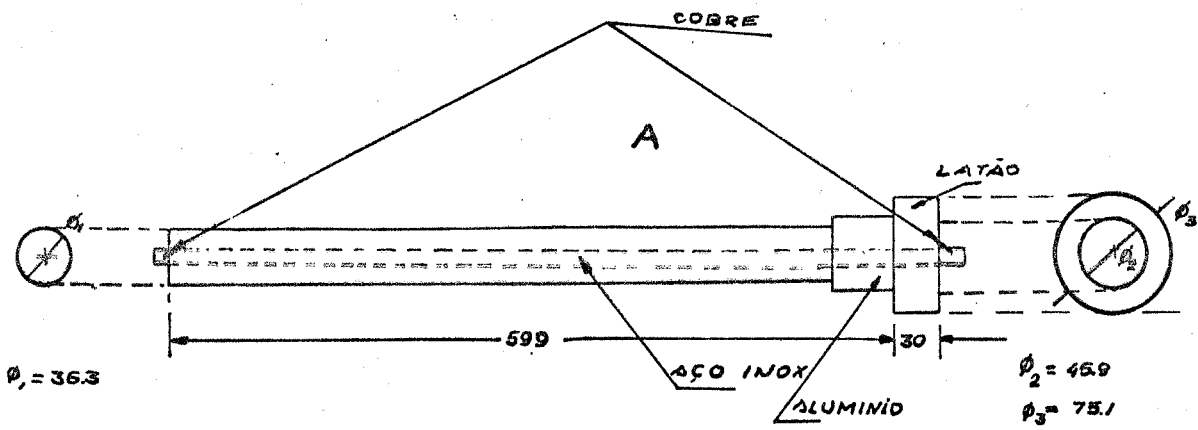
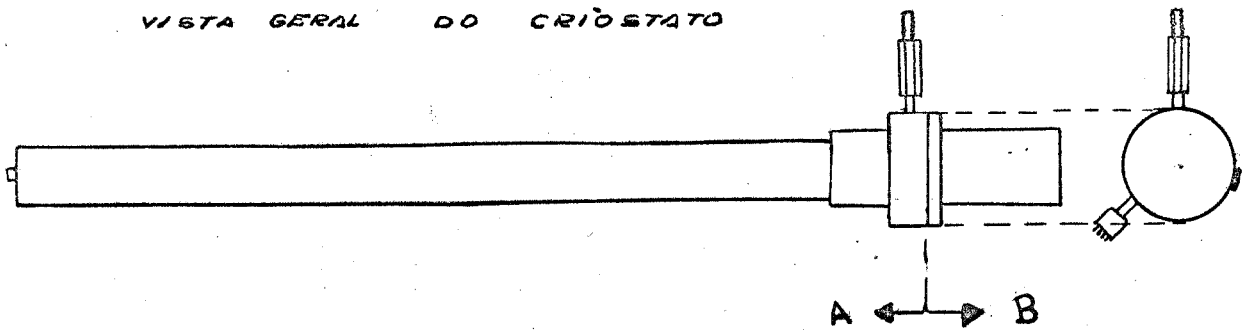


