

BR7801750



**SOBRE A MONITORAÇÃO DA POTÊNCIA DO REATOR
NUCLEAR IEAR-1 PELA ATIVIDADE DO N¹⁶**

Joel Alvarenga de Sousa

DISSERTAÇÃO E TESE - IEA 011

MARÇO/1976

**SOBRE A MONITORAÇÃO DA POTÊNCIA DO REATOR
NUCLEAR IEAR-1 PELA ATIVIDADE DO N¹⁶**

Joel Alvarenga de Sousa

Dissertação para obtenção do Título de "Mestre em Engenharia" - Orientador Prof. Dr. Paulo Saraiva de Toledo. Apresentada em maio de 1970 e defendida em maio de 1971 na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

APROVADA PARA PUBLICAÇÃO EM JANEIRO/1976.

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Klaus Reinach - Presidente
Roberto D'Utra Vaz
Helcio Modesto da Costa
Ivano Humbert Marchesi
Admar Cervellini

PARTICIPANTES

Regina Elisabete Azevedo Beretta
Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro Pieroni

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL

NOTA: Este trabalho foi conferido pelo autor depois de composto e sua redação está conforme o original, sem qualquer correção ou mudança.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
I.1 – Introdução	1
I.2 – Objetivos	1
CAPÍTULO II	
O REATOR IEAR-1 E MÉTODOS DE MEDIDA DE POTÊNCIA	2
II.1 – O Reator IEAR-1	2
II.2 – Métodos de Medida de Potência	4
CAPÍTULO III	
O MÉTODO EXPERIMENTAL	12
III.1 – Detalhes sobre a Espectrometria Gama	12
III.2 – Descrição do Arranjo Experimental	13
III.3 – Medidas Realizadas	13
CAPÍTULO IV	
INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	19
IV.1 – Espectros de Energia dos Raios Gama	19
IV.2 – Espectros de Tempo	19
IV.3 – Análise das Curvas de Decaimento	24
CAPÍTULO V	
CONCLUSÃO	26
APÊNDICES	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

SOBRE A MONITORAÇÃO DA POTÊNCIA DO REATOR NUCLEAR IEAR-1 PELA ATIVIDADE DO N¹⁶

Joel Alvarenga de Souza

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 – Introdução

A potência de funcionamento de reatores do tipo IEAR-1 é geralmente monitorada através de câmaras de ionização compensadas, fixas em posições acima e lateralmente em relação ao núcleo do reator.

Em geral esta informação é ligeiramente deformada devido as flutuações locais de fluxo de nêutrons térmicos, proveniente das movimentações das barras de segurança e controle. Essas movimentações são efetuadas para contrabalançar os efeitos de envenenamento pelo Xenon, temperatura, etc. As indicações das câmaras nos registradores ao serem mantidas no mesmo nível, provocarão conseqüentemente alterações no fluxo médio de nêutrons térmicos.

As tentativas que têm sido efetuadas para reduzir esses efeitos são as seguintes:

- a) desenvolvimento de detetores mais sensíveis e mais afastados do núcleo do reator;
- b) localização de 4 a 6 câmaras de ionização compensadas em diversas faces do núcleo do reator; as indicações seriam, portanto, somadas para fornecer dados mais condizentes com o fluxo médio de nêutrons térmicos;
- c) utilização de sistemas que medem atividade de fluidos circulantes, como é o caso de N¹⁶, produzido na reação $O^{16}(n,p)N^{16}$.

1.2 – Objetivos

A técnica de monitoração da potência do reator pelo N¹⁶ é bem conhecida, tendo sido aplicada em diversos reatores (6,7,8,15).

A característica marcante da monitoração de potência global do reator pela medida de atividade do N¹⁶ é que esta não é afetada por deformações locais de fluxo provenientes das variações de posições das barras que variam para compensar os efeitos Xenon e Samarium, o efeito de "burn-up"^(*) e o efeito dos dispositivos experimentais e de irradiação. Este método é também utilizado no IEAR-1, onde se instalou um sistema nos moldes do existente no reator francês Melusine⁽⁶⁾.

(*) "burn-up" = queima do elemento combustível do reator.

São objetivos deste trabalho:

- i) Estudar o posicionamento ótimo da câmara de ionização, para medida de atividade do N^{16} ; por posicionamento ótimo entende-se um ponto onde a atividade do N^{16} depende muito pouco da vazão da água através do circuito primário de refrigeração do reator.
- ii) Identificar, nesta posição, a presença do N^{16} .

No capítulo II daremos uma descrição do reator IEAR-1 e dos métodos de medida de potência nele utilizados com ênfase no método da ativação do N^{16} .

No capítulo III são descritos o método experimental utilizado para identificar o N^{16} na posição da câmara de ionização, o arranjo experimental e as medidas realizadas.

No capítulo IV é feita a interpretação dos dados experimentais do capítulo III. Os espectros de energia dos raios gama são interpretados qualitativamente, e as curvas de decaimento da atividade detetada são analisadas por método de mínimos quadrados.

CAPÍTULO II

O REATOR IEAR-1 E MÉTODOS DE MEDIDA DE POTÊNCIA

II.1 — O Reator IEAR-1

O Reator IEAR-1 é do tipo piscina, projetado e construído pela Babcock & Wilcox Co. para operar continuamente em 5 Mw⁽¹⁾.

O caroço consiste de um arranjo de elementos combustíveis e refletores colocados na placa matriz. O caroço do reator pode ser deslocado, e operado em duas posições distintas. Na primeira posição a placa matriz está localizada acima do "header"^(*) do circuito primário de refrigeração. A circulação da água de refrigeração se faz na direção vertical, de cima para baixo. A segunda posição é em frente à coluna térmica, que é constituída de blocos de grafite colocados no interior de um recipiente de aço e alumínio, cujas dimensões são 1,80 m por 2,40 m, e provida de seis canais de blocos de grafite removíveis. Nesta posição a máxima potência de operação é 200 Kw, isto porque acima deste valor, há necessidade da circulação forçada da água de refrigeração e não existe dispositivo para isto nesta posição. Neste caso a refrigeração do caroço é feita somente por convecção natural.

A piscina está dividida em dois compartimentos. Um dos compartimentos é aquele em que o reator pode ser operado até a potência máxima de 5 Mw em operação contínua. No outro compartimento situam-se os armazenamentos para os elementos combustíveis queimados e material radioativo em geral. O caroço pode ser deslocado até este compartimento, no caso de ser necessário alguma manutenção no compartimento de operação. Neste caso, o compartimento de operação pode ser esvaziado, com a colocação de comportas especiais de alumínio.

Os elementos combustíveis são do tipo MTR, com 19 placas para os enriquecidos a 20% e 18 placas para os enriquecidos a 93%. Cada elemento combustível normal, enriquecido a 20%, contém em média 160 g de U^{235} . Os elementos enriquecidos a 93%, contém, em média, 185 g de U^{235} para o elemento combustível e 90 g de U^{235} para os elementos de controle. Os elementos de controle são os

(*) "header" = funil colimador de fluxo d'água para o circuito primário.

elementos onde correm as barras de segurança e controle. Destes elementos são retiradas algumas placas centrais de modo a fornecer um canal para passagem das barras. O caroço do reator consta atualmente de 26 elementos combustíveis, assim distribuídos: quatro elementos de controle enriquecidos a 20%, sete elementos combustíveis normais, enriquecidos a 20% e, 15 elementos combustíveis normais, enriquecidos a 93%.

O reator é moderado e refrigerado a água leve.

Os elementos refletores são de grafita⁽²⁾ colocados na periferia do caroço.

Os dados físicos do caroço são os seguintes, referidos ao início de uma configuração:

excesso de reatividade a 20°C = 2.100 pcm.

massa operacional, aproximadamente = 3.980 g de U²³⁵

valor total das barras de segurança, aproximadamente = 8,5% Δk/k

valor total da barra de controle, aproximadamente = 0,45% Δk/k

fluxo térmico médio de nêutrons = 1,6 x 10¹³ n/cm².s. a 2 Mw

pico do fluxo térmico de nêutrons = 2,5 x 10¹³ n/cm².s

coeficiente negativo de temperatura (20°C) = - 20 pcm/°C

Em relação ao sistema de refrigeração do caroço do reator⁽²⁾, pode-se dizer que existe um sistema primário de refrigeração, cuja função é remover o calor gerado no caroço do reator pela fissão nuclear nos elementos combustíveis. O sistema tem seis componentes: a placa matriz, "hopper"^(*) e "header", bomba-trocador de calor, tubulação e instrumentação. Quando o sistema está sob circulação forçada, a água da piscina é bombeada para passar entre as placas e ao redor dos elementos combustíveis que transferem seu calor para a água de refrigeração. A água passa através dos elementos combustíveis com a vazão de 15,8 x 10⁴ cm³/s. A água entra a 30°C aproximadamente e sai a 32,3°C para 2 Mw. No trocador de calor, parte do calor conduzido pela água através do circuito primário de refrigeração é transferido para o sistema secundário de refrigeração, cuja água está à temperatura mais baixa. Há instrumentos neste sistema para informar o operador do reator sobre as condições do sistema primário de refrigeração.

O sistema secundário tem como objetivo dissipar na atmosfera o calor gerado pelo caroço do reator.

Um sistema para desmineralização da água da piscina, faz com que sejam removidos materiais dissolvidos nesta água e deixá-la com uma impureza de duas partes por milhão no máximo.

