UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

CRISTIAN GABRIEL DE OLIVEIRA

ANÁLISE TERMO-HIDRÁULICA DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL DE MAIOR POTÊNCIA DO REATOR SMART USANDO OS CÓDIGOS STHIRP E OPENFOAM

Belo Horizonte
2025

Cristian Gabriel de Oliveira

ANÁLISE TERMO-HIDRÁULICA DO ELEMENTO COMBUSTÍVEL DE MAIOR POTÊNCIA DO REATOR SMART USANDO OS CÓDIGOS STHIRP E OPENFOAM

Dissertação apresentada ao programa de pós graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como pré-requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares

Área de concentração: Engenharia Nuclear e da Energia

Orientador: Prof. Clarysson Alberto Mello da Silva
Coorientador: Prof. Dario Martin Godino

Belo Horizonte
2025

Oliveira, Cristian Gabriel de.
O48a Análise termo-hidráulica do elemento combustível de maior potência do reator SMART usando os códigos STHIRP e OpenFOAM [recurso eletrônico] / Cristian Gabriel de Oliveira. - 2025.
1 recurso online (88 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Clarysson Alberto Mello da Silva
Coorientador: Dario Martin Godino.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 86-88.

1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Reatores nucleares - Teses. 3. Combustíveis nucleares - Teses. 4. Dinâmica dos fluídos computacional - Teses. I. Silva, Clarysson Alberto Mello da. II. Godino, Dario Martin. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.039(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

PCTN

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise Termo-Hidráulica do Elemento Combustível de maior Potência do Reator SMART usando os códigos STHIRP e OpenFOAM

CRISTIAN GABRIEL DE OLIVEIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração ENGENHARIA NUCLEAR E DA ENERGIA.

Aprovada em 14 de abril de 2025, pela banca constituída pelos membros:

gov.br Documento assinado digitalmente
CLARYSSON ALBERTO MELLO DA SILVA
Data: 17/04/2025 14:38:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Clarysson Alberto Mello da Silva - Orientador
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Prof. Dario Martin Godino - Coorientador
Universidad Tecnológica Nacional / CIMEC

gov.br Documento assinado digitalmente
ANTONELLA LOMBARDI COSTA
Data: 17/04/2025 09:21:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Antonella Lombardi Costa
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

gov.br Documento assinado digitalmente
MARIA AUXILIADORA FORTINI VELOSO
Data: 17/04/2025 13:06:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Maria Auxiliadora Fortini Veloso
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

gov.br Documento assinado digitalmente
JOAO MANOEL LOSADA MOREIRA
Data: 16/04/2025 18:59:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. João Manoel Losada Moreira
Universidade Federal do ABC

Belo Horizonte, 14 de abril de 2025.

Dedico este trabalho
aos meus pais Paulo e Helena
à minha irmã Karina
ao meu tio José Luiz
às minhas sobrinhas Julie e Laila

e aos meus amigos

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelas possibilidades que recebi.

Agradeço aos meus pais, pelo apoio durante a realização do presente trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Clarysson, pelos pelas orientações e conselhos.

Agradeço ao meu coorientador, Dario, por todo o apoio na realização deste trabalho.

Agradeço a Profa. Maria Auxiliadora pelas orientações com STHIRP.

Agradeço ao Dr. Marcelo Veloso pelo desenvolvimento do programa STHIRP, usado para a realização do presente trabalho.

Agradeço a Profa. Antonella pela colaboração na realização do presente trabalho.

Agradeço ao Prof. Carlos, pelo incentivo durante a realização dos trabalhos.

Agradeço aos amigos do departamento Isaac, Gabriel, Ivan, Karytha, Natalia, Jefferson e Thalles pelo companheirismo.

Agradeço à FAPEMIG pela bolsa concedida e CNEN, CNPq e CAPES, pelo apoio direto ao PCTN, ao DEN e ao presente trabalho.

"Não sabendo que era impossível, foi lá e fez."

Jean Cocteau

Resumo

As projeções de demanda elétrica mundial a médio e longo prazo demonstram um crescimento acentuado que contempla o território brasileiro. No país, existem diversas regiões desconectadas do Sistema Interligado Nacional (SIN), que necessitam de sistemas de geração elétrica própria para suprir a demanda local. Nesse sentido, os reatores modulares de pequeno porte (SMRs) são uma possibilidade atrativa para o suprimento da demanda nessas regiões. Estes podem ser pré-fabricados e posteriormente transportados para regiões de interesse, a fim de abastecer regiões isoladas. Dentre os reatores modulares, o SMART possui um *design* baseado no PWR, reator mais utilizado atualmente no mundo. Este fato o torna uma solução atrativa para o Brasil, uma vez que o país já possui experiência industrial na produção de elementos combustíveis e na operação deste tipo de sistema. O SMART possui uma potência nominal de 330 MW_{Th}, sendo capaz de suprir a demanda elétrica de uma cidade de aproximadamente 100000 habitantes. O presente trabalho realiza uma análise termo-hidráulica do elemento de maior potência do reator SMART, em estado estacionário, no início do ciclo de queima. Para tanto, foram usados dois programas distintos: STHIRP e OpenFOAM, a fim de obter os principais parâmetros térmicos da região mais quente do reator. Os resultados para o elemento foram obtidos através da construção de dois modelos térmicos independentes, um para cada programa. Durante os trabalhos, os dois programas foram usados de maneira conjunta, de forma que os resultados em comum entre os dois programas fossem comparados e os particulares de ambos apresentados de maneira complementar. Os principais resultados obtidos pelos programas incluem as distribuições de temperatura, pressão e velocidade de escoamento do refrigerante, tal como o perfil de temperatura nas varetas. No presente trabalho as variações totais de pressão e temperatura do elemento mais quente calculadas pelos dois programas são comparadas entre si e particularmente, para o caso da temperatura, com o resultado previsto pela teoria. Os parâmetros globais obtidos pelos dois programas mostraram boa concordância entre si e com os valores previstos teoricamente. Para demonstrar a capacidade dos modelos térmicos desenvolvidos no presente trabalho, particularmente usando o programa STHIRP, o perfil de DNBR do reator foi calculado para potências de 100% e 115% da potência nominal do reator.

Palavras-chave: reator nuclear; SMR; SMART; termo-hidráulica; CFD; STHIRP; OpenFOAM.

Abstract

Projections for global electricity demand in the medium and long term show a sharp increase in Brazil. There are several regions in the country that are disconnected from the National Interconnected System (SIN), which require their own electricity generation systems to meet local demand. In this sense, Small Modular Reactors (SMRs) are an attractive option for meeting the demand in these regions. These reactors can be fabricated and subsequently transported to regions of interest in order to supply isolated regions. Among the modular reactors, the SMART modular reactor has a design based on the PWR, the most widely used reactor in the world today. This fact makes it an attractive solution for Brazil, since the country already has industrial experience in the production of fuel elements and in the operation of this type of reactor. The SMART has a nominal power of 330 MW_{Th}, being capable of meeting the electricity demand of a city with approximately 100,000 inhabitants. This work performs a thermal-hydraulic analysis of the highest power element of the SMART reactor in steady state at the beginning of the burning cycle. For this purpose, two programs were used: STHIRP and OpenFOAM, in order to obtain the main thermal parameters in the hottest region of the reactor. The results for the element were obtained through the construction of two independent thermal models, one for each program. During the present work, the two programs were used in a complementary manner, so that the results in common between the two programs were compared and the particular results of both presented in a complementary manner. The main results obtained by the programs include the distributions of temperature, pressure and coolant flow velocity, as well as the temperature profile in the rods. In the present work, the total variations of pressure and temperature of the hottest element calculated by the two programs are compared with each other and, particularly in the case of temperature, are compared with the result predicted by theory. The overall results obtained by the two programs showed good agreement with each other and with the values predicted theoretically, when an energy balance was applied to the simulated system. To demonstrate the capability of the thermal models developed in the present work for predictions, particularly using the STHIRP program, the DNBR profile of the reactor was calculated for 100% and 115% of the nominal reactor power.

Keywords: nuclear reactor; SMR; SMART; thermal-hydraulic; CFD; STHIRP; OpenFOAM.

Lista de Acrônimos e Abreviações

BOC: *Begin of Cycle*

CDTN: Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear

CFD: *Computational Fluid Dynamic*

CHF: *Critical Heat Flux*

CHT: *Conjugated Heat Flux*

CNAA: Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

DNBR: *Departure from Nucleated Boiling*

ENDF: *Evaluated Nuclear Data File*

FRP: Fator Radial de Potência

FVM: Método de Volumes Finitos

HTGR: *High Temperature Gas Reactor*

IAEA: *International Atomic Energy Agency*

KAERI: *Korean Atomic Energy Research Institute*

LBLOCA: *Large Break Loss of Coolant Accident*

LFR: *Lead-cooled Fast Reactor*

LWR: *Light Water Reactor*

MDF: Método das Diferenças Finitas

MSR: *Molten Salt Reactor*

OpenFOAM: *Open-source Field Operation and Manipulation*

PCH: Pequena Central Hidroelétrica

PWR: *Pressurized Water Reactor*

SFR: *Sodium-cooled Fast Reactor*

SIN: Sistema Interligado Nacional

SMART: *System-integrated Modular Advanced Reactor*

SMR: *Small Modular Reactor*

SOR: Sobre-relaxações Sucessivas

STHIRP: Simulação Termo-hidráulica em Reatores de Pesquisa

Lista de Símbolos

Δp: Queda de Pressão

ΔT: Variação de Temperatura

ω: Frequência de Dissipação Turbulenta

κ: Condutividade Térmica

μ_t: Viscosidade

ρ: Densidade

c_p: Calor Específico

q': Fator Linear de Potência

T: Temperatura

UO_2: Dióxido de Urânio

UN: Mononitreto de Urânio

U_3Si_2: Siliceto de Urânio

ρ: Densidade

u: Velocidade de Escoamento

q: Calor

T: Temperatura

p: Pressão

X: Variável Genérica

H: Coeficiente de Transferência de Calor

Q_c: Fluxo de Calor Crítico

ϕ: Multiplicador de Atrito Bifásico

D_w: Diâmetro Hidráulico Molhado

x: Título de Vapor

Lista de Figuras

1.1 Representação dos resultados provenientes de STHIRP e OpenFOAM. Fonte: Autor. 21

2.1 Diagrama do vaso de pressão do reator nuclear modular SMART [13] (adaptado). 23
2.2 Diagrama do núcleo do reator SMART [8] (adaptado). 23
2.3 Representação esquemática dos quatro tipos de elementos combustíveis do reator SMART [8] (adaptado). 25

4.1 Diagrama ilustrativo de um subcanal [17] (adaptado). 32
4.2 Numeração imposta para os subcanais e varetas no programa STHIRP. Fonte: Autor. 38
4.3 Distribuição de potência (pino a pino) calculada no MCNP-6. 39
4.4 Região de simetria usada nas simulações do elemento combustível do reator SMART. 40
4.5 Diagrama da nodalização radial da região do combustível e do revestimento para a simulação usando STHIRP. Fonte: Autor. 44
4.6 Diagrama da metodologia do método de volumes finitos [19] (adaptado). . . 49
4.7 Exemplo de malha usando volumes finitos cúbicos [46]. 50
4.8 Malha usada na primeira simulação usando o BuoyantSimpleFoam. Fonte: Autor. 51
4.9 Malha usando três camadas de inflação. Fonte: Autor. 56
4.10 Malha com cinco camadas de inflação. Fonte: Autor. 56
4.11 Malha com nove camadas de inflação. Fonte: Autor. 57
4.12 Malha usada nas simulação considerando as varetas e o refrigerante: (a) visão radial da malha e (b) corte 3D na malha para melhor visualização. Fonte: Autor. 60

5.1 Comparação entre os perfis de temperatura dos canais 35 e 11 em função da altura dos canais. Fonte: Autor. 68
5.2 Comparação entre as temperaturas calculadas para as varetas 3 e 36 no centro do elemento combustível (1 m de altura). Fonte: Autor. 69
5.3 Comparação do perfil de MDNB para o modelo térmico usando potência nominal de 100 % e 115 %. Fonte: Autor. 70
5.4 Distribuição de temperatura calculada na região do refrigerante do reator. Fonte: Autor. 71
5.5 Distribuição radial de temperatura no centro do elemento combustível mais potente do reator SMART. Fonte: Autor. 72
5.6 Temperatura calculada no centro do canal 11 em função da altura do elemento. Fonte: Autor. 73
5.7 Distribuição de velocidades obtida da simulação da região do refrigerante do elemento mais potente do reator. Fonte: Autor. 74
5.8 Distribuição radial de velocidade, em módulo, no centro do elemento combustível. Fonte: Autor. 75
5.9 Distribuição de velocidade no centro do subcanal 11 em função da altura. Fonte: Autor. 76
5.10 Queda de pressão ao longo do elemento mais potente do reator: (a) Queda de pressão global no elemento em função da altura e (b) queda de pressão ao longo do subcanal 11. Fonte: Autor. 77
5.11 Distribuição radial de temperatura nas varetas do reator no centro do elemento combustível. Fonte: Autor. 78
5.12 Distribuição axial de temperatura nas varetas ao longo do elemento. Fonte: Autor. 79
5.13 Distribuição de temperatura no refrigerante no calculo CHT. Fonte: Autor. 79
5.14 Distribuição radial de temperatura calculada no centro elemento combustível pelo solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor. 80
5.15 Distribuição de velocidade, em módulo, calculada pelo solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor. 80
5.16 Distribuição radial de velocidades calculada no centro do elemento combustível pelo solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor. 81
5.17 Perfil de temperatura no canal 35 pelo solucionador CHTMultiRegion. Fonte: Autor. 82

5.18 Perfil de pressão no canal 35 calculado pelo CHTMultiRegion. Fonte: Autor. 82

Lista de Tabelas

2.1 Principais características do núcleo do reator SMART [8]. 24
2.2 Propriedades geométricas e de materiais das varetas combustíveis do reator [8]. 25

4.1 Geometria dos subcanais para a modelagem do elemento combustível mais quente do reator SMART [8]. 37
4.2 Geometria das varetas do reator nuclear SMART [8]. 38
4.3 Distribuição radial de potência implementada no programa STHIRP oriunda do cálculo feito no programa MCNP-6. Fonte: Autor. 41
4.4 Coeficientes do polinômio para o cálculo das propriedades termo-físicas do UO_2 em função da temperatura [40] [17]. 42
4.5 Coeficientes do polinômio para o cálculo das propriedades termo-físicas do Zircaloy-4 em função da temperatura [40] [17]. 42
4.6 Propriedades físicas da água a pressão de operação do SMART (15 MPa) [37]. 43
4.7 Distribuição axial de potência normalizada usada nas simulações [17] [45]. . 48
4.8 Condições de entrada no núcleo do reator aplicadas ao modelo na simulação usando STHIRP [8]. 48
4.9 Parâmetros usados na malha para a simulação da região de fluido do elemento de maior potência do reator SMART. Fonte: Autor. 52
4.10 Amplitude A calculada para a função de potência aplicada a cada vareta no modelo térmico do fluido. Fonte: Autor. 54
4.11 Condições de contorno aplicadas ao refrigerante do reator [8]. 55
4.12 Principais parâmetros da malha usada nas simulações usando o solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor. 60

5.1 Comparação de resultados entre os programas STHIRP e OpenFOAM. Fonte: Autor. 62

5.2 Comparação dos aumentos totais de temperatura calculados pelos dois programas com o valor esperado teoricamente. Fonte: Autor. 63
5.3 Sumário das propriedades termo-físicas na saída dos subcanais calculadas pelo programa STHIRP. Fonte: Autor. 65
5.4 Propriedades termo-físicas calculadas pelo programa STHIRP para o subcanal 35. Fonte: Autor. 67

Conteúdo

1 Introdução **18**

1.1 Objetivos 20

1.2 Estrutura da dissertação 21

2 Características Gerais do Reator SMART **22**

3 Revisão Bibliográfica **26**

3.1 Principais trabalhos desenvolvidos usando o programa STHIRP 26

3.2 Principais trabalhos usando o programa OpenFOAM 27

3.3 Trabalhos realizados sobre o SMART 29

4 Metodologia **32**

4.1 STHIRP 32

4.1.1 Construção do modelo térmico usando STHIRP 36

4.1.2 Geometria dos subcanais 37

4.1.3 Geometria das varetas 37

4.1.4 Propriedades termo-físicas dos materiais 41

4.1.5 Nodalização das regiões das varetas 44

4.1.6 Descrição das correlações usadas no programa 45

4.1.7 Descrição da distribuição axial de potência nas varetas 47

4.1.8 Condições de contorno na entrada do núcleo 47

4.2 OpenFOAM 49

4.2.1 Simulação da região do fluido do elemento combustível de maior potência usando o solucionador BuoyantSimpleFoam 51

4.2.2 Condições de contorno aplicadas à superfície das varetas na simulação do fluido usando BuoyantSimpleFoam 52

4.2.3 Análise de malha 56

4.2.4 Modelagem do elemento de maior potência do reator SMART usando o solucionador CHTMultiRegion 58

5 Resultados **62**

5.1 Verificação dos resultados globais obtidos pelos programas STHIRP e OpenFOAM 62

5.2 Resultados obtidos pelo programa STHIRP 63

5.3 Resultados obtidos pelo programa OpenFOAM 70

5.3.1 Resultados para a simulação somente da região do fluido 70

5.3.2 Simulação completa do elemento combustível usando o solucionador CHTMultiRegion 78

6 Conclusão **84**

Referências **86**

Capítulo 1

Introdução

Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), são estimados crescimentos de 30% na demanda global de energia e de 100% na capacidade instalada no mundo até 2050 [1] [2]. Para suprimento dessa demanda prevista, diversas tecnologias têm sido propostas em escala mundial. Dentre as possibilidades para a composição da matriz elétrica se encontram os Reatores Modulares de Pequeno Porte, *Small Modular Reactors* (SMRs), amplamente pesquisados atualmente para suprir a demanda elétrica em regiões isoladas. A introdução deste tipo de reator na matriz elétrica mundial possui diversos benefícios, muitos dos quais estão inerentemente ligados à natureza de seu *design* (pequeno e modular) [3]. Algumas das vantagens dos SMRs incluem:

- Menor custo inicial e capacidade de implementação gradual.
- Segurança passiva.
- Flexibilidade de localização.
- Redução do impacto ambiental.
- Menor demanda por recursos e pessoal.
- Menor demanda de combustível.
- Possibilidade de utilização em aplicações não elétricas.

Nesse sentido, unidades pré-fabricadas de SMRs podem ser produzidas, transportadas e instaladas no local, tornando-as mais acessíveis para construir em relação a reatores de grande porte, que geralmente exigem um alto custo inicial, longos prazos de construção e infraestrutura complexa [3]. Atualmente existe uma grande variedade de conceitos de SMR, dentre os quais: Refrigerados a água leve (LWR), refrigerados a gás de alta temperatura

(HTGR), refrigerados a sal fundido (MSR) e reatores rápidos refrigerados a chumbo/sódio (LFR/SFR) [4]. De acordo com a IAEA, alguns modelos SMR, particularmente aqueles que usam refrigerantes diferentes da água, podem gerar novas formas de rejeitos radioativos, e, portanto, os países que planejam implantar SMRs precisam planejar o gerenciamento destes novos tipos [5].

A crescente demanda elétrica se estende para o Brasil e impulsiona pesquisas para o desenvolvimento de dispositivos, como painéis solares, geradores eólicos, Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH) e reatores nucleares, os quais podem ser capazes de fornecer a oferta necessária à respectiva demanda [6]. No país, existem diversas regiões desconectadas do Sistema Interligado Nacional (SIN), em especial na região norte, onde o suprimento de energia elétrica é feito de maneira específica, necessitando de usinas próprias para a geração da energia demandada [7]. Nesse contexto, os SMRs surgem como uma solução viável, oferecendo uma fonte de energia segura, eficiente e com menor impacto ambiental, além de permitir uma instalação mais rápida e com menores custos de infraestrutura em áreas remotas. A implementação de SMRs em regiões desconectadas do SIN pode trazer vantagens socioeconômicas que incluem:

- Geração de empregos locais.
- Desenvolvimento econômico local.
- Independência energética.
- Atração de novos investimentos.
- Melhora na qualidade de vida.
- Redução de desigualdades regionais.
- Integração e conectividade regional.

Portanto, SMRs podem ser uma solução não só para atender à demanda de energia de regiões desconectadas, mas também promover um desenvolvimento regional sustentável e inclusivo.

Dentre os diversos conceitos de SMRs encontra-se o Reator Modular Avançado de Sistema Integrado (*System-integrated Modular Advanced Reactor* - SMART), cujo projeto foi proposto pelo Instituto Coreano de Pesquisa em Energia Atômica, *Korean Atomic Energy Research Institute* (KAERI) [8]. O reator foi projetado em uma configuração baseada em um reator a água leve pressurizada (PWR), tipo mais usado no mundo atualmente [9].

Devido ao sucesso dos reatores PWR, o SMART se mostra uma opção promissora para suprir a demanda elétrica em regiões isoladas do SIN.

No ano de 2012 o SMART recebeu sua primeira aprovação de projeto padrão pelo orgão regulador coreano para uma potência elétrica de $100MW$ e térmica nominal de $330MW_{Th}$ [10]. Naturalmente, com o mesmo conceito do PWR, o SMART usa o dióxido de urânio (UO_2) como combustível e água leve (H_2O) como refrigerante, moderador e refletor. O revestimento das varetas é feito de ZIRCALOY-4, mesmo material usado em grandes centrais nucleares como a usina de Angra 2, situada na Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto (CNAAA), localizada em Angra dos Reis, Rio de Janeiro (Brasil) [11]. Considerando a experiência brasileira na operação de reatores PWR, na fabricação e no gerenciamento do combustível, bem como na fabricação de peças e suprimentos para este tipo de reator, os SMRs refrigerados a água leve pressurizada tornam-se uma opção atrativa para o país, pois aproveitam o conhecimento e a infraestrutura já estabelecidos, oferecendo uma solução segura, eficiente e adaptada às necessidades energéticas nacionais.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de calcular parâmetros termo-hidráulicos de segurança para o elemento de maior potência do SMART, entre os quais: a temperatura das varetas e do refrigerante, a pressão do refrigerante e a razão de distanciamento em relação a ebulição nucleada (DNBR). Para tanto, o elemento foi modelado usando dois programas: o programa para Simulação Termo-hidráulica de Reatores de Pesquisa (STHIRP) e o programa de código aberto para operação e manipulação de Campos (*Open-source Field Operation and Manipulation*-OpenFOAM). O uso das duas ferramentas é justificável pela possibilidade de verificação dos resultados produzidos em comum por ambos, além da possibilidade da obtenção de resultados particulares de cada código. A Figura 1.1 esquematiza alguns resultados produzidos pelos dois programas, evidenciando que são usados como ferramentas complementares no presente trabalho. Na Figura, de maneira ilustrativa, os resultados em comum são mostrados na interseção dos dois conjuntos e os resultados particulares, mostrados na região fora da interseção.