FIG. 15

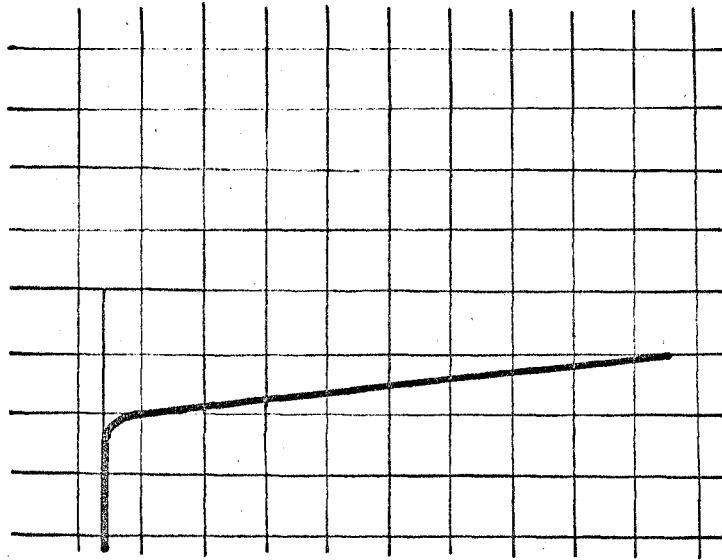
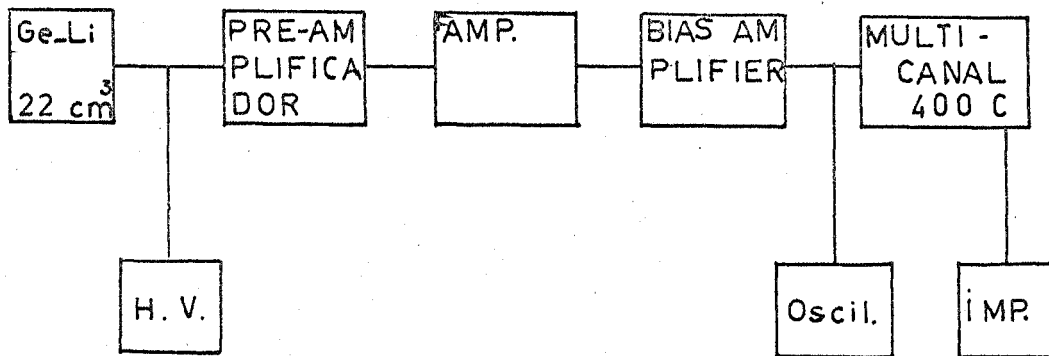


