

# SIMULAÇÃO DE UM ACIDENTE POSTULADO DE PERDA DE REFRIGERANTE PRIMÁRIO POR PEQUENA RUPTURA NA USINA ANGRA 2 COM O CÓDIGO RELAP5/MOD3.2.2G

Gaianê Sabundjian e Delvonei Alves de Andrade

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Av. Prof. Lineu Prestes 2.242  
05508-000 Butantã, São Paulo, SP, Brasil

## RESUMO

Este trabalho apresenta a simulação de um acidente de perda de refrigerante primário por pequena ruptura SBLOCA que está descrito no Relatório Final de Análise de Segurança de Angra 2 – RFAS, com o código RELAP5/MOD3.2.2.g. O acidente consiste basicamente na ruptura de 380 cm<sup>2</sup> da linha do Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo/SREN, conectada à perna quente do circuito 20 da Usina Angra 2. Os resultados obtidos não se mostraram como esperados, embora sejam considerados satisfatórios para a nodalização proposta.

**Keywords:** RELAP, simulation, Angra 2, reactor safety, accident analysis, SBLOCA.

## I. INTRODUÇÃO

A partir das atividades que vem sendo desenvolvidas na Cooperação Técnica entre o IPEN, os Institutos de Pesquisas da CNEN (CDTN e IEN) e a sede (CODRE), onde foi realizada uma nodalização básica [1] e estabelecido o regime permanente com o código RELAP5/MOD3.2.2g [2], foi simulado um acidente de perda de refrigerante primário a partir do “input” básico.

Este trabalho tem a finalidade de qualificar a nodalização de Angra 2 de forma eficiente para o transiente analisado. No entanto, como este processo é bem complexo, deve-se observar a correta adequação da lógica de atuação dos sistemas associados a planta, de funções de controle e proteção e das reais condições de contorno impostas ao problema que só devem atuar ao longo do transiente analisado.

Para se verificar a atuação das lógicas e de sistemas modelados no conjunto de dados de entrada do código, é necessária a simulação de diversos tipos de transientes e acidentes. Um primeiro caso simulado neste contexto de um transiente de parada simultânea das quatro bombas de refrigeração do circuito primário do reator [3], como descrito no item 15.6.2 do Relatório Final de Análise de Segurança da Usina Angra 2 (RFAS/A2) [4].

No entanto, é proposto neste trabalho a simulação de um acidente de perda de refrigerante primário por pequena ruptura (SBLOCA), como descrito no RFAS (Relatório Final de Análise de Segurança). Este trabalho não tem a finalidade de reproduzir fielmente a simulação apresentada no RFAS, no entanto, se espera que a fenomenologia seja observada no decorrer do acidente.

O objetivo deste trabalho é o de simular o acidente 15.6.4.1.3.9 descrito no RFAS/A2, que consiste em um acidente de perda de refrigerante por pequena ruptura –

SBLOCA na linha do Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (SREN), conectada à perna quente do circuito 20 da Usina Angra 2. Nesta análise é usado o conjunto de dados de entrada da nodalização básica, segundo a referência [5] para o código Relap5/Mod3.2.2.g. É importante salientar que os resultados a seguir não representam um cálculo independente dentro do processo de licenciamento, mas sim, um cálculo para dar suporte ao processo de qualificação a nível transiente da nodalização básica de Angra 2 em desenvolvimento na Cooperação Técnica anteriormente mencionada. Nas seções seguintes estão descritos: o acidente analisado, as condições de contorno impostas para o problema, a nodalização adotada e os resultados e conclusões obtidas da simulação.

## II. DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

O transiente simulado neste trabalho é relativo ao acidente de perda de refrigerante por pequena ruptura na linha do Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (SREN), conectada à perna quente do circuito 20 da Usina Angra 2. A área considerada para a ruptura é de 380 cm<sup>2</sup> que corresponde a 9 % da área de escoamento da tubulação do circuito primário. Este acidente está descrito no item 15.6.4.1.3.9 do capítulo de análise de acidentes do RFAS/A2 [4].

O objetivo deste trabalho é verificar a eficiência da atuação do Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (SREN) em caso de acidentes e transientes. Além disso são adotados critérios de falha e reparo de alguns dos componentes do SREN, que estão descritos a seguir, de modo a verificar conservativamente o seu o funcionamento e do sistema em desempenhar sua função, como prevista

pelo projeto, para preservar a integridade do núcleo do reator e garantir o seu resfriamento.

