

DETERMINAÇÃO DA MASSA CRÍTICA E APROXIMAÇÃO DA  
CRITICALIDADE DO REATOR IPEN/MB-01

P.R.P.Coelho, J.R.Maiorino, M.A.P.Alves, A.A.Silva,  
U.D.Bitelli, P.S.B.Ferreira e H.Yoriyaz

Divisão de Física de Reatores  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo - SP

Resumo

Neste trabalho é descrito o primeiro carregamento do reator IPEN/MB-01, quando se determinou experimentalmente sua massa crítica, pela técnica do inverso da multiplicação. Comparando-se o resultado experimental obtido, 6,66 kg de U-235, com o valor previsto teoricamente, 6,34 kg de U-235, utilizando o código HAMMER-CITATION, baseado na teoria de difusão, observou-se uma discrepância de 5% no valor da massa crítica. A configuração sem barras ( $k_{ef}=1$ ), foi calculada pelos códigos HAMMER-CITATION tendo-se obtido  $k_{ef}=1,007$ . A primeira criticalidade foi atingida em 9/11/88 e sua confirmação foi realizada para duas configurações distintas de barras de controle. A discrepância entre os valores de excesso de reatividade medido e previsto pelo projeto é de 700 pcm, que é equivalente a uma incerteza na previsão da criticalidade de 0,7%.

Abstract

This work describes the first fuel load of the IPEN/MB-01 nuclear reactor when its critical mass value was obtained experimentally by the inverse multiplication factor method. The comparison between the experimental result, 6,66 kg of U-235, and the theoretical result from Hammer-Citation code, 6,34 kg of U-235, shows a discrepancy of 5% of the critical mass value. The critical configuration without control rods calculated by Hammer-Citation code is  $k_{eff}=1,007$ . The first criticality was achieved on 11/09/88 and its confirmation was realized for two different control rods configuration. The discrepancy between the theoretical and experimental reactivity excess values is 700 pcm what is equivalent to an uncertainty of 0,7% in the criticality foresight.

## 1. Introdução

Ao se carregar pela primeira vez um reator, não se sabe com precisão o quanto de combustível será necessário para colocar o reator crítico, bem como em que arranjo de elementos combustíveis, de moderador e de posição de barras de controle resulta um reator crítico. Estimativas desses valores são obtidas através de cálculos baseados em teoria de reatores. A massa crítica do reator para a configuração estabelecida é determinada realizando um experimento com o qual se obtém a criticalidade de forma segura e controlada evitando que esta seja inesperada.

A operação de carregamento do núcleo do reator é uma operação cercada de rígidos critérios de segurança sugeridos pela Agência Internacional de Energia Atômica [1]; no caso da Unidade Crítica IPEN/MB-01, acresce-se o fato de ser o primeiro reator projetado e construído com tecnologia nacional, o que justifica o extremo cuidado com que se levou esse reator à criticalidade.

O IPEN/MB-01 é um reator de potência zero (unidade crítica) que tem por finalidade o estudo de núcleos de reatores de potência moderados à água leve. Seu carregamento é feito colocando-se vareta por vareta de combustível, possuindo grande flexibilidade na configuração geométrica do arranjo de combustível para possibilitar facilidades na realização de experimentos para medidas de parâmetros de reatores. As características do projeto nuclear do primeiro núcleo do reator são discutidas em outro trabalho apresentado neste encontro [2] e, por isso, não serão aqui abordadas.

Nas seções seguintes são apresentados o método de determinação da massa crítica do reator, o trabalho desenvolvido para a obtenção da primeira criticalidade desse reator, os resultados experimentais obtidos e as comparações com previsões do projeto nuclear.

