

R

BR 8570 670

NUCLEBRÁS

Empresas Nucleares Brasileiras SA



CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

CAIXA POSTAL, 1941 - 30.000 - BELO HORIZONTE - BRASIL

EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S/A - NUCLEBRÁS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
DEPARTAMENTO DE APOIO TÉCNICO
DIVISÃO DE FORMAÇÃO E TREINAMENTO

ESTUDO DE DINÂMICA DO IPR-R1 POR MEIO
DE EXCITAÇÕES PSEUDO-ALEATÓRIAS
DE REATIVIDADE

Guilherme Roedel
NUCLEBRÁS/CDTN 461

Trabalho apresentado no IV Encontro Nacional de Física de
Reatores, Itaipava, R.J, de 03 a 05/novembro de 1983

Belo Horizonte
1983

**ESTUDO DE DINÂMICA DO IPR-R1 POR MEIO DE EXCITAÇÕES
PSEUDO-ALEATÓRIAS DE REATIVIDADE**

Guilherme Roedel

**NUCLEBRÁS - Empresas Nucleares Brasileiras S.A.
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Departamento de Apoio Técnico**

SINOPSE

Para se demonstrar a viabilidade de utilização de técnicas de análise de ruído neutrônico em reatores, foi desenvolvido para o reator IPR-R1 do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS, um modelo dinâmico que admite realimentações de reatividade devidas a variações de temperatura do combustível e do refrigerante. Este modelo conduz a uma expressão teórica para a função de transferência de realimentação do reator.

O sistema foi excitado através de variações de reatividade moduladas por uma sequência binária pseudo-aleatória e sua resposta foi medida por meio das flutuações resultantes em torno da potência estacionária.

Como teste do modelo desenvolvido e das técnicas utilizadas, valores de parâmetros do sistema, obtidos através de ajuste das funções de transferência teórica e experimental, foram comparados a outras determinações, efetuadas por processos independentes.

1. Introdução

Através do desenvolvimento de modelos teóricos, pode-se prever a resposta de um sistema a um sinal de entrada pré-determinado. Comparando-se esta resposta a uma outra, obtida experimentalmente, valores de parâmetros que surgem nas expressões teóricas podem ser determinados. Uma boa concordância entre estas determinações e outras, realizadas por processos independentes, atesta a qualidade do modelo e dos métodos utilizados.

Neste trabalho, com o objetivo de se verificar a viabilidade de utilização de técnicas de análise de ruído em reatores, com equipamento experimental bastante simples, construiu-se um modelo dinâmico para o reator IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, da NUCLEBRÁS.

A preocupação de se utilizar equipamento simples se prende ao fato de que, para se realizar experimentos semelhantes em centrais nucleares, um mínimo de instrumentação estranha à própria central deve ser utilizado, afim de minimizar as perturbações da operação normal.

O modelo desenvolvido, baseado nas equações de cinética para seis grupos de nêutrons atrasados, conduz a uma expressão para a função de transferência de realimentação do reator, na qual aparecem parâmetros termo-hidráulicos relacionados com o combustível e com o refrigerante.

Um trabalho semelhante fora desenvolvido para o mesmo reator por SOARES, P. A. [1], com o objetivo de se determinar o coeficiente de temperatura do combustível, por análise de ruído, técnica que permite a investigação de um sistema em um amplo intervalo de frequências, num único experimento. Naquela ocasião foram desprezadas as variações de temperatura da água de refrigeração uma vez que, face os objetivos do trabalho, foram utilizados sinais de entrada de curta duração, comparada com a constante de tempo de transmissão de calor entre o combustível e o refrigerante.

No trabalho atual, como a sensibilidade do modelo só é apreciável em regiões de frequências muito baixas, esta simplificação foi abandonada, admitindo-se valores finitos para a capacidade térmica do refrigerante e para o tempo de trânsito do mesmo através do núcleo do reator.

