

PRIMEIRA REVISÃO DA ANÁLISE DOS
ACIDENTES OCACIONADOS POR FALHAS INFREQUENTES
(PFD&SAR - SEÇÃO 14.3)

CONFIDENCIAL

Angelo A.R.Lobo
Jairo G. de Paula
Walkírio R.A.Lavorato

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Seção 14.0 (página 14.0), os resultados analíticos que justificaram as conclusões citadas na Seção 14 foram obtidos utilizando-se suposições pertinentes a Sistemas Nucleares de Suprimento de Vapor (Nuclear Steam Supply Systems) muito similares, fornecidos pela Westinghouse, e foram incluídos apenas com propósitos ilustrativos.

Além disso, a Seção 3 (página 3.1-1) informa que aquela Seção dá uma descrição e avaliação do projeto do núcleo (baseada no projeto de um núcleo com 3 regiões) para as condições em que a central de Angra será operada e que o núcleo final de Angra terá 4 regiões.

Por estas duas afirmativas não se justifica considerar esta análise como análise para a central de Angra.

2. ANALISE DOS ACIDENTES

Por definição, as Falhas Infrequentes (condição III) são aquelas que podem acontecer raramente durante o funcionamento da central. Estes acidentes podem ser controlados quando apenas uma pequena parte do combustível é danificada, embora possam ocorrer danos suficientes para impedir o reinício da operação da central por um tempo considerável.

A liberação de radioatividade não deve ser suficiente para impedir ou restringir o uso público das áreas situadas além dos limites de exclusão.

Nenhuma falha de condição III deve, por si só, provocar um acidente da condição IV (Falhas Limites) ou causar uma sobrepressurização do Sistema de Refrigeração do Reator (RCS).

2.1. Rompimento menor (secundário) da tubulação do sistema secundário

Descrição do Acidente

Este acidente de rompimento (menor) de um circuito do sistema secundário resultaria numa taxa de liberação de vapor equivalente à capacidade de uma única válvula de alívio, segurança, ou de descarga de vapor.

O vapor liberado como uma consequência de um rompimento de uma tubulação do sistema secundário, resulta num aumento inicial do fluxo de vapor que decresce durante o acidente a medida que a pressão de vapor cai. A remoção da energia do Sistema de Refrigeração do Reator (RCS) causa a redução da temperatura e pressão do refrigerante. Na presença de um

coeficiente negativo de temperatura do moderador o resfriamento resulta num aumento da reatividade do reator, logo, numa redução da margem de desligamento do núcleo.

Condições de Análise

1. Margem de desligamento para o reator no fim da vida (EOL) sem carga ("no load"), nas condições de xenônio em equilíbrio e com o conjunto ("assembly") de barras de controle mais reativo na sua posição completamente retirado.

2. Coeficiente negativo do moderador correspondendo ao núcleo no fim da vida (EOL) com todas as barras de controle inseridas e com o conjunto de barras de controle mais reativo na sua posição completamente retirada. A realimentação local de reatividade proveniente do alto fluxo de neutrons na região do núcleo próximo ao conjunto de barras de controle preso na sua posição inteiramente retirada, foi incluída no balanço geral de reatividade. Esta realimentação local de reatividade é composta da reatividade do efeito Doppler devido a alta temperatura do combustível e do efeito de temperatura do moderador devido a alta entalpia da água, ambos próximos ao local do conjunto de barras de controle preso em sua posição inteiramente retirada.

3. Capacidade mínima de injeção de solução altamente concentrada de ácido bórico (20000 ppm). Isto corresponde ao fluxo liberado por uma bomba de injeção de segurança, liberando seu conteúdo total para a cabeça da perna quente ("hot leg header").

4. Valor de projeto do coeficiente de transferência de calor para o gerador de vapor incluindo uma margem de compensação pelo fator de fuligem.

.4.

5. O caso estudado é de um rompimento equivalente a um fluxo de vapor de 270 lb/s a 1200 psia de um gerador de vapor com potência externa disponível. Supõe-se o reator nas condições iniciais desligado a quente ("hot shutdown") no instante do acidente.

6. Para calcular o fluxo de vapor utilizou-se a curva de Moody com $fL/D = 0$

7. Supõe-se separação perfeita de humidade no gerador de vapor.

Discussão das Condições

Como o acidente vai resultar numa diminuição da margem de desligamento, a condição (1) é conservativa, porque considera inicialmente a menor margem de desligamento disponível, segundo a tabela 3.2.1-3 na página 3.2-18.

Devido ao coeficiente negativo do moderador vai haver um acréscimo de reatividade positiva, com a queda de temperatura do refrigerante. Logo, a condição (2) é conservativa porque toma o valor mais negativo do coeficiente do moderador, segundo a figura 3.2.1-8.

A consideração de capacidade mínima de injeção de solução altamente concentrada de ácido bórico (20000 ppm), condição 3, é conservativa porque diminui a possibilidade de desligamento do reator.

Para a condição (4), seria mais conservativo, tomar o valor do coeficiente de transferência de calor do gerador de vapor sem considerar o fator de fuligem.

O valor de fluxo de vapor de 270 lb/s a 1200 psia, (condição 5), é conservativo para este acidente porque corresponde à capacidade máxima de uma válvula de alívio, segurança ou descarga de vapor. As condições

iniciais de desligamento a quente ("hot shutdown") no instante zero são mais conservativas porque, o único calor disponível, que vai dificultar o resfriamento do refrigerante, é o calor residual; se o reator estivesse ligado haveria produção de calor no combustível o que dificultaria a queda de temperatura do refrigerante após o acidente.

