

**ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DA QUANTIDADE DE MASSA DE  
URÂNIO NATURAL POR MEIO DA MEDIDA DE NÊUTRONS ATRASADOS  
COM O USO DA TÉCNICA DE FONTE PULSADA DE NÊUTRONS RÁPIDOS**

**Paulo Rogério Pinto Coelho e Lao Holland**

**PUBLICAÇÃO IPEN 42  
IPEN - Pub - 42**

**MAIO/1982**

**CONSELHO DELIBERATIVO**

**MEMBROS**

Prof. Dr. Luiz Cintra do Prado – Presidente  
Dr. Edgardo Azevedo Soares Júnior – Vice-Presidente

**CONSELHEIROS**

Dr. Helcio Modesto da Costa  
Dr. Ivano Humbert Marchesi  
Prof. Dr. Waldyr Muniz Oliva  
Prof. Dr. José Augusto Martins

**REPRESENTANTES**

Dr. Jacó Charcot Pereira Rios  
Dr. Samuel Angarita Ferreira da Silva

**SUPERINTENDENTE**

Hernani Augusto Lopes de Amorim

**ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DA QUANTIDADE DE MASSA DE  
URÂNIO NATURAL POR MEIO DA MEDIDA DE NÊUTRONS ATRASADOS  
COM O USO DA TÉCNICA DE FONTE PULSADA DE NÊUTRONS RÁPIDOS**

**Paulo Rogério Pinto Coelho e Léo Holland**

**CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
SÃO PAULO - BRASIL**

Série PUBLICAÇÕES IPEN

INIS Categories and Descriptors

B20

B11

NONDESTRUCTIVE ANALYSIS: Natural uranium

NATURAL URANIUM: Nondestructive analysis

NATURAL URANIUM: Delayed neutrons

PULSED NEUTRONS TECHNIQUES: Fast neutrons

NONDESTRUCTIVE ANALYSIS: Fuel elements

CEN

---

Recebido em setembro de 1981.

Aprovado para publicação em fevereiro de 1982.

Nota: A redação, ortografia, concertos e revisão final são responsabilidade dos Autores.

# ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DA QUANTIDADE DE MASSA DE URÂNIO NATURAL POR MEIO DA MEDIDA DE NÊUTRONS ATRASADOS COM O USO DA TÉCNICA DE FONTE PULSADA DE NÊUTRONS RÁPIDOS

Paulo Rogério Pinto Coelho e Lao Holland

## RESUMO

~~Neste trabalho são apresentados~~ resultados de análises não destrutivas de urânio natural por meio da técnica de fonte pulsada. O método empregado é de medida relativa, sendo que a massa de urânio é determinada por meio da medida da produção de nêutrons atrasados, emitidos após fissões produzidas pela irradiação da amostra com pulsos de nêutrons de 14 MeV. As medidas são normalizadas em função da contagem integral da intensidade de nêutrons de 14 MeV obtida através de um cintilador.

Os nêutrons atrasados são medidos utilizando-se um detector tipo fatia (tipo "Long Counter") especialmente construído, operado em antisincronismo com os pulsos de nêutrons de 14 MeV.

Os nêutrons de 14 MeV são produzidos utilizando-se a reação  $T(d,n)^4\text{He}$  usando um acelerador Van de Graaff PN-400 operado de modo pulsado, em 200 kV.

Três tipos de amostras foram analisadas, a saber: discos de urânio metálico, pastilhas de óxido de urânio sinterizadas e placas de liga urânio-alumínio, envoltas por uma camada de alumínio. Essas placas simulam aquelas de elementos combustíveis de reator tipo MTR (Material Testing Reactor).

Os resultados das medidas são reprodutíveis dentro do intervalo de 1,6 a 3,9%. O erro numa medida específica depende da forma, tamanho e massa da amostra.

## I – INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho foi implantar no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares um sistema de análise não destrutiva de urânio. O método de interrogação ativa (irradiação) por nêutrons foi utilizado para a determinação quantitativa de urânio em matrizes que o contenham associado a materiais não fissionáveis, em várias composições e formas físicas. Realizaram-se análises de discos de urânio metálico, pastilhas de óxido de urânio e placas de liga urânio-alumínio.

## II -- DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A determinação da quantidade de urânio contida nas amostras é feita pelo método de medida da produção de nêutrons atrasados, emitidos após fissões induzidas nas amostras por pulsos de nêutrons interrogadores (nêutrons da fonte pulsada) de energia aproximadamente igual a 14 MeV.

Os nêutrons interrogadores são gerados por um acelerador Van de Graaff<sup>(\*)</sup>, operado de modo pulsado em 200 kV, através da reação  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ .

É difícil a detecção de nêutrons atrasados na presença de nêutrons prontos e de nêutrons interrogadores. Para contornar esse obstáculo e possibilitar a utilização de equipamentos de contagem simples, é necessário usar uma fonte pulsada de nêutrons interrogadores e contar o número de nêutrons

(\*) Da High Voltage Engineering Corp., Modelo PN.400, com voltagem máxima de operação igual a 400 kV.

atrasados no intervalo de tempo entre esses pulsos. A medida é feita utilizando-se um detector de nêutrons tipo fatia ("long counter")<sup>(4)</sup>, associado a um sistema de análise de altura do pulso. Um detector de nêutrons rápidos, operando em sincronismo com os pulsos de nêutrons do acelerador, é utilizado como monitor, para normalizar as contagens de nêutrons atrasados quanto a variações do fluxo de nêutrons do acelerador, durante cada irradiação e entre irradiações de várias amostras.

A normalização é feita dividindo-se a contagem do detector fatia pela contagem obtida no monitor.