2. Relações Básicas do Método

Para um sistema que apresente um sinal de saída $y(t)$ como resposta a um sinal $x(t)$, define-se a função de transferência $G(\omega)$ como

$$G(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = G(\omega) e^{i\phi(\omega)} \quad (1)$$

sendo $Y(\omega)$ e $X(\omega)$ as transformadas de Fourier de $y(t)$ e $x(t)$, respectivamente.

A função de transferência é uma grandeza complexa cujo módulo é o ganho do sistema e cuja fase contém informações sobre o atraso entre a saída e a entrada.

Pode-se obter informações sobre o grau de similaridade entre duas variáveis temporais x e y através da função de correlação cruzada $C_{xy}(\tau)$, definida através da relação

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt \quad (2)$$

No caso particular de $x = y$, C_{xy} ou C_{xx} é denominada função de auto-correlação e indica a semelhança entre valores de uma mesma variável separados por um intervalo de tempo τ .

A transformada de Fourier da função de auto-correlação, denominada densidade espectral de potência, fornece a distribuição de potência de um sinal $x(t)$ para as diversas frequências ω que o compõem. Usando a notação $R_{xx}(\omega)$ para esta função tem-se, portanto,

$$R_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

Analogamente, define-se a densidade espectral cruzada de potência, $R_{xy}(\omega)$, como a transformada de Fourier da função de correlação cruzada

$$R_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (4)$$

Existe uma relação simples entre as densidades espectrais e a função de transferência

$$G(\omega) = \frac{R_{xy}(\omega)}{R_{xx}(\omega)} \quad (5)$$

Para um sistema livre de ruídos, as expressões (1) e (5) são equivalentes; o uso de (5) é preferível, entretanto, por eliminar contribuições ao valor de $G(\omega)$ devidas a ruídos na entrada do sistema.

3. Modelo Teórico

O IPR-R1 é um reator TRIGA MARK I cujo núcleo, na atual configuração, contém 58 elementos combustíveis. A parte ativa dos elementos combustíveis é formada por uma mistura homogênea de urânio enriquecido a 20% e hidreto de zircônio, que atua como moderador principal. Esta configuração confere ao reator um coeficiente pronto de temperatura altamente negativo, que o torna inerentemente seguro, sendo virtualmente impossíveis excursões de potência [2]. Com estas características, a água de refrigeração influi apenas secundariamente na moderação de nêutrons, o que levou à formulação de um modelo bastante peculiar para os efeitos de realimentação de reatividade [3].

Para o reator operando à potência zero, a função de transferência $GZ(\omega)$, obtida a partir das equações de cinética pontual para seis grupos de nêutrons atrasados, é dada pela expressão.

$$GZ(\omega) = \frac{\Delta P(\omega)}{P_0 \Delta K(\omega)} = \frac{1}{i\omega \left[\lambda + \sum_{k=1}^6 \frac{\beta_k}{(\lambda_k + i\omega)} \right]} \quad (6)$$

onde

P_0 = potência estacionária

ΔP = flutuação de potência

ΔK = reatividade

λ = vida média efetiva dos nêutrons prontos

λ_k = constante de decaimento do k-ésimo grupo de nêutrons atrasados

β_k = fração de nêutrons atrasados do grupo k

Com o reator operando em potência, têm lugar realimentações de reatividade. Assim, a função de transferência a alta potência, $GP(\omega)$, difere de $GZ(\omega)$.

Como a água tem efeito somente secundário na moderação, admite-se que as realimentações de reatividade introduzidas diretamente por variações na temperatura do refrigerante (ligadas, por exemplo, a variações de densidade) sejam desprezíveis. Entretanto, a simples presença do refrigerante diminui as realimentações de rea-

tividade do combustível, por não permitir que sua temperatura suba tanto quanto ocorreria se não houvesse remoção de calor.