A instrumentação nuclear fornece um meio de manter a segurança e controle do reator. Isto é feito pela monitoração, registros, manualmente ou automaticamente, controlando o fluxo de nêutrons térmicos que é linearmente proporcional à potência do reator. Esta instrumentação pode ser considerada como constituída de dois grupos de instrumentos: de segurança e de operação. A informação principal de interesse de ambos os grupos é o nível de fluxo de nêutrons e a razão de mudança do mesmo. O fluxo de nêutrons e o nível de potência são fornecidos através de três canais, que operam em intervalos que vão desde o nível mínimo de detecção do fluxo de nêutrons até 300% da potência global. Os canais são: canal de partida, canal do log N, canal linear. O canal de partida é usado para monitorar o fluxo de nêutrons desde o nível da fonte até a entrada dos canais log N e linear, à uma potência mais elevada. O detector é uma câmara de fissão que fornece um sinal ao pré-amplificador, amplificador e discriminador. A saída do sinal é para o "scaler" e registrador LCR. Para contagens menores que 3 cps, um dispositivo

(*) "hopper" = suporte do "header"

de segurança faz com que caiam as barras de segurança. O canal do log N monitora a potência do reator desde 10^{-6} até 3 vezes o nível de potência projetado. O amplificador do log N também fornece um sinal para o amplificador de período: o sinal de saída deste amplificador alimenta um dos amplificadores de segurança. No evento de um período curto, o amplificador de segurança atua diretamente, reduzindo as correntes que alimentam os magnetos das barras de segurança. O detector é uma câmara de ionização compensada. O canal linear é capaz de monitorar potência de 1 milliwatt até 10 Mw. O detector é uma câmara de ionização compensada, acoplada a 1 milicromicro amperímetro. Os canais de segurança são dois, cada um utilizando uma câmara de ionização não compensada que envia um sinal diretamente aos amplificadores de segurança. Estes canais fornecem um "scram"^(*) do reator de proteção à potência acima do valor projetado ou pré-fixado. A Figura 2.1-1 é uma vista do caroço do reator.

II.2 – Métodos de Medida de Potência

A potência dissipada por reatores nucleares do tipo IEAR-1 é geralmente determinada por um ou por uma combinação dos seguintes métodos:

II.2.1 – Fluxo Médio de Nêutrons Térmicos

Neste método, são dispostas uniformemente no núcleo do reator várias (cerca de 500 no caso do IEAR-1) folhas de Au + folhas de Au recobertas com Cdmio. Essas irradiações são feitas em várias operações durante as quais é mantida uma potência nominal previamente fixada. Após a determinação do fluxo de nêutrons térmicos que é feita através das medidas absolutas das atividades dessas folhas, procede-se à determinação do fluxo médio de nêutrons térmicos do reator naquela potência nominal. Conhecendo-se a massa total de U-235 durante essas operações, determina-se facilmente a potência real de funcionamento⁽¹⁾ do reator e ajusta-se, portanto, as escalas dos diversos canais através dos quais era lida a potência nominal anterior.

Este método é quase sempre usado nas primeiras operações de qualquer reator e geralmente, se se tratar de reatores de funcionamento em potências maiores que alguns watts é comparável com métodos colorimétricos. No caso do reator IEAR-1, determinou-se pelo método do fluxo médio de nêutrons térmicos, uma potência da ordem de 50 watts. Como potência de operação chega até 5 Mw, usa-se o sistema de operações em potências crescentes durante as quais, sempre em uma mesma posição é irradiada uma folha de material cuja atividade absoluta é medida para se verificar a linearidade de respostas dos instrumentos. Caso não haja distorções ou discrepâncias, atinge-se uma potência, digamos 2 Mw. Nesse nível de potência o método da determinação da potência dissipada através do balanço térmico já possui um certo grau de precisão.

II.2.2 – Balanço Térmico

Conhecendo-se, então, a razão do acréscimo de temperatura da água através do núcleo, determina-se em seguida a potência térmica que poderá ser comparada então com o primeiro método. Rigorosamente nessa comparação a potência térmica dissipada deverá ser pouco inferior a potência determinada neutronicamente devido ao fato de que nos 200 Mev por fissão utilizados por este método são incluídas parcelas devido uma parcela de nêutrons rápidos e aos neutrinos que não dissipam energia no núcleo do reator.

II.2.3 – Envenenamento pelo Xenon⁽³⁾

O método de envenenamento pelo Xenon desenvolvido no IEA⁽³⁾, compara o envenenamento causado teoricamente pelo Xenon com os efeitos que se medem pela movimentação de barras

(*) "scram" = desligamento

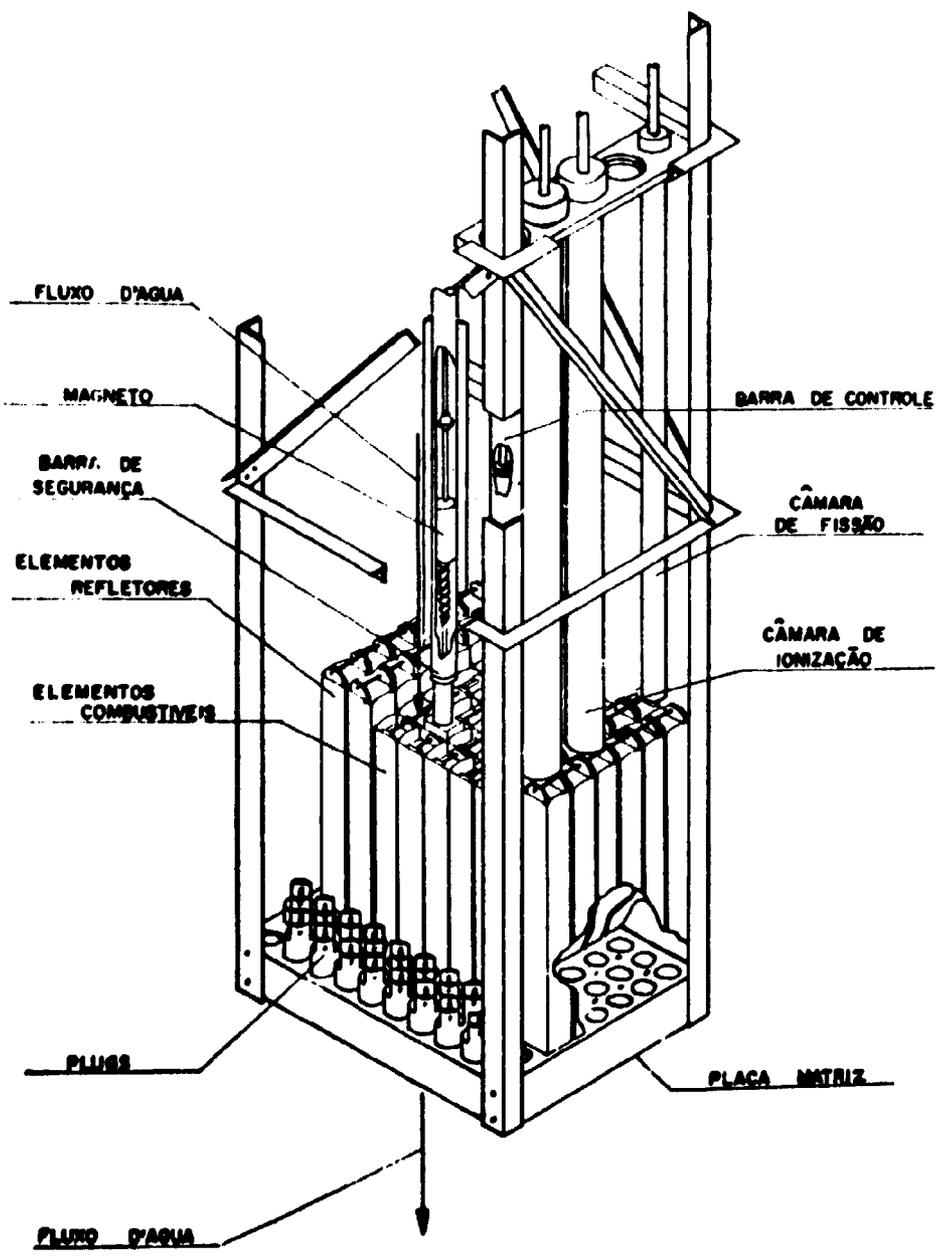


Figura 2.1-1 - Vista do caroço do Reator IEAR-1 (2)

absorvedoras de nêutrons previamente calibradas em termos de reatividade. Este método serve, portanto, para uma verificação acurada dos métodos anteriores quando se tratar de potências altas. O efeito do Xenon cresce com o quadrado da elevação da potência do reator e é desprezível em potências da ordem de watts ou mesmo de dezenas de kilowatts.

II.2.4 – Atividades de Fluidos Circulantes

Outro método consiste em se medir a atividade de fluidos que atravessam o núcleo do reator e são aí ativados. Na maioria dos casos utiliza-se o próprio agente refrigerador do reator, no caso do IEAR-1, a água leve.

A formação do N^{16} é devida, justamente, a uma reação (n,p) sobre o O^{16} da água, que atravessa o caroço do reator. Esta reação possui um limiar elevado (11 Mev) que faz com que a formação do N^{16} dependa unicamente do fluxo de fissão localizado em todo o volume do caroço e, portanto, da potência global do reator.

O N^{16} tem meia-vida de 7,37 s e se desintegra emitindo betas e gamas, sendo que 68% dos casos são gamas de 6,14 Mev.

A atividade em N^{16} representa 99% da atividade total da água, saindo do caroço⁽⁵⁾; atividade restante é devida à ativação de impurezas, de produtos de corrosão, produtos de fissão, de reações menos importantes que dão a formação do N^{17} , O^{19} , A^{41} , Mg^{27} , Al^{28} e Na^{24} .

A meia-vida do N^{16} é tal que sua atividade desaparecerá completamente quando a água retornar ao caroço do reator após a passagem pelo trocador de calor, e se difundir na piscina.

A secção eficaz média de ativação do N^{16} sobre o espectro de fissão ($\bar{\sigma} = 18,5 \mu b$). O princípio de monitoração consiste em medir a água ativa após sua saída do caroço num ponto onde o tempo para atingi-lo seja suficientemente curto em relação à atividade presente no caroço. Após sua passagem pelo dispositivo de medida a água retornará à piscina do reator. O esquema da instalação é dado na Fig. 2.2.4-2.

Um monitor de potência através do N^{16} , consiste em: um medidor (ou registrador) e os circuitos associados a um detetor gama que monitora a água de refrigeração em uma posição determinada ao longo do circuito de refrigeração. A intensidade dos raios gama do N^{16} proveniente do segmento de água observado é determinada por:

- 1) A quantidade de ativação que o volume recebeu ao passar pelo fluxo de nêutrons no caroço.
- 2) O decaimento durante a irradiação.
- 3) O tempo de decaimento entre o caroço e o detetor.
- 4) A constante de desintegração do N^{16} .
- 5) A forma e o volume do segmento de água medido.