## 2. Descrição do Método

O experimento de aproximação à criticalidade baseia-se na técnica do inverso da multiplicação, a qual consiste em prever a criticalidade a partir das respostas de detectores estrategicamente localizados em um arranjo subcrítico, com uma fonte de nêutrons externa, para várias etapas de carregamento. Em seguida, apresenta-se um resumo da teoria que fundamenta a realização desse experimento, pois ela é bem estabelecida na literatura e, maiores detalhes sobre a mesma, podem ser vistos nas referências [3] e [4].

Num arranjo subcrítico, no qual esteja presente uma fonte de nêutrons, os nêutrons emitidos por esta são multiplicados através de fissões no combustível. A multiplicação de um conjunto subcrítico é definida como a razão entre o número total de nêutrons, incluindo nêutrons de fissão e da fonte, e o número de nêutrons da fonte. Demonstra-se [4] que, num reator subcrítico com fonte de nêutrons, a multiplicação, após um tempo suficientemente longo para atingir o equilíbrio é dada por:

$$M = \frac{1}{1 - k_{eff}} ; \quad (1)$$

onde  $k_{eff}$  é o fator de multiplicação efetiva. À medida que o reator aproxima-se da criticalidade,  $k_{eff}$  tende para 1 e, da equação (1) verifica-se que  $1/M$  tende para 0; assim sendo, fazendo-se um gráfico de  $1/M$  versus o parâmetro que está afetando a multiplicação pode-se extrapolar o valor desse parâmetro para o estado crítico, por exemplo, o número de varetas combustíveis para obter a criticalidade (massa crítica).

Por outro lado pode-se mostrar que para um detector de nêutrons localizado próximo ao núcleo, a multiplicação também pode ser expressa por,

$$M \approx \frac{C_i}{C_o} \quad (2)$$

onde  $C_i$  é a taxa de contagem após a  $i$ ésima etapa de carregamento e  $C_o$  é a taxa de contagem no início do carregamento (primeira etapa ou etapa de referência). A forma da curva  $1/M$  citada é função da localização do detector em relação à fonte e também do modo como é carregado o núcleo ( $k_{eff}$  é função do "buckling" geométrico), entre tanto o valor do parâmetro para o estado crítico final previsto por todos os detectores será o mesmo, independente da posição dos mesmos.

Antes de realizar uma próxima etapa deve-se extrapolar graficamente qual é a posição prevista para a criticalidade, para dessa forma evitar que ela ocorra de modo imprevisto. Esta extrapolação pode subestimar ou superestimar o valor da massa crítica devido a variações nas formas dessas curvas de  $1/M$ .

### 3. Descrição do Carregamento

O processo de carregamento do núcleo inclui os cuidados e a realização de medidas sugeridas pelas normas de segurança [1] e implica em utilizar a sequência de etapas que leva ao menor incremento de reatividade por etapa.

O núcleo do reator IPEN/MB-01 [5] tem a forma de um paralelepípedo, com as dimensões de 39 X 42 X 54,6 cm<sup>3</sup>, composto de 680 varetas combustíveis encamisadas com aço inox e contendo em seu interior pastilhas de UO<sub>2</sub> com 4,3% de enriquecimento no isótopo U-235.

As varetas combustíveis possuem um comprimento de 119,4 cm, sendo que a parte ativa é de 54,6 cm, e espaçadas de 1,5 cm. Além das 680 varetas, o núcleo possui 48 tubos guias de aço inox destinados a receber as varetas de segurança e controle, as quais foram, respectivamente, dois conjuntos: 24 varetas de B4C (segurança) e 24 varetas compostas de uma liga de Ag, In e Cd (controle).

O carregamento do núcleo foi realizado em dez etapas nas quais, foram realizadas medidas com cinco detectores proporcionais do tipo BF3 colocados externamente ao núcleo, nas posições estratégicas indicadas nas figuras 1 e 2. Os detectores são iguais (marca CENTRONIC, modelo 31EB70/25G) para que medidas sejam função

apenas da posição dos detectores. Com essa distribuição dos detectores obtêm-se vários arranjos no que diz respeito a posição relativa entre a fonte de nêutrons, varetas combustíveis, as barras de controle e segurança e os detectores.

