

À Biblioteca
do IEA
M. S. P.
S.P. 14/3/71

MOACIR DE ARAÚJO LYRA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
DINÂMICO DO REATOR NUCLEAR IEAR-1



Dissertação de Mestrado Apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

São Paulo

1970

À Lourdinha e ao nosso filho Henrique
A meu pai e à memória de minha mãe

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui minha gratidão

Ao Prof. Dr. Paulo Saraiva de Toledo pela orientação eficaz na realização dêste trabalho e por sua apreciação crítica do manuscrito.

Ao Eng^o Azor Camargo Penteado Filho pelo apóio constante e esclarecimentos nas experiências realizadas no Reator.

Aos colegas Ronaldo Elias F. Melo e Joaquim Sylos Cintra pelos esclarecimentos referentes à Térmica do Reator.

Aos colegas da DDMR Joel Alvarenga de Souza, Hertz Pasqualetto e Kouji Ogura pelo incentivo a realização dêste trabalho.

Ao colega Antonio Gouveia, pelas discussões proveitosas durante a elaboração da simulação analógica.

Ao Sr. Danilo Mariconi pela colaboração na montagem das experiências realizadas.

Ao Sr. Américo Yoshida, que fêz os desenhos com perfeição.

À Sra. Silvia Helena Fernandes de Deus, que datilografou com dedicação.

Ao Sr. José Florentino dos Santos, que imprimiu.

Finalmente, à direção do Instituto de Energia Atômica, na pessoa do Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni, pela oportunidade que me foi dada à realização dêste trabalho.

A êstes, e a muitos outros, que memória me falta, devo os possíveis êxitos desta dissertação.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
Cap. I - O MODELO MATEMÁTICO	
I-1 - Parte Neutrônica	4
I-2 - Parte Térmica	7
I-3 - Modelo Incremental	10
I-4 - Efeitos Térmicos na Reatividade do Reator	12
I-5 - O Modelo Matemático	16
Cap. II- DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TEMPERATURA	
II-1 - Experiência no Reator	17
II-2 - Simulação Analógica	21
Cap. III - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA - MATRIZ DE TRANSIÇÃO	
III-1 - Considerações Teóricas	35
III-1.1 - Cálculo da Matriz de Transição	37
III-1.2 - Cálculo da Função de Transferência	38
III-2 - O Modelo de Estado do Reator	39
III-3 - Matriz de Transição do Reator	40
III-4 - Função de Transferência do Reator	43
III-5 - Reator sem Neutrons Atrasados	44
III-5.1 - Matriz de Transição	45
III-5.2 - Função de Transferência	47
Cap. IV - COMENTÁRIOS E APLICAÇÕES	
IV-1.1 - Reator em Operação Normal	50
IV-1.2 - Reator Operando com Vazão Reduzida	52
IV-2 - Efeito dos Neutrons Atrasados	53
CONCLUSÕES GERAIS	56
Sugestões para Trabalhos Futuros	57
APÊNDICE A	58
APÊNDICE B	63
REFERÊNCIAS	61

INTRODUÇÃO

O presente trabalho se propõe a dar uma contribuição ao estudo do comportamento dinâmico do reator IEAR-1. Nos reatores nucleares, mais do que em qualquer outro sistema, é de suma importância sua operação em segurança, e para isto, é preciso que se conheça o seu comportamento dinâmico pela análise de suas Funções de Transferência e/ou Respostas Transitórias. É o cálculo destas que desenvolveremos neste trabalho como ponto de partida para um estudo posterior mais detalhado, incluindo otimizações do sistema de controle.

O estabelecimento de um modelo matemático para o reator IEAR-1 é desenvolvido nos Capítulos I e II, como primeira providência para um estudo teórico deste. No Capítulo I é proposto um modelo a parâmetros concentrados que, no Capítulo II, será ajustado ao reator, através da comparação entre respostas transitórias determinadas experimentalmente e simulações analógicas do modelo matemático. Ainda no Capítulo II será feito um estudo paramétrico dos coeficientes de temperatura para determinar os do IEAR-1.

No Capítulo III, pela técnica das variáveis de estado, com base no modelo matemático desenvolvido, serão determinadas a Função de Transferência e Matriz de Transição, instrumentos necessários e suficientes para a análise da estabilidade e cálculo das respostas transitórias a qualquer tipo de perturbação de reatividade no reator. No Capítulo IV calcularemos, explicitamente, e analizaremos as funções de transferência e principalmente as respostas transitórias a um degrau de reatividade, em diversas condições de operação do reator. Ainda neste capítulo, estudaremos a controversa influência dos neutrons atrasados na estabilidade dos reatores nucleares.

Para facilitar a leitura e compreensão deste trabalho, incluiremos nesta Introdução, uma breve descrição do sistema considerado, a saber, o Reator de Pesquisa IEAR-1, do Instituto de Energia Atômica.

O IEAR-1 é um reator de pesquisa, tipo piscina, refrigerado e moderado à água.

Há dois tipos de elementos combustíveis, ambos do tipo MTR, utilizam do urânio enriquecido a 20% e 90% em seu isótopo U-235. A placa matriz, que suporta os elementos combustíveis, está mergulhada na piscina de 270 m³ de água desmineralizada, a dez metros de profundidade, presa à superfície da piscina por uma treliça de alumínio. Cada elemento combustível é formado de dezenove placas de uma liga de alumínio e urânio revestidas por uma fina camada de alumínio para evitar o escape de produtos de fissão altamente radioativos. Entre as placas passa o refrigerante, a água. O arranjo dos elementos combustíveis na placa matriz, que forma o arranjo crítico necessário para a manutenção da reação em cadeia, constitui o chamado caroço do reator.

Com o reator operando até 200 Kw, a refrigeração pode ser por convecção natural; acima desta potência por circulação forçada da água. A água, que além de servir como moderador e refrigerante serve de blindagem biológica, é aspirada através dos elementos combustíveis por meio de uma bomba, a vazão sendo de 2600 gpm. Após atravessar um trocador de calor, a água volta à piscina através de um difusor. O calor é transferido, no trocador de calor, ao sistema secundário e daí é dissipado na atmosfera por meio de uma torre de refrigeração.

Há quatro barras de controle, três de cádmio denominadas barras de segurança, e uma de aço inox, denominada barra de regulação; inseridas em elementos combustíveis especiais distribuídos no caroço. Estas barras servem para se deixar o reator crítico na potência desejada e manter esta potência estável. As barras de segurança são presas à haste de sustentação por meio de magnetos, de sorte que em caso de qualquer anormalidade as correntes dos magnetos são interrompidas e as barras inseridas totalmente no caroço por gravidade, "apagando" a reação em cadeia.

A instrumentação nuclear é composta de:

- 1) Uma câmara de fissão para o Canal de Partida
- 2) Duas câmaras de ionização compensadas para o Canal Log N e o Canal Linear.
- 3) Duas câmaras de ionização não compensadas para os Canais de Segurança.

Êstes canais constituem o sistema de controle e segurança do reator.

No APÊNDICE B é apresentada uma vista isométrica da piscina do reator com o caroço do mesmo.

Maiores detalhes a respeito do reator IEAR-1 se encontram em publicações do IEA (Pe 61) e (To 60).

CAPÍTULO I

O MODELO MATEMÁTICO

A análise do comportamento dinâmico de um sistema exige o conhecimento dos fenômenos físicos envolvidos e a partir deste, o estabelecimento de um modelo matemático que corresponda à realidade. Na escolha do modelo entra uma boa dose de bom senso, pois nos colocamos sempre diante de um compromisso entre precisão e complexidade de um lado e aproximação e simplicidade por outro lado. Por paradoxal que pareça nem sempre a primeira escolha dá melhor precisão porque a solução de um modelo complexo, quando possível, muitas vezes envolve aproximações.

No caso dos reatores nucleares evidentemente nos defrontamos com uma opção deste tipo. As equações que representam tanto os fenômenos essencialmente nucleares como os térmicos são a parâmetros distribuídos, não lineares ou lineares com coeficientes variáveis, portanto de solução do ponto de vista da resposta transitória muito difícil. Deste modo costuma-se aproximar o sistema por um modelo a parâmetros concentrados onde são considerados os valores médios das variáveis envolvidas. O sistema é linearizado pela consideração de pequenas variações de amplitude das variáveis, obtém-se um modelo incremental. Ora, o teorema de Lyapunov (Po-69) demonstra que se o modelo obtido da primeira aproximação, do desenvolvimento de Taylor do sistema não linear, for estável o não linear também o será. Harrer et. al. (Ha 52) determinaram experimentalmente, em Argonne, a função de transferência do reator CP-2 e comparando com a teórica obtida através do modelo incremental obtiveram ótimos resultados. E mais recentemente Gossman et. al. (Go 62) comparando as respostas de frequência obtidas por simulações analógicas de um modelo a parâmetros distribuídos com a de um modelo a parâmetros concentrados, para o reator EOCR, verificaram ser ambas praticamente idênticas.

I.1 - Parte Neutrônica

Admitindo que a distribuição espacial do fluxo neutrônico não se modifica durante um transitório, - aproximação válida se a perturbação da reatividade for uniformemente distribuída no reator ou localizada num ponto distante vá

rios livre caminho médio de transporte do ponto onde se encontra o detetor (Refs.: Pu 58, Ch 69), - as equações clássicas da cinética de um reator pontual podem ser usadas para a análise do comportamento dinâmico do reator real.

Daremos apenas uma demonstração simplificada das equações da cinética de um reator pontual; uma demonstração rigorosa se encontra por exemplo nas referências (GI 55) ou (He 58).

Considerando o fator de multiplicação efetivo k como a razão entre o número médio de neutrons de uma geração para o número médio da geração seguinte num dado reator, e o tempo de geração ℓ como o intervalo de tempo médio entre gerações sucessivas, a variação média de densidade neutrônica n , se todos os neutrons são prontos, é dada por:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(k - 1)}{\ell} n \dots\dots\dots (I-1.1)$$

Uma percentagem β dos neutrons de uma geração não são prontos, ou seja, não são provenientes diretamente da fissão, mas se originam de núclídeos instáveis provenientes da desintegração beta de certos produtos de fissão, constituindo os chamados neutrons atrasados. Keepin et. al. (Ke 57) classificou os neutrons atrasados em seis grupos de acordo com seu núclídeo precursor e determinou os λ_i e β_i , respectivamente, constante de decaimento e fração de neutrons atrasados relativa ao total de neutrons, do i -ésimo precursor, para fissões térmicas no U-235, U-233 e Pu-239.

A razão de produção dos neutrons atrasados é igual a $\sum_i \lambda_i C_i$, onde C_i é a concentração do i -ésimo precursor.

Se $\beta = \sum_i \beta_i$ é a percentagem dos neutrons atrasados sobre o total, $(1 - \beta)$ será a percentagem de neutrons prontos. Introduzindo os neutrons atrazados na expressão (I-1):

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\beta)-1}{\ell} n + \sum_i \lambda_i C_i \dots\dots\dots (I-1.2)$$

A variação do i -ésimo precursor será dada por:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \dots\dots\dots (I-1.3)$$

Como nesta dissertação consideraremos sômente pequenas perturbações, por tanto sempre $k \approx 1$, e definindo a reatividade como $\rho = k - 1$ as equações (I-1.2) e (I-1.3) podem ser escritas na forma:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_1^6 \lambda_i C_i \dots\dots\dots (I-1.4)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i n}{\ell} - \lambda_i C_i \dots\dots\dots (I-1.5)$$

Aproximação a um grupo de neutrons atrasados

Para a análise da dinâmica de reatores costuma-se tomar um único grupo médio de neutrons atrasados como representando aproximadamente os efeitos devido aos seis grupos (We 68, We 63, Gl 55).

A constante de decaimento λ do grupo médio, é dada por:

$$\lambda = \beta / \sum_1^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i}$$

Tomando os valores de Keepin (Ke 57) para os seis grupos de precursores quando o combustível é U-235

i	β_i (%)	$\tau_i = \frac{1}{\lambda_i}$ (s)	$\beta_i \tau_i$
1	0,0267	0,33	0,009
2	0,0737	0,88	0,065
3	0,2526	3,31	0,836
4	0,1255	8,97	1,125
5	0,1401	32,78	4,592
6	0,0211	80,39	1,688

encontra-se o valor de 0,077 para a constante de decaimento do grupo médio.

O valor da fração efetiva dos neutrons atrasados

Havia uma discordância entre o valor da fração de neutrons atrasados encontrada por Hughes (Hu 48) 0,00755, e a encontrada por Keepin (Ke 57), mais recente 0,0064.

Em vista dos neutrons atrasados serem gerados com energia de aproximadamente 0,5 Mev e dos prontos com energia em torno de 2 Mev (Ba 56), portanto os neutrons atrasados tem menor probabilidade de fuga durante a moderação, foi definida a fração efetiva dos neutrons atrasados $\beta_{ef} = \epsilon \beta$ (Mo 58) onde ϵ é um fator que leva em consideração a efetividade dos neutrons atrasados num reator particular. ϵ é aproximadamente proporcional a razão entre a probabilidade de não fuga dos neutrons atrasados para a probabilidade de não fuga dos neutrons prontos. Moore (Mo 58) adotou o valor de 1,18 para ϵ e tomando o valor de Keepin para o β encontrou para a fração efetiva dos neutrons atrasados $\beta_{ef} = 0,00755$ que é o valor determinado por Hughes para o β . Este será o valor adotado neste trabalho.

Nesta aproximação a um grupo de neutrons atrasados as equações (I-1.4) e (I-1.5) se tornam:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\rho - \beta_{ef})}{\ell} n + \lambda C \dots\dots\dots (I-1.6)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta_{ef}}{\ell} n - \lambda C \dots\dots\dots (I-1.7)$$

1.2 - Parte Térmica

Como para a parte neutrônica tomamos um modelo pontual para o reator baseado na hipótese da distribuição do fluxo neutrônico não variar de forma durante o transiente, será consistente tomarmos para a parte térmica também um modelo a parâmetros concentrados para descrever o processo de geração e troca de calor no caroço do reator. Esta aproximação bastante comum, ver por exemplo as referências Pu 58, Ma 69, Mo 65 e Lu 54 é perfeitamente válida para reatores de pequeno porte como o IEAR-1.

As equações que governam tal processo de geração e troca de calor são

formuladas estabelecendo o balanço energético entre o combustível, o moderador e o refrigerante. Nos reatores tipo piscina o moderador e o refrigerante são o mesmo, a água leve.

O calor gerado no combustível por unidade de tempo, proveniente das fissões, é igual à quantidade de calor armazenada no mesmo, tendo como consequência um aumento de sua temperatura, ~~menos~~ a transferida ao fluido refrigerante:

$$Q = M_u C_u \frac{dT_u}{dt} + h A (T_u - T_m) \dots\dots\dots (I-2.1)$$

sendo $Q = K (1-a)n$

onde: K = constante de proporcionalidade entre a densidade neutrônica e a potência

a - fração do calor gerado no moderador

M_u - massa do combustível (g)

C_u - Calor específico do combustível (cal/g °C)

h - coeficiente de troca de calor em W/cm^2 °C

A - área de troca (cm^2)

T_u - temperatura do combustível (°C)

T_m - temperatura do moderador ou refrigerante (°C)

O calor gerado no moderador pela termalização dos neutrons e absorção de raios gama mais o calor transferido pelo combustível é igual ao calor armazenado no moderador mais o aumento da entalpia do mesmo, ou seja:

$$K a n + h A (T_u - T_m) = W_m C_m (T_s - T_i) + V_m \rho_m C_m \frac{dT_m}{dt} \dots\dots (I-2.2)$$

onde:

C_m - calor específico da água no caroço (cal/g °C)

W_m - vazão de refrigerante (cm^3/min)

T_s - temperatura de saída da água do caroço (°C)

T_i - temperatura de entrada da água no caroço (°C)

T_m - temperatura média da água no caroço (°C)

ρ_m - densidade da água (g/cm^3)

V_m - volume da água no caroço (cm^3)

Admitiu-se aqui que a potência P do reator é proporcional à densidade neutrônica, portanto o calor gerado no combustível e moderador.

Na equação (I-2.2)

$$T_m = \frac{T_s + T_i}{2}$$

logo $T_s - T_i = 2(T_m - T_i)$, substituindo:

$$V_m \rho_m C_m \frac{dT_m}{dt} = a n + h A T_u - h A T_m - 2 W_m C_m T_m + 2 W_m C_m T_i$$

ou

$$V_m \rho_m C_m \frac{dT_m}{dt} = a n + h A T_u - (hA + 2W_m C_m) T_m + 2W_m C_m T_i \dots (I-2.3)$$

Não foi considerada qualquer efeito devido a presença do trocador de calor admitindo-se que a temperatura de entrada da água no caroço é constante (Pu 58, Mo 65). Nos reatores tipo piscina isto é verdadeiro porque a água saindo do trocador de calor passa num difusor e daí para a piscina de 270 m³, portanto de capacidade térmica muito grande, não se aquecendo ou esfriando nos poucos minutos de intervalo de tempo em que serão estudados os transientes.

O valor do coeficiente de troca

Entre todos os parâmetros do IEAR-1 que fazem parte das equações da térmica (I-2.1) e (I-2.3) o único de valor desconhecido é o coeficiente de troca.

Baseado no formulário francês (La 64) para cálculos térmicos do reator Melusine, tipo piscina e praticamente idêntico ao IEAR-1, foram calculados (*) os coeficientes de troca de calor em diversas condições de operação do reator, cujos resultados se encontram na tabela abaixo:

(*) Cálculos realizados na seção de térmica da Divisão de Física de Reatores do I.E.A. pelo Eng^o Ronaldo Elias F. Melo, a quem o autor agradece.