Um diagrama de blocos que representa adequadamente o modelo é apresentado a seguir

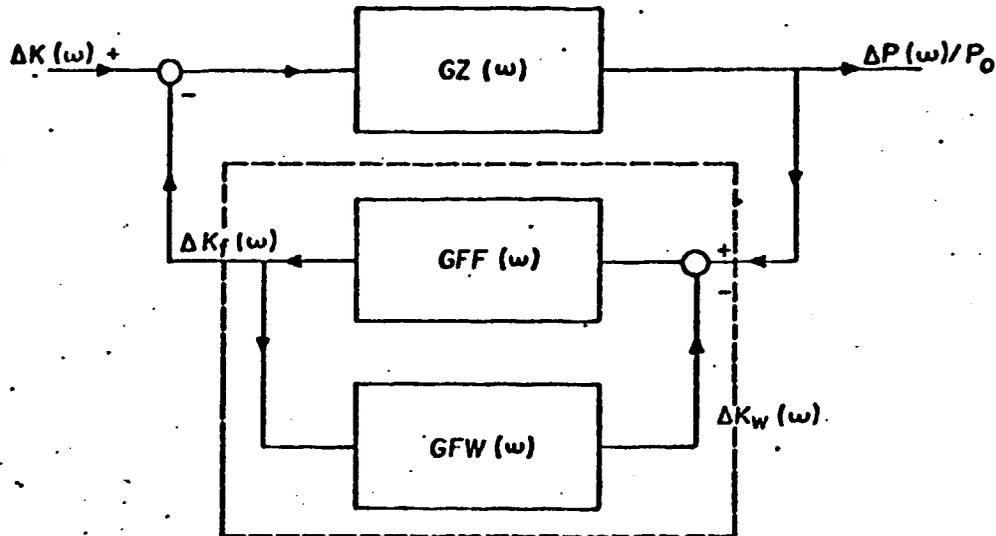


FIGURA 1

$GFF(\omega)$ e $GFW(\omega)$ são as funções de transferência de realimentação devidas ao combustível e ao refrigerante, respectivamente, enquanto o bloco tracejado representa uma função de transferência de realimentação global, que designaremos por $GF(\omega)$. Considerando este bloco, teremos

$$\frac{\Delta P(\omega)}{P_0 \Delta K(\omega)} \equiv GP(\omega) = \frac{GZ(\omega)}{1 + GF(\omega) \cdot GZ(\omega)}, \text{ ou}$$

$$GF(\omega) = \frac{1}{GP(\omega)} - \frac{1}{GZ(\omega)} \quad (7)$$

Observando diretamente o comportamento dos blocos $GFF(\omega)$ e $GFW(\omega)$,

$$\begin{aligned} \Delta K_f(\omega) &= [(\Delta P(\omega)/P_0) - \Delta K_w(\omega)] GFF(\omega) = \\ &= [(\Delta P(\omega)/P_0) - \Delta K_f(\omega) GFW(\omega)] GFF(\omega) \\ \text{ou} \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta K_f(\omega)}{\Delta P(\omega)/P_0} \equiv GF(\omega) = \frac{GFF(\omega)}{1 + GFF(\omega) \cdot GFW(\omega)} \quad (8)$$

As expressões (7) e (8) mostram que a realimentação de reatividade recebe contribuições via combustível e refrigerante e que $GF(\omega)$ pode ser determinada a partir de valores de $GP(\omega)$ e $GZ(\omega)$.

De acordo com a referência [4], as equações de balanço termodinâmico são as seguintes:

$$P(t) = C_f \frac{d}{dt} [T_f(t)] + hA [T_f(t) - T_w(t)] \quad (9)$$

$$hA [T_f(t) - T_w(t)] = C_w \frac{d}{dt} [T_w(t)] + C_w \frac{V}{H} [T_w(t) - T_{w,e}(t)] \quad (10)$$

onde

$P(t)$ = potência térmica gerada no instante t

C = capacidade térmica

T = temperatura

V = velocidade

H = altura ativa do núcleo

f = subscrito referente ao combustível

w = subscrito referente à água

e = subscrito referente à entrada de refrigerante no núcleo

h = coeficiente de transferência de calor

A = área de transmissão de calor

Admitindo pequenas flutuações das variáveis envolvidas em torno de valores médios, podemos escrever:

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

$$T_f(t) = T_{f0} + \Delta T_f(t)$$

$$T_w(t) = T_{w0} + \Delta T_w(t)$$

Além disso, de acordo com o modelo proposto,

$$\Delta K(t) = \alpha_f \Delta T_f(t) = \Delta K_f(t), \text{ onde}$$

α = coeficiente de temperatura da reatividade

Aplicando estas aproximações às equações (9) e (10) e tomando as transformadas das equações obtidas, teremos

$$\frac{\Delta K_f(\omega)}{\Delta P(\omega)} = \frac{\alpha_f}{hA + i\omega C_f} \left[1 + hA \frac{\Delta T_w(\omega)}{\Delta P(\omega)} \right]$$

$$\frac{\Delta T_w(\omega)}{\Delta K_f(\omega)} = \frac{hA/C_w \alpha_f}{i\omega + hA/C_w + V/H}$$

que conduzem a

$$\frac{\Delta K_f(\omega)}{\Delta P(\omega)/P_o} \equiv GF(\omega) = \frac{P_o \alpha_f / (hA + i\omega C_f)}{1 - \frac{P_o \alpha_f}{hA + i\omega C_f} \cdot \frac{(hA)^2 / C_w \alpha_f P_o}{i\omega + hA/C_w + V/H}} \quad (11)$$

Comparando as expressões (11) e (8), podemos identificar

$$GFF(\omega) = \frac{P_o \alpha_f}{hA + i\omega C_f}$$

$$GFW(\omega) = \frac{-(hA)^2 / C_w \alpha_f P_o}{i\omega + hA/C_w + V/H}$$

Através de ajuste paramétrico da expressão (11) aos valores obtidos experimentalmente pela equação (8), podemos obter o valor de V/H se conhecermos as outras grandezas envolvidas. A figura 2 apresenta a curva da função $GF(\omega)$.

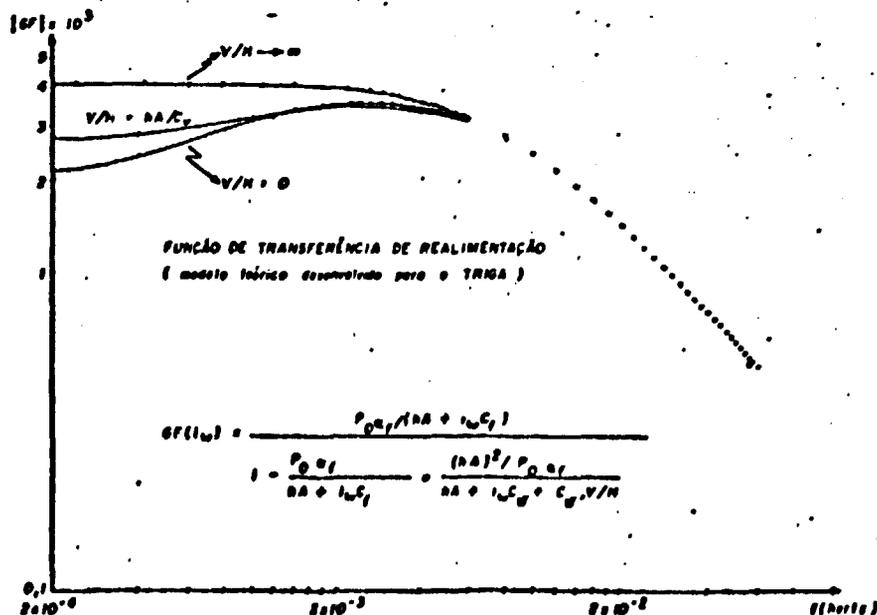


FIGURA 2

4. Escolha do Sinal de Excitação

4.1 Tipo Adequado de Sinal

Uma das maneiras de se obter informações a respeito de um sistema consiste em introduzir no mesmo uma perturbação e analisar sua resposta. Neste trabalho, a perturbação utilizada foi um sinal de reatividade, conseguido por meio de inserções e retiradas da barra reguladora.

O sinal de perturbação deve ter um espectro de frequências compatível com as constantes de tempo dos fenômenos a serem estudados.