Os acidentes do tipo SBLOCA são caracterizados por uma lenta despressurização do circuito primário até valores onde ocorre a atuação da injeção de segurança de alta pressão e, logo em seguida, para injeção de água pelos acumuladores. O lado secundário é requerido na remoção de calor residual. Os processos termo-hidráulicos inerentes à fenomenologia do acidente, tais como a vaporização da perna quente com conseqüente vaporização do núcleo causando uma má distribuição de vazão no interior do núcleo do reator, podem levar a uma redução no nível de líquido no núcleo, provocando um pequeno descobrimento do mesmo, porém por intervalo de tempo limitado.

**Condições Iniciais e de Contorno.** Basicamente as condições iniciais e de contorno adotadas nesta simulação do acidente em questão seguem aquelas especificadas no RFAS/A2 (à menos de indicação ao contrário, onde a condição usada na análise do RFAS/A2 será mencionada entre parênteses):

- Reator operando à 100% de potência (no RFAS/A2 a análise foi conservativamente realizada a 106% de potência);
- Núcleo do reator na condição de início de ciclo, para o ciclo de equilíbrio (i.e. 6 dias de equilíbrio com operação a plena potência e queima de 0,2 MWd/Kg);
- Perfil axial da potência do tipo “*top skewed*”;
- Calor de decaimento seguindo a tabela ANS79-1, com um fator multiplicativo de 1,08
- Sinal de desligamento (“*scram*”) do reator: conservativamente considerado o 2º sinal de desligamento, desprezando-se o 1º sinal (previsto ser a pressão na contenção ( $p_{cont}$ ) > 1,03 bar);
- Reatividade de “*scram*” (para desligamento do reator): reatividade equivalente de todas as barras com exceção da barra mais reativa; adicionalmente está sendo considerado um atraso de 0,2 s para início da queda das barras e 2 s de tempo de queda das barras;
- Assumida a condição de “*Emergency Power Mode (EPM)*”, i.e. indisponibilidade de potência externa, ocorrendo no mesmo instante do isolamento da turbina;
- Consideração do critério de falha e reparo para o gerador diesel dos circuito 30 e 40, o que provoca a indisponibilidade das bombas de injeção de alta pressão e de remoção de calor residual do SREN conectado a estes circuitos;
- Consideração da perda dos seguintes sistemas: acumulador de perna quente, sistema de alta e baixa pressão, para o circuito 20 pelo lado da ruptura; salienta-se, no entanto, que o sistema de baixa pressão ou de remoção de calor residual atua normalmente através da perna fria;
- Desligamento (“*coastdown*”) das bombas de refrigeração do reator concomitante com a perda da potência externa;

- Considerado o resfriamento do secundário a uma taxa de -100 K/h, quando a pressão do primário ( $p_{RCS}$ ) < 132 bar e a  $p_{cont}$  > 1,03 bar;
- Critério de atuação do SREN: 2 de 3 sinais;  $p_{cont}$  > 1,03 bar,  $p_{RCS}$  < 112 bar, nível do pressurizador ( $L_{pzz}$ ) < 2,28 m;
- Critério para a bomba de injeção de alta pressão (*sip*): critério do SREN atingido, +32 s de atraso devido ao EPM, +5 s de atraso para a partida da bomba;
- Critério para a bomba de remoção de calor residual (*rhrp*):  $p_{RCS}$  < 10 bar, +37 s de atraso devido ao EPM, +5 s de atraso para a partida da bomba;
- Critério para a injeção de água de alimentação auxiliar: nível do gerador de vapor ( $L_{gv}$ ) < 5m.

**Modelagem Adotada na Simulação (SBLOCA).** A Fig. 1 apresenta esquematicamente a nodalização da Usina Angra 2 para o a simulação do SBLOCA 380 cm<sup>2</sup> com o Código Relap5/Mod3.2.2g. Observa-se que embora apenas o Circuito 20 de Refrigeração do Reator esteja representado na figura, pois é onde ocorre a ruptura, os três circuitos restantes estão sendo também considerados. Da mesma forma como os sistemas de refrigeração de emergência associados a cada um dos outros três circuitos.

