

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO COMBUSTÍVEL DURANTE UM APRPGR NA USINA NUCLEAR DE ANGRA-1.

. Gaiané Sabundjian
. Thadeu das Neves Conti
. Cláudio José Morandini

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN/CNEN
Diretoria de Reatores
Travessa R, 400 - Cidade Universitária
05508-900 - São Paulo - SP
• e.mail: gdjian@net.ipen.br; tnconti@net.ipen.br

RESUMO

Este trabalho propõe uma comparação dos modelos de cálculo, correlações e dados experimentais utilizados por FURNAS S/A e IPEN-CNEN/SP nas metodologias de análise termo-mecânicas do combustível de ANGRA 1 durante um acidente postulado de Perda de Refrigerante Primário por Grande Ruptura (APRPGR). FURNAS utiliza uma metodologia aprovada pela CNEN que emprega programas que possuem o Apêndice K do 10 CFR 50, sendo que a metodologia proposta pelo IPEN utiliza o Código FRAP-T6.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é realizar a análise integrada de um Acidente de Perda de Refrigerante Primário por Grande Ruptura (APRPGR), sob o ponto de vista de efeitos na vareta combustível da Usina Nuclear de ANGRA 1. Os dados de refrigeração e potência na vareta ao longo do acidente são gerados pelo código de análise termo-hidráulica RELAP4 [1], e a seguir são transferidos para o código de análise de desempenho do combustível, FRAP-T6, [2] via Programa de Interligação RELAP4/FRAP-T6 [3,4].

Os resultados obtidos com o código FRAP-T6 são comparados com os resultados fornecidos pelo código TOODEE-2 [5] e, pelo FSAR de ANGRA 1.

II. CARACTERÍSTICAS DOS CÓDIGOS UTILIZADOS

Programa RELAP4. Os programas computacionais da linha RELAP4 [1] são bastante versáteis e simulam o comportamento termo-hidráulico de reatores refrigerados à água leve, na análise de transientes acidentais. Eles consideram o sistema termo-hidráulico a ser analisado como uma série de volumes de controle conectados entre si por junções, com a transferência de calor sendo

efetuada através das estruturas de troca de calor situadas entre os volumes.

Estes códigos resolvem as equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia para cada um dos volumes de controle, supondo que o fluido é homogêneo com escoamento unidimensional e que as fases de líquido e de vapor estão em equilíbrio térmico [1].

Programa FRAP-T. Os códigos de desempenho do combustível da série FRAP-T [2] analisam o comportamento de uma vareta combustível em condições hipotéticas de transientes e acidentes de Perda de Refrigerante Primário por Grande Ruptura - APRPGR e acidentes iniciados por reatividade. Eles são restritos à análise de combustível de dióxido de Urânio e Plutônio com revestimento de zircaloy.

Interligação RELAP4/FRAP-T. Para utilizar o código FRAP-T6 [2] necessita-se dos dados de entrada da vareta a frio, dos dados de entrada fornecidos por códigos da linha FRAPCON [7], que geram as condições para o estado estacionário da vareta combustível, e finalmente dos dados sobre o comportamento termo-hidráulico do canal durante o transiente, fornecido pelo código da linha RELAP4 [1].

Devido a grande quantidade de dados de entrada que tratam o comportamento termo-hidráulico para o código FRAP-T6, gerados pelo código RELAP4,

desenvolveu-se um programa de acoplamento a fim de otimizar esta entrada. Portanto, a partir dos resultados gerados pelo código RELAP4 então os dados de entrada para o FRAT-T6 podem ser lidos, por meio de arquivos em disco ou fita, a fim de serem utilizados pelo código de maneira automática, isto é, sem a necessidade de serem digitados pelo usuário.

Dependendo da opção selecionada, dois tipos de conjuntos de dados termo-hidráulico distintos podem ser fornecidos ao FRAP-T6:

- opção 1 - Histórico da pressão, da entalpia, da temperatura e da vazão na câmara superior e inferior e em cada zona axial previamente definida na vareta; e
- opção 2 - Histórico do coeficiente de transferência de calor da pressão e da temperatura do refrigerante em cada zona axial previamente definida na vareta.