Potência P (Kw)	Vazão (GPM)	Coefficiente de troca h (W/cm ² °C)
2000	2500	0,9
	2600	0,92
	2400	0,872
	1600	0,67
1000	2600	0,781
	1600	0,6186

Tabela I-1

I.3 - Modelo Incremental

A equação (I.1.6) é não linear em ρ_n e as equações (I-2.1) e (I-2.3) são lineares com alguns coeficientes variáveis uma vez que o coeficiente de troca de calor é função da temperatura. Estas dificuldades podem ser contornadas se tomarmos um modelo incremental, válido para pequenas perturbações de reatividade. Pequena perturbação de reatividade significa ρ da ordem de $\beta_{ef}/2$ ou, para melhor precisão, da ordem de $\beta_{ef}/10$ (Ha 63).

Quanto aos parâmetros nucleares λ e β_{ef} são considerados independentes do tempo (Ch 69, Ke 60 e He 58) num transiente.

Escrevendo as equações (I-1.6) e (I-1.7) em função da potência, as equações normalizadas para densidade neutrônica correspondente a unidade de potência. Fazendo:

$$P(t) = P_0 + \delta P(t)$$

$$C(t) = C_0 + \delta C(t)$$

P_0 e C_0 representam potência e concentração de precursores de neutrons atraçados no estado de equilíbrio do reator. Podemos escrever (I.1.6) e (I-1.7) assim:

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} (\delta P + P_0) + \lambda (C_0 + \delta C) \dots\dots\dots (a)$$

$$\frac{d \delta C}{dt} = \frac{\beta}{\ell} (P_o + \delta P) - \lambda (C_o + \delta C) \dots\dots\dots (b)$$

No estado de equilíbrio δP , δC , $\frac{d\delta P}{dt}$ e $\frac{d\delta C}{dt}$ são nulos, portanto de (b):

$$C_o = \frac{\beta P_o}{\ell \lambda} \dots\dots\dots (c)$$

substituindo (c) em (a) e (b), vem:

$$\frac{d \delta P}{dt} = \rho \frac{\delta P}{\ell} + \rho \frac{P_o}{\ell} - \frac{\beta}{\ell} \delta P - \frac{\beta}{\ell} P_o + \frac{\lambda \beta}{\ell} \frac{P_o}{\lambda} + \lambda \delta C$$

e

$$\frac{d \delta C}{dt} = \frac{\beta}{\ell} P_o + \frac{\beta}{\ell} \delta P - \frac{\lambda \beta}{\ell} \frac{P_o}{\lambda} - \lambda \delta C$$

Desprezando os termos de ordem mais elevada como $\rho \delta P$ (ver por exemplo a referência Ag-61), as equações se tornam finalmente:

$$\frac{d \delta P}{dt} = - \frac{\beta}{\ell} \delta P + \lambda \delta C + \rho \frac{P_o}{\ell} \dots\dots\dots (I-3.1)$$

$$\frac{d \delta C}{dt} = \frac{\beta}{\ell} \delta P - \lambda \delta C \dots\dots\dots (I-3.2)$$

Fazendo o mesmo em relação as equações da térmica (I-2.1) e (I-2.3):

$$T_u = T_{u_o} + \delta T_u \quad e \quad T_m = T_{m_o} + \delta T_m, \quad \text{onde } T_{u_o} \quad e \quad T_{m_o}$$

são relativos ao estado de equilíbrio do reator. Substituindo em (I-2.1) e (I-2.3) vem:

$$M_u C_u \frac{d \delta T_u}{dt} = (1-a) (P_o + \delta P) - h A (T_{u_o} + \delta T_u - T_{m_o} - \delta T_m) \dots\dots\dots (d)$$

No estado de equilíbrio $\frac{d \delta T_u}{dt}$, δT_u e δT_m são nulos, portanto;

$$(1-a) P_o = h A (T_{u_o} - T_{m_o})$$

logo, a equação (d) se reduz a:

$$M_u C_u \frac{d \delta T_u}{dt} = (1-a) \delta P - h A (\delta T_u - \delta T_m) \dots\dots\dots (I-3.3)$$

A equação (I-2.3) fica:

$$V_m \rho_m C_m \frac{d\delta T_m}{dt} = a (P_o + \delta P) + h A (T_{u_o} + \delta T_u) - (h A + 2 W_m C_m) (T_{m_o} + \delta T_m) + 2 W_m C_m T_i$$

onde T_i , sendo a temperatura de entrada da água, é considerada constante, como já justificamos.

Analogamente a equação anterior, no estado de equilíbrio:

$$a P_o + h A T_{u_o} - (h A + 2 W_m C_m) T_{m_o} + 2 W_m C_m T_i = 0$$

logo:

$$V_m \rho_m C_m \frac{d\delta T_m}{dt} = a \delta P + h A \delta T_u - (h A + 2 W_m C_m) \delta T_m \dots\dots\dots (I-3.4)$$

As equações (I-3.1) (I-3.2) (I-3.3) (I-3.4) constituem o modelo incremental, válido para pequenas perturbações. Para simplificar a notação a partir deste ponto não escreveremos os δ 's do P, C, T_u e T_m , subentendendo-se sempre que se trata de variações em torno do estado de equilíbrio. As equações que governam a solução temporal do modelo incremental se tornam:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{\beta}{\ell} P + \lambda C + \frac{P_o}{\ell} \rho$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\ell} P - \lambda C$$

$$M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = (1-a) P + h A (T_u - T_m)$$

$$V_m \rho_m C_m \frac{dT_m}{dt} = a P + h A T_u - (h A + 2 W_m C_m) T_m$$

I.4 - Efeitos Térmicos na Reatividade do Reator

A influência da temperatura na reatividade é bastante grande, a ponto de, em muitos reatores, a estabilidade depender sensivelmente dela. Esta influên

cia se origina no fato de muitos parâmetros nucleares serem função da temperatura do meio.

Entre os fenômenos que contribuem para tal dependência da temperatura, os principais são (maiores detalhes ver referência Gl 55, Is 63 e La 66, por exemplo):

a) Efeitos Nucleares - As seções de choque microscópicas são funções da energia cinética dos neutrons e esta por sua vez depende da temperatura absoluta do meio; logo a temperatura influi no fator de multiplicação, portanto, na reatividade.

b) Efeitos de Densidade - A variação da densidade dos materiais nucleares com a temperatura resulta em variações das seções de choque macroscópicas, portanto, na reatividade.

c) Parâmetros como Coeficiente de difusão e Idade de Fermi sendo funções da temperatura, as probabilidades de não fuga também o serão, logo a reatividade.

d) Efeito Doppler - Alargamento das ressonâncias do Urânio-238 com o aumento da temperatura, tendo como consequência maior absorção de neutrons por átomos deste elemento.

e) Formação de vazios - Principalmente nos reatores tipo BWR há formação de bolhas d'água no moderador diminuindo a taxa de moderação. Este fenômeno da origem aos chamados coeficientes de vazio.

A predominância de um efeito sobre outro, depende muito do tipo e até do porte do reator.

Define-se então o coeficiente de temperatura como a variação de reatividade por unidade de variação de temperatura do meio. Assim temos um coeficiente de temperatura do combustível α_u , que representa todos os efeitos na reatividade devido a variações da temperatura do combustível; e, analogamente, um coeficiente de temperatura do moderador α_m .

O coeficiente de temperatura sendo a variação da reatividade com a tem

peratura pode ser escrito, de uma maneira geral, assim:

$$\alpha = \frac{d\rho}{dT}, \text{ sendo } \rho = \frac{k-1}{k}$$

$$\alpha = \frac{1}{k^2} \frac{dk}{dT}$$

Como k^2 é sempre positivo segue que o sinal algébrico do coeficiente de temperatura vai depender do de dk/dT . Portanto, se α é positivo, dk/dT também o é; logo o fator de multiplicação k cresce com a temperatura. Ora k , crescendo significa que o reator vai se tornando supercrítico, o número de fissões aumenta, conseqüentemente o calor gerado, portanto a temperatura. Vê se pois que um coeficiente de temperatura positivo tem influência desestabilizante no reator. Reciprocamente se o coeficiente de temperatura for negativo, tem influência estabilizante.

No caso de se considerar o coeficiente de temperatura do combustível e o do moderador, eles serão definidos matematicamente por:

$$\alpha_u = \left(\frac{d\rho}{dT_u} \right)_{T_m = \text{cte}}$$

$$\alpha_m = \left(\frac{d\rho}{dT_m} \right)_{T_u = \text{cte}}$$

Os valores dos coeficientes de temperatura são avaliados por cálculos durante a fase de projeto do reator e posteriormente obtidos por medidas experimentais em protótipos.

Do reator IEAR-1 conhecemos apenas o coeficiente de temperatura global, isotérmico. Para a medida experimental do coeficiente de temperatura do moderador e do combustível são necessários elementos combustíveis instrumentados, que não dispomos no IEA. Contornamos este problema determinando os coeficientes de temperatura do combustível e do moderador através de um estudo paramétrico pelo computador analógico, apresentado no capítulo II.

Nesta dissertação adotaremos para os coeficientes de temperatura a unidade pcm/°C (pcm significa uma parte por cem mil = 10^{-5}).

Sob o ponto de vista dinâmico, os efeitos de temperatura na reatividade de se comportam como uma realimentação (feedback), nos processos nucleares. O diagrama do bloco da figura I-1, ilustra tal comportamento:

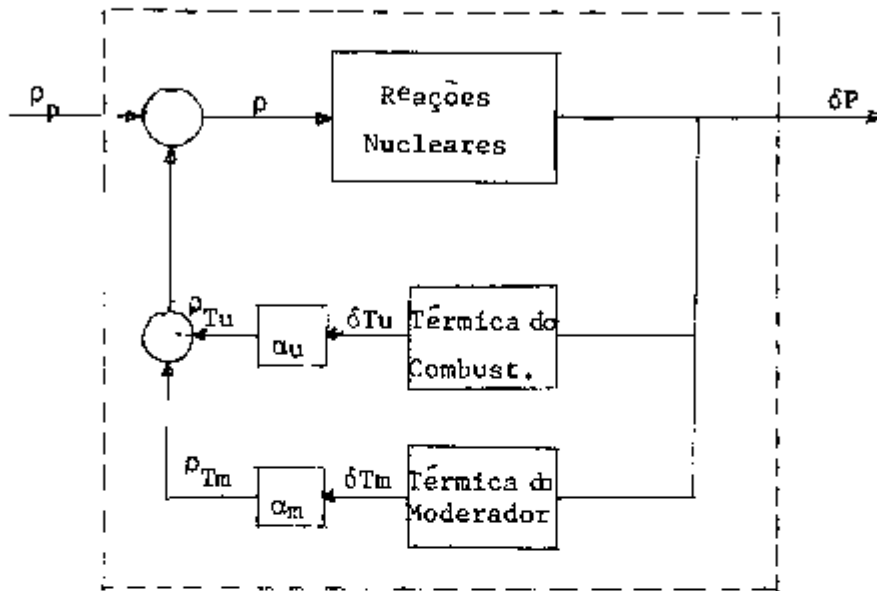


Figura I-1

- Onde:
- α_m - Coeficiente de temperatura do moderador
 - α_u - Coeficiente de temperatura do combustível
 - ρ_p - Perturbação externa da reatividade
 - ρ_{T_u} - Variação de reatividade devido a temperatura do combustível
 - ρ_{T_m} - Variação de reatividade devido a temperatura do moderador.
 - ρ - Reatividade resultante

Portanto:

$$\rho = \rho_p + \rho_{T_m} + \rho_{T_u}$$

ou:

$$\rho = \rho_p + \alpha_u T_u + \alpha_m T_m$$

lembrando as definições de α_u e α_m e que T_u e T_m são variações δT_u e δT_m das temperaturas do combustível e do moderador, respectivamente.

Efeito Xenon

O efeito do produto de fissão Xenon-135 é muito importante nos reatores de grande porte onde há problemas de instabilidades espaciais (La 56, Ba 60). Para reatores menores, em particular os reatores de pesquisa o efeito do Xenon no comportamento dinâmico é sempre desprezado porque o período de oscilação provocada pelo Xenon é da ordem de algumas horas (Ch 60).

-5 - O Modelo Matemático

Introduzindo no sistema (I-1) os coeficientes da temperatura através da expressão da reatividade resultante $\rho = \rho_p + \alpha_u T_u + \alpha_m T_m$, obteremos o conjunto de equações que descrevem o modelo matemático que propomos para o IEAR-I.

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\beta}{\ell} P + \lambda C + \frac{P_0}{\ell} \alpha_u T_u + \frac{P_0}{\ell} \alpha_m T_m + \frac{P_0}{\ell} \rho_p$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\ell} P - \lambda C$$

$$M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = (1-a) P - h A (T_u - T_m)$$

$$V_m \rho_m C_m \frac{dT_m}{dt} = a P + h A T_u - (h A + 2 W_{m m} C_m) T_m$$

CAPÍTULO II

DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TEMPERATURA

Com a finalidade de verificar até que ponto o modelo matemático corresponde à realidade e de determinar os coeficientes de temperatura do reator IEAR-1, fizemos medidas experimentais e simulações analógicas do modelo matemático para:

a) Comparar as medidas experimentais com o resultado da simulação analógica da experiência. Para esta simulação tomamos coeficientes de temperatura hipotéticos mas dentro da gama de variação encontrada em publicações internacionais para outros reatores nucleares semelhantes.

b) Fazer um estudo paramétrico visando determinar os coeficientes de temperatura que na simulação analógica melhor reproduzissem a resposta experimental do reator.

II.1 - Experiência no Reator

A experiência realizada no reator IEAR-1 consistiu em provocar um degrau de reatividade no reator e medir sua resposta de potência.

Experiências deste tipo foram realizadas originalmente por Pelsler (Pe 55) para determinar a função de transferência à potência zero através da resposta transitória a um degrau positivo de reatividade. Fader e Harrison (Fa 61) fizeram experiências semelhantes, introduzindo um degrau negativo pela inserção de uma barra de controle e demonstrando que, embora o degrau não seja perfeito devido ao tempo finito de inserção da barra, os resultados são satisfatórios se considerarmos simplesmente a quantidade de reatividade inserida como um degrau desta amplitude.

II-1.1 - Descrição da Experiência

Com o reator nas seguintes condições:

a) Potência estável em 2 Mw

- b) Temperatura da piscina estável, Isto se dá no 3º dia de operação da semana.
- c) Configuração do caroço: Arranjo 82-A

Foi provocada uma perturbação da reatividade pela inserção de cem divisões (875 - 775) da barra de controle. Na curva de calibração da barra de controle, fig. II-1, vê-se que trabalhamos na região quase linear de sua efetividade e que esta inserção corresponde a uma perturbação de 40 pcm. A barra de controle é inserida com uma velocidade de 29 div/s, portanto a inserção de 100 divisões se dá em 3,5 segundos, que comparado com o tempo de observação da experiência, 5 minutos, pode ser desprezível e considerada a perturbação como verdadeiramente um degrau.

Método de Medida

A medida da resposta transitória foi feita pelo Canal Linear do sistema de controle do reator, que permite medidas precisas no intervalo de 10^{-3} a 100% da potência nominal.

A figura II-2 apresenta o diagrama do Canal Linear, constituído de:

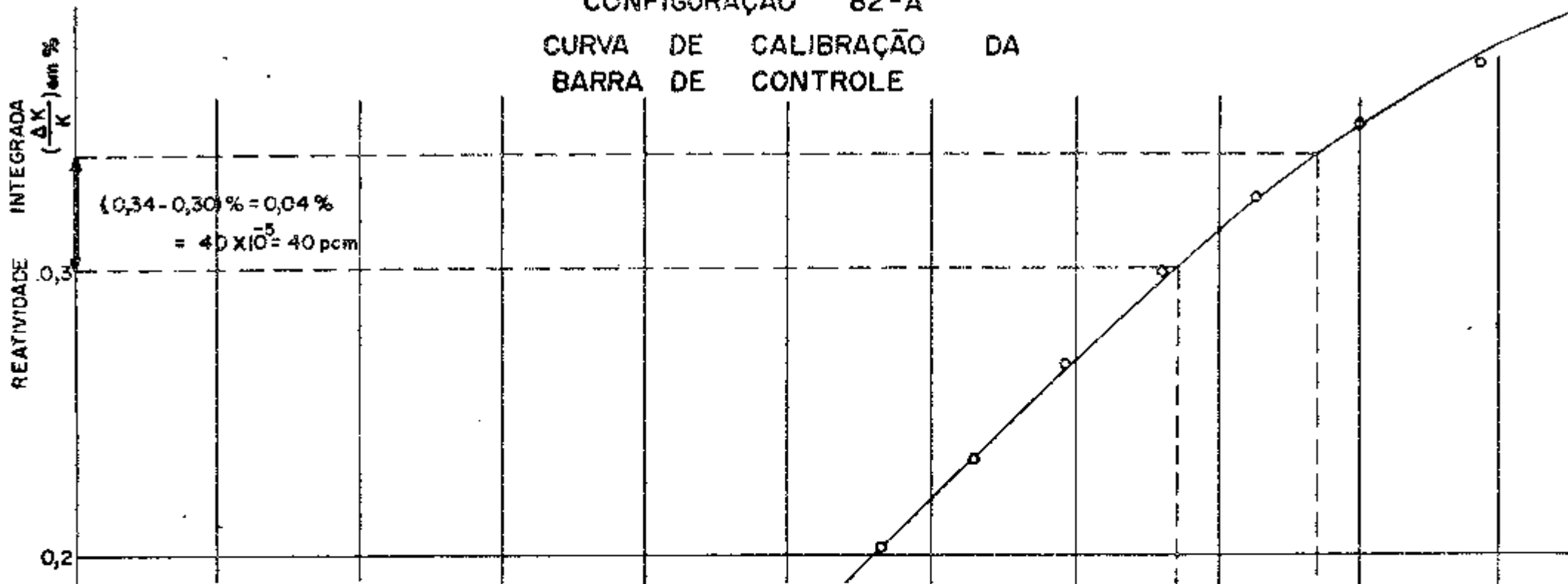
1) Câmara de ionização compensada - É uma câmara sensível apenas a neutrons, com compensação para raios gama, que produz uma corrente contínua proporcional ao fluxo neutrônico, portanto à potência do reator. É importante notar que a câmara de ionização está colocada a uma distância de 30 cm da barra de controle, ou seja, o ponto de medida e o ponto onde foi produzida a perturbação distam vários livres caminhos médio de transporte.

