



SISTEMA DE DETEÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE FALHAS  
EM ESTOPIM ATRAVÉS DE RADIOISÓTOPO

ENG. DURVALDO GONÇALVES

SISTEMA DE DETEÇÃO NÃO DESTRUTIVA  
DE FALHAS EM ESTOPIM ATRAVÉS  
DE RADIOISÓTOPO

B11  
A.R.

RESUMO

~~foi desenvolvido~~<sup>de R</sup> um sistema para demonstrar a viabilidade de detecção não destrutiva de falhas na continuidade da pólvora no estopim produzido pela Fábrica da Estrela do Ministério do Exército.

~~Foi~~<sup>de R</sup> projetada a câmara de ionização, a fonte radioativa, o colimador, o eletrômetro e os circuitos eletrônicos de alimentação e controle.

~~Detectam-se~~<sup>de R</sup> as falhas ~~são detectadas~~ por uma câmara de ionização, com base na variação da intensidade das partículas beta que atravessam o estopim que passa através de um colimador. As partículas beta são emitidas por uma fonte de Estrôncio-90 + Itrio-90 encapsulada em aço inoxidável ou alumínio. ~~Foi adotado~~<sup>Adota-se</sup> um sistema de medição comparativa, apurando-se a compensação eletrônica. (Autor)

ABSTRACT

Design of an equipment for on line detection of faults in the safety fuses for conventional explosives employing transmission of  $\beta$ -radiation is reported.

The faults are detected by an ion-chamber based on the variation of the intensity of the beta particles transmitted through the fuse during its passage across the collimated beam. Strontium-90 encapsulated in stainless steel or aluminum is used as the  $\beta$ -source. An electrical signal corresponding the fault is obtained by subtraction of an external current, that is equivalent to the output of the ion-chamber in the presence of faultless fuse. (author).

**SISTEMA DE DETEÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE FALHAS  
EM ESTOPIM ATRAVÉS DE RADIOISÓTOPOS**

**INDICE**

	Pag.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REQUISITOS FUNDAMENTAIS PARA O PROJETO	2
3. CIRCUITOS ELETRÔNICOS	6
4. MONTAGEM-RESULTADOS	10
5. SEGURANÇA RADIOLÓGICA	11

## 1. INTRODUÇÃO

O estopim convencional contendo pólvora negra ainda é muito usado na indústria para propagar a chama ao explosivo. Ele é composto de um núcleo de pólvora negra (72% de  $\text{KNO}_3$ , 8% de carbono e 20% de enxofre), envolvido por vários fios enrolados sobre ele e finalmente coberto com plástico.

Durante a fabricação do estopim pequenas seções, maiores de 2mm de comprimento, não são preenchidas com pólvora negra devido a várias causas, as quais passam despercebidas. Estas falhas são observadas somente após o uso do estopim quando é interrompida a propagação da chama. Estas falhas expõem os trabalhadores a sérios perigos, bem como causam considerável perda de tempo e prejuízos materiais.

Foi realizado um estudo de viabilidade de emprego de técnicas nucleares para a detecção contínua não destrutiva de falhas em estopim e, após isso realizado o projeto completo de todo sistema idealizado, isto é, o detetor, a fonte radioativa, o colimador, o eletrômetro e os circuitos eletrônicos de alimentação e controle. A figura 1 mostra o esquema de tal sistema que emprega o método de transmissão para a detecção das falhas.

Uma fonte de estrôncio-ítrio ( $\text{Sr}^{90} - \text{Y}^{90}$ ) e uma câmara de ionização são colocadas nos lados opostos de um colimador. O estopim passa através do colimador perpendicularmente ao feixe colimado de partícula beta.

A intensidade do feixe que alcança o detetor aumenta quando a falha do estopim passa através do colimador entre a fonte e o detetor e, portanto, maior corrente de saída é obtida pela câmara de ionização. Esta corrente elétrica maior produz variações de tensão na saída do eletrômetro de valor suficiente para servir de base para o controle do processo de fabricação.

## 2. REQUISITOS FUNDAMENTAIS PARA O PROJETO

### 2.1. MÉTODO DE MEDIDA

A opção quanto ao uso de método de transmissão ou de re-trodispersão para os medidores nucleares não depende somente da precisão e da sensibilidade desejadas, mas de considerações de ordem prática, como disponibilidade da fonte radioativa conveniente, custo do sistema de medição, facilidade de acesso ao material a medir e da segurança radiológica.

Uma das exigências necessárias a esses medidores é assegurar que a resposta do medidor seja unicamente função da variável medida. Para isso é necessário que as outras variáveis que influem no processo sejam mantidas constantes ou compensadas por meios apropriados. Dentre essas variáveis estão a densidade do material a medir, a composição do material, a densidade do ar entre a fonte e detetor, as distâncias relativas fonte-material-detetor, distância fonte-detetor e variação da intensidade da fonte.

Geralmente, sempre que as condições da instalação e disponibilidades de fontes radioativas permitem, é preferível optar pelo método de transmissão, quando se trata de medir espessura de um material, por apresentar maior facilidade de realização mecânica do equipamento, ser menos sensível às variações de geometria de medição e necessitar de fonte radioativa de menor intensidade. No caso presente, o estopim será controlado numa operação isolada após sua fabricação, oferecendo portanto ampla possibilidade de acesso e espaço e facilidade de escolha de geometria.

Após o confronto dessas particularidades de cada método optou-se pelo princípio de transmissão que atende também ao aspecto da segurança radiológica pelo uso de uma fonte de menor atividade, para a mesma sensibilidade desejada.

Tendo como base essas premissas os requisitos adotados para o projeto foram:

- seleção correta do tipo, atividade e energia da fonte radioativa e do tipo de detetor.
- adequada geometria de medição.
- qualidade do projeto e montagem dos circuitos eletrônicos
- cumprimento das normas de segurança radiológica e outras contra incêndio, explosões, etc.

## 2.2. TIPO DE RADIOISÓTOPO

A forma e as características do material a medir são os fatores principais para a seleção do radioisótopo. Os outros elementos que afetam essa escolha são: o tipo e a energia da radiação emitida, a meia vida, a emissão de somente um ou mais tipos de radiação, a disponibilidade e custo, a sensibilidade e a escala de medição.

