



22 a 27 de abril de 1990

ANAIIS - PROCEEDINGS

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE INSERÇÃO RÁPIDA PARA MEDIDA DA REATIVIDADE DE BANCOS DE CONTROLE

PEDRO PONZONI FILHO - FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.
 JOÃO BATISTA BORGES - FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.
 AMORY DIAS - NUCLEM
 PAULO S.B. FERREIRA - IPEN
 SADAKATU SATO - FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.
 VANDERLEI BORBA FERNANDES - FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

SUMÁRIO

O método de Inserção Rápida consiste em medir a reatividade de um banco de controle enquanto o mesmo é inserido em alta velocidade controlada no núcleo do reator, sem qualquer compensação de reatividade.

Dos testes realizados em Angra-1, concluiu-se ser necessária a correção do sinal de fluxo neutrônico processado pelo reatímetro, para compensar os efeitos da redistribuição espacial de fluxo sobre as fugas captadas pela Instrumentação Nuclear Externa.

Aplicando essa correção, todos os resultados situaram-se dentro dos critérios de aceitação, concluindo-se que a nova técnica pode substituir o tradicional método de boração/diluição, com grandes vantagens econômicas, menor geração de rejeitos radioativos e maior segurança.

ABSTRACT

The "Rod insertion method" consist of rod worth measurements while the rod is being inserted into the reactor core, with high speed and without any reactivity compensation. From the tests performed in Angra-1, it was concluded that the neutronic flux signal processed by the reatmeter needed a correction to compensate for space-flux redistribution as detected by Nuclear Excore Instrumentation. Taking into account this correction, all measured rod worth fall within the acceptance criteria, and for this reason, this new approach can substitute the traditional boration/dilution method with great economical, advantages, such as generating less radioactive waste and more safety.

INTRODUÇÃO

1. A técnica de Inserção Rápida consiste em medir o valor de um banco de controle enquanto o mesmo é inserido em alta velocidade controlada no núcleo do reator. Durante a medida, nenhuma compensação de reatividade é requerida. O reator vai se tornando progressivamente mais sub-crítico. No final do teste, a criticalidade é restaurada, simplesmente pela retirada do banco.

(1)

Esta técnica foi empregada por B. Glumac e G. Škraba na Jugoslávia. O maior erro relatado foi 14,5%, dentro do critério de aceitação do órgão licenciador. Glumac e Škraba aplicaram técnicas de filtragem e de ajuste de curvas.

A aplicação do Método de Inserção Rápida em Angra-1 foi possível porque anteriormente foi desenvolvido e testado o Reatímetro Digital-009NC-IPEN/2,3/. A utilização deste equipamento, como parte de um arranjo experimental descrito posteriormente, permitiu a medida com o novo método das reatividades dos 4 bancos de controle do reator, numa das partidas da Unidade, com 2789 MWD/T de depleção do Ciclo-2.

Os valores de referência para o teste foram obtidos por 2 metodologias de cálculo distintas: LEOCIT-CITATION/4/ e FASER-MEDIUM/5/. Conforme se poderá observar, nos capítulos que se seguem, as técnicas de filtragem e de ajuste de curvas utilizadas por Glumac e Škraba foram necessárias, mas não suficientes, para satisfazer os critérios de aceitação. Os efeitos da redistribuição espacial de fluxo sobre as fugas captadas pela Instrumentação Nuclear Externa, foram bem evidentes. A correção do sinal de fluxo neutrônico processado pelo reatímetro, devido aos efeitos de redistribuição, constituiu-se num aprimoramento da técnica, que tornou-a viável, em princípio, para ser utilizada em Angra-1.

2. VANTAGENS DO NOVO MÉTODO

O método tradicionalmente utilizado para medida de valores de bancos de controle em reatores PWR é o da boração/diluição: a partir de uma configuração próxima de todos os Bancos Retirados (TBR) com o reator crítico, e fluxo de nêutrons abaixo do ponto de adição de calor nuclear, é iniciada uma diluição contínua do boro solúvel do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR). O sinal de reatividade, gerado por um reatímetro em um registrador X-t, é monitorado continuamente. Sempre que a reatividade do reator atinge cerca de +10 pcm, o banco de controle a ser medido é inserido cerca de 20 pcm, levando a reatividade do reator a ≈ -10 pcm em cerca de 4 segundos. A taxa de diluição é constante, de sorte que, o sinal de reatividade entre os "dentes de serra" provocados pela inserção de banco, é linear e bem definido, indo de ≈ -10 pcm a $\approx +10$ pcm em cerca de 3 minutos, quando novamente o banco é inserido cerca de 20 pcm, e assim sucessivamente.