2) Micromicro amperímetro - Este recebe a corrente da câmara de ionização compensada e transforma numa tensão CC amplificada, no intervalo de 0 a 10 mV.

3) Registrador - A tensão do micromicro amperímetro é registrada, portanto é registrada a variação da potência do reator.

Na nossa experiência não foi usado este registrador do Canal Linear. Foi usado um Graphispot por ser mais sensível e mais versátil por permitir diversas escalas de tempo a escolher. Usamos a escala de 6 cm/min.

CONFIGURAÇÃO 82-A
CURVA DE CALIBRAÇÃO DA
BARRA DE CONTROLE



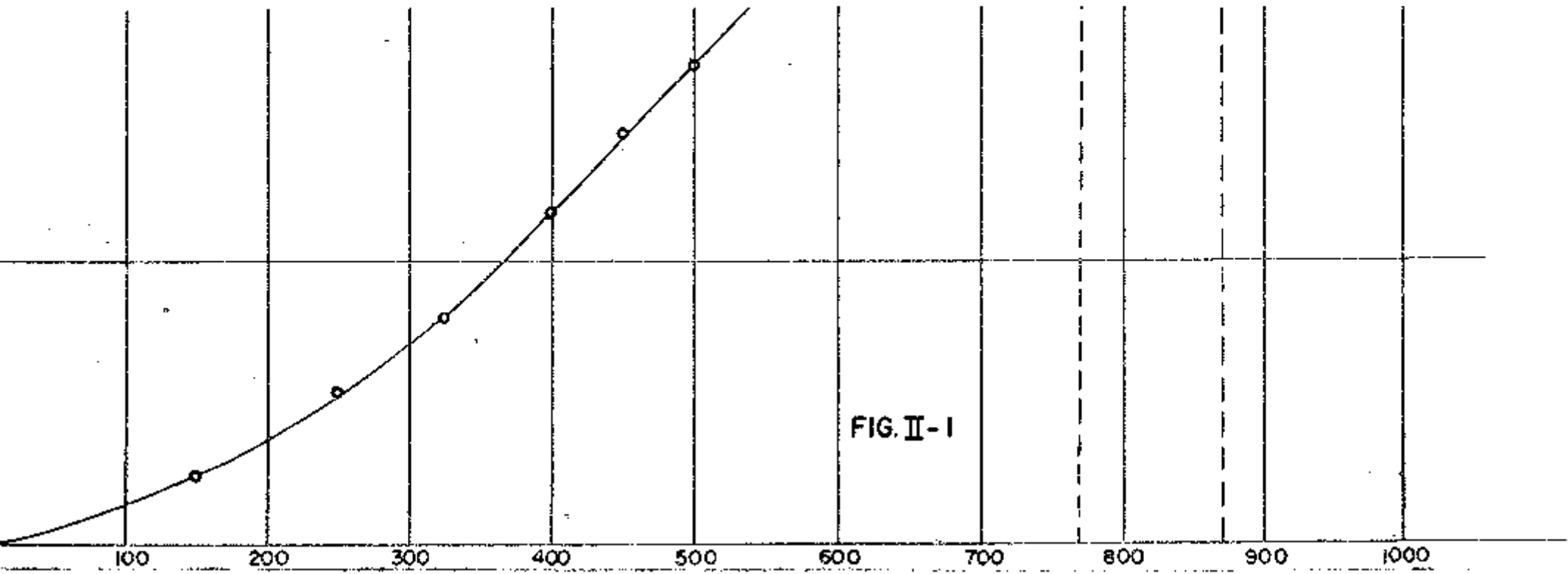


FIG. II-1

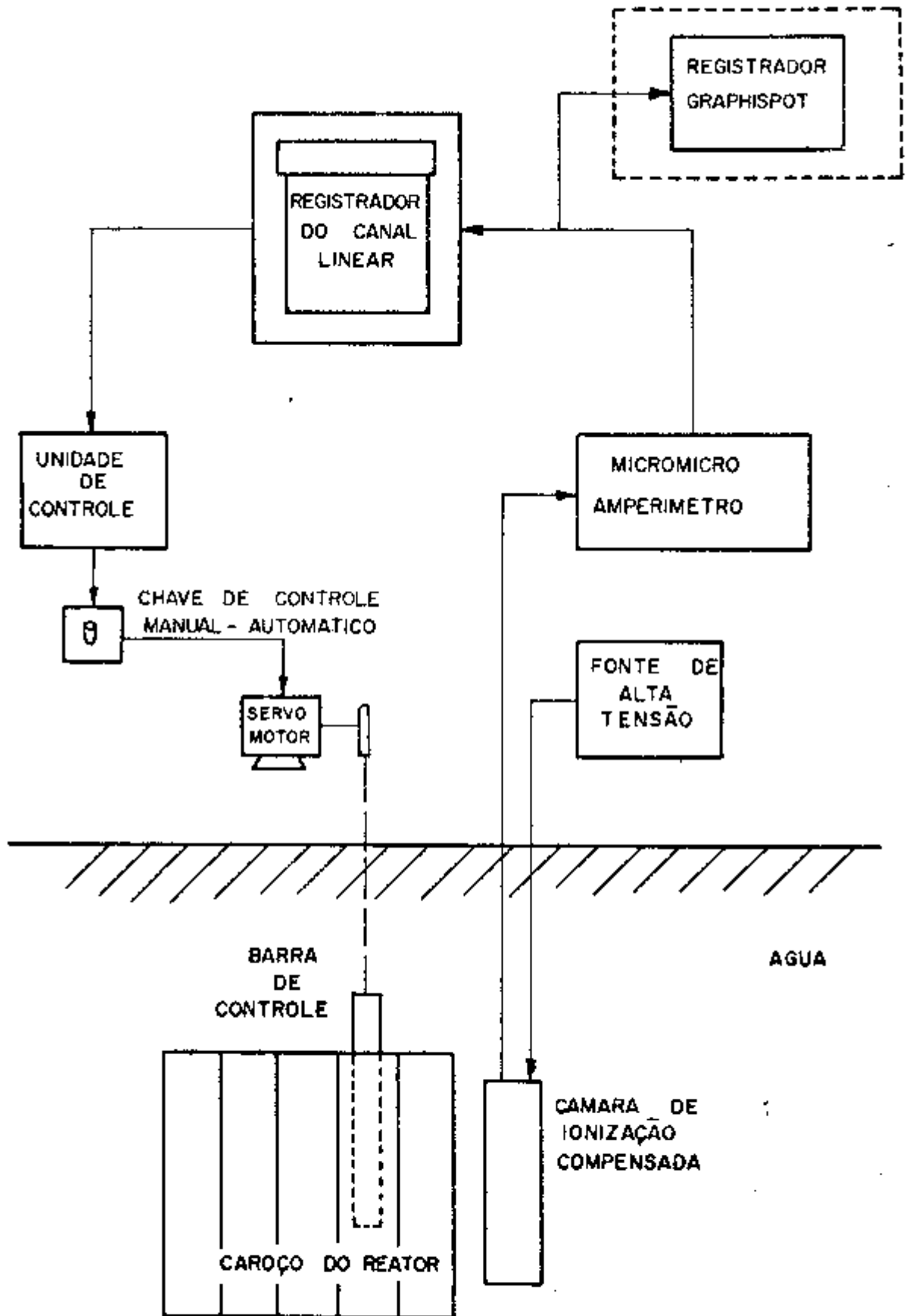


FIG. II-2
CANAL LINEAR

Na escala de amplitude de 5 mV as características do Graphispot⁽⁺⁾ são:

Tempo de resposta a 99%: 1,2 s.

Erro da linearidade inferior a 0,2%

Resolução menor que: 0,1%

Esta experiência foi repetida duas vezes, em dias diferentes, verificando-se a reprodutividade.

O resultado se encontra na Figura II-3.

II.2 - Simulação Analógica

Entre os parâmetros do modelo matemático desenvolvido no capítulo anterior, apenas os coeficientes de temperatura do moderador e do combustível, são desconhecidos, para o IEAR-1.

No entanto, conhecemos o coeficiente de temperatura não homogêneo, o global, ou seja, aquele que considera os efeitos da temperatura na reatividade devido a fenômenos no combustível e no moderador indistintamente. Sabemos ainda que nos reatores tipo piscina, a maior contribuição para o coeficiente de temperatura global é a variação da área de migração (soma da área de difusão com a área de moderação: $k^2 = L^2 + \tau$) com a temperatura (Is 63), portanto a maior contribuição é do moderador porque a área de migração depende essencialmente das propriedades deste. Finalmente conhecemos os coeficientes de temperatura de outros reatores (ver a Tabela II-1).

Tabela II-1

REATOR	POTÊNCIA	VAZÃO	TEMPERATURA SAÍDA	COEF. TEMPER.	
Melusine (France)*	1,2 MW		22,5°C	- 6 pcm/°C	
IEAR-1 (S. Paulo)*	2,0 MW	2600 gpm		-20 pcm/°C	
FNR (USA)*	1,0 MW	1000 gpm	90,0 °F	-9,9 pcm/°C	
IRL (USA)*	5,0 MW	2200 gpm	116,0 °F	-12,4 pcm/°C	
UVAR (USA)*	1,0 MW	1000 gpm	102,0 °F	-20 pcm/°C	
JEEP (D ₂ O)**				α_u	α_m
				-1,5 pcm/°C	-25 pcm/°C

+ Marca: SEFRAM - Modelo CR VAI

* Tipo Piscina (Directory of Nuclear Reactors, Vols. II e IV.

** Água Pesada (Referência Lu 54)

Baseados nestes fatos atribuímos valores hipotéticos aos coeficientes temperatura do moderador e do combustível para o reator IEAR-1 afim de proceder a simulação analógica. Atribuímos inicialmente os valores:

$$\alpha_u = -7 \text{ pcm/}^\circ\text{C} \quad \text{e} \quad \alpha_m = -15 \text{ pcm/}^\circ\text{C}$$

Simulação I - Verificação da validade do Modelo Matemático

Equacionamento do problema

As equações são:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{\beta}{\ell} P + \lambda C + \alpha_u \frac{P_o}{\ell} T_u + \alpha_m \frac{P_o}{\ell} T_m + \left(\frac{P_o}{\ell} \rho_p \right)$$

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{\beta}{\ell} P - \lambda C$$

$$M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = (1-a) P - h A T_u + h A T_m$$

$$V_m \rho_m C_m \frac{dT_m}{dt} = a P - h A T_u + (h A + 2 W_m C_w) T_m$$

Valores numéricos:

- $\beta = 0,00755$ - fração efetiva dos neutrons atrasados
- $\lambda = 0,077 \text{ s}^{-1}$ - Constante de decaimento dos precursores.
- $P_o = 2.000 \text{ Kw}$ - Potência do reator
- $h = 0,92 \text{ w/cm}^2\text{ }^\circ\text{C}$ - Coeficiente de troca (vazão 2600 gpm)

Dados do reator:

- $V_m = 57.184 \text{ cm}^3$ - Volume da água no caroço
- $W_m = 2.600 \text{ gpm}$ - Vazão da água no caroço
- $\rho_m = 1 \text{ g/cm}^3$ - densidade da água
- $C_m = 4,18 \text{ J/g/}^\circ\text{C} = 9,986 \times 10^{-4} \text{ k cal/g }^\circ\text{C}$ - Calor específico da água
- $A = 346884 \text{ cm}^2$ - Área total de troca

$\ell = 5 \times 10^{-4} \text{ s}$	- tempo de geração dos neutrons instantâneos
$M_u = 13.634,183 \text{ g}$	- Massa do Urânio no caroço
$C_u = 0,029 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$	- Capacidade térmica do Urânio
$a = 0,05$	- fração do calor gerado no moderador
$\alpha_u = -7 \text{ pcm/}^\circ\text{C}$	- Coeficiente de temperatura do combustível
$\alpha_m = -15 \text{ pcm/}^\circ\text{C}$	- Coeficiente de temperatura do moderador

A excitação: $\frac{P_0}{\ell} \rho_p$, onde $\rho_p = 40 \text{ pcm}$ (valor do degrau na experiência).

Substituindo estes valores numéricos no modelo incremental desenvolvido no capítulo anterior, encontra-se:

$$\frac{dP}{dt} = - 15,1 P + 0,077 C - 280 T_u - 600 T_m + \text{Excitação}$$

$$\frac{dC}{dt} = 15,1 P - 0,077 C$$

$$1,654 \frac{dT_u}{dt} = 0,95 P - 319,133 T_u + 319,133 T_m$$

$$238,9153 \frac{dT_m}{dt} = 0,05 P + 319,133 T_u - (319,133 + 1371,246) T_m$$

ou ainda:

$$\frac{dP}{dt} = 15,1 P + 0,077 C - 280 T_u - 600 T_m + \text{Excitação}$$

$$\frac{dC}{dt} = 15,1 P - 0,077 C$$

$$\frac{dT_u}{dt} = 0,574 P - 192,94 T_u + 192,94 T_m$$

$$\frac{dT_m}{dt} = 0,000209 P + 1,336 T_u - 7,075 T_m$$

O computador usado para este estudo foi um PACE TR-48, Seu intervalo útil de voltagem das variáveis de máquina é de 10 V, razão pela qual é necessário aplicar fatores de escala às variáveis do problema para transformá-las em variáveis de máquina. Na escolha desses fatores procurou-se fazer com que as voltagens fossem as mais altas possíveis, fornecendo soluções com precisão máxima.

Equações de Máquina

As variáveis de máquina serão:

$$\begin{aligned} P' &= bP & T_u' &= e T_u \\ C' &= dC & T_m' &= f T_m \\ t' &= at \end{aligned}$$

onde os fatores de escala selecionados foram:

$$\begin{aligned} a &= 2 \text{ s}^*/\text{s} & e &= 5 \times 10^{-2} \text{ V/}^\circ\text{C} \\ b &= 5 \times 10^{-3} \text{ V/Kw} & f &= 2 \text{ V/}^\circ\text{C} \\ d &= 5 \times 10^{-5} \text{ V/Kw} \end{aligned}$$

onde s^* significa segundo de máquina, ou seja a unidade de tempo que o computador leva para simular determinado fenômeno real.

As equações de máquina serão portanto:

$$\frac{dP'}{dt'} = \frac{-15,1}{a} P' + 0,077 \frac{b}{ad} C' - 280 \frac{b}{ae} T_u' - 600 \frac{b}{af} T_m' + \left(\frac{P_0}{L} \rho_p\right)$$

$$\frac{dC'}{dt'} = 15,1 \frac{d}{ab} P' - \frac{0,077}{a} C'$$

$$\frac{dT_u'}{dt'} = 0,574 \frac{e}{ab} P' - \frac{192,94}{a} T_u' + 192,94 \frac{e}{af} T_m'$$

$$\frac{dT_m'}{dt'} = 0,000209 \frac{f}{ab} P' + 1,336 \frac{f}{ae} T_u' - \frac{7,075}{a} T_m'$$

Substituindo os valores dos fatores de escala, encontra-se:

$$\frac{dP'}{dt'} = -7,55 P' + 3,85 C' - 14 T_u' - 0,75 T_m' + \left(\frac{b}{a} \frac{P_o}{\ell} p\right)$$

$$\frac{dC'}{dt'} = 0,0755 P' - 0,0385 C'$$

$$\frac{dT_u'}{dt'} = 0,287 P' - 96,47 T_u' + 2,41 T_m'$$

$$\frac{dT_m'}{dt'} = 0,0418 P' + 26,72 T_u' - 3,537 T_m'$$

A excitação é: $\frac{b}{a} \frac{P_o}{\ell} \rho_p = \frac{5 \times 10^{-3}}{2} \frac{2000}{5 \times 10^{-4}} \times 40 \times 10^{-5} = 4 \text{ volts.}$

Gerador de tempo:

O gerador de tempo e a escala X do "plotter" foram escolhidos de modo que a simulação tivesse a mesma escala de tempo da experiência no reator (6 cm/minuto). Assim:

GT: $0,005 \text{ V/s}^*$ ($s^* = \text{segundo de máquina}$)

Escala X do "plotter": $0,1 \text{ V/cm}$

Escala de tempo de simulação será: $\frac{0,005 \text{ V/s}^*}{0,1 \text{ V/cm}} = 0,05 \text{ cm/s}^*$

ou como $a = 2 \text{ s}^*/\text{s}$, $0,1 \text{ cm/s} = 6 \text{ cm/min}$

Condições iniciais:

Em se tratando de um modelo incremental as variáveis são incrementos do estado de equilíbrio, portanto as condições iniciais são tôdas nulas.

Escala Y do "plotter": $0,5 \text{ V/cm}$, como $b = 5 \times 10^{-3} \text{ V/Kw}$

a escala será: 100 Kw/cm

Diagrama da simulação:

Na figura II-4 se encontra o diagrama da simulação e na Tabela II-2 os valores colocados nos potenciômetros.