A leitura do monitor de potência é determinada pela sensibilidade do monitor e pelos cinco fatores mencionados acima. O fator mencionado em 1) é diretamente proporcional à potência; nos itens 2) e 3) temos fatores relacionados com vazão do circuito primário de refrigeração e nos itens 4) e 5) termos constantes.

Sendo o detetor uma câmara de ionização, a leitura do monitor é expressa matematicamente por:

$$A = KP (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \quad (1)$$

sendo:

A = corrente da câmara de ionização

K = constante de proporcionalidade de potência, que combina a secção de choque de ativação com a sensibilidade e geometria do detetor

P = potência do reator (megawatts)

λ = constante de desintegração do N^{16} (s^{-1})

t_1 = tempo para um segmento de água atravessar o caroço

t_2 = tempo para um segmento de água se deslocar do caroço ao detetor.

Os últimos dois fatores da equação $(1 - e^{-\lambda t_1})$ e $e^{-\lambda t_2}$, dependem da vazão de refrigeração. Se a vazão for constante esses termos serão constantes e poderão ser combinados com K para dar uma proporcionalidade direta entre a leitura do N^{16} e a potência do reator. Assim, com a vazão constante o monitor do N^{16} é um aparelho linear, similar aos controles do nível de potência, com exceção de que:

- 1) Os níveis de potência diferenciais através do caroço foram somados e incluídos na indicação do N^{16} .
- 2) O detetor está localizado numa área livre de fluxo de nêutrons.
- 3) A leitura do N^{16} indica um nível de potência que ocorreu alguns segundos antes, quando o segmento de água medido se achava no caroço.

Devemos, portanto, estudar a influência das variações da vazão sobre A , porque, mesmo para um reator que funcione com vazão nominal constante, qualquer que seja o nível de potência, existem sempre flutuações em torno do fluxo normal adotado

A partir da equação (1):

$$A = K_P (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} \quad (1)$$

ou

$$A = KP(1 - e^{-\lambda V_1/Q}) e^{-\lambda V_2/Q} \quad (2)$$

onde:

V_1 = volume de ativação do caroço

V_2 = volume compreendido entre a saída do caroço e o detetor

Q = vazão de água no circuito primário da refrigeração

A medida da atividade é então uma função simples da vazão.

A função $A=f(Q)$ foi calculada pelo programa ATN 16 em linguagem Fortran II (vide Apêndice I) e o resultado é dado na Figura 2.2.4-1.

Nesta Figura vemos que, para uma dada vazão existe um ponto ideal de funcionamento definido, para o qual uma variação na vazão tem pouca influência na monitoração da potência.

Vemos ainda na Figura 2.2.4-1 que para o IEAR-1 onde a vazão é de $15,8 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{s}$ o posicionamento ótimo da câmara de ionização é tal que $t_2 = 8,9 \text{ s}$.

Outros fatores podem influir na monitoração de potência pela atividade do N^{16} os mais importantes são as atividades do Al^{28} , Mg^{27} , Na^{24} e A^{41} .

Todos estes isótopos têm meia-vida grande em relação à do N^{16} e podem ser acumulados em diversos ciclos de operação. Por exemplo, o equilíbrio do Na^{24} é atingido depois de 60 horas de operação em potência constante.

Uma variação de densidade do refrigerante pode também ser uma fonte que afeta a monitoração.

A atividade instantânea no local da câmara varia devido às flutuações na mistura do refrigerante provocadas pela turbulência; essas variações são desprezíveis porque em média elas se anulam.

A rigor a resposta da câmara de ionização para N^{16} seria dada pela expressão:

$$A = A(\text{N}^{16}) + A(\text{O}^{19}) + A(\text{Al}^{28}) + (\text{Mg}^{27}) + (\text{Na}^{24}) + \dots$$

Para que a medida não represente a atividade de outros núclídeos, que não o N^{16} , a câmara de ionização é otimizada^(5,9) para a energia emitida pelo N^{16} .

Esta câmara de ionização mostrada na Figura 2.2.4-3 tem o eletrodo interno de grafita isolado por um suporte de teflon; o eletrodo externo também de grafita tem 9 mm de espessura. O volume da câmara é de 870 cm^3 . A ionização do ar é devida aos elétrons originários da grafita a partir da incidência da radiação. A alimentação é feita por alta tensão e fixa em 270 volts; o funcionamento desta câmara é descrito em detalhe na referência⁽⁹⁾.

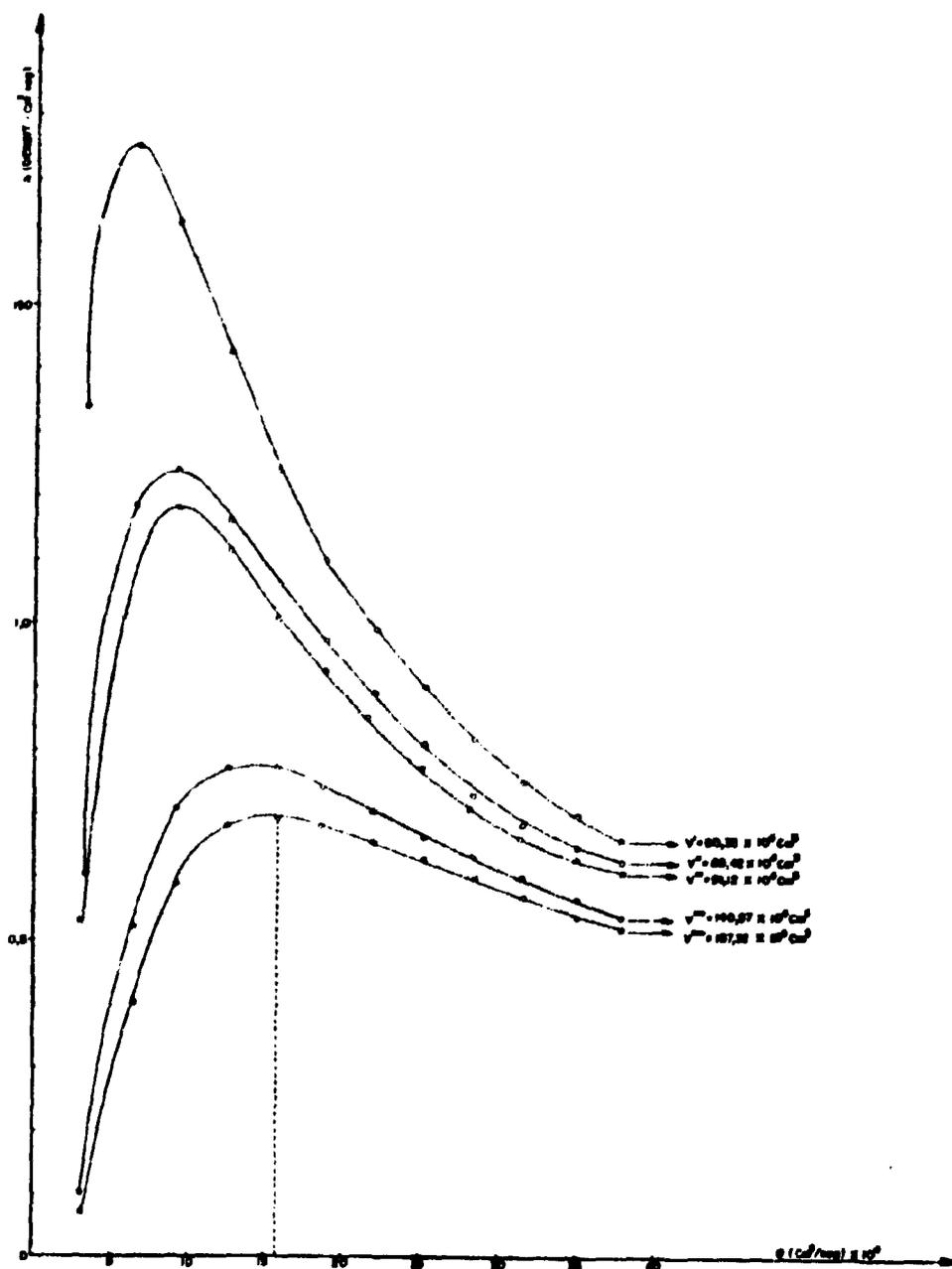
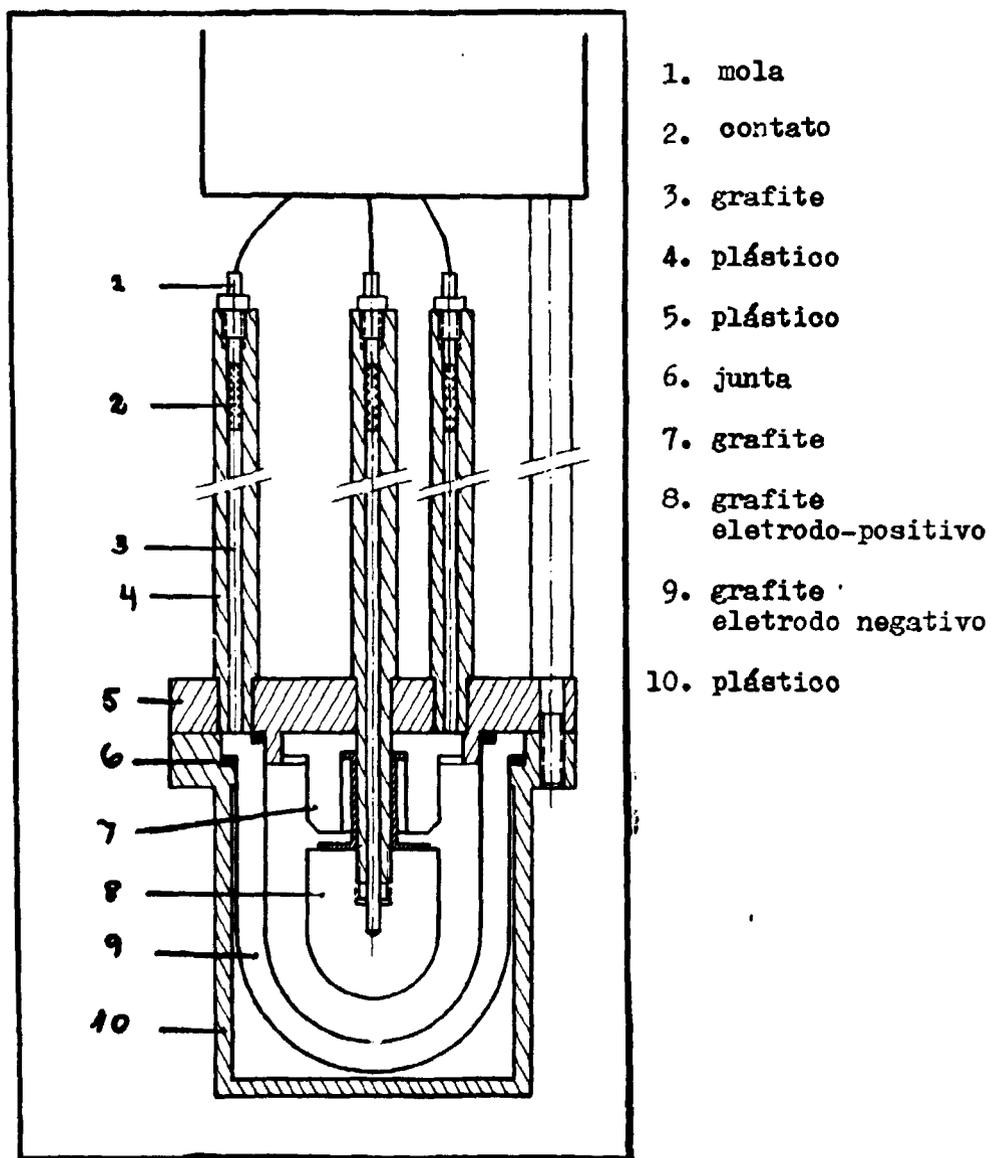