A nodalização proposta é composta pelo vaso do reator e suas regiões internas, gerador de vapor e suas regiões internas, pressurizador e linha de surto, bomba de refrigeração do reator e pelo Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (SREN), composto de 8 acumuladores que injetam água nas pernas quente e fria, de 4 bombas de injeção de alta pressão, de 4 bombas de injeção de baixa pressão e remoção de calor residual e de 4 tanques de água borada. Como principais condições de contorno neste esquema de nodalização estão as injeções de água de alimentação principal e auxiliar e a extração de vapor do gerador de vapor. Esta nodalização está descrita em detalhes na referência [6] bem como toda documentação referente a ela. Também está sendo considerado nesta nodalização a cinética do reator, modelo de cinética pontual, o decaimento de potência do reator em caso de seu desligamento, o sistema de proteção do reator e a lógica de atuação do SREN.

A contenção é modelada como um componente do tipo “*single volume*”, no entanto outros sistemas tais como “*spray*” da contenção e estruturas de calor internas (ou mesmo do envoltório) da contenção para absorção de calor proveniente da energia liberada do sistema primário através da ruptura bem como de mecanismos de remoção de calor internos a contenção não são representados. É neste componente que ocorre a descarga da ruptura do SBLOCA como representada pela Fig. 1.

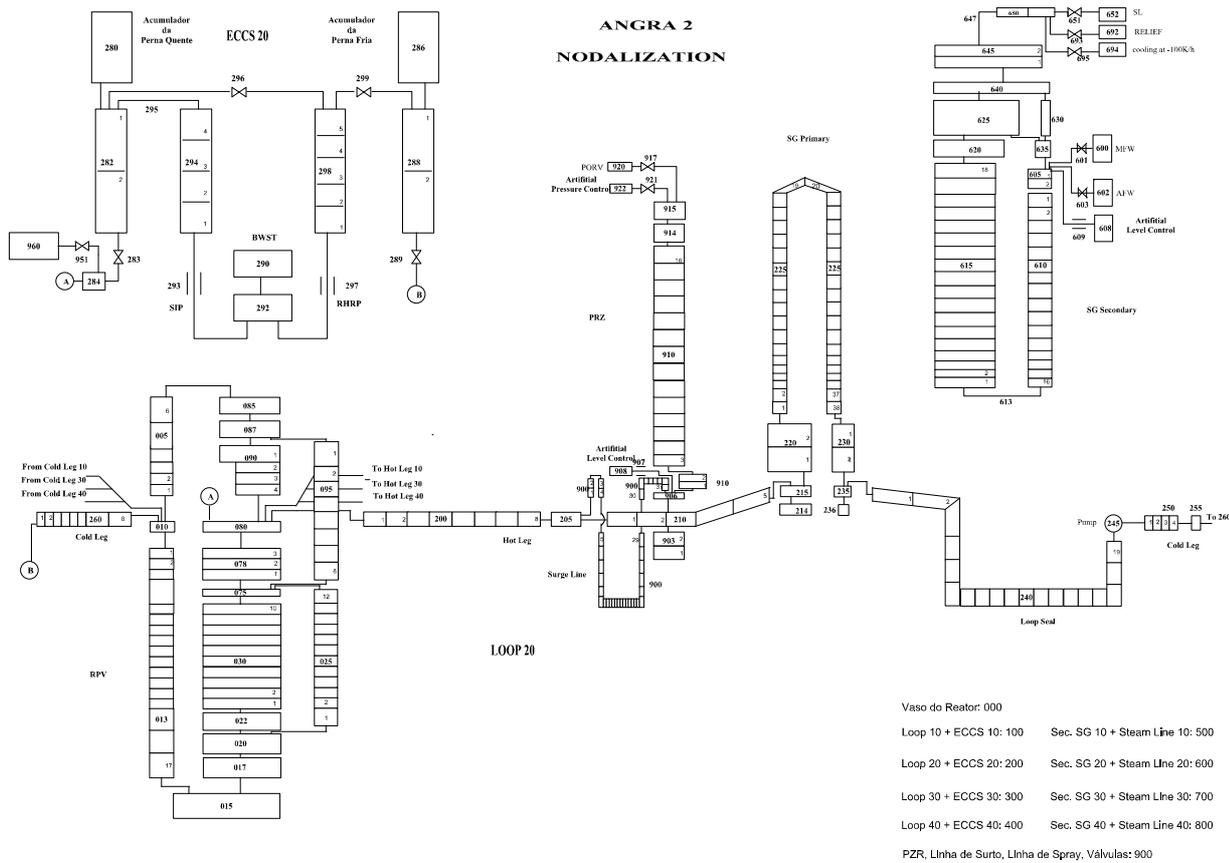


Figura 1. Esquema da Nodalização de Angra 2 para o SBLOCA 380 cm<sup>2</sup>.