POT Nº	COEFICIENTE	VALOR COLOCADO	AJUSTADO
15	$\beta / \ell \cdot a$	0,755	0,7555
01	$\lambda \cdot b/ad$	0,385	0,3855
02	$\alpha_u \rho_o / \ell \cdot b/ae$	0,14	0,141
32	$\alpha_m \rho_o / \ell \cdot b/af$	0,75	
03	$\beta/\ell, d/ab$	0,0755	
00	λ/a	0,0385	
16	$(1-a)/M_u C_u \cdot e/ab$	0,287	
23	$h A/M_u C_u \cdot 1/a$	0,965	
30	$h A/M_u C_u \cdot e/af$	0,241	0,242
20	$a/V_m \rho_m C_m \cdot f/ab$	0,042	
47	$h A/V_m \rho_m C_m \cdot f/ae$	0,267	0,268
18	$(hA+2W C_m)/V_m \rho_m C_m \cdot 1/a$	0,354	
45	$\rho_o / \ell \cdot \rho_p \cdot b/a$	0,04	0,041

Valores dos Potenciômetros

Tabela II-2

Resultados:

A figura II-3 apresenta o resultado da simulação analógica da resposta de potência a um degrau de reatividade de 40 pcm comparada com a resposta experimental ao mesmo degrau. Nota-se que as duas curvas se aproximam bastante, apenas deslocada uma da outra devido ao valor do coeficiente de temperatura. Isto nos leva a concluir que o modelo matemático proposto no capítulo

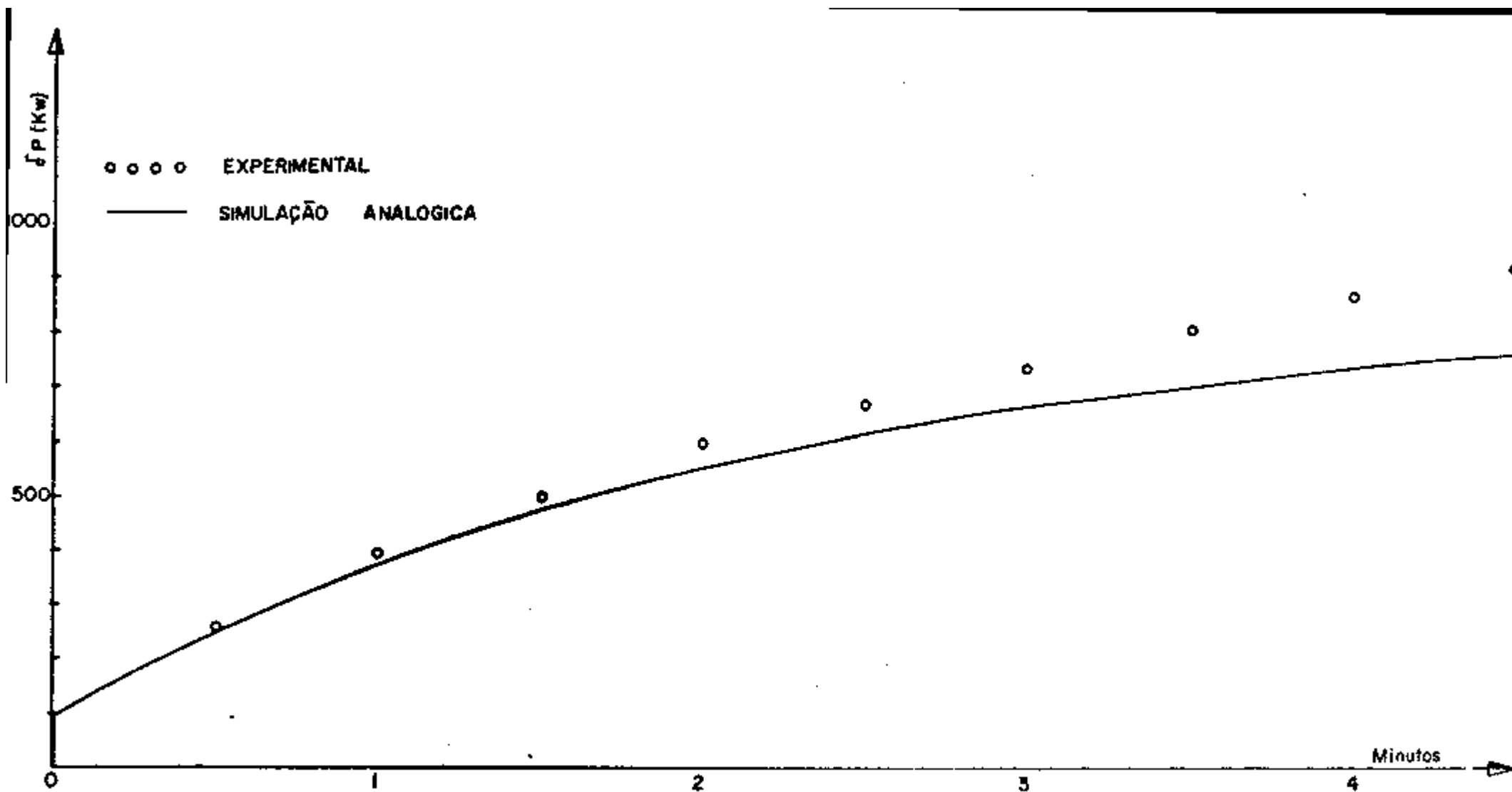


Fig- II- 3

Resposta de potência a um degrau de reatividade de 40 pcm. Comparação entre o resultado experimental e a simulação

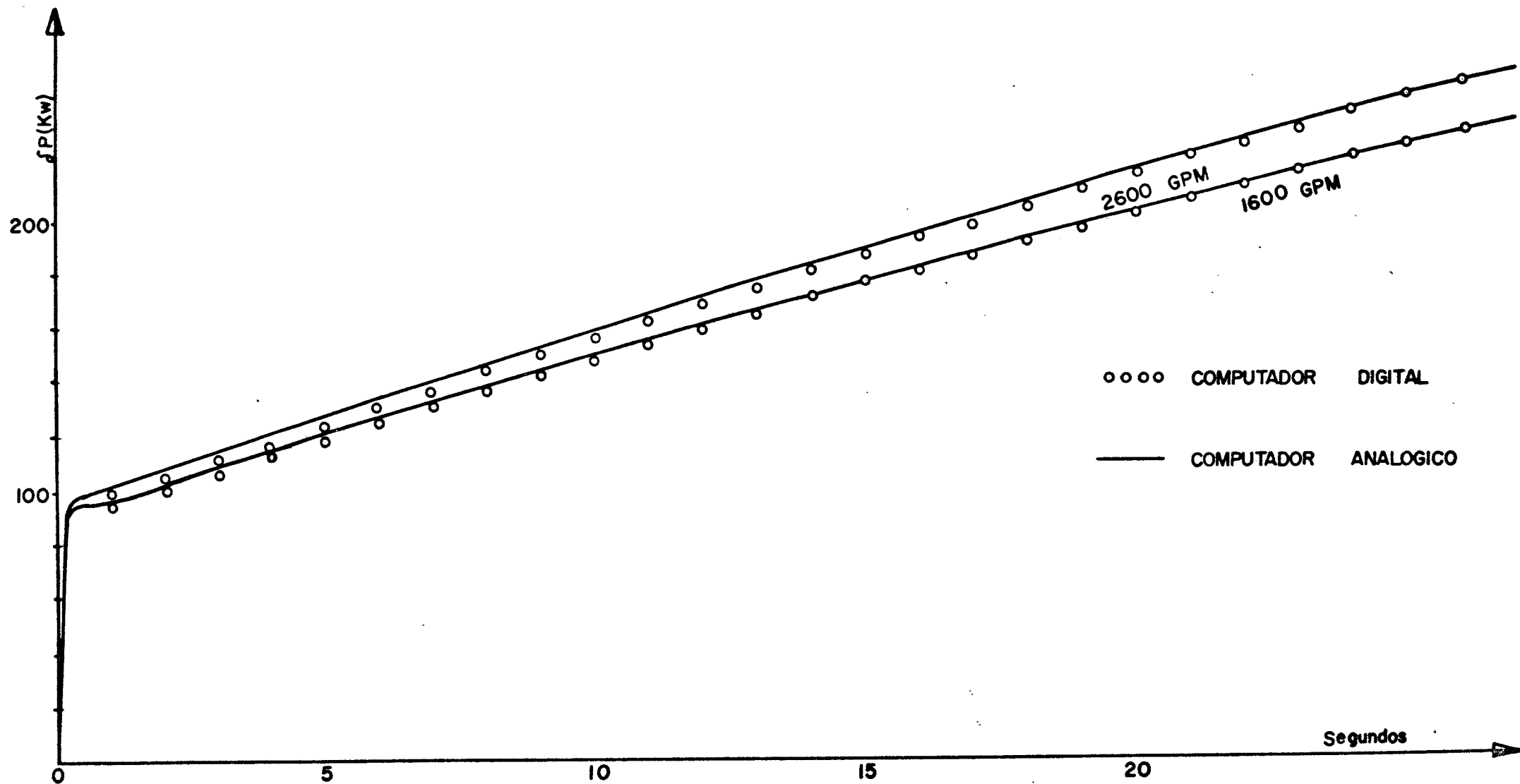


Fig- IV- 1

Respostas de potência a um degrau de reatividade de 38 pcm com reator com vazão normal e reduzida. Determinadas por simulação Analógica e cálculo analítico.

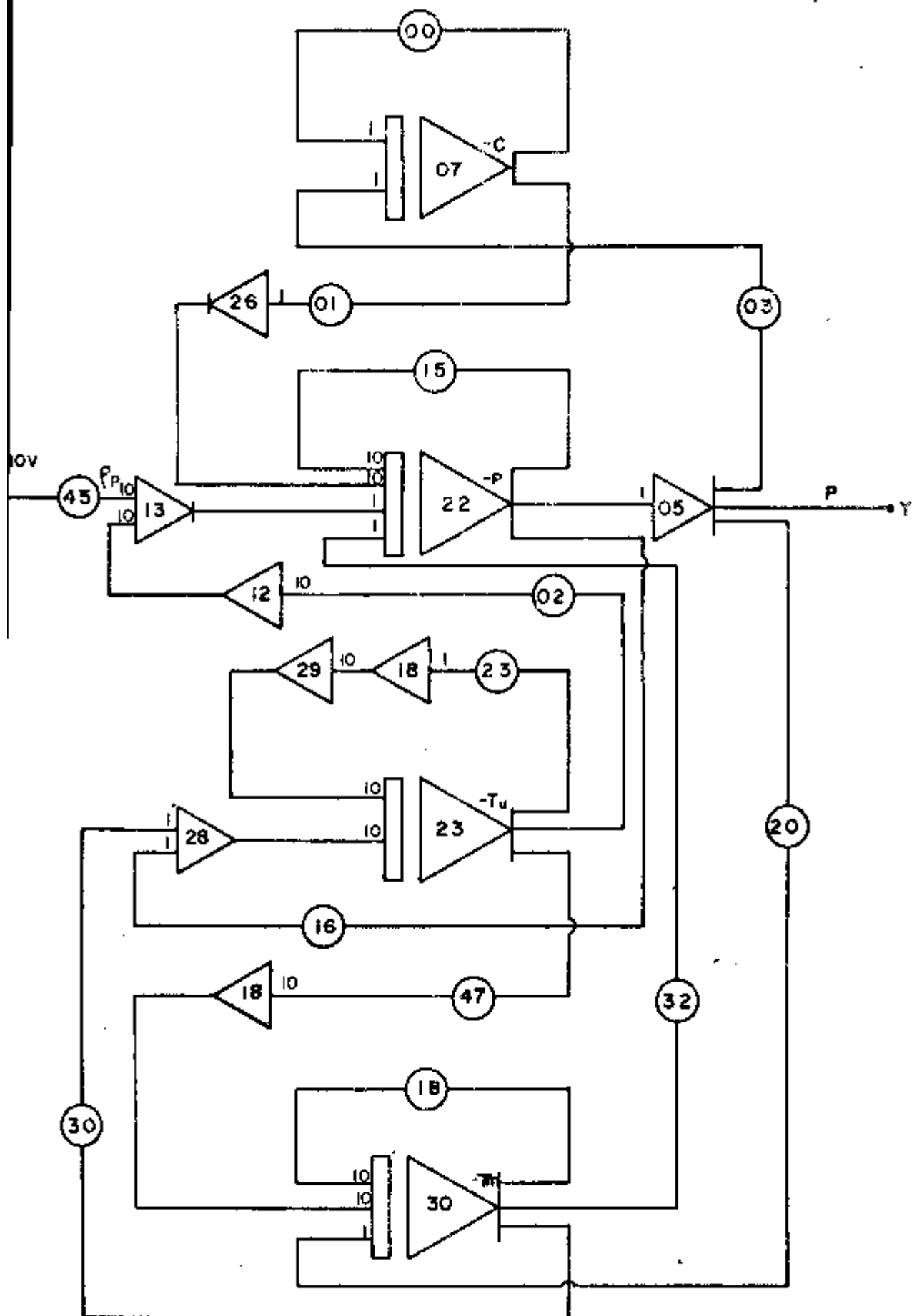


DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO ANALÓGICA
Fig. II-4

anterior é válido para o reator IEAR-1.

Simulação II - Estudo Paramétrico

Com os resultados da Simulação I, fizemos simulações analógicas para diversos valores dos coeficientes de temperatura em torno daqueles hipotéticos. As figuras II-5 e II-6 apresentam os resultados deste estudo paramétrico mostrando o processo de refinamento.

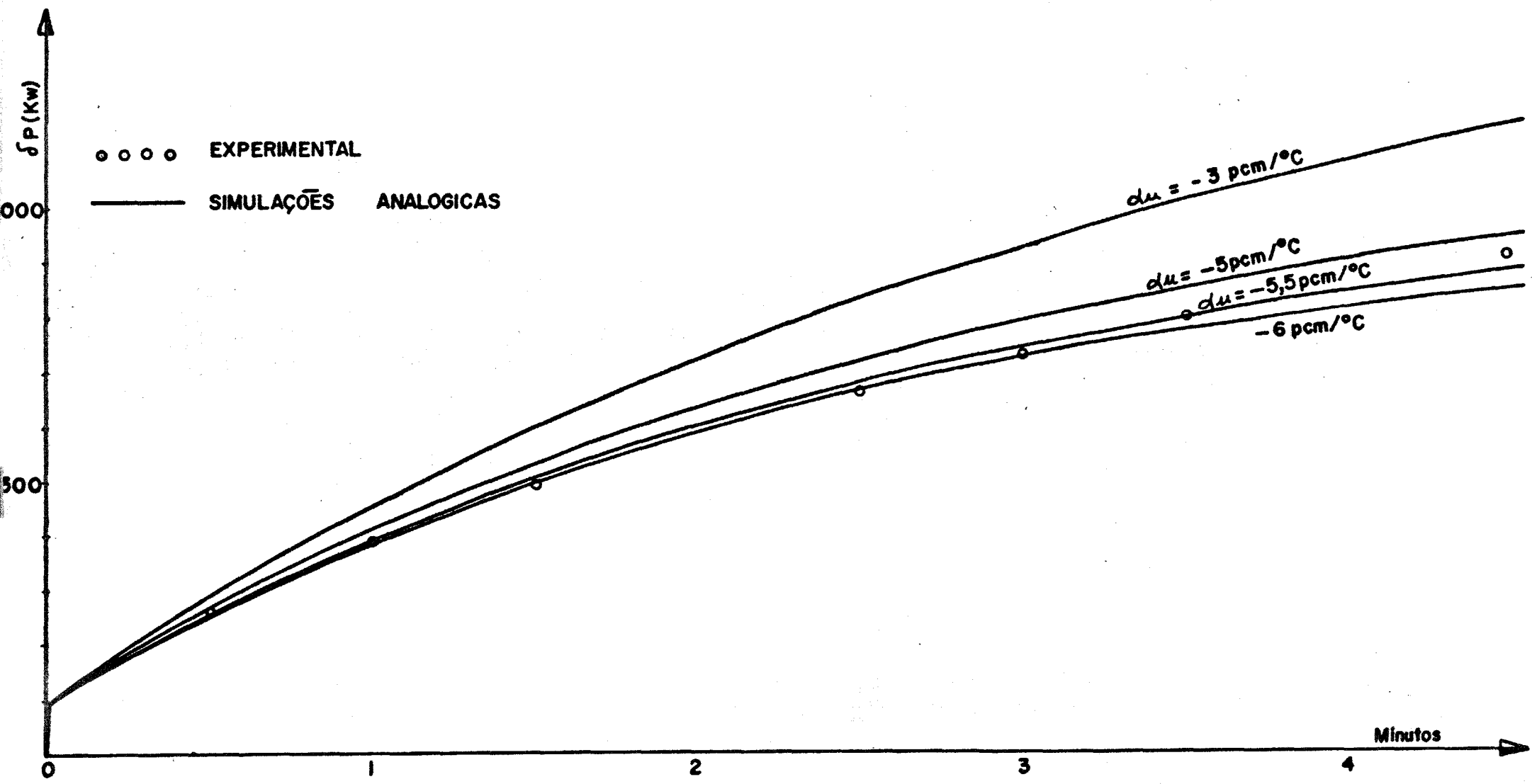
O diagrama dessas simulações é o mesmo da Simulação I, sendo alterados apenas os potenciômetros P-02 e P-32 correspondentes aos coeficientes de temperatura. Os valores correspondentes colocados nestes potenciômetros estão na Tabela II-3. Para os novos valores dos potenciômetros P-02 e P-32 verificou-se não haver necessidade de novos ajustes nos demais potenciômetros.

α_u (pcm/°C)	POT Nº 02	α_m (pcm/°C)	POT Nº 32
-6	0,12	-20	1
-3	0,06	-10	0,5
-5	0,10	-12	0,6
-5,5	0,11	-6	0,3

Tabela II-3

A figura II-7 apresenta o resultado final, onde se vê que com os valores de -5,5 pcm/°C para o coeficiente de temperatura do combustível e - 14 pcm/°C para o do moderador consegue-se uma boa reprodução da resposta experimental. Estes serão os valores adotados para o desenvolvimento deste trabalho e que podem ser considerados, dentro das aproximações da medida experimental e da simulação analógica, como os coeficientes de temperatura do reator IEAR-1.