Considera-se também que o reator estava funcionando na condição sem carga ("no load") no instante antes de ser desligado. Essa condição é também mais conservativa do que se o reator estivesse funcionando a uma potência mais alta ("at power") porque estando a "no load" a energia residual depois do desligamento será menor e a quantidade de água no sistema secundário, capaz de retirar energia do primário, será maior.

O cálculo do fluxo de vapor utilizando a curva de Moody com $\frac{fL}{D} = 0$ é o mais conservativa porque isto equivale a considerar que não há perda de carga no fluxo de vapor, o que mantém o fluxo de vapor máximo.

A separação perfeita de umidade no gerador de vapor é conservativa porque não considera a água que, em realidade, esta sendo carregada pelo vapor. Esta suposição equivale a considerar uma maior quantidade de água disponível no secundário para retirar o calor do primário.

2.2. Carregamento inadvertido de um feixe de elementos combustíveis em uma posição errada

Descrição do acidente

Erros de carregamento do elemento combustível e do núcleo, tais como, carregamento inadvertido de um ou mais feixes de combustível em posições erradas; carregamento de uma barra de combustível, durante a fabricação, com uma ou mais pastilhas de enriquecimento errado; ou carrega

mento de todo um feixe de combustível durante a fabricação com pastilhas de enriquecimento errado, resultarão em aumento de fluxo de calor se o erro resultar da colocação de um combustível em posições no núcleo reservadas para outro combustível de menor enriquecimento. Considera-se também, incluído entre possíveis erros de carregamento do núcleo, o carregamento inadvertido de um ou mais feixes de elementos combustíveis que necessitam de barras de veneno queimável (num núcleo novo) sem as barras de veneno queimável.

Qualquer erro no enriquecimento além das tolerâncias normais de fabricação, podem causar formas de potência mais pontudas do que aquelas calculadas com enriquecimentos corretos. Existe uma margem de incerteza de 5% incluída no valor de projeto de pico de potência suposto na análise da operação normal em estado estacionário, e dos transientes operacionais e de condição II.

Condições de Análise

1. Foram analisados os seguintes casos :

CASO A - Um feixe de elementos combustíveis da região 2 é colocado numa posição da região 1 no centro do núcleo.

CASO B - Um feixe de elementos combustíveis da região 2 é colocado numa posição da região 1 fora do centro do núcleo.

2. Erros de carregamento mais grosseiros de feixes de elementos combustíveis e/ou barras de venenos queimável não são analisadas neste acidente.

Discussão das condições

Os casos A e B, tomados para serem analisados, são realmente mais conservativos, porque qualquer outro tipo de erro de colocação de elementos combustíveis, como por exemplo, troca de posição de dois feixes de elementos combustíveis diferentes; colocação de um feixe de elementos combustíveis sem as barras de veneno queimável numa posição em um núcleo novo, onde se deveria colocar um feixe de elementos combustíveis com barras de veneno queimável, e todas as combinações possíveis dos casos anteriores; serão muito mais facilmente revelados pelos mini detetores de fluxo colocados no núcleo, do que nos dois casos A e B.

2.3. Rompimento de uma tubulação principal de vapor

Descrição do acidente

A liberação de vapor a partir da ruptura de uma tubulação principal de vapor, resultaria num aumento inicial do fluxo de vapor com um decréscimo durante o acidente a medida que a pressão de vapor caísse. A remoção de energia do sistema de refrigeração do reator (RCS) causa a redução da temperatura e da pressão do refrigerante. Na presença do coeficiente negativo de temperatura do moderador, o resfriamento resulta num aumento da reatividade do reator, logo, numa redução da margem de desligamento do núcleo.

Se se supõe que o conjunto de barras de controle de maior reatividade negativa, está preso, em sua posição inteiramente retirada, após o desligamento do reator, existe uma maior possibilidade de que o núcleo se torne crítico e retorne a potência. O núcleo é finalmente desligado pela injeção de ácido bórico liberado pelo sistema de injeção de segurança (SIS).

A análise de uma ruptura de uma tubulação principal de vapor, é realizada para demonstrar que os seguintes critérios são satisfeitos :

1. A suposição de que um conjunto de barras de controle está preso em sua posição inteiramente retirada, com ou sem potência externa, e a suposição de que uma falha única ("single failure") nos sistemas de proteção ("engineered safeguards") não acarretam, em consequência, nenhum dano ao sistema primário, e o núcleo permanece no lugar e intacto.

2. A energia liberada para o vaso de contenção (containment) a partir do pior rompimento da tubulação de vapor não causa dano à estrutura do vaso de contenção.

3. Os níveis de radiação externa (offsite) durante e na fase de controle após o acidente são aceitáveis.

Condições de Análise

A análise da ruptura da tubulação de vapor foi realizada para determinar :

1. O fluxo de calor do núcleo e a temperatura e pressão do sistema de refrigeração do reator (RCS) resultante do resfriamento que se segue ao rompimento de um conduto de vapor.

2. O comportamento térmico e hidráulico do núcleo em seguida ao rompimento de um conduto de vapor.

Supõe-se que existam, simultaneamente, as seguintes condições no instante do acidente de rompimento de um conduto principal de vapor :

1. Margem de desligamento para o reator no fim da vida (EOL), sem carga ("no load"), nas condições de xenônio em equilíbrio e com o conjunto ("assembly") de barras de controle mais reativo na sua posição completamente retirado.

