

## MODELAGEM TERMO-HIDRÁULICA DE UM REATOR MODULAR DE PEQUENO PORTE UTILIZANDO RELAP5

**Bruno V. Melo<sup>1</sup>, Antonella L. Costa<sup>1,2</sup>, Lucas P.C. Leão<sup>1</sup>, Gustavo L.A. Ribeiro<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia, Bloco 4 Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, 31270-90, Belo Horizonte, MG, Brasil)

<sup>2</sup>CNPq Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Reatores Nucleares Inovadores, Brasil

bviotti@protonmail.com

**Palavras-Chave:** SMART, SMR, Termo-hidráulica, RELAP 5

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo modelar os componentes principais do SMART utilizando o código de análise termo-hidráulica RELAP5 MOD 3.3, amplamente utilizado nos estágios de licenciamento de reatores de potência e de pesquisa. Outros objetivos incluem verificar a modelagem em situação de operação em estado estacionário. Os canais de escoamento de fluido refrigerante foram modelados para reproduzir a área total de vazão e a eles foram relacionadas estruturas de calor, representando assim os quatro tipos de elementos combustíveis utilizados no reator. O restante do ciclo primário do SMART, incluindo as quatro bombas de circulação de refrigerante e os geradores de vapor, foram também implementados no modelo. Os resultados de simulações do estado estacionário foram comparados com dados de referência e apresentaram razoável concordância com os mesmos. Temperaturas de revestimento, *gap* e combustível apresentaram resultados similares aos esperados e dentro da margem de erro aceitável presente na literatura, bem como temperaturas de saída do refrigerante do núcleo e parâmetros calculados no ciclo secundário.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - IEA*), aproximadamente 63% da energia mundial é produzida por meio de combustíveis fósseis. O Brasil hoje é o oitavo país com maior consumo absoluto de energia elétrica do mundo, utilizando como fontes primárias a hidreletricidade e a termoeletricidade [1]. Em virtude das mudanças climáticas e da grande dependência energética mundial sobre combustíveis fósseis, emerge uma crescente necessidade de substituir tais fontes - poluentes e não renováveis - por alternativas mais eficientes e menos danosas ao meio ambiente. Neste contexto, a energia nuclear, hoje responsável por aproximadamente 10% da geração mundial de energia, apresenta-se como alternativa viável, limpa e com uma ampla gama de vantagens sobre fontes tradicionais [1].

Os reatores de menor dimensão e potência, caracterizados por custos de implementação e desenvolvimento inferiores aos dos reatores de grande porte, têm se destacado no contexto energético atual [2]. A classe dos reatores modulares pequenos (*Small Modular Reactors - SMRs*) compreende reatores com capacidade de produção média de até 300 MWt. Esses reatores, que apresentam dimensões reduzidas em comparação aos modelos tradicionais, permitem a fabricação de seus componentes de forma modular e independente. Além disso, os SMRs são projetados com sistemas de segurança inerentes e passivos, proporcionando uma abordagem mais segura e eficiente para a geração de energia nuclear [3,4].

Nesse contexto, o reator SMART apresenta dimensões reduzidas em função da integração de seus principais componentes em um único vaso de pressão, podendo operar até uma potência máxima de 330

MWt em um ciclo de três anos sem a necessidade de reabastecimento. Possui quatro bombas de resfriamento, 8 geradores de vapor e seu núcleo é composto por 57 elementos combustíveis distribuídos espacialmente em uma rede 17x17. Cada elemento é constituído por 264 varetas de combustível de 8,05 mm de diâmetro e 2m de comprimento, 21 tubos guia para barras de controle e 4 tubos guia instrumentados. O combustível utilizado é o  $UO_2$  enriquecido a 4,95%. O SMART não utiliza boro solúvel incorporado ao moderador [5]. A integração de seus principais componentes em um único vaso de pressão minimiza a utilização de tubulações de conexão e torna o SMART menos susceptível à ocorrência de acidentes severos com perda de refrigerante, tais como LB-LOCAs (*Large Break Loss of Coolant Accidents*) [6,7].

O SMART foi desenvolvido como um reator multipropósito, com potenciais aplicações em geração de eletricidade, dessalinização de água marinha e aquecimento de distritos, sendo adequado para uso em redes pequenas e isoladas [8]. Em 2012 tornou-se o primeiro reator integral do mundo a ser licenciado [9]. Em 2024, a *SMART Power Co.*, responsável pela construção do SMART, prevê que as duas primeira plantas do reator, a serem construídas na Arábia Saudita, serão finalizadas em um período de 5 a 6 anos após a autorização da construção [10].