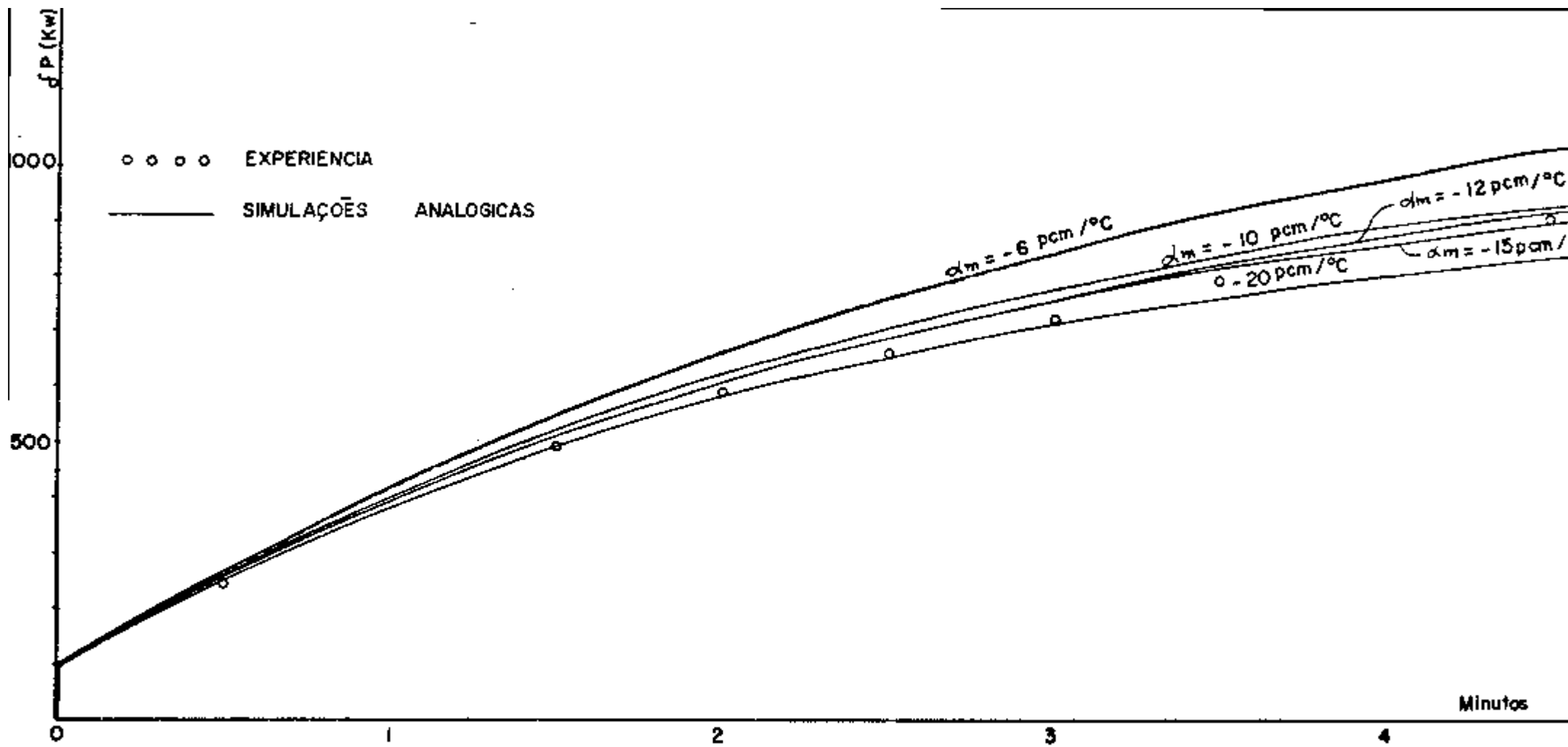
A análise dos resultados deste estudo paramétrico mostra que o coeficiente de temperatura do moderador não exerce grande influência na resposta transitória. Isto pode ser explicado pelo fato da vazão do refrigerante, o



SIMULAÇÃO II : ESTUDO PARAMETRICO ($d_m = -15 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$)

Fig. II - 5

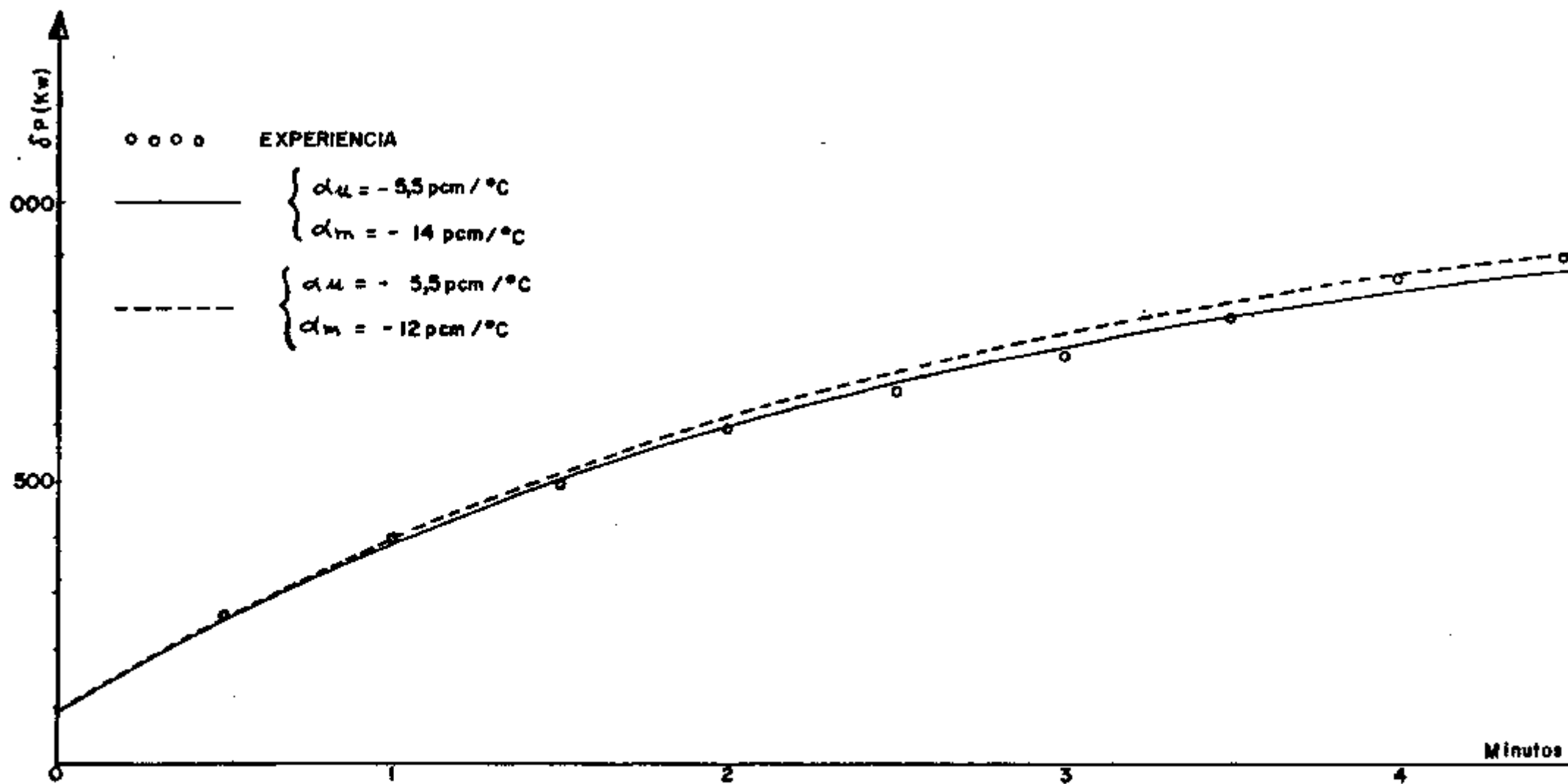
Respostas de potência a um degrau de reatividade de 40 pcm. Resultado Experimental e das simulações analógicas.



SIMULAÇÃO II: ESTUDO PARAMETRICO ($\alpha_m = -5,5 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$)

Fig.II-6

Respostas de potência a um degrau de reatividade de 40 pcm. Resultado Experimental e das simulações analógicas.



SIMULAÇÃO II: ESTUDO PARAMETRICO

Fig.II-7

Respostas de potência a um degrau de reatividade de 40 pcm. Experimental e simuladas.

próprio moderador, ser muito alta quando comparada com a vazão em reatores similares (Tabela II-1).

Simulação III

Afim de verificar possíveis fontes de erro nas medidas experimentais provocadas por flutuações de vazão do fluido refrigerante provenientes de flutuações de tensão da rede que alimenta os motores das bombas hidráulicas, fizemos uma simulação analógica do reator com vazão de 2400 gpm. Comparamos com os resultados para o reator com vazão nominal de 2600 gpm.

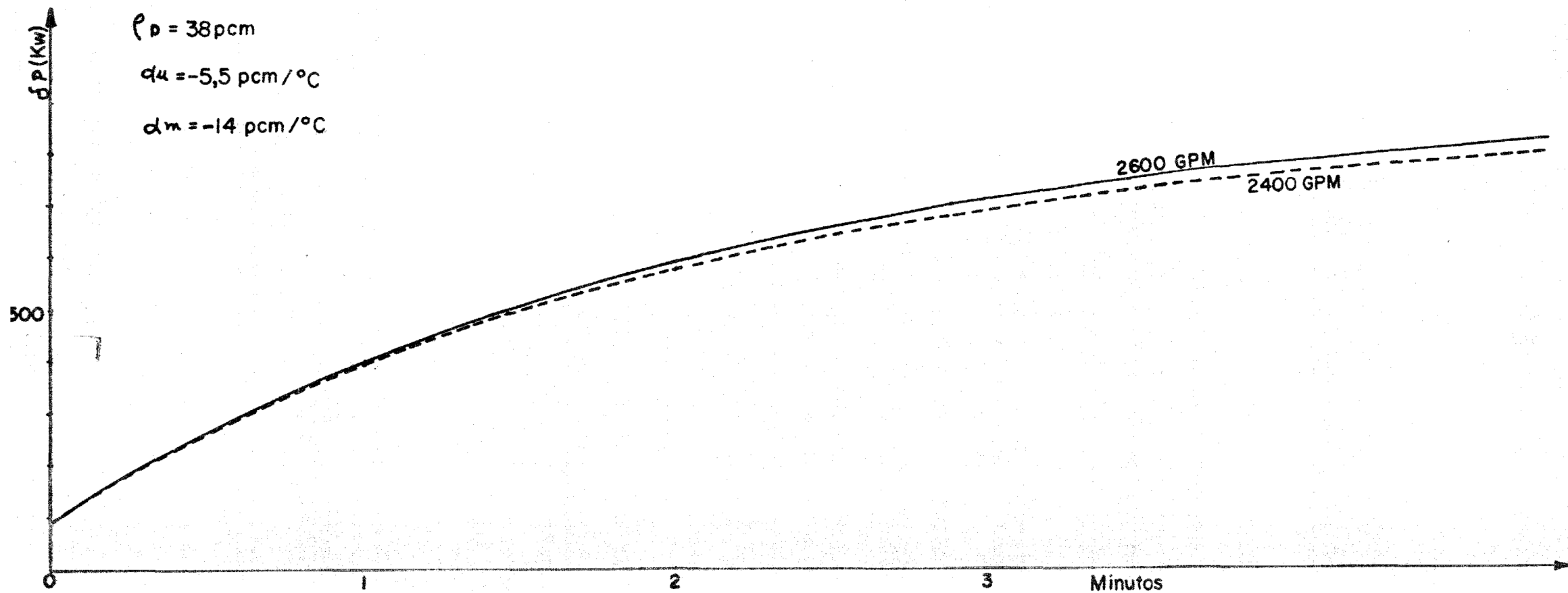
Neste caso o coeficiente de troca de calor, fica reduzido para 0,872 w/cm² °C (ver Tabela I-1 do Capítulo I).

O diagrama desta simulação é o mesmo das anteriores, modificando-se apenas os valores dos potenciômetros indicados abaixo.

COEFICIENTE	POT N°	VALOR(2600 gpm)	VALOR(2400 gpm)
hA/a	23	0,965	0,915
hA'e/af	30	0,241	0,229
hA f/ae	47	0,267	0,254
$(hA + 2W_{m,m} C_m)/a$	18	0,354	0,328

Tabela II-4

A figura II-8 apresenta o resultado desta simulação com vazão reduzida comparada com a correspondente à vazão nominal. Nota-se que mesmo com esta flutuação exagerada de vazão, 2600 para 2400, a simulação não apresenta uma diferença tão grande a ponto das pequenas flutuações reais deverem ser levadas em consideração nos resultados das medidas experimentais.



SIMULAÇÃO III: FLUTUAÇÃO DE VAZÃO

Fig. II-8

Simulações analógicas da resposta de potência a um degrau de reatividade de 38 pcm. Vazão do refrigerante normal e reduzida.

CAPÍTULO III

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA - MATRIZ DE TRANSIÇÃO

O objetivo deste capítulo é preparar o modelo matemático, demonstrado nos capítulos anteriores, para a análise do comportamento dinâmico do reator. Determinaremos a Matriz de Transição e a Função de Transferência pela técnica das Variáveis de Estado.

A Matriz de Transição permite, através de uma simples integração, o cálculo da forma analítica das respostas transitórias do sistema. A Função de Transferência desempenha um papel importante no estudo dinâmico dos reatores nucleares. Historicamente, a primeira aplicação do conceito da Função de Transferência nos reatores nucleares foi feito em 1948 por Langsdorf (La-48) em Argonne; no ano seguinte Piggott et. al. (Pi 49) utilizaram a Função de Transferência para fazer a especificação do servomecanismo das barras de controle do reator. Mas, foi o trabalho experimental de Harrer et. al. (Ha 52) que selou a justificação do uso do conceito de Função de Transferência nos reatores nucleares.

Nos últimos anos surgiram muitos trabalhos de aplicação de Função de Transferência em reatores nucleares para:

- a) Análise da estabilidade (Go 58 , Gy 60).
- b) Estudo da influência na dinâmica dos reatores, dos neutrons atrasados, tempo de geração, produtos de fissão e da temperatura (Go 62, Je 68 e Lu 54).
- c) Determinação dos coeficientes de temperatura pela comparação entre a Função de Transferência teórica e experimental (Je 68).

Em resumo, a Função de Transferência é elemento fundamental para o estudo do comportamento dinâmico dos reatores nucleares.

III.1 - Considerações teóricas

Modernamente, com o advento do conceito de Espaço Estado e formulação da teoria de Sistemas a variáveis de Estado, encontrou-se uma forma de análise de sistema de uma maneira global, ou seja, sem necessidade de diagramas de bloco com realimentação, etc.

Um sistema descrito por uma equação diferencial de grau n pode ser posto em forma normal, ou seja, pode ser transformado num sistema de n equações diferenciais do primeiro grau. A escolha das novas variáveis que vão compor o sistema na forma normal não é única. Pode acontecer que uma certa escolha não permita a observação de todos os modos naturais do sistema; neste caso ele é dito "não observável"; ou que não seja possível o controle de todos os modos naturais: neste caso o sistema é dito "não controlável". Felizmente há critérios simples para verificar a controlabilidade e observabilidade.

O conjunto das variáveis que comparecem nestas equações diferenciais de primeira ordem constitui o conjunto das variáveis de estado. Define-se o estado de um sistema como "o conjunto mínimo de variáveis, as variáveis de estado, que contém informações suficientes acerca do passado do sistema para determinar os estados futuros, admitindo que se conheçam as excitações e as equações do sistema". Com o sistema na forma normal é fácil escrevê-lo em forma matricial e toda a análise é feita nesta forma compacta e simples.

Tomemos um sistema de ordem n , linear, invariante no tempo, descrito pelas equações em forma matricial:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{B}u(t) \dots\dots\dots (III-1.1)$$

onde $\dot{\underline{x}}(t)$ é um vetor coluna ($n \times 1$). (As variáveis de estado)
 \underline{A} - matriz constante ($n \times n$)
 \underline{B} - matriz constante ($n \times 1$)
 $u(t)$ - escalar (a excitação)

Demonstra-se (Og 67, Sc 65) que o sistema homogêneo:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) \quad \text{tem por solução}$$
$$\underline{x}(t) = e^{\underline{A}t} \underline{x}_0 \dots\dots\dots (III-1.2)$$

onde \underline{x}_0 - é o estado inicial,

e $e^{\underline{A}t} = \phi(t)$ - é a Matriz de Transição

Para o sistema não homogêneo (III-1.1) a solução é dada por:

$$\underline{x}(t) = \phi(t-t_0) \underline{x}_0 + \int_{t_0}^t \phi(t-\tau) \underline{B} \underline{u}(\tau) d\tau \dots\dots\dots(III-1.3)$$

Vê-se de imediato que o conhecimento da Matriz de Transição $\phi(t)$ permite a determinação dos estados futuros do sistema desde que se conheça a excitação $\underline{u}(t)$ e o estado inicial.

III-1.1 - Cálculo da Matriz de Transição

Existem vários métodos para o cálculo da Matriz de Transição (ver por exemplo We 68 ou El 67), e usaremos o da Transformada de Laplace por ser simples quando não se trata de sistemas de ordem muito elevada.

Tomando o sistema homogêneo, e tomando sua Transformada de Laplace:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t)$$

s $\underline{x}(s) - \underline{x}_0 = \underline{A} \underline{x}(s)$, onde $\underline{x}(s) = L\{\underline{x}(t)\}$ é a Transformada de Laplace de $\underline{x}(t)$, e s é a variável da Transformada de Laplace.