O método é de medida relativa, ou seja, a determinação da quantidade de urânio na amostra a ser analisada é obtida comparando-se as contagens normalizadas de nêutrons atrasados para a amostra desconhecida com as contagens normalizadas obtidas em medidas similares, para uma amostra padrão de massa e composição conhecida.

A produção de nêutrons atrasados é proporcional ao número de fissões ocorridas que, por sua vez, é proporcional à quantidade de isótopo fissionável presente, desde que a multiplicação ( $m$ )<sup>(\*)</sup> e a auto-absorção de nêutrons na amostra sejam insignificantes; assim sendo, a contagem integrada para os vários ciclos de uma medida é proporcional à integral (no tempo) da produção de nêutrons atrasados e à quantidade de material fissionável presente na amostra irradiada com os nêutrons interrogadores.

Na Figura 1 está indicado o intervalo de nêutrons atrasados em função dos pulsos de nêutrons interrogadores.

A contagem é iniciada certo tempo após o final da irradiação (no tempo  $t_c$ ), para que o detector possa se recuperar dos efeitos devidos à detecção dos nêutrons interrogadores. A contagem termina, ou seja, o contador é bloqueado para novas contagens, no tempo  $t_b$ , antes do final do ciclo ( $t_p$ ) para evitar que seja feita a contagem de nêutrons interrogadores do início do ciclo de irradiação seguinte.

Vale observar que o pré-amplificador utilizado não possibilitava que se ligasse e desligasse o detector; assim sendo, isto foi feito com o contador a ele associado.

Demuestra-se<sup>(3)</sup> que o acelerador deve ser modulado com um período menor do que a meia vida de qualquer precursor de nêutrons atrasados e, também que a irradiação deve se prolongar por um tempo muito maior do que a meia vida de qualquer um desses precursores, para que a produção de nêutrons atrasados, resposta aos pulsos do acelerador, alcance um valor de equilíbrio (para intensidade média constante de nêutrons interrogadores). Só ter sido alcançado esse valor de equilíbrio é que deve ser iniciada a contagem de nêutrons atrasados.

Por meio de cálculo computacional, foram otimizados os tempos de irradiação e contagem, tendo-se em vista a maior acumulação de contagens, em menor tempo, com a conseqüente minimização de erros estatísticos, obtendo-se os seguintes parâmetros:

$$\text{período dos pulsos } (t_p) = 120 \text{ ms}$$

$$\text{largura do pulso de irradiação } (t_i) = 60 \text{ ms}$$

Os valores de  $t_c$  e  $t_b$  devem ser determinados experimentalmente.

A razão entre a contagem no detector fatia ( $C_{DF}$ ) e a contagem no monitor ( $C_M$ ) não é afetada por variações na intensidade de nêutrons interrogadores. O valor dessa razão ( $C$ ) é chamado de contagem normalizada.

(\*)  $m = \frac{\text{n}^\circ \text{ de nêutrons interrogadores} + \text{n}^\circ \text{ de nêutrons de fissão}}{\text{n}^\circ \text{ de nêutrons interrogadores}}$

