

Medida do Coeficiente de Reatividade de Temperatura do Moderador do Reator Angra-I via Análise de Ruído

Paulo Sérgio Brasko Ferreira e Aucyone Augusto da Silva
Departamento de Tecnologia de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear - São Paulo

RESUMO

Em virtude da técnica convencional de medida do coeficiente de reatividade de temperatura do moderador apresentar certas características negativas (conforme citado no trabalho), outras técnicas de determinação de α_{Tm} vêm sendo pesquisadas. Dentre elas, a *Técnica de Análise de Ruído* tem sido cada vez mais empregada. Neste trabalho deriva-se as principais equações utilizadas para a determinação de α_{Tm} e apresenta-se o primeiro resultado experimental de α_{Tm} do reator Angra-I, obtido usando-se essa técnica.

INTRODUÇÃO

O coeficiente de reatividade de temperatura do moderador, α_{Tm} , é um dos parâmetros avaliados na verificação da segurança de operação de uma usina nuclear. O parâmetro α_{Tm} é definido como sendo a razão entre a variação de reatividade do núcleo do reator e a variação de temperatura do moderador (causa da flutuação de reatividade).

A obtenção experimental (convencional) desse coeficiente em reatores de potência requer que sejam efetuadas variações significativas na temperatura do sistema. Esse tipo de procedimento experimental possui alguns inconvenientes, tais como:

- considera-se impraticável realizar variações de temperatura somente no moderador: variando-se a temperatura do moderador, também varia-se a temperatura do combustível e materiais estruturais. Isso interfere significativamente na precisão da medida de α_{Tm} , devido a presença de efeitos paralelos que também influenciam na reatividade do sistema;
- o reator não pode operar normalmente durante esse tipo de experimento: as variações de temperatura do sistema interferem na operação da usina. Em consequência desse fato, normalmente só se mede α_{Tm} no comissionamento de cada novo ciclo combustível;
- a medida é feita em baixa potência, não na potência nominal.

Em virtude desses pontos negativos, citados acima, outras técnicas de determinação de α_{Tm} vêm sendo pesquisadas. Dentre elas, a *Técnica de Análise de Ruído* tem sido cada vez mais empregada.

A técnica de análise de ruído baseia-se no estudo dos espectros de ruído de sensores nucleares. Os espectros normalmente estão no domínio da frequência. Sabe-se que os espectros contêm informações relevantes das condições de operação e de outros parâmetros dinâmicos do reator.

Essas informações podem ser obtidas através da análise e, por vezes, da correlação dos espectros de frequência dos sensores. Tanto os espectros, como também a sua análise, podem ser obtidos normalmente através de um *Analizador Fourier*.

Para o caso específico de determinação de α_{Tm} , os sensores utilizados são os de temperatura e de nêutrons.

Com relação aos detectores de nêutrons, a maioria dos picos proeminentes são oriundos de flutuações de reatividade do núcleo. Essas flutuações podem ser devidas a diversos fatores, tais como:

- vibração de barras de controle;
- vibração de elementos combustíveis;
- flutuação da concentração de boro;
- flutuação da pressão interna;
- flutuação da temperatura interna dos materiais (Estrutura, combustível, moderador).

Como as variações de reatividade são causadas por vários efeitos paralelos, os quais são oriundos de fenômenos físicos distintos entre si, as frequências características de cada fenômeno que influencia na variação de reatividade global do sistema são distintas.

Por causa desse fato, pode-se isolar a influência de cada um dos efeitos na variação de reatividade do sistema, no domínio da frequência.

A estimativa do coeficiente de reatividade de temperatura do moderador, através da técnica de análise de ruído, é baseada em espectros de ruído no intervalo de baixas frequências (<5Hz). Isso se deve ao fato de que o processo de transferência de calor entre o moderador e o combustível é relativamente lento.

A instrumentação nuclear utilizada consiste em detectores de nêutrons "ex-core" e sensores de temperatura na saída do núcleo.

As principais vantagens da determinação de α_{Tm} via técnica de análise de ruído são:

- obtenção de α_{Tm} em potência nominal;
- não necessitar de perturbações na operação normal da usina;
- não requer instrumentação especial: utiliza-se a própria instrumentação instalada no reator;
- determinação direta de α_{Tm} : isolamento do efeito da variação de temperatura do moderador na reatividade do sistema;
- possibilidade de monitoração permanente de α_{Tm} (durante todo o ciclo combustível);
- obtenção de correlação entre α_{Tm} e concentração de boro ao longo do ciclo combustível.

