



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REMOÇÃO DE CALOR
RESIDUAL DE UM REATOR DE PEQUENO PORTE

Nathália Nunes Araújo

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Nuclear da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos ne-
cessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Su Jian

Rio de Janeiro

Março de 2018

ANÁLISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REMOÇÃO DE CALOR
RESIDUAL DE UM REATOR DE PEQUENO PORTE

Nathália Nunes Araújo

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNI-
VERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUI-
SITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
NUCLEAR

Examinado por:

Prof. Su Jian , D.Sc.

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.

Dr. José Luiz Horácio Faccini, D.Sc.

Dr. Marcos Bertrand de Azevedo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Março de 2018

Araújo, Nathália Nunes

Análise Térmica de um Sistema de Remoção de Calor Residual de um Reator de Pequeno Porte / Nathália Nunes Araújo - Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2018.

XIV, 39 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Su Jian

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Nuclear, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 33-35.

1. Calor Residual. 2. Reator Modular de Pequeno Porte. 3. Equações de Balanço. 4. Mathematica 5. Modelo Analítico. I. Jian, Su. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Análise Térmica de um Sistema de Remoção de Calor Residual de um Reator de Pequeno Porte.

*Aos meus pais, Renilda e José Camilo
e às minhas irmãs, Marianna e Camila*

Agradecimentos

Ao Professor Su Jian, orientador desta dissertação, por todos os seus esforços para que o melhor sempre fosse alcançado.

Ao Dr. José Luiz Horácio Faccini, também meu orientador, por todo o auxílio e conselhos durante a realização de diversos trabalhos realizados no Laboratório de Termo-hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear (LTE/IEN/CNEN).

Ao Dr. Marcos Bertrand de Azevedo pelas orientações nos trabalhos de iniciação científica e apoio durante minha graduação.

Agradeço em geral ao pessoal do Laboratório de Termo-Hidráulica do Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN por toda a ajuda.

Aos professores e funcionários do DNC/POLI e PEN/COPPE da UFRJ pela dedicação e apoio durante todo o estudo de graduação.

A minha família, que sempre apoiou nos meus estudos e fizeram de tudo para que eu não desistisse, que foram capazes de me dar a oportunidade de estudar em outro estado e por serem uma fortaleza na minha vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

Análise Térmica de um Sistema de Remoção de Calor Residual de um Reator de Pequeno Porte.

Nathália Nunes Araújo

Março/2018

Orientador: Su Jian

Curso: Engenharia Nuclear

A circulação natural é um fenômeno importante na indústria nuclear, principalmente em sistemas passivos de segurança em usinas nucleares. O sistema de remoção de calor residual (Passive Residual Heat Removal System, PRHR) é um sistema passivo, que não utiliza nenhuma fonte de energia externa e funciona a base de circulação natural, removendo calor do núcleo por convecção natural no caso da não-disponibilidade do sistema de alimentação de água. Este trabalho visa o estudo de um sistema de remoção de calor residual proposto, o qual contém dois circuitos. As equações de continuidade, de energia e de quantidade de movimento foram utilizadas nos cálculos. Inicialmente o sistema foi dimensionado e depois as equações referentes ao sistema foram resolvidas utilizando-se o software comercial *Mathematica*. Uma análise sobre as distribuições de temperatura e vazão mássica ao longo do circuito foi realizada.

Palavras-chave: 1. Calor Residual 2. Reator Modular de Pequeno Porte 4.Equações de Balanço 5.Mathematica 6.Modelo Analítico

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

Thermal Analysis of a Residual Heat Removal System of a Small Reactor

Nathália Nunes Araújo

March/2018

Advisor: Su Jian

Course: Nuclear Engineering

Natural circulation is an important phenomenon in the nuclear industry, especially in passive safety systems in nuclear power plants. The Passive Residual Heat Removal System (PRHR) is a passive system that uses no external power sources and operates at natural circulation base, removing heat from the core by natural convection in case of non-availability of the water supply system. This work aims at the study of a proposed residual heat removal system, which is consisted of two circuits. The continuity, energy and momentum equations were used in the calculations. Initially the system was dimensioned and then the equations referring to the system were solved using commercial *Mathematica* software. An analysis of the temperature and mass flow distributions along the circuit was performed.