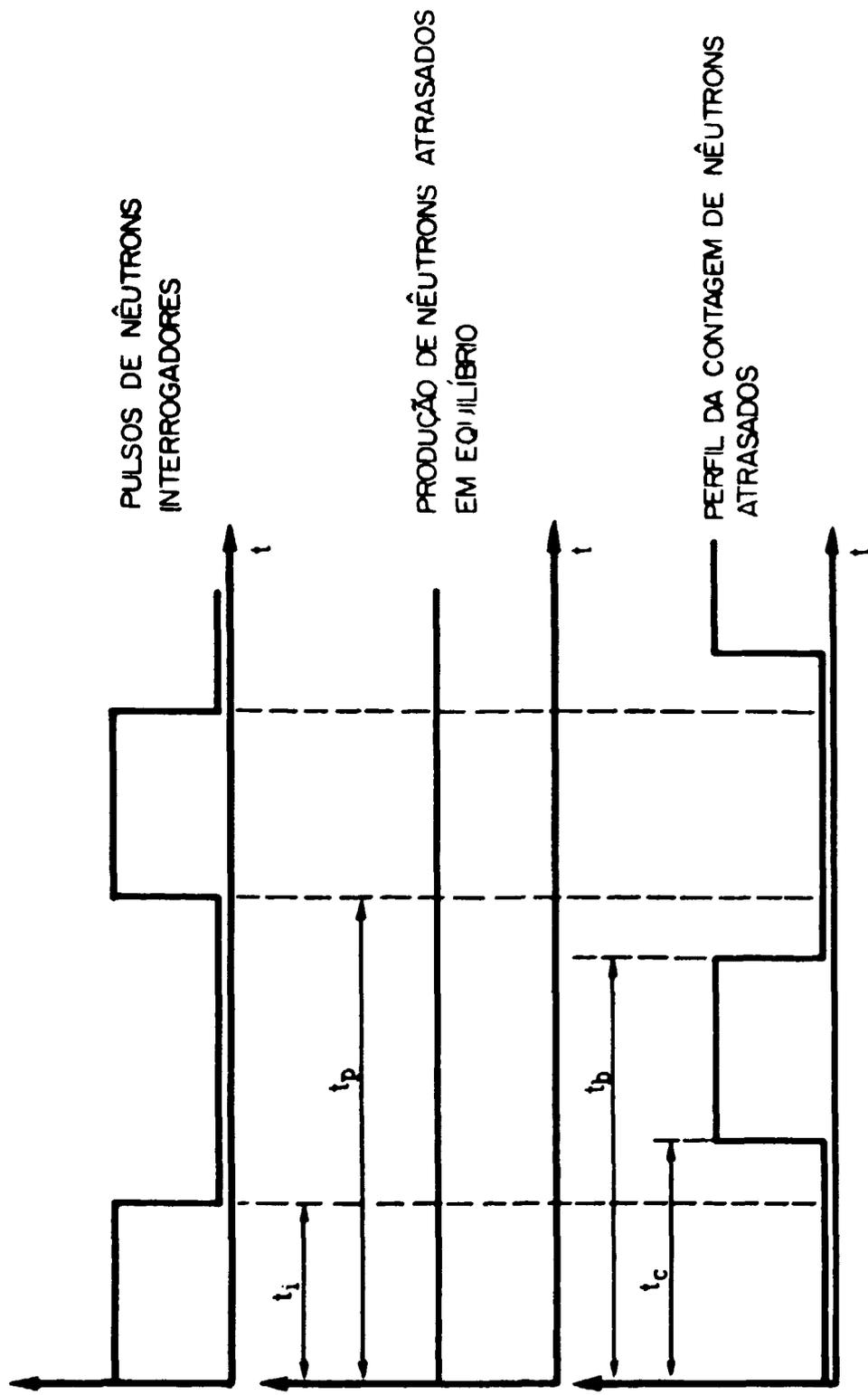


Figura 1 -- Tempos Envolvidos no Ciclo de Irradiação e Contagem.

Em todas as análises realizadas no decorrer deste trabalho, as amostras utilizadas eram constituídas unicamente de urânio natural, como material fissionável; assim sendo, a abundância relativa ( $f_i$ ) de cada um dos ( $i$ ) isótopos de urânio é uma constante para todas as amostras, tanto as desconhecidas como a padrão. Esse fato possibilita algumas simplificações em termos de cálculo com a consequente obtenção da equação de calibração do sistema que é:

$$m_a = \frac{(C_a - CF)}{(C_p - CF)} m_p \quad (1)$$

Onde o índice  $a$  se refere à amostra desconhecida e o índice  $p$  à amostra padrão;  $m$  é a massa;  $C$  é a contagem normalizada e  $CF$  é a contagem de fundo definida como toda contagem que não seja devida aos nêutrons atrasados emitidos pelo urânio.

### III – ARRANJO EXPERIMENTAL

#### Descrição do Sistema

O esquema simplificado do equipamento eletrônico utilizado está apresentado na Figura 2. O equipamento de controle do acelerador Van de Graaff e a maior parte dos equipamentos eletrônicos associados ao monitor e ao detector fatia estão na sala de controle que dista aproximadamente 30 m da sala do acelerador.

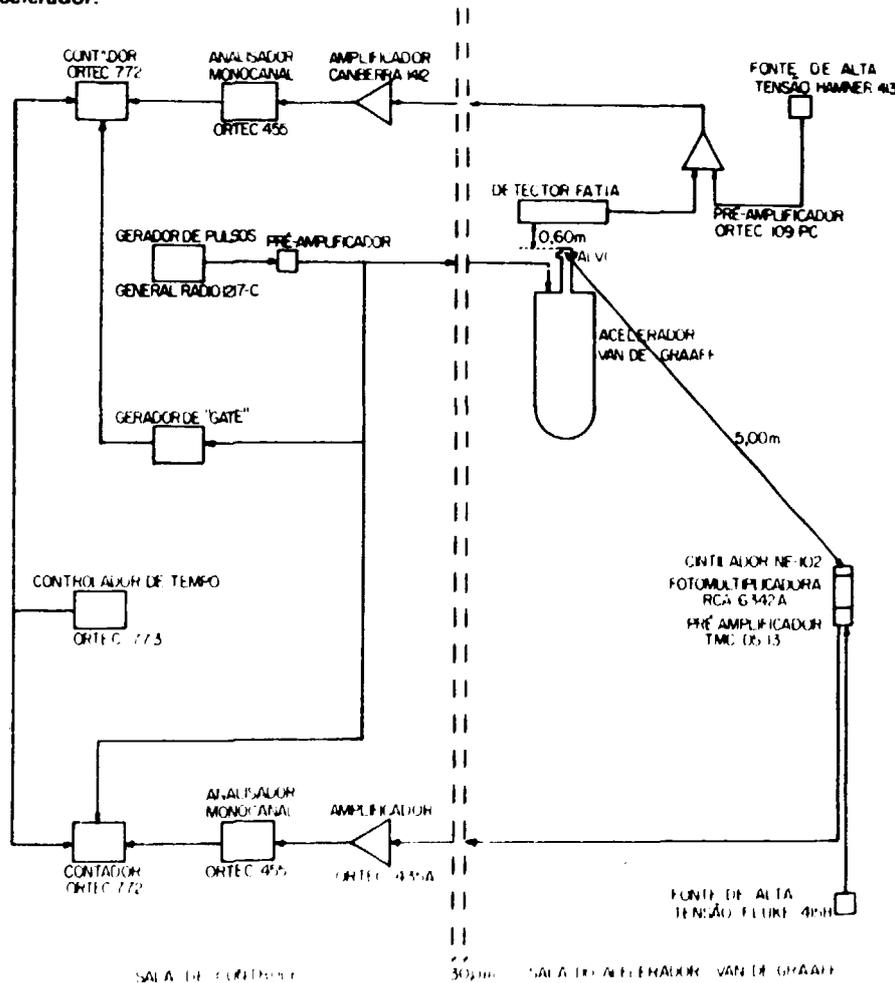


Figura 2 – Esquema do Equipamento Eletrônico Utilizado.

Dispõe-se também de um analisador multicanal (TMC de 1024 canais) e de um computador de 16 k de memória (Hewlett Packard 2116 C) para auxiliar na calibração do sistema e na análise dos dados.

### Detector Fatia

Com o objetivo de obter alta eficiência na detecção dos nêutrons atrasados, foi construído um detector tipo fatia que é similar ao utilizado no programa de salvaguarda do laboratório de Los Álamos<sup>(4)</sup>. Uma vista em corte do detector construído é apresentada na Figura 3.