Para o estudo, o elemento de maior potência é o de interesse por se tratar da parte crítica (região factível para algum possível problema termo-hidráulico) do reator, exigindo um estudo mais detalhado. Os modelos térmicos aqui desenvolvidos abrem uma gama de possibilidades para testar o impacto termo-hidráulico da alteração de características típicas de operação do reator em regime estacionário. Desta forma, os modelos construídos podem

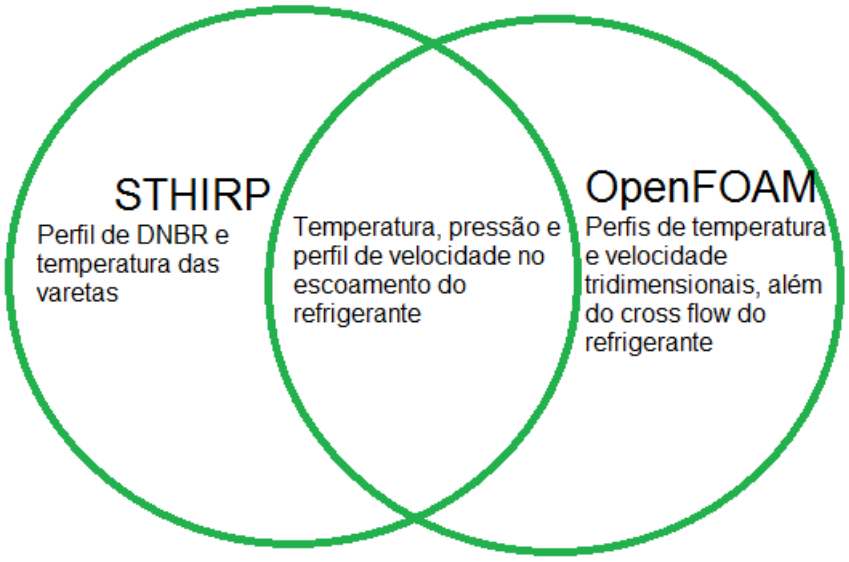

Figura 1.1: Representação dos resultados provenientes de STHIRP e OpenFOAM. Fonte: Autor.

testar, por exemplo, o que acontece com o DNBR mínimo do elemento quando a potência do reator é aumentada por um fator de interesse.

1.2 Estrutura da dissertação

A apresentação da dissertação está organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 2: São apresentadas as principais características do reatores SMART, de acordo com o design proposto pela KAERI.
- Capítulo 3: Apresenta uma revisão bibliográfica sobre alguns dos principais trabalhos desenvolvidos com os programas STHIRP e OpenFOAM, assim como sobre o reator SMART.
- Capítulo 4: Detalha o metodologia geral de funcionamento dos dois programas, tal como o passo a passo para a construção dos modelos térmicos em ambos os programas.
- Capítulo 5: Apresenta os principais resultados obtidos pelas simulações usando os dois programas.
- Capítulo 6: Contém uma discussão sobre os principais resultados obtidos e sobre perspectivas futuras.

Capítulo 2

Características Gerais do Reator SMART

O reator foi projetado de maneira que todo o circuito primário de refrigeração fosse integrado no interior do vaso de pressão e dessa forma ser capaz de operar em segurança sem a necessidade de um sistema de injeção de boro [8]. Isso ocorre devido ao baixo risco de grande perda de refrigeração por vazamento, *Large Break Loss of Coolant Accident* (LBLOCA) no circuito primário, garantida pela integração deste no interior do vaso de pressão, que elimina a necessidade da utilização de tubos no primário [8]. O SMART possui em sua configuração 12 geradores de vapor, 4 bombas de refrigeração e um pressurizador alocados na parte superior do vaso de pressão [12]. Também na parte superior do vaso de pressão estão posicionados o mecanismo para acionamento das varetas de controle e o bocal de instrumentação. Nesse reator o núcleo fica posicionado na parte inferior do vaso de pressão, onde aquece o refrigerante posteriormente bombeado na direção dos geradores de vapor [12]. A Figura 2.1 mostra o digrama do vaso de pressão do reator.

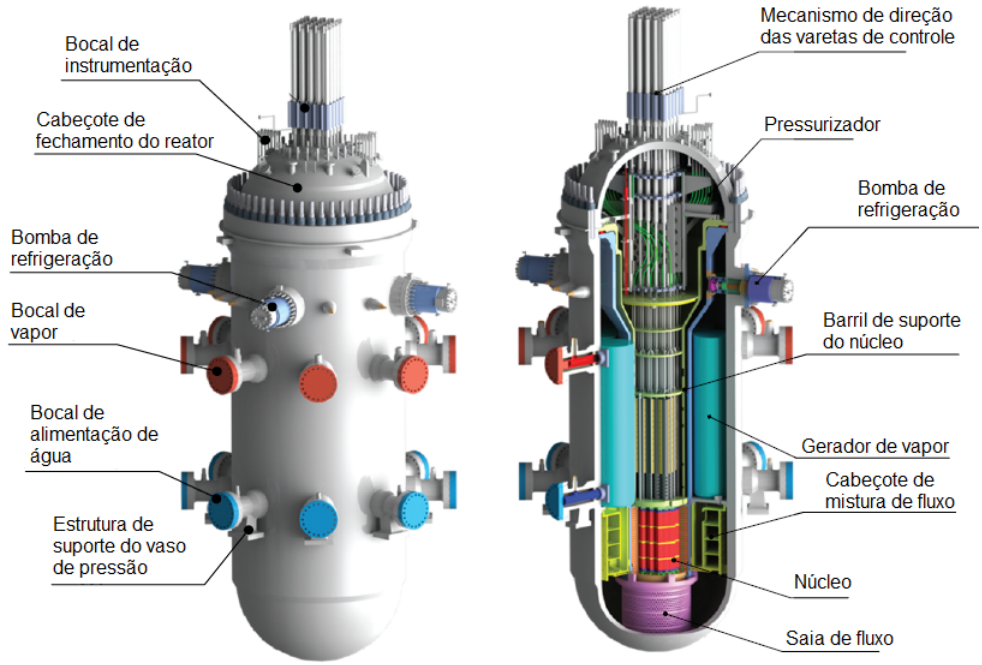

Figura 2.1: Diagrama do vaso de pressão do reator nuclear modular SMART [13] (adaptado).

O núcleo do reator é composto por 57 elementos combustíveis de quatro tipos: A, B, C e D [8]. A configuração dos elementos combustíveis do reator no arranjo do núcleo também está disponibilizada no relatório da KAERI [8]. A Figura 2.2 apresenta o núcleo do reator SMART, discriminando a posição de cada elemento combustível.

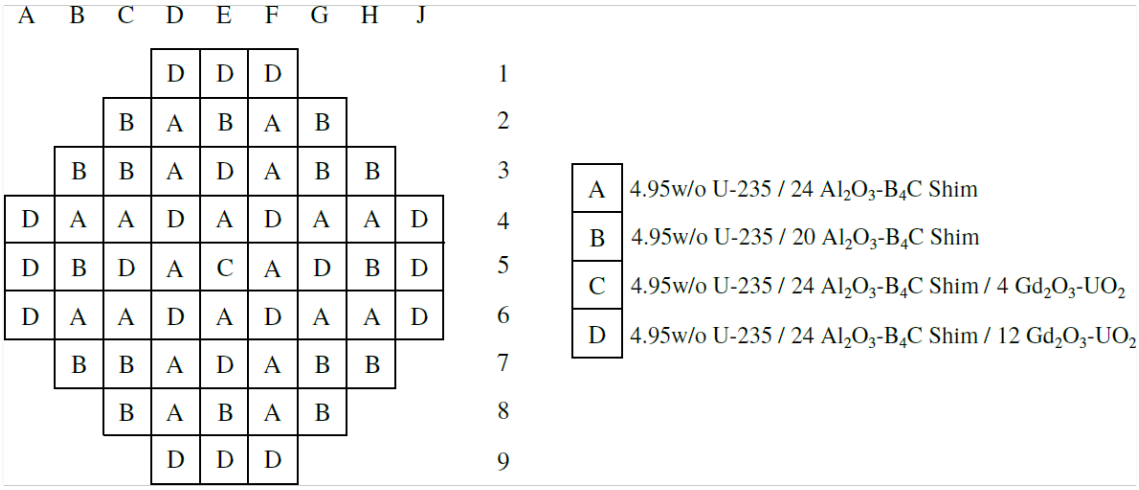

Figura 2.2: Diagrama do núcleo do reator SMART [8] (adaptado).

O *design* do núcleo do reator é baseado em cinco princípios fundamentais [8]:

- No máximo de potência ($330MW_{Th}$), o fator de pico de potência não pode exceder o limite de 3.6.
- O coeficiente de temperatura no moderador deve ser negativo.

- O reator é capaz de ser desligado sem a presença do elemento de controle de maior reatividade.
- Os efeitos de todas as situações de acidentes devem ser aceitáveis e compatíveis com as análises de segurança.
- A configuração do núcleo deve ser capaz de suprir o ciclo de queima do combustível nuclear usando UO_2, com ^{235}U enriquecido a 4,95 w/o.

Na Tabela 2.1 estão apresentados os principais parâmetros do núcleo do reator, disponibilizados pela KAERI [8].

Número de elementos combustíveis	57
Número total de varetas combustíveis	13744
Espaço total entre dois elementos combustíveis adjacentes	0,394 cm
Diâmetro hidráulico nominal	1,18 cm
Área total do núcleo	2,64 m^2
Diâmetro equivalente do núcleo	183,2 cm
Carga de combustível no núcleo ativo	12436,5 (kgU)
Volume de combustível	1,4 m^3
Diâmetro das varetas	0,95 cm
Diâmetro do combustível	0,805 cm
Comprimento total das varetas	2,166 cm
Comprimento ativo das varetas	2 m
Pressão de operação	15 MPa
Temperatura de entrada do refrigerante	270 $°C$
Fator linear de potência (q')	10,965 kW/m

Tabela 2.1: Principais características do núcleo do reator SMART [8].

Os quatro tipos de elementos combustíveis, presentes no núcleo do reator, seguem configurações $17x17$, se distinguindo pelas posições das varetas combustíveis, venenos queimáveis e tubos guias. A Figura 2.3 apresenta os quatro tipos de elementos combustíveis, explicitando esquematicamente suas respectivas configurações.

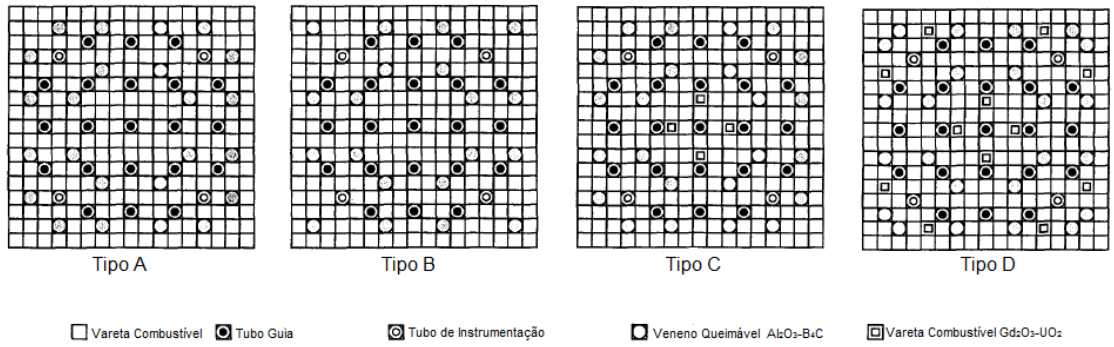

Figura 2.3: Representação esquemática dos quatro tipos de elementos combustíveis do reator SMART [8] (adaptado).

A presente dissertação realiza o estudo térmico do elemento de maior potência do reator. De acordo com a distribuição de potência dos elementos do reator obtida pela KAERI, foi identificado que o elemento de maior potência, em inicio de ciclo de queima (BOC), é do tipo A, tendo sua configuração apresentada na Figura 2.3 [8]. No total, o elemento combustível do tipo A possui 240 varetas combustíveis, cujas características geométricas e de materiais são descritas na Tabela 2.2.

Material das pastilhas	UO_2
Diâmetro das patilhas	0,805 cm
Comprimento das pastilhas	1 cm
Densidade das pastilhas	10,40 g/cm^3
Material do revestimento	Zircaloy-4
Diâmetro interno do revestimento	0,822 cm
Diâmetro externo da vareta	0,95 cm
Largura do revestimento	0,064 cm
Diâmetro do *gap*	0,0085 cm
Material do *gap*	He
Comprimento ativo	200 cm
Comprimento pleno	16,6 cm

Tabela 2.2: Propriedades geométricas e de materiais das varetas combustíveis do reator [8].

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

O estudo termo-hidráulico computacional compreende uma vasta gama de códigos capazes de desempenhar o cálculo do transporte do calor produzido pela queima do combustível nuclear. As implicações à hidráulica ocasionadas pela variação da temperatura no sistema, tal como a variação da pressão e a variação do fluxo de massa, também são parâmetros calculados por este tipo de programa. Os programas STHIRP e OpenFOAM já foram empregados na simulação de reatores nucleares de pesquisa e de potência em diversos trabalhos disponibilizados na literatura. Nas próximas seções são apresentados alguns dos principais trabalhos envolvendo os programas STHIRP e OpenFOAM e o reator SMART.

3.1 Principais trabalhos desenvolvidos usando o programa STHIRP

O programa para Simulação Termo-hidráulica de Reatores de Pesquisa (STHIRP), desenvolvido no Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, foi inicialmente programado para a simulação de reatores de pesquisa, porém sua formulação matemática é suficientemente geral para simular reatores de potência [14]. O código trabalha solucionando as equações de conservação de energia e momento pelo do método de diferenças finitas [14]. Trabalhos já envolveram a aplicação do código na análise de sistemas nucleares, dentre estes, o estudo do reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1, do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), localizado na cidade de Belo Horizonte (Brasil) [14]. Durante o trabalho, foram feitas comparações entre os valores obtidos pelo programa STHIRP-1 e os valores medidos experimentalmente no poço do reator Triga [15]. O programa simulou o reator operando com potências térmicas

de: 50 kW, 70 kW e 100 kW. Os resultados apresentaram boa concordância com os valores de temperatura medidos pelos detectores do reator, sendo as diferenças entre os valores calculados pelo programa e os experimentais da mesma ordem de grandeza dos erros dos instrumentos de medição [15].

Ainda sobre o reator de pesquisa TRIGA, o programa STHIRP foi usado na simulação do reator modelo Mark-II, de Bangladesh [16]. Os resultados gerados pelo código para distribuições de temperatura foram comparados com resultados calculados por outro algoritmo de simulação termo-hidráulica de reatores nucleares, denominado PARET, cujos dados estão disponíveis na literatura. Os códigos apresentaram perfis de temperatura semelhantes, com o STHIRP-1 apresentando valores mais altos para nós axiais mais altos [16].

Posteriormente, o código foi utilizado como ferramenta para cálculo termo-hidráulico em um reator de potência proposto pela Westinghouse [17]. A análise termo-hidráulica do reator nuclear PWR, contempla uma verificação do algoritmo para cálculo termo-hidráulico de reatores de potência por meio de comparação dos resultados fornecidos pelo programa com os disponibilizados na literatura [17]. Durante os trabalhos são comparados os resultados fornecidos pelo algoritmo STHIRP para o reator nuclear proposto com os cálculos efetuados por meio do programa VIPRE para o mesmo reator [17]. As varetas do reator avaliado têm seu interior vazado (tipo anular), ou seja, existe o escoamento interno e externo de refrigerante nas varetas de geometria cilíndrica. Esta configuração garante maior eficiência de retirada de calor uma vez que a superfície de contato vareta-refrigerante é maior [17].

O programa STHIRP também já foi usado para o estudo térmico de um reator do tipo PWR operando com uso do combustível nuclear nitreto de urânio (UN) [18]. O trabalho apresenta um estudo neutrônico e termo-hidráulico de um elemento combustível 16 x 16 do reator, comparando os combustíveis UN e UO_2. Da comparação entre os combustíveis avaliados, a maior condutividade térmica de UN contribui para a maior condução de calor na zona de pastilhas e para a menor temperatura do combustível [18]. No entanto, o UN apresenta a maior produção de transurânicos e produção considerável de ^{14}C durante a queima [18].

3.2 Principais trabalhos usando o programa OpenFOAM

O programa OpenFOAM consiste em um pacote de códigos para a solução de equações diferenciais pelo Método de Volumes Finitos (FVM) [19]. Ao longo dos últimos

anos o *software* já foi usado para a simulação de reatores nucleares em trabalhos já disponibilizados na literatura, possuindo um guia para a simulação de sistemas nucleares disponibilizado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) [20]. Artigos usando OpenFOAM e outros códigos CFD, como ANSYS CFX, também contemplam o reator de pesquisa TRIGA [21] [22] [23] [24].

Em relação ao reator TRIGA MARK I IPR-R1, foi realizado um estudo detalhado da resposta térmica-hidráulica do sistema de refrigeração durante eventos transientes críticos, como a perda de refrigerante em grande escala (LOCA) e a perda total de energia elétrica da instalação (SBO), utilizando o código OpenFOAM. O estudo implementou uma abordagem de acoplamento multidimensional entre modelos tridimensionais para a piscina do reator e modelos zero-dimensionais para o circuito externo de refrigeração, permitindo uma representação mais precisa da circulação natural e dos efeitos da estratificação térmica na piscina. Para a modelagem CFD, foram empregados os solucionadores PimpleFOAM e BuoyantPimpleFoam, sendo este último utilizado para resolver o fluxo compressível e os efeitos de flutuabilidade no domínio tridimensional. Os resultados indicaram que, mesmo sob condições extremas, a circulação natural da água na piscina pode garantir a remoção de calor do núcleo por um período prolongado, embora a eficiência da transferência térmica para o ambiente seja limitada. No caso de um grande vazamento de refrigerante, o estudo revelou que a piscina pode se esvaziar rapidamente caso não haja ação dos sistemas de segurança, levando à exposição do núcleo e à perda completa da capacidade de resfriamento [21].

Em 2017, foi desenvolvido um estudo do reator TRIGA, modelo MARK II, utilizando os algoritmos de simulação CFD: ANSYS e OpenFOAM [22]. Para tanto o núcleo foi modelado como um todo, usando para cálculo da diferença de pressão a técnica de meios porosos para modelar as grades superior e inferior do reator [22]. O modelo térmico construído foi capaz de fornecer valores razoáveis para a temperatura dentro dos canais centrais do núcleo do reator, que podem ser usados para estimar a vazão de massa de água induzida pela circulação natural em cada canal no reator [22].

Na literatura, diversos solucionadores têm sido desenvolvidos para a simulação de fenômenos físico-nucleares utilizando a plataforma OpenFOAM. Dentre eles, destaca-se o ntkFoam, um solucionador baseado no método dos volumes finitos para a solução das equações de transporte de nêutrons multi-grupo e cinética de precursores retardados [25]. Desenvolvido por Ma et al., o ntkFoam incorpora a discretização angular via método SN e método de ângulo de controle (CADOM). A metodologia implementada permite a

simulação de cinética neutrônica transitória em malhas estruturadas e não estruturadas, viabilizando o acoplamento eficiente com cálculos termo-hidráulicos [25].

Além do ntkFoam, outra ferramenta relevante é o GeN-Foam, um solucionador multifísico avançado para análise transiente de reatores nucleares desenvolvido por Fiorina et al. [26]. O GeN-Foam integra, de maneira acoplada, a solução de fenômenos termo-hidráulicos, termo-mecânicos e neutrônicos, utilizando uma abordagem baseada em malhas múltiplas e computação paralela. Entre as aplicações, permite a simulação de reatores rápidos refrigerados a sódio, bem como reatores de água leve e a sal fundido, oferecendo flexibilidade na modelagem de sistemas de combustível homogêneos e *pin-based*. O modelo inclui a deformação da malha de acordo com o campo de deslocamento térmico-mecânico, além da implementação de esquemas de discretização de diferenças finitas para modelagem da temperatura no combustível [26].

Além dos estudos de cinética neutrônica, OpenFOAM também tem sido utilizado para investigações térmicas em reatores nucleares. Por exemplo, o CorTAF [27] foi desenvolvido para realizar cálculos detalhados de transferência de calor e submetido a um rigoroso processo de validação utilizando *benchmarks* internacionais, como os experimentos de fluxo de montagem de combustível GE3 $\times$ 3, Weiss e PNL2 $\times$ 6 [27].

3.3 Trabalhos realizados sobre o SMART

A evolução cronológica dos estudos a respeito do reator começa no ano 1998, quando o *design* conceitual do reator foi inicialmente apresentado [8]. Ao longo das últimas duas décadas alguns marcos foram alcançados no desenvolvimento do projeto, entre os quais:

- No ano 2005, foi construído um protótipo do reator nuclear SMART com 1/5 da potência original do projeto [10].
- Já no ano de 2012 o reator recebeu licenciamento a nível termo-hidráulico para operação, estando em conformidade com os testes necessários para operação [10].
- Posteriormente, um modelo do reator SMART capaz de operar usando apenas sistemas de segurança passivos foi proposto (SMART-P) [10].

Vários estudos vem sendo realizados ao longo das três últimas décadas a respeito do reator SMART. Na literatura estão divulgados estudos na parte neutrônica, térmica, de materiais e de segurança [28] [8]. Os estudos contemplam análises da criticalidade em função da queima do combustível nuclear, tal como a avaliação do fator de conversão em função da queima do combustível [28].

Estudos neutrônicos já avaliaram o reator usando combustíveis tolerantes a acidentes [29]. Durante esse processo, o código determinístico DRAGON foi usado para a investigação neutrônica. Nesse trabalho, o nitreto de urânio (UN), o siliceto de urânio (U_3Si_2) e o material composto (70% UN- 30% U_3Si_2) foram considerados os candidatos de maior potencial. O estudo analisou a criticalidade de um oitavo de diferentes elementos combustíveis, usando um argumento de simetria, tal como as concentrações de plutônio e xenônio ao longo de três anos (tempo de um ciclo de queima do reator SMART) [29]. Ao longo da operação, os elementos mantiveram um estado crítico. Devido às diferenças de enriquecimento e composição química, verificou-se que o UN apresenta o maior valor de k_{eff}. No entanto, o UN apresentou menor variação de concentração para diferentes isótopos [29].

Estudos neutrônicos envolvendo o reator, usando como ferramenta o programa de cálculo neutrônico estocástico OpenMC, também foram realizados [30]. Durante o trabalho, a distribuição espacial de nêutrons foi avaliada, comparando elementos com enriquecimento mais baixo (2.4%) com os demais elementos do reator (4.95%), onde foi notado um maior fluxo de nêutrons rápidos para os elementos de maior enriquecimento. Na configuração descrita, foi observado um fluxo desprezível de nêutrons na fronteira de ambos os elementos. Além do fluxo de nêutrons, outro parâmetro importante estudado foi o espectro de energias dos nêutrons no núcleo do reator. A distribuição de potência do reator, tal como a não uniformidade desta distribuição quando o reator está em operação, também foram investigadas. A criticalidade do reator foi calculada em função da queima, revelando um valor de $k_{eff} = 1,22913$ no inicio do ciclo de queima [30].

Trabalhos de Bottcher contemplam o emprego do algoritmo de simulação ANSYS na análise térmica do reator nuclear SMART [31]. O programa Fluent, dentro do pacote de códigos do ANSYS, é um algoritmo de simulação CFD assim como OpenFOAM. Os dois programas se diferenciam porque ANSYS é um software comercial e OpenFOAM é livre. O artigo em questão apresenta uma análise detalhada do vaso de pressão do reator usando ANSYS CFX 20.2. O modelo CFD usou um conceito de resolução de detalhes geométricos completos com modelagem usando meios porosos com fontes de momento e energia para componentes como o núcleo, bombas e geradores de vapor [31]. Os resultados detalhados obtidos por meio de uma simulação usando a aproximação RANS em estado estacionário usando ANSYS CFX 20.2 foram muito promissores, dada a comparação de parâmetros do núcleo selecionados da simulação CFD com os do código termo-hidráulico TRACE.

Um trabalho desenvolvido por Lee discorre a respeito dos parâmetros gerais do reator

SMART [32]. No trabalho os principais parâmetros térmicos do reator são apresentados em comparação com os parâmetros de um PWR. A margem térmica foi avaliada em regime estacionário pelo código de análise de subcanal MATRA usando uma correlação de parâmetro local CHF aplicável a condições de baixa velocidade de massa. De acordo com os resultados, conclui-se que uma margem operacional de 15 % é garantida [32].

Trabalhos disponibilizados na literatura também apresentam parâmetros específicos do reator, tal como a configuração das grades espaçadoras, responsáveis por manter as varetas combustíveis fixadas em sua determinada posição [33]. No projeto padrão, o reator usa cinco grades espaçadoras, sendo a superior e a inferior confeccionadas de inconel e as centrais de zircaloy-4 [33].

