



# MODELAGEM E ANÁLISE TERMO-HIDRÁULICA DO VASO DE PRESSÃO DO REATOR ANGRA 2 COM O CÓDIGO RELAP5-3D

Javier González-Mantecón\*, Antonella L. Costa, Maria Auxiliadora F. Veloso, Claúbia Pereira

Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Minas Gerais

\*mantecon1987@gmail.com



## RESUMO

A aplicação dos códigos de análise termo-hidráulica para simular situações reais tem como principais objetivos validar os modelos termo-hidráulicos para projeto, operação, análise de segurança e licenciamento e verificar a instrumentação nuclear dentro do reator a partir da comparação de variáveis térmicas obtidas na simulação com os valores fornecidos pelos sensores no interior do reator. No presente trabalho, o código de análise termo-hidráulica RELAP5-3D foi utilizado para desenvolver um modelo do vaso de pressão do Reator a Água Pressurizada (PWR) Angra 2 localizado no Brasil. O modelo foi desenvolvido utilizando dados geométricos e de materiais fornecidos no Relatório Final de Análise de Segurança (FSAR) de Angra 2. Os resultados do cálculo no estado estacionário do modelo foram verificados em comparação com os dados de referência, demonstrando boa concordância. A nodalização desenvolvida, bem como valores dos parâmetros de temperatura do refrigerante, vazão, pressão e fração de vazio obtidos a partir do cálculo são apresentados e analisados.

## Introdução

Em junho de 1975, foi assinado um acordo de cooperação para os usos pacíficos da energia nuclear entre o Brasil e a República Federal da Alemanha. Sob esse acordo o Brasil realizou a aquisição de duas usinas nucleares, Angra 2 e 3, da empresa alemã SIEMENS/KWU, atualmente Areva ANP. A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto - Unidade 2 está localizada na costa do Atlântico em uma baía no extremo oeste do Estado do Rio de Janeiro. Situa-se entre a Serra do Mar e Baía da Ilha Grande na Região Angra dos Reis.

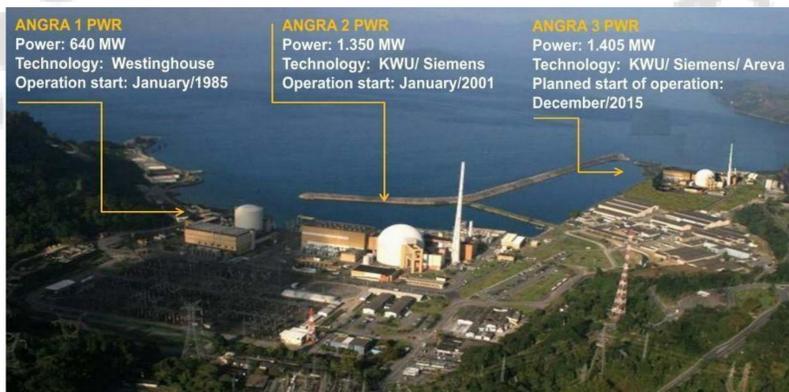


Figura 1: Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.

A segunda usina nuclear brasileira começou a operar comercialmente em 2001. Com potência de 1350 MWe, Angra 2 é capaz de atender ao consumo de uma cidade de 2 milhões de habitantes, como Belo Horizonte. Angra 2 pertence à família de 1300 MWe SIEMENS/KWU PWR, com sistemas de segurança redundantes 4 x 50%, com a consequente separação física dos trens.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise termo-hidráulica do vaso de pressão do reator Angra 2 utilizando o código RELAP5-3D através da avaliação de parâmetros importantes como pressão, temperatura e vazão durante a operação do reator em modo estacionário.

## Metodologia

Para realizar a modelagem os autores se basearam na nodalização de um reator PWR apresentada no manual de RELAP5-3D. RELAP5-3D é um código que tem sido amplamente utilizado para a modelagem de sistemas primários em estado estacionário, assim como as respostas dos sistemas primários durante transitórios, incluindo cenários de Acidentes de Perda de Refrigerante (LOCAS em inglês) em Reatores de Água Leve (LWR em inglês).

A área de vazão de refrigerante pelo núcleo foi dividida em 10 regiões representando 10 canais termo-hidráulicos e a cada um destes canais foram associadas estruturas de calor. Um canal não aquecido representa o restante da vazão (*bypass*). Na Figura 2 é mostrada a nodalização do vaso de pressão.

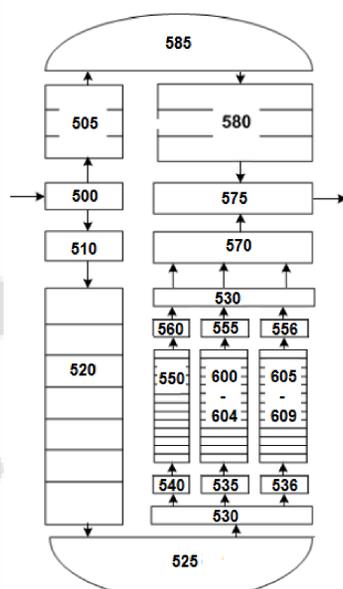


Figura 2: Nodalização do vaso de pressão do reator Angra 2.

Os canais termo-hidráulicos foram subdivididos axialmente em 34 volumes, associados aos 34 volumes axiais das estruturas de calor. Dois componentes dependentes do tempo (TDV), conectados a componentes do tipo *branch*, representam a entrada e saída de refrigerante no vaso de pressão. Para o cálculo de estado estacionário foi utilizada a potência térmica do reator de 3765 MW.