As características essenciais do material alvo, que servem de dados para a seleção da fonte radioativa podem ser resumidas como se segue:

1. diâmetro da pólvora negra do estopim.....2mm
2. espessura do revestimento (algodão e plástico).....1,5mm
3. composição da pólvora:
 

KNO <sub>3</sub> .....	72,0%
Carvão.....	8,0%
Enxofre.....	20,0%
4. peso da pólvora do estopim (mg/cm).....40
5. espessura média da pólvora (mg/cm<sup>2</sup>).....220

Com essa quantidade de pólvora a radiação gama não é aplicável devido a seu alto poder de penetração. Ao contrário, a radiação alfa tem muito pequeno alcance. No caso de partículas beta pode-se determinar a faixa de energia das partículas que permite obter as condições ótimas de projeto, atendendo-se às condições de máxima sensibilidade de medida e de minimização do erros ocasionados pela flutuação estática da fonte.

Dos emissores beta disponíveis com meia vida razoável, com pouca ou nenhuma atividade gama e energia de radiação suficiente, considerando-se a absorção nas janelas da fonte e do detetor, foi escolhida uma fonte da combinação Estrôncio 90 + Itrio 90 (<sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y). O <sup>90</sup>Sr emite uma partícula beta de 0,546 MeV e decai para o <sup>90</sup>Y com meia-vida (T<sub>1/2</sub>) de 28 anos enquanto o <sup>90</sup>Y emite partícula beta de 2,27 MeV com T<sub>1/2</sub> de 64 horas.

As partículas beta do <sup>90</sup>Sr serão quase completamente absorvidas nas janelas da fonte e do detetor, de modo que as partículas beta realmente utilizadas serão as do <sup>90</sup>Y de 2,27 MeV, cuja energia é suficien-

te para atravessar o estopim e sensibilizar o detetor. A longa meia-vida do  $^{90}\text{Sr}$  elimina a necessidade de troca da fonte radioativa durante quase toda a vida do sistema de detecção. O  $^{90}\text{Sr}$  é produzido como rejeito da fissão do urânio e pode ser adquirido ao preço de 2 dólares por milicurie.

### 2.3. QUANTIDADE DE RADIOISÓTOPO - FONTE RADIOATIVA

Os fatores principais que determinam a atividade da fonte radioativa são a sensibilidade do sistema de medida e a proteção radiológica. Para que seja mantido um nível de radiação externa ao colimador dentro dos limites de tolerância sem o uso de excessiva blindagem, deve-se usar uma fonte radioativa com a menor intensidade possível. Ao contrário, para se obter maior sensibilidade do sistema de medida exige-se maior intensidade da fonte. A determinação da quantidade necessária de  $^{90}\text{Sr}$  será feita pelo balanço desses dois fatores. Praticamente, a intensidade da fonte foi determinada somente pela sensibilidade da medida, já que foi adotado um valor mínimo de sensibilidade necessário para se obter uma precisão que permita ao mecanismo de controle ser operado num nível razoavelmente alto.

Foram adquiridos na New England Nuclear alguns frascos de  $^{90}\text{Sr}$ , contendo cada um cerca de 50mCi, na forma de  $\text{Sr Cl}_2$ , dissolvido em 0,2ml de uma solução 1,1 molar de HCL.

A figura 1, mostra a cápsula de alumínio da fonte preparada. A cápsula interna foi colocada dentro de uma capela e, após ser cheia com 0,2 ml de água destilada saturada com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  foi posto a secar lentamente. Após isso, quantidades de 0,2 a 0,4ml da solução de  $^{90}\text{Sr Cl}_2$ , foram sendo adicionados e secos, sucessivamente, até obterem-se 5ml do material residual. A atividade final da fonte foi de 50 mCi.

### 2.4. DETETOR DE RADIAÇÃO

Tendo em vista a alta atividade da fonte de radiação utilizada e as vantagens oferecidas pela câmara de ionização como, simplicidade de fabricação e robustez, insensibilidade às flutuações na tensão de polarização e relativamente baixa tensão de operação, optou-se pelo uso de uma câmara de ionização de corrente, cuja única dificuldade é o alto isolamento exigido para o eletrodo coletor de elétrons.



## 2.5. COLIMADOR

O colimador deve permitir a obtenção de uma adequada colimação do feixe de radiação para que pequenas alterações de geometria do sistema não afetem a intensidade da radiação incidente do detetor, bem como manter constantes as distâncias relativas fonte-estopim-detetor.

As variações que dependem da geometria do sistema são a distância entre a fonte e detetor e a posição do estopim em relação à fonte e ao detetor. Alterando-se a distância fonte-detetor, o ângulo sólido definido pela fonte e janela da câmara de ionização também se altera provocando mudanças na intensidade de radiação que atinge o detetor. A posição do estopim relativamente ao detetor e a fonte deve ser mantida constante para que permaneça constante a dispersão produzida na radiação que atravessa o estopim.

### 3. CIRCUITOS ELETRÔNICOS

A corrente necessária na câmara de ionização resultante da interação das partículas  $\beta$  com o gás de enchimento da câmara é da ordem de  $10^{-10}$  ampères e as variações dessa corrente, como consequência das falhas do estopim são da ordem de  $10^{-11}$  ampères. Esses valores de corrente são muito baixos e não podem ser medidos pelos instrumentos comuns de medida como o de imã permanente e bobina móvel, podendo ser determinadas pela medida da diferença de potencial nos terminais de uma resistência conhecida de  $10^{11}$  a  $10^{13}$  ohms. O instrumento que mede e amplifica essa diferença de potencial é chamado eletrômetro, cujo sinal de saída pode ser medido por um instrumento de sensibilidade normal ou então usado para quaisquer fins de controle.

O sistema eletrônico usado para esta aplicação é mostrado no diagrama de blocos da figura 4. Consiste de uma fonte de alta tensão contínua de + 100 volts para a polarização da câmara, um eletrômetro e amplificador, uma fonte de baixa tensão de  $\pm 15$  volts para o eletrômetro, o amplificador e o circuito de controle, um circuito de controle que discrimina as variações de sinal de saída do amplificador, e um circuito de acionamento cuja finalidade é efetuar o controle do motor que aciona o carretel do estopim em teste e ligar o circuito de alarme.

Os circuitos mostrados em linha tracejada, embora já projetados, somente terão seus desempenhos verificados quando da montagem do sistema à Fábrica da Estrela, após a verificação da sua viabilidade com a conclusão deste trabalho.

A seguir é feita a descrição de cada parte do sistema.

### 3.1 FONTE DE ALTA TENSÃO

A câmara de ionização trabalha na região de saturação e portanto, é praticamente insensível a variações de tensão de polarização. Assim a regulação da tensão da câmara não é crítica. Além disso, a corrente solicitada dessa fonte é muito baixa. O circuito da fonte de alta tensão de + 100 volts é comum, constando de um retificador de onda completa e de um regulador em paralelo estabilizado com um diodo zener. O transformador de alimentação é o mesmo da fonte de + 15 volts (ver item 3.3). A figura 5 mostra o esquema da fonte de alta tensão.