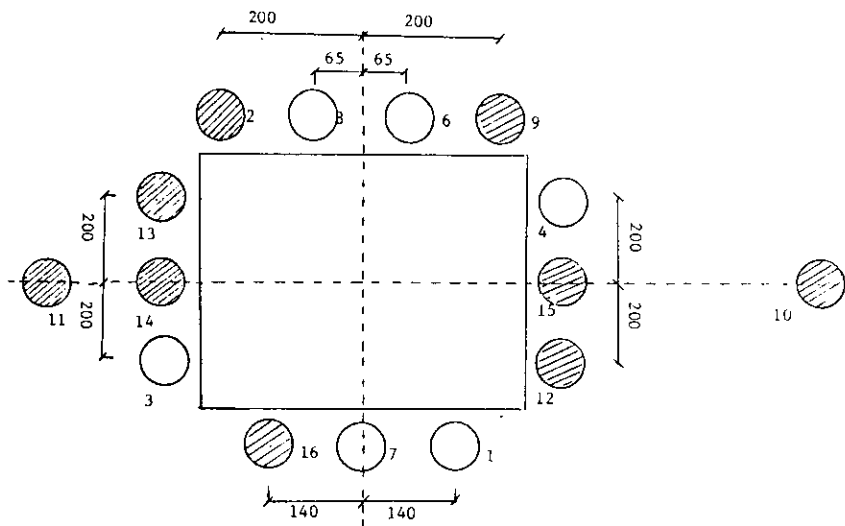


Figura 1. Posicionamento dos Detectores - Vista Superior.  
 Círculos branco - detectores experimentais  
 Círculos hachurados - detectores da Instrumentação nuclear do reator.

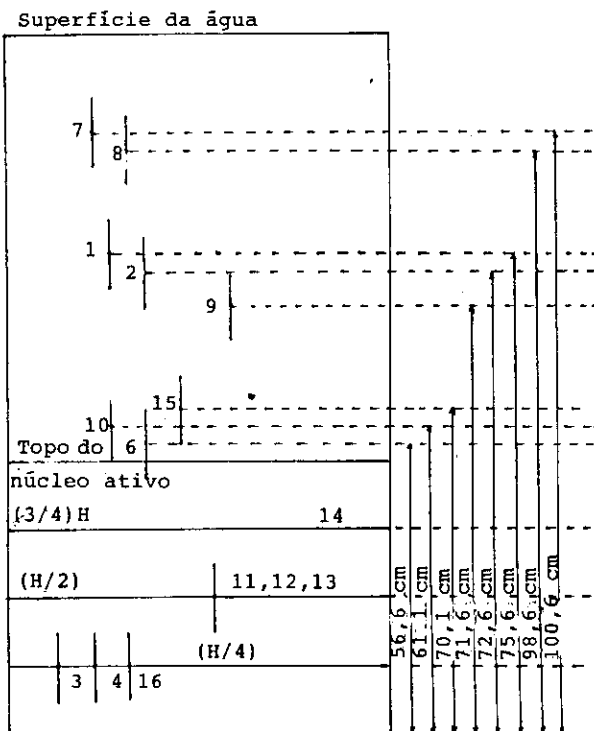


Figura 2 - Posicionamento dos Detectores - Corte Longitudinal.

Assim sendo, com esses vários detectores e utilizando simetria de carregamento, evita-se que efeitos geométricos levem a erros de interpretação dos resultados obtidos das curvas  $1/M$  e previne-se contra falha de equipamentos. Deve-se salientar que dependendo do posicionamento do detector e de sua sensibilidade, pode ocorrer que o detector não seja sensível ao início do carregamento, ou então sature (em taxa de contagem) antes da última etapa de carregamento.