Um trabalho desenvolvido por Young realizou o estudo térmico do cabeçote de mistura de fluido (FMHA) instalado no reator SMART [34]. As simulações incluíram investigações sobre os efeitos das diferenças de vazão de descarga do FMHA, modelos de turbulência e condições do gerador de vapor. Os resultados da análise mostram que o FMHA funciona efetivamente para mistura térmica em várias condições e faz com que a diferença de temperatura na entrada do núcleo diminua visivelmente. Foi verificado pelo estudo que a capacidade de mistura do FMHA satisfaz o requisito de projeto em todos os casos de simulação testados [34].

Um estudo desenvolvido investigou o fluxo de massa na entrada do núcleo do reator SMART [35]. Para tanto, o fluxo turbulento foi computado usando o programa FLUENT 12.0. As simulações realizadas levaram em consideração as regiões dos elementos combustíveis, do defletor de fluxo do reator e da placa de suporte inferior do reator [35]. Durante os trabalhos foi obtido que, sob uma condição de contorno uniforme, a diferença máxima na taxa de fluxo de massa entre os elementos combustíveis é menor que 2 %, enquanto aumenta ligeiramente para 2,3 % sob uma condição não uniforme [35].

Capítulo 4

Metodologia

Para o estudo do reator nuclear SMART, dois principais códigos computacionais foram empregados para a construção do modelo térmico do elemento de maior potência: STHIRP e OpenFOAM. Durante a metodologia o mecanismo de funcionamento, tal como o processo de construção dos modelos térmicos em ambos os programas são apresentados.

4.1 STHIRP

O programa STHIRP consiste na implementação de um algoritmo para simulação termo-hidráulica usando a técnica de subcanais. Na técnica de subcanais, o feixe de varetas percorrido de maneira axial pelo refrigerante, é dividido em um número finito de canais paralelos e lateralmente abertos, denominados subcanais [17]. Os transportes de massa, de quantidade de movimento e de energia podem ocorrer axialmente e entre subcanais adjacentes através das interfaces laterais [17]. A Figura 4.1 apresenta um diagrama de um subcanal.

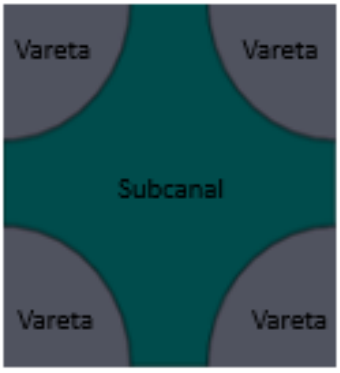

Figura 4.1: Diagrama ilustrativo de um subcanal [17] (adaptado).

Nesse sentido, programa é capaz de resolver as equações de conservação de energia

(na forma da equação da difusão de Fourier) para as varetas e as equações de conservação de energia, momento e massa para o refrigerante na região do núcleo do reator. As equações 4.1, 4.2 e 4.3 correspondem as equações de conservação de massa, momento e energia respectivamente, descritas em função da densidade ρ, da velocidade U, da pressão p do módulo da aceleração gravitacional g e da tensão τ.

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \tag{4.1}$$

- Equação de balanço de momento:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho(\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_t + \rho g + S_m \tag{4.2}$$

- Equação de conservação de Energia:

$$\frac{\partial (\rho \hat{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \hat{u} \mathbf{U}) + \frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho K \mathbf{U}) =$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} - \nabla \cdot (p\mathbf{U}) - \nabla \cdot (\tau_t \mathbf{U}) + S_e \tag{4.3}$$

Onde k corresponde à condutividade térmica, q corresponde ao calor e S corresponde ao termo fonte. Na equação 4.1 está quantificado matematicamente que o módulo da variação temporal da massa, em uma unidade de volume, corresponde a divergência da densidade superficial de corrente de massa. Na equação 4.2 está quantificado que a taxa de variação total do momento linear, em cada volume de controle, corresponde ao somatório das contribuições referentes à força gravitacional e à diferença pressão, acrescidas de um termo fonte. Na equação 4.3 está quantificada a primeira lei da termodinâmica, que diz que a taxa de variação da energia interna corresponde à soma do calor líquido com o trabalho líquido, em cada volume de controle.

Para a solução das equações diferenciais, o Método das Diferenças Finitas (MDF) é usado em conjunto com o método das sobre-relaxações sucessivas (SOR). O MDF converte as equações diferenciais de conservação em um conjunto de equações algébricas por meio da expansão em séries de Fourier, às quais o SOR é capaz de solucionar forma iterativa [36] [37]. A descrição teórica do programa no presente trabalho segue o caminho realizado pelo calor produzido pelas fissões nucleares. Para a realização dos cálculos da propagação do calor nas varetas combustíveis do reator, o programa possui quatro principais considerações; são elas [37]:

- O fluxo de calor ao longo das varetas é unidimensional e ocorre na direção radial, ou seja, não há transporte de calor na direção axial das varetas e existe simetria para qualquer direção radial.
- A densidade volumétrica de calor pode ser considerada radialmente não uniforme.
- A única fonte de calor é o combustível nuclear, isto é, não há produção de calor no revestimento das varetas.
- As propriedades termo-físicas dos materiais são descritas como função da temperatura e calculadas por interpolação usando um polinômio de terceiro grau.

A partir das considerações iniciais, o programa trabalha resolvendo a equação de Fourier, que pode ser deduzida da equação de conservação de energia em materiais sólidos, para o cálculo da propagação de calor ao longo da direção radial das varetas, tanto no combustível quanto no revestimento. A relação 4.4 mostra a equação de Fourier para condução térmica. Já no *gap* das varetas (preenchido com hélio) o programa é capaz de calcular a queda de temperatura usando um valor de condutância térmica fornecido pelo usuário para o tipo de gás contido na respectiva vareta.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\kappa(\nabla T) + Q \tag{4.4}$$

Onde T corresponde a temperatura, κ a condutividade térmica, t ao tempo, ρ representa a densidade, c o calor específico do material e Q a densidade volumétrica de calor. Em regime estacionário, como no caso das presentes simulações, o membro esquerdo da igualdade 4.4 é igual a zero, porque a simulação é feita em tempo fixo. Na equação 4.4, as propriedades termo-físicas, como o calor específico não são constantes, dessa forma o programa usa, para obter o valor do calor específico a uma temperatura T, um polinômio interpolador de terceira ordem, como já listado nas considerações iniciais do código STHIRP [14]. A equação 4.5, apresenta uma relação genérica para a interpolação de uma propriedade termo-física $X(T)$, entre as quais o calor específico e a condutividade térmica.

$$X(T) = X_0 + X_1(T - T_0) + X_2(T - T_0)^2 + X_3(T - T_0)^3 \tag{4.5}$$

Na equação 4.5, os coeficientes X_1, X_2 e X_3 do polinômio interpolador são fornecidos pelo usuário do programa, tal como o valor da propriedade termo-física X_0 a um valor de temperatura de referência T_0. No programa STHIRP, a transferência de calor entre a superfície da vareta e o refrigerante é descrita por meio da lei de resfriamento de Newton

apresentada na equação 4.6.

$$Q = H\Delta T \tag{4.6}$$

Onde H corresponde ao coeficiente de transferência de calor, Q a densidade superficial de calor e ΔT corresponde à diferença de temperatura entra a superfície da vareta e o refrigerante. Na equação 4.6, o coeficiente de transferência de calor H é calculado por meio de uma correlação empírica selecionada na entrada do programa pelo usuário. Seguindo o caminho do calor gerado pelo combustível nuclear, o algoritmo implementado no programa STHIRP para cálculo da dinâmica do refrigerante usa sete considerações básicas [37]:

- É válida a aproximação de parâmetros agrupados.
- No escoamento bifásico o vapor e o líquido estão em equilíbrio termodinâmico.
- O fluido pode ser transportado entre os subcanais termo-hidráulicos na forma de fluido turbulento (transmissão líquida igual a zero) e de escoamento transversal.
- A velocidade de escoamento axial do refrigerante é muito maior que a transversal.
- Fenômenos sônicos são desconsiderados.
- Não há reversão no sentido de escoamento do fluido na direção axial.
- Não há dissipação de energia por viscosidade e interação eletromagnética.

No programa STHIRP, a mecânica do refrigerante é governada pelas equações de conservação de massa, momento e energia apresentadas nas expressões 4.1, 4.2 e 4.3 respectivamente. Estas equações são solucionadas usando o MDF para a discretização das equações e o SOR para a solução das equações algébricas, obtidas pelo MDF [37]. O valor das propriedades termo-físicas da água usadas nas equações de conservação são calculadas internamente pelo programa através de uma sub-rotina denominada ACQUA 97 [37]. Na transferência de calor entre a vareta e o refrigerante, a razão de distanciamento em relação à ebulição nucleada (DNBR) quantifica o distanciamento do fluido da formação de bolhas de vapor, indesejada em reatores do tipo PWR, visto que este tipo de reator é projetado para operar com a água em estado líquido. Matematicamente o DNBR é definido pela equação 4.7.

$$DNBR = \frac{Q_C}{Q} \tag{4.7}$$

Onde Q_C representa a densidade superficial de calor crítico (calor necessário para a transição de fase líquido-vapor) e Q representa a densidade de calor local na superfície da vareta.

Ou seja, na equação 4.7, quanto mais o DNBR se aproxima de 1, mais o fluido se aproxima de entrar em ebulição na região da superfície da vareta em que o DNBR é medido. Para o cálculo do DNBR o programa usa uma correlação de entrada, empírica ou semi-empírica, fornecida pelo usuário para o fluxo de calor crítico Q_C e a densidade superficial de calor Q obtida pela equação 4.6. A correlação usada para cálculo do fluxo de calor crítico é função da faixa de temperatura e pressão do sistema físico simulado [21].

4.1.1 Construção do modelo térmico usando STHIRP

Para a construção da simulação do elemento combustível de maior potência do reator usando o código STHIRP foram necessárias as seguintes descrições:

- Geometria dos subcanais: área transversal, perímetro molhado, perímetro aquecido, tal como discriminar os subcanais vizinhos e as distâncias entre os respectivos centroides dos canais adjacentes.
- Geometria das varetas: diâmetro do combustível e do revestimento de cada vareta, fator radial de potência e fração da potência gerada na vareta que é dissipada em cada subcanal adjacente a respectiva vareta.
- Descrição das propriedades termo-físicas dos materiais: calor específico e condutividade térmica do combustível e do revestimento tal como seus respectivos polinômios interpoladores em função da temperatura.
- Descrição das correlações usadas na dinâmica do refrigerante para cálculo de: modelo de vazio (usada para o cálculo do título de vapor), fração de vazio, multiplicador de fricção, coeficiente de transferência de calor e fluxo de calor crítico.
- Descrição da distribuição axial de potência nas varetas: fração de potência em cada nível axial e a posição relativa fração indicada.
- Condições de fronteira na entrada do núcleo: pressão, temperatura, fluxo de massa médio e densidade linear de potência média.

Durante as próximas seções as etapas da construção do modelo térmico serão detalhadas. Tendo em vista que ambos os programas, STHIRP e OpenFOAM, são códigos determinísticos foi usada a simetria de 1/8 presente no elemento combustível simulado para a construção do modelo térmico. O uso deste argumento de simetria é justificável tendo em vista que os programas determinísticos resolvem as equações por métodos numéricos

bem definidos (que não dependem de variáveis aleatórias) e os resultados de uma simulação envolvendo o elemento completo produziria oito vezes os mesmos parâmetros calculados em uma simulação usando uma unidade de simetria. Desta forma as simulações foram realizadas com 1/8 do elemento e os resultados obtidos são representativos de todo o elemento. Ambas as simulações, usando STHIRP e OpenFOAM, foram realizadas em regime estacionário, considerando o fator de potência em inicio do ciclo de queima do elemento mais quente (1,455).

4.1.2 Geometria dos subcanais

Para a construção da geometria do modelo térmico, os principais parâmetros usados nas simulações foram obtidos de um documento referente ao *design* conceitual do reator SMART produzido pela KAERI [8]. A Tabela 4.1 apresenta os principais parâmetros geométricos dos subcanais do reator SMART.

Área dos canais	0,8804 cm^2
Perímetro molhado	2,9845 cm
Perímetro aquecido	2,9845 cm
Distância entre os centroides de dois canais adjacentes	1,26 cm
Diâmetro hidráulico	1,18 cm

Tabela 4.1: Geometria dos subcanais para a modelagem do elemento combustível mais quente do reator SMART [8].

No programa os canais são numerados pelo usuário como identificação para o cálculo térmico e para a apresentação dos resultados após a simulação, isto é, na entrada do programa o usuário identifica o número referente aos canais que deseja que o programa detalhe os resultados dos cálculos. A Figura 4.2 apresenta a configuração dos subcanais e varetas implementada no programa STHIRP.

4.1.3 Geometria das varetas

Analogamente ao procedimento feito no caso dos subcanais, a geometria das varetas foi obtida do relatório contendo o *design* conceitual do reator SMART, divulgado pela KAERI [8]. A Tabela 4.2 apresenta as principais propriedades das varetas do reator SMART.

Na descrição das varetas também é necessária a especificação do fator radial de potência de cada vareta. O fator radial de potência é definido matematicamente como a razão entre a potência da vareta sobre a potência média por vareta no elemento mais

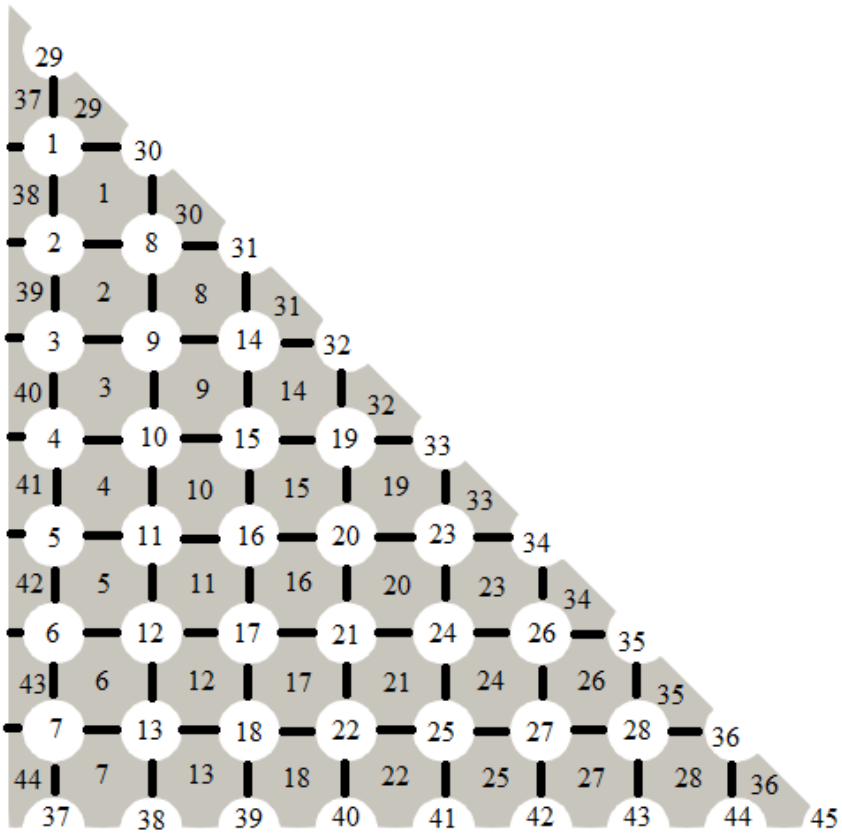

Figura 4.2: Numeração imposta para os subcanais e varetas no programa STHIRP. Fonte: Autor.

Diâmetro das Varetas	9,5 mm
Diâmetro das Pastilhas	8,05 mm
Espessura do Gap	0,085 mm
Espessura do Revestimento	0,64 mm
Passo do Reticulado	12,6 mm

Tabela 4.2: Geometria das varetas do reator nuclear SMART [8].

quente. A equação 4.8 mostra a definição de Fator Radial de Potência FRP em função da potência da vareta q_v e da potência média das varetas do elemento simulado $< q_v >$.

$$FRP = \frac{q_v}{< q_v >} \tag{4.8}$$

Os valores usados para o fator de potência de cada vareta foram obtidos de trabalhos usando o programa MCNP-6. O trabalho para calcular a distribuição de potência foi feito por colaboradores do presente trabalho por meio de uma simulação do núcleo inteiro, obtendo assim, a partir de um cálculo usando o método estocástico de Monte Carlo, a distribuição de potência de pino usada nas simulações do programa STHIRP. Para a construção da simulações usando MCNP foram usados os dados da KAERI referentes a

geometria e materiais usados no reator e as seções de choque dos respectivos materiais disponíveis no Arquivo de Dados Nucleares Avaliados, *Evaluated Nuclear Data File* (ENDF) [8] [38]. Usando os fatores radiais de potência calculados pelo programa MCNP-6, o fator linear de potência do elemento mais quente e as distribuições axiais de potência, o programa é capaz de calcular o valor da potência em cada região das varetas do elemento simulado. A Figura 4.3 apresenta distribuição radial de potência usada nas simulações. No resultado existe uma diferença entre os valores obtidos para a distribuição de potência

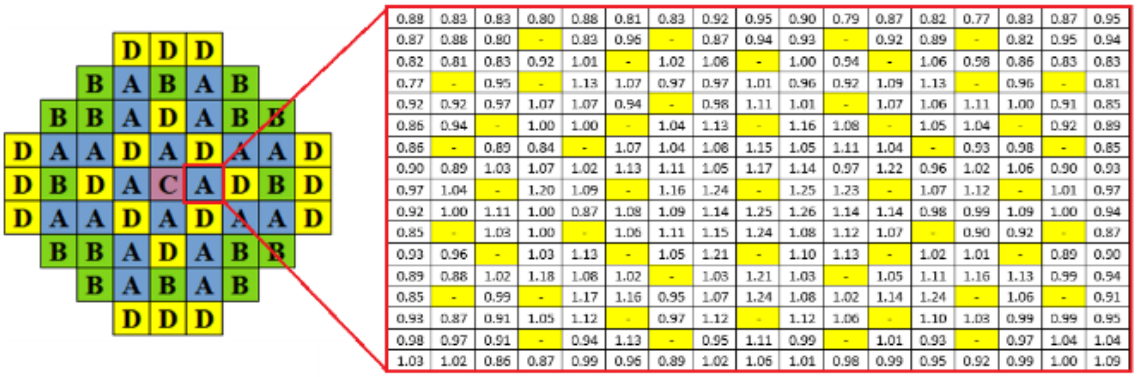

Figura 4.3: Distribuição de potência (pino a pino) calculada no MCNP-6.

nas oito regiões de simetria do elemento. Essa constatação é decorrente do método de Monte Carlo ser baseado em probabilidade e por consequência dependente de variáveis aleatórias (ou pseudo-aleatórias) [39]. O resultado disso é que simulações sob as mesmas condições físicas podem levar a resultados levemente diferentes, como no caso simulado pelo programa MCNP. Além disso, como as simulações no MCNP foram feitas considerando o núcleo inteiro e os elementos adjacentes ao elemento A (simulado) não são todos iguais. Nessa configuração, os elementos vizinhos interferem no fluxo de nêutrons calculado e por conseguinte na potência do elemento combustível simulado. Para fins das presentes simulações, tanto no programa STHIRP quanto no programa OpenFOAM, foi escolhido o oitavo que apresentava os maiores valores de potência relativa. Na Figura 4.4 está destacado o oitavo escolhido para as simulações.

Assim como no caso dos subcanais, no programa STHIRP as varetas também são numeradas, como mostrado na Figura 4.2. Desta forma, seguindo a distribuição de potência da Figura 4.3, a Tabela 4.3 apresenta a distribuição de potência construída para as simulações seguindo a enumeração apresentada na Figura 4.2.

Além da distribuição de potência, o programa necessita que usuário descreva a fração de potência de cada vareta destinada a cada canal. Neste ponto, foi considerada a simetria angular de cada vareta para destinar 25 % da potencia de cada vareta completa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0.88	0.83	0.83	0.80	0.88	0.81	0.83	0.92	0.95	0.90	0.79	0.87	0.82	0.77	0.83	0.87	0.95
2	0.87	0.88	0.80	-	0.83	0.96	-	0.87	0.94	0.93	-	0.92	0.89	-	0.82	0.95	0.94
3	0.82	0.81	0.83	0.92	1.01	-	1.02	1.08	-	1.00	0.94	-	1.06	0.98	0.86	0.83	0.83
4	0.77	-	0.95	-	1.13	1.07	0.97	0.97	1.01	0.96	0.92	1.09	1.13	-	0.96	-	0.81
5	0.92	0.92	0.97	1.07	1.07	0.94	-	0.98	1.11	1.01	-	1.07	1.06	1.11	1.00	0.91	0.85
6	0.86	0.94	-	1.00	1.00	-	1.04	1.13	-	1.16	1.08	-	1.05	1.04	-	0.92	0.89
7	0.86	-	0.89	0.84	-	1.07	1.04	1.08	1.15	1.05	1.11	1.04	-	0.93	0.98	-	0.85
8	0.90	0.89	1.03	1.07	1.02	1.13	1.11	1.05	1.17	1.14	0.97	1.22	0.96	1.02	1.06	0.90	0.93
9	0.97	1.04	-	1.20	1.09	-	1.16	1.24		1.25	1.23	-	1.07	1.12	-	1.01	0.97
10	0.92	1.00	1.11	1.00	0.87	1.08	1.09	1.14	1.15	1.06	1.14	1.14	0.98	0.99	1.09	1.00	0.94
11	0.85	-	1.03	1.00	-	1.06	1.11	1.15	1.14	1.08	1.12	1.07	-	0.90	0.92	-	0.87
12	0.93	0.96	-	1.03	1.13	-	1.05	1.21		1.10	1.13		1.02	1.01	-	0.89	0.90
13	0.89	0.88	1.02	1.18	1.08	1.02	-	1.03	1.11	1.03	-	1.05	1.11	1.16	1.13	0.99	0.94
14	0.85	-	0.99	-	1.17	1.16	0.95	1.07	1.14	1.08	1.02	1.14	1.24		1.06	-	0.91
15	0.93	0.87	0.91	1.05	1.12	-	0.97	1.12		1.12	1.06	-	1.10	1.03	0.99	0.99	0.95
16	0.98	0.97	0.91	-	0.94	1.13	-	0.95	1.11	0.99	-	1.01	0.93	-	0.97	1.04	1.04
17	1.03	1.02	0.86	0.87	0.99	0.96	0.89	1.02	1.06	1.01	0.98	0.99	0.95	0.92	0.99	1.00	1.03

Figura 4.4: Região de simetria usada nas simulações do elemento combustível do reator SMART.

para cada subcanal em contato com a respectiva vareta. Para as demais varetas, a fração da potência irradiada para cada canal adjacente foi calculada também considerando as varetas simétricas, ou seja, a fração de potência destinada a cada canal é proporcional ao perímetro da vareta em contato com o respectivo canal. A equação 4.9 mostra a expressão usada para calcular a fração de potência FPC destinada a cada canal adjacente a cada uma das varetas do modelo.

$$FPC = \frac{P_c}{P_t} \tag{4.9}$$

Onde P_c é o perímetro da vareta em contato o respectivo canal adjacente e P_t é perímetro total da vareta, que normaliza a fração de potência destinada a cada canal.

