

# MEDIDAS DE FLUXO USANDO FOLHAS DE ATIVAÇÃO E CÂMARA DE FISSÃO MINIATURA

por

AUCYONE A. da SILVA e ULYSSES d'UTRA BITELLI

RESUMO -- O mapeamento da distribuição de fluxo de nêutrons de um reator de pesquisa é muito importante pois além de definir a distribuição de potência gerada, permite também a realização de experimentos em melhores condições e fornecer subsídios para a validação de métodos de cálculos teóricos. Neste sentido, são propostos dois experimentos nos quais o mapeamento pode ser realizado empregando-se a técnica de ativação do ouro e a que utiliza a câmara de fissão miniatura. Paralelamente aos experimentos, será enfatizado o uso do computador no laboratório de medidas nucleares.

## INTRODUÇÃO

O conhecimento da distribuição espacial e energética de nêutrons é fundamental em física de reatores. Tal conhecimento possibilita averiguar a metodologia de cálculo utilizada, além de fornecer informações úteis para produção de radioisótopos, estudos de danos de irradiação, acompanhamento da queima de combustível, estratégia de movimentação das barras de controle e aspectos ligados a segurança do reator (1). No experimento de mapeamento do fluxo de nêutrons térmicos a ser realizado no núcleo do reator IEA-R1 serão utilizados dois tipos de detetores: folhas de ativação (detetores de ativação) e câmara de fissão miniatura (CFM). Será mapeado o canal de refrigeração número 13 referente ao elemento combustível que ocupa a posição 35 da placa matriz (vide figura 1 e 2). As folhas de ativação são detetores de indicação indireta, pois só fornecem o resultado do fluxo neutrônico após serem irradiadas e contadas em laboratório. Pelas suas diminutas dimensões aliada a ausência de mecanismos de varredura comuns aos detetores de indicação direta, é o detetor ideal para se realizar medidas absolutas do fluxo de nêutrons. Por isso frequentemente é utilizada na calibração dos demais tipos de detetores. A câmara de fissão miniatura é um detetor de indicação direta, ou seja fornece a informação da variação espacial e temporal do fluxo neutrônico durante a sua permanência no mesmo. Este detetor nada mais é que uma câmara de ionização miniatura cilíndrica preenchida com argônio a alta pressão com depósitos de urânio altamente enriquecidos nas paredes da câmara. A CFM será utilizada na medida do fluxo relativo de nêutrons térmicos.

Para a aquisição e análise dos dados experimentais será utilizado alguns programas computacionais existentes no laboratório de medidas, juntamente com um microcomputador IBM-PC.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Mapeamento do fluxo de neutrons por ativação

A atividade induzida num detetor de ativação submetido a um campo neutrônico é diretamente proporcional ao fluxo de neutrons no local da irradiação. Desta forma, conhecida todas as características físicas e nucleares do detetor (massa, pureza, forma, espessura, seção de choque de ativação etc) podemos determinar o valor absoluto do fluxo de neutrons. No caso específico do nosso experimento utilizaremos folhas de ouro nuas (sem cobertura de cádmio) de espessura 0,013mm e diâmetro 8mm a serem irradiadas numa única operação, a fim de obtermos a distribuição espacial do fluxo de neutrons térmicos no canal de refrigeração número 13 do elemento combustível (vide figura 1). O fato de irradiarmos apenas as folhas nuas se deve a que já conhecemos previamente o valor da razão de cádmio em cada um dos pontos de irradiação das folhas de ouro a partir de dados colhidos em experimentos passados, o que dispensa a irradiação de folhas de ouro cobertas de cádmio. O produto da reação nuclear a ser contado em laboratório é o Au-198 obtido da reação de captura radioativa:  $Au-197 + n \rightarrow Au-198 + \gamma$ . A técnica e teoria de ativação de detetores de ativação e seu uso na medida do fluxo neutrônico podem ser vistos nas referências 2 e 3. As expressões utilizadas na determinação do fluxo de neutrons foram obtidas da referência 1, sendo basicamente as seguintes (1):

$$\phi = \frac{A_{nua} (1 - F_{cd}/R_{cd})}{No. \sigma_{act.} Kt}$$

$$A_{nua} = \frac{cr. \text{Lamb.} (C - Bg). \exp(\text{Lamb.} T_e)}{E.I. (1 - \exp(-\text{Lamb.} T_o)) (1 - \exp(-\text{Lamb.} T_c))}$$

$$cr = \frac{1/\text{Lamb.} \exp(T_r/T) (1 - \exp(-\text{Lamb.} t_o))}{1/\text{Lamb.} \exp(T_r/T) (1 - \exp(-\text{Lamb.} T_o)) + w}$$

sendo,

$$w = (T/1 + \text{Lamb.} T) \exp(-\text{Lamb.} T_o) \cdot (\exp(T_r/T) - \exp(-\text{Lamb.} T_r))$$

$$R_{cd} = A_{nua} / A_{cd}$$

$$No = M.f.Na/Pa$$

onde:

$\phi$  - fluxo de neutrons térmicos (neutrons/cm<sup>2</sup>.s);

$A_{nua}$  - atividade de saturação da folha nua (Bq);

$A_{cd}$  - atividade de saturação da folha coberta com Cd;

$R_{cd}$  - razão de cádmio;

$F_{cd}$  - fator de cádmio;