2. Coeficiente negativo do moderador correspondendo ao núcleo no fim da vida (EOL) com todas as barras de controle inseridas e com o conjunto de barras de controle mais reativo na sua posição completamente retirada. A realimentação local de reatividade proveniente do alto fluxo de neutrons na região do núcleo próximo ao conjunto de barras de controle preso na sua posição inteiramente retirada, foi incluída no balanço geral de reatividade. Esta realimentação local de reatividade é composta da reatividade do efeito Doppler devido a alta temperatura do combustível e do efeito de temperatura do moderador devido a alta entalpia da água, ambos próximos ao local do conjunto de barras de controle preso em sua posição inteiramente retirada.

3. Capacidade mínima de injeção de solução altamente concentrada de ácido bórico (20000 ppm). Isto corresponde ao fluxo liberado por uma bomba de injeção de segurança, liberando seu conteúdo total para a cabeça da perna quente ("hot leg header").

4. Valor de projeto do coeficiente de transferência de calor para o gerador de vapor incluindo uma margem de compensação pelo fator de fuligem.

5. Fatores de pico de potência correspondentes ao caso de um conjunto de barras de controle presa em sua posição completamente retirada no fim da vida do núcleo (EOL). Os fatores de pico de potência levam em consideração o efeito de vazão local, na região do conjunto de barras de controle preso, durante a fase de retorno a potência que se segue ao rompimento de uma linha de vapor. Os fatores de pico de potência dependem

da potência do núcleo, da temperatura, pressão e fluxo do refrigerante, e são, portanto, diferentes para cada caso estudado.

6. Foram considerados quatro casos, combinando tamanhos de buracos e condições iniciais da central, na determinação da potência do núcleo e dos transientes do sistema de refrigeração do reator (RCS) :

a) Rompimento completo de uma tubulação fora do vaso de contenção (containment), a jusante da tuberia de medição do fluxo de vapor, com a central inicialmente nas condições sem carga ("no load"), e considerando-se o fluxo total de refrigerante no reator com potência externa disponível.

b) Rompimento completo de uma tubulação dentro do vaso de contenção (containment), na saída do gerador de vapor com a central inicialmente nas condições sem carga ("no load") com potência externa disponível.

c) Caso (a) acima, considerando-se, simultaneamente com o rompimento da linha de vapor e início do sinal de injeção de segurança (SIS), a perda de potência externa. A perda de potência externa resulta no desligamento de uma bomba de refrigerante e a queda do fluxo de refrigeração naquele circuito ("loop") de acordo com a inércia da bomba.

d) Caso (b) acima considerando-se também, simultaneamente com o rompimento da linha de vapor e o início do sinal de injeção de segurança (SIS), a perda de potência externa.

Em todos os casos acima se supôs as condições iniciais de desligamento a quente (hot shutdown) no instante do acidente porque isto representa a condição inicial mais pessimista. Além disto o reator foi considerado na condição sem carga ("no load"), no instante em que foi desligado.

7. Para calcular o fluxo de vapor utilizou-se a curva de Moody com $fL/D = 0$

8. Supõe-se separação perfeita da humidade no gerador de vapor.

Discussão das Condições

Como o acidente vai resultar numa diminuição da margem de desligamento, a condição (1) é conservativa porque considera inicialmente a menor margem de desligamento disponível, segundo o item 3.2.1-3, na página 3.2-18.

Devido ao coeficiente negativo do moderador vai haver um acréscimo de reatividade positiva com a queda de temperatura do refrigerante. Logo, a condição (2) é conservativa pois toma o valor mais negativo do coeficiente do moderador, segundo a figura 3.2.1-8.

A consideração de capacidade mínima de injeção de solução altamente concentrada de ácido bórico (20000 ppm), condição (3), é conservativa porque diminui a possibilidade de desligamento do reator.

Para a condição (4), seria mais conservativo tomar o valor do coeficiente de transferência de calor do gerador de vapor sem considerar o fator de fuligem.

O rompimento de uma tubulação principal de vapor é tanto mais conservativo, quanto mais próximo estiver do gerador de vapor, porque, a vazão de vapor pelo buraco neste caso será maior (condição 6). A condição inicial de desligamento a quente, é conservativa, porque o reator estando quente, há possibilidade de um grande decréscimo da temperatura do refrigerante, e, estando desligado, o único calor disponível é o que foi armazenado antes do desligamento, somado ao calor de decaimento. A supo-

sição de que o reator estava na condição sem carga ("no load"), antes do desligamento é mais conservativa porque a energia armazenada no primário (RCS) é menor, e a quantidade de água no secundário é maior do que se estivesse em potência ("at power"), facilitando e aumentando assim a remoção da energia do primário.

7. Para calcular o fluxo de vapor utilizou-se a curva de Moody com $fL/D = 0$

8. Supõe-se separação perfeita de humidade no gerador de vapor.

2.4. Ruptura do alojamento do mecanismo de acionamento de uma barra de controle (Ejeção de um conjunto de barras de controle).

Descrição do Acidente

Este acidente é definido como uma falha mecânica do alojamento sob pressão do mecanismo de acionamento de uma barra de controle, resultando na ejeção de um conjunto de barras de controle e de seu eixo motor. A consequência desta falha mecânica é uma rápida inserção de reatividade juntamente com uma distribuição desfavorável de potência no núcleo, levando possivelmente a um dano localizado, na barra de combustível.