Figura 2.2.4-1 – Variação de atividade calculada do N^{16} em função da vazão do circuito primário para diversas posições do detector.



(9)
 Câmara de ionização de paredes de grafite, utilizada para detecção do N^{16} .

Figura 2.2.4-3 - Câmara de ionização de paredes de grafite⁽⁹⁾, utilizada para detecção do N^{16}

CAPÍTULO III

O MÉTODO EXPERIMENTAL

III.1 – Detalhes sobre Espectrometria Gama

Vários detectores usados em estudos nucleares produzem pulsos cujas alturas dependem da energia neles depositada pelas partículas ou radiações.

A energia da radiação gama emitida por um radioisótopo é característica dele e pode ter um ou mais valores distintos. A intensidade da radiação em cada energia pode ser determinada com um espectrômetro gama e constitui o que se chama espectro da fonte.

Os principais processos de interação de raios gama com a matéria, são três: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares elétron-positron^(11,12,13). Todos estes processos são funções contínuas da energia do fóton, através dos quais os fótons cedem toda ou parte de sua energia em eventos simples.

No efeito fotoelétrico, o fóton gama transfere toda a sua energia a um elétron ligado a um átomo. Este elétron é ejetado com uma energia que é igual a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron.

No efeito Compton os fótons incidentes são espalhados por elétrons com perda parcial de energia. Os elétrons são geralmente considerados livres e a energia do fóton incidente é repartida entre o elétron e o novo fóton. Este tipo de interação dá origem a uma distribuição contínua de energia nos elétrons secundários e portanto, um espectro similar das amplitudes de impulsos.

A produção de pares elétron-positron é possível quando o fóton incidente tem uma energia superior a 1,02 Mev., que é a energia de repouso de dois elétrons. Neste processo, que ocorre na presença do campo Coulombiano do núcleo, o raio gama desaparece com a criação de um par elétron-positron. A energia total do par de partículas será igual à energia do fóton primário e sua energia cinética será igual à diferença entre a energia total e a energia de repouso das duas partículas. Este par elétron-positron perde logo sua energia por ionização e por excitação, até parar. Em seguida o positron interage com um elétron e ocorre o fenômeno da aniquilação, que consiste na emissão de 2 fótons de energia 0,511 Mev cada um.

Para a medida dos raios gama no circuito primário de refrigeração (no ponto onde está localizada a câmara de ionização para o N^{16}) será utilizado como detector um cristal de Iodeto de Sódio ativado com Tório, acoplado a uma válvula fotomultiplicadora⁽¹⁴⁾.

O N^{16} emite raios gama com as energias de

8,87 Mev (1%)

7,11 Mev (5%)

6,14 Mev (68%)

tendo uma meia-vida de 7,35 s⁽¹⁷⁾.

Neste caso, o processo dominante de interação com o cintilador será a produção de pares. Esperamos então encontrar nos espectros de energia dos raios gama de N^{16} um pico correspondente à energia de 6,14 Mev (fotopico) e dois outros nas energias de (fotopico) 6,14 - 0,11 ≈ 5,83 Mev e

$6,14 - 1,02 = 5,12$ Mev, correspondendo ao escape de um ou de ambos os raios gama de 0,511 Mev produzidos na aniquilação do positron. Os picos correspondentes às energias de 7,11 e 8,87 Mev dificilmente serão vistos, devido às pequenas porcentagens de ocorrências das transições correspondentes.

III.2 – Descrição do Arranjo Experimental

O arranjo experimental para a obtenção dos espectros de energia e de tempo para a atividade observada, foi instalado no trocador de calor, ao lado do arranjo experimental existente, que acomoda a câmara de ionização que mede a atividade devida ao N^{16} . O diagrama de bloco do sistema de contagens é dado na Figura 3.2-1 e o detalhe da localização dos detectores pode ser visto na Figura 3.2-2.

O arranjo experimental consta da blindagem de chumbo contendo no interior o cintilador de NaI(Tl) acoplado à válvula fotomultiplicadora.

Com a blindagem de chumbo vários objetos são visados:

- a) colocar o detector na situação da câmara de ionização;
- b) colimar a radiação que vem do trocador de calor, para melhorar a resolução do espectro de energia dos raios gama. O cintilador vê a radiação através de uma fenda de aproximadamente 5 mm;
- c) limitar as taxas de contagem no detector, para evitar o empilhamento de pulsos.

O sistema contagem consiste de um detector de cintilação, válvula fotomultiplicadora 6342A (RCA), pré-amplificador, alimentação de alta tensão, amplificador linear e analisador multicanal. Este último foi usado com duas funções: analisador de altura de impulsos (provido de discriminador inferior) e analisador em tempo (com canais de 0,1 segundo de duração). Em ambos os casos, 1024 canais eram disponíveis para a coleta de dados. No caso dos espectros de tempo, os 1024 canais foram somados dois a dois, a fim de que os dados pudessem ser processados no computador digital IBM 1620 do IEA. A informação do analisador, obtida em fita impressa, foi transferida para cartões perfurados para o processamento de dados. O analisador multicanal e amplificador, foram colocados em local que não oferece riscos de radiação, no 1º andar do reator.

A largura dos canais em tempo do analisador multicanal foi aferida utilizando-se um pulsador controlado a cristal, verificou-se que a largura dos canais empregada para a análise das curvas de decaimento é correta a menos de 0,1%. Na Figura 3.2-3 vêem-se o analisador multicanal e o equipamento eletrônico auxiliar.

III.3 – Medidas Realizadas

As medidas experimentais foram realizadas em diferentes condições:

- a) Na potência de 500 Kw o reator foi desligado, a bomba do circuito primário de refrigeração permaneceu ligada. Com o cintilador NaI(Tl) 2" x 2", linha de base do analisador em aproximadamente 3 Mev., foi obtida a curva de decaimento da atividade observada. Figura 3.3-1.
- b) Na potência de 1 Mw, o reator e a bomba do circuito primário de refrigeração foram desligados simultaneamente. O disparo do analisador foi feito com a bomba do circuito primário completamente parada, isto se deu após 13,5 s. Com o cintilador NaI(Tl) 2" x 2", linha de base do analisador em aproximadamente 3 Mev, foi obtida a curva de decaimento da atividade observada. Figura 3.3-2.