Esse detector é do tipo "long counter" com uma resposta aproximadamente constante dentro de uma variação de 3%, no intervalo de energia de 25 keV a aproximadamente 3 MeV. Nessa região de energia, a eficiência intrínseca do detector, definida como a probabilidade de detectar nêutrons entrando na face frontal do detector de área ativa de 3100 cm<sup>2</sup>, é da ordem de 18%<sup>(4)</sup>.

O detector fatia consiste de treze detectores proporcionais de 3 He a 4 atm com 2,5 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, que são montados em dois blocos justapostos de parafina com as dimensões de 61 x 51 x 9 cm cada. O detector fatia é blindado (com exceção da face frontal) por uma camada de 16 cm de parafina misturada com ácido bórico (na razão de 45% de parafina em peso) e é envolto por uma camada de 1 mm de cádmio, para a qual a transmissão de nêutrons térmicos é 10<sup>-6</sup><sup>(2)</sup>. O bloco frontal de parafina do detector possui 7 furos cilíndricos (2,5 cm de diâmetro por 61 cm de comprimento), para que a resposta seja constante em função da energia dos nêutrons<sup>(1)</sup>.

A construção desse detector de alta eficiência tornou-se necessária devido a produção de nêutrons atrasados ser pequena, e porque desejava-se que o detector fôsse pouco sensível a raios gama, para que a presença destes, produzidos na amostra, não interferisse significativamente na medida de nêutrons atrasados. Essas duas qualidades: alta eficiência e pouca sensibilidade a raios gama, estão aproximadamente combinadas no detector fatia.

Durante a irradiação ocorre uma taxa de detecção de nêutrons muito alta no detector fatia e, em consequência, o pré-amplificador fica saturado no final da irradiação. Isto implica na necessidade de um tempo de espera relativamente longo para que o detector volte a funcionar normalmente, antes de iniciar-se a contagem dos nêutrons atrasados emitidos pela amostra analisada.

### Amostras Utilizadas

As análises foram realizadas com três tipos de amostras (confeccionadas no IPEN), a saber:

#### a) Discos de urânio metálico

Foram usados de 1 a 4 discos de 8,3 cm de diâmetro com 1,0 cm a 1,4 cm de espessura, sendo a massa desses discos dada na Tabela I.

#### b) Pastilhas de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

Foram utilizadas pastilhas sinterizadas de óxido de urânio natural, de forma cilíndrica com 1,2 cm de diâmetro e 1,7 cm de altura. O número de pastilhas usadas dependeu de análise realizada, chegando-se a usar o máximo de 328 dessas pastilhas.

A massa de cada uma dessas pastilhas é de aproximadamente 14,7 g. A massa de cada conjunto de pastilhas foi medida como um todo de modo a sempre obter-se um erro de apenas 0,05 g na medida da massa de cada conjunto.

#### c) Placas de "elemento combustível"

Foram utilizadas placas simulando as de elemento combustível de reator tipo "Material Testing Reactor" (MTR), como o reator IEA R1, sendo estas constituídas de um núcleo de liga urânio e alumínio (17,9 a 18,0% de U em peso) de área ativa de 383 cm<sup>2</sup> que é envolvido por duas outras placas de alumínio.

A massa do núcleo de cada uma das 18 placas usadas é de 60 ± 1 g e as dimensões da placa são 62,5 x 7,11 x 0,165 cm. Foram usadas até 18 dessas placas de "elementos combustíveis".