Fundamentos Teóricos

Na maioria dos casos práticos [1,2,5,6], várias perturbações influenciam nas flutuações de reatividade no estado estacionário do reator. Assumindo-se que:

- a) A reatividade dependa de um processo ergódico estacionário $s(t)$, ou seja,

$$\rho(t) = \rho(s(t)) \quad (1)$$

onde ρ representa a reatividade;

- b) que o valor estacionário de $s(t)$ seja s_0 ; e
c) que $\rho_0 = \rho(s_0)$.

pode-se expandir a reatividade ρ em torno dos valores, estacionários, a flutuação de reatividade se torna:

$$\rho(t) = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial s} (s - s_0) + \dots \quad (2)$$

Restringindo-se a pequenas variações de s , pode-se utilizar a aproximação linear e assumindo-se que qualquer função $f(t)$ é dada por:

$$\delta f(t) = f(t) - f_0 \quad (3)$$

tem-se que

$$\delta \rho(t) = \frac{\partial \rho}{\partial s} \delta s(t) \quad (4)$$

Considerando o coeficiente de reatividade como

$$c_s = \frac{\partial \rho}{\partial s} \quad (5)$$

tem-se que

$$\delta \rho(t) = c_s \cdot \delta s(t) \quad (6)$$

Utilizando a transformada de Fourier para transladar a equação acima para o domínio da frequência, tem-se

$$\delta \rho(w) = c_s \cdot \delta s(w), \quad (7)$$

onde a transformada de Fourier para qualquer função $f(t)$ é dada por

$$\delta f(w) = \frac{1}{2\pi} \int f(t) e^{-iwt} dt \quad (8)$$

Enquanto $\delta s(t)$ é uma grandeza mensurável, $\delta \rho(t)$ não pode ser medida diretamente. Entretanto, considerando a função transferência $G(w)$, função que relaciona o fluxo de nêutrons $n(w)$ à reatividade $\rho(w)$ como sendo:

$$n(w) = G(w) \cdot \rho(w), \quad (9)$$

pode-se reescrever a equação (7) da seguinte forma:

$$\frac{\delta n(w)}{G(w)} = c_s \cdot \delta s(w), \quad (10)$$

onde $\delta n(w)$ é a transformada de Fourier da flutuação de fluxo.

Multiplicando-se a equação (10) pelo complexo conjugado tem-se

$$\left| \frac{\delta n(w)}{G(w)} \right|^2 = c_s^2 \cdot |\delta s(w)|^2 \quad (11)$$

As médias dos dois lados da equação (11), conseguidas a partir de várias medidas aproximam-se aos correspondentes valores de APSD, ou seja, para uma função arbitrária f tem-se que

$$APSD_f(w) = \langle \delta f(w) \cdot \delta f(w)^* \rangle \quad (12)$$

Assim, a equação (11) pode ser reescrita da seguinte forma

$$\frac{APSD_n(w)}{|G(w)|^2} = c_s^2 \cdot APSD_s(w) \quad (13)$$

ou

$$c_s = \left| \frac{APSD_n(w)}{|G(w)|^2 \cdot APSD_s(w)} \right|^{1/2} \quad (14)$$

A equação (14) é bem realística nas vizinhanças dos picos das funções de APSD, especialmente se os picos nas duas funções estão situados no mesmo valor de w .

Um modo alternativo de estimativa de c_s , a partir da equação (13), é baseada na consideração de que a função transferência é

aproximadamente constante no intervalo $\{w_1, w_2\}$ onde os picos da função de APSD estão situados. Nesse caso, integrando a equação (13) nesse intervalo e tomando a raiz quadrada tem-se

$$c_s = \frac{RMS_n}{G \cdot RMS_s} \quad (15)$$

onde: G é o valor de $G(w)$ no intervalo de $\{w_1, w_2\}$ e

$$RMS_f = \left[\int APSD_f(w) dw \right]^{1/2} \quad (16)$$

Pode-se ainda derivar uma outra equação alternativa, bastando para isso multiplicar a equação (7) pelo complexo conjugado de $\delta s(\delta s^*(w))$ e tomando-se os valores médios tem-se

$$\frac{CPSD_{n,s}(w)}{G(w)} = c_s \cdot APSD_s(w) \quad (17)$$

onde

$$CPSD_{n,s}(w) = \langle \delta n(w) \cdot \delta s^*(w) \rangle \quad (18)$$

Assim, o coeficiente de reatividade de temperatura pode ser reescrito como

$$c_s = \frac{CPSD_{n,s}^2(w)}{G(w) \cdot APSD_s(w)} \quad (19)$$

ou, utilizando a forma de RMS

$$c_s = \frac{RMS_{n,s}^2}{G \cdot RMS_s^2} \quad (20)$$

Embora as equações (14), (15), (19) e (20) por si só deveriam servir para a determinação do coeficiente de reatividade, c_s , na prática a consideração de um sinal de ruído de uma única fonte $s(w)$ certamente não é verdadeira para todo o domínio de w . Entretanto, essa hipótese se aproxima da realidade para valores de w próximos dos picos do APSD do ruído analisado. Deve-se lembrar que, neste trabalho, a fonte $s(w)$ representa α_{Tm} .