Portanto: $\{sI - \underline{A}\} \underline{x}(s) = \underline{x}_0$, onde I é a matriz unitária

ou ainda, se $\{sI - \underline{A}\}$ é não singular: $\underline{x}(s) = \{sI - \underline{A}\}^{-1} \underline{x}_0$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace:

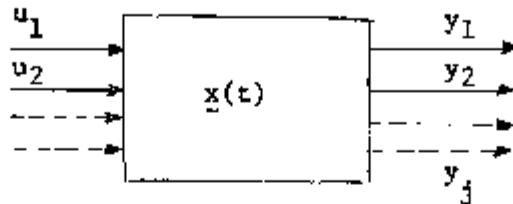
$$\underline{x}(t) = L^{-1} \{ \{sI - \underline{A}\}^{-1} \} \underline{x}_0$$

comparando esta expressão com a (III-1.2), concluímos que:

$$\phi(t) = L^{-1} \{ \{sI - \underline{A}\}^{-1} \}$$

III-1.2 - Cálculo da Função de Transferência

Supondo um sistema inicialmente no estado zero submetido a excitações $\underline{u}(t)$, com várias saídas:



onde u_1, u_2, \dots são as componentes do vetor $\underline{u}(t)$. Se o sistema for descrito por:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \underline{x}(t) + \underline{B} \underline{u}(t)$$

$$\underline{y}(t) = \underline{C} \underline{x}(t) \quad \text{equação de saída}$$

A função de transferência $H(s)$ ou matriz de transferência, no caso de várias entradas e saídas, é por definição:

$$\underline{Y}(s) = \underline{H}(s) \underline{U}(s)$$

onde $\underline{Y}(s) = L\{y(t)\}$ e $\underline{U}(s) = L\{u(t)\}$

Aplicando a Transformada de Laplace ao sistema acima:

$$s \underline{x}(s) = \underline{A} \underline{x}(s) + \underline{B} \underline{U}(s)$$

$$\underline{Y}(s) = \underline{C} \underline{x}(s)$$

Da primeira: $\left[sI - \underline{A} \right] \underline{x}(s) = \underline{B} \underline{U}(s)$

ou $\underline{x}(s) = \left[sI - \underline{A} \right]^{-1} \underline{B} \underline{U}(s)$

substituindo na segunda:

$$\underline{Y}(s) = \underline{C} \left[sI - \underline{A} \right]^{-1} \underline{B} \underline{U}(s)$$

portanto:

$$\underline{H}(s) = \underline{C} \left[s\underline{I} - \underline{A} \right]^{-1} \underline{E} \dots\dots\dots (III-1.5)$$

III.2 - O Modelo de Estado do Reator

Considerando o modelo incremental do reator, parágrafo 1.5 do Capítulo I, observa-se que as equações já estão na forma normal, onde as variáveis de estado são respectivamente a variação de potência P, a variação da concentração dos precursores de neutrons atrasados C, a variação da temperatura do combustível T_u e a variação da temperatura do moderador T_m; a excitação é a perturbação da reatividade ρ_p(t). Sendo este sistema linear e invariante no tempo pode-se usar diretamente o exposto no parágrafo anterior.

Em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{C} \\ \dot{T}_u \\ \dot{T}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta/\ell & \lambda & \alpha_u P_o/\ell & \alpha_m P_o/\ell \\ \beta/\ell & -\lambda & 0 & 0 \\ a_1 & 0 & -g_1 & g_1 \\ a_2 & 0 & g_2 & -h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ C \\ T_u \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_o/\ell \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \left[\rho_p(t) \right] \quad (III-2.1)$$

onde $a_1 = \frac{1-a}{M_u C_u}$, $a_2 = \frac{a}{V_m \rho_m C_m}$

$$g_1 = \frac{hA}{M_u C_u} , \quad g_2 = \frac{hA}{V_m \rho_m C_m} \quad \text{e} \quad h_2 = \frac{hA + 2W_m C_m}{V_m \rho_m C_m}$$

Como neste trabalho só nos interessa a função de Transferência entre reatividade e potência, a equação de saída será:

$$P = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} P \\ C \\ T_u \\ T_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III-2.2)$$

III.3 - Matriz de Transição do Reator

Vimos a importância da Matriz de Transição para o cálculo da resposta transitória de um sistema a uma excitação conhecida.

A forma analítica dessas respostas, de uma maneira genérica, vimos ser:

$$\underline{x}(t) = \Phi(t-t_0) \underline{x}_0 + \int_{t_0}^t \Phi(t-\tau) \underline{B} \underline{u}(\tau) d\tau$$

No nosso caso trata-se de um modelo incremental onde as variáveis de estado representam variações a partir do estado de equilíbrio, portanto quando o sujeito a excitação, ou perturbação, nosso sistema parte do estado zero, ou seja $\underline{x}_0 = \underline{0}$

Logo:
$$\underline{x}(t) = \int_0^t \Phi(t-\tau) \underline{B} \underline{u}(\tau) d\tau \dots\dots\dots (III-3.1)$$

No nosso caso
$$\underline{x} = \begin{pmatrix} P \\ C \\ T_u \\ T_m \end{pmatrix} \quad e \quad \underline{u} = \{ \rho_p(t) \}$$

Pela expressão acima vê-se que para o cálculo da resposta transitória será feito o produto $\Phi(t-\tau) \underline{B}$. Como a matriz \underline{B} tem a forma

$$\underline{B} = \begin{pmatrix} P_0/\ell \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

conclui-se que basta calcular os elementos da primeira coluna da matriz de transição. Os demais são desnecessários uma vez que vão ser multiplicados por zero.

A matriz de transição é:

$$\Phi(t) = L^{-1} \left\{ [sI - \underline{A}]^{-1} \right\}$$

Por (III-2.1) podemos escrever:

$$[sI - \underline{A}] = \begin{bmatrix} s + \beta/\ell & -\lambda & -P_0/\ell \alpha_u & -P_0/\ell \alpha_m \\ -\beta/\ell & s + \lambda & 0 & 0 \\ -a_1 & 0 & s + g_1 & -g_1 \\ -a_2 & 0 & -g_2 & s + h_2 \end{bmatrix}$$

$$[sI - \underline{A}]^{-1} = \frac{[\text{adj } (sI - \underline{A})]^T}{|sI - \underline{A}|}$$

Se só precisamos os elementos da primeira coluna da matriz de transição, basta calcular os elementos da primeira linha de $\text{adj } [sI - \underline{A}]$, ou seja os cofatores dos elementos da primeira linha de $[sI - \underline{A}]$. Estes são:

$$\alpha_{11}$$

$$\alpha_{11} = (s + \lambda) \left[(s + g_1)(s + h_2) - g_1 g_2 \right]$$

$$\alpha_{11} = s^3 + (g_1 + h_2 + \lambda) s^2 + (g_1 h_2 - g_1 g_2 + \lambda g_1 + \lambda h_2) s + \lambda g_1 h_2 - \lambda g_1 g_2$$

$$\alpha_{12}$$

$$\alpha_{12} = \beta/\ell \left[(s + g_1)(s + h_2) - g_1 g_2 \right] = \beta/\ell \left[s^2 + (g_1 + h_2) s + g_1 h_2 - g_1 g_2 \right]$$

$$\alpha_{13}$$

$$\alpha_{13} = (s + \lambda) \left[a_1(s + h_2) + a_2 g_1 \right] = a_1 s^2 + (a_1 h_2 + a_1 \lambda + a_2 g_1) s + a_1 \lambda h_2 + a_2 g_1 \lambda$$

$$\alpha_{14}$$

$$\alpha_{14} = - \left[-(s + \lambda) (a_1 g_2 + a_2 (s + g_1)) \right]$$

$$\alpha_{14} = a_2 s^2 + (a_1 g_2 + a_2 g_1 + a_2 \lambda) s + a_1 g_2 \lambda + a_2 g_1 \lambda$$

$$\text{O determinante } |sI - \underline{A}| = (s + \beta/\ell) \begin{bmatrix} s + \lambda & 0 & 0 \\ 0 & (s + g_1) & -g_1 \\ 0 & -g_2 & s + h_2 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -\beta/\ell & 0 & 0 \\ -a_1 & s + g_1 & -g_1 \\ -a_2 & -g_2 & s + h_2 \end{bmatrix} -$$

$$-(P_o/\ell)\alpha_u \begin{pmatrix} -\beta/\ell & s+\lambda & 0 \\ -a_1 & 0 & -g_1 \\ -a_2 & 0 & s+h_2 \end{pmatrix} + (P_o/\ell)\alpha_m \begin{pmatrix} -\beta/\ell & s+\lambda & 0 \\ -a_1 & 0 & s+g_1 \\ -a_2 & 0 & -g_2 \end{pmatrix}$$

ou

$$|sI-A| = (s+\beta/\ell)(s+\lambda)(s+g_1)(s+h_2) - g_1g_2(s+\beta/\ell)(s+\lambda)$$

$$- \frac{\beta\lambda}{\ell}(s+g_1)(s+h_2) + \frac{\beta\lambda}{\ell}g_1g_2 - \frac{P_o}{\ell}\alpha_u(s+\lambda)a_1(s+h_2)$$

$$- \frac{P_o}{\ell}\alpha_u a_2g_1(s+\lambda) - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_1g_2(s+\lambda) - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_2(s+\lambda)(s+g_1)$$

desenvolvendo, encontra-se

$$|sI-A| = s^4 + k_1s^3 + k_2s^2 + k_3s + k_4$$

onde:

$$k_1 = \beta/\ell + \lambda + g_1 + h_2$$

$$k_2 = g_1\beta/\ell + \lambda g_1 + h_2\beta/\ell + \lambda h_2 + g_1h_2 - g_1g_2 - \alpha_u \frac{P_o}{\ell}a_1 - \alpha_m \frac{P_o}{\ell}a_2$$

$$k_3 = h_2g_1\beta/\ell + h_2g_1\lambda - g_1g_2\beta/\ell - g_1g_2\lambda - \frac{P_o}{\ell}\alpha_u a_1\lambda - \frac{P_o}{\ell}\alpha_u a_1h_2$$

$$- \frac{P_o}{\ell}\alpha_u a_2g_1 - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_1g_2 - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_2\lambda - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_2g_1$$

$$k_4 = - \frac{P_o}{\ell}\alpha_u a_1h_2\lambda - \frac{P_o}{\ell}\alpha_u a_2g_1\lambda - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_1g_2\lambda - \frac{P_o}{\ell}\alpha_m a_2\lambda g_1$$

Portanto a matriz de Transição será

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} L^{-1} \left\{ \frac{\alpha_{11}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ L^{-1} \left\{ \frac{\alpha_{12}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ L^{-1} \left\{ \frac{\alpha_{13}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ L^{-1} \left\{ \frac{\alpha_{14}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \end{bmatrix}$$

Onde o determinante $|sI-\underline{A}|$ e os α_{11} , α_{12} , α_{13} e α_{14} são calculados pelas expressões indicadas.

Fizemos um programa em FORTRAN II-D para o computador IBM-1620, intitulado MTR-FT, que calcula o determinante $|sI-\underline{A}|$, os α 's e a transformada inversa de Laplace, portanto a matriz de transição; desde que se conheçam os coeficientes do modelo incremental. Para o cálculo da resposta transitória a uma perturbação, basta aplicar a expressão (III-3.1).

III.4 - A Função de Transferência do Reator

Pela expressão (III-1.5), a função de transferência é dada por:

$$\underline{H}(s) = \frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \underline{C} [sI-\underline{A}]^{-1} \underline{B}$$

substituindo-se, sabendo-se que

$$\underline{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} P_o/\ell \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

vem:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}{|sI - \underline{A}|} \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \alpha_{31} & \alpha_{41} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{32} & \alpha_{42} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} & \alpha_{43} \\ \alpha_{14} & \alpha_{24} & \alpha_{34} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_o/\ell \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

onde os α_{ij} são cofatores dos elementos (i,j) de $[sI - \underline{A}]$

Efetuando o produto obtém-se, finalmente:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{(P_o/\ell)\alpha_{11}}{|sI - A|}$$

Considerando a expressão de α_{11} e $|sI - A|$ calculadas no parágrafo anterior, obtemos a Função de Transferência:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{P_o/\ell (s+\lambda) \left\{ (s+g_1)(s+h_2) - g_1g_2 \right\}}{s^4 + k_1s^3 + k_2s^2 + k_3s + k_4}$$

O programa MTR-FT, cuja listagem e equivalência de variáveis se encontra no APÊNDICE A, calcula os polos e os zeros da expressão acima.

III.5 - Reator sem Neutrons Atrazados

Na realidade não existe reator sem neutrons atrazados, mas como nos interessa estudar o discutido efeito dos neutrons atrazados na estabilidade do reator IEAR-1, calcularemos função de transferência e matriz de transição teóricas do reator sem êstes.

A não consideração dos neutrons atrazados equivale a fazer λ e β nulos nas equações do modelo. Portanto, estas se reduzem a:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_o}{\ell} \alpha_u T_u + \frac{P_o}{\ell} \alpha_m T_m + \frac{P_o}{\ell} \rho_p$$

$$\frac{dT_u}{dt} = a_1 P - g_1 T_u + g_1 T_m$$

$$\frac{dT_m}{dt} = a_2 P + g_2 T_u - h_2 T_m$$

ou

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{T}_u \\ \dot{T}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (P_o/l)\alpha_u & (P_o/l)\alpha_m \\ a_1 & -g_1 & g_1 \\ a_2 & g_2 & -h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_u \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_o/l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \left[(P_o) \right]$$

a equação de saída:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_o/l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

III-5.1 - Matriz de Transição

$$\Phi(t) = L^{-1} \left\{ [sI - \underline{A}]^{-1} \right\}$$

$$[sI - \underline{A}] = \begin{bmatrix} s & -(P_o/l)\alpha_u & -(P_o/l)\alpha_m \\ -a_1 & s+g_1 & -g_1 \\ -a_2 & -g_2 & s+h_2 \end{bmatrix}$$

O determinante é:

$$|sI - A| = s \left[(s+g_1)(s+h_2) - g_1 g_2 \right] + (P_o/l)\alpha_u \left(-a_1(s+h_2) - a_2 g_1 \right) - (P_o/l)\alpha_m \left(a_1 g_2 + a_2 (s+g_1) \right)$$

Desenvolvendo; encontra-se

$$|sI-\underline{A}| = s^3 + (g_1+h_2) s^2 + (g_1 h_2 - P_o/\ell \alpha_u a_1 - P_o/\ell \alpha_m a_2) s - g_1 g_2 s - (P_o/\ell) \alpha_u a_1 h_2 - (P_o/\ell) \alpha_u a_2 g_1 - (P_o/\ell) \alpha_m a_1 g_2 - (P_o/\ell) \alpha_m a_2 g_1$$

Para a matriz $[sI-\underline{A}]^{-1}$ temos:

$$[sI-\underline{A}]^{-1} = \frac{1}{|sI-\underline{A}|} \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{21} & \gamma_{31} \\ \gamma_{12} & \gamma_{22} & \gamma_{32} \\ \gamma_{13} & \gamma_{23} & \gamma_{33} \end{pmatrix}$$

onde os γ_{ij} tem significado equivalente aos α_{ij} do caso anterior.

Como a matriz $\underline{B} = [P_o/\ell \ 0 \ 0]^T$, e a matriz de transição na resposta transitória vai ser multiplicada por \underline{B} , só precisamos calcular os cofatores γ_{11} , γ_{12} e γ_{13} analogamente ao que ocorrem quando consideramos os neutrons atrasados.

Cálculo dos cofatores

$$\gamma_{11} = (s+g_1)(s+h_2) - g_1 g_2 = s^2 + (g_1+h_2) s + g_1 h_2 - g_1 g_2$$

$$\gamma_{12} = -(-a_1(s+h_2) - a_2 g_1) = a_1 s + a_1 h_2 + a_2 g_1$$

$$\gamma_{13} = a_1 g_2 + a_2(s+g_1) = a_2 s + a_2 g_1 + a_1 g_2$$

e a matriz de transição será:

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} L^{-1} \left\{ \frac{\gamma_{11}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} \\ L^{-1} \left\{ \frac{\gamma_{12}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} \\ L^{-1} \left\{ \frac{\gamma_{13}}{|sI-\underline{A}|} \right\} & \text{---} & \text{---} \end{pmatrix}$$

III-5.2 - Função de Transferência

$$H(s) = \frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \underline{C} [sI - \underline{A}]^{-1} \underline{B}$$

Portanto:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}{|sI - \underline{A}|} \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{21} & \gamma_{31} \\ \gamma_{12} & \gamma_{22} & \gamma_{32} \\ \gamma_{13} & \gamma_{23} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_o/\ell \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ou

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{21} & \gamma_{31} \end{bmatrix}}{|sI - \underline{A}|} \begin{bmatrix} P_o/\ell \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Finalmente:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{(P_o/\ell)\gamma_{11}}{|sI - \underline{A}|}$$

O programa MTR-FT para o computador digital, também calcula a Matriz de Transição e Função de Transferência para este caso do reator sem o efeito dos neutrons atrasados.

Todo este formalismo será utilizado no próximo capítulo, através do programa MTR-FT, quando analisaremos o comportamento dinâmico do reator IEAR-1 em diversas condições de operação.

CAPÍTULO IV

COMENTÁRIOS E APLICAÇÕES

Na análise do comportamento dinâmico de um sistema, em primeiro lugar está a sua estabilidade, em segundo, os transientes que apresenta quando submetido a excitações padrões.

Um sistema estável poderia, quando submetido a uma perturbação, apresentar transientes com "overshoots" perigosos para sua segurança.

A análise das funções de transferência responde bem às questões de estabilidade, e um pouco sobre os transientes, através da correlação existente entre resposta de frequência e transitória. As funções de transferência são ainda muito úteis para o projeto do controle automático do sistema, bem como para a determinação de parâmetros do sistema pela comparação entre a resposta de frequência experimental e a função de transferência teórica.