### 3.2 ELETRÔMETRO E AMPLIFICADOR

O eletrômetro é um voltímetro de corrente contínua usado para a medida de diferenças de potencial desenvolvidas através de altas impedâncias sem influir ou carregar o circuito.

As características ideais desses medidores são: impedância de entrada infinita, impedância de saída zero e nenhuma necessidade de correção das características. Para o projeto do eletrômetro em questão, totalmente transistorizado, foi adotado um sistema de medida que consta de um amplificador diferencial acoplado diretamente a um amplificador operacional, com realimentação negativa total, através de uma resistência de  $10^{11}$  ohms. A figura 6 mostra o esquema do circuito do amplificador diferencial e operacional que constituem o eletrômetro.

Um transistor de efeito de campo (FET) foi escolhido para o circuito de entrada do sinal da câmara de ionização devido a sua inerente alta impedância de entrada, que é inferior à de um transistor de efeito de campo do tipo metal-óxido (MOSFET), mas não necessitando de circuitos especiais de proteção. O amplificador diferencial constituído dos transistores  $T_1$  e  $T_2$  oferece uma impedância de entrada muito alta com baixa tensão de desequilíbrio.

Os transistores FET  $T_1$  e  $T_2$  foram selecionados entre outros transistores comerciais do mesmo tipo, por apresentarem características elétricas idênticas, favoráveis à finalidade colimada, e serem de baixo preço, o que permitiu a escolha de pares dentre 50 elementos. Estes pares foram escolhidos nas condições de funcionamento real do circuito. Com isso reduziu-se em grande parte as fontes de deriva ou desvios próprios desses elementos, oriundos de duas causas: 1) o envelhecimento, que é um processo lento de desvio que ocorre devido as mudanças de parâmetros do elemento com o tempo, e 2) a temperatura, que é a causa mais importante de desvio, pois, todo o processo de condução dos semicondutores depende da temperatura. Normalmente os processos usados para a redução da deriva à temperatura atendem também à correção devido ao tempo.

As saídas dos transistores  $T_1$  e  $T_2$  são acopladas às entradas do amplificador operacional integrado 741 C, permitindo um ganho máximo de  $10^5$ . A saída do amplificador operacional é realimentada à entrada do amplificador diferencial através de uma resistência, encapsulada em vácuo, produzida pela Victoreen Instruments Co., de  $10^{11}$  ohms, através da qual flui a corrente oriunda da câmara de ionização.

Esta realimentação negativa permite obter não só a estabilidade do circuito, face às fontes de ruído e variações dos componentes, como também um aumento da velocidade de resposta, conseguida pela redução da capacitância de entrada do circuito para um valor  $C / (1 + G)$ , onde  $C$  é a capacitância total da entrada do circuito e  $G$  é o ganho do circuito desde a entrada até a saída. Outra vantagem deste circuito é manter a porta de  $T_1$  sempre no mesmo potencial, permitindo compensar a corrente de fuga da sua porta referindo-se o transistor  $T_3$  a um potencial fixo. Entre os drenos de  $T_1$  e  $T_2$  está ligado um capacitor em série com uma resistência, que estabilizam o amplificador. A determinação do desvio do eletrômetro já integrado ao conjunto câmara de ionização - colimador - fonte radioativa, foi feita deixando o circuito ligado durante algumas horas e verificando a variação do nível de tensão contínua na saída do eletrômetro com um voltímetro.

O nível de ruído no eletrômetro foi determinado com e sem fonte radioativa no colimador, com a tensão de polarização da câmara ligada. Os resultados destes testes revelam a maior ou menor incidência de cada um dos fatores, fonte e tensão de polarização, no nível de ruído do sistema. Foi observado uma forte influência dos transitórios da fonte de alta tensão no ruído de saída do circuito do eletrômetro. Essa influência foi reduzida fazendo um transformador de alimentação com blindagem em cada enrolamento (ver item 3.3.)

Para estes testes foi utilizado um registrador Phillips, modelo PM8010, de 2 canais.

### 3.3. FONTE DE BAIXA TENSÃO

As tensões de + 15 volts, cujos esquemas de circuitos são mostrados na figura 7, são altamente estabilizadas e alimentam os circuitos dos amplificadores diferencial e operacional. O transformador usado nesta fonte de alimentação foi projetado com blindagem em cada enrolamento, para diminuir os efeitos de transitórios que ocorrem na rede de alimentação. O regulador é transistorizado pois as correntes solicitadas dessas fontes são somente da ordem de 100 miliamperes.

#### 4. MONTAGEM - RESULTADOS

Realizados os testes de desempenho de cada parte do sistema de per si ou em conjunto, e obtidos os resultados considerados satisfatórios, passou-se ao teste do sistema total constituído da fonte radioativa, do colimador, detetor e sistema eletrónico de medida. Para a verificação de comportamento do sistema completo foram utilizados dois tipos de estopim com falhas provocadas pelo fabricante. Para estes testes, o registrador Philips, modelo PM 8010, de dois canais, foi acoplado diretamente à saída do eletrômetro.

Não se dispondo do mecanismo de acionamento do estopim, imaginado para a instalação do sistema à fábrica, o teste de resposta do sistema em presença de uma falha do estopim foi realizado puxando-se o estopim manualmente através do furo do colimador, numa velocidade de 20 a 30 cm/s, próxima à programada pela fábrica.

As variações da tensão de saída do eletrômetro quando da passagem de uma falha frente ao detetor, com o estopim recoberto de plástico ou não, foram 3,5 e 6 volts, respectivamente. A amplitude desses sinais de tensão, representativos de cada falha, tem um valor suficiente para a finalidade desejada de servir de base para o processo de controle de qualidade do estopim.

A análise dos sinais de saída mostra que o estopim sem a cobertura plástica é mais conveniente para o controle. O estopim com plástico pode também ser controlado, caso haja outros interesses da fábrica que se sobrepõem aos motivos expostos.

Verificada a viabilidade de funcionamento do sistema de deteção de falhas, que é o objetivo desta fase do trabalho, tenciona-se colocá-lo em execução prática, adiando-se, para isso, algumas observações sobre a montagem do sistema visando à atingir o fim colimado, o de montar o sistema completo para o controle de qualidade na fabricação do estopim.