Na referência 1 realiza-se um estudo de casos de fonte de ruído simples e composta. Naquele trabalho verificou-se uma analogia nas equações derivadas para os dois casos.

Descrição do Experimento

Para a determinação do coeficiente de reatividade de temperatura do combustível de Angra-I, realizou-se a monitoração dos sinais oriundos da instrumentação já existente nessa unidade.

As medidas apresentadas neste trabalho foram realizadas no terceiro ciclo combustível, em um nível de 50% da potência nominal, em 09/05/91.

Os sensores utilizados para a determinação de α_{Tm} foram um sensor de temperatura e um detector de nêutrons (Figura 1).

O sensor de temperatura foi o termopar TE-10, que encontra-se posicionado logo acima dos elementos combustíveis do núcleo. Esse sensor monitora a temperatura do moderador logo após a sua saída da região ativa do núcleo.

O detector de nêutrons utilizado consiste da câmara de ionização compensada QL1, que se encontra localizada fora do vaso de pressão (ex-core), um pouco abaixo da região central do núcleo do reator.

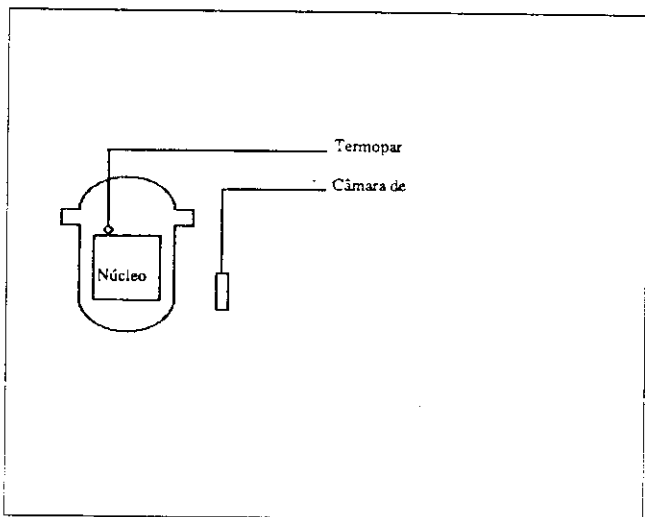


Figura 1. Instrumentação Utilizada no Experimento.

Para realizar as aquisições dos sinais dos sensores citados acima e para posterior gravação e análise utilizou-se os seguintes equipamentos: Filtros - isoladores - amplificadores, Gravador Kyowa de 21 canais e Analisador Fourier. Um diagrama de como esses equipamentos foram interligados é apresentado na Figura 2.

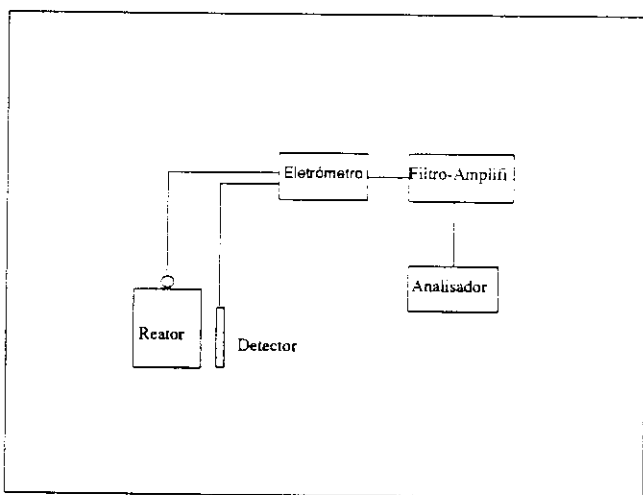


Figura 2. Arranjo Experimental dos Equipamentos Utilizados.

Resultados Experimentais

Para determinação de α_{Tm} utilizou-se a equação (14). Em função disso, levantou-se os auto-espectros dos sensores de temperatura e de nêutrons na região de baixas frequências.