Em 26 de setembro de 2024 o projeto SMART100, desenvolvido pela KAERI como um sucessor do SMART, contando com design aprimorado, apresentando um sistema de segurança integralmente passivo e podendo gerar até 365 MWt [11] recebeu o SDA (*Standard Design Approval*) pela NSSC (*Nuclear Safety and Security Commission*). Segundo a KAERI (*Korea Atomic Energy Research Institute*), os planos futuros para seus reatores envolvem seu constante aprimoramento tecnológico e futuras expansão e comercialização para o mercado global [11].

O objetivo deste trabalho é modelar os ciclos primário e secundário do SMART e verificar a nodalização proposta em estado estacionário.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Características do sistema simulado

O projeto SMART utiliza quatro tipos de elementos combustíveis, que diferem entre si pelo seu número total, pelo número de varetas combustíveis, por sua posição no núcleo e pelo número e posições de barras de venenos queimáveis. Os quatro tipos de elementos combustíveis (A, B, C e D) são descritos na Tab. 1.

Tabela 1 – Características gerais dos tipos de elementos combustíveis utilizados no SMART [5].

Elementos Combustíveis				
Tipo	Nº Total	Nº Varetas Combustíveis	Nº Barras $Al_2O_3-B_4C$	Nº Barras $Gd_2O_3 - UO_2$
A	20	240	24	-
B	16	244	20	-
C	1	236	24	4
D	20	228	24	12

No início de seu ciclo de vida, o núcleo do SMART apresenta excesso de reatividade suficiente para compensar a queima de combustível e o aumento da concentração de produtos de fissão. Desta forma, barras de controle e venenos queimáveis são empregados a fim de evitar a supercriticalidade no início de seu ciclo. São usadas barras de venenos queimáveis compostas por  $Al_2O_3-B_4C$  (30% de boro), bem como barras de combustível contendo  $Gd_2O_3$  a 12% e  $UO_2$  enriquecido a 1,8%. O material utilizado nas barras de controle, por sua vez, é  $Ag(80\%)-In(15\%)-Cd(5\%)$  [9]. O padrão de carregamento do núcleo é apresentado na Fig. 1.

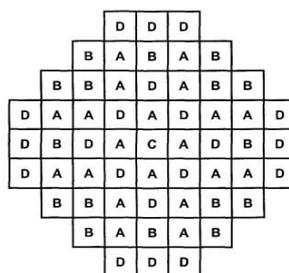


Figura 1 – Padrão de carregamento do núcleo padrão do projeto SMART. A: U-235 4,95 w/o/ 24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>B<sub>4</sub>C; B: U-235 4,95 w/o/ 20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C; C: U-235 4,95 w/o/ 24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C/ 4 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – UO<sub>2</sub>; D: U-235 4,95 w/o/ 24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C/ 4 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – UO<sub>2</sub> [6].

Em virtude dos segredos tecnológicos e da limitação de informações disponíveis, recorremos a diversas fontes de dados para modelar computacionalmente os sistema primário e secundário do projeto SMART [5,12]. A Tab. 2 apresenta os principais parâmetros de entrada empregados na modelagem do reator.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada para modelagem do sistema primário.

Parâmetro	Valor
Potência Total	330 MWt
Altura Ativa do Combustível (núcleo), L	2,0 m
Área efetiva para troca de calor no núcleo, A <sub>t</sub>	1,4 m <sup>2</sup>
Vazão mássica, $\dot{m}$	2090 kg/s
Temperatura de entrada do refrigerante (núcleo), T <sub>in</sub>	543 K
Temperatura de saída do refrigerante (núcleo), T <sub>out</sub>	583 K
Número de Elementos Combustíveis	57
Pressão Nominal do Sistema, P <sub>op</sub>	15 MPa
Número de Geradores de Vapor	8
Área superficial total de geradores de vapor, A <sub>s</sub>	500 m <sup>2</sup>
Nº de bombas de circulação (sistema primário)	4
Velocidade das bombas de circulação, V <sub>b</sub>	3600 rpm
Vazão das bombas de circulação, $\dot{m}_b$	0,89 m <sup>3</sup>

A distribuição de potência utilizada na modelagem do projeto SMART tem perfil senoidal, e é baseada em [5]. Não há acoplamento térmico ou hidráulico entre os componentes A, B, C e D.