### III. RESULTADOS

O SBLOCA simulado neste trabalho foi obtido a partir do estado estacionário [6,7] e também dos valores nominais apresentados no RFAS/A2, os quais foram adotados do capítulo de análise de acidentes. A potência do reator, no entanto, para esta simulação foi considerada 100% de seu valor nominal.

A seqüência de eventos ocorrida durante o acidente pode ser vista através da tabela 1 onde estão apresentados tanto os valores calculados pelo código quanto os do RFAS/A2 na simulação do acidente proposto.

As Fig. 2 e Fig. 3 apresentam a evolução temporal da vazão mássica de fluido pela ruptura e das pressões do primário ( $p_{RCS}$ ) e do secundário ( $p_{sec}$ ). Observa-se uma brusca descarga de água para a contenção no início do acidente, que se encontra inicialmente subresfriada e com muita energia, ocasionada pela depressurização do sistema primário. Nesta simulação não considerou-se a contenção como sendo um componente (TMDPVOL) como sugerido pela KWU, que é um dos tipos de componentes que o RELAP5 dispõe, na qual são fornecidas apenas as

condições operacionais com relação ao tempo para o componente, sem levar em consideração as suas dimensões. Neste caso a contenção foi simulada como um componente simples (SGLVOL), para que a atuação dos sinais de resfriamento do lado secundário e da atuação do sistema de injeção de emergência é pcont > 1,03 bar sejam obedecidos segundo as condições de contorno impostas pelo problema.

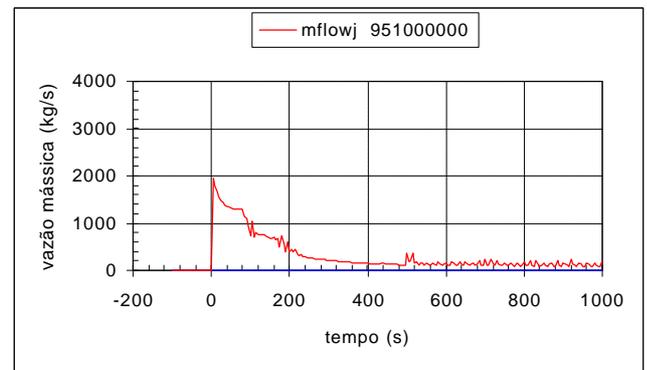


Figura 2. Perfil Temporal da Vazão Mássica de Fluido pela Ruptura.

TABELA 1. Sequência de Eventos para o SBLOCA com Área da Ruptura de 380 cm<sup>2</sup>

EVENTO	TEMPO (s)	
	Relap5/mod3.2.2g	RFAS/A2
- Início da ruptura	0,0	0,0
- Desligamento do reator pelo 2º sinal ( $p_{RCS} < 132$ bar): → isolamento da turbina, perda de potência externa (EPM), desligamento das bombas do primário	5,77	1,46
- Resfriamento do lado secundário à taxa de -100 K/h pelos sinais de $p_{RCS} < 132$ bar e $p_{cont} > 1,03$ bar	5,77	1,46
- Critério de atuação do SREN atingido ( $p_{RCS} < 110$ bar e $p_{cont} > 1,03$ bar)	12,33	8,34
- Início das bombas de injeção de segurança de alta pressão	42,78	38,5
- Início da injeção pelos acumuladores	434,20	340,0
- Recobrimento do “downcomer” do vaso do reator	575,00	370,0
- Início das bombas de remoção de calor residual	-	375,0
- Recobrimento do núcleo (“breakthrough channel” no RFAS)	(*)	400,0
- Pico de temperatura no revestimento do combustível (valor, °C)	460,00 (523°C)	-
- Recobrimento do canal quente do núcleo do reator	(*)	465,0
- Sinal para isolamento dos acumuladores de perna fria (500 s após ter sido atingido o critério do SREN)	512,34	508,3
- Término da simulação	1100,00	1000,0
(*) – Valores não encontrados pois a modelagem do vaso nesta simulação não corresponde a nodalização do RFAS		