Após o término da medida de todos os bancos por diluição, os mesmos começam a ser medidos por boração, ou seja, são retirados em incrementos de cerca de + 20 pcm enquanto o SRR é borado continuamente, até ser atingida uma configuração de bancos adequada para iniciar a ascensão de potência.

Como no método de Inserção Rápida não existe a necessidade de compensar a reatividade por boração/diluição, esta nova técnica possibilitará uma economia, por Ciclo de operação, de cerca de sessenta mil litros de água desmineralizada, dez mil litros de ácido bórico de qualidade nuclear e a correspondente redução no volume de refrigerante do reator a ser tratado pelo Sistema de Tratamento de Rejeitos Radioativos, além de diminuir o tempo de execução dos testes em cerca de 48 horas, antecipando em 2 dias a disponibilidade da Usina para operação comercial, em cada Ciclo.

Além de diminuir os custos de produção da energia elétrica, o método de Inserção Rápida implica em maior segurança para o reator, pois durante todo o teste a margem de desligamento é mantida em torno de 7%, enquanto no método de boração/diluição chega a ser apenas cerca de 3%.

3. ARRANJO EXPERIMENTAL

O Sistema de Instrumentação Nuclear Externa (SINE) de Angra-1 é constituído de 2 canais de faixa-fonte, 2 canais de faixa intermediária e 4 canais de faixa de potência distribuídos simetricamente com relação aos bancos de controle, mas externamente ao vaso do reator.

Cada canal de potência é constituído de 2 detetores que cobrem toda a altura ativa do núcleo: um cobre a metade superior e o outro a metade inferior. São Câmaras de ionização não-compensadas.

As correntes dos 2 detetores de um dos canais de potência (o N41, por ter maior facilidade de acesso em Angra-1) são somadas e a soma é o sinal de entrada de um eletrômetro. A saída de tensão do eletrômetro (zero a 1 volt) é conectada ao Reatímetro Digital, onde o sinal analógico de tensão é digitalizado num ADC, numa frequência ajustável via software (usualmente 2 aquisições/seg.). Os valores digitais de fluxo são processados pelo microcomputador do reatímetro, resultando nos valores de reatividade medidos. Esse sinal tem uma saída em impressora e, opcionalmente, no monitor do computador. O mesmo sinal é processado por um DAC e é enviado para um registrador X-t de 2 penas, que recebe também o sinal analógico de fluxo.

Além do registro de fluxo e reatividade, um outro registrador X-t registra os sinais de temperatura média do SRR e Nível do Pressurizador, vindos diretamente de pontos de teste existentes na Sala de Controle. Esse registro é necessário porque os 2 parâmetros afetam a reatividade do reator.

A velocidade normal das barras de controle no modo manual é 48 passos/minuto. Antes do início dos testes o módulo eletrônico de velocidade é ajustado para 72 passos/min. Após os testes a condição inicial é restabelecida.

4. PROCEDIMENTO DE TESTE E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A criticalidade foi atingida, seguindo os procedimentos normais da Usina, com o banco D 170 passos retirados e os demais totalmente retirados. Cada banco tem um curso de 0 a 228 passos. O ponto de adição de calor nuclear foi determinado retirando-se 4 passos do banco controlador e observando os registros de fluxo & reatividade

e Temperatura do SRR e Nível do PZR. O fluxo de nêutrons aumentou continuamente, devido à reatividade positiva provocada pela retirada do banco D. O ponto de adição de calor nuclear é o fluxo para o qual a reatividade começa a diminuir e a temperatura do SRR começa a aumentar. A faixa de testes foi determinada como 0,075 a 0,75 do ponto de adição de calor nuclear, aproximadamente.

Em seguida foi executado o teste de Verificação do Reatímetro: foram feitas 2 retiradas e 2 inserções do banco controlador, intercaladas de períodos de estabilização. As 4 reatividades registradas foram comparadas com valores calculados "off-line", aplicando a Equação "In-hour" nos períodos medidos em cada caso. O critério de aceitação, de $\pm 4,0\%$, na média, foi satisfeito.

Os critérios de estabilidade, que devem ser obedecidos antes do início de qualquer teste são os seguintes: o reator deve estar crítico (0 ± 1 pcm), variação de reatividade < 5 pcm/hr, variação de temperatura $< 1,7^\circ\text{C/hr}$, pressão do SRR = $157,2 \pm 1,8$ Kgf/cm² e diferença de concentrações de boro entre o SRR e o pressurizador < 20 ppm.