## 2.2. Modelagem

A modelagem termo-hidráulica do projeto SMART foi desenvolvida utilizando o código RELAP5 MOD 3.3. Os canais de escoamento do fluido refrigerante do núcleo foram modelados assumindo quatro elementos combustíveis distintos (A, B, C e D), com 11 divisões axiais cada. A eles foram atribuídas estruturas de calor (HS) que representam o combustível.

A vazão mássica e a área de fluxo para os canais termo-hidráulicos do núcleo foram obtidas assumindo o número total de elementos combustíveis de cada tipo presentes no SMART. Os dados de entrada utilizados na modelagem do núcleo são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada para modelo do núcleo.

Canal	Identificação	Vazão Mássica, $\dot{m}$ (kg/s)	Nº de Elementos Combustíveis	Área de Escoamento (m <sup>2</sup> )
1	301	733,33	1	0,0246
2	302	586,67	20	0,4912
3	303	36,67	16	0,3930
4	304	733,33	20	0,4912

As estruturas de calor do núcleo foram modeladas com 11 e 7 divisões axiais e radiais, respectivamente, como ilustra a Fig. 2. O modelo foi construído de acordo com as dimensões reais das varetas combustíveis propostas para o reator. As propriedades térmicas dos materiais UO<sub>2</sub>, hélio e *zircaloy-4* foram devidamente inseridas no modelo como dados de entrada no RELAP5 para representar respectivamente os três materiais: combustível, *gap* e revestimento. As propriedades térmicas utilizadas na caracterização dos materiais são a condutividade térmica (W/m.K) e a capacidade calorífica (J/m<sup>3</sup>.K). Para o hélio foram utilizados valores constantes para ambas. Para o UO<sub>2</sub> foram usados valores no intervalo de temperatura de 200K a 5000K [13] e para o *zircaloy-4* valores no intervalo de 300K a 3200K [14].

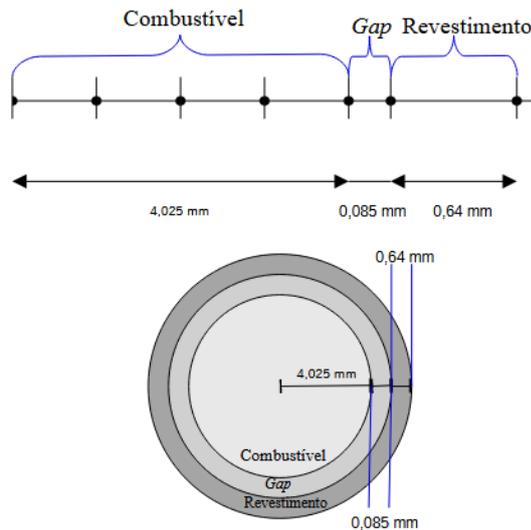


Figura 2 – Nodalização das estruturas de calor do núcleo (fora de escala).

A modelagem dos geradores de vapor foi realizada segundo metodologia proposta por [15] para geradores de vapor helicoidais. Foram utilizados 11 volumes axiais conectados a estruturas de calor, sendo estas as vias de troca de calor entre a água dos sistemas primário e secundário. As estruturas de calor correspondentes foram modeladas em 11 divisões axiais e duas radiais. O material considerado para essa HS foi o Inconel 690 [12]. Para a condutividade térmica e a capacidade calorífica do Inconel 690 foram usados valores no intervalo de temperatura de 373K a 1273K [16].

O sistema secundário foi modelado de forma simplificada para representar as trocas de calor entre os dois ciclos do SMART. O modelo consiste 11 volumes axiais ligado a dois volumes dependentes do tempo que contém as condições de contorno de pressão e temperatura do ciclo secundário. Na Tab. 4 são apresentados os principais parâmetros utilizados na modelagem do sistema secundário do SMART.

Tabela 4 – Parâmetros de entrada de referência do sistema secundário [17].

Parâmetro	Valor
Pressão de Entrada, $P_{in}$	5,2 MPa
Pressão de Saída, $P_{out}$	3,2 MPa
Área de fluxo total, $A_t$	1,19 m <sup>2</sup>
Vazão mássica, $\dot{m}$	161 kg/s
Altura, L	2 m
Temperatura de entrada, $T_{in}$	453 K
Temperatura de saída, $T_{out}$	547 K

A nodalização dos ciclos primário e secundário do SMART desenvolvida neste trabalho é apresentada na Fig. 3.