Keywords: 1. Residual Heat. 2. Small Modular Reactor. 4. Balance Equations. 5. Mathematica. 6. Analytical Model.

Sumário

| | |
|--|-------------|
| Dedicatória | iv |
| Agradecimento | v |
| Resumo | vi |
| Abstract | vii |
| Índice | viii |
| Índice de Figuras | x |
| Índice de Tabelas | xi |
| Lista de Símbolos | xii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivo | 3 |
| 1.2 Organização do Trabalho | 3 |
| 2 Conceitos Básicos | 4 |
| 2.1 Reator de Água Pressurizada | 4 |
| 2.1.1 Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual | 6 |
| 2.2 Trocadores de Calor | 7 |
| 2.3 Proposta de Sistema de Remoção de Calor Residual | 10 |
| 3 Revisão Bibliográfica | 12 |
| 3.1 Circulação Natural em Sistemas Passivos | 12 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | Sistemas Passivos Avançados | 13 |
| 4 | Modelo Matemático | 17 |
| 4.1 | Resolução das equações governantes | 17 |
| 4.1.1 | Temperatura no núcleo do reator | 18 |
| 4.1.2 | Temperatura no primeiro trocador de calor | 19 |
| 4.1.3 | Temperatura no segundo trocador de calor | 19 |
| 4.1.4 | Cálculo das temperaturas nos canais | 20 |
| 4.2 | Dimensionamento dos trocadores de calor | 22 |
| 5 | Resultados e Discussões | 25 |
| 5.1 | Trocadores de Calor | 25 |
| 5.2 | Análise Térmica | 27 |
| 6 | Conclusões e Sugestões | 32 |
| | Referências Bibliográficas | 33 |
| | Apêndices | 35 |
| A | Cálculos realizados no Mathematica | 36 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Esquema simplificado de uma usina PWR. | 5 |
| 2.2 | Esquema do sistema de circulação natural. | 8 |
| 2.3 | Trocador de calor casco e tubo | 9 |
| 2.4 | Arranjo a) triangular e b) quadrados | 10 |
| 2.5 | Sistema de Remoção de Calor Residual. | 11 |
| 3.1 | Unidade de Remoção Passiva de Calor do PFBR. | 14 |
| 3.2 | Unidade de Remoção Passiva de Calor do SWR-1000. | 15 |
| 3.3 | Unidade de Remoção Passiva de Calor do AP1000. | 15 |
| 5.1 | Temperaturas do sistema primário e secundário em diferentes potências | 28 |
| 5.2 | Vazão mássica do sistema primário e secundário em diferentes potências | 28 |
| 5.3 | Temperaturas do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no primeiro trocador de calor | 29 |
| 5.4 | Temperaturas do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no segundo trocador de calor | 30 |
| 5.5 | Vazão mássica do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no primeiro trocador de calor | 30 |
| 5.6 | Vazão mássica do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no segundo trocador de calor | 31 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Propriedades do Reator CAREM. | 26 |
| 5.2 | Dados do primeiro trocador de calor | 26 |
| 5.3 | Dados do segundo trocador de calor | 27 |