Com o reator estável e o banco D em 170 passos foi iniciada a medida do mesmo banco pelo método tradicional da boração, até a sua retirada para a posição 212. Esta posição satisfaz a 3 requisitos: a) ≥ 200 passos garante uma taxa de partida inferior 1,0 DPM no caso de uma retirada instantânea do banco, b) ≥ 203 passos implica em reatividade remanescente inferior a 100 pcm, portanto dentro da faixa de ± 100 pcm escolhida para a escala do registrador de reatividade no teste subsequente, c) a condição inicial dos testes deve ser próxima da condição TBR, assumida nos cálculos teóricos.

O próximo teste foi o de Determinação do Ponto Final de Boro TBR, isto é, a concentração crítica de boro com todos os bancos retirados: com o reator estável é retirada uma amostra de água do SRR, analisada quimicamente para determinar a concentração crítica com o banco D em 212 passos. A reatividade entre a posição 212 e TBR é determinada por 3 degraus de retirada e inserção de 212 a 228 e 228 a 212 passos, intercalados por períodos de estabilização. A média desses degraus de reatividade é transformada em concentração de boro pelo valor de boro teórico. Este valor é acrescentado ao resultado da análise química. Após uma correção final devido a temperatura, obtém-se o Ponto Final de Boro na condição TBR e temperatura nominal.

Em seguida o reator foi levado às condições iniciais do teste de Inserção Rápida, propriamente dito. Essas condições são os critérios de estabilidade já descritos, posição do banco controlador próxima de TBR (212) e fluxo próximo do limite superior da faixa de testes. Esse valor de fluxo é importante para garantir um sinal livre de ruídos durante a maior parte da medida.

O software que faz o cálculo "on-line" da reatividade foi descarregado e em seu lugar carregado um programa que só faz a aquisição dos dados de fluxo, grava-os num disquete e imprime-os numa impressora. A inserção contínua do banco D foi iniciada pelo operador do reator. A frequência de aquisição empregada foi 2/seg. Durante o teste a indicação do eletrômetro, proporcional ao fluxo, é monitorada continuamente. O fluxo vai diminuindo progressiva

mente, mudando de década 2 vezes antes que o banco chegue ao final do seu curso. Então, assim que o fluxo cai para um valor abaixo de 10% da escala deve-se mudar manualmente a escala do eletrômetro para a escala imediatamente abaixo. Em vista disso, deve-se eliminar de 2 a 4 pontos adquiridos em seguida às mudanças de escala e dividir por 10 os valores subsequentes. Após essa filtragem de dados, a reatividade é calculada pelas mesmas equações usadas normalmente, mas agora num processamento "off-line".

Assim que o banco D chega ao fundo do reator o mesmo deve ser retirado continuamente até alguns passos acima da posição inicial (212) para possibilitar a recuperação do fluxo até o nível desejado, no limite superior da faixa de testes. Durante a retirada não há interesse nenhum em gravar o sinal de fluxo, porque o mesmo fica dominado por ruídos.

Após a estabilização nas condições iniciais requeridas para o teste, foi feita a medida do banco C de 228 a 0 passos, de modo inteiramente análogo ao do banco D. A mesma sequência foi utilizada para os bancos B e A sucessivamente. Tanto as inserções quanto as retiradas dos bancos C, B e A foram totais. O banco controlador, para recuperar fluxo e estabilizar o reator, sempre foi o banco D.

Os resultados obtidos para os 4 bancos mostraram oscilações entre 50 e 0 passos, devido ao baixo nível do sinal. Nesta faixa tornou-se necessário um ajuste da curva de reatividade e a eliminação de valores sem sentido físico. Os erros decorrentes desse ajuste são desprezíveis porque nessa faixa, no estado de depleção em que se encontrava o reator, a reatividade dos bancos representa apenas cerca de 1,0% do total de cada um.

Para o banco D os cálculos de reatividade foram feitos usando 9 "steps" de cálculo diferentes, de 0,5 a 10 segundos, com resultados praticamente idênticos para o valor integral. Para que se tenha uma boa resolução também para os valores diferenciais, adotou-se para todos os bancos "step" de 2,0 segundos.

O resultado da medida parcial do banco D realizada pelo método tradicional de boração, entre 170 e 228 passos foi 390,4 pcm. Neste mesmo trecho, o resultado do método de Inserção Rápida foi 364 pcm.