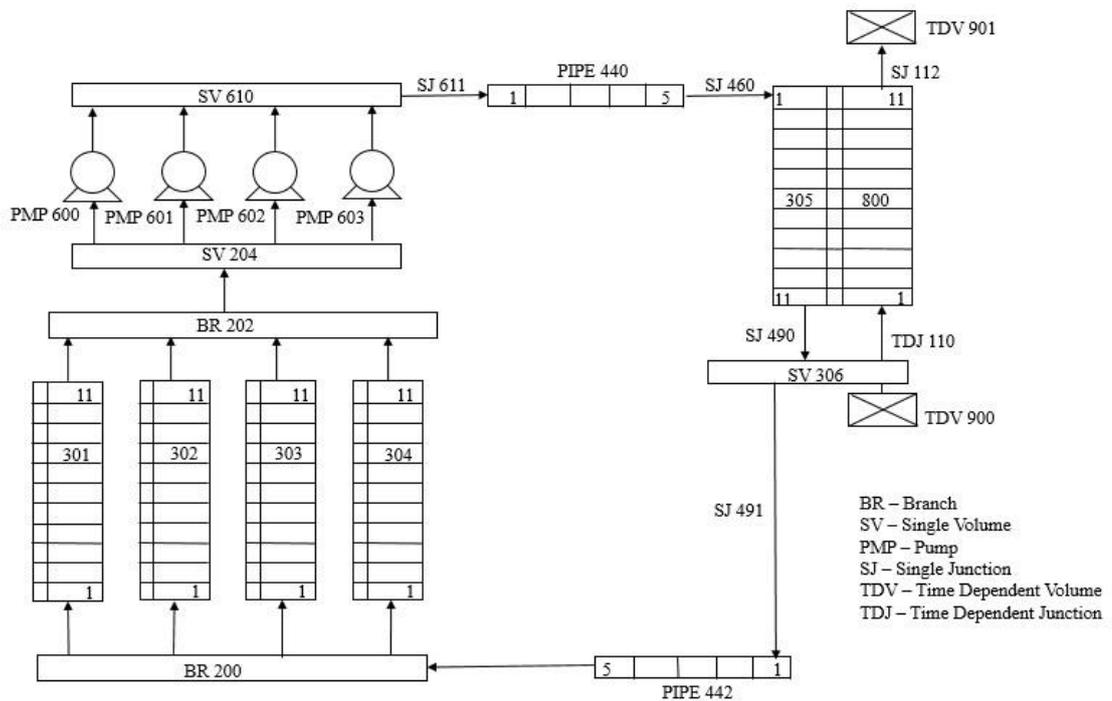


Figura 3 – Nodalização desenvolvida em RELAP5 MOD 3.3. para o projeto SMART.

O problema é inicializado com valores fixos de temperatura e pressão para todos os volumes axiais das estruturas 301, 302, 303, 304, 305 e 800, que o RELAP5 MOD 3.3. considera como condições iniciais de cálculo. As bombas de circulação são inicializadas com velocidade constante. As estruturas 440 e 442 são inicializadas com pressão, temperatura e vazão mássica constantes e próximas daquelas esperadas para o estado estacionário.

### 3. RESULTADOS

A comparação entre os dados de referência e o modelo proposto para o sistema primário do SMART é apresentada nas Tab. 5. O erro é calculado de acordo com os critérios de licenciamento, verificação e validação de sistemas nucleares apresentados em [18].

Tabela 5 – Comparação entre valores de referência e valores calculados pelo RELAP5 para o ciclo primário.

Parâmetro	Valor de Referência	RELAP5	Erro(%)	Sugerido [18]
Potência (MW)	330	330	0	2,0
$T_{out}$ (K)	583	610	5,0	0,5
$\Delta T$ (K)	40	70	5,0	0,5
$\Delta P$ (kPa)	400	3000	18,0	10
$\dot{m}$ (kg/s)	2090	1000	52,0	2

Conforme observado, a temperatura média de saída do refrigerante do núcleo apresenta-se superior ao valor esperado de 583 K. No entanto, apesar de os resultados ainda não serem plenamente satisfatórios, nota-se a possível formação de um padrão de estabilização a partir de aproximadamente 230 segundos. Esse comportamento é evidenciado na Fig. 4, que ilustra a variação da temperatura do fluido refrigerante em função do tempo à saída dos canais de escoamento 301, 302, 303 e 304.