Foi usada uma sequência binária pseudo-aleatória, denominada sequência m . Este tipo de perturbação foi utilizado na experiência da referência [1] e é descrito com detalhes em [5] e [6]. As características principais de uma sequência m são ter uma densidade espectral de potência bem achatada numa dada faixa de frequências e uma função de auto-correlação que se aproxima bastante de uma função Delta de Dirac. Estas características conferem à sequência uma forte semelhança com o ruído branco, que é um sinal realmente aleatório e tem uma amplitude constante em todo o espectro de frequências. Uma vantagem apresentada pela sequência m é o fato de que ela é determinística e periódica, permitindo por isto que sejam feitas iterações da experiência. Seu período é dado por

$$T = Z\Delta,$$

onde Z é da forma

$$Z = 2^n - 1, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

e Δ representa a menor duração possível de um dos dois estados (+1 ou -1). A faixa útil do conteúdo de frequências da sequência m é limitada por

$$f_{\min} = \frac{1}{T}$$

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta}$$

A figura 2 mostra a curva da equação (11) para valores extre-

mos de V/H : $V/H = 0$ e $V/H \rightarrow \infty$. Nota-se que as curvas se afastam na região de baixas frequências.

Para se atingir frequências tão baixas quanto estas, foi programada uma sequência m com $Z = 255$ e $\Delta = 10s$. Por peculiaridades devidas ao processamento dos dados, via FFT ("Fast Fourier Transform"), é conveniente que o número de pontos do sinal seja uma potência inteira de 2. Por isto, a sequência utilizada foi de 256 intervalos, em vez dos 255 mencionados. Esta modificação praticamente não altera a distribuição de frequências nos harmônicos.

Assim, o intervalo de frequências do sinal empregado ficou limitado por

$$f_{\min} = \frac{1}{2560s} = 3,9 \times 10^{-4} s^{-1}$$

e

$$f_{\max} = \frac{1}{2 \times 10s} = 5 \times 10^{-2} s^{-1},$$

o que permitiu uma análise em 128 harmônicos da frequência fundamental.

4.2 Amplitude do Sinal de Reatividade

Limitou-se as flutuações de potência a no máximo $\pm 10\%$ de seu valor estacionário, para que o sistema não fugisse da linearidade admitida no modelo teórico.

Na sequência de entrada utilizada, o maior intervalo de tempo sem mudanças de estado é de 80 s.

Assim, para

$$\frac{P}{P_0} = e^{-t/T},$$

com

$$t = 80s$$

e

$$\frac{P}{P_0} = 1,1 .$$

obtemos

$$T = 840s$$

A reatividade correspondente a este período é de aproximadamente 1,5 cents. Durante as experiências, a barra reguladora era deslocada ± 15 posições ($\pm 1,5$ cents) em torno da posição que tornava o reator crítico.

5. Sistema Experimental

Para a geração da seqüência m , foi elaborado um programa em FORTRAN de acordo com o procedimento citado em [5]. A introdução do sinal de reatividade foi feita manualmente pelo operador do reator modificando a posição da barra reguladora a instantes de tempo pré-determinados.

5.1 Sistema de Registro do Sinal de Potência

Para se registrar as flutuações de potência, foi acrescentada à instrumentação normal do reator um registrador gráfico de dois canais.

Num dos canais, aplicou-se o sinal proveniente do canal linear do reator e, simultaneamente, uma tensão DC correspondente à potência estacionária do reator, porém de sinal oposto àquela. Com este procedimento, foi possível ampliar o ganho do registrador, para tornar mais visíveis as flutuações de potência.

5.2 Sistema de Registro do Sinal de Reatividade

Um transdutor linear de deslocamento foi acoplado à cremalheira de acionamento da barra reguladora e o sinal elétrico aí gerado quando a barra mudava de posição foi aplicado ao segundo canal do registrador gráfico. O reator foi colocado crítico com a barra reguladora numa posição em torno da qual a reatividade positiva ou negativa introduzida no sistema é proporcional ao deslocamento da barra. Desta forma, foi efetuada uma calibração de forma que a 1 cm do papel do registrador correspondesse 1 cent de reatividade.