Os valores integrais dos 4 bancos medidos pela Técnica de Inserção Rápida foram os seguintes:

BANCO D =	726 pcm
BANCO C =	994 pcm
BANCO B =	665 pcm
BANCO A =	1221 pcm

5. RESULTADOS TEÓRICOS

As constantes da Equação de Cinética Inversa, usada tanto nos cálculos "on-line" quanto nos cálculos "off-line", nas medidas de reatividade, dependem do inventário isotópico do núcleo e da distribuição de densidades de fissão. São, portanto, fortemente dependentes da depleção média do núcleo.

As " β 's" dos 6 grupos de nêutrons atrasados médias do núcleo foram calculadas ponderando as " β 's" características de cada elemento sobre a fração de fissões do mesmo. As meias-vidas dos precursores de cada grupo foram calculadas de modo análogo. O tempo de geração de nêutrons prontos foi calculado pela média ponderada de λ^* das 5 células básicas de Angra-1.

Todos os fatores de ponderação necessários para os cálculos dos parâmetros de cinética acima foram sub-produtos dos cálculos dos valores integrais e diferenciais dos 4 bancos de controle. Os valores teóricos desses bancos foram obtidos por 2 metodologias de cálculo distintas: de Furnas/4/, baseada nos códigos LEOCIT e CITATION e da NUCLen/5/, baseada nos códigos FASER e MEDIUM.

Um estudo de sensibilidade realizado com as constantes de cinética obtidas nas 5 configurações diferentes que ocorrem durante o teste, mostrou que as constantes obtidas para a configuração TBR podem ser utilizadas durante todos os testes. Essa hipótese, de considerar constantes os parâmetros básicos de cinética induz a erros inferiores a 2%.

Os resultados teóricos dos valores integrais dos 4 bancos de controle são mostrados no capítulo seguinte em comparação com resultados experimentais.

6. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS E APERFEIÇOAMENTO

Na Tabela-1 são comparados os valores integrais teóricos com os experimentais, obtidos pelas metodologias de cálculo de FURNAS e da NUCLen.

TABELA 1 - RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SEM CORREÇÃO PARA REDISTRIBUIÇÃO DE FLUXO

BANCO	FURNAS			NUCLen		
	Teórico (pcm)	Medido (pcm)	Diferença (%)	Teórico (pcm)	Medido (pcm)	Diferença (%)
D	715	726	+ 1,5	696	734	+ 5,5
C	1066	994	- 6,7	1049	1006	- 4,1
B	783	665	-15,0	792	673	-15,0
A	1043	1221	+17,1	1022	1238	+21,1
SOMA	3607	3606	0,0	3559	3651	+ 2,6

Os resultados medidos são diferentes porque as constantes de cinética usadas nas medidas de reatividade também o são.

O importante é manter a coerência. Os resultados teóricos foram muito semelhantes, como era de se esperar, pois as 2 metodologias de cálculo já foram validadas por grande número de testes anteriores. O que se pretende agora é validar uma nova técnica de medição.

Os resultados mostraram claramente que a nova técnica sub-estima o banco B e super-estima o banco A. Essas diferenças podem ser explicadas da seguinte maneira:

- a) o banco A é inserido na periferia do núcleo; por isso, ele provoca a queda da corrente na instrumentação externa por 2 motivos: porque diminui a população global de nêutrons no núcleo e porque diminui a fração dessa população que foge na direção dos detetores externos. Portanto, a reatividade tem uma tendência a ser super-estimada em valor absoluto;
- b) o banco B é inserido nas zonas centrais do núcleo; por isso, ele provoca a diminuição da população global de nêutrons no núcleo e o aumento da fração dessa população que foge na direção dos detetores externos. Esse aumento relativo de fuga tende a sub-estimar a reatividade medida (em módulo, isto é, tende a ser menos negativa);
- c) como o banco D é inserido na região intermediária do núcleo e o banco C fica em parte na periferia e em parte no centro, os erros provocados pelos efeitos de redistribuição espacial de fluxo são muito menos significativos do que nas medidas dos bancos A e B.

Foram determinados fatores de correção para os fluxos indicados pela Instrumentação Nuclear Externa, de modo que o sinal processado pela rotina de cálculo de reatividade, seja continuamente o mesmo que seria obtido, se a inserção de reatividade negativa fosse homogênea.

A resposta do detetor para cada configuração (TBR, Dins, Cins, Bins e Ains) é calculada pelo somatório das correntes de nêutrons rápidos nos nodos periféricos do modelo simulado na direção do detetor, divididas pelos quadrados das respectivas distâncias ao detetor.