Programa TOODEE-2. O TOODEE-2 é um programa de análise térmica do elemento combustível, dependente do tempo, desenvolvido a partir do código TOODEE-1 pela RNC. O TOODEE-2 calcula a distribuição de temperatura na barra combustível, determina a máxima temperatura atingida pelo encamisamento e determina também os coeficientes de transferência de calor e fluxo de calor para o canal.

O programa é uma ferramenta para avaliação da resposta térmica do elemento da câmara inferior e reinundação do núcleo do reator durante um APRGR.

III. METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia de análise do desempenho do combustível do acidente em questão, é inicialmente simular a planta inteira, Figura 1, vaso de pressão e seus internos associados.

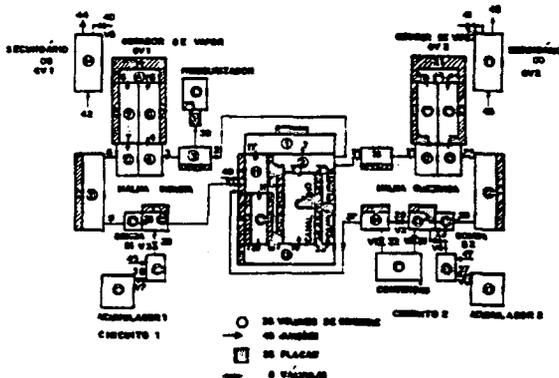


FIGURA 1 - MODELAGEM DE ANORA 1 PARA O CÓDIGO RELAP 4/ MOD 5

Na modelagem estão incluídos: o sistema de resfriamento primário do reator (pernas frias e quentes, gerador de vapor e bombas) e o sistema de resfriamento do secundário. A modelagem utilizada pelo código RELAP4 tem por objetivo o de fornecer as condições de contorno

para análise do canal quente e desempenho da vareta combustível, a ser realizada com o código FRAP-T6.

A modelagem do canal quente, Figura 2, simulada pelo código RELAP4 é constituída de 14 volumes de controle e por condições de contorno geradas durante a simulação da planta inteira.

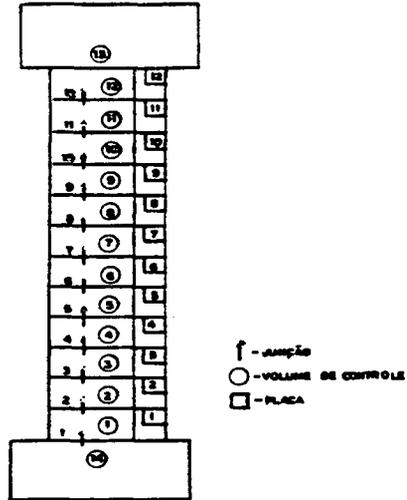


FIGURA 2 - ESCHEMA DO CANAL QUENTE

Para a simulação do acidente durante a fase de remolhamento com o código RELAP4, utilizou-se a modelagem vista na Figura 3 e para a análise do desempenho do combustível durante o APRGR com os códigos TOODEE-2 e FRAP-T6 empregou-se as modelagens vistas nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

