



Distribuição axial de temperatura no subcanal de um reator PWR a partir de duas abordagens: analítica e numérica

Souto, N. P. B.,* Oliveira, C. L., Vellozo, S. O., and Cabral, R. G.
Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio 80, Urca, Rio de Janeiro - RJ

No núcleo de um reator, o calor produzido por fissão nuclear no combustível é removido por um fluido refrigerante. Mesmo que a transferência de calor deva ser otimizada a fim de aumentar a eficiência do processo, a temperatura no núcleo não deve exceder determinados limites de segurança, o que torna análise térmica em elementos combustíveis alvo de diversas investigações, tanto em seu *design* quanto em sua operação. Diferentes formas de modelar esse tipo de problema são possíveis. Neste trabalho foi estudada uma abordagem analítica por meio do balanço de energia no subcanal e uma abordagem numérica pelo Método dos Volumes Finitos. Os resultados obtidos se mostraram compatíveis, o que indicou a validade do modelo numérico desenvolvido, garantindo uma maior confiabilidade a outras análises que podem ser feitas com base na simulação realizada.

Keywords: CFD, reator nuclear, termo hidráulica, transferência de calor.

I. INTRODUÇÃO

Como apontado pela Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês), a geração termonuclear contribui de diversas formas para a segurança energética, principalmente por colaborar com a estabilidade de redes elétricas. Tal papel é essencial num cenário de expansão de fontes renováveis, o que coloca a geração termonuclear com um papel notável na transição energética [1].

Numa usina termonuclear, o núcleo do reator é a fonte de energia térmica usada para gerar eletricidade. No reator PWR (*Pressurized Water Reactor*), que é o tipo mais comumente utilizado em todo o mundo, o calor gerado por fissão no combustível é transferido para o revestimento através do *gap*, sendo posteriormente removido do revestimento para o refrigerante. A análise da remoção de calor é crucial, não apenas para aumentar a eficiência do processo termodinâmico, mas também para garantir a segurança operacional do sistema [2, 3]. Sendo assim, é necessário trabalhar com modelos que descrevam os fenômenos físicos envolvidos.

Os métodos analíticos para a solução de problemas físicos apresentam a limitação de ser aplicáveis apenas a problemas de geometria e condições de contorno simples, necessitando de hipóteses simplificadoras que podem desviar o problema dos fenômenos físicos reais. Ainda assim, apresentam a vantagem de permitir uma rápida obtenção da solução desejada. Em outra vertente, os métodos numéricos possuem poucas restrições quanto à geometria e às condições de contorno, sendo capazes

de resolver problemas mais complexos. Por conta disso, é importante que o analista responsável pela solução em questão tome as devidas precauções para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos pelos modelos numéricos [4].

De acordo com Palazzi [5], o equilíbrio entre a complexidade da modelagem e o custo computacional se coloca como um grande desafio na representação precisa de sistemas físicos. Para lidar com esse desafio, foram desenvolvidos códigos unidimensionais conhecidos como *System Codes*, que resolvem modelos simplificados das equações de continuidade de massa, energia e momento, combinados com correlações experimentais para tratar outros fenômenos. Esses códigos, como COBRA, RELAP5, TRACE e CATHARE, têm sido amplamente utilizados em aplicações termo hidráulicas de reatores e apresentam uma boa precisão em muitas situações. No entanto, as limitações do modelo unidimensional impedem que eles possam prever o comportamento de certos tipos de escoamento.

Como alternativa, a tecnologia de fluidodinâmica computacional (CFD) apresenta um amplo potencial para prever o comportamento do escoamento de fluidos e da transferência de calor em processos de reatores nucleares. Com a capacidade de simular fenômenos físicos bi ou tridimensionais, a solução com CFD permite uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos termo hidráulicos presentes na operação de reatores [6]. Dentre os softwares de CFD mais utilizados para aplicações em termohidráulica, destacam-se o ANSYS (módulos CFX e Fluent), o ABAQUS, o COMSOL Multiphysics e o OpenFOAM.

A pesquisa em CFD na área nuclear tem experimen-

* normandosouto@gmail.com

tado um rápido crescimento nos últimos anos, tornando-se um tema de discussão frequente em conferências internacionais. O objetivo é trocar informações e progredir no conhecimento dessa área de estudo [7].