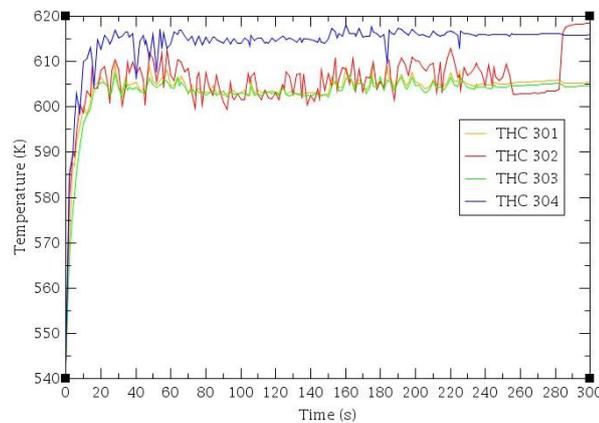


Figura 4 – Temperatura do refrigerante na saída dos canais de escoamento 301, 302, 303 e 304.

As temperaturas do combustível, do *gap* e do revestimento foram monitoradas com o objetivo de assegurar que não ultrapassassem os limites de segurança e de referência estabelecidos. Em todas as estruturas de calor, a temperatura do núcleo permanece abaixo de 700 K, conforme apresentado na Fig. 5. A literatura indica que, em condições de operação do reator a 100% de potência, as temperaturas médias esperadas para o combustível situam-se entre 450 K e 500 K [5].

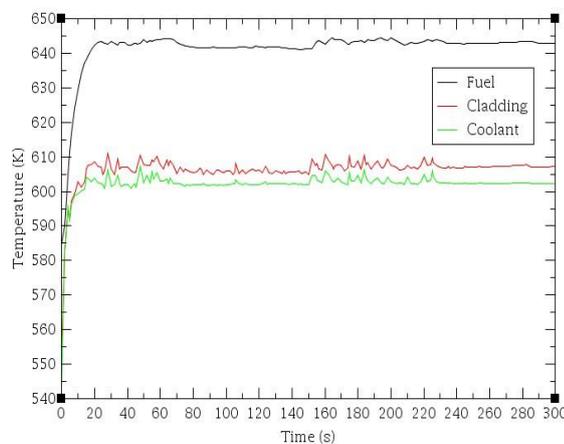


Figura 5 – Temperaturas do combustível, revestimento e fluido refrigerante para o nível axial 7 do canal de escoamento 304.

A Fig. 5 apresenta as temperaturas do combustível, revestimento e refrigerante para o nível axial 7 da HS 304. Em todas as estruturas de calor, a temperatura do revestimento não excedeu 700 K. O ponto de fusão do *zircaloy-4* é de 2123 K [19]; contudo, a partir de 1473 K, sua reação de oxidação atinge níveis críticos, liberando hidrogênio gasoso e calor, o que pode comprometer a segurança do reator [20,21]. Assim, o revestimento de *zircaloy-4* manteve-se dentro dos limites térmicos aceitáveis para este material.

Outro aspecto crucial da análise do modelo é a observação da queda de pressão ao longo dos canais de escoamento do núcleo, que se mostrou significativamente superior ao valor esperado de 0,4 MPa, atingindo aproximadamente 3 MPa. Nas condições operacionais do SMART, isso resulta em uma vaporização quase completa e indesejada do fluido refrigerante, o que é corroborado pelo aumento do coeficiente de vazio ao longo dos canais, que atinge um valor máximo de 0,9.

Além do estudo do sistema primário, foi realizada a modelagem e análise de uma estrutura simplificada para o sistema secundário. A comparação entre os dados de referência e o modelo proposto para o sistema secundário do SMART é apresentada na Tab. 6, sendo o erro determinado da mesma maneira descrita para o ciclo primário.

Tabela 6 – Comparação entre valores de referência e valores calculados pelo RELAP5 para o ciclo secundário.