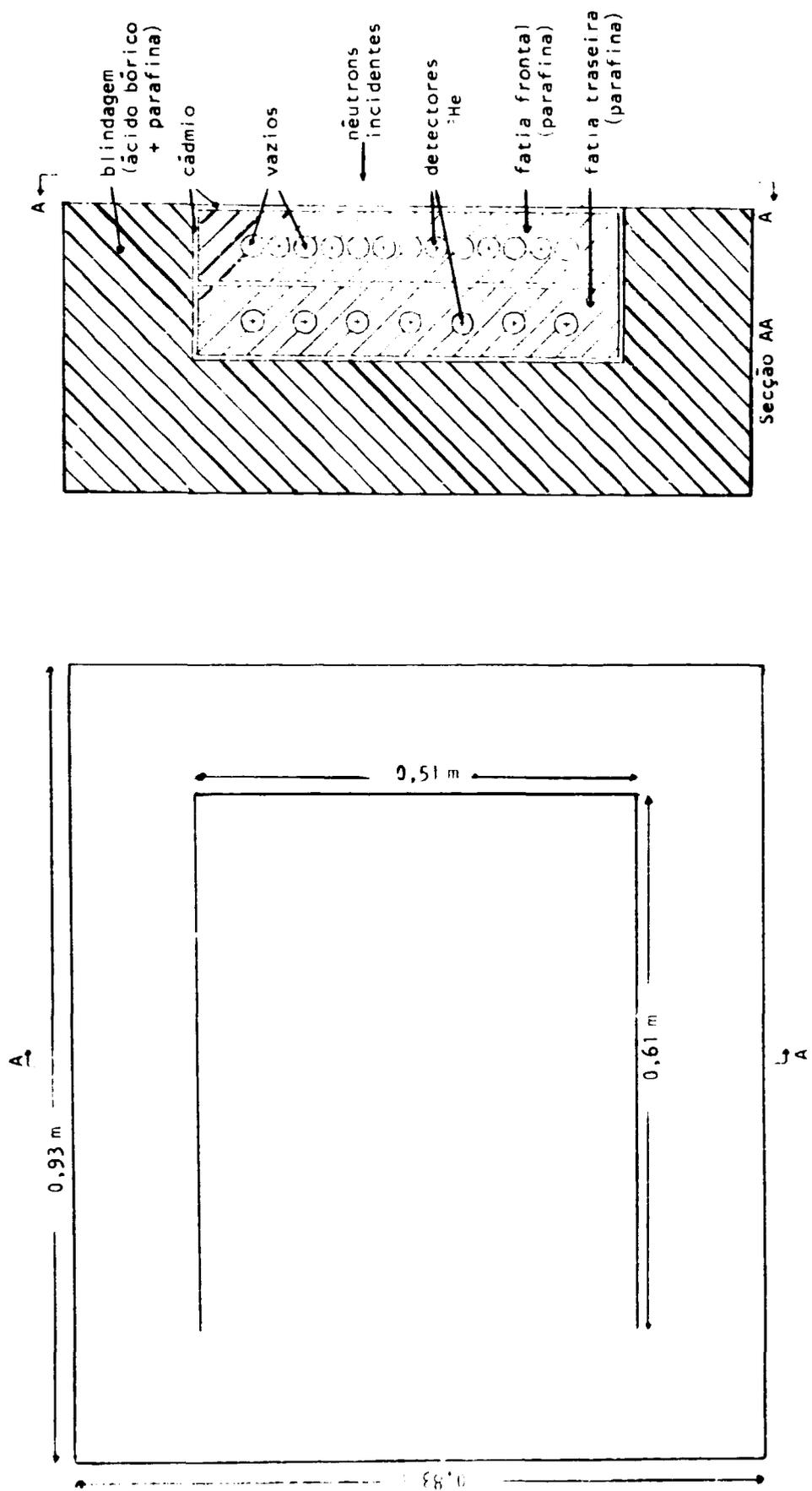


Figura 3 — Vista em Corte do Detector Fatia.

As placas dos elementos combustíveis atualmente utilizadas no IEA R1 têm a região ativa U-A1, com urânio enriquecido a 93% em  $^{235}\text{U}$ , diferindo nessa característica das placas utilizadas para a execução do presente trabalho, que têm urânio natural.

**TABELA I**  
Massas dos Discos de Urânio Metálico

Discos nº	Massa
1	892,9 ± 0,05 g
2	1109,3 ± 0,05 g
3	798,2 ± 0,05 g
4	1127,1 ± 0,05 g

#### IV – ANÁLISE DOS ERROS

As principais fontes de erro neste método de análise são os erros associados à estatística de contagem, à determinação das massas dos padrões, ao posicionamento da amostra e às variações nos tempos de irradiação e contagem.

a) Erro associado à estatística de contagem

A massa de urânio foi determinada pela Equação (1) aqui reproduzida:

$$m_a = \frac{(C_a - CF)}{(C_p - CF)} m_p$$

O desvio-padrão numa medida devido a flutuações estatísticas da desintegração radioativa é dado<sup>(6)</sup> pela raiz quadrada do número de contagens; então, aplicando-se a fórmula de propagação de erro à Equação (1) na qual são usadas contagens normalizadas obtém-se que o erro associado à estatística de contagem na amostra padrão (índice p) é dado por:

$$\frac{\sigma^2(C_p - CF)}{(C_p - CF)^2} = \frac{\left(\frac{1}{C_{DF_p}} + \frac{1}{C_{M_p}}\right) C_p^2 + \left(\frac{1}{C_{DF_{CF}}} + \frac{1}{C_{M_{CF}}}\right) CF^2}{(C_p - CF)^2} \quad (2)$$

(obtem-se fórmula análoga no caso da amostra desconhecida).

Nas condições utilizadas, com 1000 segundos de tempo total de medida, o erro total associado à estatística de contagem (amostra padrão + desconhecida) na medida de 11 placas de combustível, utilizando como massa padrão 17 dessas placas, foi 3,3%.

b) Erro associado à determinação da massa de urânio

Para a análise de placas de combustível foi adotada uma incerteza de 1,7% na massa dos padrões, que é o valor fornecido pelo fabricante (IPEN).

Para os outros casos, foi calculado o erro percentual considerando-se a precisão da balança (0,05 g) em que as massas foram determinadas.

c) Erro relacionado com o posicionamento da amostra

Diferentes posicionamentos da amostra em relação ao alvo e ao detector fatia implicam em diferentes contagens de nêutrons atrasados, devido à variação na intensidade de nêutrons interrogadores que incidem na amostra e à variação na eficiência total ( $E_{DF}$ ) do detector fatia (variações no fator geométrico).

Foi realizado um estudo experimental para escolher a posição da amostra a ser analisada, tendo-se determinado o erro relacionado com esse posicionamento, conforme está apresentado na Tabela II.

TABELA II

Resumo das Fontes de Erros na determinação da Massa de Urânio

Parâmetro	ERRO PERCENTUAL	
	11 Placas de Combustível	4 Discos de Urânio
Estatística de contagem	3,3	1,6
Determinação da massa padrão	1,7	0,0013
Posicionamento da amostra	1,2	0,1
Não simultaneidade do início do tempo de análise com o início do pulso de nêutrons interrogadores	0,12	0,12
Flutuação nos tempos de irradiação e contagem	<< 0,67	<< 0,67
Erro total na análise (raiz quadrada da soma dos quadrados)	3,9	1,6

d) Erro associado às variações nos tempos de irradiação e contagem

Este erro foi estimado a partir de cálculos baseados em observações experimentais e é apresentado na Tabela II, para os dois casos possíveis.

e) Erro total na determinação da massa

O erro total no resultado da análise é dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados do erro associado a cada parâmetro da análise, os quais são apresentados na Tabela II.

Os erros associados aos parâmetros da análise, apresentados na Tabela II, foram calculados para as análises em que eles eram maiores; assim sendo, nas outras análises, o erro total é sempre menor do que o aqui apresentado.