Lista de Símbolos

| | |
|----------|--|
| A | Área transversal total do escoamento |
| B | Espaçamento entre as chicanas |
| D_s | Diâmetro interno do casco |
| Dh | Diâmetro hidráulico |
| d_i | Diâmetro interno dos tubos |
| d_o | Diâmetro externo dos tubos |
| C | Folga entre tubos adjacentes |
| cp_1 | Calor específico da água no circuito primário |
| cp_2 | Calor específico da água no circuito secundário |
| F | Fator de correção |
| f | Fator de atrito |
| G | Velocidade mássica |
| g | Aceleração da gravidade |
| h_{t1} | Coefficiente de transferência de calor nos tubos |
| h_{t2} | Coefficiente de transferência de calor no casco |
| K | Condutividade térmica do tubo |
| k | Condutividade térmica do fluido |

| | |
|-----------|--|
| L | Comprimento do trocador de calor |
| L_r | Altura ativa no núcleo |
| L_t | Comprimento do primeiro trocador de calor |
| L_c | Comprimento do segundo trocador de calor |
| m_1 | Vazão mássica da água no circuito primário |
| m_2 | Vazão mássica da água no circuito secundário |
| N_t | Número de varetas combustíveis |
| Ph_c | Perímetro hidráulico no interior dos tubos do segundo trocador de calor |
| Ph_{t1} | Perímetro hidráulico no interior dos tubos do primeiro trocador de calor |
| Ph_{t2} | Perímetro hidráulico no casco do primeiro trocador de calor |
| Pr | Número de Prandtl |
| P_t | Pitch |
| Q | Transferência de calor |
| q'' | Fluxo de calor |
| q' | Taxa de calor linear |
| q'_0 | Taxa de calor linear no centro do núcleo |
| Q | Transferência de calor |
| Re | Número de Reynolds |
| T_{ar} | Temperatura da atmosfera |
| T_c | Temperatura da água no casco do primeiro trocador de calor |

| | |
|--------------|--|
| T_{c1} | Temperatura do downcomer do primário |
| T_{c2} | Temperatura do downcomer do secundário |
| T_{h1} | Temperatura do riser do primário |
| T_{h2} | Temperatura do riser do secundário |
| T_t | Temperatura da água na piscina |
| U | Coefficiente de transferência total de calor |
| U_c | Coefficiente de transferência de calor do segundo trocador de calor |
| U_t | Coefficiente de transferência total de calor do primeiro trocador de calor |
| R_{fi} | Resistência térmica de incrustação interna |
| R_{fo} | Resistência térmica de incrustação externa |
| Ph_c | Perímetro hidráulico no interior dos tubos do segundo trocador de calor |
| Ph_{t1} | Perímetro hidráulico no interior dos tubos do primeiro trocador de calor |
| Ph_{t2} | Perímetro hidráulico no casco do primeiro trocador de calor |
| ΔT_m | Diferença média das temperaturas |
| Δz_1 | Diferença de altura entre o núcleo e o primeiro trocador de calor |
| Δz_2 | Diferença de altura entre o primeiro e o segundo trocador de calor |
| β | Coefficiente de expansão da água |
| μ | Viscosidade dinâmica |

Capítulo 1

Introdução

A civilização contemporânea está demandando cada vez mais energia porém só alguns países conseguem garantir um fornecimento ininterrupto em tempos de crise. A produção de energia no Brasil é provida quase exclusivamente em hidrelétricas e muitas delas são localizadas longe dos centros de grande demanda energética, aumentando o custo das linhas de transmissão.

Durante a crise energética no Brasil em 2015, devido à baixa pluviosidade, implantou-se planos de racionalização do uso de energia e aumentou-se a geração por meio de termelétrica. Iniciou-se um estudo sobre as diretrizes estratégicas para a expansão de energia nos próximos anos, o Plano Nacional de Energia 2050, que pretende contemplar a construção de novas usinas nucleares.

A energia nuclear é uma alternativa energética que implica em um baixo impacto ambiental em condições normais de operação, ocupa uma pequena área territorial, gera uma baixa quantidade de poluentes atmosféricos e é independente do clima, sendo propícia para operar na base. Proveniente da energia liberada em reações nucleares, as centrais nucleares utilizam o calor liberado no núcleo dos reatores para transformar água em vapor, que move turbinas gerando energia elétrica.