Condições de Análise

1. O cálculo deste transiente, é feito em dois estágios :
Primeiro calcula-se um canal médio do núcleo, e em seguida é feito um cálculo da região quente. O cálculo do núcleo médio é feito utilizando-se métodos de cinética espacial para determinar a variação temporal da potência média do núcleo, incluindo-se os vários efeitos de realimentação total do núcleo. Determinam-se então, os transientes de entalpia e

temperatura no ponto quente, multiplicando-se a geração média de energia de energia do núcleo, pelo fator de canal quente e calculando-se o transiente de transferência de calor na barra de combustível. O cálculo da distribuição de potência foi feito sem se considerar a realimentação e esta suposição será mantida durante o transiente. No método de análise serão considerados os quatro itens abaixo :

- a) Cálculo do canal médio do núcleo
- b) Cálculo da região quente
- c) Análise de sobrepressão do sistema
- d) Parâmetros básicos

- a) Cálculo do canal médio do núcleo

Para esta análise foi utilizado um código de cinética espacial (TWINKLE) desenvolvido pela Westinghouse. Este código resolve as equações de cinética para a teoria da difusão com dois grupos de neutrons em uma, duas ou tres dimensões espaciais (coordenadas retangulares), para seis grupos de neutrons atrasados e até 2000 pontos espaciais. Os casos transientes em uma dimensão foram comparados com o código WIGLE 2.

Nesta análise, o código TWINKLE foi usado primeiramente como um código de cinética uni-dimensional axial, em seguida foi utilizado com duas e tres dimensões | 1 |.

- b) Cálculo da região quente

Para analisar o ponto quente, multiplica-se a geração média de energia no núcleo pelos fatores de canal quente apropriados e utiliza-se um código de computador para calcular o transiente de transferência de calor do combustível para o revestimento. Este código, calcula a distribuição transiente de temperatura em uma seção transversal do combustível UO_2 ,

com revestimento metálico, e o fluxo de calor na superfície da barra, usando como dado de entrada a potência nuclear em função do tempo e as condições locais do refrigerante.

O fluxo de calor do DNB não é calculado, em vez disto, o código é forçado a um DNB pela especificação de um fluxo de calor DNB conservativo. O coeficiente de transferência de calor do espaçamento ("gap") pode ser calculado pelo código; entretanto, ele é ajustado de maneira a forçar a concordância da distribuição de temperatura em estado estacionário e potência total, com os códigos de projeto de transferência de calor no combustível, presentemente em uso na Westinghouse.

c) Análise de sobrepressão do sistema

Como os limites de segurança de dano do combustível não são excedidos, existe pouca probabilidade de dispersão do combustível no refrigerante, ou de um aumento súbito de pressão a partir da conversão da energia térmica em energia cinética. O aumento repentino da pressão pode entretanto ser calculado baseado na transferência convencional de calor do combustível para o refrigerante e na geração muito rápida de calor no refrigerante. O aumento rápido de pressão é calculado fazendo-se primeiramente o cálculo do coeficiente de transferência de calor do combustível, para determinar as variações do fluxo de calor médio e do fluxo de calor do ponto quente, com o tempo. Utilizando-se estes dados de fluxo de calor determina-se, pelo código THINC-3, o aumento rápido de volume do refrigerante. Finalmente, o aumento de volume é simulado num código de transiente da central. Este código calcula o transiente de pressão levando em consideração o transporte de fluido no sistema, a transferência de calor para os geradores de vapor, e a ação das válvulas de alívio de pressão, do pressurizador. Não se leva em conta a possível redução de pressão causada pela suposta falha do alojamento sob pressão da barra de controle.

d) Parâmetros básicos :

Os parâmetros de entrada para análise são conservativamente selecionados com base nos valores calculados para este tipo de núcleo. A tabela 14.4-10, da página 14.4-83, em anexo, apresenta os parâmetros utilizados nesta análise.

1. Valores da barra ejetada

Os valores da barra ejetada são calculados utilizando-se uma síntese de cálculos em uma dimensão (axial) e, em duas dimensões (X-Y). Utilizando-se simplesmente um código bi-dimensional (X-Y), não é possível se levar em conta, diretamente, inserções parciais do banco de barras de controle ou a inserção do grupo de barras de comprimento parcial. Então, os valores da barra ejetada e os fatores de canal quente são determinados para planos, contendo várias combinações de inserções do banco de controle com e sem barras de comprimento parcial. O valor integral da barra ejetada é então determinado utilizando-se um código uni-dimensional e ajustando o veneno da barra em cada região axial para combinar com o cálculo bi-dimensional. Não se levam em conta os efeitos de achatamento de fluxo devido à realimentação de reatividade. O cálculo é então feito para a máxima inserção permitida para o banco de barras de controle, para um dado nível de potência, como está determinado pelos limites de inserção de barras. Uma margem de 10% é adicionada ao valor calculado para a barra ejetada, para se levar em conta uma possível inclinação azimutal do fluxo e outras incertezas de cálculo.