- No - número de átomos alvo na folha;
- $\bar{\sigma}_{act}$  - seção de choque média de ativação no espectro térmico;
- Kt - fator de perturbação do fluxo térmico;
- cr - correção para a rampa de subida de potência na irradiação das folhas;
- To - tempo de irradiação das folhas (s);
- Lamb - constante de decaimento do radionuclídeo contado(s-1);
- Tc - tempo de contagem da folha descontado o tempo morto(s);
- Te - tempo de espera para contagem da folha (s);
- Tr - tempo de subida da rampa de potência (s);
- T - período de subida da rampa de potência (s);
- E - eficiência global de contagem;
- M - massa das folhas nuas de ouro (g);
- Mcd - massa das folhas cobertas com cádmio (g);
- Na - número de avogrado (6.0225E+23 mol-1);
- I - abundância gama do fotopico contado (gama/100 desintegrações);
- f - fração isotópica do material alvo;
- Pa - peso atomico do material alvo.

Um programa de ativação a ser descrito no ítem 2.4 calculará o fluxo de neutrons térmicos a partir dos dados das contagens das folhas de ouro, utilizando-se das expressões aqui citadas. As vantagens na utilização dos detetores de ativação são: o seu baixo custo, insensibilidade à radiação gama, independência de conexões elétricas, pequenas dimensões e inexistência de mecanismos de varredura. Assim, a perturbação de fluxo causada por esses pequenos detetores é muito pequena, razão pela qual são utilizados em medidas absolutas de fluxo e calibração de detetores de indicação direta.

Mapeamento de fluxo no reator IEA-R1 com câmara de fissão miniatura (CFM)-- Para se realizar o mapeamento de fluxo no elemento combustível do reator IEA-R1, pode-se empregar a técnica que utiliza uma minicâmara de fissão que, devido as suas pequenas dimensões pode ser inserida entre as placas dos elementos combustíveis.

A câmara de fissão utilizada (modelo WL-23292) tem ~2,29mm de diâmetro (figura 3) e será utilizada para varrer o elemento combustível do canal de refrigeração 13 na posição 35 da placa matriz em 26 posições diferentes.

Esta técnica, permite se obter o sinal do detector R(ro,t) que é proporcional ao fluxo de neutrons de acordo com a expressão abaixo (4):

$$R(\vec{r}_0, t) = \int_0^{\infty} \Sigma_d(E) \phi(\vec{r}_0, E, t) dE$$

onde :

$\vec{r}_0$  - posição do detector no núcleo  
 $\Sigma_d(E)$  - seção de choque efetiva do detector que depende do material sensível, da estrutura e da eficiência intrínseca do detector.

Para se obter o fluxo térmico de neutrons a partir da taxa de reação nêutron  $^{235}\text{U}$ , que é o sinal do detector  $R(\vec{r}_0, t)$ , é necessário levar em conta a perturbação que o detector causa localmente no fluxo, descrita em termos de depressão do fluxo ao redor do detector, autoblindagem e possível contribuição de neutrons rápidos e epitérmicos às medidas. Todas essas contribuições devem estar representadas devidamente na seção de choque efetiva,  $\Sigma_d(E)$ , do detector.

Nas medidas a serem realizadas, será obtida a distribuição relativa do fluxo de neutrons térmicos no mesmo elemento combustível onde se foi realizado o mapeamento com folhas de ativação. Desta forma, podemos assumir que o detector perturba igualmente o fluxo neutrônico nas várias regiões do núcleo, tornando desnecessária considerar depressão local do fluxo, autoblindagem etc.

### Arranjos Experimentais

Reator IEA-R1 -- O reator IEA-R1 é um reator do tipo piscina aberta, utilizado na produção de radioisótopos e em pesquisa. Basicamente o núcleo do IEA-R1 tem a forma de um paralelepípedo composto de elementos combustíveis, elementos de controle e elementos refletores, encaixados verticalmente em furos da placa matriz. Esta placa, é responsável pela sustentação dos elementos e esta suspensa em balanço por uma estrutura de alumínio que a mantém ligada a ponte móvel do topo da piscina.

O elemento combustível do reator IEA-R1 é do tipo MRT ("Material Testing Reactor") contendo atualmente 24 elementos combustíveis (19 com 93%  $^{235}\text{U}$ , 5 com 20%  $^{235}\text{U}$ ). Os elementos combustíveis são formados por 18 placas combustíveis de espessura média de 1.52mm dispostas num estojo de alumínio com seção horizontal de 7,61x8,00cm.

A figura 5 mostra o reator IEA-R1 e os diversos arranjos experimentais disponíveis e a figura 2 a configuração atual do núcleo.

Espectrômetro HPG<sub>e</sub> -- Após a irradiação das folhas, estas serão contadas na bancada do detector semiconductor de alta pureza de germanio (HPGe - "high purity germanium detector"). O sistema de espectrometria utilizado na contagem das folhas de ouro pode ser visualizado na figura 4. O detector HPGe apresenta uma alta resolução em comparação a detectores do tipo cintilação como o iodeto de sódio (NaI). No entanto, o detector NaI apresenta uma

## Realização dos Experimentos

Irradiação das folhas de ouro no IEA-R1 -- O seguinte procedimento deve ser adotado para se irradiar as folhas de ouro:

- colocar as folhas de ouro no suporte de acrílico de conforme mostra a figura;
- inserir o dispositivo de irradiação de folhas (figura 6) na posição de irradiação (figura 2) estabelecida;
- acompanhar a subida de potência do reator tendo em conta o tempo de subida de rampa de potência e o período de subida de rampa de potência de 30s;
- atingida a potência de 200 Watts irradiar as folhas por 30 minutos;
- após a irradiação desligar o reator ("Scram") e retirar as folhas;
- anotar todos os dados de irradiação na tabela 2.