Parâmetro*	Valor de Referência	RELAP5	Erro(%)	Sugerido [18]
$T_{out}$ (K)	547	528	3,5	0,5
$\Delta T$ (K)	94	75	3,5	0,5
$\Delta P$ (kPa)	300	300	0	10
$\dot{m}$ (kg/s)	161	-	-	2

A temperatura de saída do fluido no sistema secundário está abaixo do valor de referência, o que pode ser atribuído ao fato de o fluido refrigerante do sistema primário retornar ao gerador de vapor com uma temperatura inferior a 583 K. No entanto, observa-se que quase toda a água que entra no canal termo-hidráulico 800 é vaporizada ao atingir o nível axial 11, conforme indicado pelo coeficiente de vazio, que se aproxima de 1. A queda de pressão ao longo do canal também se mostra adequada, com o vapor sendo liberado a uma pressão média de 3,2 MPa.

Por fim, é importante analisar as vazões mássicas dos sistemas primário e secundário. A Fig. 6 apresenta a variação de  $\dot{m}$  para os dois sistemas ao longo do tempo.

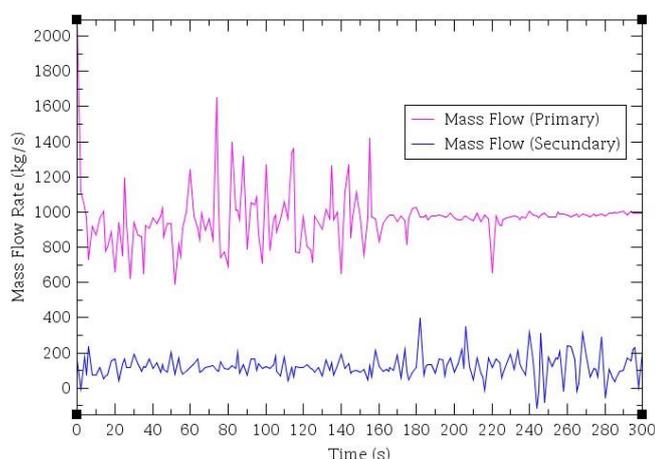


Figura 6 – Vazões mássicas dos sistemas primário e secundário.

Conforme apresentado na Fig. 6, a vazão mássica no ciclo primário sofre uma queda abrupta do valor inicial de 2090 kg/s, oscilando rapidamente em torno de uma média de 1000 kg/s ao longo de todo o ciclo. Esse comportamento, associado à queda de pressão de 3 MPa ao longo dos canais de escoamento, explica a vaporização quase completa do refrigerante no sistema primário. Com uma vazão mássica reduzida, o fluido refrigerante é submetido a um aquecimento superior ao esperado, e a uma pressão abaixo do valor de referência, levando à sua vaporização. Aproximadamente aos 230 segundos, surgem indícios de estabilização, embora em um nível muito inferior ao esperado de 2090 kg/s. No ciclo secundário, observa-se um comportamento semelhante, porém sem sinais evidentes de estabilização. A vazão mássica no ciclo secundário, entretanto, oscila em torno de um valor mais próximo do esperado de 161 kg/s.

Uma possível explicação para a queda de  $\dot{m}$  observada no modelo é a utilização de apenas um canal de escoamento para representar os geradores de vapor. O projeto SMART contempla oito geradores de vapor, resultando em uma área de fluxo total significativamente maior que a área de fluxo total dos canais de escoamento do núcleo. Resultados preliminares, obtidos por meio de uma discretização mais detalhada dos geradores de vapor, com seis canais de escoamento, levaram a uma estabilização de  $\dot{m}$  em ambos os sistemas, aproximando-se dos valores apresentados na literatura: 2090 kg/s e 161 kg/s para os sistemas primário e secundário, respectivamente [12]. Além disso, essa discretização dos geradores de vapor reduziu a queda de pressão a valores próximos a 0,4 MPa, também mais coerente com a literatura [12]. Entretanto, esses resultados não são apresentados neste trabalho, pois ainda se encontram em estágio preliminar de desenvolvimento, com margem para otimização e aperfeiçoamento.

Os resultados obtidos com o modelo inicial desenvolvido em RELAP5 MOD 3.3 para o projeto SMART se mostram promissores, entretanto um estudo mais aprofundado na configuração do modelo deve ser conduzido para adequar os resultados aos dados de referência.

#### 4. CONCLUSÃO

Desenvolvemos um modelo em RELAP5 MOD 3.3. para a análise térmica e hidráulica do projeto SMART, considerando dimensões e condições de contorno iniciais de temperatura, vazão mássica e pressão retiradas da literatura, bem como propriedades térmicas de materiais estruturais e combustíveis reunidas a partir de múltiplas fontes.

