



ANÁLISE DE INSTABILIDADES EM REATORES A ÁGUA FERVENTE – CÁLCULO DOS PARÂMETROS DECAY RATIO E FREQUÊNCIA NATURAL

W. A. Coloma, A. L. Costa, C. Pereira,

Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia
Av. Antônio Carlos, nº 6627, Campus UFMG, PCA 1, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia de Reatores Nucleares Inovadores/CNPq, Brasil
wilmer.fcpn.fis@gmail.com

Palavras-Chave: BWR, Instabilidades, *Decay Ratio*, Frequência Natural

RESUMO

Os reatores de água fervente são suscetíveis a instabilidades, provocando oscilações na potência do reator em regiões de alta potência e baixo fluxo de refrigerante. Durante o *startup* do reator existe uma probabilidade maior de que estas regiões de instabilidade estejam presentes; outra razão pode ser devido a processos transitórios em alguns parâmetros do reator. A análise da evolução temporal da potência revela um processo estável ou instável após a perturbação em um reator de água leve do tipo BWR (*Boiling Water Reactor*) – Reator de Água Fervente. Neste trabalho, o modelo de séries temporais conhecido como ARMA (*Auto Regressive Moving Average model*) foi utilizado para calcular a razão de decaimento, ou *Decay Ratio* (DR), e a frequência natural (NF) decorrentes de oscilações na potência do reator. O código Matlab foi utilizado para esta finalidade. Este documento também apresenta uma comparação dos valores calculados de DR e NF com códigos DRIA e DRAT desenvolvidos pela Universidade da Pensilvânia.

1. INTRODUÇÃO

As possíveis instabilidades em reatores do tipo BWR são um problema de segurança porque a grande flutuação na potência localizada poderia violar as margens térmicas e comprometer a integridade do combustível. Existe ampla investigação relacionada com os esforços para compreender as razões para o aparecimento de instabilidade em termos da física básica, identificando as causas e os acoplamentos mecânicos entre os distintos parâmetros do sistema. Modelos de sistemas não lineares podem ser utilizados para prever esses acoplamentos como pode ser verificado, por exemplo, em [1]. Outro método para prever as instabilidades, conceitualmente combinado com o primeiro, se refere ao cálculo do parâmetro de estabilidade numérico, que é conhecido como razão de decaimento (*Decay Ratio* - DR). O terceiro, e indiscutivelmente mais importante, refere-se à determinação quantitativa real de DR, através de monitoramento do fluxo neutrônico medido no núcleo. Na sua forma mais simples, DR é definido como a razão entre dois máximos consecutivos da função de autocorrelação do sinal do fluxo neutrônico.

Neste documento, o código de análise termo-hidráulica RELAP5/MOD3.3 [2] e o código de cinética neutrônica PARCS/2.4 [3] foram usados para a simulação de um evento transitório de instabilidade conhecido como perturbação de pressão, caracterizado pelo aumento abrupto da pressão no vaso reator (pico de pressão) a partir da parada de uma das turbinas, descrito em [4]. No experimento do evento transitório, a magnitude do pulso de pressão escolhido foi aproximadamente de 0,22 MPa, que deu uma



boa resposta do sinal do fluxo neutrônico e não causou dificuldades durante o teste. Então, considera-se uma pequena perturbação de pressão, identificado como ponto de operação PT3 [4], cujos principais parâmetros são mostrados na Tab. 1.

Tab. 1. Condições de teste PT3.

Potência		Vazão (entrada do núcleo)		Entalpia (entrada do núcleo)	Pressão (entrada do núcleo)
59.2%	1948MW	5216.4kg/s	40.4 %	1184.6 kJ/kg	7.10 Mpa

2. RAZÃO DE DECAIMENTO (DR)

O comportamento dinâmico de um núcleo BWR na região estável, ou seja, quando o comportamento do ciclo limite não pode ser observado, muitas vezes é descrito como um sistema de segunda ordem. Isto significa que as flutuações do $y(t)$ obedecem a uma equação de segundo grau impulsadas por uma força aleatória $f(t)$ como:

$$\ddot{y}(t) + 2\sigma\dot{y}(t) + \omega^2y(t) = f(t) \quad (1)$$

Onde ω é a frequência angular e σ é a constante de amortecimento

A solução homogênea para um amortecimento pequeno é:

$$y(t) = Ae^{-\sigma t} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

O parâmetro DR de um sistema oscilatório, na sua forma mais simples, é definido como a razão entre dois máximos consecutivos do sinal (ver Fig. 1). Para os sistemas de segunda ordem deste parâmetro, DR é constante [5], e é dado por:

$$DR = \frac{A_2}{A_1} = \frac{A_3}{A_2} = \frac{A_4}{A_3} \quad (3)$$

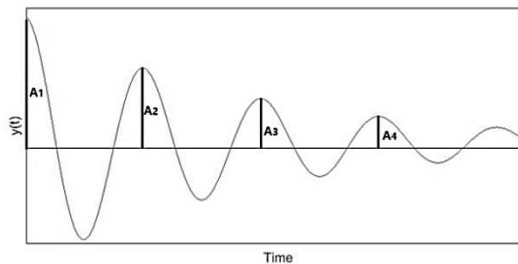


Fig. 1. Definição de DR.

A definição acima, também pode ser escrita como se segue:

$$DR = \frac{y(T)}{y(0)} = \frac{Ae^{-\sigma T} \sin(\omega T + \phi)}{Ae^{-\sigma 0} \sin(\omega 0 + \phi)} = \frac{Ae^{-\sigma T} \sin\left(\frac{2\pi}{T}T + \phi\right)}{A \sin(\phi)} \quad (4)$$

$$DR = e^{-2\pi\frac{\sigma}{\omega}}$$

Para os sistemas de segunda ordem, todas as igualdades da equação 3 coincidem, mas para sistemas de ordem superior os polos não coincidem.



A obtenção desse parâmetro ajuda-nos a estudar a estabilidade do sistema devido às seguintes características : Se o $DR < 1$, o sistema é estável assintoticamente (caso da Fig. 1), se o $DR = 1$, o sistema é criticamente estável, se o $DR > 1$, o sistema é instável.

2.1. Modelo DR de Tempo Discreto

Os polos de um sistema de segunda ordem da função de transferência são [6]:

$$z = -\sigma + \omega i \quad (9)$$

Temos uma conexão entre os polos contínuos e discretos da seguinte forma:

$$Z_i = e^{z_i \Delta t} \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (6)$$

sendo que os polos de tempo discretos podem ser simplificadas como se segue.

$$Z = e^{-\sigma \Delta t} e^{\omega i \Delta t}$$

Onde

$$\begin{cases} r = e^{-\sigma \Delta t} \\ \varphi = \omega \Delta t \end{cases} \rightarrow Z = r e^{i\varphi} \quad (7)$$

E, finalmente, DR e NF são obtidos substituindo a equação 7 em 4

$$DR = e^{2\pi \frac{\text{Re}(z)}{|\text{Im}(z)|}} \quad \text{e} \quad NF = \frac{\text{Im}(z)}{2\pi} \quad (8)$$

Esta é a expressão para o fator da razão de decaimento no caso de tempo discreto [6].

2.2. Auto Regressive Moving Average – ARMA (p,q)

Um modelo autoregressivo de média móvel para um processo estacionário pode ser definido como:

$$y_i = \sum_{k=1}^p a_k y_{i-k} + \varepsilon_i - \sum_{\mu=1}^q b_\mu \varepsilon_{i-\mu} \quad (9)$$

Onde ε_t é um processo de ruído branco normalizado. Esta equação relaciona as medidas da saída e da sequência de entrada.

A função de autocorrelação do processo com uma sinal de dados finito é:

$$r_y(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} y(k-m)y(k) \quad 0 \leq m \leq N-1 \quad (10)$$

Onde $r_y(-m) = r_y(m)$

É fácil conseguir a seguinte relação entre os elementos de auto correlação AR (p) [7]:

$$r_y(n) + \sum_{k=1}^p a_k r_y(n-k) = \begin{cases} |b_0|^2 & , n = 0 \\ 0 & , n \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

ou de forma mais compacta onde a , r e R são matrizes

$$a = -(R^{-1})r \quad (12)$$

onde a_k $k = 1, \dots, p$, são os coeficientes autorregressivos e os b_μ , $\mu = 1, \dots, q$ são os coeficientes de média móvel. Para ver a relação entre a análise de frequência no domínio do tempo, fazemos a transformada Z em ambos lados da expressão ARMA (p, q).

$$\tilde{y}_i = \sum_{k=1}^p a_k z^{-k} \tilde{y}_{i-k} + \tilde{\varepsilon}_i - \sum_{\mu=1}^q b_\mu z^{-\mu} \tilde{\varepsilon}_{i-\mu} \quad (13)$$