Nesse sentido, este trabalho tem o intuito de apresentar a comparação entre a solução analítica e a solução numérica da distribuição axial de temperatura no subcanal de um reator, incorporando o conjunto de bibliografias de aplicação CFD na análise termo hidráulica de reatores com a premissa de difundir esse método.

II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para demonstrar o paralelo entre as duas abordagens, propõe-se o cálculo do incremento na temperatura do fluido refrigerante no subcanal de um reator, em que se trabalha com a transferência de calor no escoamento a uma fase.

A. Geometria do subcanal

Os dados utilizados são do reator conceitual desenvolvido no trabalho de Neto [8]. Trata-se de um reator modular de pequeno porte do tipo PWR com varetas cilíndricas de 80 centímetros de comprimento. A célula combustível e suas dimensões são apresentadas na Figura 1.

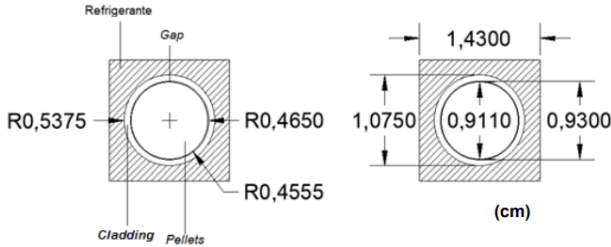


Figure 1. Célula combustível utilizada [8].

B. Características do escoamento

A água entra no subcanal na temperatura de 293,47 °C com velocidade de 80 $cm \cdot s^{-1}$. As propriedades da água leve (Tabela I) foram avaliadas na temperatura de 300 °C e na pressão de 15,5 MPa, valores convencionais de operação de reatores PWR. Trata-se de um escoamento turbulento com $Re = 89.657,48$ e vazão mássica $\dot{m} = 0,06608 kg \cdot s^{-1}$.

C. Fornecimento de calor

O núcleo do reator tem potência térmica de 30 MW com 2448 varetas. A partir desses dados, tem-se que a

Propriedade	Valor
Massa específica ($kg \cdot m^{-3}$)	726,513
Calor específico ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	5458
Condutividade térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0,56399
Viscosidade dinâmica ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	$8,583 \cdot 10^{-5}$

Table I. Propriedades da água leve para o modelo.

densidade linear de potência q' é de 153,19 $W \cdot cm^{-1}$. Esse valor é utilizado de forma direta na abordagem analítica. Para a abordagem numérica utiliza-se o fluxo de calor (q''), que se relaciona ao q' pela expressão abaixo:

$$q' = 2 \pi R_c q'' \quad (1)$$

Em que R_c é o raio externo do revestimento, apresentado na Figura 1. O valor de q'' é então de 45,36 $W \cdot cm^2$.

Considerando o perfil cossenoidal de potência e a altura extrapolada igual à altura da vareta, trabalha-se com as seguintes expressões:

$$q'(z) = q' \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (2)$$

$$q''(z) = q'' \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (3)$$

III. ABORDAGEM ANALÍTICA

Uma maneira de determinar a mudança da temperatura média do fluido ao longo do subcanal é fazendo uso de um balanço de energia que relaciona o ganho de energia do refrigerante no escoamento com a energia transferida pela vareta ao longo de uma determinada distância. A Equação 4 representa esse balanço.

$$\dot{m} c_p dT = q'(z) dz \quad (4)$$

Integra-se o balanço a partir da entrada ($T = T_{ent}$ e $z = -H/2$) até uma altura qualquer, conforme apresentado abaixo:

$$\dot{m} c_p \int_{T_{ent}}^{T_{fl}} dT = q' \int_{-H/2}^z \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) dz \quad (5)$$

Dessa forma, ao aplicar os limites de integração e rearranjar os termos é obtida a equação para a temperatura média do fluido (T_{fl}) numa seção de altura z , apresentada abaixo:

$$T_{fl}(z) = T_{ent} + \frac{q' H}{\pi \dot{m} c_p} \left[1 + \text{sen}\left(\frac{\pi z}{H}\right) \right] \quad (6)$$

Com isso, a variação de temperatura entre a entrada e a saída é dada por:

$$\Delta T = T_{sai} - T_{ent} = \frac{2q'H}{\pi \dot{m} c_p} \quad (7)$$

Dessa forma, tem-se a distribuição de temperatura média do fluido refrigerante ao longo do subcanal de interesse.