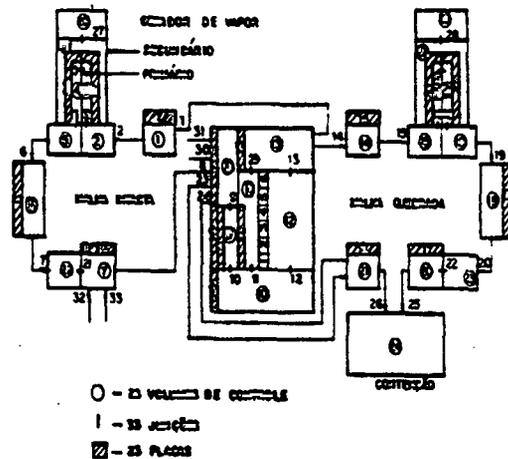


FIGURA 3 - MODELAGEM DE ANORA 1 PARA O FLOOD

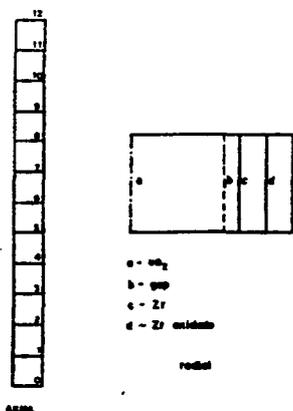


Figura 4 - Divisão Axial e Radial da Barra Quente Utilizada no TOODEE-2.

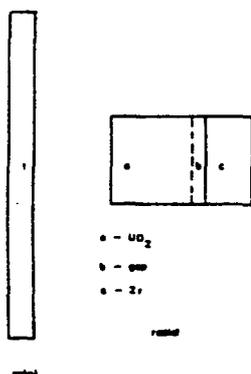


Figura 5 - Divisão Axial e Radial da Barra Quente Utilizada no FRAP-T6.

Para esta análise adotou-se as seguintes etapas:

- 1) Análise do comportamento termo-hidráulico da Planta ANGRA 1 para as fases de despressurização e reenchimento de um APRPGR com o código RELAP4 (opção EM - Evaluation Model), Figura 1. Este estudo fornece condições de contorno (histórico de potência, pressão, temperatura, título e vazão mássica) para análise do canal quente com o programa RELAP4;
- 2) A análise do comportamento do canal quente fornece as condições de contorno das duas primeiras fases do acidente para o código FRAP-T6;
- 3) A partir dos dados gerados na 1ª etapa simula-se a fase de remolhamento com o código RELAP4 (opção FLOOD), que por sua vez fornece as condições de contorno para os códigos TOODEE-2 e FRAP-T6; e
- 4) A análise do desempenho do combustível foi feita com os códigos RELAP4 (fase de despressurização e reenchimento) e TOODEE-2 (fase de reinundação), e para as três fases do APRPGR com o programa FRAP-T6.

A partir das etapas acima mencionadas comparam-se os resultados obtidos dos códigos RELAP4, TOODEE-2 e FRAP-T6 com FSAR (Final Safety Analysis Report).

IV. HIPÓTESES ASSUMIDAS NA SIMULAÇÃO DO APRPGR

a) 1ª e 2ª Fases:

- Potência inicial do reator - 102 % da potência nominal;
- Início do APRPGR em $t = 0$ s;
- Desligamento do reator em $t = 0$ s;
- Desligamento das bombas em $t = 0$ s;
- Desligamento da água de alimentação dos gerados de vapor em $t = 3,6$ s; e
- Atuação dos acumuladores através do sistema de injeção de emergência em $P = 48,5$ bar.

b) 3ª Fase:

- Utiliza as condições de contorno geradas na 1ª e 2ª fases para simular a fase de reinundação com RELAP4 (opção FLOOD); e
- Tempo de início desta fase se deu aos 25 s do acidente.

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS NA VARETA

Neste item serão comparados e analisados parâmetros de desempenho da vareta combustível, os quais caracterizam seu comportamento durante um acidente, e em particular, um acidente tipo APRPGR.

A vareta apresenta um comportamento térmico e mecânico dependentes entre si. Contudo, pode-se dizer que a resposta de temperatura da vareta é uma medida que caracteriza bem o seu desempenho. Assim, os gráficos de temperatura do revestimento e central da pastilha serão analisados primeiramente. A resposta de pressão interna da vareta depende dos parâmetros que a influenciam, notadamente os volumes de vazios no interior da vareta e a temperatura média do "gap" e pastilha, com predominância da última. A tensão circunferencial é consequência do balanço de pressão interna e externa e é importante que a tensão não se eleve a ponto de provocar alta deformação plástica, com possível fechamento de canal, ou até mesmo falha da vareta por ruptura do revestimento. O tamanho do "gap" altera o uso de modelos para "gap" aberto ou fechado e sua determinação e consequência de todos os parâmetros anteriores. A seguir, é feita uma análise de cada parâmetro de desempenho isoladamente.