FIG-16 CORRENTE x VOLTAGEM HORIZONTAL 20V/cm
 VERTICAL 1mA/cm



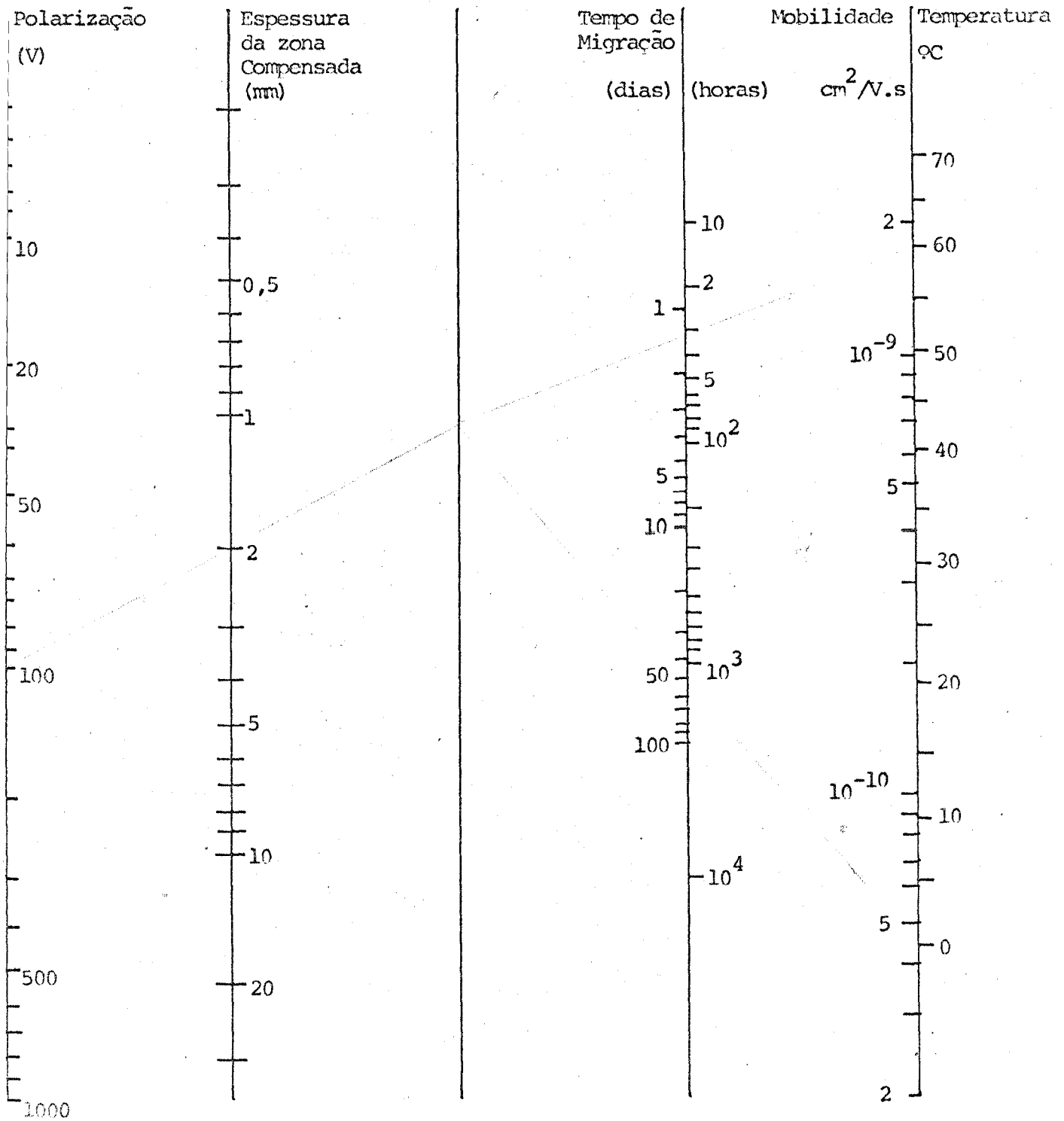


FIG. 17- Ábaco para determinação da espessura da zona compensada em função de diferentes parâmetros: tensão de polarização, temperatura, tempo de migração. (Nucl.Instr. and Meth. 35(1965)113-119 L.Stab et al.)