Os reatores nucleares podem ser classificados em reatores de potência, nos quais utilizam o calor gerado no núcleo para produzir eletricidade, e em reatores de pesquisas, que utiliza-se o fluxo de nêutrons gerados para produzir elementos químicos e realizar estudos e investigações sobre a matéria.

Segundo Gonçalves e Ruiz[1], a energia nuclear é a quarta maior fonte geradora

de energia elétrica, correspondendo a cerca de 10,4% da produção mundial, atrás do carvão, do gás natural e da hidroeletricidade. Existem atualmente cerca de 446 reatores nucleares em funcionamento no mundo e 61 em construção, sendo grande parte deles com mais de 30 anos de operação.

O Brasil possui, atualmente, dois reatores do tipo água pressurizada (*Pressurized Water Reactors*, PWR's) instalados e operantes, Angra 1 e Angra 2, e um em construção, Angra 3, que podem ser encontrados na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), localizada na Praia de Itaorna, no município de Angra dos Reis. Em relação aos reatores de pesquisa, quatro estão em operação, tendo sido o primeiro inaugurado em 1957. O projeto para um Reator Multipropósito Brasileiro está em desenvolvimento, o que produzirá radioisótopos e radiofármacos. Um protótipo de um reator para um submarino nuclear, localizado no Laboratório de Geração de Energia Núcleo-Elétrica, também está em construção. O Brasil possui a sexta maior reserva de urânio do mundo e domina o ciclo de combustível nuclear.

A ocorrência de um pequeno número de acidentes em usinas nucleares, o último em Fukushima, em 2011, gerou um cenário mundial desagradável para o uso da energia nuclear, provocando um aumento na demanda de requisitos de segurança nuclear inerentes a usina. Com a experiência adquirida na operação de reatores nas últimas décadas, um dos objetivos desejados para reatores mais avançados, como os da geração III+ e IV é o de incorporar características que reduzam os riscos de um acidente severo e atendam aos requisitos exigidos pelas autoridades licenciadoras (Botelho [2]).

Um sistema passivo de segurança fornece resfriamento ao núcleo ou à contenção usando processos como transferência de calor por convecção natural, condensação de vapor, evaporação líquida, injeção de refrigerante impulsionada por pressão ou injeção de refrigerante impulsionada por gravidade, não dependendo de energia elétrica externa.

Após o desligamento seguro do reator, calor continua sendo gerado no núcleo devido aos produtos de fissão, exigindo que o núcleo seja resfriado continuamente, caso contrário haveria aumento de temperatura nos materiais e possível fusão do núcleo. Em função da importância do sistema de remoção de calor residual do núcleo

do reator em uma usina nuclear, pesquisas estão em andamento a fim de desenvolver sistemas passivos de remoção de calor residual mais efetivos, principalmente aqueles nos quais o seu funcionamento se deve a um fenômeno natural, que é a convecção livre.

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho concentra-se na análise térmica de um sistema passivo de remoção de calor residual proposto de um reator nuclear modular de pequeno porte de água pressurizada de 100MW, de modo que o núcleo se mantenha resfriado sem a utilização de energia externa ou outro sistema de emergência. Essa análise foi realizada através da solução de um conjunto de equações, utilizando-se *software* comercial *Mathematica* e obtendo-se as distribuições de temperatura ao longo de um circuito proposto.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 serão mostrados os conceitos básicos necessários para a compreensão do que foi desenvolvido no trabalho. No Capítulo 3 foi realizada uma revisão da literatura sobre circulação natural e modelagens de sistemas passivos de remoção de calor residual do núcleo. O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do modelo para o cálculo da retirada de calor no núcleo. Finalmente, nos Capítulos 5 e 6 serão apresentados os resultados obtidos pelos métodos propostos, e as discussões destes resultados, explicando seus comportamentos.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Este capítulo apresenta os conceitos básicos sobre reatores modulares de pequeno porte e descrição sobre sistemas passivos de remoção de calor residual em um reator nuclear, explicitando os fenômenos e os equipamentos envolvidos.