Mapeamento de fluxo com a CFM -- A câmara de fissão miniatura contendo  $^{235}\text{U}$  em alta concentração detecta principalmente neutrons térmicos porém, detecta também um pouco de neutrons rápidos e epitérmicos. Uma vez que a contribuição destes últimos depende da região do núcleo, verificou-se teoricamente que esta contribuição é mais acentuada no centro do núcleo. Para o nosso caso, consideraremos que a maior contribuição é devido aos neutrons térmicos uma vez que o mapeamento é realizado afastado do centro do núcleo.

A figura 3 mostra o esquema da câmara de fissão, a figura 7 apresenta o sistema de inserção no elemento combustível e a figura 8 o sistema eletrônico a ser utilizado com a CFM.

Antes de iniciar as medidas é necessário ajustar o sistema eletrônico de forma que as contribuições devido a ruído eletrônico e radiação gama sejam suprimidos.

A realização do experimento deve ser seguido como mostraremos abaixo:

- colocar o detector na posição 35 da placa matriz no elemento combustível no canal de refrigeração 13 (figuras 1 e 2) na primeira posição de sustentação do dispositivo;
- o reator deve ser colocado crítico na potência de 200 watts;
- aguardar que os possíveis transientes do fluxo decaiam;
- após os ajustes eletrônicos realizar as medidas de contagens com uma boa estatística (~1%) para todas as 26 posições do dispositivo; anotar os ajustes na tabela 5;
- os resultados devem ser anotados na tabela 3;

eficiência global de contagem maior que o detetor HPGe. Assim, quando se vai ativar uma grande quantidade de folhas, cujo radio-nuclídeo formado apresente pequena meia-vida e fotopicos bem discriminados e recomendável se utilizar o detetor NaI. No nosso caso, como serão irradiadas e contadas apenas 9 folhas de ouro, podemos utilizar o detetor HPGe sem receio de decaimento das mesmas antes das contagens. Antes de se liberar a bancada HPGe para as contagens das folhas, realizou-se nelas uma série de testes para verificar o seu bom funcionamento e correta utilização. Dentre eles, citamos o teste do "qui-quadrado", medida da relação sinal-ruído, resolução (comparando com o valor do fabricante), linearidade do multicanal, etc.

A tabela 1 apresenta alguns parâmetros característicos do espectrômetro HPGe para a energia de 411 Kev (fotopico do  $^{198}\text{Au}$ )

#### Dispositivos de irradiação

- A) Folhas de ativação -- O dispositivo de irradiação para as folhas de ouro durante a irradiação das mesmas no núcleo do reator IEA-R1. Basicamente é uma placa de lucite de espessura de 2mm capaz de penetrar no canal de refrigeração 13 do elemento combustível (largura 2,89mm) e pode ser vista na figura 9. O material do suporte é de acrílico ("plexiglas"), tendo em vista que em termos neu-trônicos este apresenta um comportamento similar a água.
- B) Câmara de fissão miniatura (CFM)-- A CFM é inserida no núcleo do reator IEA-R1 através de um sistema de guias que movimenta o detetor ao longo de 26 posições axiais à placa combustível. Tal sistema permite a inserção do detetor nos canais de refrigeração 5 e 13 do elemento combustível. No nosso caso será mapeado o canal de refrigeração 13 do elemento combustível que ocupa a posição 35 da placa matriz na atual configuração do núcleo do reator. A distância entre cada uma das 26 posições é de 2,5cm. Uma visualização do sistema de guias do detetor móvel para medidas de fluxo neutrônico pode ser visualizado na figura 7.

#### Programas computacionais para análise dos experimentos

As medidas experimentais serão analisadas utilizando alguns programas computacionais existentes no IBM-PC, em uso na aquisição de dados. A seguir, descreveremos, de forma geral, estes programas.

- A) Cálculo do fluxo térmico -- O programa Fluxo, em Fortran (Anexo), calcula as atividades das folhas de ouro irradiadas e determina o fluxo térmico de acordo com as expressões descritas no item 2.1. Consideramos já conhecida a razão de cádmio.
- B) Gráficos -- O programa EDDE, em Pascal, permite que seja realizado, tanto no monitor quanto na impressora, os gráficos dos experimentos (fluxo vs posição no EC, contagem vs posição no EC etc.). Este programa permite se ajustar por polinômios as curvas traçadas. Antes de iniciar deve-se utilizar o programa Graphics para preparar a transferência dos gráficos do monitor para a impressora.

Contagem das folhas de ouro irradiadas -- Após a irradiação das folhas de ouro conforme o ítem 2.5.1, estas deverão ser contadas no Espectrômetro HPGe- Associado ao sistema eletrônico está um microcomputador IBM-PC no qual está acoplado o sistema ADCAM da Ortec que permite utilizar o microcomputador como sistema de aquisição de dados (Multicanal). O procedimento experimental adotado é apresentado a seguir:

- após a irradiação das folhas de ouro estas deverão ser retiradas do suporte de lucite e colocadas em envelopes devidamente identificados;
- as folhas, para serem contadas, devem ser colocadas num suporte circular de lucite;
- após os ajustes eletrônicos adequados para as medidas (calibração em energia, otimização de sinal/ruído, etc.), inserir o dispositivo com a folha no local estabelecido para a contagem;
- estabelecer a janela do Multicanal em torno do fotopico do  $^{198}\text{Au}$  (411 KeV), mantendo-se, durante as medidas uma contagem líquida da ordem de 10000 contagens;
- iniciar as contagens sistemáticas das folhas imprimindo os resultados obtidos e anotá-los na tabela 4;
- as condições da eletrônica devem ser anotadas na tabela 5.

#### ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os mapeamentos do fluxo térmico no elemento combustível do reator IEA-R1 escolhido, utilizando as folhas de ativação e a CFM, podem ser comparados, qualitativamente, com o mapeamento obtido através do código CITATION.

Os resultados experimentais (valores dos fluxos) obtidos por meio de técnicas empregadas são apresentados nas tabelas 3 e 6.

Estes resultados são analisados com o programa EDDE.

Na análise dos resultados deverão ser comentados os seguintes aspectos:

- erros experimentais nas medidas;
- comparação dos resultados experimentais com o valor calculado.

#### REFERÊNCIAS

1. BITELLI, U.D. Medida e cálculo da distribuição Espacial e Energética de Neutrons no Núcleo do Reator IEA-R1. Dissertação de Mestrado, IPEN- 1988.
2. BECKURTZ, K.H., and WIRTZ, K., Neutron Physics. New York, Springer, 1964.

3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - Neutron Fluence Measurements, Vienna, 1970 (Technical Reports Series, 107).
4. TANGARI, C.M., MOREIRA, J.M.L.; JEREZ, R., Mapeamento de fluxo térmico no reator IEA-R1, São Paulo, IPEN, Jan. 1986, (Ipen Pub-93).

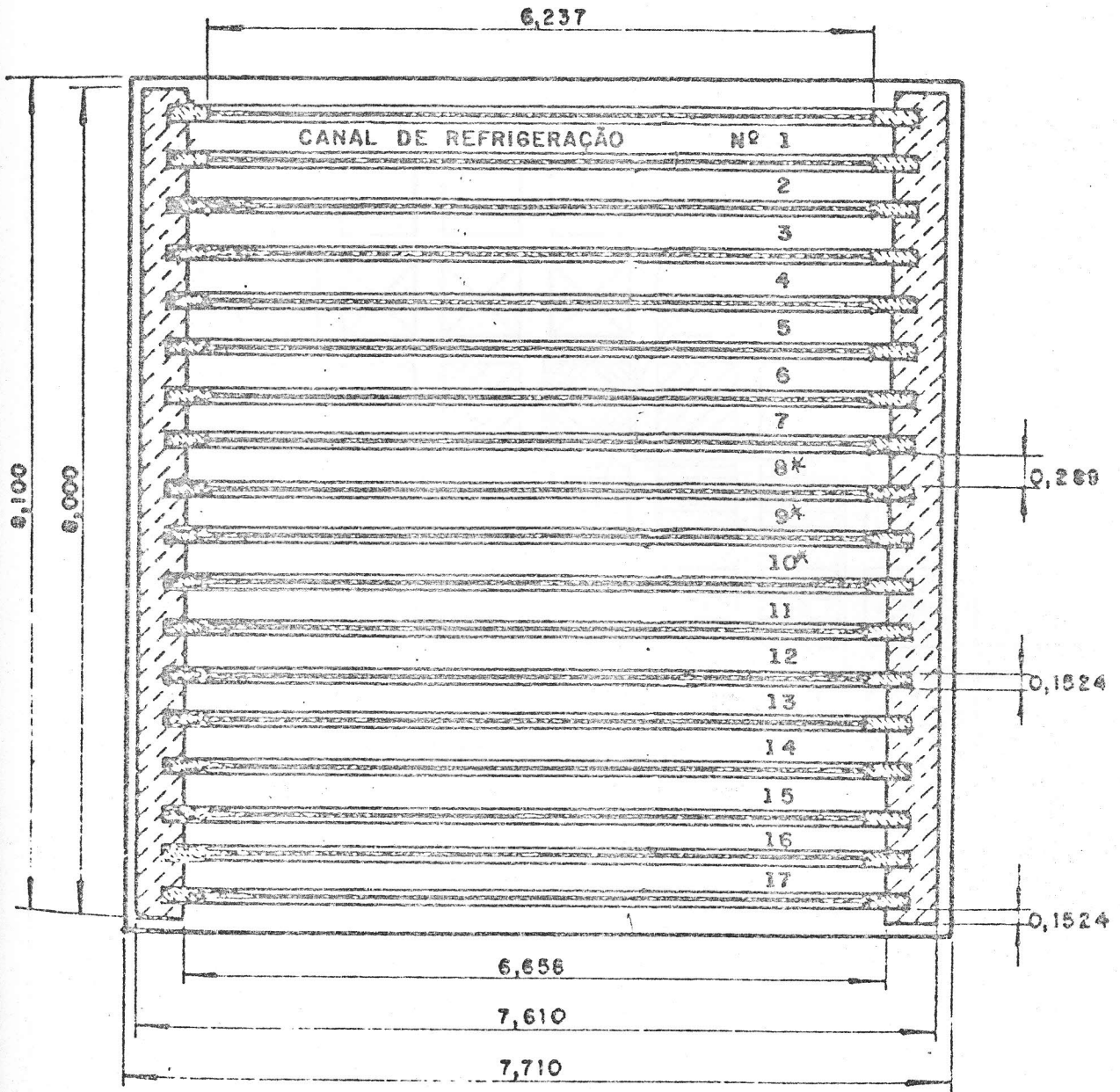


Figura 1 - Identificação dos Canais de refrigeração para mapeamento do fluxo de neutrons .