A escolha do número de etapas de carregamento, número de varas combustíveis a serem colocadas no núcleo por etapa e a escolha das posições dos detectores foram baseadas em critérios de segurança e embasados nos cálculos neutrônicos realizados com o código HAMMER-CITATION utilizando geometria x-y-z [6]. As etapas de carregamento estão apresentadas de forma esquemática na figura 3.

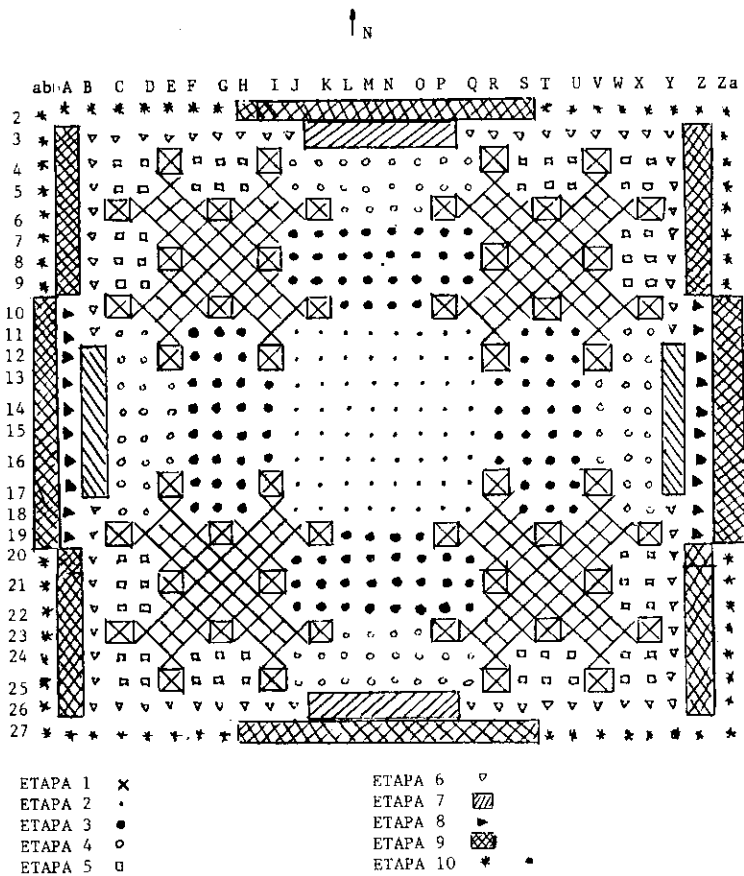


Figura 3. Núcleo do Reator com as Etapas de Carregamento.

O carregamento consiste, portanto de uma sequência de etapas nas quais são colocados, no núcleo, conjunto de varetas combustíveis quando o tanque está sem moderador e sempre que possível (exceção é a primeira etapa) as barras de controle e segurança estão inseridas. Após cada etapa de carregamento, retiravam-se totalmente as barras de segurança (sistema de segurança acionado), e seguimento de reatividade, para que fossem realizadas as medidas, era fornecido pela retirada das barras de controle em passos.

A partir das respostas dos detectores, durante as várias etapas de carregamento, com as barras de segurança retiradas e as barras de controle retiradas ou inseridas, são construídas as curvas do inverso da multiplicação ( $1/M$ ) em função do número de varetas combustíveis (massa de U-235) inseridas no núcleo para cada detector e para as condições de barras de controle citadas anteriormente. Tais curvas permitem, por extrapolação, determinar o valor da massa crítica, para o núcleo, sem barras de controle e segurança e a análise das duas curvas possibilita o conhecimento do valor das barras de controle em termos de número de varetas combustíveis sendo adicionadas e, esta informação é importante para estimar a quantidade de combustível a ser adicionada nas últimas etapas de carregamento para obter a criticalidade sem que esta ocorra de forma inesperada, ou seja, com as barras de controle inseridas. Foi construída, também, a curva de  $1/M$  versus posição das barras de controle para determinar a posição destas para a qual o reator fica crítico. Este estudo foi realizado para duas configurações de barras de controle: uma totalmente extraída com a outra sendo retirada, e as duas barras igualmente retiradas.