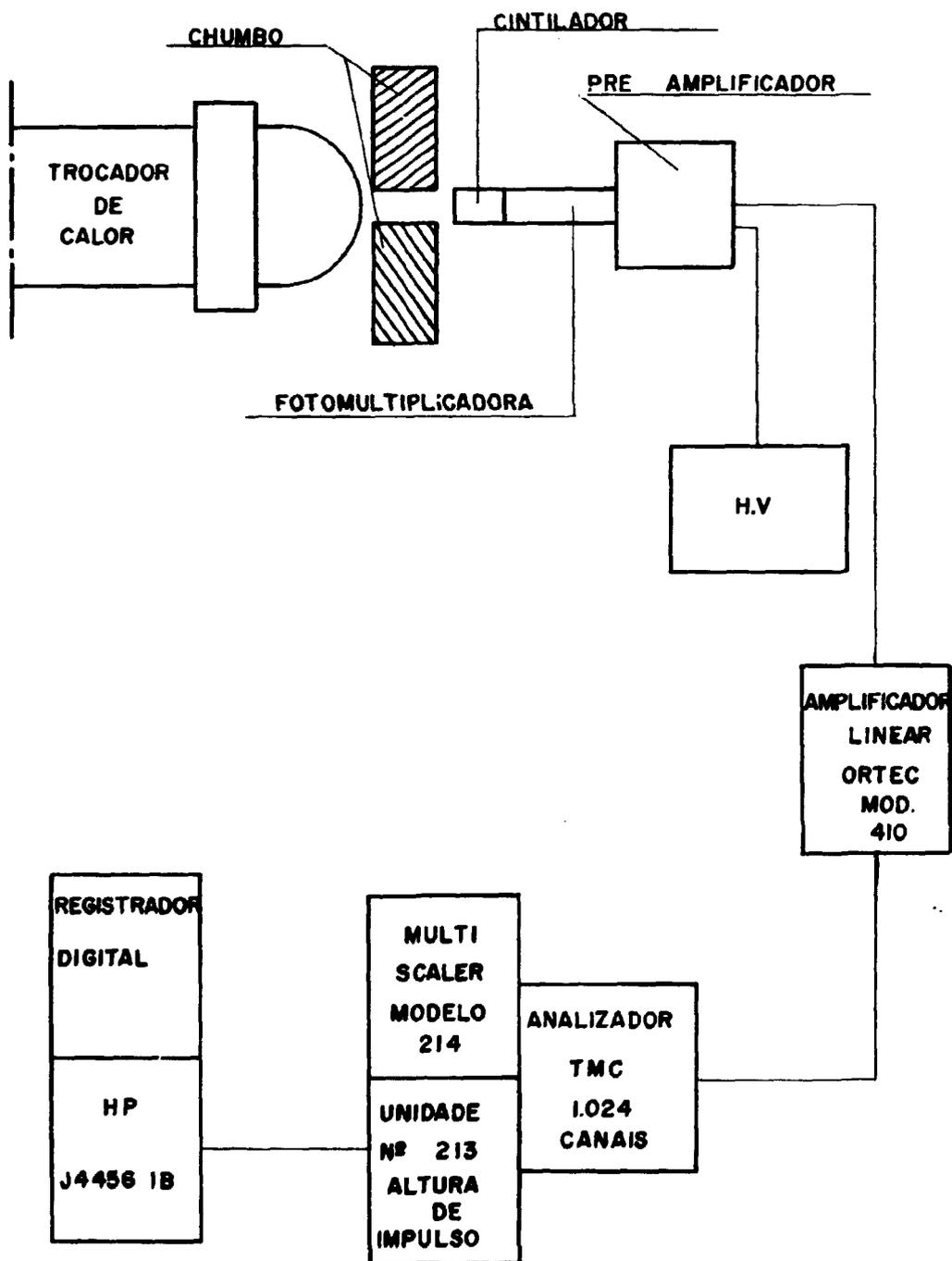


Diagrama de bloco do sistema de contagens

Figura 3.2.1 - Diagrama do bloco do sistema de contagens.



Figura 3.2-2 — Vista do detetor e parte do circuito primário do sistema de refrigeração.

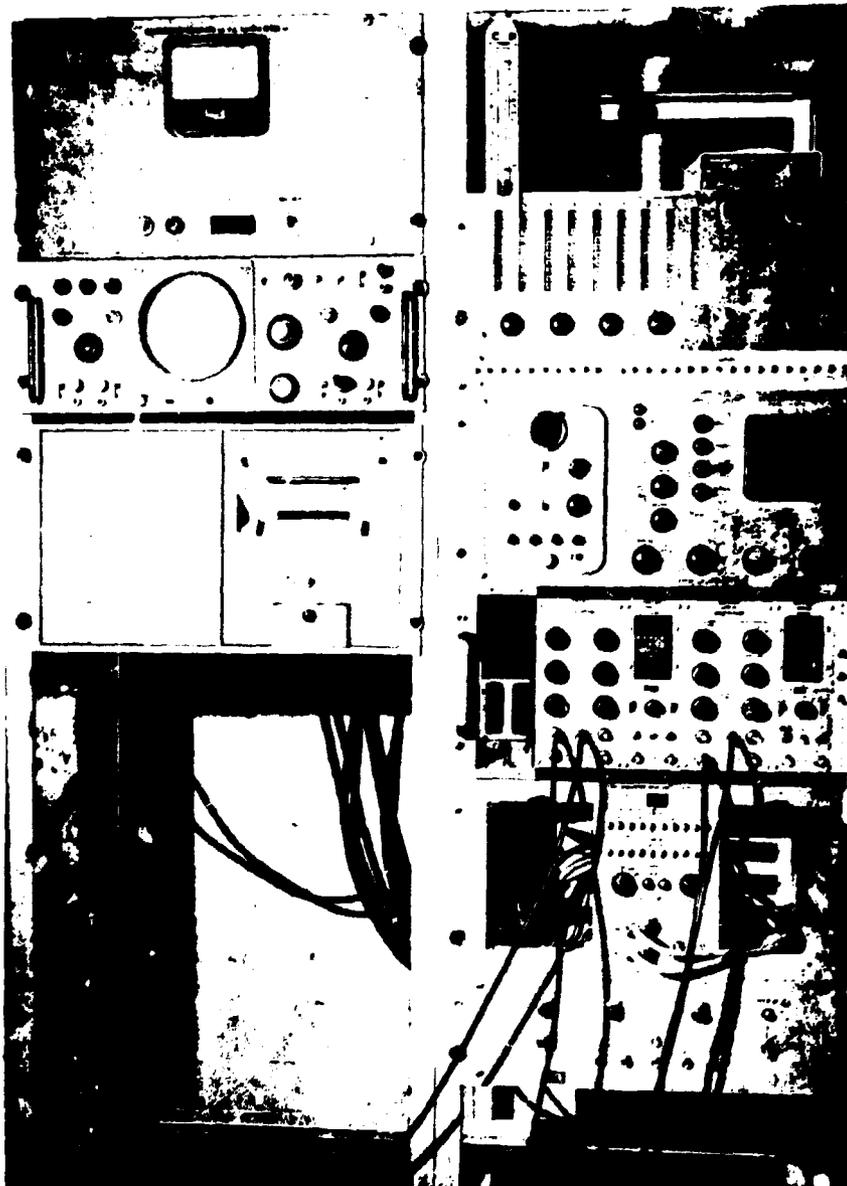


Figura 3.2-3 — Analisador multicanal e equipamento eletrônico auxiliar.

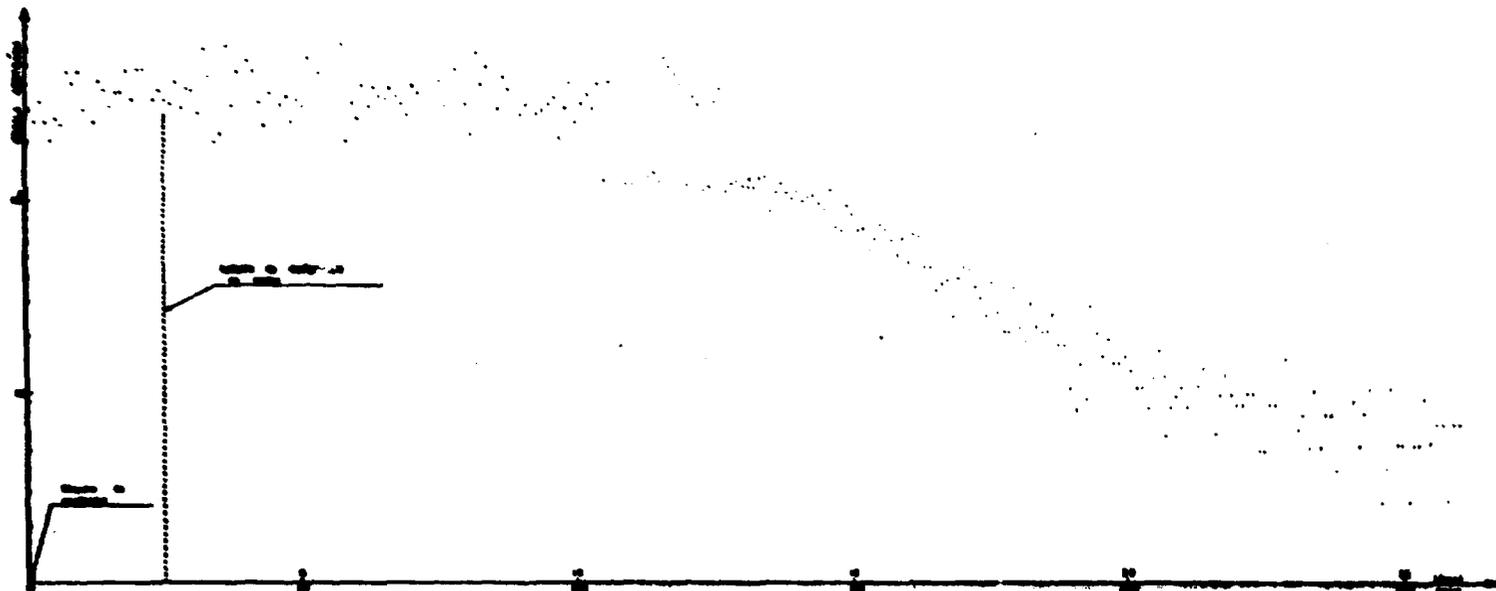


Figura 3.3-1 — Decaimento da atividade observada com Reator a 500 Kw. Bomba do circuito primário de refrigeração permanece ligada após o "scram" do Reator.
 Cintilador NaI (TI) 2" x 2"
 Linha de base do analisador em aproximadamente 3 Mev.