## Resultados

A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros termo-hidráulicos calculados pelo código RELAP5-3D no vaso de pressão, e são comparados com os dados fornecidos no FSAR. Os resultados demonstram concordância com os dados o que significa que o modelo de cálculo reproduz com boa aproximação o comportamento térmico no vaso de pressão de Angra 2.

A temperatura de entrada e saída do refrigerante no vaso de pressão é mostrada na Figura 3. A água entra ao vaso com uma temperatura de 291.28 °C e pressão de aproximadamente 15.98 MPa e ao passar pelo núcleo do reator incrementa sua temperatura em 35.39 °C.

Tabela 1: Comparação entre os parâmetros termo-hidráulicos calculados com RELAP5-3D e os dados do FSAR.

| Parâmetro                     | Especificação no FSAR | Resultado obtido com RELAP5-3D | Erro (%) |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------|
| Potência (MW)                 | 3765                  | 3765.04                        | 0.001    |
| $T_{\text{entrada}}$ (°C)     | 291.3                 | 291.28                         | 0.007    |
| $T_{\text{saída}}$ (°C)       | 326.1                 | 326.67                         | 0.17     |
| $\Delta T_{\text{vaso}}$ (°C) | 34.8                  | 35.39                          | 0.02     |
| $P_{\text{entrada}}$ (MPa)    | 16.05                 | 15.98                          | 0.44     |
| $P_{\text{saída}}$ (MPa)      | 15.7                  | 15.79                          | 0.57     |
| Vazão (kg/s)                  | 18800                 | 18799.98                       | 0.0001   |

Na Figura 3 também se apresenta o gráfico que caracteriza a pressão de entrada e saída. A queda de pressão é de 0.19 MPa. Observando a figura fica claro que o cálculo em estado estacionário tem uma boa aproximação com as especificações do reator fornecidas pelo FSAR.

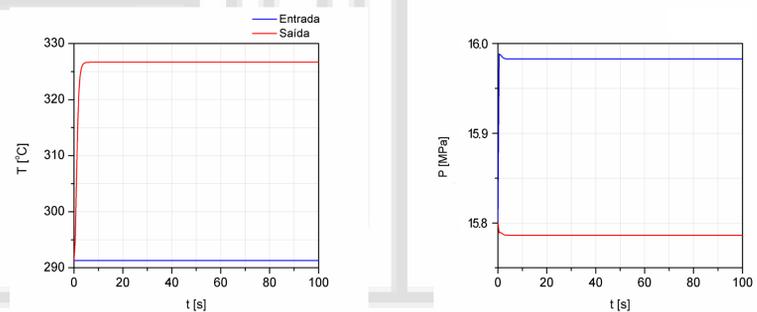


Figura 3: Parâmetros de entrada e saída do vaso de pressão: temperatura (esquerda) e pressão (direita).

No reator PWR não acontece mudança de fase porque a água se mantém a alta pressão. Isto pode ser visto na Figura 4 onde a fração de vazio fica constante e é igual a zero. A vazão de massa pelo vaso de pressão também foi calculada (Figura 5). Como é esperado permanece constante durante a maior parte do tempo de simulação, com um valor de 18799.98 kg/s.

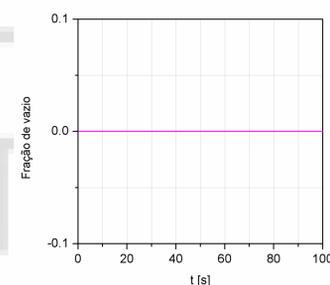


Figura 4: Fração de vazio no vaso de pressão.

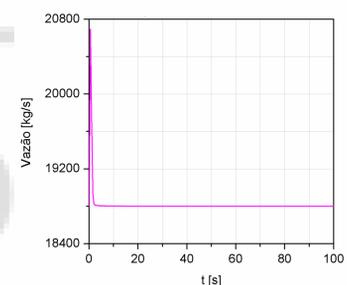


Figura 5: Vazão de massa no vaso de pressão.

## Conclusões

Neste trabalho um modelo foi desenvolvido no código RELAP5-3D para realizar a análise termo-hidráulica do vaso de pressão do reator nuclear Angra 2. Os resultados do cálculo de estado estacionário com o modelo que foi feito foram comparados com dados do FSAR de Angra 2, os parâmetros termo-hidráulicos como temperatura, pressão, fração de vazio e vazão apresentaram boa concordância com os dados fornecidos, com erros menores do 1%. O modelo de cálculo reproduz as condições de operação do vaso de pressão de Angra 2. O próximo passo é modelar o sistema secundário do reator e realizar simulações de possíveis transitórios.

## Referências bibliográficas

- [1] Idaho National Laboratory, "RELAP5-3D Code Manual - The RELAP5-3D Code Development Team," Idaho Falls, DOE/NE Idaho Operations Office Contract No. DE-AC07-05ID14517 2009.
- [2] Eletrobras Eletronuclear, "Final Safety Analysis Report - Central Almirante Álvaro Alberto - Unit 2," Rev. 13, 2013.
- [3] Timothy Crook, Rodolfo Vaghetto, Alessandro Vanni e Yassin A. Hassan, "Sensitivity analysis of a PWR response during a Loss of Coolant Accident under a hypothetical core blockage scenario using RELAP5-3D," em *Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE22*, Prague, 2014.
- [4] Kenneth D. Kok, *Nuclear Engineering Handbook*. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [5] J. C. Clayton, "The Shippingport Pressurized Water Reactor and Light Water Breeder Reactor," em *25th Central Regional Meeting American Chemical Society*, Pittsburgh, 1993.

## Agradecimentos