O estopim deve passar através do furo do colimador com o menor atrito possível a fim de minimizar o aumento de temperatura do colimador e a vibração mecânica que possa gerar ruído elétrico na câmara. Com essa finalidade foi imaginado o sistema mecânico, mostrado na figura 8, constituído por duas roldanas guias que mantêm o estopim sempre na horizontal, qualquer que seja a sua quantidade existente nos carretéis. Um dos carretéis é acionado por um motor que será desligado a cada passagem de uma falha pelo colimador.

Foram fornecidas amostras de estopim radiografada pela firma Supervise do Brasil, para indicar a existência e posição exata das falhas. Essas radiografias foram obtidas enrolando-se o estopim em espiral entre duas placas de eucotex de modo a formar uma única camada. Essas radiografias, além de difícil observação, exigem muito tempo para a obtenção dos seus resultados. O sistema projetado neste trabalho, entretanto, mostrou maior número de falhas e com maior facilidade.

## 5. SEGURANÇA RADIOLÓGICA

As radiações  $\beta$  têm alcance limitado e alguns milímetros de espessura de metal ou plástico servem de blindagem contra essas radiações, por isso não apresentam problemas importantes de segurança radiológica, sob o aspecto de exposição externa.

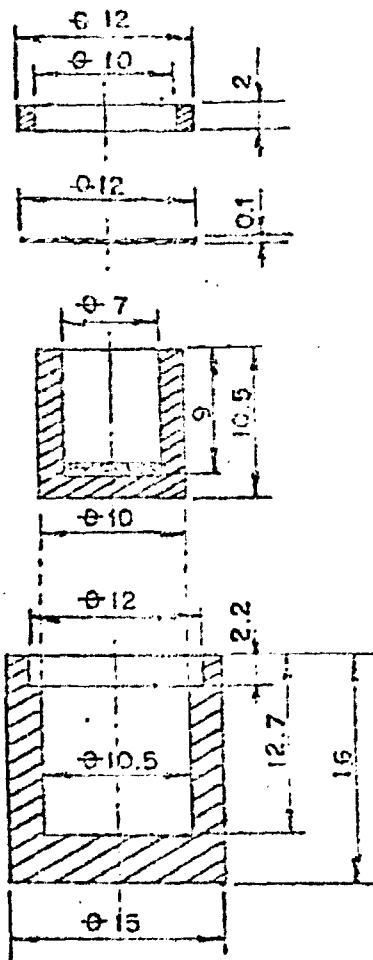
A fonte de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  representa perigo, sob o aspecto de partículas  $\beta$  somente quando existe contaminação pelo radioisótopo, devido a sua longa meia-vida. Isto ocorre se a janela ou o corpo da cápsula forem perfurados e houver vazamento do radioisótopo. Como a fonte está dentro do colimador, esta possibilidade será remota. Recomenda-se, entretanto, que, pelo menos duas vezes por ano, se proceda a uma verificação da possibilidade de fuga do radioisótopo, esfregando-se um papel filtro ou um pedaço de algodão na cápsula da fonte ou no colimador, próximo à saída do estopim, local mais provável de contaminação, verificando-se a contaminação com um monitor de radiação.

A principal preocupação para a segurança radiológica devido a exposição externa é representada pela radiação de frenagem, produzida pela absorção das partículas  $\beta$  no suporte da fonte e no colimador. O espectro de raios-x produzidos pela fonte radioativa de 50 mCi, com cápsula de alumínio, mostra na figura 9 indica que a intensidade máxima da distribuição e energia dessa radiação ocorre em 50 KeV.

Esses raios-x de baixa energia tem alto poder de penetração e devem ter a sua intensidade atenuada, por meio de blindagem de chumbo para que externamente ao sistema de medida, a taxa de dose tenha um valor abaixo dos valores máximos permitidos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, para a classe de trabalhadores em questão.

Externamente e em contato com a blindagem provisória do sistema de medida constituída de 20 mm de chumbo, o nível de radiação, no ponto de maior intensidade, foi de 2 mR/h. Este nível está abaixo do valor máximo permitido pela referida Comissão Internacional, de 2,5 mR/h. Entretanto, na montagem definitiva, essa blindagem deverá ser constituída por uma espessura de chumbo de 50 mm, a fim de se ter externamente a essa blindagem um nível de 0,05 mR/h, da ordem da radiação de fundo.