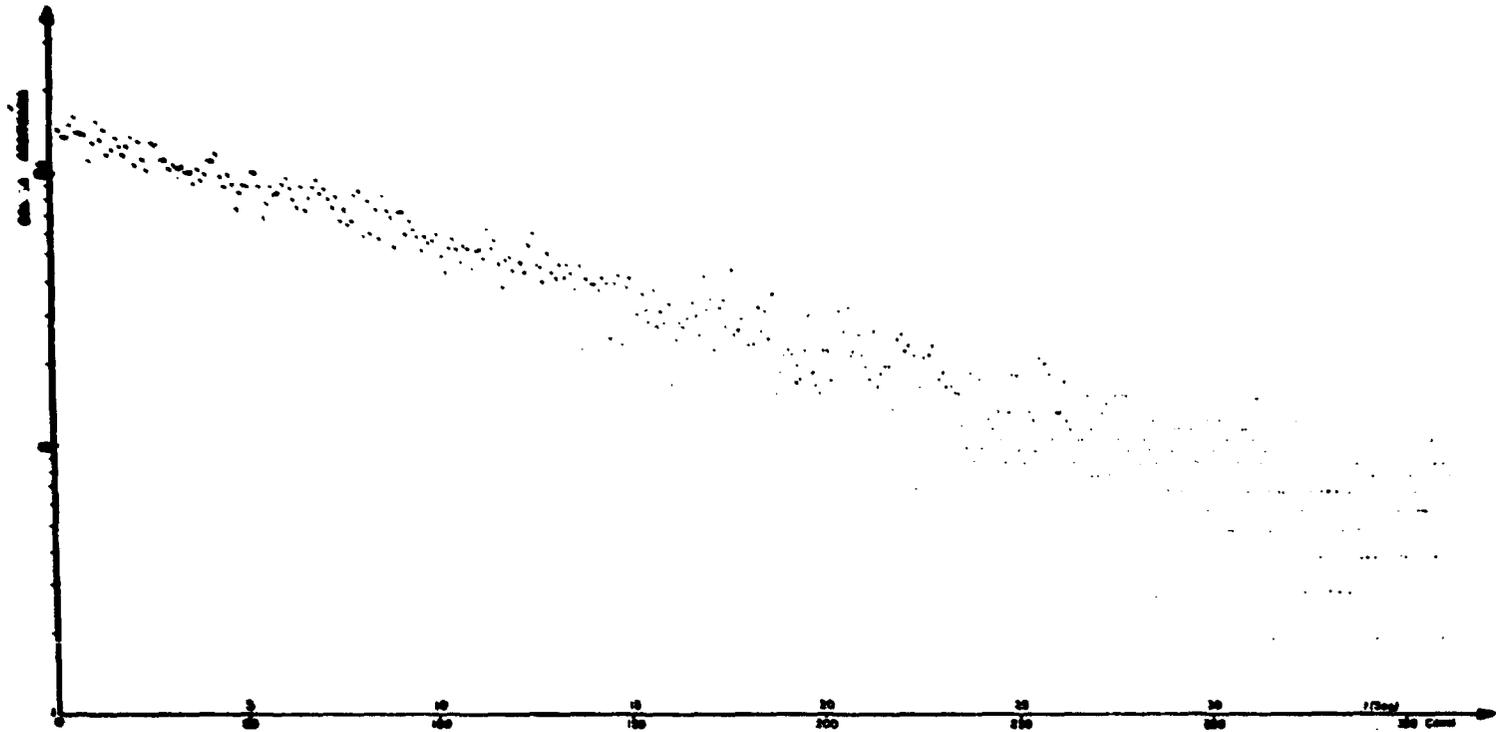


Figura 3.3-2 - Decaimento da atividade observada com Reator 1 Mw. Disparo do analisador 13,6 seg após "scram" do Reator (Bomba do circuito primário completamente parada).

Cintilador NaI (TI) 2" x 2"

Linha de base do analisador de aproximadamente 3 Mev.

- c) Na potência de 1 Mw, com o cintilador NaI(Tl) 3" x 3", foi obtido o espectro de altura de impulso. Figura 3.3-6.
- d) Na potência de 1 Mw, o reator e a bomba do circuito primário de refrigeração foram desligados simultaneamente. Com o cintilador NaI(Tl) 3" x 3", linha de base do analisador aproximadamente 3 Mev, foi obtida a curva de decaimento da atividade observada. Figura 3.3-3.
- e) Na potência de 2 Mw, com o cintilador NaI(Tl) 2" x 2", foi obtido o espectro de altura de impulso. Figura 3.3-5.
- f) Na potência de 2 Mw, o reator e a bomba do circuito primário de refrigeração foram desligados simultaneamente. Com o cintilador NaI(Tl) 2" x 2", linha de base do analisador aproximadamente 3 Mev, foi obtida a curva de decaimento da atividade observada. Figura 3.3-4.

CAPÍTULO IV

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

VI.1 – Espectros de Energia dos Raios Gama

Os espectros de energia das Figuras 3.3-5 (espectro completo) e 3.3-6 (energias acima de 3 Mev aproximadamente) são características do N^{16} (5). Os picos referidos nas Figuras acima mencionadas podem ser identificadas como sendo:

- 6,14 Mev fotopico do N^{16}
- 5,62 Mev pico de escape
- 5,12 Mev pico de duplo escape

Como já vimos na secção III.3 estes espectros foram obtidos com cintiladores de dimensões diferentes 2" x 2" e 3" x 3". Como era de se esperar o cintilador 3" x 3" permite uma melhor resolução do fotopico e mostra indícios na presença do pico 7,1 Mev. Em nenhum dos dois casos aparecem indícios do pico correspondente à energia de 8,87 Mev. As elevadas taxas de contagem com que foram obtidos esses espectros e o uso de uma geometria de contagem não otimizada, mascaram a possível presença dos isótopos emissores de radiação gama, com energias menores que 3 Mev (Al^{28} , Mg^{27} , Na^{24} , O^{19} , A^{41} , ...)

IV.2 – Espectros de Tempo

Com o espectro de tempo é possível, também, reconhecer o isótopo N^{16} .

Várias condições foram impostas para a obtenção destes espectros, como foi dito anteriormente. (Figuras: 3.3-1, 3.3-2, 3.3-3 e 3.3-4).

O gráfico da Figura 3.3-1 mostra que foi acompanhado, de fato, o decaimento da potência do reator, e não o decaimento do N^{16} ; isto é consequência de não ter sido desligada a bomba do circuito

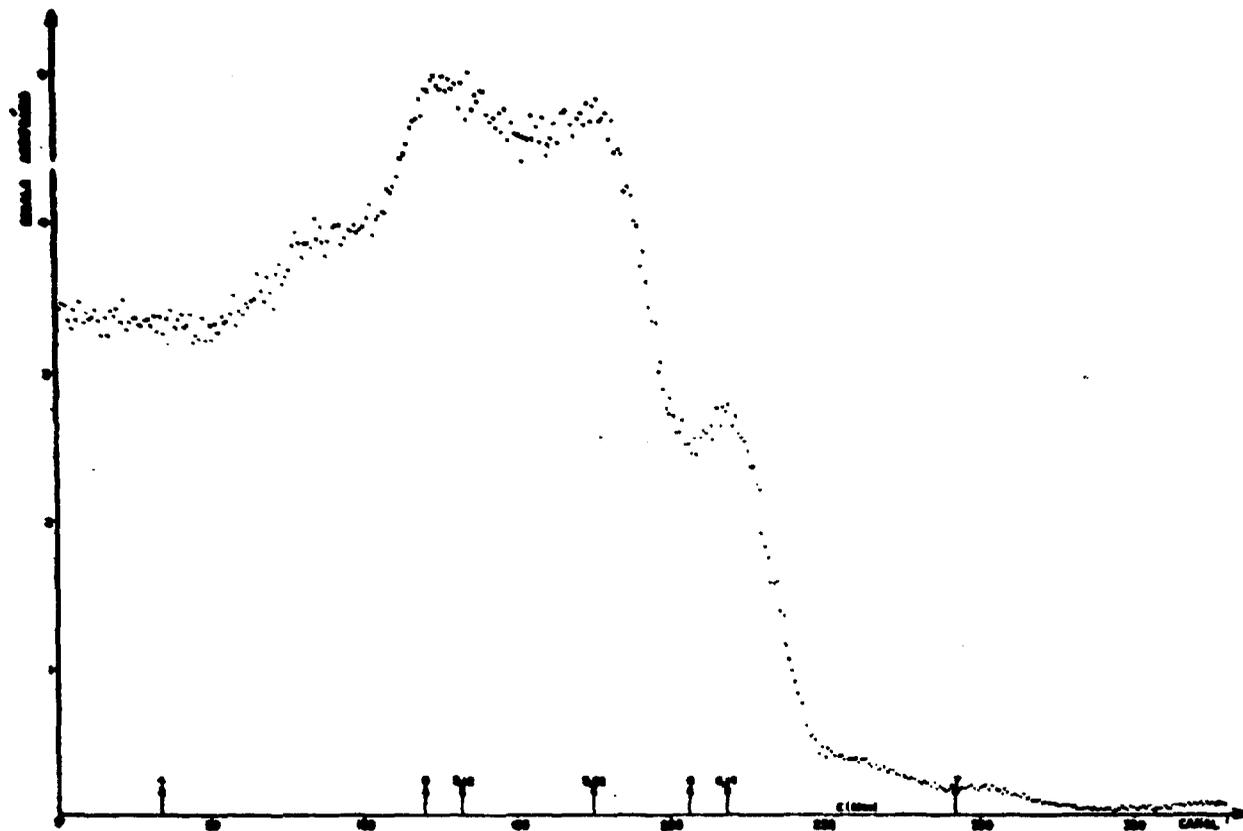


Figura 3.3-6 - Espectro de altura de impulso obtido com cintilador 3" x 3". Potência do Reator 1 Mw.

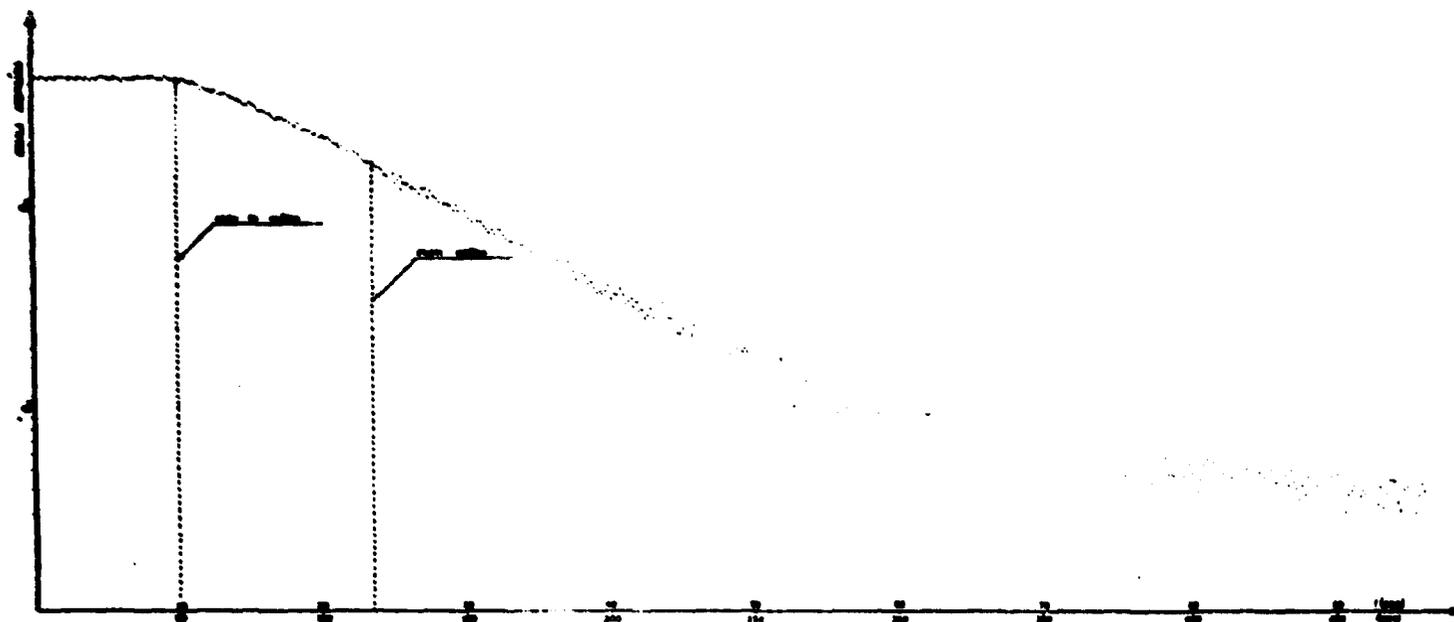


Figura 3.3-3 — Decaimento da atividade observada com o reator em 1 Mw. Reator e bomba do circuito primário desligados simultaneamente.
 Cintilador NaI (TI) 3" x 3"
 Linha de base do analisador aproximadamente 3 Mev.
 Disparo do analisador aproximadamente 10 seg. antes dos desligamentos do reator e bomba simultânea.