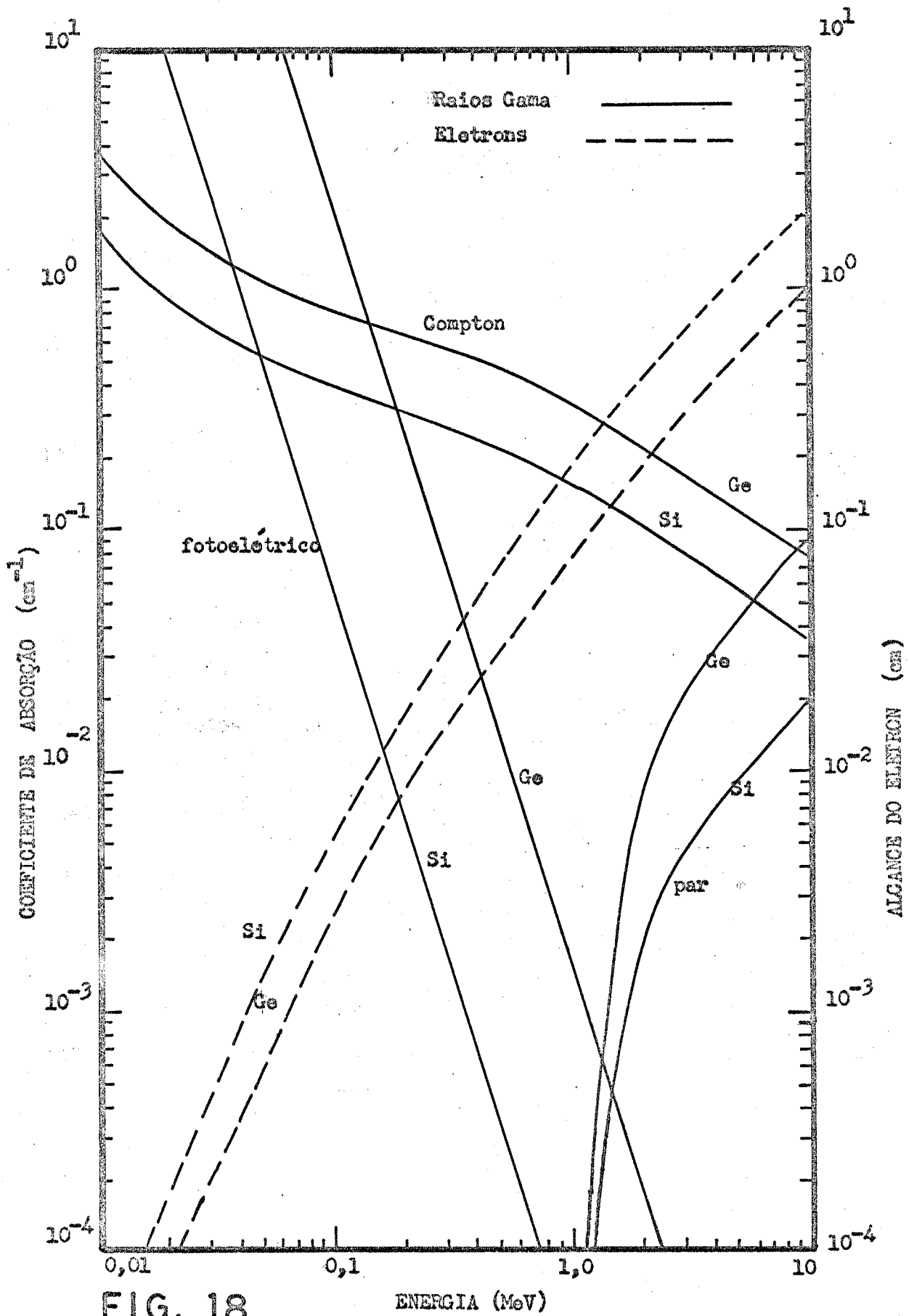


FIG. 18

ENERGIA (MeV)