Devido as flutuações do fluxo de nêutrons em decorrência das flutuações de temperatura do moderador serem relativamente lentas, estimava-se que o intervalo de frequência $[w1, w2]$ dos APSDs, a ser analisado devesse estar compreendido entre 0,1 e 1 Hz.

A determinação desse intervalo foi obtida através da análise do espectro de coerência dos sinais dos sensores estudados (também fornecido pelo analisador fourier).

Através do espectro de coerência levantado nesse trabalho, Figura 3, pode-se notar que na região compreendida entre 0,4 e 0,6 Hz há uma coerência significativa entre os sinais neutrônico e de

temperatura. Por isso, adotou-se esse intervalo para realização dos cálculos para determinação de α_{Tm} .

Após definição do intervalo de análise, realizou-se os cálculos estabelecidos na equação (14), onde $G(w)$ é considerado constante e cujo valor é aproximadamente igual ao $\beta_{efetivo}$ do reator [2].

Os valores estimados, teoricamente, de $\beta_{efetivo}$ e α_{Tm} , para as condições de operação e queima de combustível em que se encontrava a usina, na época da medida, eram respectivamente [3,4]:

$$\beta_{efetivo} = 5,96 \times 10^{-3} \text{ e}$$

$$\alpha_{Tm} = - 81,354 \text{ pcm}^{\circ}\text{C}.$$

O valor de α_{Tm} encontrado pela técnica proposta neste trabalho, utilizando-se o valor de $\beta_{efetivo}$ citado acima, foi de

$$\alpha_{Tm} = - 96,23 \text{ pcm}^{\circ}\text{C}$$

Conclusão

Com esse resultado, verificou-se que o valor obtido para esse coeficiente apresentou um desvio de 18,3 %. Considera-se o resultado obtido por essa técnica de análise de ruído animador.

Novas medidas de α_{Tm} estão sendo programadas para consolidação dessa técnica, não só em Angra-I, mas como também no reator de pesquisa IEA-R1 de 2 MW de potência situado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP).

Referências

1. Aguilar, O. and Por, G. Monitoring temperature reactivity coefficient by noise method in a NPP at full power. KFKI-1987-16/G (1987).
2. Shieh, D.J., Upadhyaya, B.R. and Sweency, F.J. Application of noise analysis technique for monitoring the moderator temperature coefficient of reactivity in pressurized water reactor. Nuclear science and engineering: 95, 14-21 (1987).
3. Westing House. Final Safety Analysis Regulatory - FSAR - da instalação nuclear de Angra-I para o terceiro ciclo combustível - (1990).
4. Engenheiro João Batista Borges. Furnas - Angra-I, Comunicação Pessoal (1990).
5. Aguilar, O. Measurement of reactivity temperature coefficient by noise method in power reactors. Theory. KFKI-1986-63/G (1986).
6. Ferreira, P.S.Brasko e Silva, A.A. Medida do coeficiente de reatividade de temperatura utilizando a técnica de análise de ruído. IPEN-CNEN/SP - Relatório Interno nº RP234800024, Setembro de 1990.

Abstract

This paper describes a model for estimation of the reactivity moderator temperature coefficient in pressure water reactor (PWR). The developed model is based on the Noise Analysis Technique, which utilizes noise spectra data from neutron ex-core detectors and in-core temperature sensors. The experimental results obtained with noise analysis technique and theoretical estimation are compared and some appreciation are made between the application of noise and conventional technique in nuclear power plant.

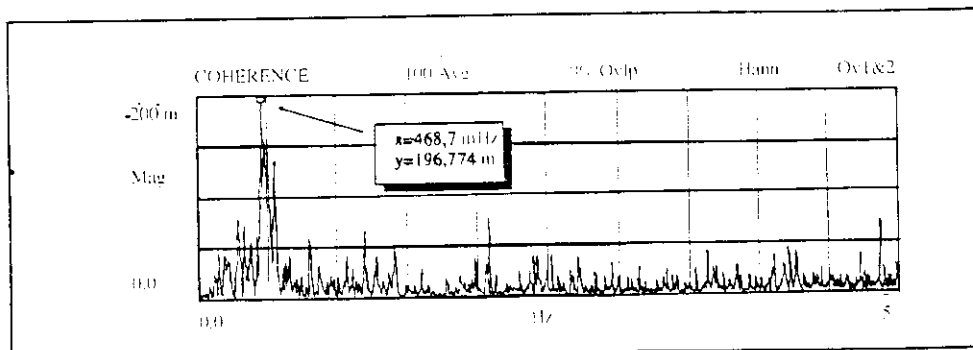


Figura 3. Espectro de Coerência dos Sensores de Nêutrons e de Temperatura.