## V – MEDIDAS E ANÁLISE DOS DADOS

A seguir serão discutidas as medidas mais significativas e mais representativas dentre as que foram realizadas na execução deste trabalho.

1) Investigação do efeito da presença de alumínio na medida de nêutrons atrasados.

Essa investigação foi realizada tendo-se em vista a aplicação desse método de fonte pulsada a elementos combustíveis do reator IEA R1, os quais são constituídos de 19 placas de liga urânio-alumínio, envoltas cada uma delas por uma camada de alumínio. A espessura total (de todas as placas juntas) de alumínio em um elemento combustível é de 15 mm.

Nessa investigação utilizaram-se os discos de urânio metálico para os quais os erros devidos à estatísticas de contagem são menores do que para as placas usadas.

Foi investigado o efeito da colocação de discos de alumínio, do mesmo diâmetro dos discos de urânio metálico, em duas posições:

- a) entre o alvo do acelerador Van de Graaff e 4 discos de urânio
- b) entre 4 discos de urânio e o detector tipo fatia

As medidas foram repetidas para um disco de urânio.

A série de medidas correspondentes ao ítem a) foi repetida utilizando discos de alumínio com o diâmetro de urânio dos anteriores e usando como amostra um disco de urânio.

A partir das várias séries de medidas realizadas, conclui-se que:

- 1º) A influência do alumínio é explicável em termos da atenuação da intensidade de nêutrons interrogadores ou atrasados;
- 2º) O fato do alumínio estar de um lado ou de outro do disco de urânio não interfere no resultado da análise;
- 3º) Conhecendo-se a quantidade de alumínio presente na amostra padrão e/ou na amostra desconhecida, é possível calcular o fator para correção do resultado da análise.

2) Estudo da influência da distribuição lateral do urânio

Como amostras foram utilizados conjuntos de 53 pastilhas de  $U_3O_8$  com uma massa de aproximadamente 780 g em cada conjunto. As pastilhas foram alojadas de forma ordenada no interior de uma caixa de alumínio de dimensões 62,5 x 1,7 x 3,6 cm, com 5 divisões internas iguais de 12,5 x 1,7 x 3,6 cm. Vale salientar que, em cada uma das divisões, as pastilhas foram ordenadas da mesma maneira.

Na experiência realizada, descrita a seguir, a face da caixa de alumínio foi colocada paralela à face frontal do detector fatia, a 23 cm deste. As distâncias empregadas foram medidas da direção alvo-centro do detector fatia ao centro geométrico da divisão da caixa utilizada (posição do centro de gravidade da amostra).

Foram feitas medidas colocando esses conjuntos de pastilhas em 5 posições laterais (divisões da caixa), cada vez em uma delas e, posteriormente, em todas simultaneamente (nas respectivas posições).

Os dados dessas medidas estão apresentados na Tabela III. Em vista dos dados apresentados nessa tabela, verifica-se que a resposta do sistema de análise é simétrica em relação à posição central e, também, que a interferência da presença de um conjunto de pastilhas de  $U_3O_8$  em outro conjunto igual, colocado ao lado do primeiro, é menor do que se pode detectar com o sistema de análise.

TABELA III

Resultado de Medidas para Determinação da Influência da Distribuição Lateral de Urânio no Resultado da Análise

Distância do Ponto Central (cm)	Massa (g)	Contagem no Monitor	Contagem no Detector Fatia	Contagem Normalizada
0	783,6	47126	2876	0,055 ± 0,001
- 25,0	783,7	43189	1399	0,026 ± 0,0009
- 12,5	781,9	39665	2005	0,044 ± 0,001
+ 12,5	784,3	44052	2251	0,045 ± 0,001
+ 25,0	784,6	44791	1513	0,027 ± 0,0009
SOMA DAS PARCELAS				0,197 ± 0,002
Todas juntas nas respectivas posições	3918,1	44613	9113	0,198 ± 0,0009

### 3) Estudo com placas de elemento combustível

Foram feitas medidas para verificar a linearidade da resposta do sistema com o aumento do número de placas de "elemento combustível".

Nestas medidas foram utilizadas massas de urânio entre 10 a 184 g (1 a 17 placas). As medidas foram feitas com as placas encostadas uma à outra (face a face), vide Figura 4. Para aumentar a razão de contagem, a separação entre o alvo e a placa mais próxima foi reduzida a 12,5 cm.

Na Figura 4, tem-se a curva de resposta do sistema como função do número de placas de urânio que são irradiadas.

Apesar da baixa estatística de contagem, observa-se que a contagem normalizada varia linearmente com o número de placas analisadas.

Usando como amostra 17 placas de "elemento combustível", nas condições da experiência anterior, foram realizadas 4 análises descritas a seguir:

- a) Amostra na posição  $X = 60$  cm e  $Y = 12,5$  cm, com o centro das placas alinhado com o centro do alvo e o centro do detector fatia.
- b) Amostra na posição anterior, sofrendo um deslocamento lateral de 1 cm para direita de quem olha do alvo para o detector fatia.
- c) Amostra na condição anterior, girando-se no plano horizontal, no sentido anti-horário de quem olha de cima para baixo, de modo a se ter um deslocamento de 1 cm nos extremos da placa, mas, mantendo-se a posição central da mesma.
- d) Amostra na posição da análise a, girando de  $90^\circ$  no plano vertical.

Os dados obtidos nessas análises encontram-se na Tabela IV.

Da análise dos dados obtidos nas experiências a, b e c, conclui-se que o erro devido aos posicionamentos das placas de "elemento combustível" é menor do que o erro de aproximadamente 3% associado à estatística de contagem.

Comparando os resultados das análises a e d, conclui-se que o sistema de análise fornece resposta idêntica (dentro do erro estatístico), estando as placas de "elemento combustível" na horizontal ou na vertical.