6. Resultados e comparações

A função de transferência experimental obtida na experiência à potência zero (5W) apresentou ótima concordância com a prevista teoricamente; isto permitiu que, na fase de análise conjunta das experiências à potência zero e a alta potência, ela fosse substituída pelos valores correspondentes gerados pela expressão teórica, eliminando flutuações provenientes de eventuais condições desfavoráveis do experimento, aquisição e processamento de dados.

A função de transferência de realimentação, $GF(\omega)$, foi calculada a partir da expressão da equação (7).

O cálculo da expressão teórica correspondente (equação (11)) depende do conhecimento dos parâmetros P_o , α_f , hA , C_f , C_w e V/H .

P_o e α_f são bem determinados. Por outro lado, na região de altas frequências, a equação (11) se reduz a

$$GF(\omega) = \frac{P_o \alpha_f}{hA + i\omega C_f} \quad (12)$$

pois, nesta faixa, os efeitos de realimentação devidos ao refrigerante não se manifestam, graças à elevada capacidade térmica da água e aos tempos relativamente curtos disponíveis para o aquecimento da mesma. Para a determinação de hA , foi feito um ajuste por mínimos quadrados dos valores teóricos e experimentais do módulo de $GF(\omega)$, numa faixa intermediária de frequências, correspondente aos harmônicos de números 8 a 37; durante o ajuste, o valor de C_f foi fixado em 53,4 kJ/°C, conforme [1], procedimento considerado satisfatório uma vez que nesta região este valor influencia pouco o módulo de $GF(\omega)$. Desta forma, encontrou-se

$$hA = 1,7 \text{ kW/}^\circ\text{C}$$

Com este valor de hA , fez-se novo ajuste, desta feita numa região onde a influência de hA sobre o módulo de $GF(\omega)$ fosse pequena (harmônicos de 41 a 80), obtendo-se para C_f um novo valor,

$$C_f = 48,2 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

Para uma maior confiabilidade, ambos os parâmetros foram calculados por processos independentes, como será visto mais adiante.

A determinação da capacidade térmica da água, C_w , foi a que apresentou maiores dificuldades, por não haver uma separação nítida en

tre a massa de água que envolve os elementos combustíveis, responsável pela refrigeração do núcleo, e o restante da água do poço do reator. Considerou-se então como responsável pela refrigeração toda a água contida num cilindro de diâmetro igual ao diâmetro interno do refletor de grafita e de altura limitada, superiormente, pelo nível superior do mesmo refletor e, inferiormente, pelo término do encapsulamento do combustível. O valor encontrado foi

$$C_w = 197 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

Para a obtenção de V/H , foi feito um ajuste dos valores teóricos e experimentais de $GF(\omega)$ usando-se, na equação (11), os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} P_o &= 90 \text{ kW (potência na qual foi realizada a experiência)} \\ \alpha_f &= 1,2 \text{ cents/}^\circ\text{C} \\ hA &= 1,7 \text{ kW/}^\circ\text{C} \\ C_f &= 48,2 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \\ C_w &= 197 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ajustes independentes, realizados para os três primeiros harmônicos, forneceram como resultados

Harmônico	$V/H(s^{-1})$
1	0,100
2	0,137
3	0,112

que conduziram a um valor médio de V/H igual a

$$(V/H)_{\text{médio}} = 0,116 \text{ s}^{-1}$$

Sendo a altura ativa H do núcleo igual a 35,56 cm, determinou-se a velocidade média \bar{V} e o tempo de trânsito $\tau = H/\bar{V}$ do refrigerante através do núcleo:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= 4,1 \text{ cm/s} \\ \tau &= 8,6 \text{ s} \end{aligned}$$