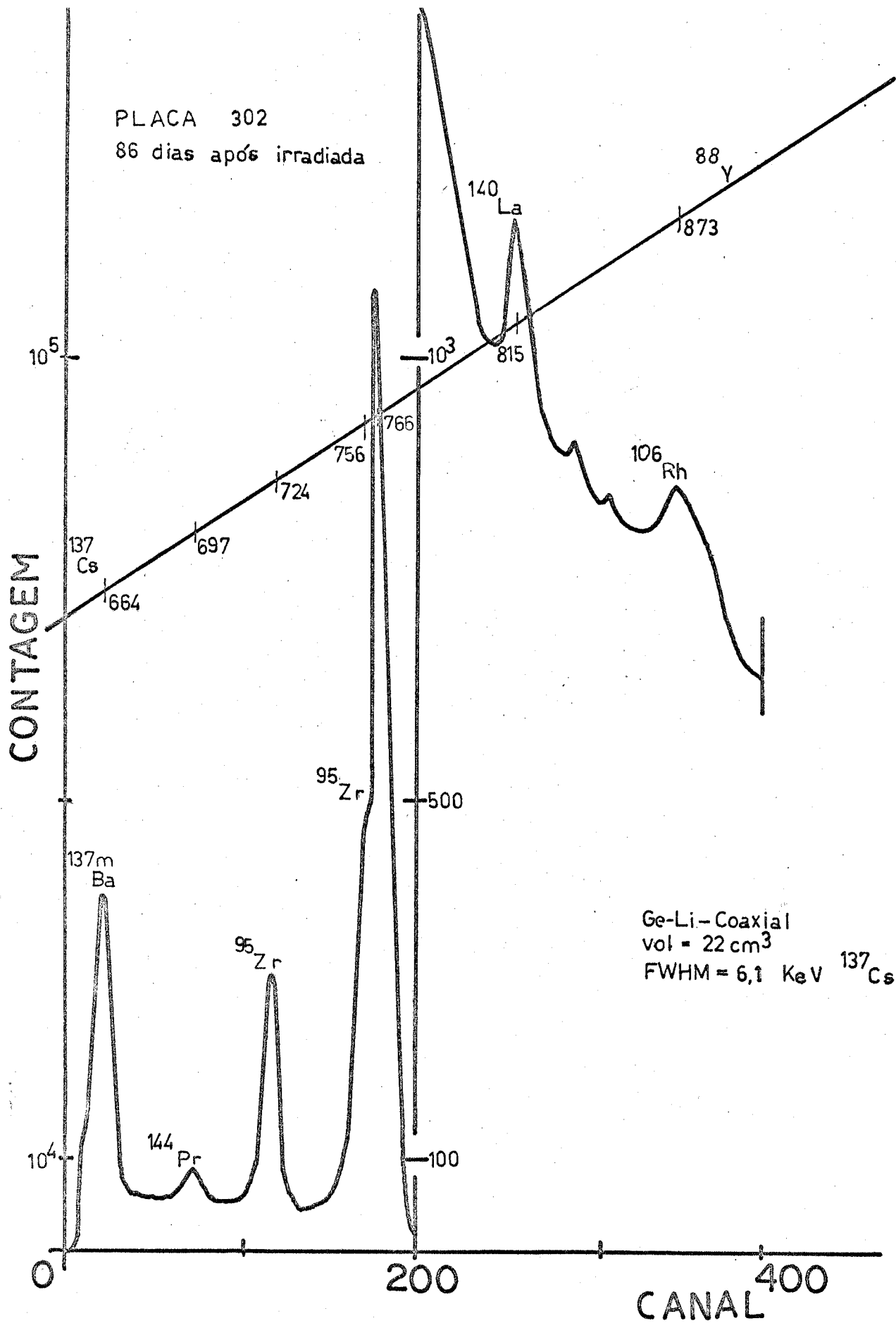


FIG.19 ESPECTRO DE RAIOS GAMA DE PRODUTOS DE FISSÃO

BIBLIOGRAFIA

- 1 - F.S. Goulding, J.W. Mayer, J.M. Hollander - Nuclear Instruments and Methods, 43 (1966)
- 2 - L.P. Adda et al - IEEE - NS-15 (1968) 347
- 3 - R.C. Wit - IEEE -NS-15 (1968) 352
- 4 - F. Cappellani - Nuclear Instruments and Methods, 37 (1965) 352
- 5 - W.L. Hansen - Nuclear Instruments and Methods, 31 (1964) 301
- 6 - H.P. Hotz - Nuclear Instruments and Methods, 37 (1965) 93
- 7 - F. Admas - Atomic Energy Review -IAEA- Vol. 5 Nº 4 (1966) 31
- 8 - G.T. Ewan - Canadian Journal of Physics, 42 (1964) 2286
- 9 - H.L. Malm - Canadian Journal of Physics, 43 (1965) 1173
- 10- R.J. Nickles - Thesis to MS. Universidade de São Paulo (1967)
- 11- J. Takacs - Nuclear Instruments and Methods, 33 (1965) 171
- 12- Proceeding of a Panel, IAEA (1966) on the use of Lithium Drifted Ge Detectors
- 13- Guy A. Armantrout, IEEE-NS-13 (1966) 328
- 14- H.M. Mann - IEEE-NS-13 (1966) 336
- 15- H.J. Fiedler - Nuclear Instruments and Methods, 40 (1966) 229
- 16- J.M. Kuchly - Nuclear Instruments and Methods, 47 (1967) 148
- 17- F. Cappellani - Nuclear Instruments and Methods, 47 (1967) 121
- 18- Semiconductor Counters for Nuclear Radiation - Dearnaley and Northrop, Spon (1963)
- 19- Semiconductor Particle Detectors - J.M. Taylor, Butterworths (1963)
- 20- Electrons and Holes in Semiconductors - Shockley
- 21- Pell, - IRE - NS-9 (1962)
- 22- A.J. Haverfield - PhD Thesis, Lawrence Radiation Laboratory, Universidade da California, USA, Novembro 1966 - UCRL - 16969