#### 4. Medidas e Análises dos Dados

Tendo em vista a grande quantidade de dados experimentais, devido ao uso de vários detectores, necessidade de várias etapas de carregamento e a realização de medidas para várias posições de barra de controle e, considerando que esses dados tinham que ser analisados durante o andamento do experimento, para liberar o prosseguimento do mesmo, concluiu-se que essa análise de dados deveria ser realizada em um microcomputador. Para tal, foi desenvolvido o programa computacional PROCAR (programa para carregamento), que consta de um arquivo de dados, no qual são armazenados os valores das medidas e, de um programa que faz a previsão de criticalidade, baseada na técnica do inverso da multiplicação para cada detector, em função do número de varetas combustíveis e da posição das barras de controle. O resultado da análise com o PROCAR é apresentado na tela do microcomputador, com opção de impressão dos resultados em impressora ou saída gráfica em registrador x-y. Com os dados das 8 primeiras etapas de carregamento, apresentadas na figura 3, foi prevista a criticalidade, utilizando o programa PROCAR, obteve-se a curva de  $1/M$  versus número de varetas combustíveis apresentada na figura 4 e as determinações de criticalidade indicadas na tabela 1, ambas para o reator com as barras de controle e segurança retiradas. Na figura 4 encontra-se incluída a curva  $1/M$  calculada.

TABELA 1

Previsão de Criticalidade - Etapa de Carregamento 8

Detector	Previsão (número de varetas)
12	5,638E+02
13	5,645E+02
14	5,617E+02
15	5,608E+02
16	5,679E+02

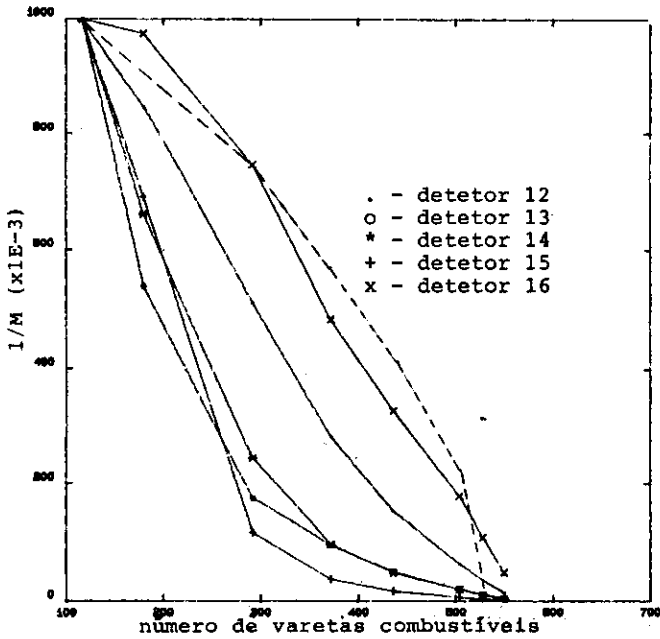


Figura 4 - Previsão de Criticalidade Etapa 8

O número de varetas combustíveis para obtenção da criticalidade foi de  $(564 \pm 2)$  varetas, que corresponde a  $(6,67 \pm 0,02)$ kg de U-235 ( $175,7 \pm 0,6$ )kg de UO<sub>2</sub>. Esse valor é de 4,8% maior do que o valor previsto por cálculos com o programa HAMMER-CITATION [5] que previa  $(6,34 \pm 0,07)$ kg de U-235 (536 varetas combustíveis). O valor de  $k_{ef}$  (multiplicação efetiva) do reator calculado com o CITATION para essa condição de criticalidade (564 varetas combustíveis) é  $k_{ef} = 1,007$ , que corresponde a um erro de 700 pcm em relação à medida experimental, dando um desvio de 0,7%.