IV. ABORDAGEM NUMÉRICA

A solução numérica foi obtida com auxílio do *software* ANSYS Fluent, que utiliza o Método dos Volumes Finitos (MVF) para resolver as equações governantes do problema (momento, massa, energia, turbulência). O método é apresentado de forma concisa na sequência, com base nas obras de Patankar [9] e Maliska [4].

A. Método dos Volumes Finitos

Tendo em vista que as equações de interesse obedecem a um princípio geral de conservação, representado para uma variável ϕ generalizada na Equação 8, traça-se uma estratégia de discretização para sua solução.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{termo transitente}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\phi)}_{\text{termo advectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\phi\nabla\phi)}_{\text{termo difusivo}} + \underbrace{S\phi}_{\text{termo fonte}} \quad (8)$$

O MVF é uma técnica de discretização adequada para problemas de escoamento de fluidos, permitindo aproximar as equações diferenciais por meio de um conjunto de equações algébricas. Dessa forma, as variáveis envolvidas no problema podem ser obtidas em posições discretas tanto no espaço quanto no tempo. Nesse método, para a obtenção das equações discretizadas pode-se realizar o balanço nos volumes do domínio ou a integração das equações sobre eles. Uma vantagem do MVF está em como a equação aproximada é obtida, já que as leis de conservação de cada propriedade são aplicadas aos volumes de controle de forma que os balanços sejam satisfeitos independentemente do tamanho da malha, o que não acontece em outros métodos, como o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

No MVF, o domínio computacional é particionado em uma quantidade finita de volumes de controle contíguos, nos quais os balanços resultantes expressam a exata conservação das propriedades correspondentes a cada um dos volumes de controle, onde os valores das variáveis são calculados. A Figura 2 apresenta um exemplo de volume elementar de uma malha estruturada bidimensional. Nesse

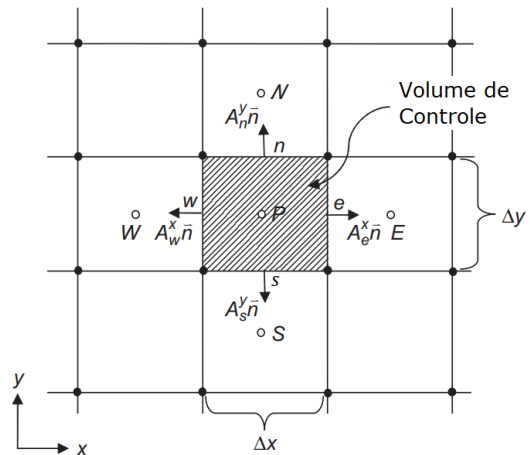


Figure 2. Exemplo esquemático de um volume de controle em uma malha estruturada. Adaptado de [10].

caso, o centróide do volume de controle é indicado pelo ponto P , envolvido pelos volumes de controle adjacentes, indicados pelos pontos E , W , N , S (*east*, *west*, *north* e *south*). A face do volume de controle entre os pontos P e E é representada pela área A_e^x . De forma análoga, as demais superfícies são representadas por A_w^x , A_n^y e A_s^y , sendo as áreas projetadas e resolvidas na integração e no balanço de acordo com a direção normal (\vec{n}) e o sistema de coordenadas cartesianas.

Com base no problema proposto neste trabalho, o primeiro passo para a discretização é a integração da Equação 8 ao longo do volume de controle (V_P) em regime permanente pela expressão:

$$\int_{V_P} \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\phi) dV = \int_{V_P} \nabla \cdot (\Gamma\phi\nabla\phi) dV + \int_{V_P} S\phi dV \quad (9)$$

Com a aplicação do Teorema da Divergência (Eq. 10), as integrais relativas aos termos advectivo e difusivo podem ser resolvidos por integrais de superfície, permitindo que se trabalhe com as faces dos volumes de controle.

$$\int_{V_P} \nabla \cdot \phi dV = \int_S \phi \cdot d\mathbf{A} \quad (10)$$

Aproximando a integral de superfície do termo advectivo em um somatório de fluxos da propriedade ϕ em cada face (f), tem-se:

$$\int_S (\rho\mathbf{u}\phi) \cdot d\mathbf{A} \approx \sum_f (\rho\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}\Delta A)_f \phi_f \quad (11)$$