2. Fatores de canal quente

Os fatores axiais de canal quente, são calculados com as barras de comprimento parcial em uma posição tal que a deformação axial do fluxo seja máxima. Isto não é consistente com o cálculo descrito acima porque, em geral, as barras de comprimento parcial não estão colocadas no pico de fluxo axial, enquanto que a análise indica que os valores máximos para a barra ejetada, e para os fatores radiais de canal quente ocorrem quando as bar

ras de comprimento parcial estão localizadas no pico. O fator de canal quente transiente total, F_q é então obtido, multiplicando-se os fatores axial e radial, muito embora os picos axiais e radiais não sejam coincidentes nas condições de cálculo. Uma margem de 10% é adicionada aos fatores de canal quente, para se levar em conta uma possível inclinação azimutal do fluxo e outras incertezas de cálculo.

3. Fatores de ponderação de realimentação de reatividade

Os maiores aumentos de temperaturas e portanto as maiores realimentações de reatividade ocorrem em canais onde a potência é maior que a média. Como o peso da região é dependente do fluxo de neutrons, estas regiões tem pesos mais altos. São feitos cálculos físicos para variações de temperatura com uma distribuição achatada de temperatura e com um grande número de distribuições de temperaturas axial e radial. As variações de temperaturas são comparadas e fatores efetivos de ponderação são determinados. Estes fatores tomam a forma de multiplicadores que quando aplicados às realimentações de reatividade de um único canal, as corrige para realimentações efetivas do núcleo inteiro com a forma apropriada de fluxo. Como nesta análise, se utilizou um método de cinética espacial uni-dimensional (axial), a ponderação axial não foi utilizada. Além disso, nenhum fator de ponderação foi aplicado à realimentação do moderador. Um fator de ponderação radial foi aplicado ao transiente de temperatura do combustível para se obter uma temperatura efetiva do combustível em função do tempo levando-se em conta a dimensão espacial que está faltando. Na análise realizada, o fator de ponderação Doppler foi considerado uma variável independente. Além dos fatores de ponderação de realimentação do núcleo, que leva em consideração as dimensões espaciais que estão faltando, considerou-se também um fator de ponderação da pastilha de combustível para levar em consideração a ausência de algum detalhe microscópico no cálculo nuclear.

4. Coeficiente Doppler e Moderador

As concentrações críticas de boro no início da vida (BOL) e a queima de combustível no fim da vida (EOL), foram ajustadas no código nuclear para obter curvas do coeficiente do moderador que fossem representativas das condições reais de projeto. Estes resultados estão apresentados na figura 14.4-36. Espera-se, segundo a referencia | 1 |, que estes resultados sejam aproximadamente equivalentes as curvas previstas para centrais de quatro circuitos ("loops") e conservativas com relação as centrais de dois e tres circuitos ("loops"). A variação de reatividade devido ao coeficiente Doppler está representado na figura 14.4-37, em função da potência. Esta curva calculada com código unidimensional de estado estacionário e usando um fator de ponderação de 1.0, mostra a variação ("defect") Doppler de 1% ΔK para uma variação de potência de zero à potência total. Cálculos de projeto indicam que a variação deveria ser de 1.3 a 1.7% de ΔK . A partir disso, conclui-se que o fator de ponderação Doppler deveria ser 1.6 para fazer o presente cálculo concordar com as previsões de projeto. Este fator de ponderação aumentará sob as condições de acidente. Entretanto na análise deste acidente o fator de ponderação Doppler foi considerado como um parâmetro de entrada e os resultados foram apresentados com fatores de ponderação Doppler de 1.0 , 1.3 , 1.6 e 2.0.

5. Fração efetiva de neutrons atrasados (β_{eff})

Os valores calculados para a fração de neutrons atrasados, β_{eff} tem variado entre .69 e .73% no início da vida (BOL) e entre .50 e .53% no fim da vida (EOL). Para este estudo foram escolhidos valores de .70% em BOL e .50% em EOL | 1 |.

O acidente é sensível a β se o valor da barra ejetada é igual ou maior do que β como nos transientes de potência zero em que o rea-

tor se torna pronto crítico.

Nenhum pessimismo é aplicado diretamente ao valor de β porque um fator de 10% aplicado aos cálculos do valor da barra é considerado um pessimismo adequado.

6. Inserção de reatividade para desligamento

Supõe-se que a reatividade de inserção para desligamento é de 5% para o reator quente a potência total (HFP) e de 2% para o reator quente a potência zero (HZP), incluindo os efeitos de um conjunto de barras preso em sua posição completamente retirada. Estes valores são reduzidos pela reatividade da barra afetada. Por exemplo, a reatividade de desligamento para a potência total (HFP) é reduzida para 4% considerando-se a reatividade de inserção de uma barra ejetada de 1% ($\beta = 1.43$) no início da vida do reator (BOL).

A reatividade de desligamento foi simulada deixando-se cair dentro do núcleo uma barra de controle de valor suficiente para desligá-lo. O início do movimento da barra, ocorre 0.5 segundos após o ponto de desligamento para um alto fluxo de neutrons ser alcançado (25% da potência para ejeção de barra a potência zero e 118% da potência para ejeção de barra a potência total). A figura 14.4-38 mostra a variação da inserção da barra com o tempo e supõe-se, segundo o parágrafo dois da página 14.4-67, que a barra estará completamente inserida 1.8 segundos após o início da queda, embora medidas em centrais em operação tenham indicado que este tempo é da ordem de 1.4 segundos. Esta taxa escolhida para inserção da barra, significa que há um intervalo da ordem de 1 segundo entre o instante em que o ponto de desligamento é alcançado e o instante em que uma quantidade suficiente de reatividade para o desligamento do núcleo tenha sido inserida.