2.1 Reator de Água Pressurizada

Atualmente 289 reatores de água pressurizada estão em funcionamento e 51 em construção. Os reatores PWR, Fig 2.1 (Todreas e Kazimi [3]), são constituídos de um sistema primário, secundário e terciário, sendo esses sistemas independentes entre si. No sistema primário, o combustível radioativo, como o urânio enriquecido, que se encontra no núcleo do reator, é bombardeado com nêutrons em alta velocidade, formando um isótopo instável que fragmenta-se em novos elementos, liberando nêutrons e gerando uma reação em cadeia. Esse processo é chamado de fissão nuclear. Moderadores e barras de controle são utilizados para manter a reação controlada, mantendo os nêutrons em uma determinada velocidade e quantidade no núcleo. No sistema primário, água a alta pressão, também chamado de líquido refrigerante, é aquecido pela energia térmica liberada pela fissão dos átomos de urânio e bombeado para os trocadores de calor (Geradores de Vapor). Um pressurizador, localizado entre o núcleo e os geradores de vapor controla a pressão da água, mantendo-a no estado líquido. O sistema primário é instalado dentro de uma contenção, normalmente feita de concreto e aço. O vapor produzido nos geradores de vapor, são utilizados

para movimentar uma turbina, que está acoplada a um gerador elétrico. Depois de passar pela turbina, o vapor é condensado pelo sistema terciário e bombeado para o gerador de vapor.

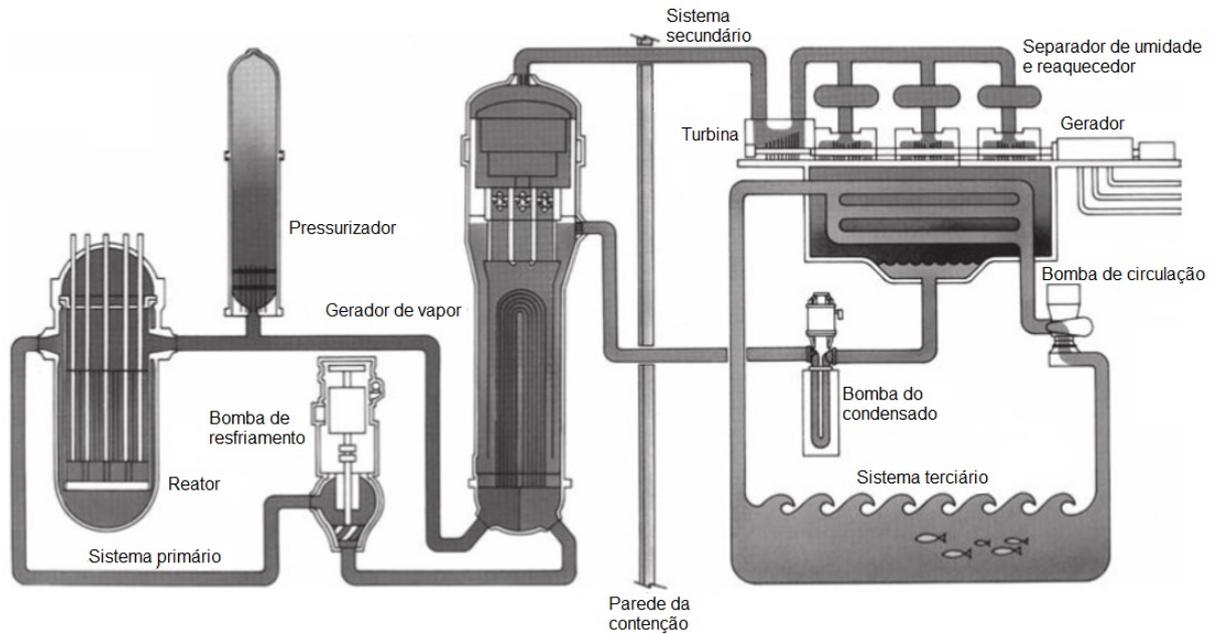


Figura 2.1: Esquema simplificado de uma usina PWR.