## VI – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O sistema de análise implantado fornece resultados reproduzíveis, dentro do erro de análise que variou de 1,6 a 3,9%, dependendo da forma física e da massa de urânio presente na amostra.

Na análise de um conjunto de 17 placas que simulam as placas de elemento combustível de reator tipo MTR, obteve-se um erro de análise de 2%. Como esse erro é principalmente devido à estatística de contagem, espera-se que o erro na determinação da massa de urânio num elemento combustível (MTR) seja da ordem da metade desse valor, devido ao fato de que essa massa é 4 vezes maior do que nas 17 placas utilizadas.

Para o controle de qualidade na fabricação de elementos combustíveis de reator tipo MTR, a massa total de urânio por placa deve ser conhecida com a precisão de 2,5%<sup>(5)</sup>. Para as análises realizadas com simulações dessas placas, obteve-se um erro de análise de 5,2%, em análises com 1000 s de duração. Com algumas modificações sugeridas a seguir, espera-se reduzir o erro nessa análise para menos do que 2,5%. Da mesma forma, as modificações sugeridas propiciarão uma redução no erro das análises que vierem a ser executadas com esse sistema.

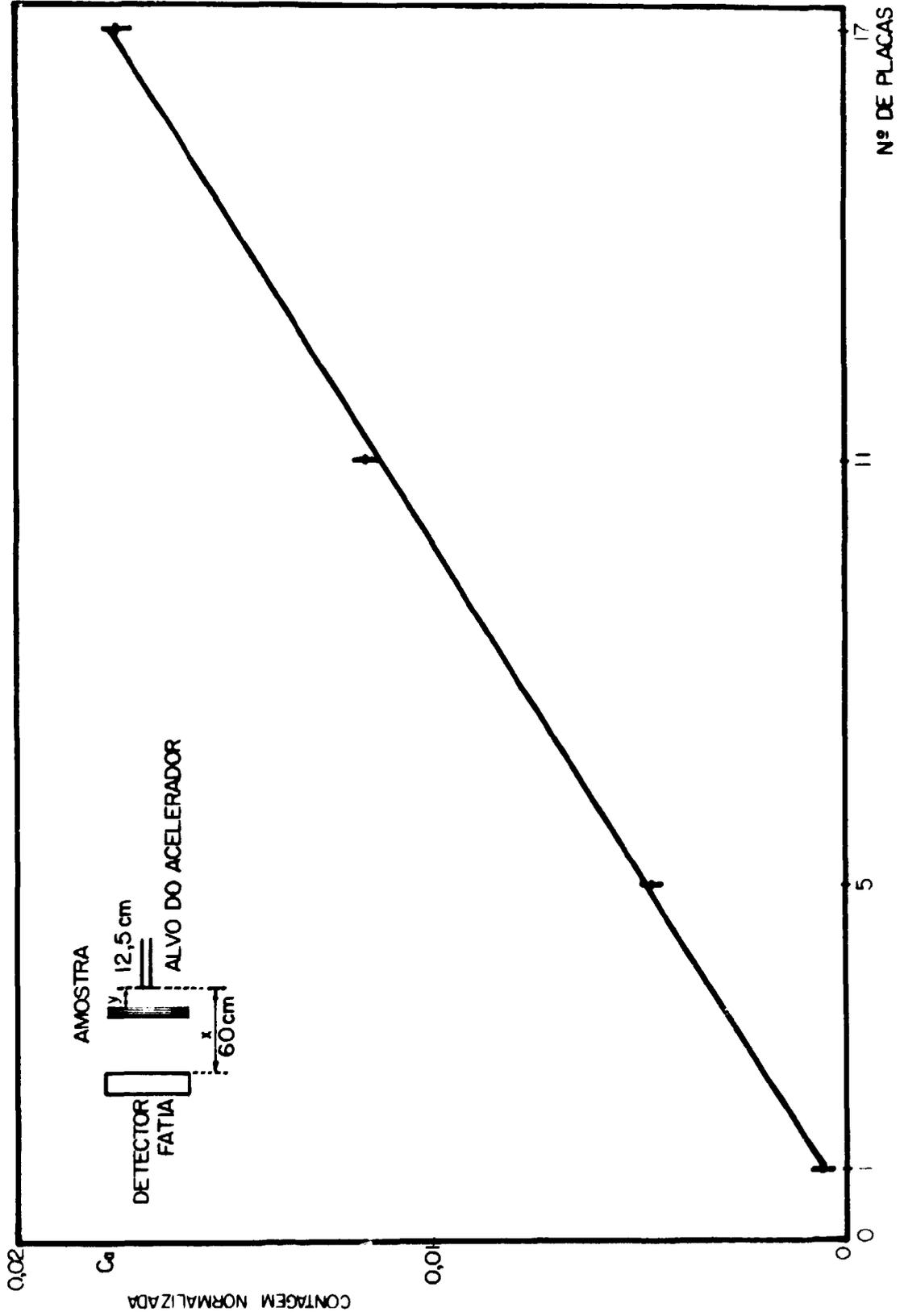


Figura 4 — Resposta do Sistema de Análise como Função do Número de Placas de "Elementos Combustíveis".

TABELA IV

Resultados de Medidas para Determinação da Influência do Posicionamento das Placas de "Elemento Combustível" nos Resultados das Análises

Análise	Contagem no Monitor	Contagem no Detector Fatia	Contagem Normalizada
a	82063	1837	0,0160 ± 0,0005
b	82151	1857	0,0162 ± 0,0005
c	84430	1936	0,0165 ± 0,0005
d	82807	1894	0,0165 ± 0,0005

Conforme exposto na Seção IV, o erro no resultado da análise reduz-se aos erros associados à estatística de contagem e ao posicionamento da amostra. Para reduzir esses erros, sugere-se:

- 1º) Aumentar a intensidade da fonte de nêutrons. Um problema significativo desse sistema de análise foi a necessidade de utilizar apenas 20% da intensidade máxima de nêutrons da fonte  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$ . Com intensidades maiores, o pré-amplificador associado ao detector saturava.