Discussão das Condições

I) Critério de limitação

Em vista de resultados experimentais, são aplicados vários critérios para assegurar que existe pouca ou nenhuma possibilidade de dispersão do combustível no refrigerante, de grande distorções no reticulado, ou de severas ondas de choque. Estes critérios são :

1) A entalpia média da pastilha de combustível no ponto quente deve permanecer abaixo de 225 cal/g para combustível não irradiado e de 200 cal/g para combustível irradiado.

2) A temperatura média do revestimento no ponto quente deve estar abaixo da temperatura na qual se pode esperar que o revestimento se torne quebradiço (2700 °F) (1482 °C).

3) O pico de pressão do refrigerante no reator, deve ser menor do que a pressão que causaria tensões capazes de exceder seus valores limites (Faulted Condition).

4) A fusão do combustível no ponto quente deverá ser limitada a menos de 10% do volume do combustível, mesmo que a entalpia média do combustível estiver abaixo dos limites do critério (1) acima.

II) A utilização do código TWINKLE primeiramente, nesta análise, como um código de cinética espacial uni-dimensional, representa um significativo aumento na precisão com relação aos métodos anteriores de cinética puntual, porque torna-se possível com isto representar explicitamente o canal médio devido a uma representação mais realística dos efeitos espaciais da realimentação axial do moderador, da inserção de reatividade devido ao movimento da barra, e a eliminação dos fatores de ponderação à realimentação axial (item (a) acima).

III) O calor específico do UO_2 é um parâmetro importante porque é um fator básico no cálculo da quantidade de energia armazenada (entalpia) no combustível. Os critérios limites apresentados anteriormente só poderão ser efetivamente aplicados se o cálculo da variação da entalpia do combustível com a temperatura, for correto. Para o cálculo do ponto quente, utilizou-se um valor limite de entalpia de 210 cal/g, mais conservativo do que o valor de 225 cal/g apresentado no critério limite (1) para se levar em conta erros no cálculo do calor específico.

IV)

1) A própria análise de sobrepressão do sistema é uma análise conservativa, supondo-se que não haja dano no combustível, conforme o terceiro parágrafo da página 14.4-64.

2) A não consideração da possível redução da pressão devido ao rompimento do alojamento, sob pressão, de barras de controle é conservativo, porque facilita um maior aumento de pressão no sistema.

V) Não se considerar os efeitos de realimentação no cálculo da distribuição de potência e durante o transiente é conservativo porque esta realimentação iria contrariar o aumento da potência.

VI) A taxa de inserção de reatividade para desligamento, de 5% de reatividade para o reator quente a potência total (HFP) e 2% de reatividade para o reator quente a potência zero (HZP), em 1.8 segundos, é conservativa principalmente para o reator quente a potência total (HFP) onde a influência da reatividade de desligamento é maior. Além disso, em ambos os casos, o tempo real de queda da barra é de 1.4 segundos.

3. CONFORMIDADE COM OS CRITERIOS DE SEGURANÇA

Os critérios de segurança tomados como base são descritos em :

- Apêndice A ao 10 CFR 50 (AEC)
"General Design Criteria for Nuclear Power Plants"-1971.

- Norma N-18.2 (ANS)
"Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary
PWR Plants" (1970).

São apresentados no Apêndice I do PSAR de Angra as discussões relativas à adoção de cada critério de projeto contido no Apêndice A ao 19 CFR 50, nos moldes propostos pela Norma N-18.2. Tais discussões envolvem várias seções do PSAR de Angra.

A falta de experiência neste tipo de análise e a impossibilidade de realização de cálculos devidas a não disponibilidade de códigos e à insuficiência de informações sobre as condições dos acidentes impossibilitam, atualmente, emitir parecer sobre a real adoção de qualquer critério no Projeto.

4. PERGUNTAS A SEREM FORMULADAS A FURNAS

ACIDENTE 14.3.2

1ª) - No item (2) da página 14.3-11 afirma-se que foi incluída, na análise deste acidente, a variação do coeficiente de reatividade do moderador com a temperatura e pressão. Se já foi considerado, para a análise do acidente, o coeficiente mais negativo do moderador, que é o do fim da vida do núcleo com barras; pergunta-se qual a necessidade, do ponto de vista de conservativismo, de se considerar a variação deste coeficiente com a temperatura e pressão ?

2*) - No mesmo ítem citado acima inclue-se uma curva de variação de K_{eff} com a temperatura a uma pressão de 1000 psia. Pergunta-se, qual é a utilidade desta curva na análise do acidente e porque foi tomada a pressão de 1000 psia na figura 14.3-9, enquanto as figuras 14.3-10 foram feitas para 1100 psia.

3*) - Explicar com mais detalhes, porque é conservativa a inclusão, no balanço geral de reatividade, do efeito de realimentação local na região do núcleo perto da barra de controle presa em sua posição completamente retirada, de acordo com o ítem 2 da página 14.3-11.

4*) - De acordo com o ítem 3, da página 14.3-11, a solução de ácido bórico de baixa concentração (2000 ppm) deve ser retirada ("swept") das linhas de injeção de segurança a jusante das válvulas de isolamento do tanque de injeção de boro, antes da liberação do ácido bórico altamente concentrado (20000 ppm) para os circuitos de refrigeração do reator. Por que isto é necessário e como é feita esta retirada ?