Vareta	Fator de Potência	Vareta	Fator de Potência
1 (vareta completa)	1.000	24 (vareta completa)	0.000
2 (vareta completa)	0.990	25 (vareta completa)	1.030
3 (vareta completa)	0.920	26 (vareta completa)	1.130
4 (vareta completa)	0.950	27 (vareta completa)	1.100
5 (vareta completa)	0.990	28 (vareta completa)	1.080
6 (vareta completa)	0.980	29 (meia vareta)	1.090
7 (vareta completa)	1.010	30 (meia vareta)	1.040
8 (vareta completa)	0.970	31 (meia vareta)	0.990
9 (vareta completa)	0.000	32 (meia vareta)	0.000
10 (vareta completa)	0.930	33 (meia vareta)	1.110
11 (vareta completa)	1.010	34 (meia vareta)	0.000
12 (vareta completa)	0.000	35 (meia vareta)	1.120
13 (vareta completa)	0.990	36 (meia vareta)	1.260
14 (vareta completa)	1.030	37 (meia vareta)	0.000
15 (vareta completa)	1.100	38 (meia vareta)	1.110
16 (vareta completa)	0.000	39 (meia vareta)	0.000
17 (vareta completa)	1.060	40 (meia vareta)	1.240
18 (vareta completa)	1.120	41 (meia vareta)	1.210
19 (vareta completa)	1.240	42 (meia vareta)	0.000
20 (vareta completa)	1.140	43 (meia vareta)	1.240
21 (vareta completa)	1.020	44 (meia vareta)	1.250
22 (vareta completa)	1.080	45 (1/8 de vareta)	0.000
23 (vareta completa)	1.050		

Tabela 4.3: Distribuição radial de potência implementada no programa STHIRP oriunda do cálculo feito no programa MCNP-6. Fonte: Autor.

4.1.4 Propriedades termo-físicas dos materiais

A fim de resolver a equação de difusão térmica de Fourier, equação 4.4, o programa STHIRP necessita da especificação dos valores das propriedades termo-físicas dos materiais. Retomando a descrição teórica do programa, as propriedades são modeladas na entrada do programa como coeficientes do polinômio interpolador dado pela equação 4.5. A Tabela 4.4, obtida de trabalhos já disponibilizados na literatura, apresenta os valor dos coeficientes das propriedades termo-físicas do combustível nuclear UO_2, a uma temperatura de referência T_0=800 °C e a densidade de $\rho = 10{,}40\ g/cm^3$, implementados na interpolação [17] [40].

Propriedade	X_0	X_1	X_2	X_3
Condutividade térmica (W/m°C)	3.210	-0.987×10^{-3}	0.887×10^{-6}	-0.181×10^{-9}
Calor específico (kJ/kg°C)	0.316	0.103×10^{-3}	-0.358×10^{-7}	0.1627×10^{-9}
Expansão térmica (1/°C)	0.931×10^{-5}	0.297×10^{-3}	0.122×10^{-7}	0.0
Módulo de elasticidade (bar)	1.786×10^{6}	-1.244×10^{-4}	0.0	0.0
Dureza de Meyer (bar)	0.0	0.0	0.0	0.0
Razão de Poisson	0.316	0.0	0.0	0.0
Emissividade	0.694	-4.442×10^{-4}	0.0	0.0

Tabela 4.4: Coeficientes do polinômio para o cálculo das propriedades termo-físicas do UO_2 em função da temperatura [40] [17].

O *gap*, preenchido com hélio, presente nas varetas combustíveis foi modelado usando um valor de entrada para a condutância do gás. Através deste valor o programa é capaz de calcular a queda de temperatura entre o combustível e o revestimento. No presente modelo térmico a condutividade do *gap* foi tomada como 0,281 W/mK, para um valor de temperatura de referência de 700 K [41]. Analogamente ao combustível nuclear, na região do revestimento, as propriedades termo-físicas do Zircaloy-4 são calculadas pelo programa usando a interpolação mostrada na 4.5, a uma temperatura de referência de T_0=300 °C, com os coeficientes apresentados na Tabela 4.5 [40] [17].

Propriedade	X_0	X_1	X_2	X_3
Condutividade térmica (W/m°C)	16.9	0.582×10^{-3}	0.0	0.0
Calor específico (kJ/kg°C)	0.314	0.296×10^{-3}	0.0	0.0
Expansão térmica (1/°C)	0.53×10^{-5}	0.196×10^{-2}	0.116×10^{-5}	0.0
Módulo de elasticidade (bar)	8.047×10^{5}	-7.444×10^{-4}	0.0	0.0
Dureza de Meyer (bar)	8.227×10^{3}	-1.651×10^{-3}	7.25×10^{-6}	-1.91×10^{-8}
Razão de Poisson	0.261	-4.852×10^{-4}	0.0	0.0
Emissividade	0.7	0.0	0.0	0.0

Tabela 4.5: Coeficientes do polinômio para o cálculo das propriedades termo-físicas do Zircaloy-4 em função da temperatura [40] [17].

Em relação ao refrigerante, as propriedades termo-físicas da água são calculadas internamente pelo programa usando a subrotina ACQUA 97 [37]. Na Tabela 4.6 estão tabulados alguns valores das propriedades termo-físicas da água em função da temperatura a uma pressão de referência de 150 bar (15 MPa), pressão de operação do núcleo do reator SMART, que contempla o intervalo de temperatura das simulações. Na Tabela 4.6 estão listados os valores do volume específico (V), do calor específico (c_p), da viscosidade (μ) e da condutividade térmica (κ) em função da temperatura. Para valores intermediários de temperatura aos apresentados na tabela, o programa faz uma interpolação linear usando os dois pontos de temperatura mais próximos a temperatura que se deseja obter o valor

da propriedade termo-física. Como medida de exemplo, o calor específico da água a uma temperatura de 300 $°C$ é obtido da equação de reta que passa pelos pontos $298,21$ $°C$ e $300,96$ $°C$.

Temperatura (°C)	V (cm^3/g)	c_p $(kJ/kg$ °C)	μ (g/ms)	κ (W/m°C)
268.00	1.27605	4.9192	0.10117	0.61295
270.75	1.28335	4.9534	0.10002	0.60920
273.49	1.29086	4.9895	0.09888	0.60534
276.24	1.29862	5.0276	0.09776	0.60135
278.99	1.30662	5.0678	0.09664	0.59723
281.73	1.31490	5.1105	0.09554	0.59299
284.48	1.32345	5.1558	0.09444	0.58863
287.23	1.33232	5.2040	0.09336	0.58413
289.97	1.34151	5.2553	0.09227	0.57949
292.72	1.35105	5.3102	0.09119	0.57473
295.47	1.36097	5.3690	0.09011	0.56983
298.21	1.37130	5.4322	0.08904	0.56479
300.96	1.38207	5.5004	0.08796	0.55961
303.71	1.39334	5.5742	0.08688	0.55430
306.45	1.40513	5.6545	0.08579	0.54885
309.20	1.41752	5.7421	0.08470	0.54326
311.95	1.43055	5.8382	0.08359	0.53753
314.69	1.44431	5.9441	0.08248	0.53166
317.44	1.45887	6.0618	0.08134	0.52565
320.19	1.47435	6.1932	0.08019	0.51951
322.93	1.49088	6.3413	0.07902	0.51322
325.68	1.50859	6.5097	0.07782	0.50679
328.42	1.52769	6.7036	0.07658	0.50021
331.17	1.54843	6.9302	0.07531	0.49346
333.92	1.57113	7.2008	0.07398	0.48653
336.66	1.59626	7.5333	0.07258	0.47935
339.41	1.62452	7.9575	0.07110	0.47185
340.33	1.63480	8.1273	0.07058	0.46926
341.24	1.64559	8.3155	0.07005	0.46662
342.16	1.65696	8.5252	0.06950	0.46392

Tabela 4.6: Propriedades físicas da água a pressão de operação do SMART (15 MPa) [37].

4.1.5 Nodalização das regiões das varetas

Durante a descrição de uma simulação no programa STHIRP o usuário seleciona o número de nodos radiais independentemente para o combustível e para o revestimento. Durante as simulações, foram usados 7 nós radiais na região do combustível e 3 no revestimento. A Figura 4.5 esquematiza a nodalização radial implementada para todas as varetas.

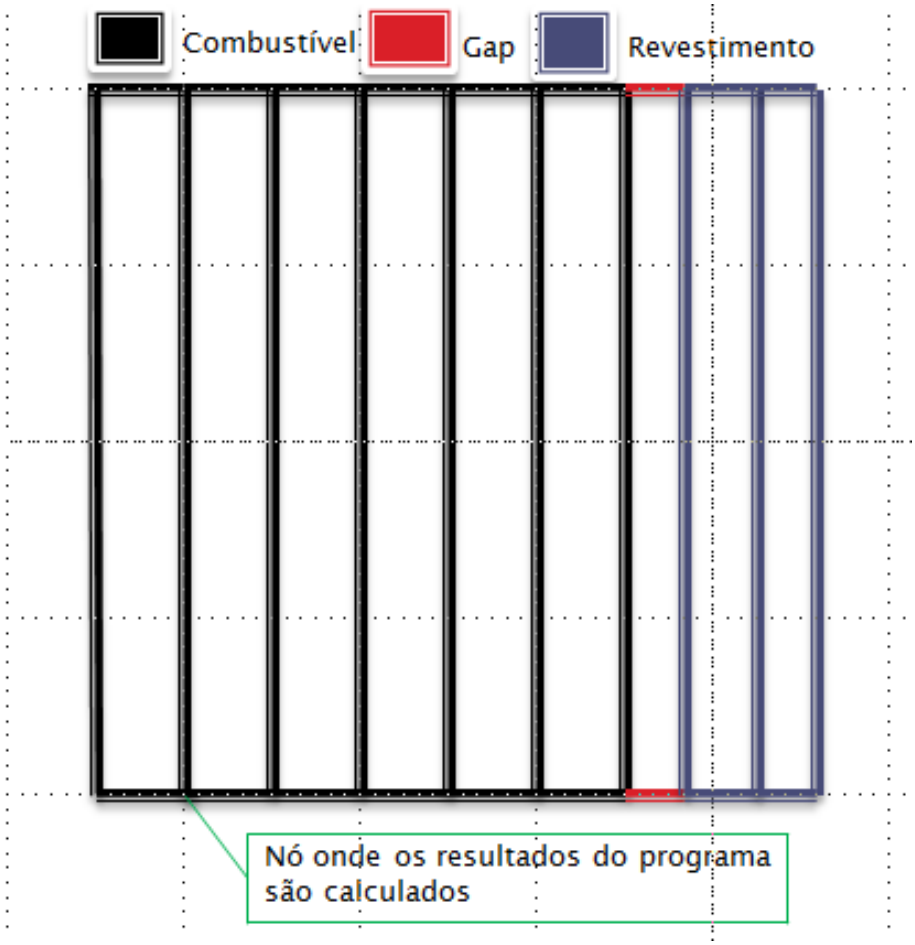

Figura 4.5: Diagrama da nodalização radial da região do combustível e do revestimento para a simulação usando STHIRP. Fonte: Autor.

A escolha da nodalização usada é importante para a apresentação dos resultados, tendo em vista que os nós escolhidos são os locais onde os resultados dos cálculos são apresentados pelo programa. Isto é, na saída do programa STHIRP, a nodalização construída determina onde serão apresentados os valores da temperatura nas varetas. Na direção axial, foram selecionados 30 pontos equidistantes para a discretização ao longo da direção de escoamento do refrigerante; essa discretização leva em conta a distribuição axial de potência imposta como entrada na simulação, que será apresentada durante as próximas seções.

4.1.6 Descrição das correlações usadas no programa

A dinâmica do fluido é regida pelas equações de conservação de momento e energia assim como por uma série de correlações empíricas e semi-empíricas usadas para o cálculo de propriedades físicas do sistema sob as condições simuladas. As correlações implementadas são responsáveis pelo cálculo do título de vapor, fração de vazio, multiplicador de fricção, coeficiente de transferência de calor e fluxo de calor crítico respectivamente. O título de vapor quantifica a massa de gás em relação a massa total, enquanto a fração de vazio quantifica a volume de vapor em relação ao volume total do refrigerante. Juntas as duas correlações empíricas quantificam a formação de vapor no refrigerante no reator. A equação 4.10 mostra a definição do título de vapor, enquanto a equação 4.11 mostra a fração de vazio.

$$\beta = \frac{m_g}{m_t} \tag{4.10}$$

Onde m_g corresponde a massa de gás no refrigerante de m_t a massa total de água (líquida + gasosa).

$$\alpha = \frac{v_g}{v_t} \tag{4.11}$$

Na equação 4.11 v_g corresponde ao volume ocupado pela fração de gás e v_t corresponde ao volume total de água na simulação. No programa STHIRP, o multiplicador de atrito bifásico é usado para calcular a variação de pressão por atrito viscoso ao longo do escoamento do refrigerante. A equação 4.12 mostra a relação para calcular a perda de pressão devido ao arrasto do fluido [37].

$$\Delta P = \frac{\phi f \Delta X (m/A)^2}{2 D_w \rho} \tag{4.12}$$

Onde ΔP corresponde a diferença de pressão devido ao atrito do fluido, ϕ corresponde ao multiplicador de atrito bifásico, fornecido pelo usuário por meio de uma correlação de entrada, f é o fator de fricção, m a vazão, A a área do canal, ΔX corresponde a comprimento dos canais do reator, D_w representa o diâmetro hidráulico molhado e ρ a densidade. Tipicamente em escoamentos monofásicos, como no caso de reatores a água pressurizada em situação normal de operação, o multiplicador de fricção é igual a um [37]. O coeficiente de transferência de calor H é usado para calcular o fluxo de calor da vareta para o refrigerante de acordo com a lei de resfriamento de Newton (equação 4.6). De maneira geral, essas relações para calcular parâmetros termo-físicos do escoamento de fluidos são muito complicadas para serem obtidas analiticamente, sendo necessário, em diversos casos, o uso de correlações que melhor representam os dados experimentais obtidos. No programa STHIRP, o usuário descreve na entrada do programa quais equações

deseja usar no modelo térmico simulado. As correlações empíricas usadas para cálculo do modelo de vazio (título de vapor), da fração de vazio, do coeficiente de transferência de calor (usado na equação 4.6) e do multiplicador de fricção fornecidas são:

- Modelo de vazio subresfriado: Saha-Zuber, desenvolvida para números de Peclet superiores a 4.10^5 [42].
- Fração de vazio: Correlação de Smith, válida para todos os valores de fração de vazio desde que os tubos sejam uniformes [43].
- Multiplicador de fricção: Armand-Treshchev, desenvolvida para pressões superiores a 10 bar e inferiores a 180 bar [37].
- Coeficiente de transferência de calor em regime de fluxo laminar monofásico: Mikheyev, desenvolvida para escoamento laminar [14].
- Coeficiente de transferência de calor em regime de fluxo turbulento monofásico: Correlação de Gnielinski, válida em tubos, para números de Prandl maiores que 0.6 e menores que 10^5 e números de Reynolds maiores que 2300 e menores que 10^6 [14] [44].

Para o fluxo de calor crítico, usado para calcular o valor do DNBR (equação 4.7), foi empregada a correlação VTI, que é valida para os valores típicos de operação do reator, isto é, esta correlação para o cálculo do fluxo de calor crítico é válida para as seguintes condições [37]:

- Pressões compreendidas entre 4,9 bar e 196 bar.
- Fluxos de massa superiores à 200 kg/m^2s e inferiores à 5000 kg/m^2s.
- Diâmetros hidráulicos molhados entre 4 mm e 32 mm.

A equação 4.13 apresenta, para as condições físicas simuladas no presente trabalho, a correlação para o cálculo do fluxo de calor crítico Q_{crit}, usando o modelo VTI [37].

$$Q_{crit} = (76.6G^{-1/3}D^{-0.07}e^{-0.00795}p/x)^8 \tag{4.13}$$

Onde G corresponde ao fluxo de massa D ao diâmetro hidráulico molhado, p a pressão termodinâmica e x ao título de vapor.

4.1.7 Descrição da distribuição axial de potência nas varetas

A distribuição axial de calor nas varetas é um parâmetro fornecido pelo usuário do programa. Matematicamente, a distribuição axial corresponde a razão entre o calor local dividido pelo calor médio de cada vareta em cada altura z. A equação 4.14 quantifica a relação.

$$F_z = \frac{q(z)}{< q >} \tag{4.14}$$

Onde $q(z)$ é a densidade de calor medido a altura z da vareta e $< q >$ é a densidade média de potência da respectiva vareta.

A distribuição axial de calor implementada no presente modelo térmico para todas as varetas combustíveis foi baseada em um perfil de potência senoidal, decorrente da solução da equação de difusão para o fluxo de nêutrons [45]. Tendo em vista que o calor produzido pelas fissões nucleares é diretamente proporcional ao número de fissões, segue que o número de fissões e o respectivo calor gerado seguem o mesmo perfil observado no fluxo de nêutrons, no caso de um combustível homogêneo [45]. O perfil implementado segue a distribuição de potência normalizada usada em reatores a água leve pressurizada. No programa STHIRP a distribuição de potência axial é imposta de maneira normalizada e o programa calcula a potência real da região pela distribuição radial de potência (descrita na Tabela 4.10) e da densidade linear de potência (q') (indicada pelo usuário na entrada do programa). A Tabela 4.7 mostra o fator de potência axial usado em função da altura relativa da vareta.

4.1.8 Condições de contorno na entrada do núcleo

Para a solução das equações diferenciais envolvidas na simulação é necessário o conhecimento prévio pelo programa do valor das propriedades termo-físicas em alguma região. No caso do programa STHIRP, o usuário informa para o programa o valor das propriedades na entrada do núcleo e programa calcula os valores das propriedades ao longo do elemento simulado. Dos valores impostos como condição de contorno para a entrada do elemento, o único que precisou ser calculado a partir das informações padrões do projeto foi a densidade linear de potência. Para tanto, o cálculo foi feito em quatro passos:

- A potência nominal do reator (330 MW_{th}) foi dividida pelo número de elementos contidos no núcleo (57), para obter a potência média por elemento.
- A potência média calculada foi multiplicada pelo fator radial de potência do elemento de maior potência $(1,455)$, onde foi obtida a potência nominal do elemento de interesse $(8,42MW)$.

Altura relativa	Fator axial	Altura relativa	Fator axial
0.0000	0.0328	0.5000	1.5500
0.0357	0.2037	0.5357	1.5405
0.0714	0.3722	0.5714	1.5122
0.1071	0.5362	0.6071	1.4653
0.1429	0.6935	0.6429	1.4005
0.1786	0.8424	0.6786	1.3186
0.2143	0.9810	0.7143	1.2205
0.2500	1.1075	0.7500	1.1075
0.2857	1.2205	0.7857	0.9810
0.3214	1.3186	0.8214	0.8424
0.3571	1.4005	0.8571	0.6935
0.3929	1.4653	0.8929	0.5362
0.4286	1.5122	0.9286	0.3722
0.4643	1.5405	0.9643	0.2037
		1.0000	0.0328

Tabela 4.7: Distribuição axial de potência normalizada usada nas simulações [17] [45].

- A potência do elemento mais quente foi dividida pelo número de varetas combustíveis do elemento do tipo A (240), para obter a potência média por vareta no elemento de maior potência (35,2 kW).
- A potência média por vareta foi dividida pelo comprimento ativo das varetas do reator (2 m), onde foi descoberto o fator linear de potência do elemento mais potente do reator (17,55 kW/m).

Os demais valores usados na entrada do programa estão disponibilizados de maneira explícita no relatório do projeto do reator [8]. A Tabela 4.8 apresenta as condições de entrada usadas para as simulações [8].

Parâmetro	Valor
Pressão de entrada	15 MPa
Temperatura de entrada	270 °C
Fluxo de massa de entrada	1010 kg/m^2s
Fator linear de potência (q')	17.55 kW/m
Fração de potência produzida pelo refrigerante	0

Tabela 4.8: Condições de entrada no núcleo do reator aplicadas ao modelo na simulação usando STHIRP [8].

4.2 OpenFOAM

O programa OpenFOAM consiste na implementação de um pacote de algoritmos para a solução de equações de diferenciais em meios contínuos [19]. Dentre as possibilidades de utilização do programa se encontram as soluções das equações de conservação de massa, momento e energia, apresentadas nas expressões 4.1, 4.2 e 4.3 [19]. O método usado pelo programa para as soluções das equações de balanço é o de volumes finitos, *Finite Volume Method (FVM)*. A implementação do método foi realizada no código pelos desenvolvedores através da linguagem C++, usando programação orientada à objetos para estruturação dos solucionadores disponíveis no pacote de códigos do OpenFOAM [19]. As quatro etapas seguidas pelo algoritmo de volumes finitos são [19]:

- A modelagem física do problema a ser resolvido.
- A discretização do domínio, em um conjunto de volumes finitos, usada para a descrição do problema (construção da malha).
- A descrição das equações diferenciais de conservação de forma algébrica pelo FVM.
- A solução da matriz de equações algébricas geradas pelo FVM por método interativo ou inversão de matriz.

A Figura 4.6 apresenta um diagrama esquemático do algoritmo usado.

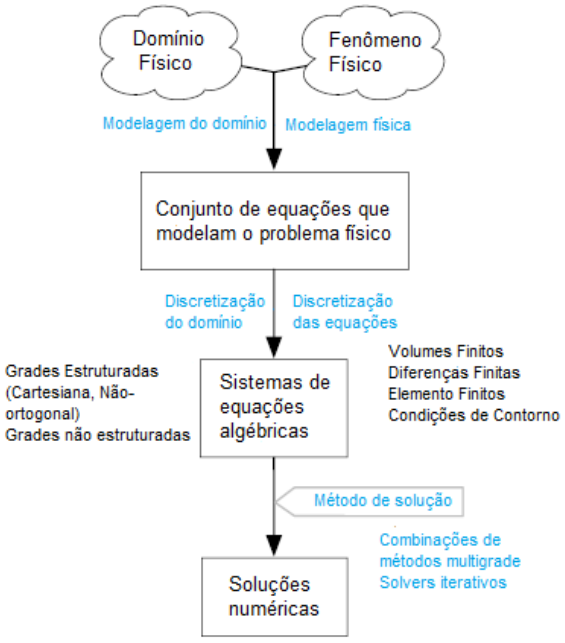

Figura 4.6: Diagrama da metodologia do método de volumes finitos [19] (adaptado).

Na sequência de passos do algoritmo FVM, os primeiros dois itens são especificados pelo usuário do programa enquanto os dois últimos são resolvidos internamente pelo algoritmo de cada solucionador do programa. Tendo em vista que computadores apenas são capazes de realizar cálculos numéricos algébricos, o método de volumes finitos transforma as equações diferenciais de conservação em equações algébricas. Para a descrição das equações de conservação de forma algébrica, o FVM usa o teorema de Gauss para transformar os divergentes contidos nas equações de conservação em fluxos de campos vetoriais através da superfície em cada volume finito descrito pelo usuário na entrada do programa. A Figura 4.7 apresenta um exemplo de uma malha usando volumes finitos de geometria cúbica, onde cada cubo representa um volume finito.

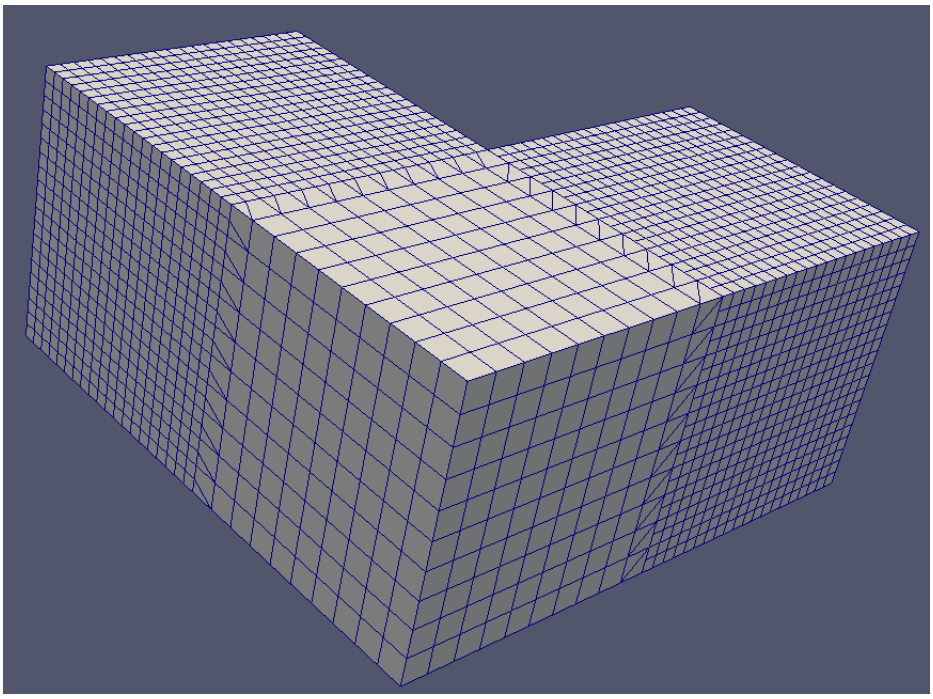

Figura 4.7: Exemplo de malha usando volumes finitos cúbicos [46].