dimensões em mm

Figura 1 - Fonte radioativa com cápsula de alumínio

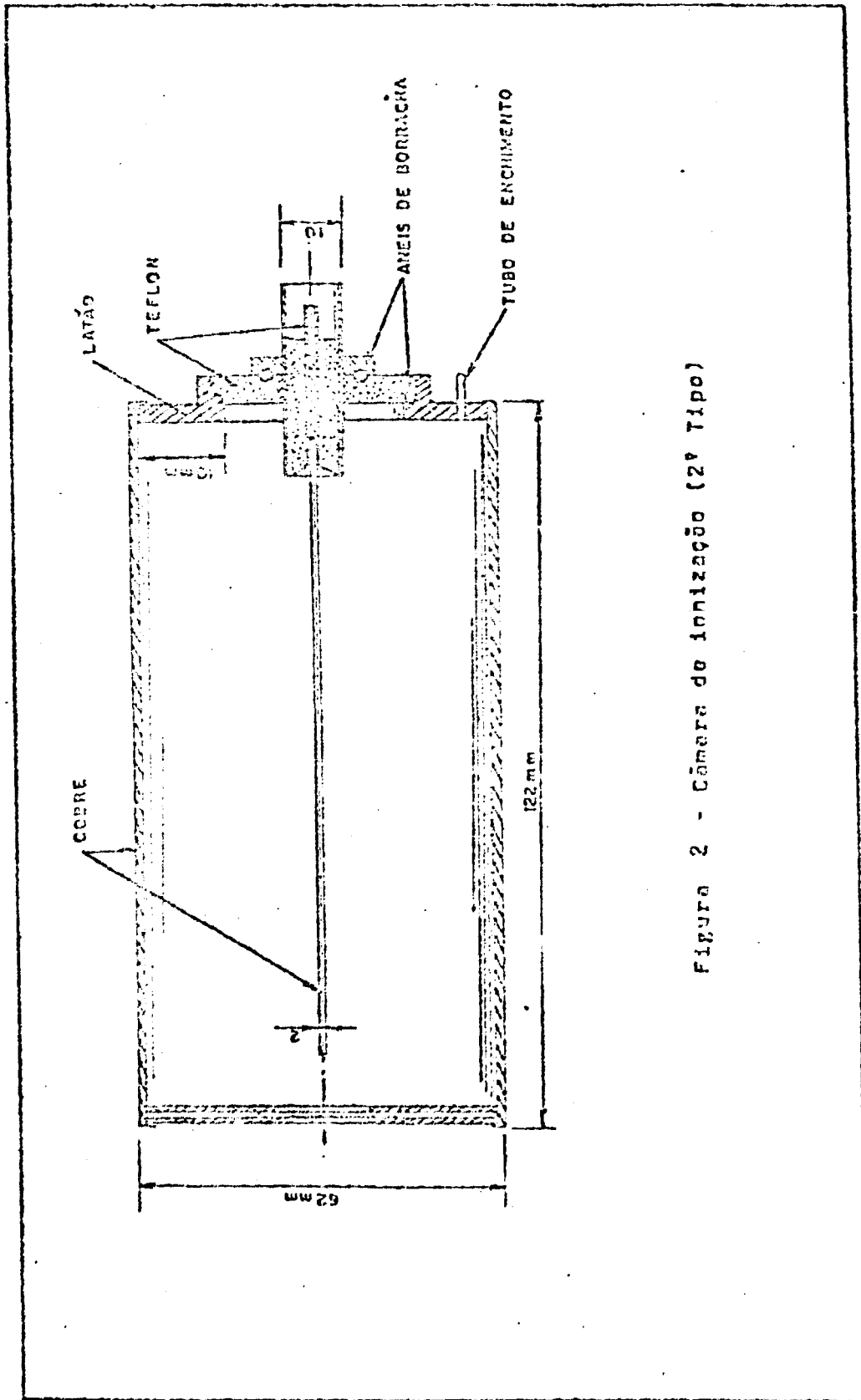


Figura 2 - Câmara de ionização (2º Tipo)

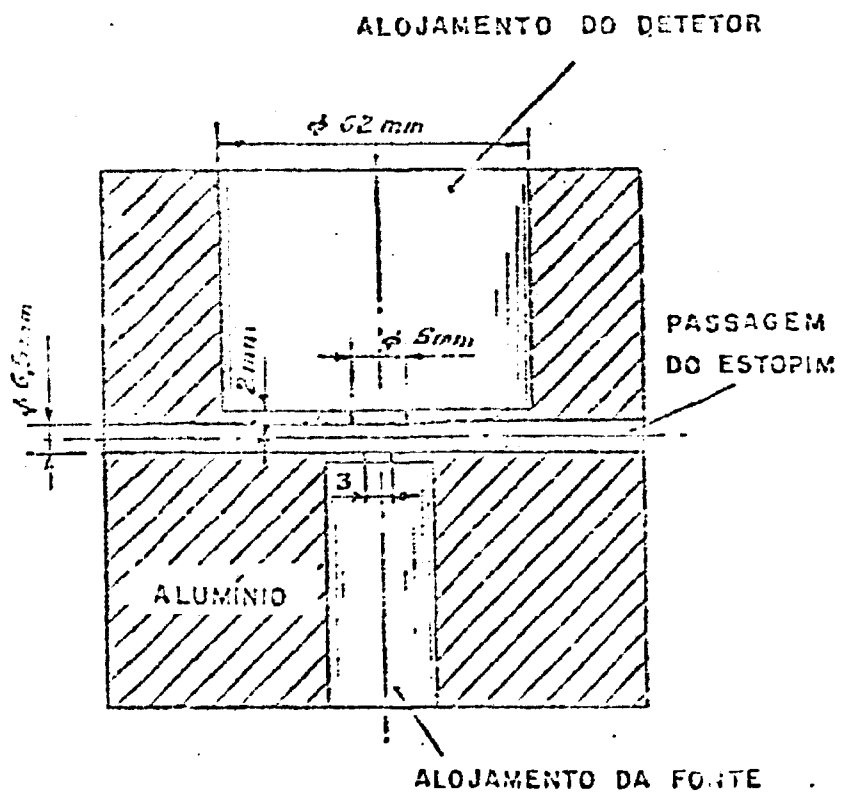


Figura 3 - Colimador de alumínio

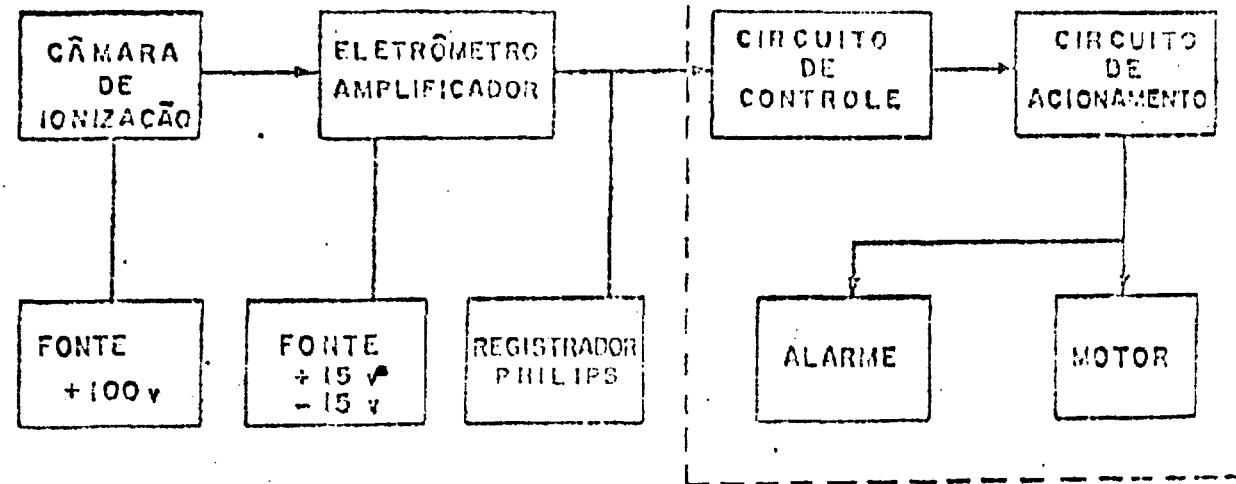
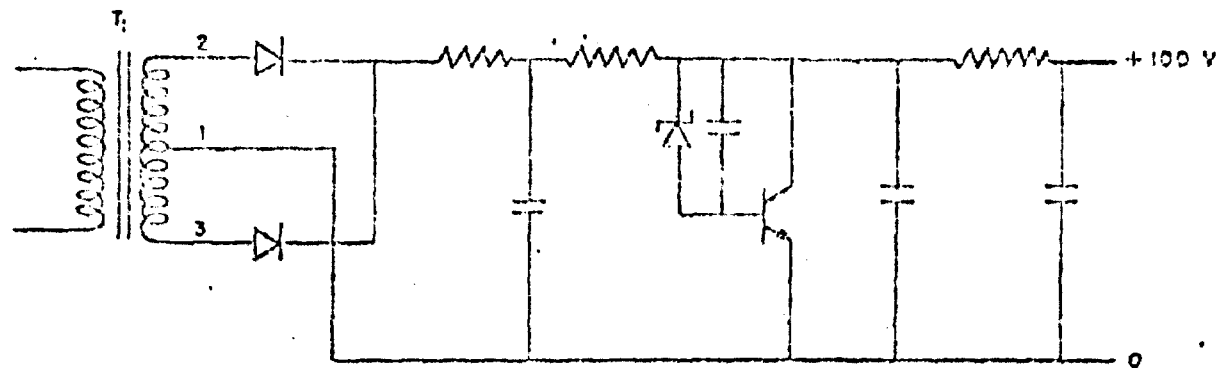