Os valores de parâmetros utilizados para o cálculo de τ foram, sempre que possível, recalculados por processos independentes, para que se pudesse obter uma estimativa da qualidade dos valores encontrados por métodos de ajuste. Assim, baseado em gráficos da capacidade térmica do combustível em função da temperatura [7], e da temperatura média do combustível em função da potência [2], obteve-se

$$C_f = 45,7 \text{ kJ/}^\circ\text{C},$$

valor que se mostra em concordância com aquele obtido experimentalmente,

$$C_f = 48,2 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

A partir da relação

$$P = hA (T_s - T_\infty), \text{ sendo}$$

P = potência térmica

T_s = temperatura da superfície do combustível

T_∞ = temperatura média do refrigerante

e de valores de temperatura fornecidos por [2], encontra-se

$$hA = 1,71 \text{ kW/}^\circ\text{C}$$

Como não se dispunha da temperatura média da superfície do combustível, o valor de P foi corrigido por um fator de 1,27, correspondente à razão fluxo máximo/fluxo médio na direção axial, conforme [8].

Para se ter uma idéia global da qualidade das determinações, foi feita ainda uma comparação com resultados de medidas de vazão, realizadas por Hornyik e Wyman [9], num reator do mesmo tipo, utilizando um rotâmetro construído especialmente para esta finalidade. Para $P = 90 \text{ kW}$, a vazão em volume Q encontrada foi

$$Q = 0,3 \text{ GPM} = 18,93 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Admitindo-se

$$\rho_{\text{água}} = 1,00 \text{ g/cm}^3, \text{ tem-se}$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = 18,93 \text{ g/s}$$

e

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} = 3,5 \text{ cm/s, sendo } A = 5,46 \text{ cm}^2 \text{ [8].}$$

Como as medidas de vazão da referência [9] foram efetuadas apenas em uma posição radial (um elemento do anel D), a velocidade de 3,5 cm/s não deve ser encarada como uma média representativa de todo o núcleo, não podendo portanto ser comparada diretamente com o valor obtido neste trabalho.

$$\bar{V} = 4,1 \text{ cm/s}$$

Ainda assim, os valores concordam em ordem de grandeza, indicando serem razoáveis as suposições admitidas no modelo teórico.

7. Conclusões

O trabalho atingiu seus objetivos, mostrando ser possível a utilização de técnicas de análise de ruído em reatores com equipamento experimental simples.

Por outro lado, face às dificuldades encontradas no cálculo da capacidade térmica da água de refrigeração, C_w , consideramos que os experimentos não foram conclusivos para a determinação de V/H.

Como sugestão para próximos trabalhos, proporíamos a determinação independente de um dos parâmetros C_w ou V/H, o que permitiria uma estimativa do outro pelo processo aqui desenvolvido.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SOARES, Perpétua Atayde. Medida do coeficiente de temperatura do reator Triga Mark I, por análise de ruído. Belo Horizonte, 1975. (Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do grau de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares - Publicação NUCLEBRÁS/IPR 351).
- [2] MERTEN, Ulrich et al. Uranium - Zirconium - Hydride fuel elements. San Diego, General Atomic, 1959. (GA - 655).
- [3] ROEDEL, Guilherme. Estudo de dinâmica do IPR-R1 por meio de excitações pseudo-aleatórias de reatividade. Belo Horizonte, 1981 (Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do grau de mestre em Ciências e Técnicas Nucleares).
- [4] WILLIAMS, M.M.R. Random processes in nuclear reactors. Oxford, Pergamon Press, 1974.
- [5] UHRIG, R. E. Random noise techniques in nuclear reactor systems. New York, Ronald Press, 1970.
- [6] KERLIN, T.W. Frequency response testing in nuclear reactors. New York, Academic Press, 1974.
- [7] WYMAN, M.E. et al. Transient temperature measurements in reactor fuels. In: PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM ON REACTOR KINETICS AND CONTROL, Tucson. Oak Ridge, USAEC, 1964. p. 381-404.
- [8] SIMBALISTA, O.C.R.L. & LADEIRA, L.C.D. Análise termohidráulica do reator TRIGA à potência de 250 kW. Belo Horizonte, NUCLEBRÁS, 1975. (PAR/GTA 048/75).
- [9] HORNYIK, K. & WYMAN, M.E. Study of the dynamics of a TRIGA type reactor. In: PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM ON NEUTRON DYNAMICS AND CONTROL, Tucson. Oak Ridge, USAEC, 1966. p. 457-472.