Analisando os dados de previsão de criticalidade para as barras de controle inseridas e retiradas, figura 5, verificou-se a necessidade de realizar a 9ª etapa de carregamento, visto que havia detectores que previam criticalidade com as barras de controle inseridas com o núcleo carregado com 680 varetas de combustível.

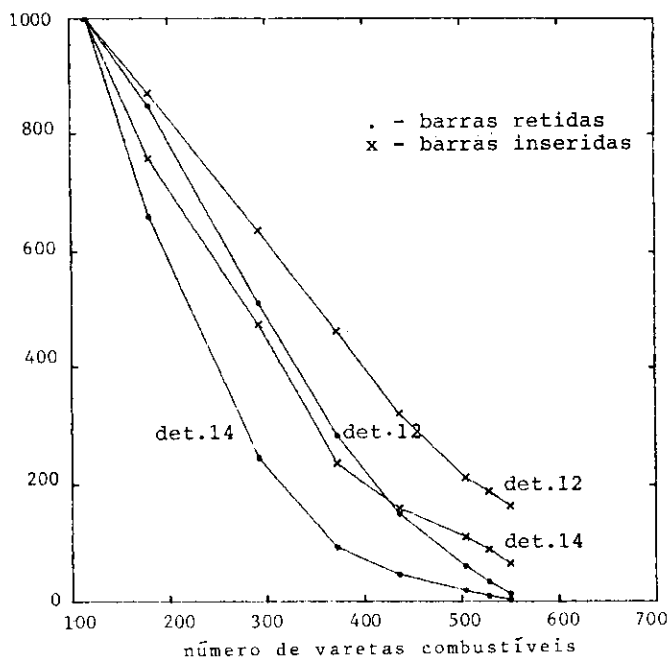


Figura 5 - Previsão de Criticalidade - Etapa 8

Determinaram-se duas configurações (posicionamento) das barras de controle para as quais o reator fica crítico quando totalmente carregado (680 varetas de combustíveis). Essas configurações foram estabelecidas retirando as barras de controle em passos cada vez menores à medida que se aproximava da criticalidade, e fazendo previsões de criticalidade com o programa PROCAR e acompanhando a variação da taxa de contagem nos detectores após a movimentação das barras. Utilizando para tanto um registrador x-t.

Na figura 6 observa-se o comportamento dos detectores quando da retirada, em pequeno número de passos, da barra de controle BC2, enquanto que a outra estava completamente extraída. Na figura 7 observa-se o comportamento temporal dos detectores, quando da aproximação à criticalidade, por movimentação da barra de controle 2 (BC2), apresentando uma posição de barra para a qual o reator ficou subcrítico, uma outra situação em que o reator ficou crítico com fonte e finalmente uma outra posição quando o reator ficou supercrítico.

O reator ficou crítico com uma barra de controle totalmente retirada (54,6 cm) e a outra retirada de 18,7 cm; e na segunda configuração de barras, com as duas barras de controle retiradas de 32,2 cm. O projeto previa que o reator ficaria crítico com uma barra de controle totalmente retirada (54,6 cm) e a outra retirada de aproximadamente 6 cm; e na segunda configuração de barras, com as duas barras de controle retiradas de 27,5 cm e 24,4 cm, o que corresponde a uma diferença de 700 pcm, ou seja, um desvio de 0,7% no valor de  $k_{ef}$  em relação ao especificado no projeto [5], confirmando as expectativas na previsão da criticalidade.