Da mesma forma, para o termo difusivo obtém-se:

$$\int_S (\Gamma\phi\nabla\phi) \cdot d\mathbf{A} \approx \sum_f \Gamma_f \Delta A_f \mathbf{n} \cdot (\nabla\phi)_f \quad (12)$$

Tratando do termo fonte, é conveniente que se realize sua linearização (Eq. 13) antes da integração (Eq. 14), já que esse termo geralmente é função da variável ϕ .

$$S^\phi = S_A\phi + S_B \quad (13)$$

$$\int_{V_P} S^\phi dV = (S_A\phi + S_B)V_P \quad (14)$$

Reunindo esses termos, tem-se abaixo a equação em sua forma discretizada:

$$\sum_f (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \Delta A)_f \phi_f = \sum_f \Gamma_f^\phi \Delta A_f \mathbf{n} \cdot (\nabla \phi)_f + (S_A\phi + S_B)V_P \quad (15)$$

No MVF, os fluxos são calculados com base nos valores de ϕ nos centróides, e as equações incluem termos relacionados aos valores nas faces. Por esse motivo, é necessário propor uma função de interpolação para cada situação. É desejável que seja empregado o menor erro possível para essas funções, e que elas não envolvam muitos pontos para evitar que se trabalhe com uma matriz muito complexa. De acordo com Maliska [4], o aprendizado obtido com soluções do problema advecção/difusão mostra que a aproximação pelo *Upwind Difference Scheme* (UDS) para o termo advectivo e o *Central Difference Scheme* para o termo difusivo são fisicamente consistentes, por exemplo.

Com a aplicação desses esquemas, a equação algébrica é colocada de acordo com os valores de ϕ para cada volume de controle, assim como de seus coeficientes. Num formato genérico da Equação 15 com modelos de interpolação aplicados, é apresentada a Equação 16, que tem coeficientes indicados para o centróide de interesse P e de seus vizinhos nb (*neighbors*).

$$a_P\phi_P - \sum a_{nb}\phi_{NB} = b_P \quad (16)$$

Ao repetir o desenvolvimento apresentado para os n volumes de controle do domínio, obtém-se um sistema de equações lineares da forma:

$$[A][\phi] = [b] \quad (17)$$

Nele, $[A]$ corresponde à matriz de coeficientes do sistema, $[\phi]$ ao vetor de incógnitas e $[b]$ ao vetor de termos independentes. Os métodos de solução do sistema linear podem ser diretos ou iterativos, sendo os últimos preferíveis para aplicações em CFD.

B. Metodologia aplicada no ANSYS Fluent

As etapas do desenvolvimento do modelo se deram de acordo com as boas práticas indicadas na obra de Hassan [11] e nos manuais do ANSYS Fluent [12–14], sendo descritas a seguir.

1. Construção da geometria e da malha

Uma vez que o foco da análise está na variação axial de temperatura do refrigerante, foi construída apenas a geometria relativa ao fluido, sem os demais componentes da célula combustível. Pela simetria do problema, seria possível trabalhar com 1/8 do subcanal, mas priorizando a conformidade da malha percebeu-se que seria mais conveniente trabalhar com 1/4. Essa redução na geometria é indicada sempre que possível, já que visa reduzir os custos computacionais da simulação.

A malha foi gerada com a aplicação do método *MultiZone* e da ferramenta *Sizing*. É possível visualizar, na Figura 3, uma das malhas utilizadas para simular o problema.

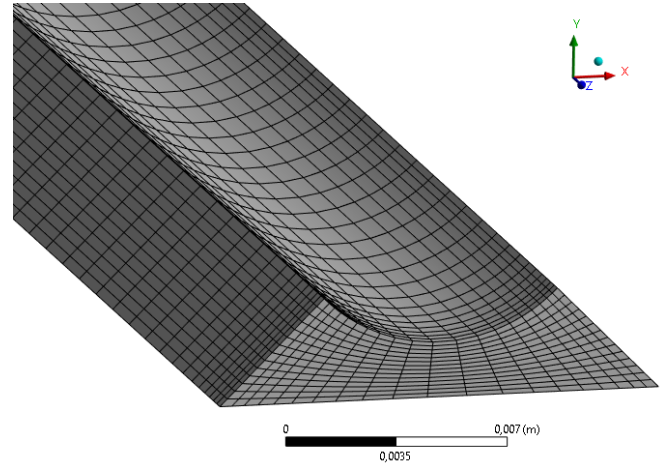


Figure 3. Vista em perspectiva da malha utilizada na simulação.