Esses fluxos, calculados na superfície de cada volume, que quantificam a taxa de variação das propriedades nos volumes de controle, podem ser transformados em equações algébricas usando o método de diferenças finitas ou serem aproximados pelo fluxo médio (no centroide da face) [19]. O presente trabalho realizou o cálculo térmico do elemento de maior potência no programa OpenFOAM em duas etapas:

- Simulação somente da região do fluido em regime estacionário, para a análise de malha usando o solucionador BuoyantSimpleFoam.
- Simulação completa das varetas e do refrigerante por meio do solucionador CHTMultiRegion.

4.2.1 Simulação da região do fluido do elemento combustível de maior potência usando o solucionador BuoyantSimpleFoam

O programa OpenFOAM possui em sua arquitetura uma série de subprogramas (solucionadores) que resolvem problemas físicos que vão além da fluidodinâmica computacional (CFD) [47]. Dentre os solucionadores disponíveis, o BuoyantSimpleFoam é capaz de resolver o problema de escoamento de fluidos em regime estacionário, compressível e turbulento [48].

Para a simulação são necessárias as especificações da malha, usada no método de volumes finitos e das condições de contorno, ou condições iniciais, usadas na fronteira das equações diferenciais resolvidas pelo solver.

A Figura 4.8 apresenta a primeira malha construída para a simulação usando BuoyantSimpleFoam.

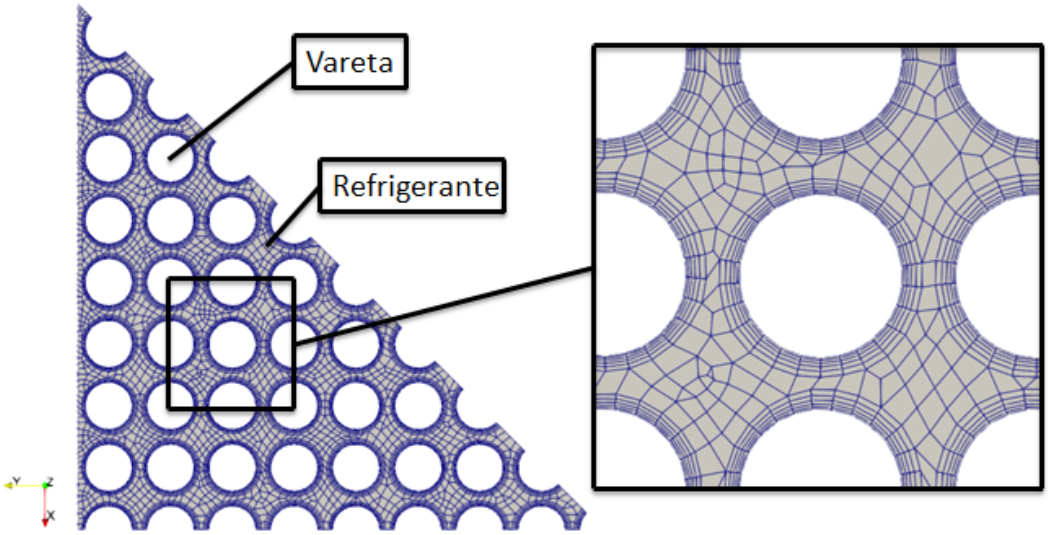

Figura 4.8: Malha usada na primeira simulação usando o BuoyantSimpleFoam. Fonte: Autor.

Tipicamente durante o processo de construção de uma malha, é recomendável que a malha seja mais refinada (com maior densidade de volumes finitos) nas regiões de maior gradiente de temperatura. Esse procedimento de refino de malha aumenta a precisão do método de volumes finitos, todavia também aumenta o custo computacional de cada simulação. Portanto, o nível adequado do refino da malha depende da sensibilidade do usuário, sendo recomendável uma comparação entre mais de um tipo diferente de malha (processo de análise de malha), que será apresentada durante as próximas seções. No processo de construção de malha, o número de volumes axiais quantifica o número de volumes finitos na direção de escoamento do refrigerante, denotado nas simulações como eixo Z no sistema de coordenadas definido para todas as simulações. O número de elementos

ao redor das varetas corresponde ao número de volumes finitos circundando cada vareta, fixado para cada nível axial. Na análise de malha, a assimetria mede o distanciamento do volume em relação a um volume ideal (cúbico), enquanto a não-ortogonalidade mede o ângulo deslocamento do vetor normal a superfície dos volumes finitos em relação ao vetor que liga dois centroides de volumes finitos adjacentes [19]. Essas grandezas são importantes para estimar o quão bem o método de volumes finitos calcula o fluxo das propriedades termo-físicas, envolvidas nas equação diferenciais resolvidas pelo programa, na superfície dos volumes finitos. Em suma, quanto menor os valores de assimetria e não ortogonalidade, melhor a qualidade da malha. A Tabela 4.9 apresenta os principais parâmetros da malha.

Número de volumes axiais	150
Número de elementos ao redor de cada vareta	32
Número de camadas de inflação	5
Assimetria máxima	1,481
Não-ortogonalidade Máxima	60,611
Não-ortogonalidade média	4,3349

Tabela 4.9: Parâmetros usados na malha para a simulação da região de fluido do elemento de maior potência do reator SMART. Fonte: Autor.

Durante as próximas seções será apresentada a análise de malha a fim de verificar a qualidade das simulações na região do fluido.

4.2.2 Condições de contorno aplicadas à superfície das varetas na simulação do fluido usando BuoyantSimpleFoam

A simulação somente do refrigerante usando BuoyantSimpleFoam levou em conta a superfície das varetas como condições de contorno para as equações diferenciais no estudo térmico. Neste estudo, de maneira análoga a distribuição de potência realizada no programa STHIRP, a potência da região simulada foi distribuída na superfície das varetas seguindo três etapas:

- Etapa 1: A potência nominal do reator foi dividida pelo número de elementos combustíveis, onde foi encontrada a potência média por elemento (5.79 MW). Em seguida, a potência foi multiplicada pelo fator de potência radial do elemento combustível mais quente (1.455), de acordo com o relatório da KAERI, onde foi encontrada a potência térmica do elemento mais quente (8.42 MW) [8].

- Etapa 2: A potência do elemento foi dividida pelo número de varetas combustíveis (240), onde foi obtida a potência média por vareta para o caso do elemento mais quente

neste caso (35.1 kW). A potência total de cada vareta foi calculada multiplicando a potência média calculada pelo fator radial de potência calculada pelo MCNP (mesma distribuição usada no programa STHIRP).

- Etapa 3: Na superfície de cada vareta, a potência foi distribuída usando um perfil axial senoidal de potência. A amplitude do seno foi ajustada para cada vareta de maneira que a integral da potência sobre a superfície de cada vareta seja igual a potência total da respectiva vareta (calculada na etapa 2).

Como a região ativa de todas as varetas são iguais, a frequência angular e a fase do seno que foi implementado para modelar a densidade superficial de potência foram os mesmos variando apenas a amplitude para cada vareta. A equação 4.15 apresenta a potência P(z), por unidade de superfície, como função da altura das varetas z.

$$P(z) = Asen(\frac{\pi}{2}z) \tag{4.15}$$

Onde a amplitude A, em W/m^2, modela a potência de acordo com a potência total de cada vareta. Os zeros da função densidade de potência ocorrem em z=0 m e z=2 m, que são as extremidades do comprimento ativo de todas as varetas. Seguindo a etapa 3, a amplitude A da equação 4.15 de cada vareta foi calculada integrando a equação na superfície das varetas igualando a integral à potência total de cada vareta, calculada previamente na etapa 2. A Tabela 4.10 apresenta os valores das amplitude A de cada vareta.

Vareta	Fator de Potência	Potência da vareta (W)	Amplitude A (W/m²)
1 (vareta completa)	1,00	35098,68	923649,58
2 (vareta completa)	0,99	34747,70	914413,08
3 (vareta completa)	0,92	32290,79	849759,11
4 (vareta completa)	0,95	33343,75	877467,11
5 (vareta completa)	0,99	34747,70	914413.09
6 (vareta completa)	0,98	34396,71	905176,59
7 (vareta completa)	1,10	38608,55	1016014,54
8 (vareta completa)	0,97	34045,72	895940,10
9 (vareta completa)	0,00	0,00	0,00
10 (vareta completa)	0,93	32641,78	858994,11
11 (vareta completa)	1,01	35449,67	932846,08
12 (vareta completa)	0,00	0,00	0,00
13 (vareta completa)	0,99	34747,70	914413,09
14 (vareta completa)	1,03	36151,65	951359,07
15 (vareta completa)	1,10	38608,55	1016014,55
16 (vareta completa)	0,00	0,00	0,00
17 (vareta completa)	1,06	18602,31	979068,16
18 (vareta completa)	1,12	39310,53	1034487,53
19 (vareta completa)	1,24	43522,37	1145325,49
20 (vareta completa)	1,14	40012,50	1052960,53
21 (vareta completa)	1,02	35800,66	942122,58
22 (vareta completa)	1,08	37906,58	997541,55
23 (vareta completa)	1,05	36853,62	969832,06
24 (vareta completa)	0,00	0,00	0,00
25 (vareta completa)	1,03	36151,65	951359,05
26 (vareta completa)	1,13	39661,51	1043724,03
27 (vareta completa)	1,10	38608,55	1016014,55
28 (vareta completa)	1,08	37906,58	997541,55
29 (meia vareta)	1,09	38257,57	1006778,04
30 (meia vareta)	1,04	36502,63	960595,56
31 (meia vareta)	0,99	34747,70	914413,08
32 (meia vareta)	0,00	0,00	0,00
33 (meia vareta)	1,11	19479,77	1025251,04
34 (meia vareta)	0,00	0,00	0,00
35 (meia vareta)	1,12	19655,27	1034487,54
36 (meia vareta)	1,26	22112,17	1163798,48
37 (meia vareta)	0,00	0,00	0,00
38 (meia vareta)	1,11	19479,77	1025251,04
39 (meia vareta)	0,00	0,00	0,00
40 (meia vareta)	1,24	21761,18	1145325,48
41 (meia vareta)	1,21	21234,71	1145325,48
42 (meia vareta)	0,00	0,00	0,00
43 (meia vareta)	1,24	21761,19	1145325,52
44 (meia vareta)	1,25	21936,68	1154562,10
45 (1/8 de vareta)	0,00	0,00	0,00

Tabela 4.10: Amplitude A calculada para a função de potência aplicada a cada vareta no modelo térmico do fluido. Fonte: Autor.

Durante as simulações as varetas combustíveis foram consideradas radialmente simétricas, isto é, a potência gerada é função apenas da altura da vareta.

Na região do refrigerante foram consideradas condições de contornos equivalentes àquelas usadas na simulação usando o programa STHIRP, isto é, o fluxo de massa foi apenas substituído pela velocidade de entrada, de acordo com a referência da KAERI [8]. Na Tabela 4.11 são apresentados os valores impostos na fronteira do refrigerante para os campos de temperatura, velocidade e pressão [8].

Pressão de entrada do refrigerante no elemento combustível	15 MPa
Pressão de saída do refrigerante no elemento combustível	15 MPa
Velocidade de entrada do refrigerante no elemento combustível	1,294 m/s
Velocidade de saída do refrigerante no elemento combustível	1,294 m/s
Temperatura de entrada do refrigerante no elemento combustível	270 °C

Tabela 4.11: Condições de contorno aplicadas ao refrigerante do reator [8].

4.2.3 Análise de malha

As primeiras simulações realizadas em OpenFOAM foram baseadas em um caso onde o elemento combustível foi discretizado somente na região do refrigerante usando uma distribuição de potência previamente calculada pelo programa MCNP. Durante os trabalhos, nove tipos diferentes de malha foram analisadas, variando a quantidade de volumes finitos em diferentes posições. Das nove construídas, três malhas com diferente número de camadas de inflação (número de camada de volumes finitos ao redor das varetas na direção radial) são apresentadas. As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam malhas com 3, 5 e 9 camadas de inflação respectivamente.

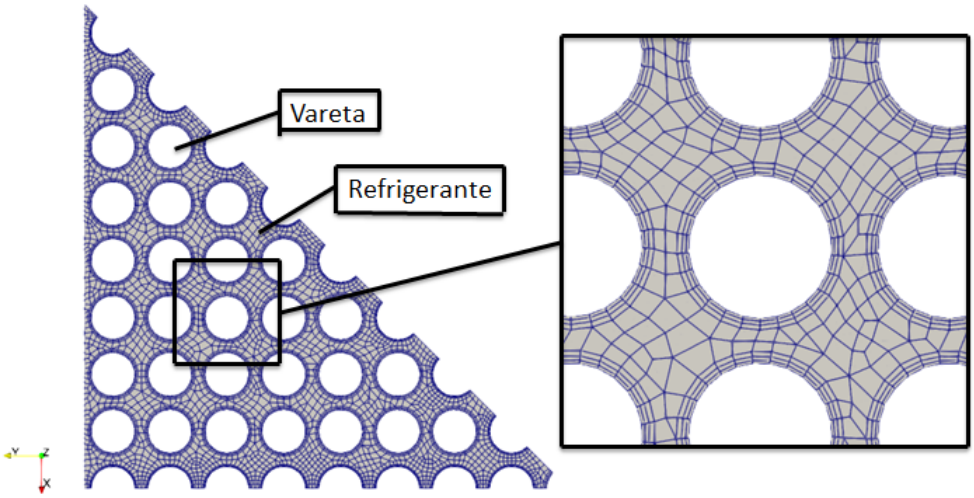

Figura 4.9: Malha usando três camadas de inflação. Fonte: Autor.

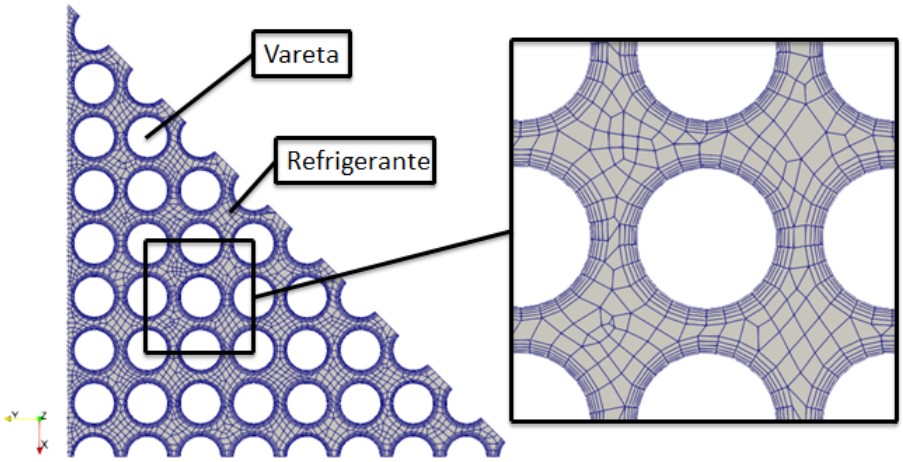

Figura 4.10: Malha com cinco camadas de inflação. Fonte: Autor.

Além das camadas de inflação, foi avaliada a sensibilidade da malha analisada variando o número de volumes ao redor das varetas combustíveis nas demais seis malhas. No

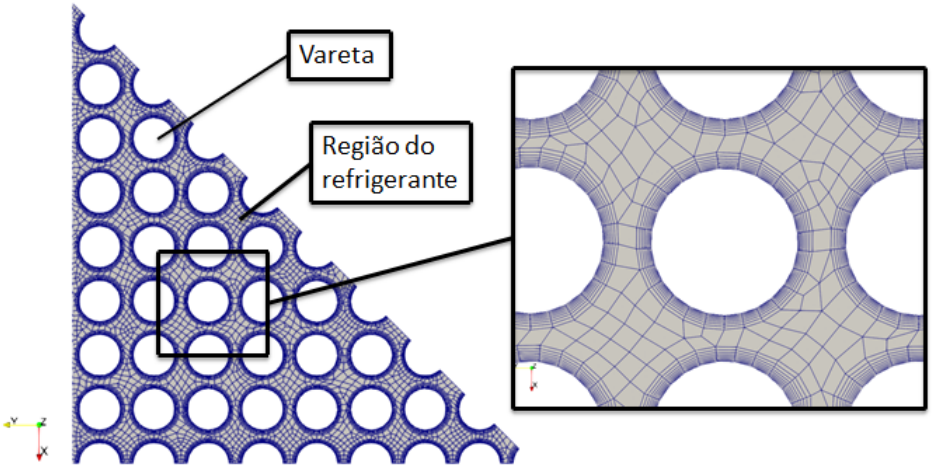

Figura 4.11: Malha com nove camadas de inflação. Fonte: Autor.

cálculo efetuado pelas diferentes malhas, foi obtida uma variação de temperatura máxima no cálculos do programa ordem de 2 °C, que corresponde a menos de 1 % de diferença de temperatura relativa, que o refrigerante no núcleo do reator opera a aproximadamente 300 $^{\circ}C$.

4.2.4 Modelagem do elemento de maior potência do reator SMART usando o solucionador CHTMultiRegion

O solucionador CHTMultiRegionSimpleFoam, contido no pacote OpenFOAM, foi construído para ser capaz de solucionar o problema de transferência de calor conjugado em regiões de sólido e fluido [49]. Para a construção do caso completo do elemento, a simulação foi implementada considerando a região do combustível nuclear como sólida e uma resistência térmica que quantifica a existência do revestimento de zircaloy-4 nas varetas. Na prática, a resistência térmica funciona com o usuário fornecendo para o programa, a condutividade térmica e a espessura do material modelado (revestimento). Com o valor da condutividade térmica k_{TH} e da espessura do material, o programa pode quantificar a queda de temperatura nas respectivas regiões através da condutância térmica C_{TH}, de acordo com a equação 4.16.

$$C_{TH} = \frac{Q}{\Delta T} \tag{4.16}$$

Onde Q corresponde ao calor conduzido pela região modelada e ΔT corresponde a queda de temperatura na respectiva região (revestimento das varetas).

Para a simulação do caso completo envolvendo o combustível, revestimento e refrigerante foram impostas, para a região de refrigerante, as mesmas condições de pressão, temperatura e vazão de entrada usadas para as simulações no código STHIRP (Tabela 4.8). A principal diferença do caso CHT em relação ao caso só do fluido, é que a superfície das varetas do reator não atuam como condição de fronteira mas como interface entre as regiões das varetas e do refrigerante. As propriedades termo-físicas da água foram calculadas usando uma interpolação de segunda ordem em função da temperatura. Isto foi feito porque interpolações usando polinômios de maior ordem no programa envolvem erros numéricos mais altos. Para a construção do polinômio interpolador, foram usados os dados disponíveis na subrotina ACQUA 97 do programa STHIRP [37], apresentados na Tabela 4.6. A região sólida do modelo CHT (combustível nuclear) foi construída usando as propriedades termo-física típicas do dióxido de urânio disponibilizadas na literatura, mesmas propriedades usadas no programa STHIRP [17] [40]. Analogamente ao caso do refrigerante, as propriedades também foram tomadas como função de segundo grau da temperatura. As propriedades foram interpoladas pelo programa usando os coeficiente até segunda ordem apresentados na Tabela 4.4. No solucionador CHTMultiRegions, a distribuição de potência foi feita ao longo do volume ocupado por cada combustível nuclear presente nas varetas do elemento combustível de maneira independente. Analogamente ao

feito no caso da simulação do refrigerante, todavia com uma nova distribuição de potência na região do combustível nuclear, a distribuição de potência na região de combustível nuclear envolveu cinco passos:

- Passo 1: A potência nominal do reator foi dividida pelo número de elementos combustíveis no reator (57) a fim de obter a potência média por elemento (5,79 MW).
- Passo 2: A potência média por elemento foi multiplicada pelo fator de potência do elemento mais potente do reator SMART no início do ciclo de queima (1,455), onde foi encontrada a potência do elemento de interesse (8,42 MW).
- Passo 3: A potência do elemento mais quente do reator foi dividida pelo número de varetas combustíveis presentes no elemento combustível do Tipo A (240), onde foi obtida a potência média por vareta (35,1 kW).
- Passo 4: Usando a distribuição de potência, obtida pelo programa MCNP, foram descobertas as potências individuais para cada vareta.
- Passo 5: A potência de cada vareta foi distribuída na região de combustível nuclear usando uma função senoidal, modelada em função da altura da vareta.

A principal diferença na distribuição de potência entre a presente simulação e a do caso apenas do refrigerante, foi que a densidade de potência foi imposta no programa como função volumétrica da posição, isto é, a densidade de potência foi introduzida por unidade de volume na entrada do programa. A equação 4.17 mostra a equação usada para modelar o combustível nuclear.

$$P(z) = Asen(\omega z + \delta) \tag{4.17}$$

Onde $P(z)$ corresponde a densidade volumétrica de potência, A corresponde à amplitude (por unidade de volume), ω corresponde à frequência angular e δ à fase. Na simulação da região sólida, foram feitas as mesmas considerações do modelo só do fluido para encontrar os parâmetros da equação 4.17, isto é, a frequência angular ω e fase δ foram encontradas como respectivamente $\pi/2$ e 0, impondo que a potência seja nula fora da região de combustível e a amplitude A de forma que a integração da expressão 4.17 no volume do combustível nuclear seja igual a potência total de cada vareta (calculada no passo 4).

Já na região de refrigerante, o calor específico, tal como a condutividade térmica da água também são descritos como um polinômio de segundo grau, através de uma

interpolação de segundo grau nos valores fornecidos pela biblioteca ACQUA 97. As equações 4.18 e 4.19 mostram respectivamente os polinômios implementados para a condutividade térmica (κ) e o calor específico (c_p) em função da temperatura da água.

$$\kappa = -9,0725.10^{-6}T^2 + 0,0085T - 1,3310 \tag{4.18}$$

$$c_p = 0,4837T^2 - 522,6186T + 146128.9073 \tag{4.19}$$

No caso da simulação usando o solver CHTMultiRegion, a malha para a simulação foi construída para as regiões de refrigerante e de combustível. A Figura 4.12 mostra a malha completa produzida considerando as regiões de combustível e de refrigerante.

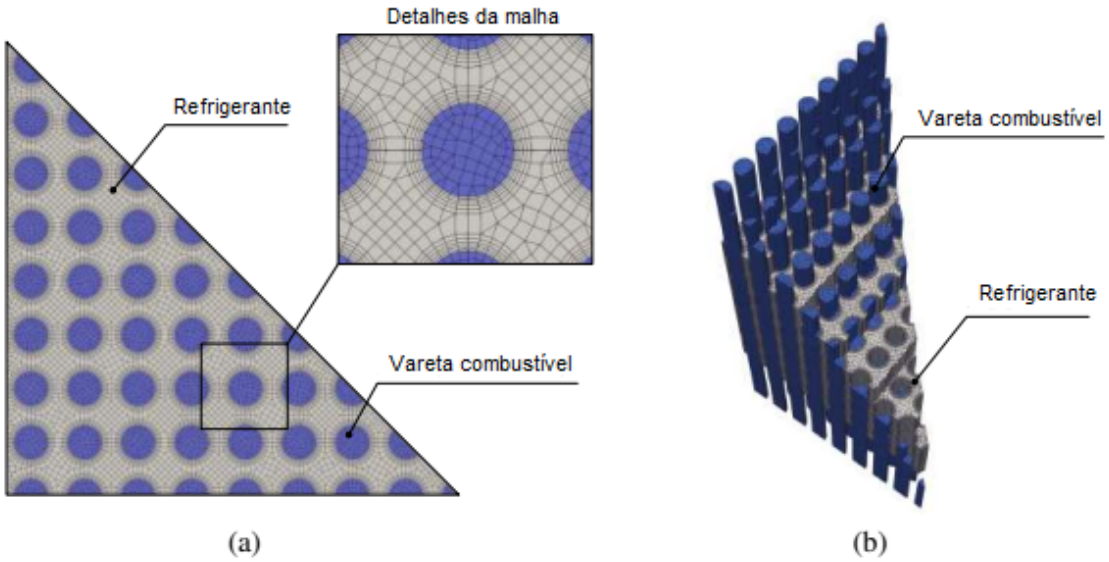

Figura 4.12: Malha usada nas simulação considerando as varetas e o refrigerante: (a) visão radial da malha e (b) corte 3D na malha para melhor visualização. Fonte: Autor.