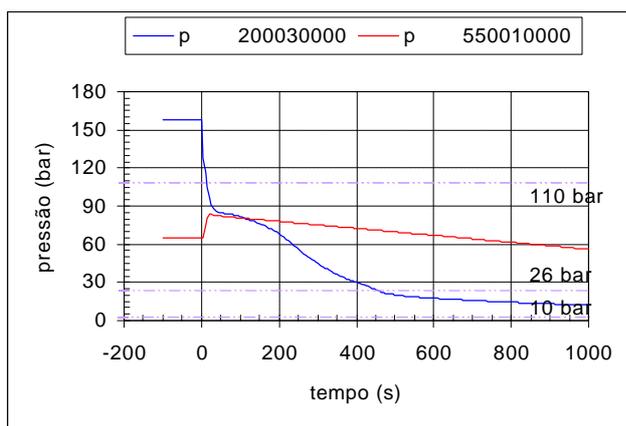


Figura 3. Perfil Temporal da Pressão do Primário e do Lado Secundário.

Observa-se através da Fig. 3 que devido ao isolamento da turbina, a pressão no lado secundário sobe bruscamente atingindo as condições para resfriamento do secundário a taxa de -100 K/h, quando então a pressão decresce monotonicamente. Nesta simulação não se atinge o ponto de atuação da válvula de alívio do gerador de vapor.

A Fig. 4 apresenta o perfil temporal da fração de vazio na região da ruptura que chega ao ponto de saturação do fluido em torno de 250 s permanecendo assim até o final do acidente.

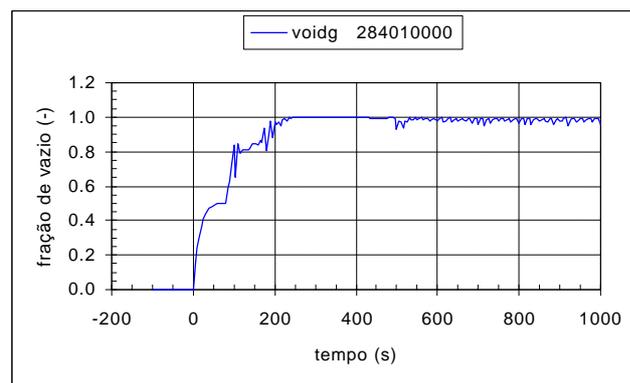


Figura 4. Perfil Temporal da Fração de Vazio na Região da Ruptura.

Pode-se verificar que até cerca de 50 s, quando a pressão do sistema atinge a pressão do secundário, o processo de remoção de calor do núcleo é obtido pela perda de massa e energia pela ruptura e também, em parte, efetuado pelo secundário dos geradores de vapor (GV's). Com isso, nenhuma injeção de água de alimentação auxiliar se faz necessária, visto que sua atuação só seria iniciada quando o nível de líquido no GV, Fig. 5, for inferior a 5 m. A partir daí toda a remoção de calor é realizada pela atuação do SREN e também pela continua perda de massa e energia pela ruptura.

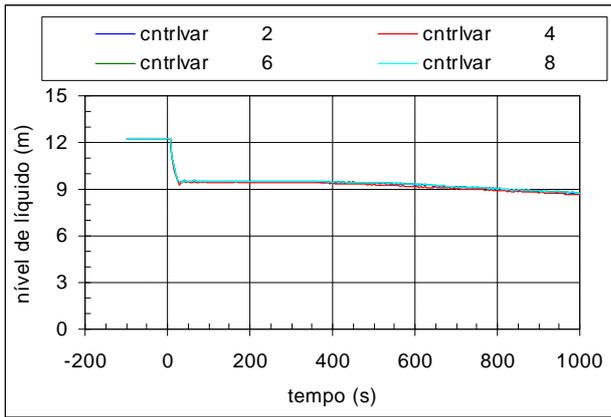


Figura 5. Perfil Temporal do Nível de Líquido nos Secundários dos GV's 10, 20, 30 e 40.

Observa-se através da Fig. 6 e da Fig. 7 que a atuação das bombas de injeção de segurança de alta pressão ocorre em torno de 45 s e as bombas associadas aos circuitos 30 e 40 não funcionam devido a considerações de falha e reparo assumidas para as mesmas, segundo RFA/S/A2, como pode ser observado na Fig. 8 para circuito 30. Como o circuito 40 apresenta o resultado semelhante não se faz necessário a apresentação de figura específica.