A resposta do detetor na condição inicial de cada teste (TBR) dividida pela resposta do mesmo na configuração final (banco medido completamente inserido) é o fator de correção a ser aplicado ao sinal vindo do detetor no instante em que o banco medido chega ao final do seu curso. No início do teste o fator de correção é 1,0. Em posições intermediárias o fator varia linearmente. Os fatores de correção foram calculados a partir das correntes de nêutrons nos nodos periféricos do modelo simulado no programa MEDIUM.

Após a aplicação das correções para redistribuição de fluxo os resultados experimentais obtidos foram os da Tabela-2.

TABELA 2 - RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS COM CORREÇÃO PARA REDISTRIBUIÇÃO DE FLUXO

BANCO	FURNAS			NUCLEN		
	Teorico (pcm)	Medido (pcm)	Diferença (%)	Teorico (pcm)	Medido (pcm)	Diferença (%)
D	715	749	+4,7	696	758	+8,9
C	1066	962	-9,7	1049	973	-7,2
B	783	752	-3,9	792	761	-3,9
A	1043	1156	+10,8	1022	1169	+14,4
SOMA	3607	3619	0,3	3559	3661	+2,9

Êsses resultados satisfazem os critérios de aceitação internacionais/6/ estabelecidos pela ANSI: $\pm 15\%$ para bancos individuais e $\pm 10\%$ para a soma dos bancos.

O trecho do banco D de 170 a 228 passos, medido pela técnica de Inserção Rápida resultou em 369 pcm, após a correção da redistribuição de fluxo. Este trecho foi também medido pela técnica tradicional da boração, com resultado de 390 pcm, portanto com diferença de apenas $-5,4\%$.

7. CONCLUSÃO

A técnica de Inserção Rápida para medida de reatividade de bancos de controle foi aplicada com sucesso em Angra-1. Os critérios de aceitação estabelecidos pela ANSI foram satisfeitos.

As seguintes providências foram tomadas e são recomendadas para aplicar com sucesso a nova técnica:

- a) iniciar o teste com o fluxo próximo ao ponto de adição de calor nuclear (um pouco abaixo, cerca de 90% do valor deste);
- b) utilizar velocidade ≥ 72 passos/min;
- c) filtrar sinais de fluxo irreais provocados por mudanças de escala;
- d) ajustar e suavizar a curva de reatividade na parte final do teste;
- e) corrigir os efeitos de redistribuição de fluxo.

A técnica de boração/diluição permite corrigir os efeitos de redistribuição, através da regra do paralelismo.

As medidas realizadas pelas 2 técnicas no trecho de 170 a 228 passos (390 pcm), no presente trabalho, apresentaram uma diferença de apenas 5,4%.

A boa concordância obtida entre os valores experimentais medidos com a nova técnica, a técnica de boração/diluição e os valores teóricos, nos permite esperar ainda melhores resultados no Ciclo III, qualificando definitivamente a técnica de Inserção Rápida, com grandes vantagens econômicas, menor geração de rejeitos radioativos e maior segurança.

8. BIBLIOGRAFIA

- 8.1- B. GLUMAC; G. ŠKRABA - Rod Insertion Method for Rod Worth Measurement. IAEA Technical Committee Meeting on Operational Safety Experience of Two-loop Pressurized Water Reactors - Bled, Yugoslávia, May 30th - June 3rd, 1988.
- 8.2- MOREIRA, J.M.L. - Medidas de Reatividade em Tempo Real-Reatímetro. Anais do 1º Congresso Geral de Energia Nuclear. RJ-março 1986-(2): 47-50.
- 8.3- RELATÓRIO DE PARTIDA INICIAL DE ANGRA-I - CICLO-II (período de 03.01.86 a 01.07.87) - RPI-87: 58-62.
- 8.4- ZIMMERMANN, E.; PONZONI, Fº P.; SATO, S.- Metodologia de Análise e Simulação da Operação de Reatores - Nota Técnica DCS.N.021.85 - FURNAS CENTRAIS ELETRICAS, Agosto 1988.
- 8.5- WEBER, SAKAI, M.; NÓBREGA, C.; MEINL, NEUFERT-Angra-1 Reactor Physics Calculations for Cycle 2 - App. C - August 1985. (R163/85/e 166).
- 8.6- RELOAD STARTUP PHYSIC TESTS FOR PRESSURIZED WATER REACTORS- ANSI/ANS-19.6.1-(1985).