Para a malha usada na simulação CHT, a Tabela 4.12 apresenta os principais parâmetros da malha.

Não-ortogonalidade máxima	33,8567
Não-ortogonalidade média	2,9456
Assimetria máxima	0,5276
Razão de aspecto máxima	106,67

Tabela 4.12: Principais parâmetros da malha usada nas simulações usando o solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor.

Os parâmetros apresentados na Tabela 4.12 são uma estimativa indireta dos erros de cálculo devido a discretização do domínio por meio de volumes finitos. De acordo com o

benchmark obtido pelos usuários do programa OpenFOAM, malhas com não-ortogonalidade inferiores a 60, apresentam boa concordância com resultados experimentais.

Capítulo 5

Resultados

No presente trabalho, os resultados estão divididos entre a verificação global das simulações e os parâmetros particulares obtidos pelos cálculos usando STHIRP e OpenFOAM. As simulações feitas usando os dois programas apresentam resultados complementares, isto é, enquanto o programa STHIRP apresenta valores médios de temperatura em função da altura OpenFOAM apresenta parâmetros tridimensionais de temperatura e velocidade. Durante as próximas seções são discutidos os principais resultados obtidos pelos dois programas, sendo detalhados os valores obtidos pela simulações dos solucionadores BuoyantSimpleFoam e CHTMultiRegion.

5.1 Verificação dos resultados globais obtidos pelos programas STHIRP e OpenFOAM

Para fins de verificação dos resultados globais (médios) fornecidos pelos dois programas, foram comparados valores comuns aos dois, isto é, os valores médios dos campos de temperatura ΔT e pressão ΔP. Esses valores correspondem respectivamente a diferença entre temperatura e pressão média de saída e temperatura e pressão média de entrada do elemento. A Tabela 5.1 apresenta os valores calculados pelos dois programas, sendo a diferença relativa calculada pela razão entre a diferença dos resultados calculados pelos dois programas sobre o valor calculado pelo programa STHIRP.

	STHIRP	OpenFOAM	Diferença relativa
ΔT (°C)	60,45	59,1	2%
ΔP (kPa)	17	16	5,8%

Tabela 5.1: Comparação de resultados entre os programas STHIRP e OpenFOAM. Fonte: Autor.

Os erros globais produzidos pelo cálculo usando os dois programas estão compreendidos nos valores considerados aceitáveis para simulações termo-hidráulicos (em geral inferiores a 7 %). Dessa forma os parâmetros calculados pelos dois programas apresentam boa concordância entre si.

Além da comparação entre os dois programas, os valores obtidos para a variação total de temperatura no elemento, foram submetidos à comparação com o valor esperado teoricamente. Um balanço de energia fornece que o aumento de temperatura médio do elemento ΔT é dado pela equação 5.1.

$$\Delta T = \frac{P}{c_p \dot{m}} \tag{5.1}$$

Onde $P = 1,053$ MW corresponde à potência do oitavo do elemento simulado, $\dot{m} = 3,218\,\mathrm{kg/s}$ corresponde à vazão média de refrigerante na região simulada, e $c_p = 5,5004\,\mathrm{kW/kg°}C$ ao calor específico da água. Na Tabela 5.2, são comparados os valores do aumento de temperatura média no elemento, calculada pelos dois programas, com o previsto teoricamente pela equação 5.1, onde o erro foi tomado como o desvio padrão (SD) entre os três valores obtidos.

	STHIRP	OpenFOAM	Teórico	SD
ΔT (°C)	60,45	59,1	59,49	0,57

Tabela 5.2: Comparação dos aumentos totais de temperatura calculados pelos dois programas com o valor esperado teoricamente. Fonte: Autor.

As diferenças entre os valores calculados pelos programas e o teórico podem ser justificadas pelo fato de que o calor específico usado na equação 5.1 foi tomado como contante, usando o valor da propriedade a pressão de 150 *bar* e a uma temperatura de referência de $T = 300,96$ °C, enquanto os dois programas consideram a dependência dessa com a temperatura da água.

5.2 Resultados obtidos pelo programa STHIRP

Os resultados do programa STHIRP incluem as temperaturas, pressões e fluxos de massa para todos os subcanais, assim como a distribuição de temperatura para todas as varetas, tal como o perfil de DNBR mínimo para o elemento simulado. Além destas propriedades térmicas, o programa STHIRP também calcula os valores da fração de vazio e do título de vapor para todos os canais. Na Tabela 5.3 estão especificados os valores das propriedades termo-físicas do refrigerante na saída do elemento de maior potência (2

metros de altura) para cada subcanal, numerados de acordo com a Figura 4.2. Os valores calculados pelo programa foram: a entalpia (H), a temperatura (T), a densidade (ρ), o título de vapor (χ), a fração de vazio (α), a vazão ($\dot{m}$) e o fluxo de massa (ϕ) de saída do elemento para cada subcanal. O programa STHIRP reporta em cada nível axial a média do intervalo axial do valor das propriedades termo-físicas e na Tabela 5.3 estão apresentados os valores médios na saída da região ativa (2 m), que corresponde ao nodo axial 30 na nodalização apresentada, para todos os canais.

Canal	H (kJ/kg)	T (°C)	ρ (g/cm^3)	χ	α	$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi(kg/m^2s)$
1	1554.50	335.06	0.6323	0.0000	0.0000	0.0911	1037.0
2	1500.90	327.35	0.6578	0.0000	0.0000	0.0859	977.0
3	1493.78	326.27	0.6611	0.0000	0.0000	0.0854	971.5
4	1527.32	331.26	0.6455	0.0000	0.0000	0.0898	1021.4
5	1496.26	326.65	0.6599	0.0000	0.0000	0.0858	976.8
6	1509.52	328.65	0.6539	0.0000	0.0000	0.0865	984.2
7	1558.95	335.66	0.6301	0.0000	0.0000	0.0938	1067.2
8	1496.67	326.71	0.6597	0.0000	0.0000	0.0859	977.8
9	1492.36	326.06	0.6617	0.0000	0.0000	0.0858	976.8
10	1493.07	326.17	0.6614	0.0000	0.0000	0.0858	976.9
11	1456.61	320.44	0.6775	0.0000	0.0000	0.0813	925.5
12	1500.48	327.29	0.6580	0.0000	0.0000	0.0864	982.8
13	1518.70	330.00	0.6495	0.0000	0.0000	0.0875	995.6
14	1513.94	329.30	0.6518	0.0000	0.0000	0.0876	997.2
15	1523.29	330.67	0.6474	0.0000	0.0000	0.0884	1005.5
16	1504.76	327.94	0.6560	0.0000	0.0000	0.0868	987.5
17	1545.85	333.88	0.6366	0.0000	0.0000	0.0914	1039.7
18	1539.24	332.95	0.6398	0.0000	0.0000	0.0889	1012.0
19	1560.30	335.85	0.6294	0.0000	0.0000	0.0935	1063.7
20	1508.68	328.53	0.6543	0.0000	0.0000	0.0870	990.5
21	1523.15	330.65	0.6475	0.0000	0.0000	0.0876	996.6
22	1572.44	337.46	0.6233	0.0000	0.0000	0.0951	1082.4
23	1470.73	322.70	0.6714	0.0000	0.0000	0.0820	932.7
24	1512.97	329.16	0.6522	0.0000	0.0000	0.0870	989.9
25	1530.15	331.66	0.6441	0.0000	0.0000	0.0883	1004.9
26	1565.94	336.61	0.6266	0.0000	0.0000	0.0934	1062.3
27	1542.97	333.48	0.6380	0.0000	0.0000	0.0889	1011.9
28	1578.96	338.30	0.6199	0.0000	0.0000	0.0936	1064.7
29	1564.82	336.46	0.6272	0.0000	0.0000	0.0460	1046.6
30	1542.80	333.45	0.6381	0.0000	0.0000	0.0453	1030.6
31	1496.55	326.69	0.6598	0.0000	0.0000	0.0430	979.2
32	1541.57	333.28	0.6386	0.0000	0.0000	0.0447	1018.4
33	1511.19	328.90	0.6531	0.0000	0.0000	0.0436	992.9
34	1514.19	329.34	0.6517	0.0000	0.0000	0.0436	992.0
35	1596.67	340.54	0.6108	0.0000	0.0000	0.0500	1137.1
36	1565.47	336.55	0.6269	0.0000	0.0000	0.0458	1042.0
37	1545.55	333.84	0.6367	0.0000	0.0000	0.0674	1022.4
38	1553.16	334.88	0.6329	0.0000	0.0000	0.0455	1035.9
39	1535.93	332.48	0.6413	0.0000	0.0000	0.0450	1023.3
40	1531.63	331.87	0.6434	0.0000	0.0000	0.0448	1019.8
41	1545.25	333.80	0.6369	0.0000	0.0000	0.0454	1032.2
42	1541.26	333.23	0.6388	0.0000	0.0000	0.0452	1029.1
43	1549.75	334.42	0.6346	0.0000	0.0000	0.0454	1033.3
44	1571.21	337.30	0.6239	0.0000	0.0000	0.0464	1055.4

Tabela 5.3: Sumário das propriedades termo-físicas na saída dos subcanais calculadas pelo programa STHIRP. Fonte: Autor.

No caso das presentes simulações, os títulos de vapor e as frações de vazio foram obtidas iguais a zero em todos os pontos dos elementos simulados. Estes resultados já eram esperados tendo em vista que o reator SMART é pressurizado, isto é, opera a alta pressão justamente para que o refrigerante do reator seja mantido em estado líquido durante a operação, garantindo dessa forma uma melhor eficiência na transferência de calor entre as varetas e o refrigerante. O padrão observado na saída dos subcanais segue uma dependência direta com a distribuição de potência implementada na entrada do programa (Figura 4.3), isto é, os canais mais quentes estão em contato direto ou na região de maior potência. Das propriedades obtidas pelo programa para a saída do reator, foi identificado que a temperatura de saída mais alta ocorre no canal de número 35. Sendo assim, este canal foi selecionado para uma análise mais detalhada. A Tabela 5.4 apresenta as propriedades calculadas para o subcanal 35. Seguindo a nomenclatura imposta para as propriedades termo-físicas na Tabela 5.3, em função da altura (A) do subcanal, onde ΔP corresponde a variação da pressão em relação a pressão de referência na saída dos subcanais (valor zero da pressão).

A (cm)	Δ P (bar)	H (kJ/kg)	T (°C)	ρ (g/cm^3)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\phi(kg/m^2s)$
0.00	0.1742	1182.69	270.00	0.7804	0.0444	1010.0
6.67	0.1684	1184.37	270.34	0.7799	0.0444	1010.1
13.33	0.1627	1188.42	271.16	0.7785	0.0444	1010.2
20.00	0.1570	1194.79	272.44	0.7764	0.0444	1010.6
26.67	0.1513	1203.39	274.16	0.7735	0.0444	1011.2
33.33	0.1456	1214.12	276.31	0.7699	0.0445	1012.2
40.00	0.1400	1226.85	278.83	0.7656	0.0445	1013.4
46.67	0.1303	1241.43	281.70	0.7606	0.0445	1012.5
53.33	0.1247	1257.73	284.87	0.7549	0.0446	1014.9
60.00	0.1191	1275.49	288.29	0.7486	0.0447	1016.8
66.67	0.1136	1294.52	291.91	0.7417	0.0448	1018.8
73.33	0.1080	1314.59	295.67	0.7344	0.0449	1020.8
80.00	0.1025	1335.48	299.52	0.7265	0.0449	1023.0
86.67	0.0970	1356.94	303.42	0.7183	0.0450	1025.2
93.33	0.0916	1378.75	307.29	0.7098	0.0452	1027.6
100.00	0.0861	1400.64	311.11	0.7010	0.0452	1029.5
106.67	0.0764	1422.41	314.81	0.6921	0.0448	1020.0
113.33	0.0711	1444.05	318.40	0.6829	0.0450	1023.3
120.00	0.0658	1465.03	321.79	0.6736	0.0451	1026.9
126.67	0.0605	1485.11	324.94	0.6604	0.0451	1026.4
133.33	0.0552	1504.20	327.85	0.6441	0.0450	1023.7
140.00	0.0500	1522.12	330.50	0.6273	0.0449	1022.6
146.67	0.0448	1538.62	332.86	0.6118	0.0450	1024.4
153.33	0.0397	1553.42	334.91	0.5988	0.0452	1028.8
160.00	0.0299	1566.32	336.67	0.5869	0.0443	1009.1
166.67	0.0248	1577.52	338.11	0.5808	0.0450	1024.3
173.33	0.0198	1586.17	339.23	0.5794	0.0459	1044.1
180.00	0.0148	1592.32	340.00	0.5825	0.0469	1066.7
186.67	0.0099	1596.05	340.46	0.5903	0.0480	1092.5
193.33	0.0049	1597.45	340.63	0.6024	0.0492	1119.9
200.00	0.0000	1596.67	340.54	0.6108	0.0500	1137.1

Tabela 5.4: Propriedades termo-físicas calculadas pelo programa STHIRP para o subcanal 35. Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para o canal 35 mostram uma diminuição para a pressão a medida que a altura aumenta. A pressão menor no topo do canal indica apenas que o sentido de escoamento de refrigerante é da base para o topo do subcanal. Da análise dos dados foi observado ainda uma consistência entre os valores de pressão e de densidade, isto é, foram observados valores mais altos de densidade nas regiões de mais alta pressão.

As variações observadas nos valores do fluxo de massa e vazão podem ser explicadas pela redistribuição do refrigerante entre os canais adjacentes devido a diferença de pressão entre cada canal e os vizinhos, isto é, a diferença na massa de água do canal na simulação corresponde à massa perdida ou ganhada oriunda dos canais vizinhos. De acordo com a Tabela 5.3 o canal cuja temperatura de saída foi menor foi identificado como sendo o canal 11. A fim de verificarmos a diferença máxima no perfil de temperatura, foram dispostos em um gráfico os valores das temperaturas nos canais 35 e 11 como função da altura dos subcanais. A Figura 5.1 mostra o resultado obtido.

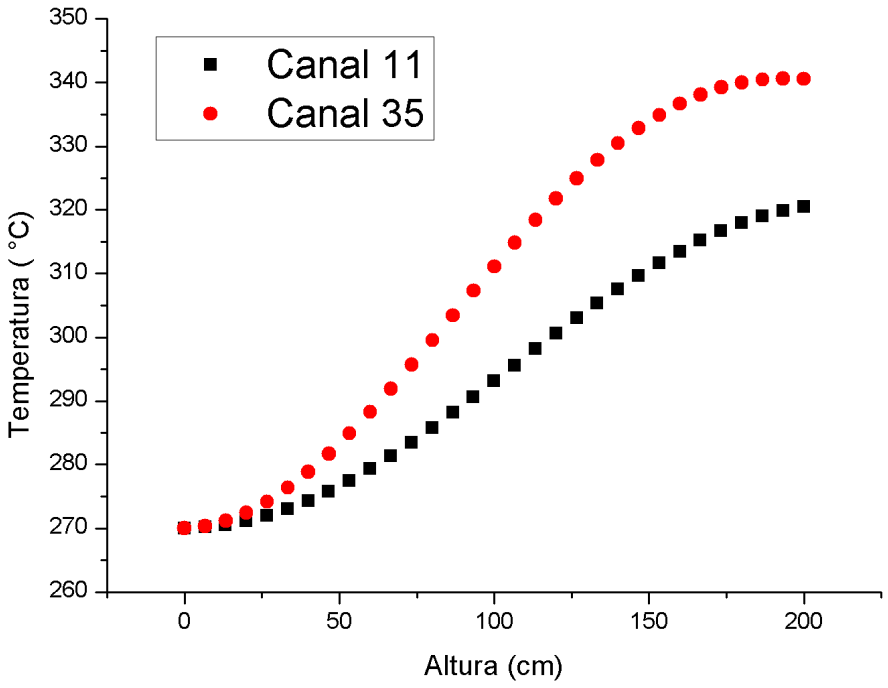

Figura 5.1: Comparação entre os perfis de temperatura dos canais 35 e 11 em função da altura dos canais. Fonte: Autor.

Para a região das varetas o programa calculou ainda as distribuições de temperatura em função da distância radial, isto é, do centro da vareta até a interface entre o revestimento para os 30 nodos axiais descritos na metodologia do modelo. Para fins de comparação,foram reportados o perfil de temperatura para o nodo central das varetas, a 1 m de altura, da vareta de maior (36) e menor (3) potência, de acordo com a distribuição calculada pelo MCNP (Tabela 4.8). A Figura 5.2 apresenta a distribuição de temperatura obtida em função da distância até o centro da vareta, tomada como o zero da distância radial.

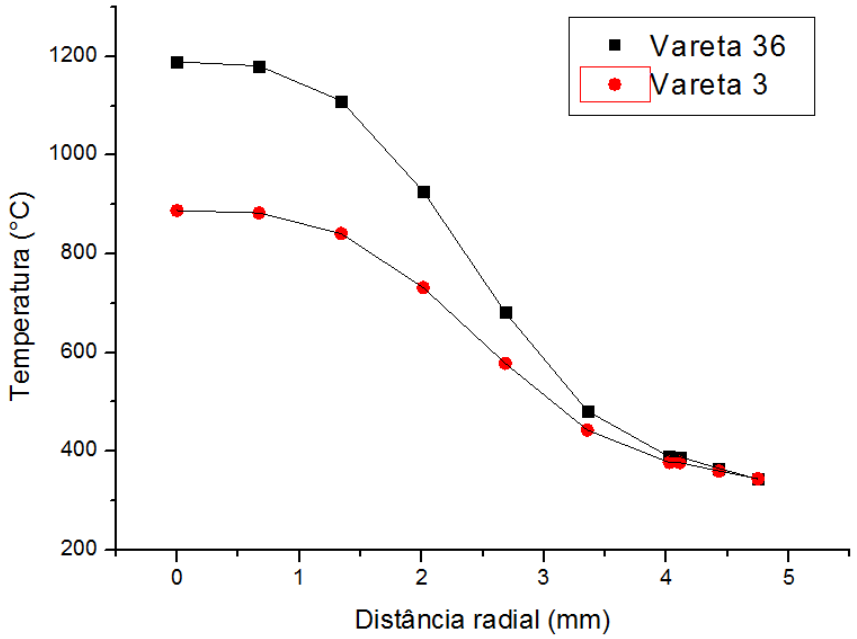

Figura 5.2: Comparação entre as temperaturas calculadas para as varetas 3 e 36 no centro do elemento combustível (1 m de altura). Fonte: Autor.

A escolha da apresentação mais detalhada da vareta de maior e de menor potência deve-se ao fato de que as demais varetas possuem distribuições de temperatura compreendidas no intervalo entre a vareta mais fria (3) e mais quente (36). Na Figura 5.2 foi observada uma grande diferença de temperatura no centro das duas varetas. Esse comportamento já era esperado devido a diferença entre os fatores de potência das duas varetas, de 0.92 para a vareta 3 e 1.26 para a vareta 36.

O programa STHIRP calculou ainda parâmetros de segurança relacionados à operação do reator. Para demonstrar a capacidade do modelo térmico na avaliação de diferentes configurações de operação, foi feita uma simulação testando o mesmo modelo térmico com o sistema operando a 115 % da potência nominal do reator. Para tanto, foi multiplicado o fator de potência linear ($17,55\ kW/m$) por um fator de $1,15$, resultando em uma potência linear de entrada de $20,18\ kW/m$. Esse fator, aplicado para demonstrar a capacidade do modelo, foi tomado com base na condição imposta para reatores do tipo PWR, de que o DNBR não pode assumir valores menores que $1,3$ a 115 % de potência nominal [45]. A Figura 5.3 apresenta o perfil de DNBR mínimo (MDNBR) nas configurações simuladas para o reator SMART, onde as curvas 100 % NP e 115 % NP denotam os valores calculados usando potência nominal de 100 % e 115 % da potência nominal respectivamente.

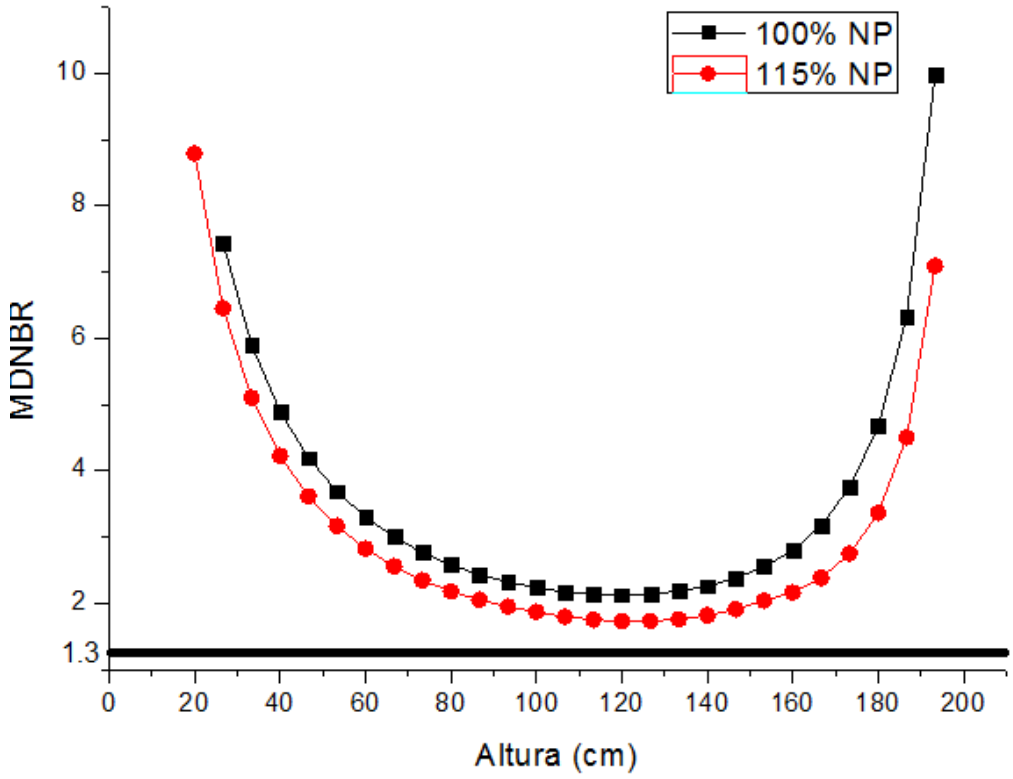

Figura 5.3: Comparação do perfil de MDNB para o modelo térmico usando potência nominal de 100 % e 115 %. Fonte: Autor.

Os valores de mínimo global do DNBR foram calculados como $2,127$ e $1,730$ para as simulações a 100 % e 115 % de potência respectivamente, bem acima do valor mínimo previsto nos testes de segurança de um PWR [45].

5.3 Resultados obtidos pelo programa OpenFOAM

Inicialmente no programa OpenFOAM foi construído um modelo térmico somente para a região do refrigerante do reator. Posteriormente o modelo completo do elemento combustível considerando as regiões das varetas também é apresentado. Durante o presente trabalho, os resultados obtidos pelos dois solucionadores são apresentados de modo complementar.

5.3.1 Resultados para a simulação somente da região do fluido

As simulações iniciais forneceram a distribuição de temperatura na região de refrigerante do elemento. Os resultados produzidos foram pós processados no software ParaView para melhor representação visual. A Figura 5.4 apresenta a distribuição de temperatura sob as condições definidas na seção metodologia, para 1/8 do elemento

combustível mais potente do reator.