\* inacessível devido ao pino de sustentação.

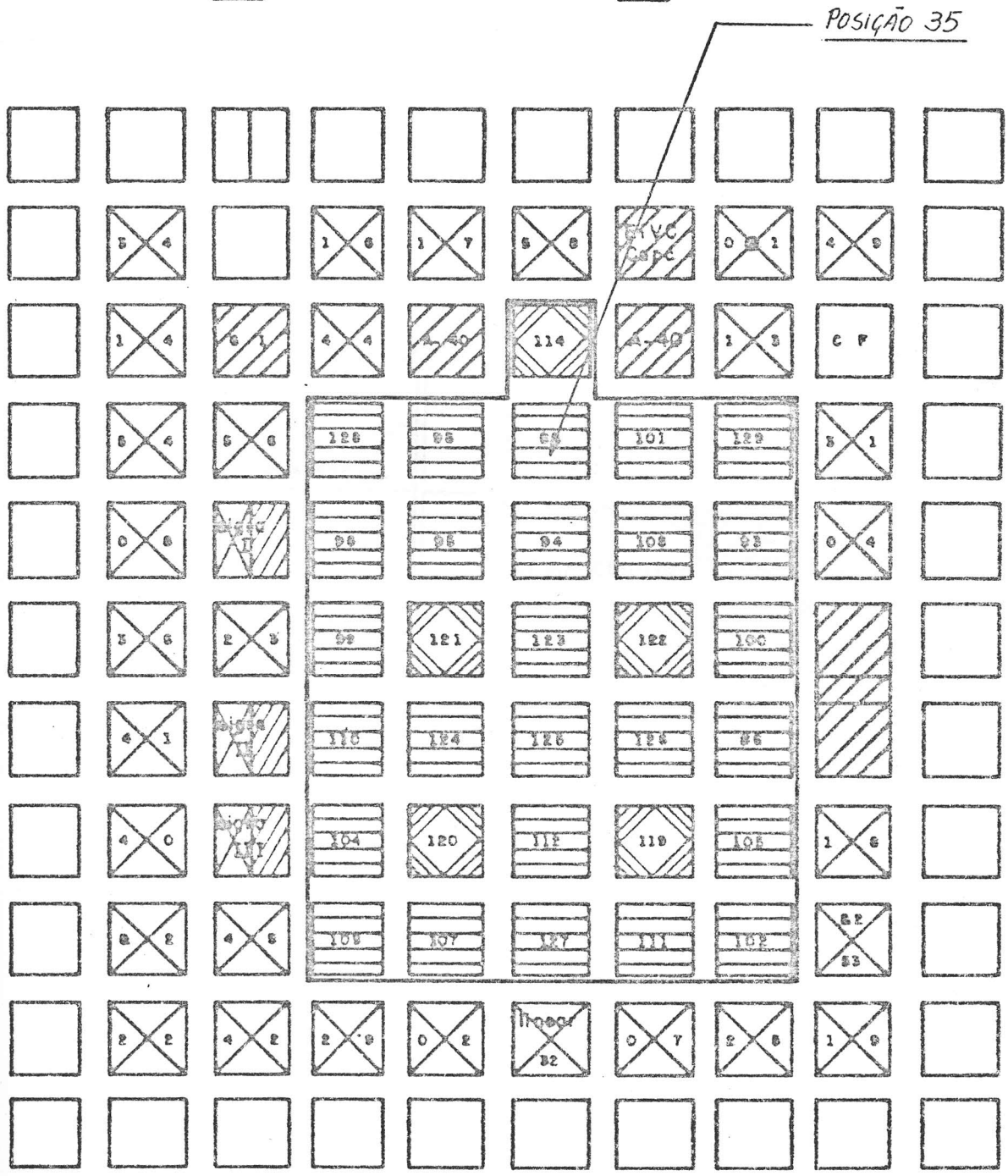
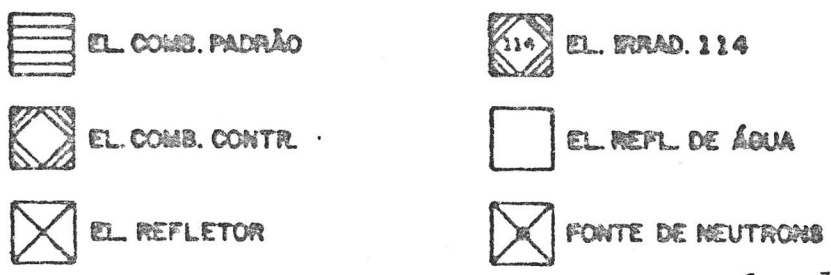


Figura 2 - Posição de irradiação das folhas de ouro e contagem com a CFM.