5*) - Segundo o ítem (4) da página 14.3-12, grandes valores para UA do gerador de vapor gerariam temperaturas de refrigerantes mais baixas em potência total ("full power"), o que por sua vez resultaria num aumento da margem de desligamento disponível em carga zero ("zero load"). Por que ? Explicar.

6*) - Se a consideração do fator de fuligem, leva a um coeficiente de transmissão de calor mais baixo; mesmo considerando-se, segundo a afirmação do ítem (4) da página 14.3-12, que uma variação de UA numa faixa de $\pm 30\%$ tem pequeno efeito sobre os transientes, pergunta-se : para que levar em consideração este fator no cálculo do coeficiente de transmissão de calor do gerador de vapor, levando-se em consideração o ponto de vista conservativo ? Explicar.

7*) - De acordo com o segundo parágrafo do ítem 14.3.2.3, da página

14.3-13, a análise de um vazamento de fluxo de vapor de 247 lb/s a 1100 psia é considerada como resultado da análise de um vazamento de um fluxo de vapor de 270 lb/s a 1200 psia (dado no item (5) da página 14.3-12). Por que ? Explicar.

8*) - Afirma-se, no segundo parágrafo do item 14.3.2.3, da página 14.3-13, que o resfriamento mostrado na figura 14.3-10 é mais rápido do que o caso de liberação de vapor de todos os geradores de vapor, através de uma válvula de segurança, de alívio ou de descarga de vapor. Por que ? Explicar.

9*) - Qual a velocidade do fluxo de solução de boro a 20000 ppm, e a que taxa de inserção de reatividade negativa corresponde ?

10*) - De acordo com a figura 14.3-10, a reatividade chega a atingir o valor zero em aproximadamente 200 segundos e a solução de 20000 ppm de boro atinge o circuito ("loop") em 204 segundos. Pergunta-se: Existe a possibilidade de reatividade ficar positiva nestes quatro segundos de diferença ? Por que ?

11*) - Quais seriam as consequências sobre o crescimento da reatividade se houvesse um atraso de alguns segundos na injeção de solução de ácido bórico a 20000 ppm ?

ACIDENTE 14.4.2

1*) - No item (2) da página 14.4-37 diz que o efeito da geração de potência no núcleo sobre a reatividade total é mostrado na figura 14.4-25. Qual a utilidade desta curva na análise deste acidente ? O valor " $-ΔK$ " apresentado naquela figura refere-se especificamente a quais efeitos ? Doppler, efeito da reatividade do moderador, efeito da reatividade do vazio, ou a soma deles ? Foram considerados outros efeitos ainda além destes ? Explicar.

2ª) - No item (5) da página 14.4-38 considera-se os fatores de pico de potência correspondentes a um conjunto de barras de controle preso em sua posição completamente retirado, no fim da vida do núcleo. Por que? Justificar.

3ª) - No mesmo item da pergunta anterior, levou-se em consideração nos cálculos dos fatores de pico de potência o efeito de vazio local na região do conjunto de barras de controle preso em sua posição completamente retirado. Considerando-se que o efeito de vazio é contrário ao fator de pico de potência porque se levou em conta este efeito no cálculo daquele fator?

4ª) - Quais os critérios que foram levados em conta na escolha dos quinze pontos dados na tabela 14.4-9 da página 14.4-82? Poderiam ser escolhidos outros pontos? Quais?

5ª) - Segundo afirmação contida no primeiro parágrafo da página 14.4-40, o transiente apresentado supõe-se liberação de vapor vindo de somente um gerador de vapor. Por que não se considera a liberação do vapor proveniente do outro gerador de vapor, considerando-se as falhas simultâneas das válvulas de retenção ("check valves") e as válvulas da parada ("stop valves")? Explicar.

6ª) - Para cada caso (a,b,c e d) considerado na análise desse acidente, qual a velocidade do fluxo da solução de boro a 20000 ppm, e a taxa de inserção de reatividade negativa corresponde? Para cada caso, quanto tempo é necessário para os 20000 ppm de ácido bórico alcançar o circuito ("loop")?

7ª) - Para cada caso, a,b,c,d qual o sinal que fez atuar o sistema de injeção de segurança (SIS). Naquele instante, quais eram a pressão e o nível no pressurizador, a pressão na linha de vapor, e a pressão no vaso de contenção?

8ª) - O que significa a expressão : "20000 ppm de boro alcançam o loop". Considerando-se que, segundo a afirmação do segundo parágrafo da página 14.4-41, não se leva em conta os 2000 ppm de boro que entram no sistema de refrigeração do reator (RCS) antes dos 20000 ppm de ácido bórico, porque, de acordo com as figuras 14.4-26 a 14.4-29, a reatividade começa a cair antes dos 20000 ppm de boro alcançarem o circuito("loop").

9ª) - De acordo com o último parágrafo da página 14.4-34 e o segundo parágrafo das conclusões da página 14.4-42, existe a possibilidade de perfuração do revestimento em seguida a um acidente de rompimento da tubulação de vapor. Em quais condições pode ocorrer esta perfuração ?

ACIDENTE 14.4.6

1ª) - Segundo a referência |1| adotou-se, para análise do ponto quente, a entalpia do combustível de 210 cal/g. Qual foi a entalpia do combustível adotada para a mesma análise no PSAR ?