- 23- P.E. Gibbons - The development and application of Li-Drift Ge diodes at A.E.R.E. - AERE-R 5206 (1966)
- 24- F. Adams - A mounting procedure for Ge(Li) detectors - Nuclear Instruments and Methods, 48 (1969) 338
- 25- J.W.T. Dabbs, F.J. Walter - Semiconductor Nuclear Particle Detectors - National Academy of Sciences - NRS publication 871 (1961) Washington D.C.
- 26- G. Dearnaley - Nucleonics 22, No 7, 78 (1964)
- 27- E.Sakai, H.L. Malm, J.L. Fowler - Proceedings of the conference on semiconductor Nuclear Particle Detectors and circuits on AECL - 2762
- 28- L. Stab, R. Henck, P. Siffert, A. Coche - Nuclear Instruments and Methods 35 (1965) 113
- 29- Laboratory Manual A-Semiconductor Detectors and Associated Electronics - 2nd. ed. - November 1968 - ORTEC
- 30- Takayanagi, Oi, Kobayashi, Sugita - Nuclear Science and Technology, 3 (5) (1966)
- 31- Oi, Tanabe, Takayanagi, Matsushima - Nuclear Science and Technology, 4(7) (1967)
- 32- Hattori, J. At. Energy Soc. Japan, 3 (2) e 3 (3) (1961)
- 33- Peirson, Brit J. Appl. Phys., 6, 444 (1955)
- 34- E. Troubtzkoy and H. Goldstein - Nucleonics, Vol. 18, No 11 (1960)171/210

E R R A T A

Página	Linha	Onde se lê	Leia-se
1a.	4a.	intensidades	intensidades da radiação γ
2a.	1a.	de Li difundidos.	compensados com Li.
2a.	12a.	(a 350°C) aproximadamente	(a 350°C) e migrou aproximadamente
4a.	8a.	necessários portadores	necessários materiais com portadores
6a.	5a.	pela meia vida de	pelo tempo de
6a.	8a. e 9a.	Tempo de detecção de Portadores τ_c . Deve ser curto, o que leva a que os elétrons	Tempo de coleção de portadores τ_c . Deve ser curto, o que exige que os elétrons
6a.	23a.	condições normais	condições ideais
8a.	2a.	$\rho_i = \frac{1}{qn_i (\mu_h + \mu_i)}$	$\rho_i = \frac{1}{qn_i (\mu_h + \mu_e)}$
8a.	9a.	elétro-buraco	elétron-buraco
8a.	21a.	pureza	impureza
9a.	5a.	buracos livres ou elétrons	buracos e/ou elétrons livres.
9a.	11a.	meia vida o mais alto	vida média a mais alta
10a.	7a.	meia vida	vida média
13a.	16a.	Foram usados	Foi usada
14a.	16a.	de C_5H_{12} . P.A.	de C_5H_{12} e C_6H_{14} . P.A.
14a.	17a.	40°C fica	40°C a 60°C fica
14a.	18a.	de detetor.	no detetor.
15a.	8a.	na junção.	na junção e na região p.
18a.	15a.	medir tal corrente	medir a corrente
19a.	18a.	por apresentar melhor resolução.	além de apresentar melhor resolução com detetores de Ge-Li.
20a.	11a.	$^{144}_{La}$	$^{140}_{La}$
Tab. I	8a.	Atoms/cm ³	Atomic density