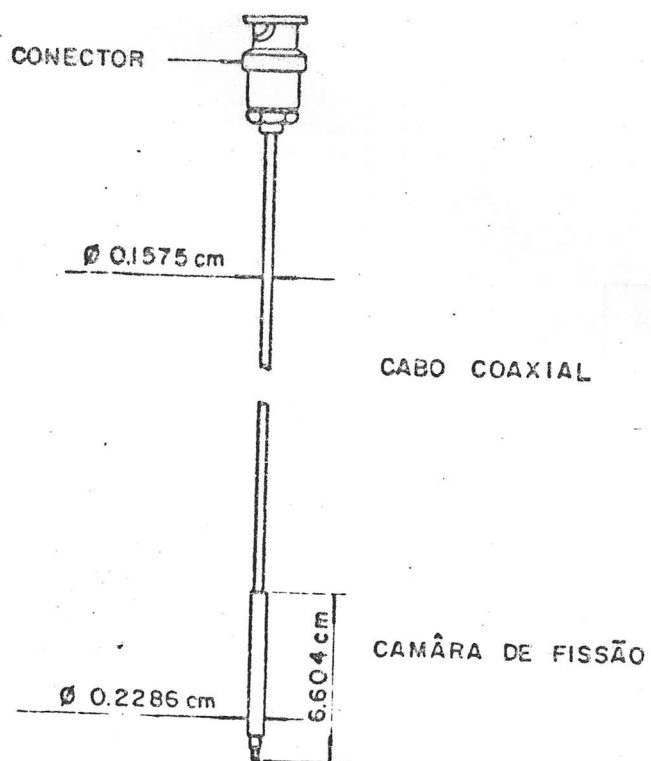


Figura 3 - Esquema da Câmara de Fissão Miniatura WL-23292

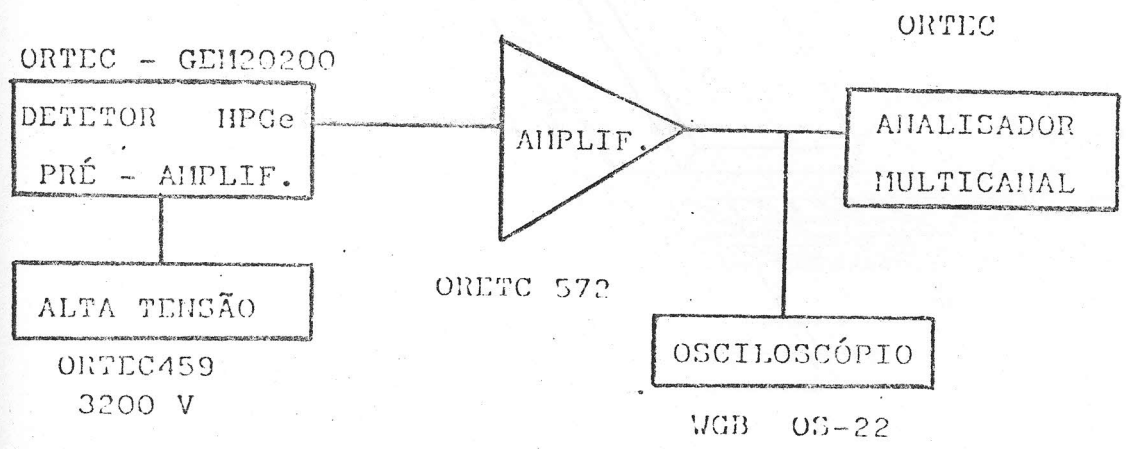
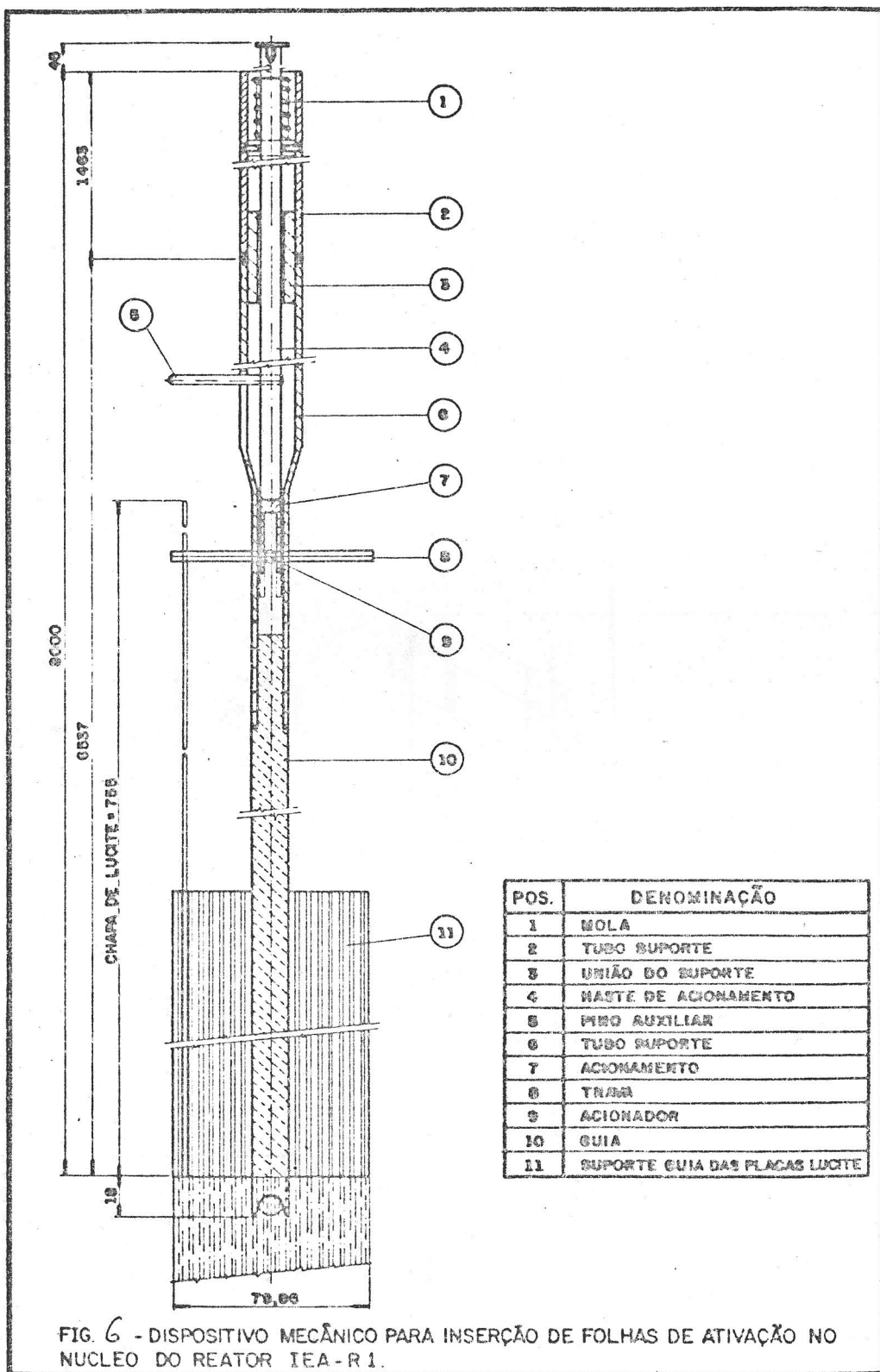