O nosso objetivo nesta dissertação foi estudar o comportamento dinâmico do reator IEAR-1, ou seja, os transientes do reator quando submetido a uma perturbação de reatividade, em diversas condições de operação. Neste sentido, o cálculo da função de transferência teve por objetivo dar uma contribuição a trabalhos posteriores que necessitem diretamente da função de transferência do reator.

O desenvolvimento do modelo matemático do reator pela técnica das variáveis de Estado, e o do programa digital MTR-FT para o computador digital IBM-1620, permitem o cálculo, com facilidade, das respostas transitórias do reator quando submetido a qualquer pequena perturbação de reatividade e em qualquer condição de operação, desde que se conheçam os valores numéricos dos parâmetros que comparecem no modelo matemático considerado.

As curvas correspondentes a respostas transitórias também poderiam ser obtidas por simulação no computador analógico. Porém julgamos que, apesar da versatilidade dos computadores analógicos e rapidez de soluções para estudos paramétricos, nossa contribuição para trabalhos futuros é de menor interesse porque a precisão dos resultados obtidos com computadores analógicos

depende muito de uma boa escolha dos fatores de escala e da habilidade do operador em ajustar os potenciômetros.

A excitação usada nos resultados finais que apresentaremos, foi um degrau de reatividade.

Considerando a expressão (III-3.1) do Capítulo III,

$$\underline{x}(t) = \int_0^t \Phi(t-\tau) B \underline{u}(\tau) d\tau \dots\dots\dots (IV.1)$$

temos, no nosso caso:

$$\underline{x}(t) = \begin{matrix} P(t) \\ C(t) \\ T_u(t) \\ T_m(t) \end{matrix}, \quad u(t) = \rho_p \quad e \quad B = \begin{matrix} P_o/l \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$$

Se o sistema não possui autovalores múltiplos, os elementos da Matriz de Transição serão formados de uma simples combinação linear de exponenciais, do tipo: $\sum k_i e^{-\lambda_i t}$, onde $-\lambda_i$ é o i -ésimo autovalor e k_i é o resíduo no autovalor.

Portanto, as respostas transitórias de cada uma das variáveis de estado P, C, T_u e T_m (lembrando que são variações em torno de estado de equilíbrio) será dada por uma soma de integrais do tipo:

$$\int_0^t (P_o/l) \rho_p k_i e^{-\lambda_i(t-\tau)} d\tau = \frac{k}{\lambda_i} e^{-\lambda_i t} \left[e^{\lambda_i \tau} \right]_0^t = \frac{k}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (IV.2)$$

Fizemos um programa digital em FORTRAN II-D, intitulado TRANSIENTE, que, baseado no resultado acima, calcula a forma analítica das respostas transitórias e os pontos da curva correspondente (ver APÊNDICE B).

A seguir apresentaremos alguns resultados, apresentados sob forma da função de transferência e respostas transitórias (gráficas e analíticas) a uma excitação de reatividade em forma de degrau e para duas condições iniciais de equilíbrio: a) Operação normal

b) Operação com vazão reduzida do refrigerante.

IV-1.1 - Reator em Operação Normal

Em operação normal o reator IEAR-1 funciona na potência de 2 Mw, com vazão do refrigerante de 2600 gpm.

A função de transferência, desenvolvida no capítulo III, é dada por:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{(P_o/\ell) \alpha_{11}}{s^4+k_1s^3+k_2s^2+k_3s+k_4} \dots\dots\dots (IV.3)$$

em 2 Mw:

$$\frac{P_o}{\ell} = \frac{2000}{5 \times 10^{-4}} = 4 \times 10^6$$

Os polos e os zeros da função de transferência foram calculados pelo programa MTR-FT e os resultados numéricos permitem escrever (IV-3) como:

$$\frac{P(s)}{\rho_p(s)} = \frac{4 \times 10^6 (s+0,076)(s+5,69)(s+194,316)}{(s+0,0057)(s+6,04)(s+15,52)(s+193,63)} \dots\dots\dots (IV.4)$$

Todos os polos são reais e localizados no semiplano esquerdo do plano complexo. Portanto, o sistema é estável e a resposta de potência não apresenta "overshoot". De fato, na simulação analógica apresentada no Capítulo II, não se nota "overshoot".

Respostas Transitórias em Regime Normal

A função de transferência mostra ainda que o sistema não possui autovalores múltiplos nem complexos; portanto a forma analítica das respostas transitórias a um degrau é uma combinação linear de exponenciais. E como todos os polos estão localizados no semiplano esquerdo, serão exponenciais decrescentes.

Neste caso do reator em operação normal, a Matriz de Transição, calculada pelo programa MTR-FT, é dada por (escreveremos apenas a primeira coluna):

$$\Phi(t) = \begin{cases} 0,435 \times 10^{-2} e^{-0,0057t} - 0,0355 e^{-6,04t} + 1,0349 e^{-15,52t} - 0,0039 e^{-193,63t} \dots \\ 0,9217 e^{-0,0057t} + 0,0898 e^{-6,04t} - 1,0119 e^{-15,52t} + 0,000302 e^{-193,63t} \dots \\ 0,151 \times 10^{-4} e^{-0,0057t} + 0,00206 e^{-6,04t} + 0,00103 e^{-15,52t} - 0,0031 e^{-193,63t} \dots \\ 0,317 \times 10^{-5} e^{-0,0057t} + 0,447 \times 10^{-3} e^{-6,04t} - 0,474 \times 10^{-3} e^{-15,52t} + 0,229 \times 10^{-4} e^{-193,63t} \dots \end{cases}$$

Conhecida a Matriz de Transição, os cálculos realizados pelo programa TRANSIENTE dão os seguintes resultados para as respostas transitórias das variáveis de estado, a um degrau de 38 pcm.

Variação da Potência (Kw):

$$P = 1239,135 - 1146,73 e^{-0,0057t} + 8,9 e^{-6,04t} - 101,35 e^{-15,52t} + 0,0304 e^{-193,63t} \dots$$

(IV.5)

Variação da Temperatura do Combustível (°C)

$$T_u = 4,589 - 3,99 e^{-0,0057t} - 0,52 e^{-6,04t} - 0,1 e^{-15,52t} + 0,0244 e^{-193,63t}$$

Variação da Temperatura da Água (°C)

$$T_m = 0,9 - 0,83 e^{-0,0057t} - 0,1127 e^{-6,04t} + 0,04639 e^{-15,52t} - 0,00018 e^{-193,63t}$$

Analisando a forma analítica da resposta de potência, vê-se que a primeira parcela do transiente, que contribue bastante, tem uma constante de tempo (1/0,0057 s) da ordem de dois minutos e meio, portanto o tempo de assentamento deverá ser bastante grande confirmando, aliás, os resultados das simulações analógicas e da resposta de potência experimental, apresentadas no Capítulo II. Quanto à última parcela, tem uma constante de tempo da ordem de 1/193,63 ≈ 5,2 milisegundos, e contribui pouco para a resposta transitória. No regime permanente, este degrau de 38 pcm dá uma variação de potência de 1239 Kw.

A Fig. IV-1 apresenta a resposta de potência calculada pelo programa TRANSIENTE comparada com uma simulação analógica similar (o esquema desta

simulação analógica é o mesmo apresentado no Capítulo II, modificando-se apenas o ajuste do potenciômetro para o valor correspondente à excitação bem como a escala do "plotter"). Nota-se que com este degrau de reatividade de 38 pcm, no primeiro segundo a potência sobe de ~ 100 Kw.

Quanto às temperaturas nota-se que o comportamento é análogo.

Em relação à temperatura da água, sua variação é muito pequena. Isto era esperado, pois no estudo paramétrico dos coeficientes de temperatura verificou-se que o coeficiente de temperatura da água influiu pouco na resposta de potência.

IV-1.2. - Reator Operando com Vazão Reduzida (1600 GPM)

Se analisarmos a Tabela II do Capítulo II verifica-se que o reator IEAR-1 opera com vazão do refrigerante muito alta em relação a reatores similares.

Numa tentativa de melhorar as condições de operação do reator IEAR-1, ou seja, deixá-lo mais estável, procuramos estudar o seu comportamento dinâmico com vazão reduzida. Esta hipótese está baseada na seguinte idéia: O reator operando com vazão reduzida tem coeficiente de troca de calor menor do que com vazão normal (ver Tabela I-1 no Capítulo I) portanto a quantidade de calor por unidade de tempo transferida do combustível ao refrigerante é menor, logo a temperatura do combustível aumentará; por outro lado embora o refrigerante receba menos energia do combustível, como a vazão é menor o tempo de residência de um elemento de volume do refrigerante no caroço do reator é maior, portanto a temperatura da água no caroço também pode aumentar mais rapidamente neste caso de vazão reduzida. Ora, se com vazão reduzida as temperaturas do combustível e da água tem tendência a aumentar mais rapidamente, num transiente, a influência dos respectivos coeficientes de temperatura deverá ser maior.

Este raciocínio intuitivo foi demonstrado pelos cálculos a seguir:

Respostas Transitórias do Reator com Vazão Reduzida

Analogamente ao caso anterior, a forma analítica das respostas tran

sitórias foi calculada pelos programas MTR-FT e TRANSIENTE, apenas o valor numérico da vazão muda para 1600 gpm e o do coeficiente de troca de calor para $0,67 \text{ w/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (ver Tabela I-1 do Capítulo I).

Os resultados desses cálculos, para um degrau de 38 pcm, são:

Variação da Potência (Kw):

$$P=831,375-742,08e^{-0,0082t}+8,769e^{-3,77t}-98,149e^{-15,88t}+0,0085e^{-140,5t} \dots$$

(IV.6)

Variação da Temperatura do Combustível ($^\circ\text{C}$)

$$T_u=4,38-3,559e^{-0,0082t}-0,583e^{-3,77t}-0,286e^{-15,88t}+0,048e^{-140,5t}$$

Variação da Temperatura da Água ($^\circ\text{C}$)

$$T_m=0,9848-0,881e^{-0,0082t}-0,14e^{-3,77t}+0,0369e^{-15,88t}-0,000354e^{-140,5t}$$

Analisando, nota-se que o reator continua estável e os transientes também não apresentam "overshoots". Em relação ao caso com o reator em operação normal, nota-se uma ligeira melhora na estabilidade, pois as constantes de tempo correspondentes são ligeiramente inferiores.

No regime permanente, a variação de potência é de 831,4 Kw e no caso anterior de 1239 Kw.

A Fig. IV-1 mostra a curva de resposta de potência a um degrau de 38 pcm calculada pelo programa TRANSIENTE e simulada no computador analógico, comparada com o caso do reator com vazão normal. As curvas mostram de maneira clara, o que foi dito anteriormente sobre a estabilidade nos casos de vazão normal e reduzida, baseado no estudo das expressões analíticas correspondentes, (IV-5) e (IV-6).

IV.2 - Efeito dos Neutrons Atrasados

Até alguns anos atrás, era comum se encontrar trabalhos referentes à

reator com os neutrons atrasados é menos estável do que sem tais neutrons. Donde se conclui que, no reator IEAR-1, os neutrons atrasados exercem influência desestabilizante.

Pode-se verificar melhor esta conclusão pelas respostas transitórias.

Resposta Transitória

Pelo programa TRANSIENTE calculamos as respostas a um degrau de 38 pcm; ainda no caso de ausência de neutrons atrasados.

Variação da Potência (Kw)

$$P=1243,4+0,0258e^{-193,68t}-1313,65e^{-1,42t}+70,19e^{-4,91t}$$

Variação da Temperatura do Combustível (°C)

$$T_u=7,99+0,022e^{-193,68t}-10,03e^{-1,42t}+2,02e^{-4,91t}$$

Variação da Temperatura do Moderador (°C)

$$T_m=1,28-0,00016e^{-193,68t}-1,28e^{-1,42t}+0,37 \times 10^{-18} e^{-4,91t}$$

Comparando a resposta de potência acima com o caso do reator sob efeito dos neutrons atrasados (IV.5), vê-se que realmente estes exercem influência ligeiramente desestabilizante. Pois, o modo natural que responde mais lentamente, e contribui bastante, tem uma constante de tempo de 0,7 segundos quando comparada com a correspondente no caso do reator com os neutrons atrasados de 2,5 minutos.

Em virtude destas conclusões a respeito da influência dos neutrons atrasados no reator IEAR-1, podemos concluir, como Smets (Sm 66), com a frase de Chernick (Ch 62); "The conviction that delayed neutrons always provide damping is now firmly imbedded in the folklore of the field. Unfortunately this is not always the case".

CONCLUSÕES GERAIS

O comportamento dinâmico do reator IEAR-1 foi estudado através de simulações analógicas e cálculos analíticos. A técnica das variáveis de Estado foi aplicada a um modelo matemático que se mostrou consistente com a realidade.

Embora o modelo matemático seja limitado para pequenas perturbações de reatividade, é satisfatório para o estudo do comportamento dinâmico do reator porque grandes perturbações nos reatores nucleares não são admitidas, neste caso o sistema de segurança do reator desliga-o automaticamente.

Não dispondo de elementos combustíveis instrumentados no IEA, elementos de grande necessidade num reator de pesquisa, que nos permitiria determinar os coeficientes de temperatura do reator experimentalmente; determinamos estes coeficientes através de um estudo paramétrico no computador analógico. Encontramos para o coeficiente de temperatura do combustível e do moderador os valores $-5,5$ pcm/°C e -14 pcm/°C, respectivamente.

Pela aplicação da técnica das variáveis do Estado ao modelo matemático foram feitos os programas MTR-FT e TRANSIENTE para o computador digital IBM 1620. O primeiro calcula a Função da Transferência e a Matriz de Transição, por meio da qual é possível o cálculo das respostas transitórias a qualquer tipo de perturbação de reatividade; e o segundo programa calcula as respostas transitórias a um grau de reatividade.

Para os casos estudados nesta dissertação concluiu-se o seguinte:

1) O reator IEAR-1 tanto em operação de 2 Mw e vazão do refrigerante de 2600 gpm como com vazão reduzida para 1600 gpm, é estável e seus transientes não apresentam "overshoots", fato bastante favorável do ponto de vista da segurança nuclear.

2) Com vazão reduzida o reator é ligeiramente mais estável do que com vazão normal. Neste ponto pode-se concluir que do ponto de vista puramente dinâmico, seria aconselhável que o reator operasse com vazão do refrigerante reduzida.

3) Os cálculos das respostas transitórias a um degrau de reatividade de 38 pcm mostram que as variações das temperaturas do combustível e do moderador são pequenas, principalmente esta última. Esta é a razão pela qual no estudo paramétrico observou-se que variações razoáveis do coeficiente de temperatura do moderador influíam tão pouco na resposta de potência.

Finalmente o estudo da influência dos neutrons atrasados na estabilidade do reator IEAR-1 mostrou que estes têm influência desestabilizante. Portanto, este reator é mais um exemplo que contradiz o teorema de Gyptopoulos.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos nesta dissertação, sugerem os seguintes temas que, entre outros, julgamos merecerem ser tratados futuramente.

- 1) Comparar a resposta de frequência experimental do reator IEAR-1 com a teórica calculada neste trabalho;
- 2) Comparar outros modelos mais complexos, a parâmetros distribuídos, com o modelo incremental desenvolvido nesta dissertação através de suas respectivas funções de transferência;
- 3) Estudar o comportamento dinâmico do reator a 10 Mw, potência a que será elevado futuramente, através dos programas MTR-FT e TRANSIENTE para o computador digital IBM 1620. Basta que se calcule o coeficiente de troca de calor e os coeficientes de temperatura a esta potência.
- 4) Considerando o modelo de estado do reator, desenvolvido nesta dissertação, otimizar o sistema de controle do reator IEAR-1 pela aplicação direta das modernas técnicas de otimização, Princípio do Máximo de Pontryagin ou Programação Dinâmica.

APÊNDICE A

Programa MTR-FT

Este programa em FORTRAN II-D para o computador digital IBM 1620, calcula:

1) Os resíduos nos autovalores, correspondentes a cada variável de estado, ou seja, a cada elemento da primeira coluna da Matriz de Transição.

2) Calcula os coeficientes da equação característica $|sI-A| = 0$; e os coeficientes do polinômio em s correspondente a cada um dos cofatores α_{ij} da matriz $|sI-A|$.

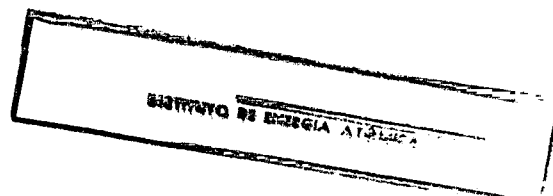
3) Finalmente calcula os zeros e polos da função de transferência.

Os cálculos são feitos levando-se em consideração os nêutrons atrasados, e sem êles.

O programa utiliza as sub rotinas GRAU 4, GRAU 3 e GRAU 2.