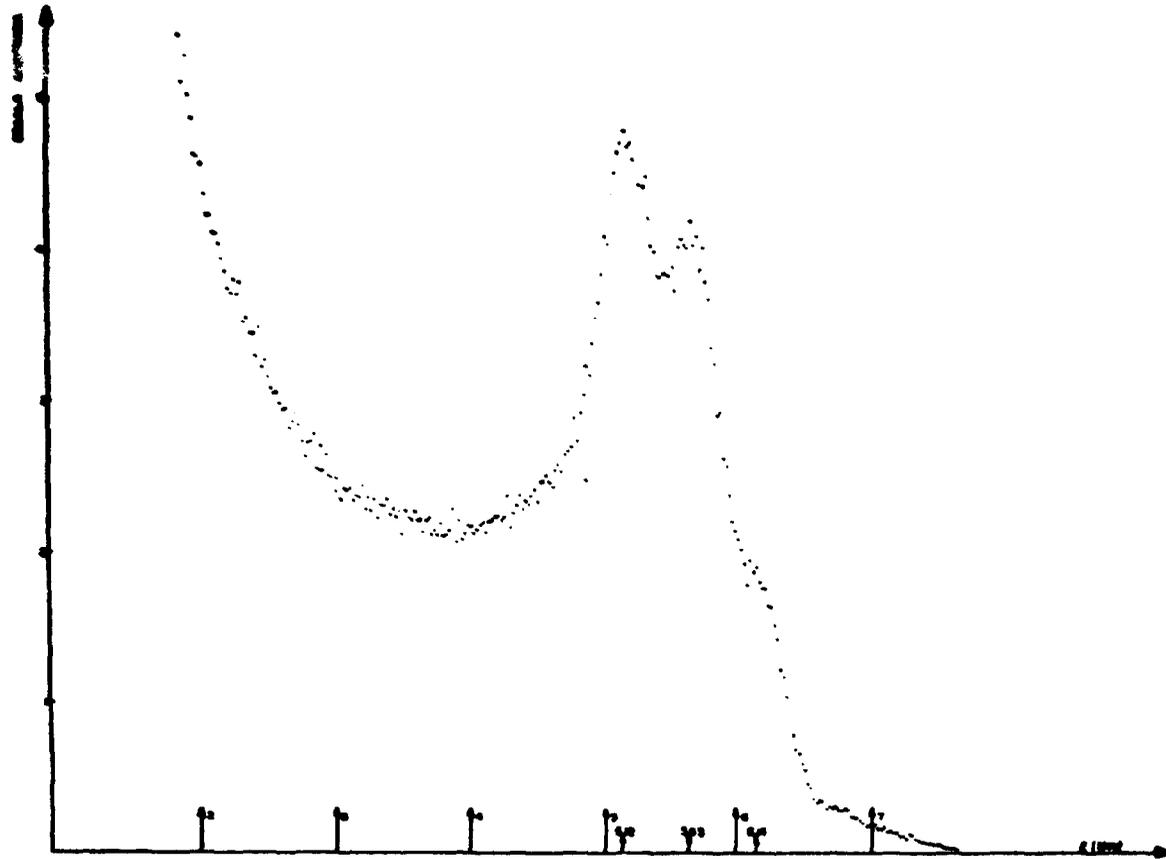


Figura 3.3-5 — Espectro de altura de impulso obtido com oscilador 2' x 2'. Potência do Reator 1 Mw.

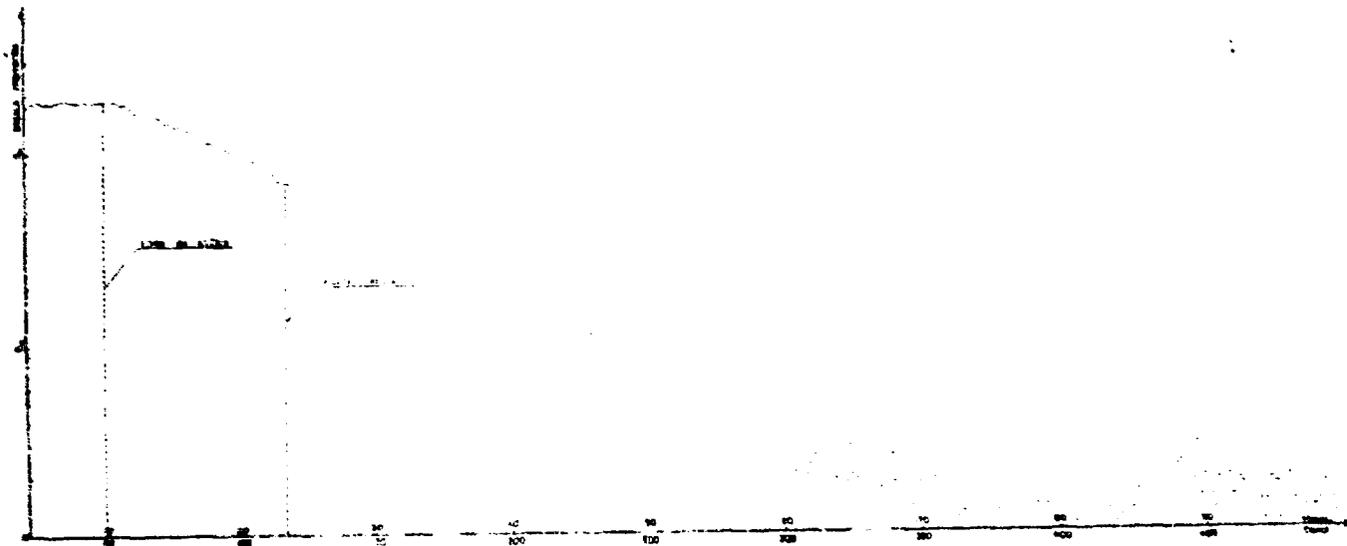


Figura 3.3-4 — Decaimento da atividade observada com o reator em 2 Mw. Reator e bomba do circuito primário desligados simultaneamente
 Cintilador NaI (TI) 2' x 2'
 Limite superior de energia aproximadamente 3 Mev.
 Disparo do analisador aproximadamente 4,5 seg. antes dos desligamentos do reator e bomba simultaneamente.

primário de refrigeração, quando o reator foi desligado. Por outro lado nesta Figura, o tempo decorrido entre o desligamento do reator e o início da queda da atividade fornece uma estimativa bastante razoável de t_2 ($\approx 9,2$ s) que pode ser utilizada para se determinar a vazão do circuito primário.

Decidiu-se então que seria interessante o desligamento simultâneo do reator e da bomba do circuito primário, e o disparo do analisador fosse feito com a bomba do circuito primário completamente parada. Obteve-se a curva de decaimento da água parada e o ajuste desta curva por mínimos quadrados forneceu o valor $\lambda = 0,935 \text{ s}^{-1}$.

Os gráficos das Figuras: 3.3-3 e 3.3-4, foram obtidos em condições diferentes das anteriores. Desligou-se o reator e a bomba do circuito primário, simultaneamente, sendo o analisador disparado segundos antes do desligamento. Daí o fato de estas Figuras apresentarem uma parte plana no seu início.

O transiente da bomba certamente interfere no decaimento da atividade do N^{16} , na região de desligamento. Além disso há a possibilidade imediata de algum outro isótopo radioativo estar decaindo juntamente com o N^{16} . Então, não se pode precisar a partir de que canal se tem um decaimento puramente exponencial. Por esta razão, os decaimentos das Figuras 3.3-3 e 3.3-4 foram ajustados diversas vezes por mínimos quadrados retirando-se sucessivamente dez pontos do início das curvas. Obtivemos assim uma curva que dá a constante do decaimento em função do início da análise. Este resultado é apresentado na Figura 4.2-1. De fato, para os primeiros pontos desta Figura, temos uma variação da constante de decaimento em função ao início da análise. Esta variação é possivelmente devida aos transientes da bomba. Em seguida temos uma região onde as duas curvas coincidem e em que a constante de decaimento não varia, indicando que apenas um isótopo radioativo está presente ou pelo menos é altamente dominante. Para explicar a divergência entre essas duas curvas, a região acima de 35 s, lembremos o caso (3) da Figura 4.2-1 corresponde a energias menores que 3 Mev. Nesta região o O^{19} que tem uma meia-vida de 29,4 s poderia estar concorrendo com o N^{16} fazendo com que a constante de decaimento determinada pelo método de mínimos quadrados se tornasse menor. Entretanto não se pode excluir a possibilidade de se tratar apenas de uma flutuação estatística dos resultados.

A diferença entre os casos (2) e (3) para o caso (1) da mesma Figura não foi bem compreendida.

IV.3 – Análise das Curvas de Decaimento

As curvas de decaimento foram analisadas com auxílio do programa MCLE⁽¹⁰⁾. Este programa ajusta uma combinação linear de exponenciais pelo método de mínimos quadrados. A expressão minimizada é do tipo:

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i [y'(t_i) - y(t_i)]^2$$

onde:

$$\omega_i = \text{é o peso de cada medida, } \omega_i = 1/\sqrt{y'(t_i)}$$

$$y'(t_i) = \text{contagem observada no canal } i$$

$$y(t_i) = A_c + \sum_{j=1}^K A_j e^{-B_j t_i} = \text{valor calculado da função ajustada por mínimos quadrados.}$$

No nosso caso, todas as curvas foram ajustadas para uma expressão contendo uma única exponencial mais um termo-constante.