2ª) - Supondo-se que a entalpia adotada para o combustível na análise do ponto quente no PSAR tenha sido a mesma da referência (1) (item 2.4.1, da página 2-5) citada acima, isto é, 210 cal/g; e, considerando-se que o item (1) da página 14.4-62 indica os limites para a entalpia da pastilha de combustível no ponto quente de 225 cal/g para o combustível não irradiado e 200 cal/g para o combustível irradiado, pergunta-se por que não se adotou o limite inferior de 200 cal/g, para análise do ponto quente, como um valor mais conservativo ?

3ª) - Como e por que foi escolhido o valor de 10% como margem pessimamente adicionada, ao valor da barra ejetada e aos fatores de canal quente para se levar em conta as incertezas de cálculo, segundo o parágrafo cinco da página 14.4-65 ?

4ª) - Explicar melhor porque a realimentação do reator é maior do que a indicada pela análise simples de um único canal, segundo o último parágrafo da página 14.4-65.

5ª) - Qual o fator de ponderação radial "muito conservativo" foi aplicado a temperatura transiente do combustível para se obter uma temperatura efetiva do combustível em função do tempo, levando-se em conta a dimensão espacial que esta faltando, segundo o primeiro parágrafo da página 14.4-66. Por que este fator é conservativo ?

6ª) - De acordo com o segundo parágrafo da página 14.4-66, as concentrações críticas de boro, no início da vida (BOL) e no fim da vida (EOL) são ajustadas no código nuclear para se obter as curvas do coeficiente de densidade do moderador que são conservativas comparadas com as condições reais de projeto para a central. Demonstrar esta afirmação.

7ª) - De acordo com o item 3.4.3, da página 3-18, da referência número (1), citada na página 14.4-73, medidas feitas indicaram que o tempo de inserção de uma barra de controle é de aproximadamente 1.2 segundos. No segundo parágrafo, da página 14.4-67 do PSAR, afirma-se que medidas realizadas indicaram que o tempo de inserção de uma barra de controle é de aproximadamente 1.4 segundos. Em ambos os casos, considerou-se um atraso de 0.5 segundos entre o instante em que o fluxo alcança o ponto de desligamento e o instante em que a barra de controle começa a cair. No primeiro caso existe um intervalo de 1.1 segundos após o ponto de desligamento ter sido alcançado para que uma quantidade suficiente de reatividade de desligamento, seja inserida no núcleo; no segundo caso este intervalo é de 0.9 segundos. Pergunta-se por que existe esta discrepância entre estas duas publicações? Explicar.

8ª) - Segundo afirmação no primeiro parágrafo da página 14.4-68, supõe-se que o fator de canal quente transiente cresce a partir do valor de projeto em estado estacionário até o valor transiente máximo em 0.1 segundos e

permanece no máximo durante o transiente. Pergunta-se, como foi escolhido este tempo de 0.1 segundos? Explicar.

9ª) - De acordo com o último parágrafo da página 14.4-69, foi feito um cálculo detalhado para o aumento de pressão do acidente, contudo estes cálculos não constam do PSAR. Pede-se a apresentação dos resultados dos cálculos feitos.

10ª) - Pede-se os resultados de cálculo que confirmem as afirmações sob as deformações do reticulado, contidas no primeiro parágrafo da página 14.4-70.

11ª) - De acordo com o item "Reactor Protection" da página 14.4-61, a proteção para este acidente é dada pelos dispositivos de desligamento ("trips") de alto fluxo de neutrons e de alta taxa de crescimento do fluxo de neutrons. Pergunta-se qual dos dois dispositivos atuou em cada um dos casos apresentados.

12ª) - No item "Trip Reactivity Insertion", da página 14.4-67 se considera um atraso de 0.5 segundos entre o instante em que o fluxo alcança o ponto de desligamento e o instante em que a barra começa a cair. No mesmo item este tempo é dividido em duas partes, 0.2 segundos para se abrir o disjuntor e 0.15 segundos para as bobinas liberarem as barras, o que somam 0.35 segundos. Porque existe uma diferença de 0.15 segundos ? Explicar.

13ª) - Pede-se a inclusão, neste acidente, das curvas dos transientes de potência e de pressão, em função do tempo.

TABLE 14.4-10

PARAMETERS FOR ROD EJECTION ACCIDENT

<u>Time in Life</u>	<u>Beginning of Life</u>	<u>Beginning of Life</u>	<u>End of Life</u>	<u>End of Life</u>
Power Level	0%	100%	0%	100%
Ejected rod worth % ΔK	.73	.46	.59	.39
Delayed neutron fraction %	.70	.70	.50	.50
Feedback reactivity weighting	1.60	1.60	1.60	1.60
Trip Reactivity % $\Delta K/K$	2	5	2	5
Initial hot spot gap heat - Btu/hr ft ² °F (w/cm ² C°)	750(.43)	4400(2.50)	750(.43)	4400(2.50)
Transfer hot spot gap heat - Btu/hr ft ² °F (w/cm ² C°)	10000(5.67)	10000(5.67)	10000(5.67)	10000(5.67)
Initial moderator density - $\Delta K/gm/cm^3$ coefficient	+.01	+.03	+.24	+.26
F _q before rod ejection	2.80	2.80	2.80	2.80
F _q after rod ejection	6.26	4.34	4.88	3.47
Number of pumps operational	1	2	1	2

5. REFERENCIAS

- | 1 | - D.H.Risher, Jr., WCAP-7588, Topical Report, "An Evaluation of the Rod Ejection Accident in Westinghouse Pressurized Water Reactors Using Spatial Kinetics Methods", March 1971.