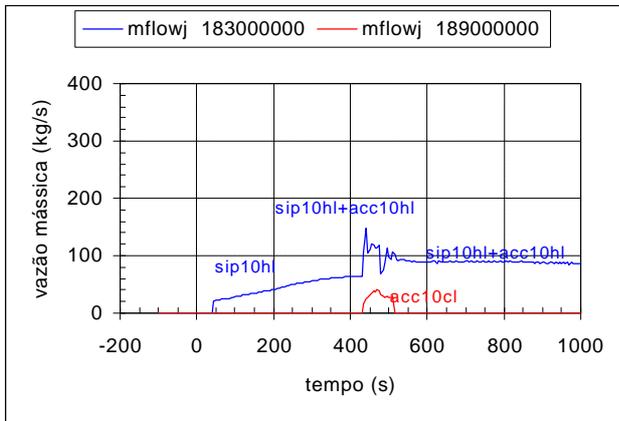


Figura 6. Perfil Temporal da Injeção do SREN nas Pernas Quente e Fria do Circuito 10.

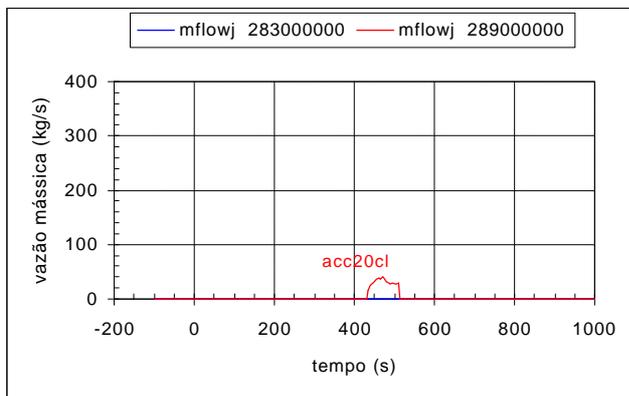


Figura 7. Perfil Temporal da Injeção do SREN nas Pernas Quente e Fria do Circuito 20.

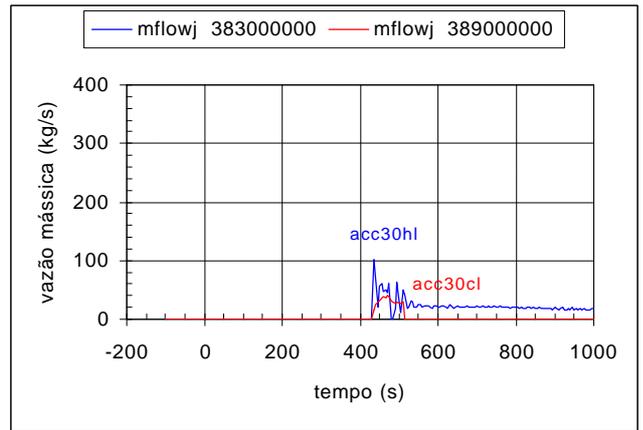


Figura 8. Perfil Temporal da Injeção do SREN nas Pernas Quente e Fria do Circuito 30.

Devido à depressurização do circuito primário o nível do líquido do núcleo do reator, Fig. 9, diminui continuamente até o patamar de atuação dos acumuladores (435 s) sendo que o núcleo é recoberto até o final do transiente. A partir da injeção de água pelos acumuladores, o sistema volta a recuperar o seu inventário de massa, como mostra a Fig. 9, que teve seu mínimo em cerca de 54300 kg.

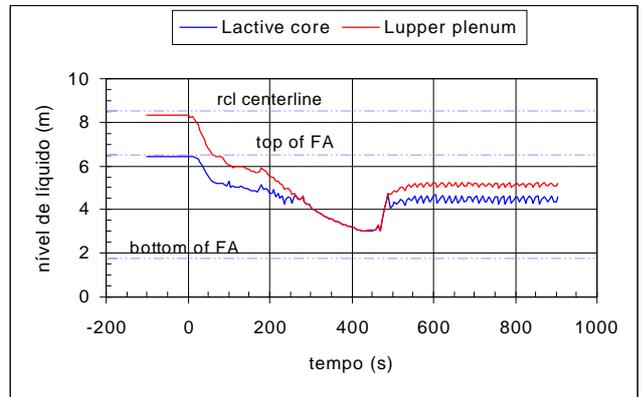


Figura 9. Perfil Temporal do Nível de Líquido na Região Ativa do Núcleo e na Região do "Upper Plenum" (Até o Nível dos Bocais).