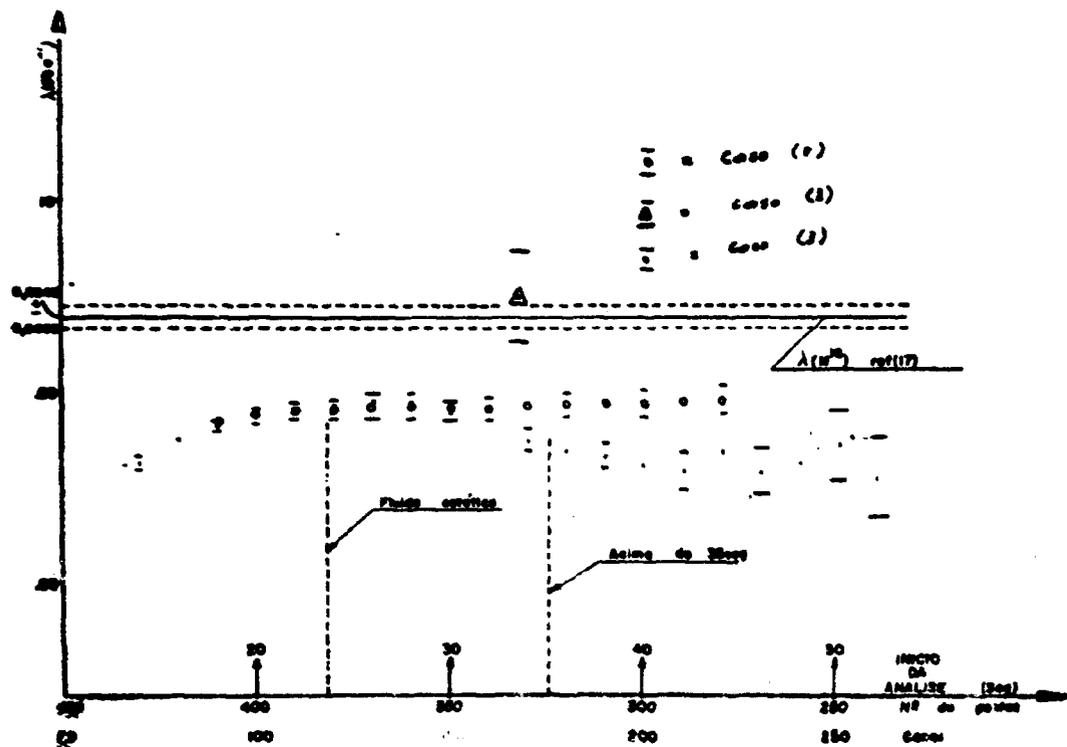


Figura 4.2-1 - Variação da constante de decaimento em função do instante do início da análise. Casos:

- (1) cintilador 2" x 2", $E > 3$ Mev, disparo do analisador após parada total do refrigerante; potência do reator 500 Kw.
- (2) cintilador 3" x 3", $E > 3$ Mev, reator e bomba do primário desligados simultaneamente; potência do reator 1 Mw.
- (3) cintilador 2" x 2", $E < 3$ Mev, reator e bomba do primário desligados simultaneamente; potência do reator 2 Mw.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Foi calculada uma posição para a câmara de ionização que monitora a potência do reator IEAR-1 pela atividade do N^{16} , onde as flutuações de vazão praticamente não interferem com a atividade medida. O tempo necessário para que a água presente no caroço do reator num dado instante se desloque até o detetor foi calculado em 8,9 s. Experimentalmente este intervalo foi estimado $9,2 \pm 0,2$ s (Figura 3.3-1). Temos então como informação suplementar uma medida da vazão, desde que se conheça o volume da tubulação compreendida entre o caroço do reator e o detetor. Ao mesmo tempo é preciso observar que a monitoração da potência pela atividade do N^{16} é um método que responde às flutuações do fluxo de nêutrons do reator com atrasos da ordem de 10 s, e portanto, não pode prescindir da existência de outros canais, de resposta rápida.

Não há dúvida que a radiação gama predominante na posição escolhida para a câmara de ionização provém do N^{16} . O valor médio observado da constante de decaimento dessa radiação difere de 4% do valor geralmente aceito para esse parâmetro que é $0,094 \text{ s}^{-1}$ (17). Os espectros de energia obtidos também são comparáveis com os encontrados na literatura (5). Como neste trabalho, o detetor foi colocado diretamente junto ao trocador de calor do circuito primário de refrigeração, as taxas de contagens extremamente elevadas prejudicaram a resolução para energias menores que 3 Mev. Seria desejável obter um maior número de espectros de tempo da atividade detetada, para melhorar a precisão na determinação da constante de decaimento, e a obtenção de espectros de energia com melhor resolução na zona abaixo de 3 Mev.

APÊNDICE I

ATN 16

Atividade em N^{16} no circuito primário de refrigeração do IEAR-1.

FINALIDADE

O programa fornece a atividade em N^{16} no circuito primário de refrigeração do IEAR-1, que foi dividido em cinco volumes distintos. Através do conhecimento dessas atividades, estudamos o posicionamento de uma câmara de ionização. O alto limiar da reação $O^{16}(n,p)N^{16}$ (11 Mev) garante que a formação do N^{16} depende unicamente do fluxo de fissão. A medida de atividade do N^{16} fornece, então, uma indicação da taxa de fissão, ou seja, da potência global do reator.

RESTRICÇÕES

O valor do expoente não deve ultrapassar de -227.

TEMPO DE PROCESSAMENTO

Para compilação e execução 3 minutos, inclusive entre compilação e execução.

POSIÇÕES REQUERIDAS

Programa principal 1876.

UTILIZAÇÃO

O programa é escrito em FORTRAN II-D. Não utiliza sub-rotinas, apenas funções de biblioteca. O cálculo da atividade nos citados volumes pode ser estendido a outros núclídeos, para isso basta que substituamos o valor da constante de decaimento (C) na fórmula dada.

Foi considerada somente uma parte do circuito primário de refrigeração do IEAR-1, devido a meia-vida dos núclídeos considerados ser curta (para volumes maiores não mais existem). Significado dos coeficientes e das variáveis:

Coefficientes:

$B = \text{produto } N$ onde $N = \text{número de núcleos/cm}^3 \text{ do isótopo pai.}$
 $\bar{\tau} = \text{seção eficaz média de ativação.}$
 $\phi = \text{fluxo médio no caroço do reator.}$

$C = \text{a constante de decaimento do núclídeo.}$

$D = \text{o volume de ativação do caroço do reator.}$

Variáveis:

$V(1) = \text{volume da entrada do primário no porão até a bomba do primário.}$

$V(2) = \text{volume da bomba do primário até o cabeçote do trocador.}$

$V(3) = \text{volume do cabeçote até a entrada do trocador.}$

$V(4) = \text{volume da entrada do trocador até a saída do trocador de calor.}$

$V(5) = \text{volume da saída do trocador até o fim do cabeçote.}$

$Q(J), J = 1, 2, \dots, 12 = \text{vazão do circuito primário de refrigeração.}$

Fórmula Utilizada:

$$A = B [1 - \text{EXP}(-CD/Q)] \text{EXP}(-CV/Q)$$

ENTRADA DE DADOS

Os dados entram por cartões perfurados IBM. Total de 5 cartões, sendo que o primeiro cartão contém 3 dados que são os coeficientes, o segundo cartão contém 4 diferentes volumes e três cartões, contendo cada um 3 dados que são as vazões.

Os cartões de dados têm que entrar nessa ordem no computador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PENTEADO FILHO, Azor Camargo e Santos, M. D. S. – "Operational experience and utilization of the brazilian 5 Mw. swimming pool reactor," publicação IEA, nº 44, setembro 1961, pg. 1 a 2.
2. The Babcock & Wilcox Co., New York, Open Pool Research Reactor Instruction Book, August 1967, pg. 17-36.
3. TOLEDO, Paulo Saraiva e Santos, M. D. S. – "A Power Calibration Method Using the Xenon Poisoning", publicação IEA, nº 5, 1958.
4. PIERONI, R. R. e outros "Níveis de Radiação Observados com o IEAR-1, operando em Potência", publicação IEA, nº 34, 1960, pg. 3.
5. THIBERGHIE, R. – "Chaîne de puissance "Azote 16" sur le circuit de réfrigération de Mélusine", 1962, Thèse présentée pour obtenir le grade d'ingénieur docteur, CEA – C.E.N.G. – France, 1962.
6. DUNCKER, E. E. and Wallace, W. D. – "Determination of Reactor Power by Coolant Activity Monitoring Nuclear Science and Engineering", 1958.
7. SOMMER, M. – "Automatic Control of the Average Core Flux by Measuring N¹⁶ coolant Activity at the FRM Munich Research Reactor". Conferência de Genebra, 1964.
8. KROCK, C. E. Webster – "Nitrogen 16 Monitoring, WCAC 6037, 1960.
9. THIBERGHIE, R. – "Chambre d'ionization à murs de graphite", CEA – C.E.N.G. Int/Pi/171/70.
10. PAIANO, Myriam de Carvalho e Cohenca, J. M. – "Mínimos quadrados para combinação linear de exponenciais" – publicação IEA, nº 106, 1965. pg. 3.
11. PRICE, W. J. – "Nuclear Radiation Detection".
12. CROUTHAMEL, G. E. – "Intrinsic Variables in Applied Gamma-Ray Spectrometry", 2º volume, in International Series of Monographs on Analytical Chemistry, General Editors: R. Belcherand and S. Gordon – Pergamon Press, 1960.
13. EVANS, R. D. – The Atomic Nucleus
14. MURRAY, R. B. – Nuclear Instruments and Their Uses.
15. GARIOD, Roger et autres – "Contrôle de puissance des piles à eau mesure d'activité en azote-16" – Rapport CEA R-2533 – C.E.A. – C.E.N.G., 1964.
16. STEHW, K. John et al. – Nuclear Cross Section – BNL, 325, Volume 1, Second Edition, Supplement, nº 2 – 1964.
17. AJZENBERG, F. et al. – Nuclear Physics, 11, 1 (1959).