Então, a função de transferência do sistema será [8].



$$H(z) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{\varepsilon}} = \frac{1 - \sum_{\mu=1}^q b_{\mu} z^{-\mu}}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (14)$$

Existem vários métodos para encontrar as ordens de p e q [12]; uma vez que os valores dos coeficientes são determinados, DR é obtido a partir dos polos dominantes da equação:

$$1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k} = 0 \quad (15)$$

3. ESTIMATIVA DE ORDEM DO MODELO

O processo de ajustamento de um modelo ARMA de uma série de tempo envolve duas tarefas distintas: (1) a estimativa dos parâmetros do modelo $\{a_k\}$ e $\{b_{\mu}\}$; e (2) a determinação da ordem do modelo p e q. Em contraste com a simples estimativa modelo AR, a estimativa de parâmetros para os modelos ARMA é uma tarefa complexa [3]. O princípio da estimativa dos parâmetros ARMA é a minimização dos erros de predição, ou resíduos estatísticos. Para uma processo ARMA, existe uma relação linear entre o erro de predição E e y_k [$\varepsilon_k = b(q^{-1}) a(q)y_k$]. Portanto, precisamos de um método numérico recursivo para estimar o coeficiente do vetor $\{a_k\}$ e $\{b_{\mu}\}$.

A estimativa da ordem do modelo é o ponto crucial da metodologia de identificação do sistema. A ordem do modelo pode ser determinada, por exemplo, sobre a base da chamada “Akaike Information Criterion” (AIC). Esta por sua vez é baseada na minimização do erro de predição, que é proporcional à soma dos quadrados dos desvios da série de tempo original e o previsto. Por conseguinte, o modelo depende do nível de ruído (aumenta com aumento no nível de ruído) [7].

4. METODOLOGIA DA ANÁLISE

Neste trabalho, o código termo-hidráulico RELAP5 e o código neutrônico PARCS 3D foram utilizados de uma forma acoplada para efetuar a simulação do transitório de perturbação de pressão. Detalhes do modelo podem ser verificados em publicações passadas [10].

Um programa foi desenvolvido com o código Matlab para calcular DR e NF gerado por este transitório. Matlab foi utilizado por possuir muitas ferramentas que ajudam na obtenção de algumas variáveis desejadas. A metodologia usada foi a seguinte:

- i. Um programa para ler os dados de saída do Relap5, e fazer gráficos dos correlogramas (gráficos da função de auto correlação) [12] para estimar a ordem do modelo ARMA foi desenvolvido.
- ii. Em muitos casos, os correlogramas não são muito claros para estimar a ordem do modelo e, por essa razão foi desenvolvido um algoritmo (bestarma.m) que calcula a melhor estimativa da ordem de ARMA. Este código é construído de acordo com o método AIC que foi visto na seção 3.
- iii. Uma vez obtida a ordem de ARMA, os coeficientes a_k e b_{μ} são calculados (ver Eq. 15); para isso, a ferramenta de Matlab conhecida como ARMAX foi usada [11]; esta ferramenta utiliza os dados de entrada e ordem do modelo ARMA para gerar a função de transferência do sinal.
- iv. Depois de obter a função de transferência, os polos "Z" da função são calculados e finalmente são substituídos na Eq. 10.

Todos estes passos foram incluídos em um só script (DRARMA.m), que calcula os parâmetros DR e NF.

5. RESULTADOS



O resultado do transitório de perturbação de pressão (PP) para o ponto de operação PT3 é apresentado na Fig. 6. A perturbação começa no tempo de 60,5 s. O processo apresenta uma diminuição rápida na oscilação de amplitude da potência, e depois de cerca de 43,0 s a oscilação é terminada atingindo novamente o estado estacionário de operação. O sistema apresenta uma boa estabilidade ao transiente PP. Após a perturbação, a potência, e os outros parâmetros retornam aos valores de estado estacionário.

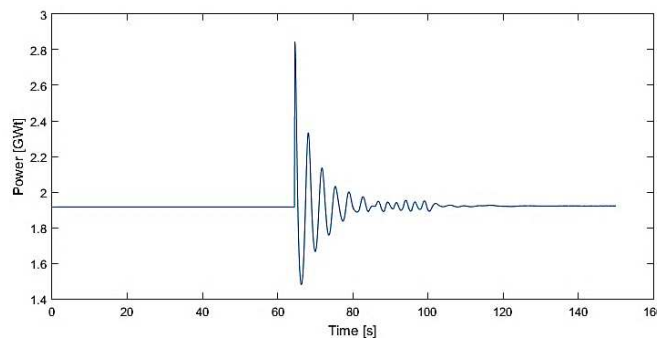


Fig. 6. Comportamento da potência ao longo do tempo, após transitório de PP.