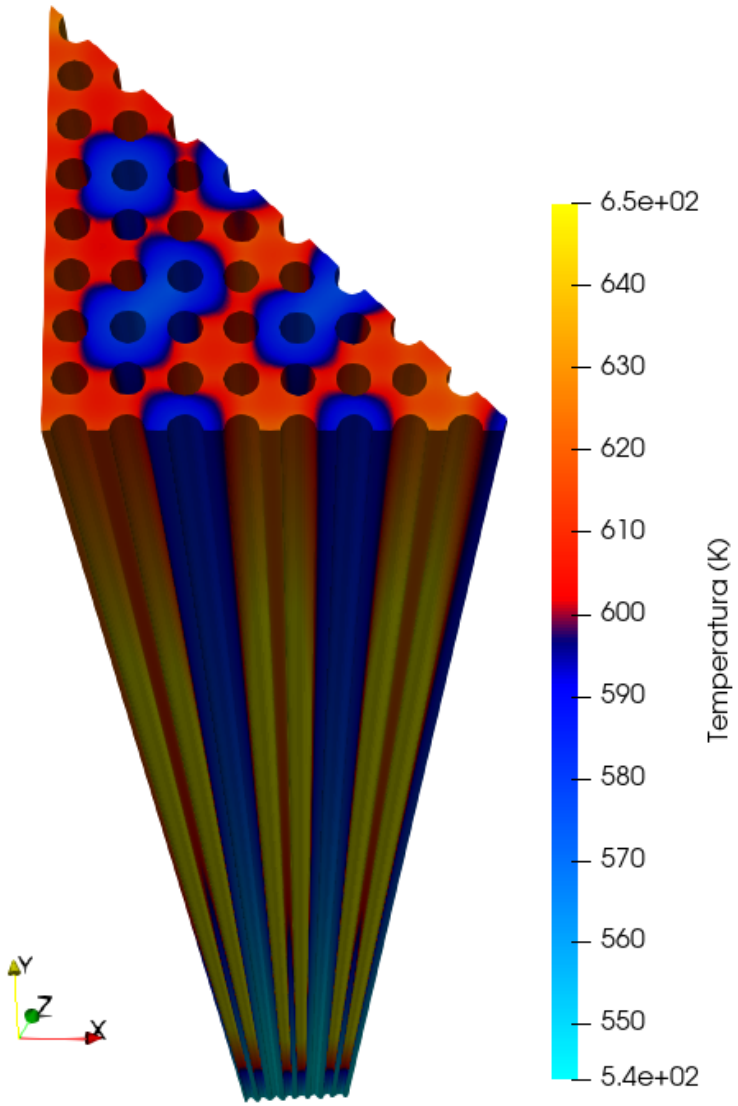

Figura 5.4: Distribuição de temperatura calculada na região do refrigerante do reator. Fonte: Autor.

Da visão geral do resultado obtido para o elemento combustível foi notada a não uniformidade radial da distribuição de temperatura do elemento. Este perfil de distribuição esta intimamente ligado à distribuição de potência imposta na entrada do programa (Tabela 4.10). A visão geral apresentada não possibilita uma visão detalhada do que está acontecendo com o refrigerante ao longo do elemento combustível. Para uma melhor visualização, foi feito um corte radial na metade do elemento combustível, isto é a um metro de altura.

A Figura 5.5 mostra os resultados obtidos para a temperatura do centro do elemento combustível.

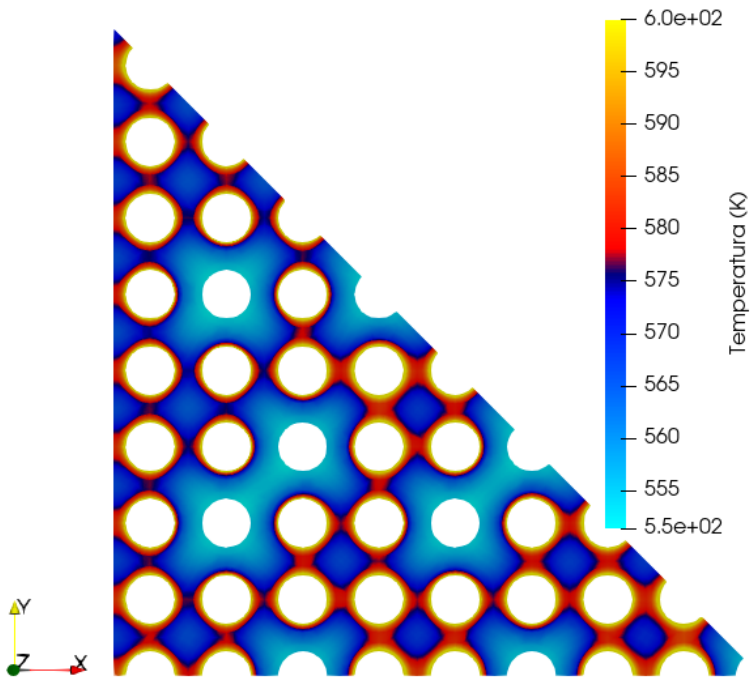

Figura 5.5: Distribuição radial de temperatura no centro do elemento combustível mais potente do reator SMART. Fonte: Autor.

A distribuição de temperatura obtida é, como esperado, inversamente proporcional a distância em relação a superfície das varetas. Do resultado apresentado, nota-se uma anisotropia da distribuição radial. A temperatura apresentada nos canais termo-hidráulicos é diretamente proporcional a densidade superficial de potência imposta na construção do modelo térmico. Para fins de um melhor detalhamento do elemento, foi produzido um gráfico da temperatura do refrigerante em função da altura do elemento combustível no centro do canal 11 (Figura 4.2) do elemento combustível. O canal foi selecionado em completude aos resultados apresentados usando STHIRP, isto é, enquanto este calculou a média da temperatura em cada nível axial, os resultados de OpenFOAM são apresentados no centro do canal. A Figura 5.6 apresenta o resultado obtido pelo solucionador BuoyantSimpleFoam para a temperatura do canal.

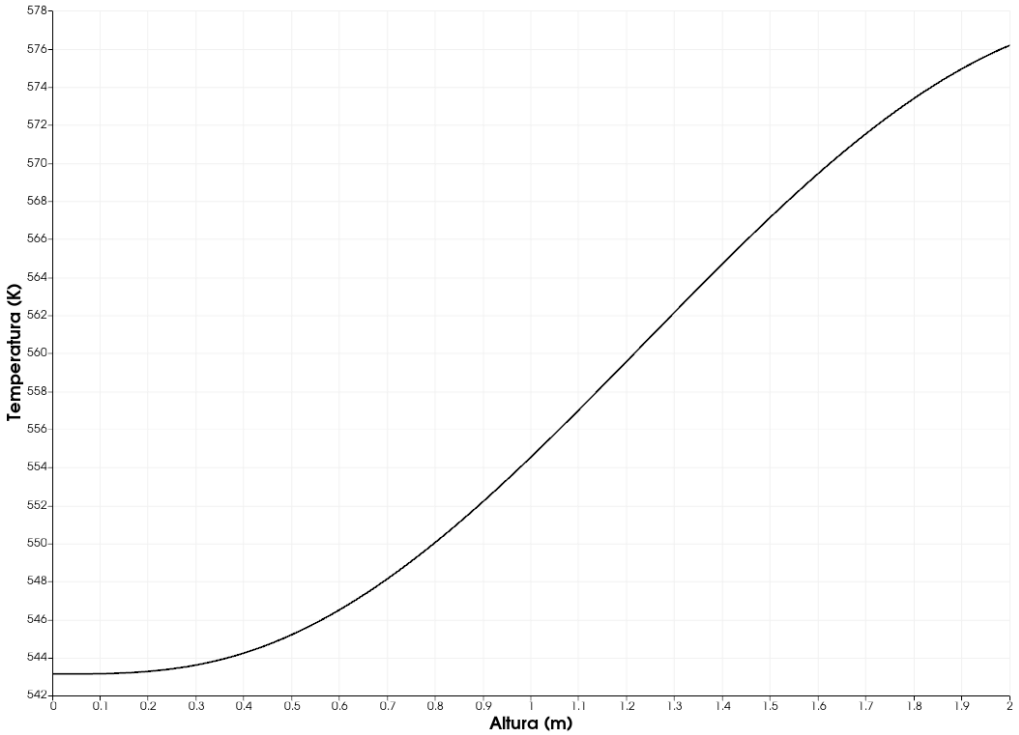

Figura 5.6: Temperatura calculada no centro do canal 11 em função da altura do elemento. Fonte: Autor.

A análise do gráfico gerado mostra que o crescimento de temperatura é mais pronunciado na região próxima ao centro do elemento (1 m), enquanto nas extremidades aumenta mais lentamente. O padrão observado é uma consequência direta do perfil senoidal de potência imposta no modelo como condição de contorno nas simulações.

Paralelamente aos cálculos envolvendo a temperatura, a simulação do fluido forneceu o perfil de velocidade do refrigerante no elemento combustível. A Figura 5.7 mostra a distribuição, do módulo de velocidade, obtida.

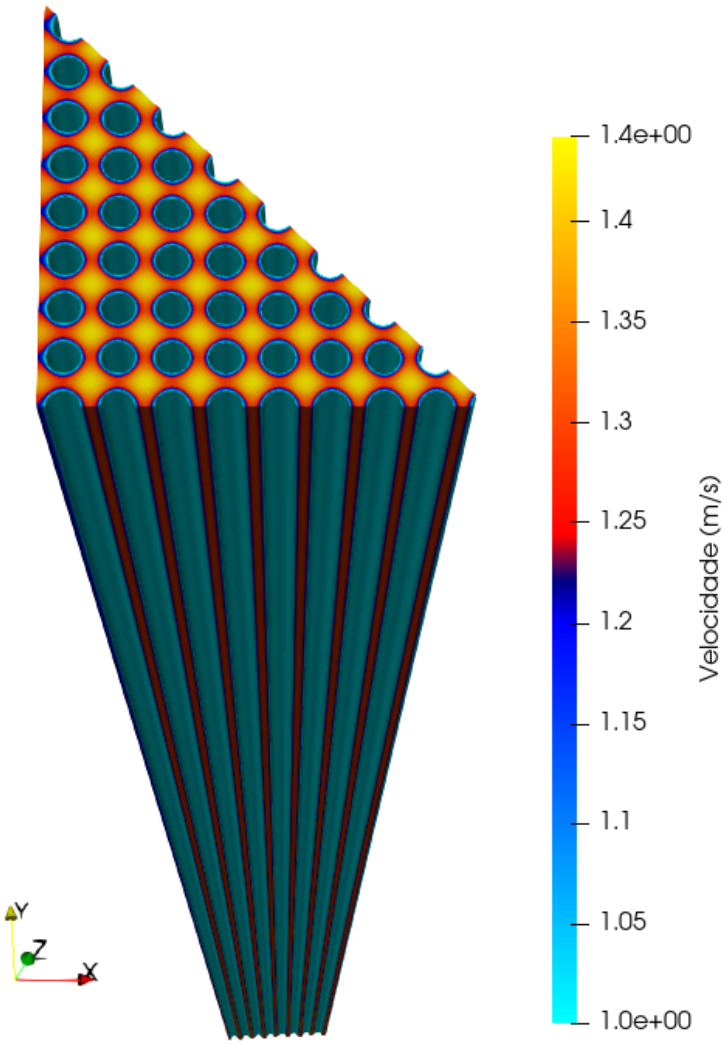

Figura 5.7: Distribuição de velocidades obtida da simulação da região do refrigerante do elemento mais potente do reator. Fonte: Autor.

Os resultados obtidos para os campos de velocidade forneceram valores mais altos no centro dos canais termo-hidráulicos. Essa implicação é decorrência direta da necessidade física da velocidade do fluido ser nula na superfície das varetas, isto é, no limite onde não há mais fluido. Além disso, foi notado uma dependência direta entre os perfis de velocidade e temperatura obtidos pelo programa. Para uma análise mais detalhada dessa relação de dependência, a Figura 5.8 apresenta um corte radial do perfil de velocidades ao centro do elemento combustível, de maneira análoga a que foi feita para a distribuição de temperatura.

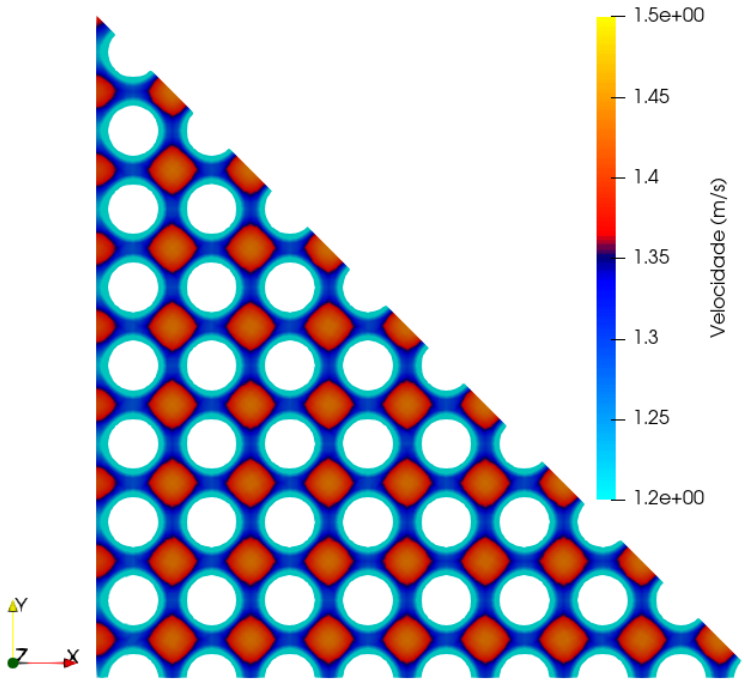

Figura 5.8: Distribuição radial de velocidade, em módulo, no centro do elemento combustível. Fonte: Autor.

Da distribuição radial de velocidade fica evidente que as velocidades são mais altas em pontos próximos ao centro dos subcanais e mais baixas próximo a superfície das varetas. As leves anisotropias observadas no comportamento das velocidades de escoamento foram observadas com dependência direta no perfil de temperatura, isto é, as regiões de temperatura mais baixas foram identificadas como as regiões de maior velocidade de escoamento (Figuras 5.8 e 5.5). Por completude, a velocidade de escoamento do refrigerante foi avaliada em função da altura do elemento na região central do subcanal 11. A Figura 5.9 mostra o resultado do cálculo.

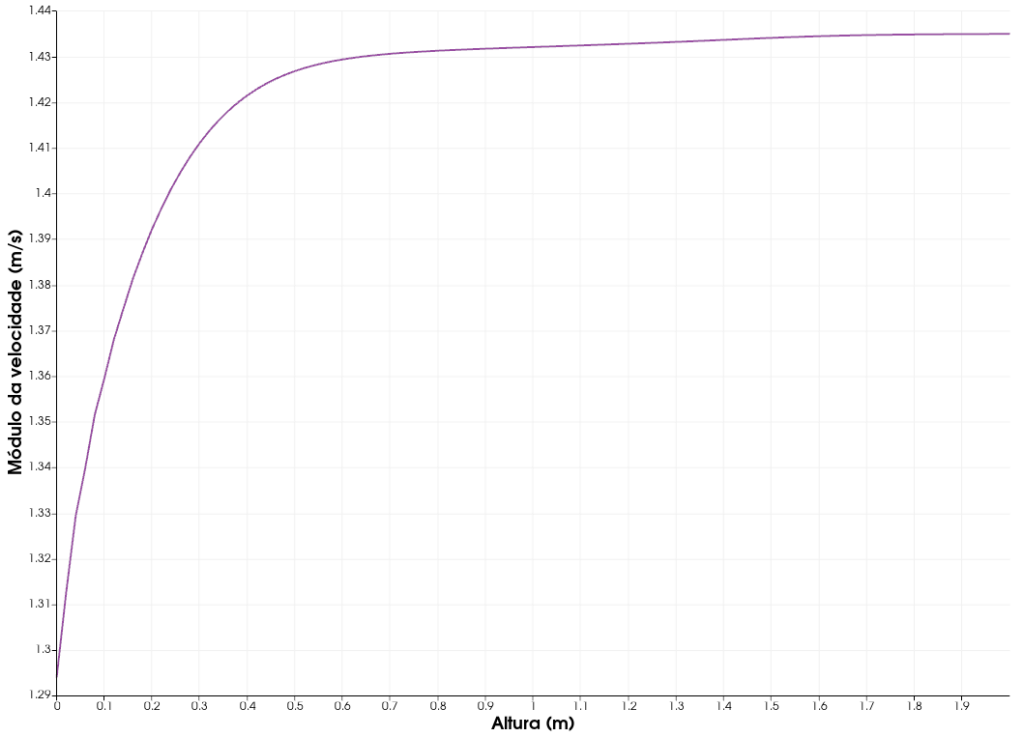

Figura 5.9: Distribuição de velocidade no centro do subcanal 11 em função da altura. Fonte: Autor.

O resultado apresentado mostra um aumento da velocidade em regiões mais baixas do subcanal e uma estabilização dos valores próximo a 50 cm de altura. Esse comportamento pode ser explicado pelo aquecimento não homogêneo dos canais adjacentes, que cria uma distância de escoamento necessária para a acomodação dos valores das propriedades físicas. Foi observado que a velocidade estabiliza em valores maiores que a velocidade de entrada, próximo a 1,43 m/s. A velocidade mais alta calculada ao centro está em conformidade com uma temperatura mais baixa medida na mesma região quando comparada com regiões mais próximas a varetas do reator. Outro fator de impacto na distribuição observada foi a imposição da condição de contorno de velocidade constante na entrada do elemento combustível, que resulta diretamente na redistribuição dos valores desta nos canais aquecidos de maneira não uniforme pelas varetas.

Nas simulações envolvendo somente o fluido, foi observado ainda o perfil de pressão ao longo do elemento. A Figura (5.10-a) mostra a distribuição obtida ao longo do elemento, sendo detalhada em função da altura do elemento para o canal 11 na Figura (5.10-b).

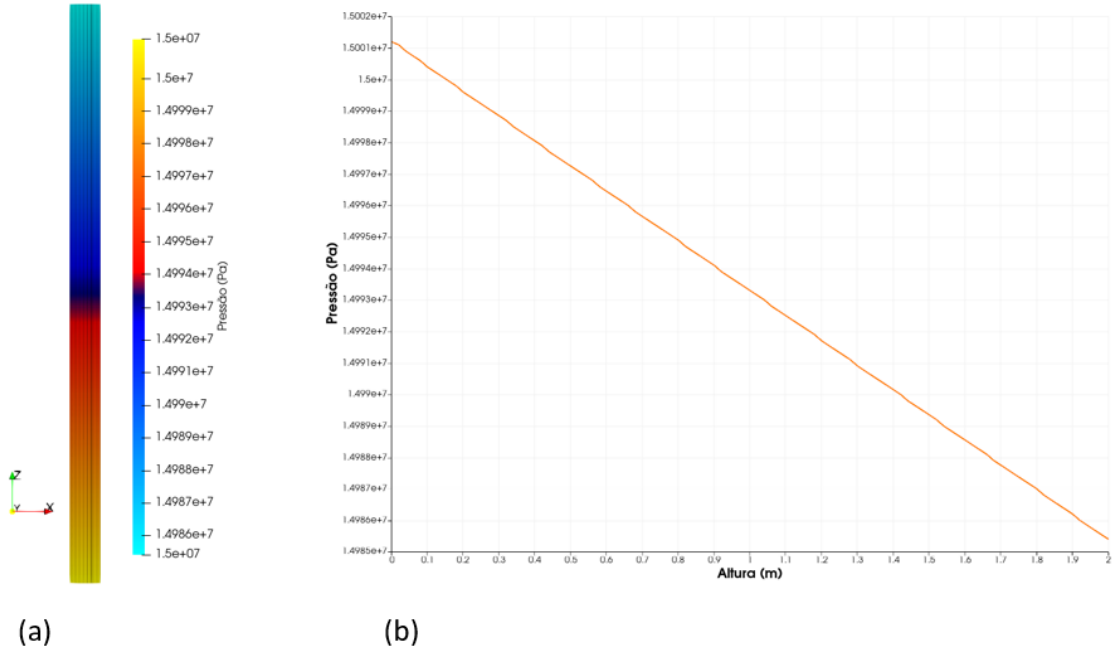

Figura 5.10: Queda de pressão ao longo do elemento mais potente do reator: (a) Queda de pressão global no elemento em função da altura e (b) queda de pressão ao longo do subcanal 11. Fonte: Autor.

Os valores obtidos, da ordem de kPa, são muito menores que a pressão nominal do vaso do reator (15 MPa). Da análise do gráfico da Figura 5.10 foi identificada uma queda da ordem de 16 kPa ao longo do comprimento ativo do canal. O perfil de pressão calculado ao longo do subcanal foi aproximadamente linear para a região central do refrigerante.

5.3.2 Simulação completa do elemento combustível usando o solucionador CHTMultiRegion

Para simulação considerando as varetas e o refrigerante, o solver do OpenFOAM para solução de problema de calor em regiões conjugadas (CHTMultiRegion) foi usado. O cálculo térmico indicou temperaturas significativamente mais altas na região do combustível nuclear em comparação com a região do refrigerante. Sendo assim, para uma melhor visualização da escala de cores, os resultados das simulações serão apresentados de maneira independente para as varetas e o refrigerante. A Figura 5.11 apresenta a distribuição radial de temperatura na região das varetas do reator a 1 m de altura. Na distribuição

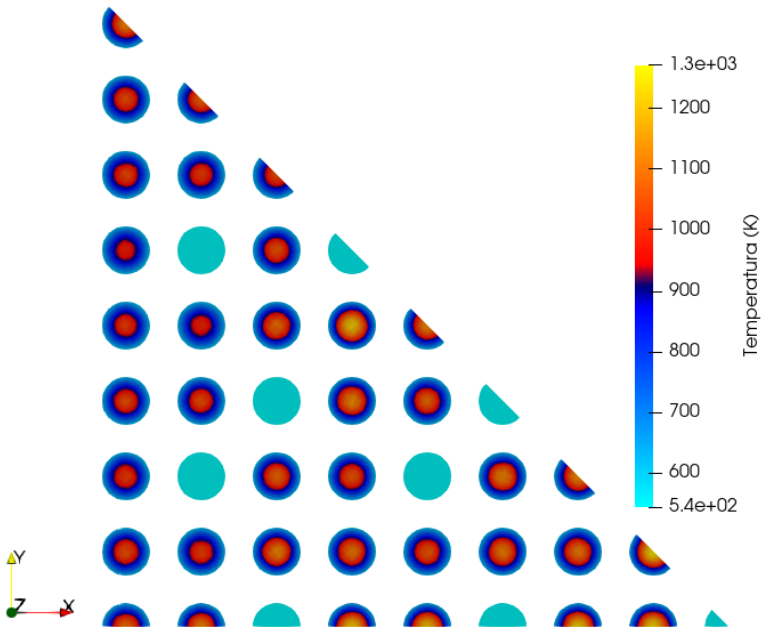

Figura 5.11: Distribuição radial de temperatura nas varetas do reator no centro do elemento combustível. Fonte: Autor.

de temperatura mostrada, varetas na cor azul claro correspondem às posições dos tubos guias e dos tubos de instrumentação, como mostrado na Figura 4.3. Pode ser observado do perfil notado que as temperaturas mais altas das varetas correspondem às varetas de maior potência do reator, como esperado teoricamente. Para mostrar a relação da temperatura ao longo do elemento, a Figura 5.12 apresenta a distribuição axial de temperatura das varetas como função da altura do elemento. A distribuição de temperatura obtida para as varetas segue o perfil senoidal de potência imposta na construção das simulações, isto é, a distribuição de temperatura imposta tem o ponto de máximo no centro do elemento e vai decrescendo de maneira senoidal a medida que se aproxima da extremidade das varetas. Na Figura 5.12 as regiões centrais, em azul claro, correspondem as regiões de tubos guias e de instrumentação, onde a temperatura é aproximadamente a do refrigerante do reator.