2. Modelos físicos e condições de contorno

De acordo com o problema proposto, o Fluent resolve as equações de conservação de massa, momento e energia, além de equações adicionais de transporte incluídas para modelar a turbulência. No caso, foi escolhido o Modelo $k - \epsilon$ Padrão, do tipo RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), por ser o mais utilizado em cálculos de termo hidráulica de reatores nucleares.

Na entrada do canal, a condição de entrada do fluido no subcanal é da magnitude e velocidade de $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na temperatura de $293,47 \text{ }^\circ\text{C}$. A expressão do fluxo de calor foi estabelecida de acordo com a Equação 3.

A condição de simetria foi utilizada nas laterais do subcanal, e na superfície de contato do fluido com o revestimento utilizou-se a condição de não-deslizamento.

3. Solver e critérios de convergência

A solução foi obtida com a versão *Double precision* do Fluent 2023 R1. A abordagem *pressure-based* foi escolhida por ser tradicionalmente aplicada a escoamentos incompressíveis. O esquema *Coupled* com fluxo do tipo *momentum based*, recomendado para escoamentos em regime permanente a uma fase, foi aplicado ao acoplamento pressão-velocidade.

Na discretização espacial, o método dos mínimos quadrados foi utilizado para calcular os gradientes. Esse é o método padrão devido à sua eficiência computacional. Para a pressão, a discretização de segunda ordem foi implementada. Nas equações de momento e energia, o esquema *Upwind* de segunda ordem foi aplicado, enquanto o *Upwind* de primeira ordem foi utilizado nas equações de turbulência.

Para os resíduos escalados a tolerância de 10^{-6} foi utilizada para a equação da energia, já para as demais equações foi aplicada a tolerância de 10^{-3} .

V. RESULTADOS

A. Malha e convergência

De forma a atestar a independência da solução do modelo com relação à malha, foram conduzidas quatro simulações com diferentes números de elementos. A temperatura média na saída foi a propriedade avaliada nesse teste, e os valores obtidos são apresentados na Tabela II.

	Elementos	Temperatura (°C)
Malha 1	23.160	315,019
Malha 2	70.200	315,050
Malha 3	109.760	315,056
Malha 4	156.800	315,057

Table II. Valores avaliados no estudo de independência de malha.

Conforme pode ser visualizado, a diferença de temperatura entre as soluções da Malha 3 e da Malha 4 foi de 0,001 °C. Levando em consideração o fato de a Malha 3 possuir 30% elementos a menos que a Malha 4, entende-se que a independência de malha foi atingida já na Malha 3. Por conta disso, as análises posteriores são realizadas com base nessa solução.

Os resíduos foram acompanhados, tendo atingido a todos os critérios de precisão estipulados na 185ª iteração, e apresentando um padrão de redução esperado. A con-

vergência do coeficiente de arrasto também foi avaliada, ficando praticamente constante a partir da 60ª iteração.

Com relação ao balanço de massa, teve-se que a diferença entre a vazão mássica de saída e a de entrada foi de $1,26 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Quanto ao balanço de energia, a diferença entre a taxa de transferência de calor na saída e a soma da taxa de transferência de calor na entrada com a energia fornecida pelo combustível foi de 0,45 W. Esses valores são considerados suficientemente baixos, sendo as diferenças atribuídas aos critérios de truncamento da solução numérica aplicada.

Tendo em vista a escolha pela Malha 3, na Tabela III estão dispostos seus parâmetros de qualidade, que apresentaram valores apropriados para simulações CFD.

	Mínimo	Máximo	Médio
Skewness	$6,5329 \cdot 10^{-2}$	0,5	0,2947
Aspect Ratio	1,2574	16,575	10,461
Orthogonal Quality	0,71526	0,99523	0,88632

Table III. Parâmetros de qualidade da Malha 3.

B. Análise térmica

Os valores analíticos são apresentados junto aos valores médios de temperatura obtidos no Fluent em diferentes seções do subcanal na Figura 4.