5.1. Determinação de DR e NF

O programa desenvolvido, DRARMA.m, foi utilizado para calcular DR e NF do evento transitório PP. Os resultados são mostrados na Tab. 2 e comparados com outros dois programas na Tab. 3, bem como com os dados experimentais disponíveis em [4].

Tab. 2. Resultados obtidos para DR e NF utilizando o programa DRARMA.m

Polo dominante	Decay Ratio	Natural Frequency
$Z = 0.9416 + 0.1685i$	DR = 0.3261	NF = 0.285 Hz

Comparando os resultados obtidos com os resultados encontrados em [10] onde foram usados os códigos ADRI e DRAT, na Tab. 3, verificamos que todos os valores de DR calculados concordam com os dados experimentais. Os valores calculados de NF, embora estejam em bom acordo entre eles, são subestimados em relação ao dado experimental.

Tab. 3. DR e NF calculados em comparação com dados experimentais para PT3.

Dados experimentais [4]			ADRI [10]		DRAT [10]		DRARMA	
LFST	DR	NF [Hz]	DR	NF [Hz]	DR	NF [Hz]	DR	NF [Hz]
PT3	0.344	0.437	0.454	0.289	0.467	0.275	0.326	0.285

6. CONCLUSÕES

O evento transitório permitiu analisar os parâmetros da estabilidade de DR e NF de um reator BWR. O transiente consistiu de uma mudança abrupta de pressão da turbina do reator usando um modelo de códigos acoplados para simular o transitório. Esta perturbação evidente gera uma variação do comportamento das variáveis do reator, como a potência, temperatura, fração de vazio e vazão.



Um método de auto-regressão, particularmente o modelo ARMA (q,p), foi usado para estimar os parâmetros de oscilação da potência. Os resultados para DR foram bastante próximos em comparação com os valores obtidos experimentalmente. O erro obtido com o código DRAMAR é de 5.2%, ficando mais próximo do valor experimental do que os cálculos obtidos com os programas ADRI e DRAT. O método de autoregressão tem uma aplicação importante no monitoramento da estabilidade do reator BWR, sendo que este modelo permite a análise de DR em tempo real e também pode ser empregado para prever valores futuros de acordo com o andamento da evolução temporal de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Leuba, et al., “Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: part 1—qualitative analysis,” Nuclear Science and Engineering, vol. 93, no. 2, pp. 111–123 (1986).
- [2] The RELAP5-3D© Code Development Team, “RELAP5-3D© Code Manuals”, INEEL-EXT-98-00834, Idaho National Laboratory, USA (2009).
- [3] D. Barber and A. Joo, Code Based on the Nonlinear Analytic Nodal Method, PARCS: A Multi-dimensional Two-group Reactor Kinetics. Purdue University, School of Nuclear Engineering (1998).
- [4] L. A. Carmichael and R. O. Niemi, “Transient and stability tests at peach bottom atomic power station unit 2 at end of cycle 2,” EPRI Report NP-56 (1978).
- [5] J. Leuba and C. M. Smith, “Fourth Specialists Meeting on Reactor Noise Development of an automated diagnostic system for boiling water reactor stability measurements”, Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 27–35 (1985).
- [6] M. Furuya, “Experimental and Analytical Modeling of Natural Circulation and Forced Circulation BWRs: Thermal-hydraulic, Core-wide, and Regional Stability Phenomena”, Tese, Institutional Repository, Technische Universiteit Delft (2006).
- [7] P. J. Brockwell and R. A. Davis, “Introduction to Time Series and Forecasting”, 1ª ed., Springer, New York (2002).
- [8] K. Kishida, "Autoregressive model analysis and decay ratio", Annals of Nuclear Energy, Vol. 17, pp. 157–160 (1990).
- [10] A. L. Costa et al., "Analyses of pressure perturbation events in boiling water reactor ", Annals of Nuclear Energy, Vol. 35, pp. 1199-1215 (2007).
- [11] <http://www.mathworks.com/help/ident/ref/armax.html>
- [12] <http://www.icmc.usp.br/~ehlers/stemp/stemp.pdf>