Figura 4 - Diagrama de blocos da bancada do detetor HPGe.





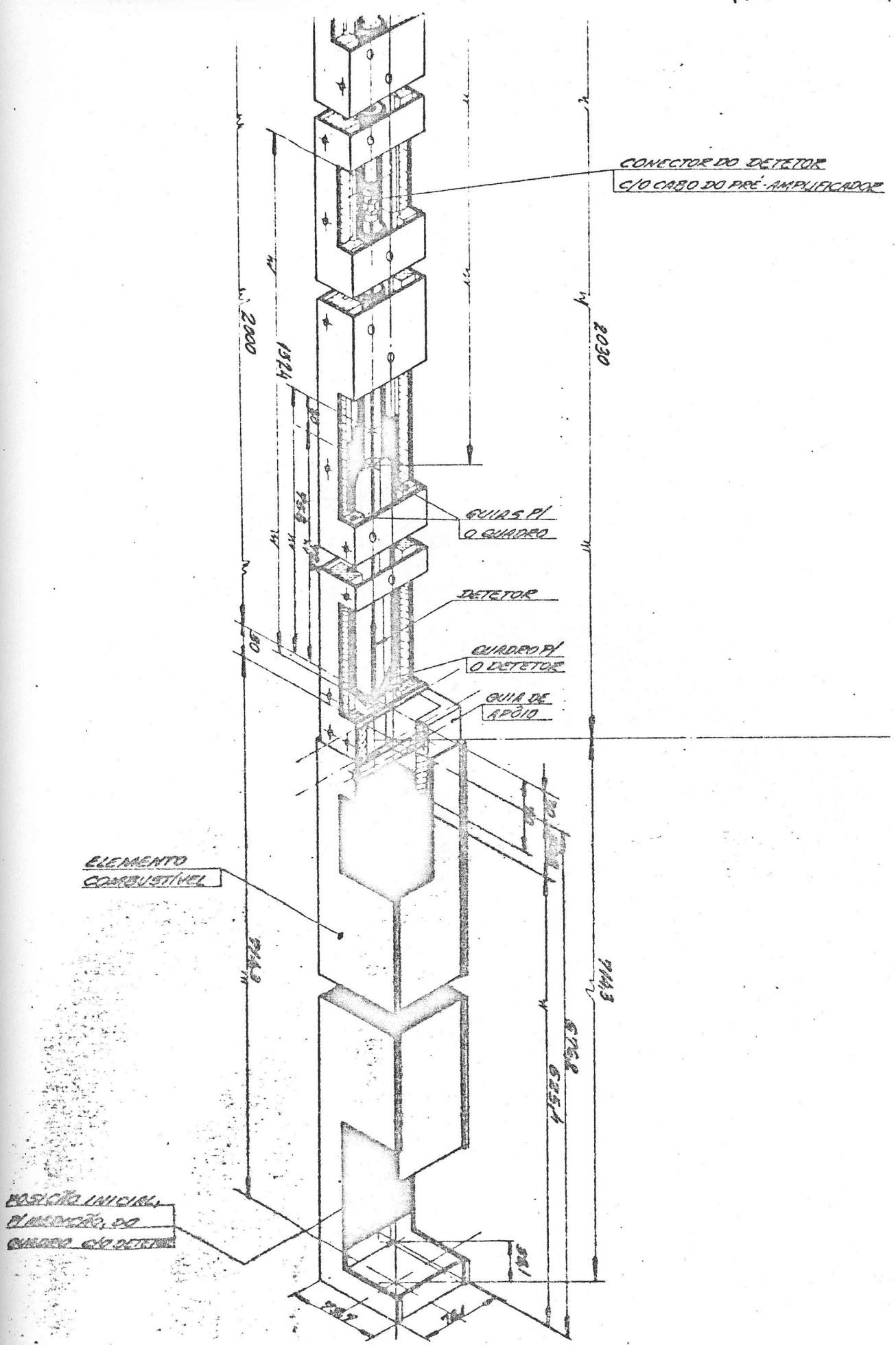


Figura 7 - Sistema guia para mapeamento do fluxo de neutrons da CFM.