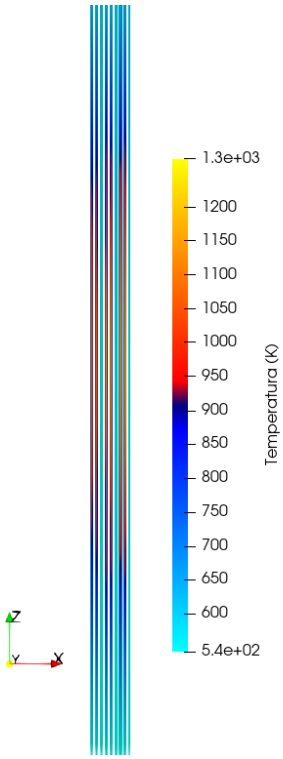

Figura 5.12: Distribuição axial de temperatura nas varetas ao longo do elemento. Fonte: Autor.

Na região de refrigerante, o programa forneceu o perfil de temperatura associado ao cálculo usando CHTMultiRegion. As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam, respectivamente, as distribuições de temperatura obtidas no elemento completo e no centro do elemento.

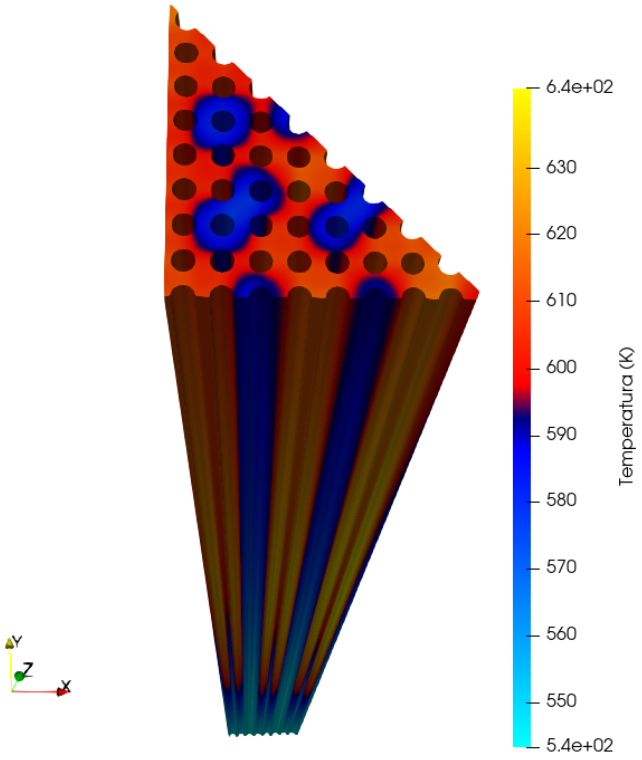

Figura 5.13: Distribuição de temperatura no refrigerante no calculo CHT. Fonte: Autor.

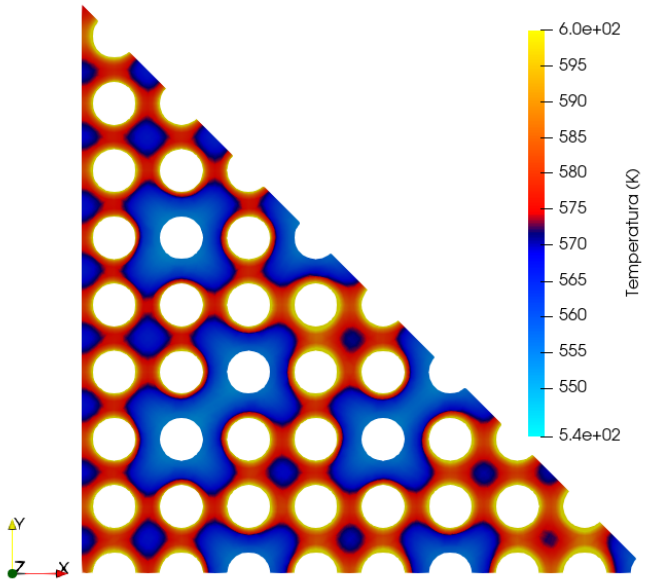

Figura 5.14: Distribuição radial de temperatura calculada no centro elemento combustível pelo solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor.

Na distribuição de temperatura obtida, ficam claras as regiões de maior potência compreendidas ao redor das varetas combustíveis. Em particular, o código OpenFOAM discrimina a distribuição radial do fluido em todos os pontos enquanto o programa STHIRP apresenta o valor médio em cada nível axial. A simulação CHT forneceu ainda a distribuição de velocidade na região do refrigerante. As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam respectivamente as distribuições de velocidade no elemento como um todo e no centro respectivamente.

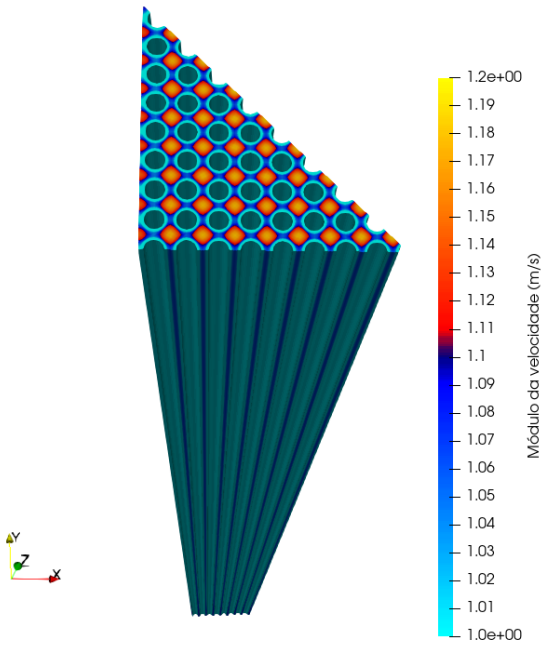

Figura 5.15: Distribuição de velocidade, em módulo, calculada pelo solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor.

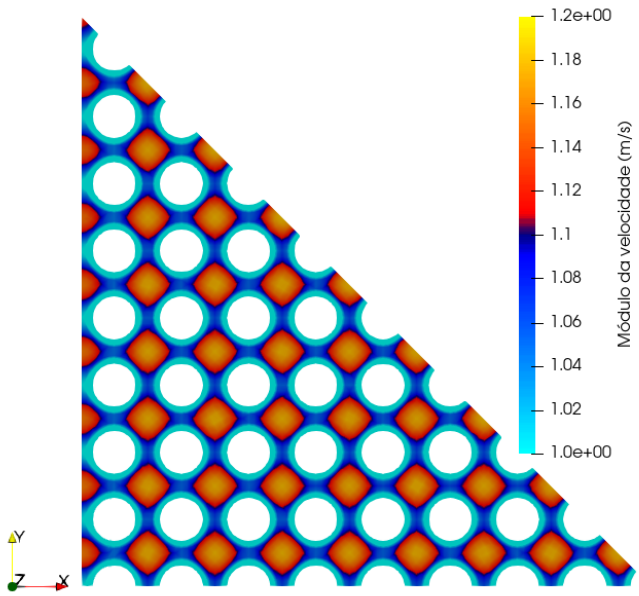

Figura 5.16: Distribuição radial de velocidades calculada no centro do elemento combustível pelo solver CHTMultiRegion. Fonte: Autor.

O padrão apresentado pela distribuição de velocidade no caso CHT seguiu o mesmo padrão já observado para a simulação somente do fluido, tendo os máximos de velocidade ao centro. Foi observado ainda, comparando os resultados obtidos para os campos de temperatura e velocidade, que os canais que possuem maior temperatura são os de menor velocidade relativa. Por completude, foram reportados os valores do canal 35 detalhadamente também para a simulação CHT. As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam respectivamente a temperatura e a pressão do subcanal 35 em função da altura. O canal 35 foi escolhido tendo em vista que foi o canal de temperatura de saída mais alta, calculada pelo programa STHIRP.

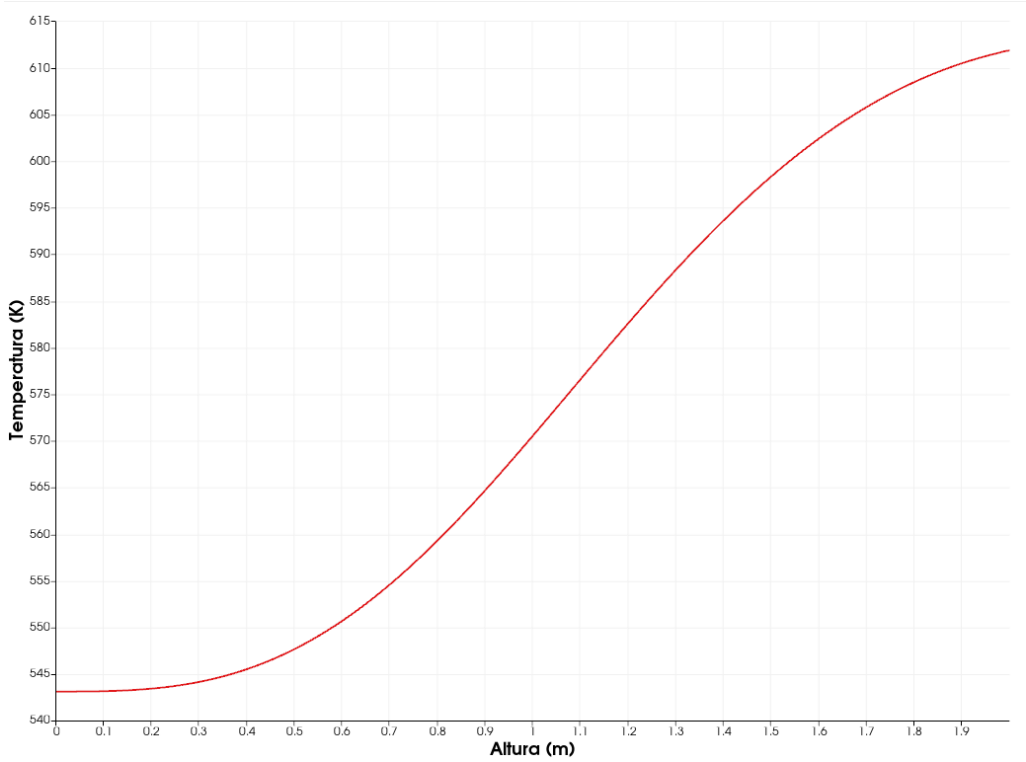

Figura 5.17: Perfil de temperatura no canal 35 pelo solucionador CHTMultiRegion. Fonte: Autor.

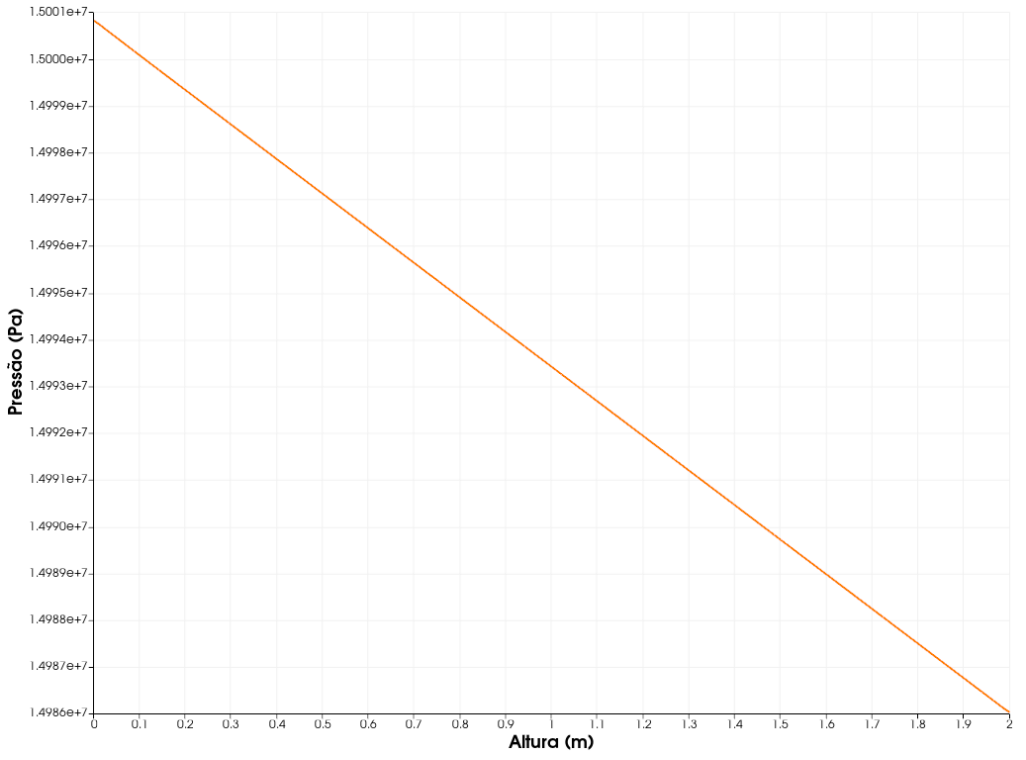

Figura 5.18: Perfil de pressão no canal 35 calculado pelo CHTMultiRegion. Fonte: Autor.

Dos resultados fornecidos pela simulação, foi verificado um aumento na temperatura total da ordem de 68 $^{\circ}C$, 2,8% abaixo da média do canal calculada pelo programa STHIRP, e uma queda de pressão de 15 kPa, 9 % abaixo da queda média de pressão do canal

calculada pelo programa STHIRP. Os valores calculados pelos dois programas estão em concordância, uma vez que os perfis mostrados na simulação usando OpenFOAM foram extraídos do centro do canal 35, que é teoricamente a região de menor temperatura e pressão do canal.

Capítulo 6

Conclusão

O presente trabalho foi capaz de obter parâmetros termo-hidráulicos de segurança para o elemento mais potente do reator SMART. Para tanto foi explorada a simetria de 1/8 existente na construção de dois modelos térmicos que fossem representativos do elemento. As simulações realizadas em ambos os programas formam feitas em regime estacionário, usando uma distribuição de potência (pino a pino) calculada no programa MCNP. Na construção do modelo foi considerada a região ativa das varetas, considerando o combustível e o revestimento. Os resultados globais das variações dos campos de temperatura e pressão médios no elemento combustível simulado apresentaram boa concordância entre si e com os valores teóricos previstos para a potência térmica do sistema simulado. Nas regiões das varetas foram encontrados perfis senoidais de temperatura pelos dois programas com um máximo no centro das varetas, em concordância com a distribuição de potência imposta. O perfil de velocidade fornecido pelo programa OpenFOAM seguiu uma proporção inversa com a temperatura, como o esperado teoricamente. Em ambas as simulações os canais mais quentes foram encontrados próximos às varetas de maior potência do reator, indicando que a energia térmica produzida no combustível está sendo retirada de maneira eficiente. Nas simulações foram detalhados os valores de temperatura e pressão para o canal mais quente do elemento combustível. O cálculo do perfil de MDNBR pelo programa STHIRP forneceu valores bem acima do mínimo imposto por critérios de segurança para reatores PWR. Futuramente os modelos construídos podem ser usados para fazer novas previsões a respeito do impacto termo-hidráulico, na região de maior potência do reator, devido a alterações geométricas ou de materiais. A configuração em que o modelo térmico foi construído, usando dois programas, permite uma verificação mútua de resultados obtidos e ainda uma quantidade maior de parâmetros térmicos previstos, em relação ao uso de apenas um código, como os apresentados no presente trabalho. Em qualquer trabalho

de simulação, resultados experimentais são fundamentais para a verificação dos modelos desenvolvidos. Contudo, devido à falta de dados experimentais para sistemas nucleares, uma das alternativas é a intercomparação entre códigos e a verificação do comportamento físico do modelo desenvolvido, a fim de garantir sua precisão e validade. Nesse sentido, os modelos desenvolvidos neste trabalho são relevantes, pois, embora novas implementações possam ser necessárias, servem como base para futuras pesquisas e aprimoramentos, contribuindo para o avanço do entendimento e da aplicação de sistemas nucleares.

Bibliografia

[1] I. E. Outlook, "World energy outlook special report https://www. iea. org/reports/india-energy-outlook-2021," 2022.

[2] E. I. A. (US), *Annual Energy Outlook 2012, with Projections To 2035*. Government Printing Office, 2012.

[3] J. Liou, "What are small modular reactors (smrs)?," 2023.

[4] F. A. for Nuclear Safety and R. Protection, "The small modular reactors (smr)," 2025.

[5] *Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024*. Non-serial Publications, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2024.

[6] E. de Pesquisa Energética, "Brazillian energetic balance (2023)," 2023. Acessado em: 2024.

[7] O. N. do Sistema Elétrico, "Sistemas de informações geográficas cadastrais do sin."

[8] S. Y. Park, C. C. Lee, J. S. Song, B. O. Cho, and S. Q. Zee, "Nuclear characteristics analysis report for system-integrated modular advanced reactor," tech. rep., Korea Atomic Energy Research Institute, 1998.

[9] *Nuclear Power Reactors in the World*. No. 2 in Reference Data Series, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2021.

[10] "Smart development history," 2024. Acessado em: 2024.

[11] Eletronuclear, "Informações de angra 2," 2024. Acessado em: 2024.

[12] Y.-J. Chung, S. H. Kim, and H.-C. Kim, "Thermal hydraulic analysis of smart for heat removal transients by a secondary system," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 225, no. 2, pp. 257–270, 2003.

[13] "Advances in very small modular nuclear reactors," 2022. Acessado em: 2024.

[14] M. A. F. Veloso, "Analise termofluidodinamica de reatores nucleares de pesquisa refrigerados a agua em regime de convecção natural," *Doctor Thesis, Universidade Estadual de Campinas, Brazil*, 2004.

[15] M. A. F. Veloso, C. A. M. Silva, A. Fortini, C. P. B. Lima, A. L. Costa, *et al.*, "Sthirp-1: computer code for thermal-hydraulic analysis of research reactor core," 2008.

[16] C. G. Oliveira and C. A. Silva, "Thermo-hydraulic analysis of the core of a triga mark-ii reactor using the sthirp-1 code," in *Proceedings of the 6. SENCIR: Brazilian national week on nuclear and energy engineering and radiation sciences*, 2022.

[17] W. F. de Souza, "Avaliação termo-hidráulica para combustível nuclear de alto desempenho

utilizando o código de subcanais sthirp," *Master Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil*, 2019.

[18] R. H. Silva, W. F. de Souza, C. A. da Silva, P. A. Reis, and A. L. Costa, "Neutronic and thermal hydraulic analysis of a pwr fuel assembly using uranium mononitride," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 194, p. 110071, 2023.

[19] F. Moukalled, L. Mangani, and Darwish, *The finite volume method*. Springer, 2016.

[20] C. Fiorina, "Introduction to nuclear reactor modelling using openfoam," 2022.

[21] D. M. Godino, S. F. Corzo, P. A. L. Reis, A. L. Costa, C. Pereira, N. M. Nigro, and D. E. Ramajo, "Simulación computacional termo-hidráulica del reactor nuclear triga mark i-ipr-r1," *Mecánica Computacional*, vol. 36, no. 9, pp. 345–357, 2018.

[22] C. Introini, A. Cammi, S. Lorenzi, D. Baroli, B. Peters, D. Chiesa, M. Nastasi, E. Previtali, *et al.*, "A 3d cfd model for the study of natural circulation in the pavia triga mark ii research reactor," in *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), Bled, Slovenia*, pp. 11–14, 2017.

[23] M. Martínez Lianes, R. Miró Herrero, G. J. Verdú Martín, C. Pereira, S. Chiva Vicent, and A. Z. Mesquita, "Modelización del estado estacionario de las condiciones de flujo de un reactor triga mediante el código de dinámica de fluidos computacional ansys cfx," 2011.

[24] A. Cammi, M. Zanetti, D. Chiesa, M. Clemenza, S. Pozzi, E. Previtali, M. Sisti, G. Magrotti, M. Prata, and A. Salvini, "Characterization of the triga mark ii reactor full-power steady state," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 300, pp. 308–321, 2016.

[25] Y. Ma, Y. Wang, and J. Yang, "ntkfoam: an openfoam based neutron transport kinetics solver for nuclear reactor simulation," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 81, pp. 512–531, 2021.

[26] C. Fiorina, I. Clifford, M. Aufiero, and K. Mikityuk, "Gen-foam: a novel openfoam® based multi-physics solver for 2d/3d transient analysis of nuclear reactors," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 294, pp. 24–37, 2015.

[27] K. Liu, M. Wang, W. Tian, J. Zhang, S. Qiu, and G. Su, "Cortaf: A nuclear reactor core three-dimensional thermal-hydraulic characteristics analysis code based on openfoam," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 405, p. 112209, 2023.

[28] R. N. Ramdhani, P. A. Prastyo, A. Waris, R. Kurniadi, *et al.*, "Neutronics analysis of smart small modular reactor using srac 2006 code," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 877, p. 012067, IOP Publishing, 2017.

[29] S. E. A. Prianka and M. M. H. Prodhan, "Evaluation of neutronic characteristics of accident tolerant fuel concepts in smart reactor fuel assemblies using dragon," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 421, p. 113100, 2024.

[30] Y. Zhong, P. Norman, and W. Wu, "A feasibility study of smart reactor power performance optimizations-part 2: Reflector material selection," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, p. 987513, 2022.

[31] M. Böttcher and V. Sanchez-Espinoza, "Detail cfd simulation of the integrated reactor pressure

vessel of smart," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 164, p. 104854, 2023.

[32] C. Lee, D.-H. Hwang, S.-Q. Zee, and M. H. Chang, "Nuclear and thermal hydraulic design characteristics of the smart core," *Journal of Physics*, 2003.

[33] J. Yoon, S. Y. Ryu, B. S. Choi, M. Lee, and S. K. Zee, "Plant system design features of smart," 2003.

[34] Y. I. Kim, Y. Bae, Y. J. Chung, and K. K. Kim, "Cfd simulation for thermal mixing of a smart flow mixing header assembly," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 357–370, 2015.

[35] Y. Bae, Y. I. Kim, and C. T. Park, "Cfd analysis of flow distribution at the core inlet of smart," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 258, pp. 19–25, 2013.

[36] J. D. Hoffman and S. Frankel, *Numerical methods for engineers and scientists*. CRC press, 2018.

[37] M. Veloso, "Pantera-1p: Programa para análise termo-hidráulica do núcleo de reatores a água," in *Proceedings of the 3rd Brazilian Meeting on Reactor Physics and Thermal Hydraulics, Itaipava, RJ, Brazil*, pp. 11–14, 1982.

[38] IAEA, "Evaluated nuclear data file." Acessado em: 2025.

[39] M. H. Kalos and P. A. Whitlock, *Monte carlo methods*. John Wiley & Sons, 2009.

[40] V. Bobkov, L. Fokin, E. Petrov, V. Popov, V. Rumiantsev, and A. Savvatimsky, "Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data," *IAEA, Vienna*, pp. 18–21, 2008.

[41] L. John and B. Anthony, "Introduction to nuclear engineering," 2021.

[42] S. Lee and S. Bankoff, "A comparison of predictive models for the onset of significant void at low pressures in forced-convection subcooled boiling," *KSME International Journal*, vol. 12, pp. 504–513, 1998.

[43] T. Hibiki, K. Mao, and T. Ozaki, "Development of void fraction-quality correlation for two-phase flow in horizontal and vertical tube bundles," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 97, pp. 38–52, 2017.

[44] N. Power, "Gnielinski equation." Acessado em: 2025.

[45] J. J. Duderstadt, *Nuclear Reactor Analysis*. Wiley, 1976.

[46] cfd online, "Finite volume mesh." Acessado em: 2024.

[47] cfd online, "openfoam documentation." Acessado em: 2024.

[48] OpenFoam, "Guide applications solvers: Heat transfer buoyantsimplefoam," 2012. Acessado em: 2025.

[49] OpenFoamuserguide, "Tutorialchtmultiregions," 2012. Acessado em: 2025.