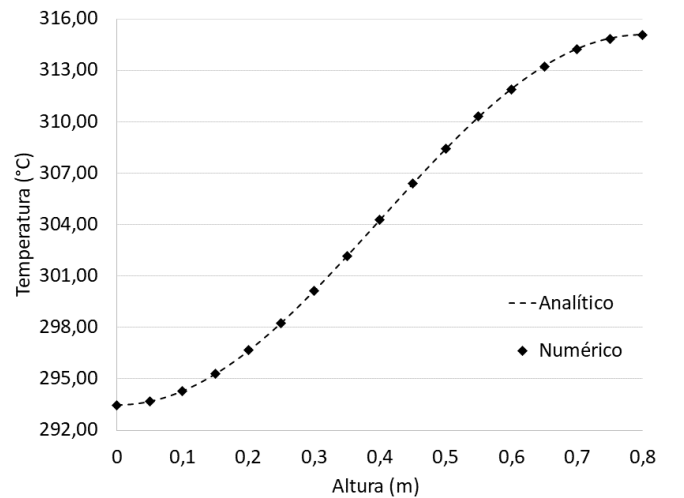


Figure 4. Dados analíticos e numéricos de temperatura ao longo do canal.

É possível constatar uma grande proximidade entre os valores obtidos. A maior diferença aconteceu na altura de 65 centímetro, sendo de 0,017% (0,05 °C). A variação de temperatura entre a entrada e a saída foi de 21,63 °C pela solução analítica (Eq. 7), enquanto pelo Fluent a variação foi de 21,59 °C.

O perfil da distribuição obtido é semelhante ao encontrado em referências teóricas da área de termo hidráulica de reatores, assim como o valor da variação está dentro da faixa usual de aumento de temperatura da entrada até a saída de subcanais [2, 3, 15].

VI. CONCLUSÕES

Este artigo permitiu a comparação entre diferentes soluções para o problema da variação de temperatura ao longo do subcanal de um reator PWR, que trabalha com fluxo de calor não uniforme.

Pela avaliação de qualidade da malha e dos critérios de convergência, observou-se a obtenção de uma solução estável. Com isso, foi possível utilizar os dados do Fluent para a comparação com os valores analíticos.

A congruência entre os dois resultados indica a validade do modelo desenvolvido, já que serve como uma etapa de verificação recomendada para simulações de CFD. Sendo assim, a realização de outras análises com os dados do modelo torna-se mais bem fundamentada.

-
- [1] IEA, *Nuclear Power in a Clean Energy System* (Paris, 2019).
- [2] M. El-Wakil, *Nuclear Power Engineering*, McGraw-Hill series in nuclear engineering (McGraw-Hill, 1962).
- [3] J. Duderstadt and L. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis* (Wiley, 1976).
- [4] C. Maliska, *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional* (Livros Técnicos e Científicos, 2004).
- [5] A. Palazzi, *Nuclear thermal hydraulic analysis using coupled CFD and system codes*, Ph.D. thesis (2018).
- [6] M. Wang, Y. Wang, X. Tian, S. Qiu, and G. Su, *Annals of Nuclear Energy* **150**, 107836 (2021).
- [7] X. Tian, M. Wang, V. Petrov, N. Erkan, and Y. Liao, *Frontiers in Energy Research* **9** (2021), 10.3389/fenrg.2021.630305.
- [8] A. T. Neto, *Desenvolvimento do projeto conceitual de um reator PWR modular de pequeno porte*, Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia (2020).
- [9] S. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Electro Skills Series (Hemisphere Publishing Corporation).
- [10] J. Tu, G. Yeoh, and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* (Elsevier Science, 2018).
- [11] Y. Hassan, in *Thermal-Hydraulics of Water Cooled Nuclear Reactors*, edited by F. D'Auria (Woodhead Publishing, 2017) pp. 729–829.
- [12] Ansys Inc., *Ansys Fluent Theory Guide* (Pensilvânia, EUA, 2021).
- [13] Ansys Inc., *Ansys Fluent User's Guide* (Pensilvânia, EUA, 2021).
- [14] Ansys Inc., *Ansys Meshing User's Guide* (Pensilvânia, EUA, 2021).
- [15] N. Todreas and M. Kazimi, *Nuclear Systems: Thermal Hydraulic Fundamentals, Second Edition*, v. 1 (Taylor & Francis, 2012).