Esse problema será eliminado com a utilização de um pré-amplificador, que está sendo construído, tipo "gated" similar ao utilizado em Los Álamos<sup>(4)</sup>. Usando maior intensidade de nêutrons interrogadores haverá maior produção de nêutrons atrasados e, conseqüentemente, melhoria na estatística de contagem. Assim sendo, com o uso desse pré-amplificador espera-se reduzir de 5,2% para aproximadamente 2,3% o erro nas análises de uma placa de "elemento combustível".

- 2º) Aumentar o tempo de análise para diminuir o erro associado à estatística de contagem. Esse erro é inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo total de análise. A utilidade ou não dessa sugestão depende da precisão requerida e da possibilidade ou não de utilizar o tempo total de análise necessário para obter-se essa precisão. No caso de implantar-se esse sistema para medidas de rotina, é importante saber qual será o número de análises que deverão ser realizadas por dia, para que se possa definir o tempo total disponível para cada análise.

- 3º) Melhorar o sistema de posicionamento da amostra para diminuir o erro a ele associado. Com essa modificação será possível diminuir a distância detector fatia-alvo, em relação à distância utilizada nesse trabalho ( $X = 60$  cm) e, conseqüentemente, reduzir o erro associado à estatística de contagem. A redução, no erro total no resultado da análise, obtível com essa modificação dependerá de quanto for possível melhorar o sistema de posicionamento da amostra.

Vale salientar que, para pequenas distâncias entre o alvo e o detector fatia, a não homogeneidade da amostra (elemento combustível) torna-se importante, e introduzirá erro no resultado da análise devido a dificuldade de obter uma amostra padrão com a mesma heterogeneidade. Esse tipo de erro não foi detectado nas medidas aqui apresentadas.

É importante lembrar ainda que melhorias no sistema de análise para obtenção de erro total no resultado da análise menor do que 0,5% implicarão na necessidade de estudar com maiores detalhes os outros parâmetros (vide Tabela I) que, por se tornarem significativos, passarão a influir no erro total da análise.

O método de análise utilizado nesse trabalho é de medida relativa e, como em todos os desse tipo, faz-se necessário que a amostra padrão tenha características químicas e físicas o mais próximo possível das existentes na amostra a ser analisada. Nesse caso, os padrões precisam ter massa e composição muito bem conhecidas. A não obtenção de padrão com essas características implica em aumento no erro da análise. Pretende-se utilizar esse método para analisar barras contendo resíduos radioativos, para os quais haverá dificuldade na obtenção de padrões com as características citadas. Assim sendo, deverão ser estudados meios para a resolução desse problema, tal como fazer análises durante as quais a amostra sofra rotação continuamente para que se tenha homogeneidade na influência dos materiais distribuídos na amostra.

## ABSTRACT

~~This work presents~~ Results of non destructive mass analysis of natural uranium by the pulsed source technique. Fissions are produced by irradiating the test sample with pulses of 14 MeV neutrons and the uranium mass is calculated on a relative scale from the measured emission of delayed neutrons. Individual measurements were normalized against the integral counts of a scintillation detector measuring the 14 MeV source neutron output.

Delayed neutrons were measured using a specially constructed slab detector operated in antisynchronism with the fast pulsed neutron source.

The 14 MeV neutrons were produced via the  $T(d,n)^4He$  reaction using a PN-400 Van de Graaff accelerator operated at 200 kV in the pulsed source mode.

Three types of sample were analysed, namely: discs of metallic uranium, pellets of sintered uranium oxide and plates of uranium aluminium alloy sandwiched between aluminium. These plates simulated those of Material Testing Reactor fuel elements.

Results of measurements were reproducible to within an overall error of 1.6 to 3.9%, the error of a specific measurement depending on the shape, size and mass of the sample.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS \*

1. ALLEN, W. D. Flat response counters. In: MARION, J. B. & FOWLER, J. L., eds. *Fast neutrons physics. Part I: Techniques*. New York., N. Y., Interscience, 1960, p.361-86. (Interscience monographs and texts in physics and astronomy, v.4).
2. BECKURTZ, K. H. & WIRTZ, K. *Neutrons physics*. Berlin, Springer, 1964. p.275.

(\*) As referências bibliográficas relativas a documentos localizados pelo IPEN foram revistas e enquadradas na NB-66 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

3. COELHO, P. R. P. *Análise não destrutiva da massa de urânio natural através da medida de neutrons atrasados com uso da técnica de fonte pulsada de neutrons rápidos*. São Paulo, EPUSP, 1979. (Dissertação de Mestrado)
4. EAST, L. V. & WALTON, R. B. Polyethylene moderated  $^3\text{He}$  neutron detectors. *Nucl. Instrum. Meth.*, 72: 161-6, 1969
5. KHOURI, M. T. F. C. *Ensaio em material combustível para reatores utilizando técnicas nucleares*. São Paulo, Instituto de Energia Atomica, 1977. (Tese de doutoramento)
6. PRICE, W. J. Statistics of detection systems. In: PRICE, W. J. *Nuclear radiation detection*. New York, N. Y., McGraw-Hill, 1958. p.53-66.

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Caixa Postal, 11 049 - Pinheiros  
CEP 05508  
01000 - São Paulo - SP

Telefone: 211-6011  
Endereço Telegráfico - IPENUCLEAR  
Telex - (011) 23592 - IPEN - BR