Uma nova geração de usinas nucleares está em desenvolvimento, os reatores nucleares de pequeno porte (*Small Modular Reactors*, SMRs).

Os SMRs são reatores que possuem potência elétrica equivalente menor ou igual que 300MW, de acordo a Agência Internacional de Energia Atômica [4] existem mais de 45 projetos SMR em desenvolvimento para diferentes problemas de aplicação. Tais reatores deverão ter maior simplicidade de projeto, economia de produção em série e tempos de construção mais curtos. Com o objetivo de aumentar a confiabilidade inerente das usinas, os SMR's utilizarão diferentes abordagens para alcançar um alto nível de segurança em seus sistemas.

Um exemplo de SMR é o CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares), que é um reator nuclear de água pressurizada de 100 MW com sistema modular simplificado e com geradores de vapor integrais. O CAREM é o primeiro reator de

potência projetado na Argentina, desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia Atômica da Argentina e pela INVAP. Este reator está sendo construído ao lado ao lado da Usina Nuclear Atucha I e possui flexibilidade para ser usado para geração de eletricidade, pesquisa ou para dessalinização de água.

2.1.1 Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual

Após o desligamento seguro do reator, calor continua sendo gerado no núcleo devido aos produtos de fissão, sendo assim o núcleo necessita ser resfriado continuamente, mesmo que a sua potência seja baixa em relação a potência em pleno funcionamento. Caso o núcleo não seja resfriado, haverá aumento de temperatura nos materiais e possível fusão do núcleo. Na maioria das plantas nucleares, o resfriamento do núcleo após o desligamento seguro do reator é feito pelo sistema de água de emergência com auxílio de bombas elétricas, porém, na perda de energia elétrica, as bombas não estão disponíveis.

Vendo a importância de manter o núcleo devidamente resfriado, pesquisas estão sendo realizadas para desenvolver sistemas de remoção de calor residual cada vez mais efetivos. Reactores avançados já possuem sistemas similares, utilizando diferentes montagens, trocadores de calor e fluidos. Um método para verificar a confiabilidade de um reator nuclear é a utilização de códigos computacionais que utilizam alguns parâmetros termo hidráulicos, fazendo uma simulação real de um reator de potência

O sistema de remoção de calor residual (*Passive Residual Heat Removal System*, PRHR) é um sistema passivo, que não utiliza nenhuma fonte de energia externa e funciona a base de circulação natural, removendo calor do núcleo por convecção natural, no caso da não-disponibilidade do sistema de alimentação de água. O PRHR é normalmente isolado do sistema principal de refrigeração por válvulas normalmente fechadas que são automaticamente abertas quando ocorre o desligamento da bomba primária de resfriamento do núcleo.

Sistemas de circulação natural são empregados na indústria nuclear para remoção calor de decaimento, no resfriamento da contenção pós e durante um acidente e no resfriamento de instalações de armazenamento de resíduos radioativos. A uti-

lização de circulação natural para o resfriamento do núcleo é tratada com especial atenção para evitar a ocorrência de acidentes severos.

A função primária de um circuito de circulação natural é transportar o calor de um local para outro. A circulação natural é um fenômeno causado por um gradiente de densidade e altura, onde diferenças de densidade no fluido podem ser criadas através de mudanças na temperatura. A circulação natural pode ser usada como meio de resfriamento do núcleo sob operação normal ou incorporados em sistemas de segurança passivos. A Fig. 2.2 (Silva [5]) demonstra um exemplo de circulação natural, o fluido em contato com uma fonte de calor (núcleo do reator) é aquecido, diminuindo sua densidade nessa região. Ao entrar em contato com o trocador de calor, localizado acima da fonte, o fluido é resfriado e conseqüentemente sua densidade aumenta.