Temperatura Externa do Revestimento. A Figura 6 apresenta o comportamento da temperatura do revestimento obtida através de três fontes distintas, ou

seja: por meio dos resultados obtidos dos códigos TOODEE-2 e FRAP-T6, e o gráfico obtido do FSAR. O TOODEE não simula a fase de despressurização, como já comentado, e portanto nesta fase o que se apresenta em seu lugar é a resposta de temperatura do RELAP4.

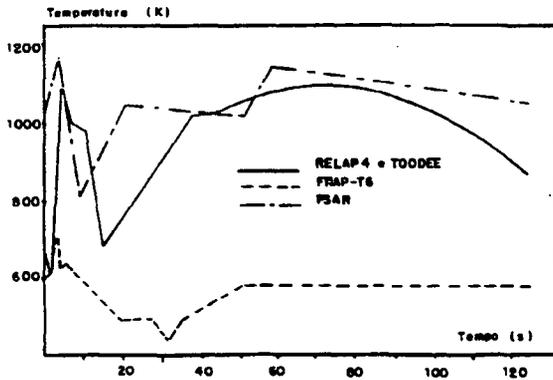


Figura 6 - Temperatura Externa do Revestimento

Observa-se uma proximidade clara entre as curvas do TOODEE e o FSAR, e abaixo destas, mas com o mesmo tipo de comportamento, está a curva de resposta do FRAP-T6. Era de se esperar que a do FSAR fosse superior às outras duas, pois as curvas do FSAR representam uma estimativa conservativa dos parâmetros, de modo que os códigos que possuem uma modelagem mais completa e portanto mais real do desempenho tendem a simular valores abaixo dos valores do FSAR.

O código FRAP-T6 é do tipo "best estimate" e portanto sua resposta de temperatura deve ser menor que a do TOODEE. Além disso, o código FRAP-T6 utilizou na simulação da vareta apenas uma região axial para todo o comprimento ativo da vareta, e portanto sua resposta de temperatura representa uma média da vareta, enquanto que a resposta de temperatura do TOODEE, embora seja a temperatura na região central da vareta, contém os fatores de distribuição axial de potência e desta forma, seus valores são maiores que a média da vareta.

De qualquer forma, a comparação da evolução da temperatura com o tempo nos três gráficos demonstra uma tendência de comportamento semelhante. Cabe ressaltar que a temperatura do revestimento é um dado bastante significativo, pois influencia diretamente na sua determinação condições externas a vareta, como o estado do refrigerante durante o acidente, e condições internas, como a evolução da potência e a energia armazenada na vareta antes do acidente. Assim, a característica de evolução da temperatura do revestimento é um resultado típico de um APRPGR. Logo no início do transiente há uma pequena queda da temperatura, observada nas curvas de respostas dos códigos de simulação. Esta queda se deve à rápida diminuição da temperatura no refrigerante devido à perda de pressão. Em contrapartida há uma degradação comparavelmente menos rápida das condições de refrigeração no sentido da capacidade de retirada de calor

da vareta, pois o fluxo de massa sofre uma rápida oscilação e o refrigerante ainda está em contato com o revestimento. Após este primeiro impacto, a transferência de calor da vareta para o refrigerante diminui e embora a potência da vareta diminua rapidamente no início do acidente, há uma grande quantidade de energia armazenada na vareta a qual tende a se "nivelar" entre pastilha e revestimento. Este nivelamento provoca aumento da temperatura do revestimento e diminuição da temperatura da pastilha. Este fenômeno é típico do APRPGR, e é responsável pelos picos de temperatura observados na fase de despressurização dos três gráficos de temperatura do revestimento, como mostra a Figura 6. Após esta transferência de energia armazenada há queda da temperatura, pois não existe na vareta uma potência capaz de sustentar esta temperatura. Contudo, com o passar do tempo, com a atuação da potência de decaimento, que embora baixa provoca aumento da temperatura e com a permanência da condição de refrigeração degradada, a temperatura volta a aumentar. Esta tendência de aumento gradual de temperatura só é contida com a atuação dos sistemas de refrigeração que injetam água no núcleo durante sua reinundação e provocam estabilização ou diminuição da temperatura do revestimento, como se observa nas partes finais dos gráficos da Figura 6.