Como consequência da depressurização rápida através da ruptura na perna quente houve uma redução do nível de líquido no núcleo diminuindo a eficiência da retirada de calor das varetas combustíveis proveniente da potência de decaimento do calor residual do combustível. Assim, a temperatura do combustível aumentou significativamente ("dryout") gerando um superaquecimento na mesma, como pode ser visto na Fig. 10 que apresenta o perfil temporal de temperatura para a barra mais quente nos quatro últimos intervalos axiais. O pico de temperatura no revestimento atingiu 523°C aos 460 s, porém bem inferior ao limite de projeto que é de 1200 C. Pode-se observar que a atuação do sistema de injeção de água pelos acumuladores não foi tão eficiente como esperado. Atribui-se tal comportamento a alta porcentagem de vaporização no

núcleo em consequência da nodalização simplificada adotada na simulação do mesmo.

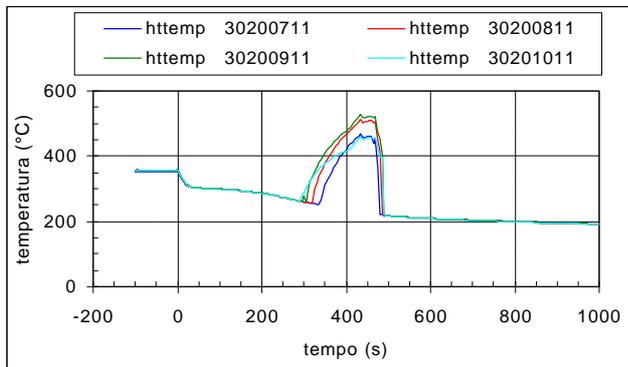


Figura 10. Perfil Temporal da Temperatura do Revestimento do Combustível para a Barra mais Quente nos Quatro Últimos Intervalos Axiais.

O resfriamento do núcleo foi possível não apenas devido a injeção de água dos acumuladores, mas também pelas bombas de injeção de segurança de alta pressão que levaram a pressão do sistema a cair continuamente até atingir as condições de equilíbrio do sistema. Não foi observada a atuação da injeção de água no sistema pelas bombas de injeção de baixa pressão, pois o circuito primário se estabilizou em valores superiores a 10 bar, ponto de atuação desse sistema. No entanto, o resfriamento do núcleo do reator foi garantido.

A Fig. 11 mostra o perfil temporal da pressão na contenção, onde observa-se que o valor máximo atingido aproxima-se assintoticamente de 2,8 bar, valor obtido em condições conservativas.

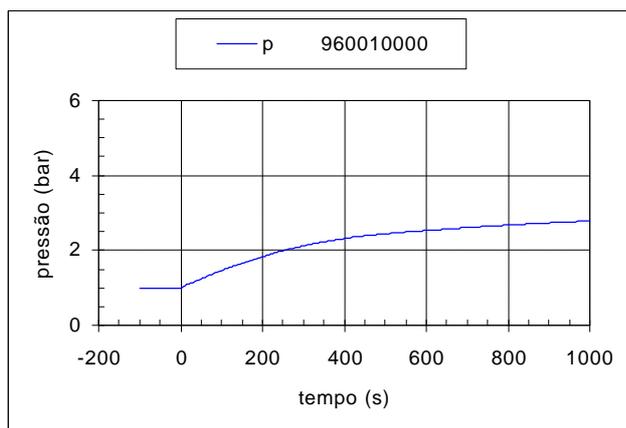


Figura 11. Perfil Temporal da Pressão na Contenção.

#### IV. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na simulação do acidente de perda de refrigerante por pequena ruptura ( $380 \text{ cm}^2$ ) na linha do sistema de resfriamento de emergência do núcleo conectada a perna quente (circuito 20) da Usina Angra 2

mostraram-se coerentes e satisfatórios embora diferindo dos apresentados no RFAS. Estes resultados estão sendo usados no contexto do processo de qualificação a nível transiente da Nodalização Básica de Angra 2, desenvolvida na Cooperação Técnica entre o IPEN a CODRE e os demais Institutos da CNEN (CDTN e IEN). Deve-se no entanto, ressaltar que esta simulação não caracteriza cálculo independente para aplicação direta ao processo de licenciamento.