Quando a diferença de temperatura é grande o suficiente, as forças de empuxo do fluido superaram as forças viscosas e o gradiente de densidade, agindo por gravidade sobre a diferença de elevação da fonte e do trocador geram uma circulação do fluido. A circulação forçada da vazão do fluido de resfriamento primário pela bomba primária, segue o sentido da perna fria para a perna quente. A vazão de circulação natural segue o sentido contrário, da perna quente para a perna fria.

A vantagem econômica da circulação natural é a não necessidade de uso das bombas de circulação, o que reduz os custos com operação e manutenção e elimina problemas associados à falha das bombas.

2.2 Trocadores de Calor

Trocadores de calor são equipamentos utilizados para efetuar uma troca térmica entre dois fluidos que se encontram a diferentes temperaturas. São amplamente utilizados em processos industriais nos quais é necessário aquecer ou resfriar um fluido. Na indústria nuclear o processo de troca de calor é fundamental, uma vez que as reações nucleares aquecem o líquido refrigerante, que troca calor com o sistema secundário, onde vapor é produzido para mover as turbinas e posteriormente é resfriado ao passar por um condensador. Diversos sistemas auxiliares e de

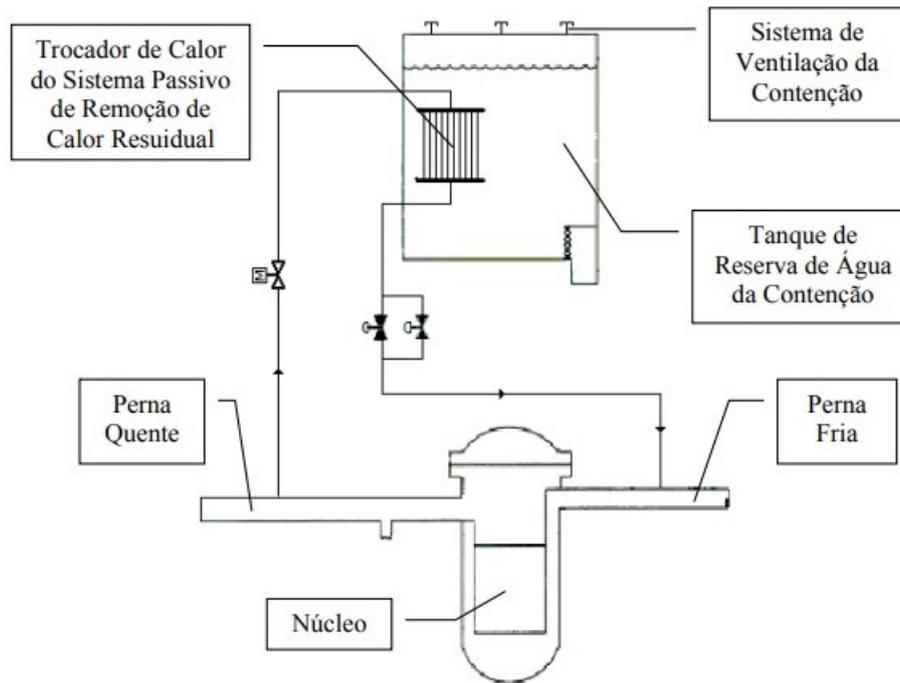


Figura 2.2: Esquema do sistema de circulação natural.

emergência de uma usina nuclear precisam trocar calor durante a sua operação.

Segundo Incropera [6], os trocadores de calor podem ser classificados em relação a sua configuração de escoamento, construção e arranjo de fluxo. Nos trocadores de calor de contato indireto, os fluidos permanecem separados por uma parede sólida e o calor é transferido através dessa parede. Nos trocadores de transferência direta, os dois fluidos se misturam.