Temperatura Central da Pastilha. A temperatura da pastilha foi determinada pelo TOODEE-2 e pelo FRAP-T6, com a mesma observação que a fase de despressurização da curva do TOODEE-2 é feita pelo RELAP4. Os gráficos estão apresentados na Figura 7.

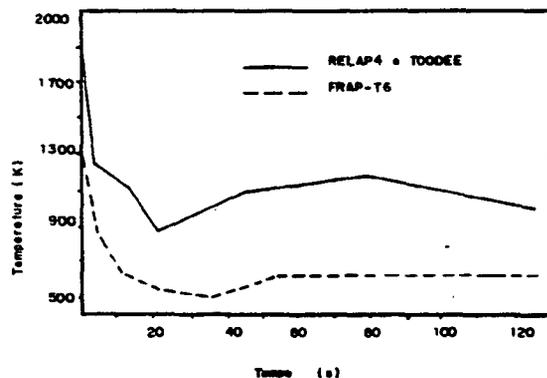


Figura 7 - Temperatura Central da Pastilha

Novamente nota-se que o FRAP-T6 vem abaixo do TOODEE e isto se deve às mesmas causas apresentadas no item anterior da temperatura do revestimento. Em ambos os códigos o maior valor de temperatura é o inicial, de modo que o APRPGR tende a resfriar o combustível, num sentido geral.

A evolução da temperatura é a mesma em ambos os códigos, logo no início do transiente há queda da temperatura, devido a rápida perda de potência, que é o

principal fator que sustenta a temperatura da pastilha. Esta seria a primeira queda de temperatura, que dura cerca de 3 segundos de acidente. Em seguida, o nivelamento entre temperatura da pastilha e do revestimento tende a diminuir a temperatura da pastilha, com influência maior sobre a pastilha do centro para a periferia. Esta seria a segunda queda de temperatura, mais longa e ao mesmo tempo mais gradual. Após a queda, a temperatura tende a se recuperar devido à potência de decaimento. Com a recuperação da condição de refrigeração na fase de reinundação o revestimento volta a retirar calor da pastilha e desta forma a temperatura da pastilha tende a se estabilizar, pelo equilíbrio entre produção e retirada de energia na pastilha.

Pressão Interna da Vareta. A pressão interna é totalmente determinada pela distribuição de temperatura, pelo volume de vazios no interior da vareta e pela quantidade de gás no interior da vareta. A quantidade de gás praticamente não varia durante o tempo útil de um acidente. Dos outros dois efeitos, a sensibilidade com relação à temperatura é mais influente, e é de esperar um comportamento de pressão parecido com o de temperatura, e é isto o que realmente ocorre.

A pressão interna foi simulada pelo FRAP-T6, de acordo com a Figura 8.

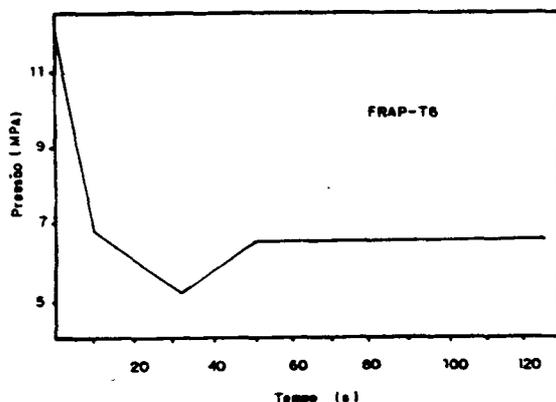


Figura 8 - Pressão Interna da Vareta

Nota-se uma queda inicial da pressão, não tão acentuada como a da temperatura central da pastilha, pois o que influi na pressão da vareta é a distribuição radial da temperatura, desde o "gap" até o centro da pastilha e a queda média da temperatura é menos acentuada que a queda da temperatura central. Em seguida a queda continua, com menor derivada, da mesma forma que o gráfico de temperatura central do FRAP-T6, para depois aumentar e enfim se estabilizar num valor intermediário.