Equivalência das variáveis:

BETN	-	β_{ef}
ELE	-	ℓ
CN	-	λ
G1	-	g_1
G2	-	g_2
A ₁	-	a_1
A ₂	-	a_2
OP	-	P_o
ALFU	-	α_u
ALFM	-	α_m



```
C      PROGRAMA      MTR-FT
      DIMENSION COR(20),COI(20),C(11),RARE(10),RAIM(10),CF1
          1(5),CF12(5),
      9CF13(5),CF14(5)
      READ 8,BETN,ELE,CN,G1,H2,G2,A1,A2,OP
      READ 9,ALFU,ALFM
      DO 116 L=1,2
      N=L-1
      IF(N)110,109,110
109  BETA=0.
      CD=0.
      GO TO 115
110  BETA=BETN
      CD=CN
115  C(1)=1.
      C(2)=(BETA/ELE)+CD+G1+H2
      C(3)=G1*BETA/ELE+CD*G1+BETA*H2/ELE+CD*H2+G1*H2-G1*G2-
          OP*ALFU*A1/EL
      5E-OP*A2*ALFM/ELE
      C(4)=H2*G1*BETA/ELE+H2*G1*CD-G1*G2*BETA/ELE-G1*G2*CD-
          OP*ALFU*A1*CD
      4/ELE-OP*ALFU*A1*H2/ELE-OP*ALFU*A2*G1/ELE-OP*ALFM*A1*G
          2/ELE-OP*ALFM
      1*A2*CD/ELE-OP*A2*G1*ALFM/ELE
      C(5)=- (OP/ELE)*ALFU*A1*H2*CD- (OP/ELE)*ALFU*A2*G1*CD- (
          OP/ELE)*ALFM*
      5A1*G2*CD- (OP/ELE)*ALFM*A2*CD*G1
      IF(N)171,170,171
170  CALL GRAU3 (C,RARE,PAIM)
      IF(RARE(1)-RARE(2))501,500,501
500  RAIM(1)=PAIM
      RAIM(2)=-PAIM
      RAIM(3)=0.
501  IF(RARE(1)-RARE(3))503,502,503
502  RAIM(1)=PAIM
      RAIM(3)=-PAIM
      RAIM(2)=0.
503  IF(RARE(2)-RARE(3))555,504,555
504  RAIM(2)=PAIM
      RAIM(3)=-PAIM
      RAIM(1)=0.
      GO TO 505
555  RAIM(1)=0.
      RAIM(2)=0.
      RAIM(3)=0.
505  RARE(4)=0.
      RAIM(4)=0.
      GO TO 152
171  CALL GRAU4 (C,RARE,RAIM)
152  CONTINUE
      CF11(1)=1.
      CF11(2)=G1+CD+H2
      CF11(3)=G1*CD+H2*(G1+CD)-G1*G2
      CF11(4)=G1*CD*H2-G1*G2*CD
      CF12(1)=BETA/ELE
      CF12(2)=(BETA/ELE)*(G1+H2)
      CF12(3)=(BETA/ELE)*G1*H2-(BETA/ELE)*G1*G2
      CF13(1)=A1
      CF13(2)=H2+CD+A2*G1
```



```
204 RR=(+CC*R+DD*S)/(CC*CC+DD*DD)
    SS=+(CC*S-DD*R)/(CC*CC+DD*DD)
    GO TO 520
205 RR=R
    SS=S
520 COR(I)=(RR*U+V*SS)/(U*U+V*V)
    COI(I)=(U*SS-RR*V)/(U*U+V*V)
    IF(I-4)50,269,50
269 IF(N)50,259,50
259 COR(I)=0.
    COI(I)=0.
    50 CONTINUE
    PRINT 6,J
100 PRINT 7,(COR(I),COI(I),I=1,4)
    PRINT 30
    PRINT40,(C(I),I=1,5)
    PRINT 77
    PRINT 71
    PRINT 72,(CF11(I),I=1,4)
    PRINT 73
    PRINT74,(CF12(I),I=1,3)
    PRINT 75
    PRINT 76,(CF13(I),I=1,3)
    PRINT 78
    PRINT 79,(CF14(I),I=1,3)
    PRINT 41
    PRINT 51,(RARE(I),RAIM(I),I=1,4)
    C(2)=CF11(2)
    C(3)=CF11(3)
    C(4)=CF11(4)
    CALL GRAU3 (C,RARE,PAIM)
    IF(RARE(1)-RARE(2))601,620,601
620 RAIM(1)=PAIM
    RAIM(2)=-PAIM
    RAIM(3)=0.
601 IF(RARE(1)-RARE(3))603,602,603
602 RAIM(1)=PAIM
    RAIM(3)=-PAIM
    RAIM(2)=0.
603 IF(RARE(2)-RARE(3))655,604,655
604 RAIM(2)=PAIM
    RAIM(3)=-PAIM
    RAIM(1)=0.
    GO TO 605
655 RAIM(1)=0.
    RAIM(2)=0.
    RAIM(3)=0.
605 PRINT 81
    PRINT82,(RARE(I),RAIM(I),I=1,3)
116 CONTINUE
    8 FORMAT(F7.5,E14.8,F5.3,F7.2,2(F6.3),F5.3,2(E14.8))
    9 FORMAT(2(E14.8))
    30 FORMAT(5X,18HCOEFS. EQ. CARACT.)
    40 FORMAT(5X,E14.8)
    41 FORMAT(17X,5HPOLOS)
    51 FORMAT(5X,E14.8,2X,E14.8)
    80 FORMAT(7X,8HRESIDUOS)
    6 FORMAT(12X,I1)
    7 FORMAT (5X,E14.8,2X,E14.8)
```

```
77 FORMAT(4X,19HCOEF. DOS COFATORES)
71 FORMAT(10X,4HCF11)
72 FORMAT(5X,E14.8)
73 FORMAT(10X,4HCF12)
74 FORMAT(5X,E14.8)
75 FORMAT(10X,4HCF13)
76 FORMAT(5X,E14.8)
78 FORMAT(10X,4HCF14)
79 FORMAT (5X,E14.8)
350 FORMAT(5X,25HCOM OS NEUTRONS ATRAZADOS.)
120 FORMAT(5X,25HSEM OS NEUTRONS ATRAZADOS.)
81 FORMAT(17X,5HZEROS)
82 FORMAT(5X,E14.8,2X,E14.8)
CALL EXIT
END
```

APÊNDICE B

Programa TRANSIENTE

Este programa em FORTRAN II-D, para o computador digital IBM-1620, calcula as respostas transitórias a um degrau de reatividade (ρ_p).

Vimos que as respostas transitórias, no caso de autovalores simples e reais, são da forma:

$$q(t) = -K_1 e^{-\lambda_1 t} - K_2 e^{-\lambda_2 t} - K_3 e^{-\lambda_3 t} - K_4 e^{-\lambda_4 t} + K_0$$

com $K_0 = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$

onde os λ_i são autovalores e os K_i os resíduos nos autovalores correspondentes (calculados pelo programa MTR-FT).

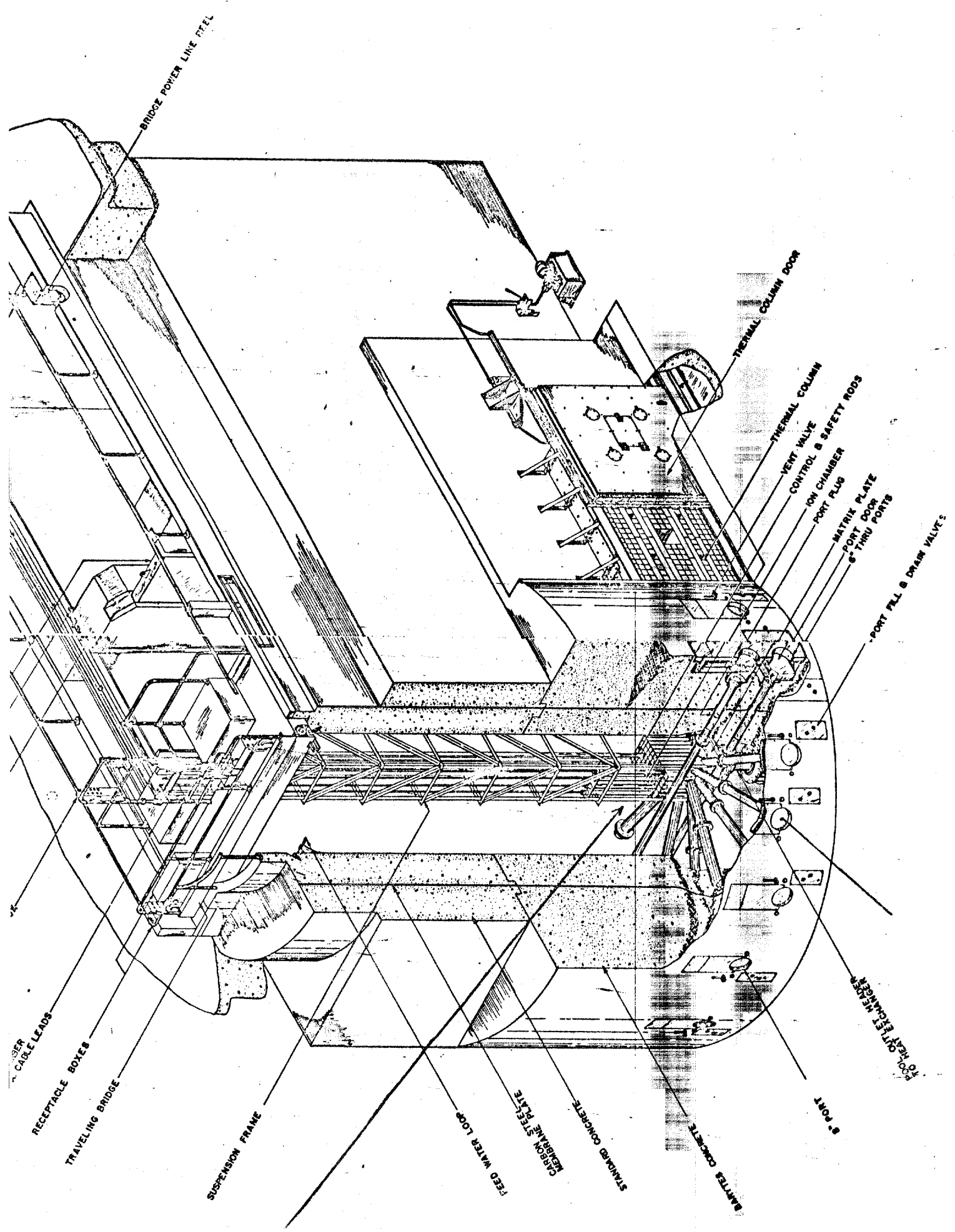
Equivalência das variáveis:

AA	-	λ_1
AB	-	λ_2
AC	-	λ_3
AD	-	λ_4
ELE	-	$\bullet \ell$
DK	-	ρ_p
OP	-	P_0
RESA	-	Resíduo no autovalor λ_1
RESB	-	Resíduo no autovalor λ_2
RESC	-	Resíduo no autovalor λ_3
RESD	-	Resíduo no autovalor λ_4
ST	-	K_0
HA	-	K_1
HB	-	K_2
HC	-	K_3
HD	-	K_4

```
C   PROGRAMA TRANSIENTE
      DIMENSION POT(100),CM(100),TT(100),VA(100),VB(100),VC
        (100),VD(100)
      READ 2,AA,AB,AC,AD
      READ 3,ELE,DK,OP
      READ 4,K,DELTA
      C=DK*(OP/ELE)
      DO 500 L=1,4
      READ 1,RESA,RESB,RESC,RESD
      HA=C*RESA/AA
      HB=C*RESB/AB
      HC=C*RESC/AC
      HD=C*RESD/AD
      ST=HA+HB+HC+HD
      T=0.
      DO 50 I=1,K
      T=T+DELTA
      AAT=AA*T
      ABT=AB*T
      ACT=AC*T
      ADT=AD*T
      IF (AAT-100.)20,20,21
21  EPA=0.
      GO TO 22
      20 EPA=EXP(-AAT)
      22 IF (ABT-100.)23,23,24
      24 EPB=0.
      GO TO 25
      23 EPB=EXP(-ABT)
      25 IF (ACT-100.)26,26,27
      27 EPC=0.
      GO TO 28
      26 EPC=EXP(-ACT)
      28 IF (ADT-100.)29,29,30
      30 EPD=0.
      GO TO 31
      29 EPD=EXP(-ADT)
      31 VAR=HA*EPA+HB*EPB+HC*EPC+HD*EPD
      POT(I)=ST-VAR
      TT(I)=T
      50 CM(I)=POT(I)/100.
      PRINT 150
      PRINT 155
      PRINT 160,ST,HA,HB,HC,HD
      PRINT 10
      PRINT 15,(TT(I),POT(I),CM(I),I=1,K)
500 CONTINUE
      1 FORMAT(4(E14.8))
      2 FORMAT(4(E14.8))
      3 FORMAT(2(E14.8),I4)
      4 FORMAT(I3,1X,F4.1)
      10 FORMAT(10X,4HT(S),8X,8HPOT.(KW),8X,2HCM)
      15 FORMAT(10X,F6.0,5X,E14.8,5X,E14.8)
      150 FORMAT(10X,15HP=ST-H *EXPONS.)
      155 FORMAT(11X,2HST,13X,2HHA,13X,2HHB,13X,2HHC,13X,2HHD)
      160 FORMAT(5X,E14.8,1X,E14.8,1X,E14.8,1X,E14.8,1X,E14.8)
      CALL EXIT
      END
```

REFERÊNCIAS

- (Ag 61) Agresta, J. and Soodak, H. - NDA 2147-7 (1961)
- (Ba 56) Batchelor, R. and Hyder, H.R. - Jour.Nucl.Energy, 3, 7 (1956)
- (Ba 60) Barcher, P. - SPM nº 638 (1960)
- (Ch 69) Chapin, D.M. - Nucl.Sci.Eng. 36, nº 1 (1969)
- (Ch 60) Chernick, J. - Nucl.Sci.Eng. 8, 233-243 (1960)
- (Ch 62) Chernick, J. - BNL 774 (1962)
- (El 67) Elgerd, O.I. - Control ^{Systems} Theory-McGraw-Hill (1967)
- (Fa 61) Fader, W.J. and Harrison, R.C. - Nucl.Sci.Eng. 11, 405 (1961)
- (Gl 55) Glasstone, S. - Principles of Nuclear Reactor Eng. - D.Van
Nostrand Co. Inc. (1955)
- (Go 62) Gossmann, S.R. et al. - IDO 16756 (1962)
- (Go 58) Gossmann, S.R. - IDO 16448 (1958)
- (Gy 60) Gyptopoulos, E.P. - Proc.Conf. - Proc. Conf. on Transfer Function
Measurements and Reactor Stability Analysis, pg 18, ANL 6205 (1960)
- (Gy 60a) Gyptopoulos, E.P. and Devooght, J. - Nucl.Sci.Eng. 8, 244 (1960)
- (Ha 52) Harrer, J.M. et. al. - Nucleonics 10, nº 8, 32 (1952)
- (Ha 63) Harrer, J.M. et.al. - Nuclear Reactor Control Engineering - D.Van
Nostrand C.Ind. (1963)
- (He 58) Henry, A.F. - Nucl.Sci.Eng. 3, 52 (1958)
- (Hu 48) Hughes, D.J. et. al. - Phys.Rev. 73, 111 (1948)
- (Is 63) Isbin, H.S. - Introductory Nuclear Reactor Theory - Reinhold Publ.Co(1963)
- (Je 68) Jeffers, D.E. and Corpus, G.-Journ.British.Nucl.Soc. 7, 2, 146, 158 (1968)
- (Ke 57) Keepin, G.R. et.al. - Phys.Rev. 107, 1044 (1957)
- (Ke 60) Keepin, G.R. et. al. - Nucl.Sci.Eng. 8, 670 (1960)
- (La 66) Lamarsh, J.R. - Introduction to Nuclear Reactor Theory - Addison Wesley
Pub. (1960).
- (La 64) Lafay, J. - Note TT nº 167, CENG-CEA (1964)
- (La 56) Lamare, J.de - SPM nº 142 (1956)
- (La 48) Langsdorf, A.S. - ANL-4342 (1948)
- (Lu 54) Lundby, A. - Chem.Eng.Prog.Symp.Series 50, nº 12, 1 (1954)
- (Ma 69) Maudsley, D. and Walker, P.W.A. - Journ.British Nucl.Soc. 8, nº 3 (1969)
- (Mo 65) Mohler, R.R. - LA 3257-MS (1965)
- (Mo 58) Moore, K.V. - IDO 16485 (1958)
- (Og 67) Ogata, K. - State Space Analysis of Control Systems - Prentice Hall (1967)
- (Pe 61) Penteado Fº, A.C. et.al. - IEA nº 44 (1961)



BRIDGE POWER LINE REEL

THERMAL COLUMN DOOR

THERMAL COLUMN

VENT VALVE

CONTROL & SAFETY RODS

ION CHAMBER

PORT PLUG

MATRIX PLATE

PORT DOOR

6" THRU PORTS

PORT P/L & DRAIN VALVES

PORT QTY EXCHANGER

8" PORT

BATTER CONCRETE

STANDARD CONCRETE

CARBON STEEL PLATE

FEED WATER LOOP

SUSPENSION FRAME

TRAVELING BRIDGE

RECEPTACLE BOXES

USER CABLE LEADS

- (Po 69) Pontryagin, L. - Equations Differentielles Ordinaires - Edit. MIR
Moscou (1969)
- (Pu 58) Purica, I. - Proc.Int.Conf. on Peaceful Uses of At.Energ. Geneva
P/1282 (1958)
- (Pi 49) Piggott, J.H. and Owens, J.I. - KAPL-251 (1949)
- (Pe 55) Pelser, D. - Proc. Int.Conf. on Peaceful Uses of At.Energy, Geneva, 5,
367 (1955)
- (Sc 65) Schawarz, R.J. and Friedland, B. - Linear Systems-McGraw-Hill (1965)
- (Sm 66) Smets, H.B. - Nucl.Sci.Eng. 25, 326 (1966)
- (To 60) Toledo, P.S. et al. - IAEA n° 18 (1960).
- (Ta 69) Tan, S. - Nucl. Sci. Eng. 38, 167 (1969)
- (Ta 69a) Tan, S. - Nucl.Sci.Eng. 37, 323 (1969)
- (We 63) Weaver, L. - System Analysis of Nuclear Reactor Dynamics - Rownam and
Littlefield Inc. (1963)
- (We 68) Weaver, L. - Reactor Dynamics and Control - American Elsevier Publ. Co.
(1968).