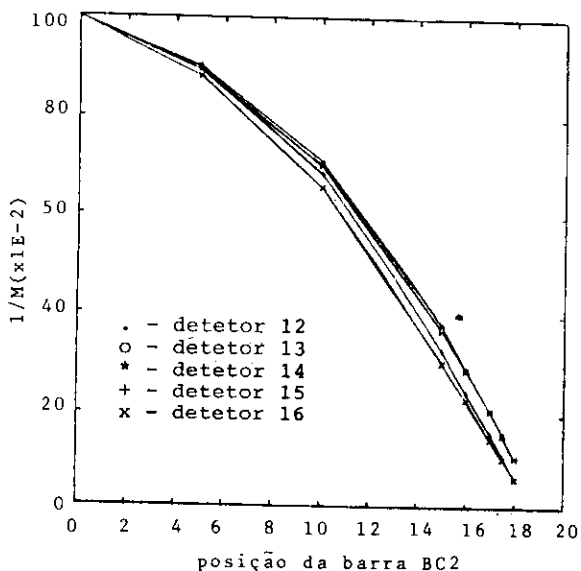


Figura 6 - Previsão de Criticalidade

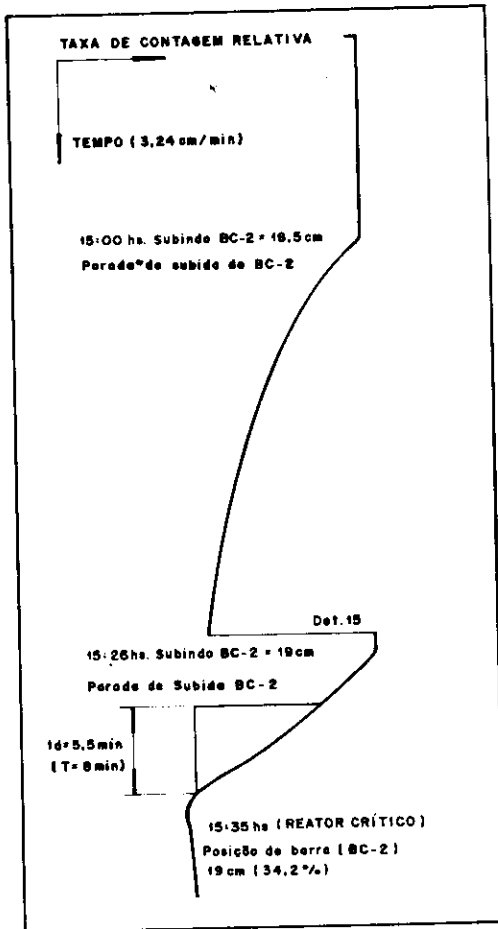


Figura 7 - Saída do Registrador x-t quando da confirmação da obtenção da obtenção da criticalidade.

## Agradecimentos

Agradecemos a todos que contribuíram para que este experimento atingisse seu objetivo com sucesso, principalmente à equipe de operação do reator nuclear IPEN/MB-01, em especial aos srs. H. Pasqualetto, R. Jerez e A.L.Ç. Carneiro.

## Referências

- [1] Safe Operation of Critical Assemblies and Research Reactors Safety Series nº 35.
- [2] J.R.Maiorino; J.A.Perrota; M.Yamaguchi; J.L.M.Moreira; H.Nakata; H.Yoriyaz; N.Kosaka; P.R.P.Coelho; A.G.Mendonça; L.C.C.Fanaro - Projeto Nuclear da Unidade Crítica IPEN/MB-01 - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares CNEN/SP (a ser apresentado no VII ENFIR).
- [3] L.C.Schimid-Critical Assemblies and Reactor Research-Wiley Interscience and Sons. N.Y. (1971).
- [4] A.E.Profio-Experimental Reactor Physics-Wiley Interscience and Sons - N.Y. (1976).
- [5] H.Yoriyaz - Especificação Técnica para o Projeto Nuclear da Unidade Crítica - relatório interno R10-IP3-213PR-4EN-001.
- [6] H.Yoriyaz; P.R.P.Coelho - Posicionamento de detectores experimentais e elaboração dos cálculos do carregamento-fase 1 - relatório interno R611090059.