Tensão Circunferencial. A tensão superficial no revestimento foi simulada pelo FRAP-T6 e está na Figura 9. Esta tensão depende basicamente da diferença entre pressão externa e interna do revestimento. No início de sua evolução, a tensão passa rapidamente de um estado de

compressão, com valor negativo, para um estado de tração, com valor positivo. Esta ocorrência se deve à perda inicial de pressão externa do refrigerante na fase de depressurização. Após esta inversão, a tensão ainda aumenta, devido à continuação da perda de pressão externa, embora agora mais gradual.

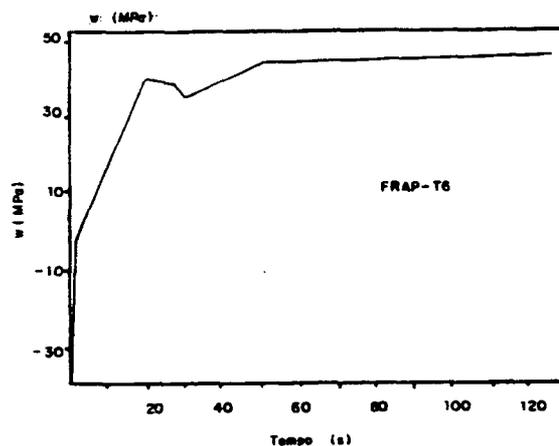


Figura 9 - Tensão Circunferencial no Revestimento

Chega porém um instante em que a tensão começa a sentir a perda da pressão interna e diminui seu valor em tração. Isto ocorre durante alguns segundos, mas logo em seguida a pressão interna se recupera e como a pressão externa neste instante está praticamente estabilizada a tensão volta a aumentar. Até que num certo ponto a pressão interna também se estabiliza e a tensão então passa para um valor praticamente constante.

Tamanho do "Gap" Estrutural e Térmico. O tamanho do "gap" é uma medida em centésimo de milímetro que dá a distância entre a superfície interna do revestimento e a superfície externa da pastilha. A diferença entre "gap" estrutural e térmico é que no cálculo do "gap" térmico é levada em consideração o efeito de realocação da pastilha combustível. Esta realocação consiste de trincas circunferenciais que se formam no material e que produzem uma deformação radial extra da pastilha. Por essa razão o "gap" térmico é sempre menor que o estrutural. Para efeito de contato mecânico entre pastilha e revestimento, estas trincas não devem ser consideradas e portanto o que determina o fechamento de "gap" neste caso é o "gap" estrutural. Para efeito de cálculo de temperatura, importa a posição real da superfície da pastilha, com realocação, e portanto o "gap" térmico deve ser usado. O mesmo vale para cálculo de pressão interna. O gráfico do tamanho do "gap" está na Figura 10.

Diversos fatores influem diretamente no tamanho do "gap": a deformação térmica e mecânica do revestimento, a deformação permanente e térmica da pastilha, a qual depende da variação de temperatura do "gap", que depende do seu tamanho. Portanto o cálculo do tamanho do "gap" tem várias influências e é interativo.