Figura 4 - Diagrama de blocos do sistema eletrônico de medida



Figuro 5 - Esquema do circuito de fonte de +100 Volts

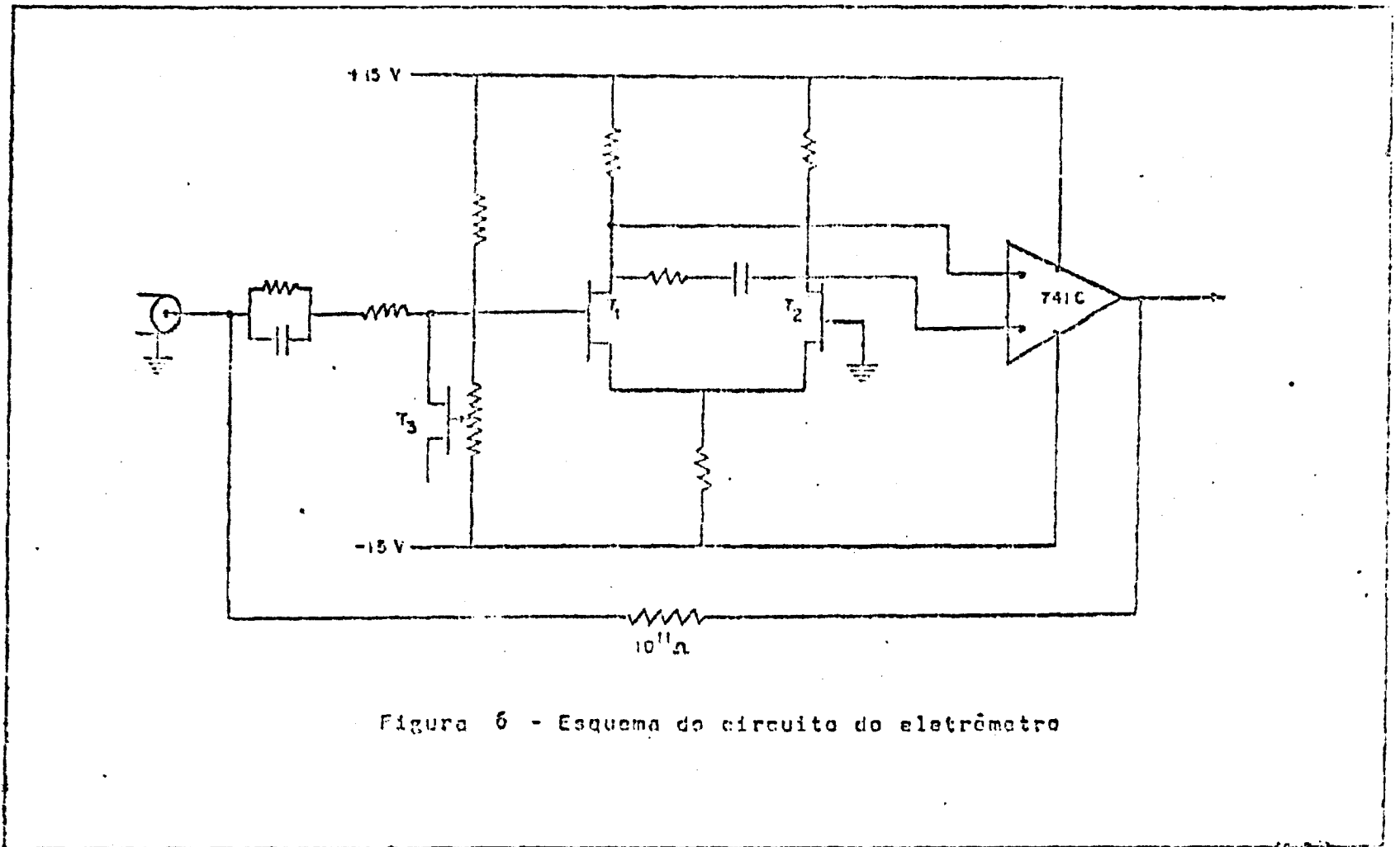


Figura 6 - Esquema do circuito do eletrômetro

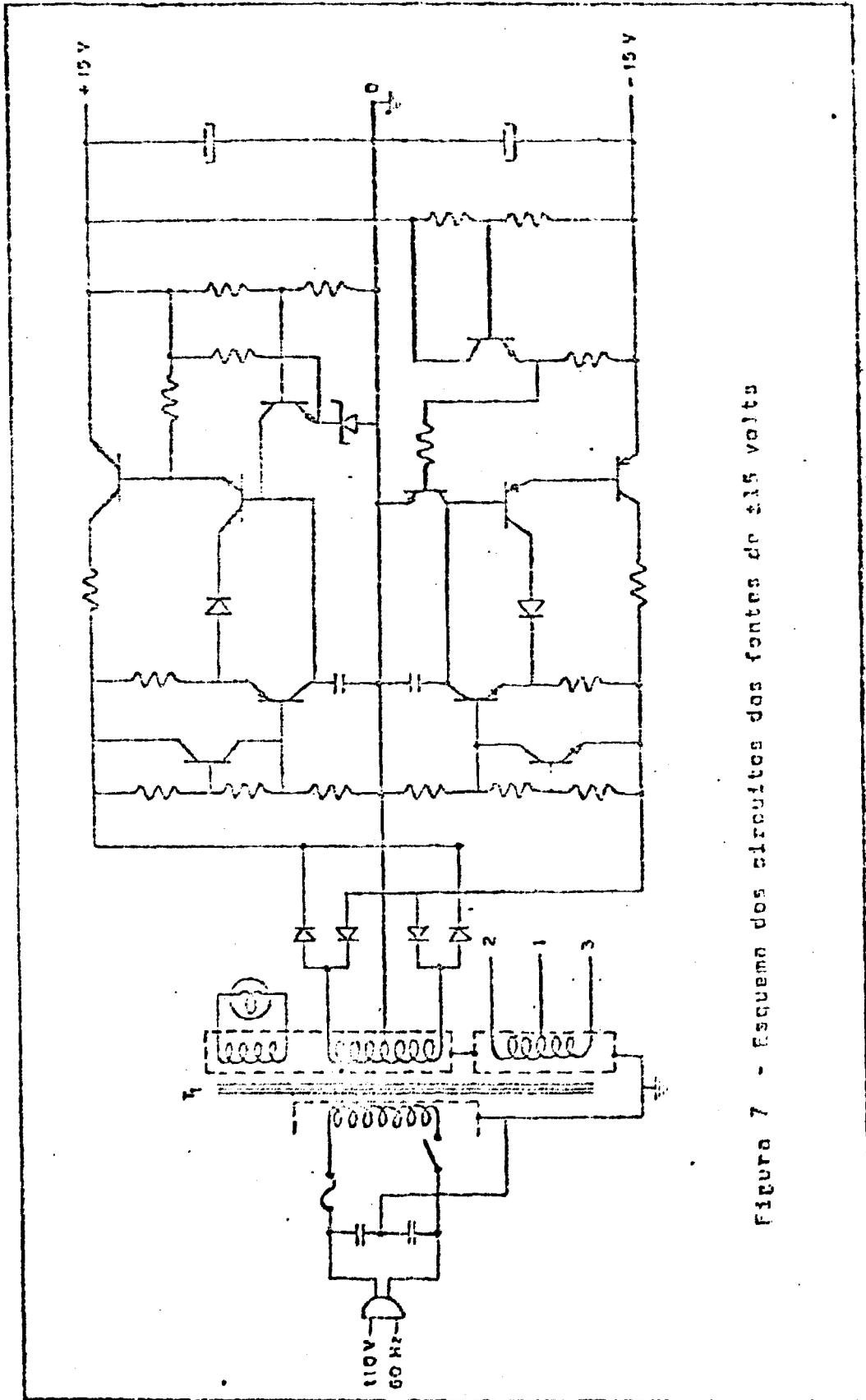