A distribuição de potência proposta para o núcleo do SMART apresenta bons resultados, com a temperatura do combustível permanecendo em uma margem de valores aceitáveis e esperados de acordo com a literatura. As temperaturas de combustível, *gap* e revestimento também indicam que a modelagem de tais componentes é adequada. A vaporização completa do inventário de água do ciclo secundário, acompanhada da queda de pressão esperada para o mesmo indica sucesso parcial na modelagem dos trocadores de calor.

No entanto, os valores observados para pressão, vazão mássica e variações de temperatura do fluido refrigerante ao longo do ciclo primário sugerem problemas nas bombas de circulação ou problemas pontuais na modelagem dos geradores de vapor. A instabilidade da vazão mássica e do aumento de temperatura do ciclo secundário podem sugerir o mesmo, sendo consequências de tais fatores.

O modelo apresentado, embora satisfatório em diversos aspectos, ainda apresenta uma grande margem para desenvolvimento e ajustes, de tal forma a adequá-lo aos valores apresentados na literatura e aos padrões de licenciamento.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <https://www.iaea.org/data-and-statistics> acessado em 03/07/2023.
- [2] E. Shobeiri *et al.*, Small Modular Reactor Deployment and Obstacles to Be Overcome, *Energies*, Vol. 16, n. 8, p. 3468 (2023).
- [3] C. L. Vinoya *et al.*, State-of-the-Art Review of Small Modular Reactors, *Energies*, Vol. 16, n.7, p. 3224 (2023).
- [4] J. Gou *et al.*, Thermal hydraulic analysis of a passive residual heat removal system for an integral pressurized water reactor, *Science and Technology of Nuclear Installations 2009*, Vol. 2009 (2009).
- [5] S. Y. Park *et al.*, Nuclear characteristics analysis report for system-integrated modular advanced reactor (1998).
- [6] H. C. Kim *et al.*, Safety analysis of SMART, Proc. of Int. Conf. on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants, GENES4/ANP2003, Kyoto, Japan (2003).
- [7] Young-Jong Chung *et al.*, Thermal hydraulic analysis of SMART for heat removal transients by a secondary system, *Nuclear engineering and design*, Vol. 225, n. 2-3, pp. 257–270 (2003).
- [8] H. Subki, Advances in small modular reactor technology developments (2020).
- [9] K. K. Kim *et al.*, SMART: The First Licensed Advanced Integral Reactor, *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 8, n.1, p. 94 (2014).
- [10] <http://smart-nuclear.com/project/commercial.php> acessado em 16/10/2024.
- [11] <https://www.kaeri.re.kr/rcus/board?menuId=MENU00718> acessado em 16/10/2024.
- [12] International Atomic Energy Agency, “Status Report 77 - System-Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)”, International Atomic Energy Agency (2011).
- [13] K.J. Geelhood *et al.*, “MatLib-1.0: Nuclear Material Properties Library”, PNNL-29728, Pacific Northwest National Laboratory, USA (2021).
- [14] H. Akhiani e J. A. Szpunar, Effect of surface roughness on the texture and oxidation behavior of Zircaloy-4 cladding tube, *Applied Surface Science*, Vol. 285, pp. 832–839 (2013).
- [15] N. V. Hoffer *et al.*, “Modeling a helical-coil steam generator in RELAP5-3D for the next generation nuclear plant”, INL/EXT-10-19621, Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, USA (2011).
- [16] Special Metals Corporation, “INCONEL Alloy 690”, Special Metals Corporation (2009).
- [17] Si-Hwan Kim *et al.*, Design verification program of SMART, *Technology*, Vol. 1, p. 2 (2003).
- [18] A. Petruzzi e F. D. Auria, Thermal-hydraulic system codes in nuclear reactor safety and qualification procedures, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2008, n.1, p. 460795 (2008).
- [19] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7644> acessado em 17/10/2024.
- [20] M. C. Collins *et al.*, A comparison of thermo-oxidation kinetic measurements of Zircaloy-4 in light and heavy water steam, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 573, p. 154111 (2023).
- [21] J. T. Prater e E. L. Courtright, Oxidation of Zircaloy-4 in steam at 1300 to 2400°C, Zirconium in the Nuclear Industry: Seventh International Symposium, ASTM International, 1987.
- [22] U. S. Nuclear Regulatory Commission, “RELAP5/MOD3.3 Beta Code Manual, Vol. IV – Models and Correlations”, Nuclear Safety Analysis Division, NUREG/CR-5535/Rev 1-Vol IV, (2001).