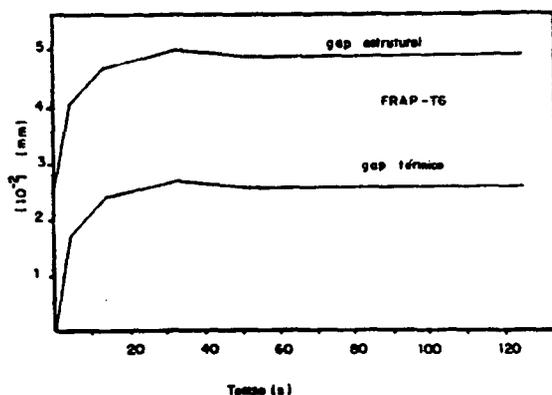


Figura 10 - Tamanho do Gap Estrutural e Térmico

Contudo, pelo comportamento do gráfico pode-se inferir que o efeito preponderante é a diminuição da deformação térmica da pastilha, devido à diminuição da temperatura da mesma, com conseqüente aumento do tamanho do "gap". Pode-se observar que o aumento do tamanho do "gap" corresponde basicamente à diminuição da temperatura central da pastilha como se observa na comparação das Figuras 7 e 10. A partir de 50 s o tamanho do "gap" se estabiliza juntamente com os demais parâmetros de comportamento da vareta.

VI. CONCLUSÕES

Conclui-se que a metodologia exposta neste trabalho, quando da análise de um acidente do tipo APRPGR, funciona satisfatoriamente, ou seja, os dados foram gerados e passados corretamente entre os programas e os resultados foram coerentes dentro de um comportamento esperado para este tipo de acidente. Quanto ao desempenho da vareta, observa-se a grande importância da resposta de temperatura sobre os outros parâmetros de desempenho. A temperatura externa do revestimento apresentou duas regiões de máximo: uma na fase de despressurização devido à energia armazenada na vareta e outra durante a fase de reinundação pela potência de decaimento. Os valores dos parâmetros de desempenho estiveram sempre dentro de limites aceitáveis para a segurança do núcleo.

Pode-se dizer que a metodologia que utiliza os códigos RELAP4 e FRAP-T, para a análise do desempenho do combustível, mostrou-se confiável quando comparada com a metodologia proposta pela CNEN. Além disso, a utilização de códigos da linha "best estimate", como é o caso do FRAP-T, quando da análise do desempenho do combustível, veio de encontro com as novas diretrizes da RNC, que é o de se fazer à análise de acidentes para Plantas de Potência da forma mais realista possível.

REFERÊNCIAS

- [1] RELAP4/MOD5 - A Computer Program for Transient Thermalhydraulic Analysis of Nuclear Reactor and Related Systems. Aerojet Nuclear. ANR - NUREG - 1355, 1976.
- [2] Siefken, L. J. et al - FRAP-T6: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods. NUREG/CR - 2148, 1981.
- [3] Conti, T. N. e Sabundjian, G. - Comparação dos Resultados obtidos com os Códigos RELAP4/MOD3 e RELAP4/MOD5 na Simulação da fase de Despressurização do Acidente de Perda de Refrigerante Primário na Usina Nuclear de ANGRA 1. VII ENFIR, Recife, Abril de 1989.
- [4] Sabundjian, G; Conti, T. N. e Neto, A. M. - Análise da Vareta Combustível de ANGRA 1 durante o Acidente de Perda de Refrigerante Primário por Grande Ruptura. 3^o CEGEN, Rio de Janeiro, Abril de 1990.
- [5] Lauben, G. N. - TOODEE-2: A Two Dimensional Time Dependent Fuel Element Thermal Analysis Program. Washington, DC, Nuclear Regulatory Commission, NUREG - 75/057, 1975.
- [6] Westinghouse, Final Safety Analysis Report - ANGRA 1, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, 1976.
- [7] Berna, G. A. et al - FRAPCON-2: A Computer Code for the Calculation of Steady State Thermal Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods. NUREG/CR-1845, 1981.

ABSTRACT

The present work shows a comparison between the models and correlation sets used by FURNAS S/A and IPEN/CNEN-SP in the thermal-mechanical analysis of the fuel of ANGRA 1 during a large LOCA. FURNAS has adopted the rules of Appendix K of the 10 CFR 50 while IPEN has adopted the FRAP-T6 computer code.