Figura 7 - Esquema dos circuitos das fontes de 15 volts

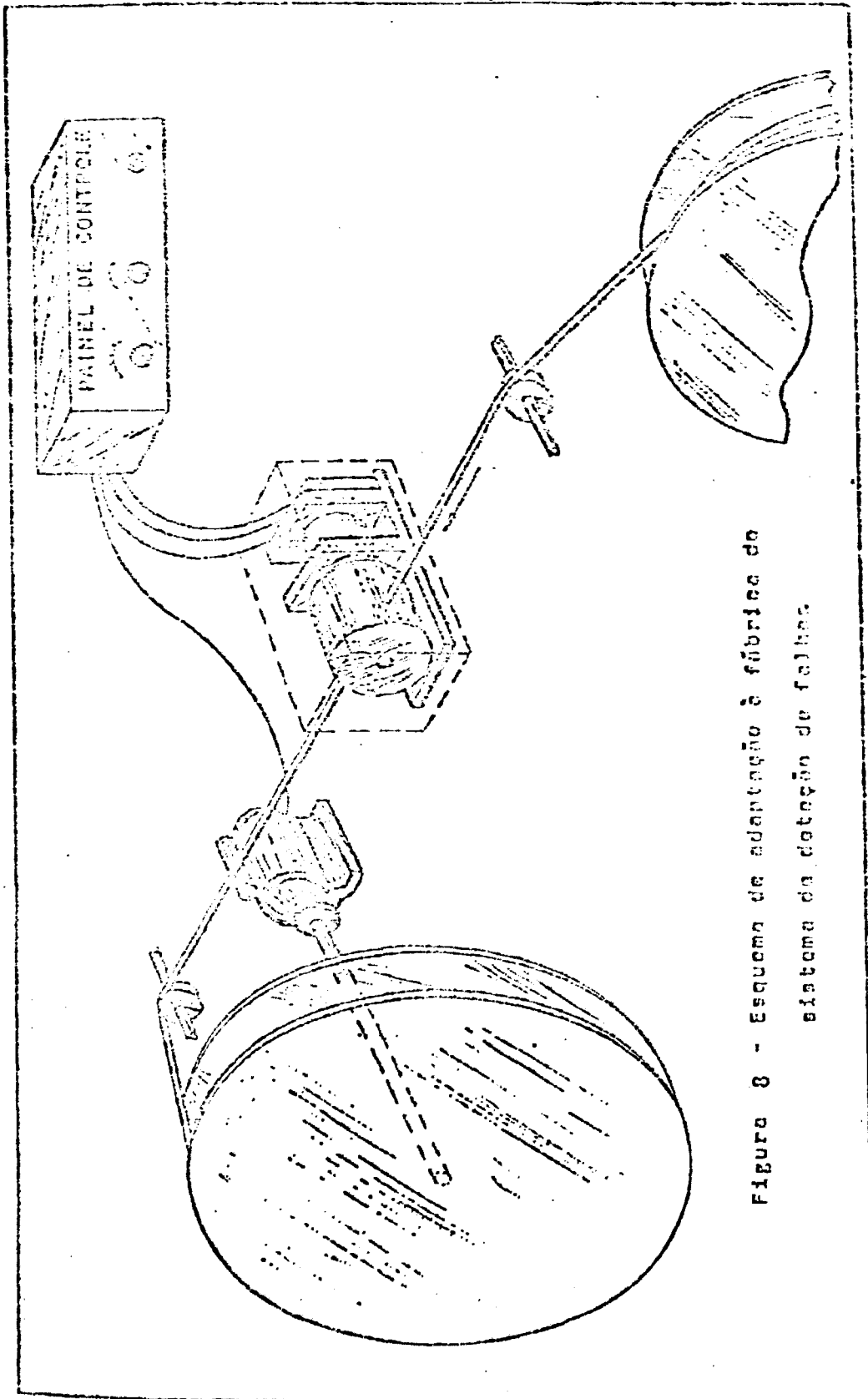


Figura 8 - Esquema de adaptação à fábrica do sistema de detecção de folhas



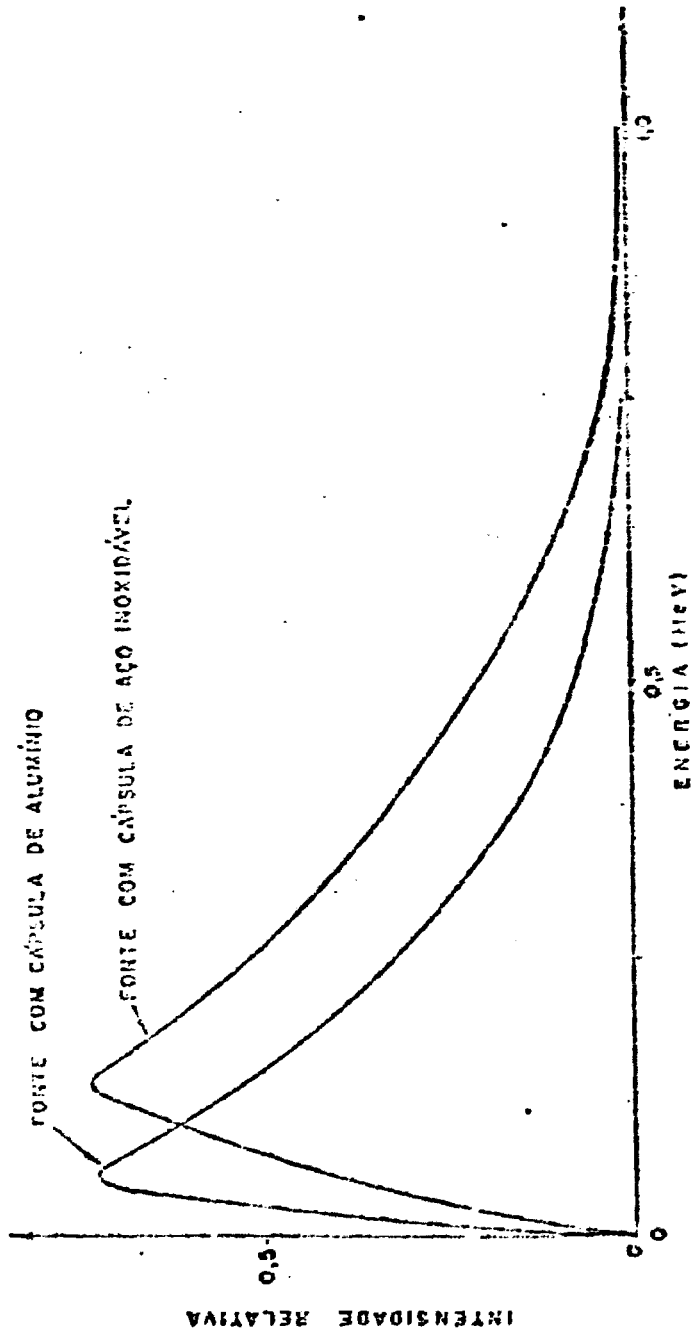