Verifica-se a partir dos resultados, que houve a atuação correta e adequada das lógicas consideradas no conjunto de dados de entrada. Estas lógicas estão associadas a atuação do sistema de proteção do reator ( $1^\circ$  ou  $2^\circ$  sinal), atuação do Sistema de Resfriamento de Emergência do Núcleo (atuação das bombas de injeção de segurança de alta pressão, dos acumuladores conectados as pernas fria e quente e das bombas de injeção em baixa pressão para remoção de calor residual), ao desempenho das condições de contorno relacionadas à cinética do reator, à potência de decaimento do reator, ao funcionamento das bombas de refrigeração do reator, ao funcionamento da injeção de água de alimentação e da extração de vapor dos geradores de vapor. Também mostrou-se satisfatório o funcionamento das válvulas de alívio e de resfriamento a taxa de  $-100 \text{ K/h}$  dos geradores de vapor.

Os resultados desta simulação, embora coerentes, não se mostraram como esperados no tocante a qualificação a nível transiente para a nodalização básica em desenvolvimento na citada Cooperação Técnica, porém a integridade do núcleo foi preservada. Observa-se também que o núcleo apresentou-se com um alto nível de vaporização fato que dificultou a atuação correta dos acumuladores e do sistema de baixa pressão/remoção de calor residual (RHRP), pois a pressão do circuito primário não atingiu o valor de atuação. Como consequência a temperatura do núcleo subiu, mas atingindo valores bem abaixo dos máximos permitidos.

Outro fato observado foi que ao utilizar o modelo de Henry-Fauske na junção de quebra, no SBLOCA ( $380 \text{ cm}^2$ ) como sugerido no manual do usuário do RELAP5/MOD3.2.2g, o comportamento da curva de vazão na mesma não apresentou melhorias quando comparada ao caso de referência (padrão do programa onde os coeficientes de descarga são iguais a 1).

Como já mencionado anteriormente este estudo não teve por finalidade realizar uma comparação direta com os resultados apresentados no RFAS/A2 para o SBLOCA  $380 \text{ cm}^2$ .

Antes de novas simulações, propõe-se analisar melhor os resultados obtidos, principalmente as variáveis que estão ligadas ao fato da não atuação eficiente do SREN, como os dados geométricos. Além disso, um estudo mais detalhado da nodalização do vaso bem como a mudança do ponto de injeção do SREN na perna quente (vaso do reator) deverão melhorar significativamente estes resultados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Madeira, A.A. e Borges, R.C., **Relatório de Acompanhamento da Cooperação Técnica na CNEN para a Aplicação do Código Relap5 à Usina Angra 2 – Maio/2001 (CODRE, IPEN, CDTN E IEN)**, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Relatório de Atividades RA-SUASE-08/2001, Junho 2001.
- [2] **The Relap5 Development Team, RELAP5/Mod3 Code Manual, NUREG/CR-5535 Report, vols. 1-5**, Idaho National Engineering Laboratory, August 1995.
- [3] Andrade, D.A., Sabundjian, G., Madeira, A.A., Pereira, L.C.M., Borges, R.C., Azevedo, C.V.G, Palmieri, E.T. e Lapa, N.S., **Simulação do Acidente Postulado de Parada das Bombas do Circuito Primário de Angra 2 com o Código Relap5/Mod3.2**, V Regional Congress on Radiation Protection and Safety – Regional IRPA Congress, Recife, Pernambuco, 29 Abril – 04 Maio 2001.
- [4] **ETN, Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unit 2**, ELETRONUCLEAR S. A., Doc. Ident. MA/2-0809.2/060000, Rev. 3, Abril 2000.
- [5] Borges, R.C., **Comunicação Pessoal via email** – 05 de Junho de 2001.
- [6] Grupo de Trabalho, **Simulação de Angra 2 com o Código Relap5/Mod3.2.2 Gamma**, Sessão Técnica Especial, XII Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-hidráulica, Rio de Janeiro, RJ, 15-20 Outubro 2000.
- [7] Sabundjian, G., Andrade, D. A., **Memória de Cálculo de Angra 2 com o código RELAP5/MOD3.2**, P&D.CENT.CENT.005.00 – Relt.001.R00 – IPEN, setembro 2000.

## ABSTRACT

This paper presents a nodalization for Angra 2 Nuclear Power Plant, as well as the results obtained for a Small Break Loss of Coolant Accident (SBLOCA), simulated with RELAP5/MOD3.2G code. This accident consists in a small break (380 m<sup>2</sup>) in the line of the Emergency Core Coolant System (ECCS) in loop 20 of Angra 2. Results are not as expected, however they are satisfactory regarding the nodalization used.