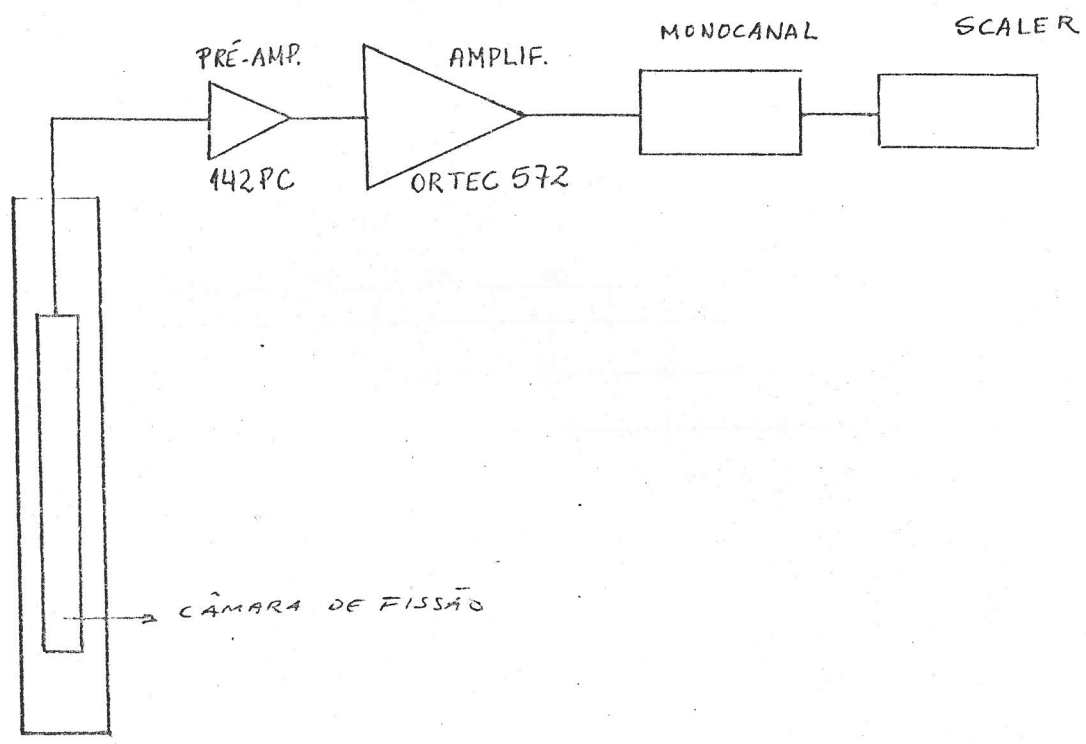


Figura 8 - Sistema eletrônico para a CFM.

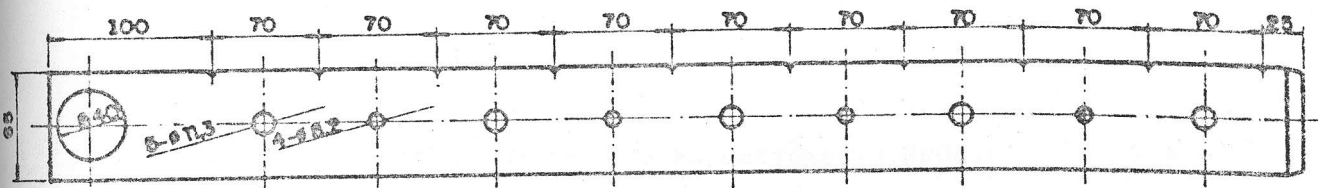


Figura 9 - Suporte de lucite para fixação das folhas de ativação.

Detector	
Resolução	
Eficiência (411 KeV)	

Tabela 1 : Dados sobre o espectrômetro HPGe.

Tempo de rampa de subida (s)				
Período (s)				
Data da Irradiação				
Horário da Irradiação				
Tempo de Irradiação				
Posição das barras de controle	BS1	BS2	BS3	BC
Elemento combustível mapeado				

Tabela 2 : Dados sobre a Irradiação das folhas de ouro.

Posição	1 <sup>a</sup> Medida	2 <sup>a</sup> Medida	3 <sup>a</sup> Medida	Média	Posição	1 <sup>a</sup> Medida	2 <sup>a</sup> Medida	3 <sup>a</sup> Medida	Média
1					14				
2					15				
3					16				
4					17				
5					18				
6					19				
7					20				
8					21				
9					22				
10					23				
11					24				
12					25				
13					26				

Tabela 3 - Medidas da CFM no canal de refrigeração nº 13.

Folha Nº	Massa (g)	Tempo de contagem	Contagem (C-BG)	Data	Horário
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

Tabela 4 : Dados sobre as contagens das folhas de ouro.

Detector	HPGe
HV	
Ganho Fino	
Ganho Grosso	
Constante de Integração ( $\mu\text{s}$ )	
Detector	CFM
HV	
Ganho Fino	
Ganho Grosso	
Constante de Integração ( $\mu\text{s}$ )	
Nível de discriminação	

Tabela 5 : Ajustes da Eletrônica

Mapeamento de Fluxo por Ativação	
Posição	Fluxo (n/cm <sup>2</sup> .s)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Tabela 6 : Resultados Experimentais