Figura 9 - Distribuição de energia da radiação de frenagem dos fótons em cápsula de aço inoxidável e de alumínio

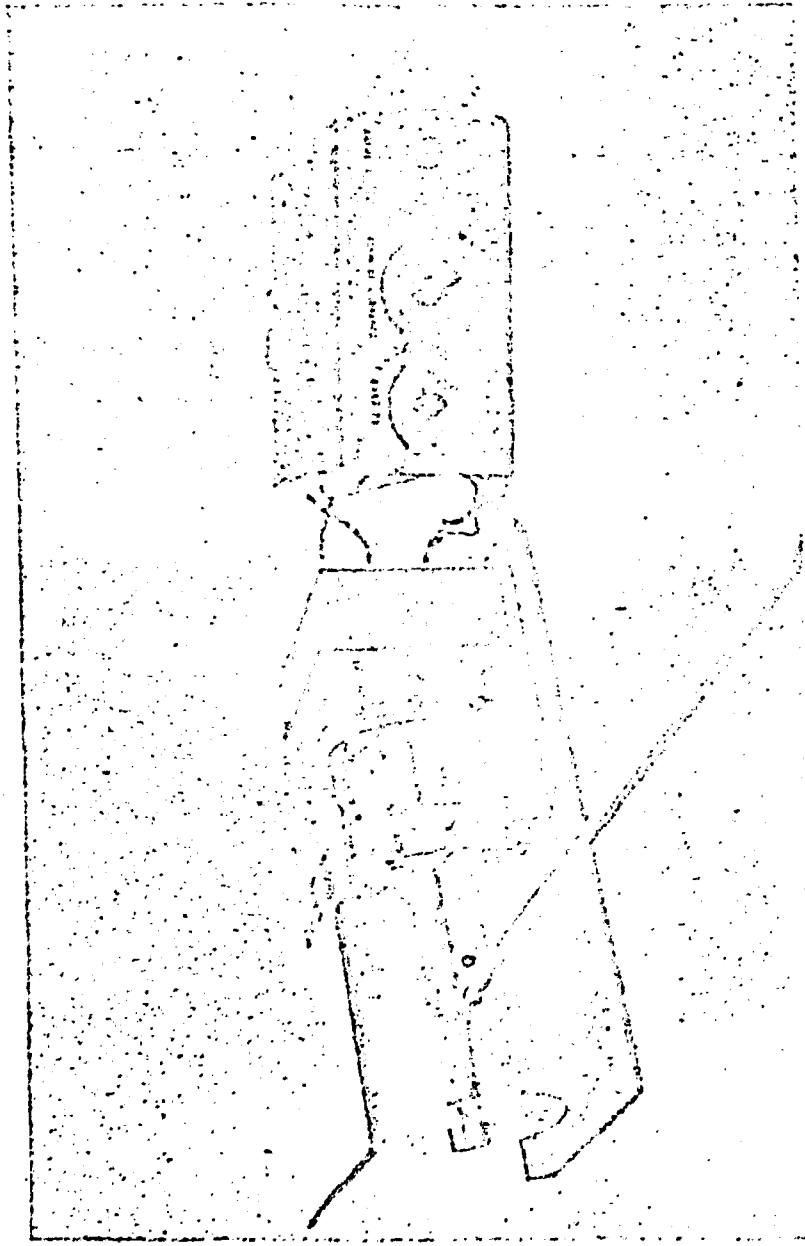


Figura 10 — Montagem do conjunto fonte radiativa, colimador, câmara de ionização e dosímetro