Os trocadores de calor também podem ser classificados pelo seu tipo de construção. O trocador de calor de placas é constituído de placas planas, lisas ou com algumas ondulações posicionadas de modo que criem canais para a circulação dos fluidos de troca térmica. Os trocadores de calor casco e tubo são constituídos por um casco cilíndrico que contém tubos paralelos ao seu eixo. Em relação a configuração de escoamento, os trocadores de calor podem ter configuração paralela, na qual o fluido quente e o fluido frio entram e saem pela mesma extremidade, escoando no mesmo sentido, e configuração contra-corrente, onde os fluidos entram e saem por extremidades opostas e escoam em sentidos opostos.

Na Fig 2.3 temos um trocador de calor tipo casco e tubo com fluxo contra

corrente. O sistema de remoção de calor residual proposto para o presente trabalho constituirá de um trocador de calor com essas configurações para a troca de calor entre dois fluidos, do circuito primário, cujo o fluido escoará pelos tubos do trocador, e do circuito secundário, no qual o fluido escoará no casco do trocador.

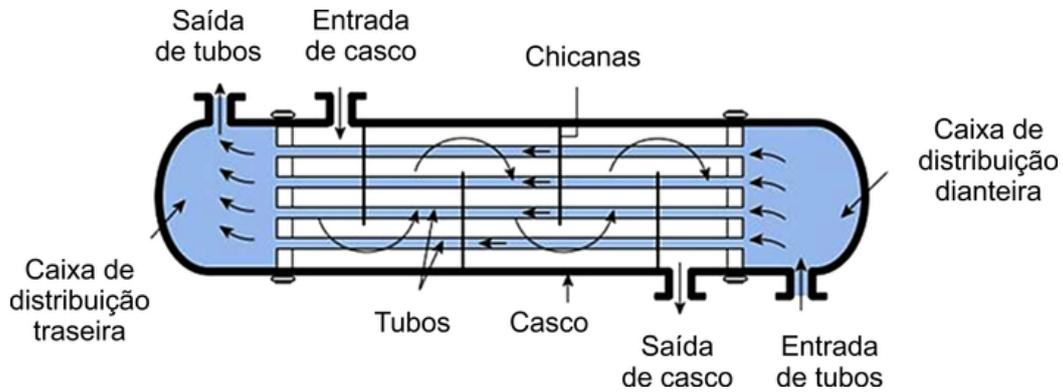


Figura 2.3: Trocador de calor casco e tubo

Um líquido escoando em um regime turbulento possui maior coeficiente de troca de calor por convecção. Para induzir turbulência no casco do trocador de calor, chicanas são empregadas fazendo com que o líquido flua através de uma barreira perpendicular aos eixos dos tubos. A chicana provoca uma turbulência mesmo quando uma pequena quantidade de líquido flui através do casco e também funciona como suporte para os tubos diminuindo vibrações. O espaçamento entre as chicanas normalmente não é menor do que um quinto do diâmetro interno do casco.

Os tubos do trocador de calor não podem se localizar muito próximos uns dos outros, uma vez que uma pequena distância entre eles pode comprometer a integridade estrutural do trocador de calor. Atualmente há padrões que estabelecem o valor da distância entre dois tubos em relação ao diâmetro no casco e do tubo.

Os tubos podem ser dispostos em arranjos quadrados ou triangulares, como apresentado na Fig 2.4. Arranjos quadrados geram uma queda de pressão mais baixa e possuem acesso mais fácil para a para a limpeza externa, porém a velocidade do fluido sofre flutuação contínua por causa da área restrita entre tubos adjacentes em comparação com a área de fluxo entre as fileiras sucessivas. No passo triangular, é

encontrada uma maior turbulência porque o fluido que flui entre tubos adjacentes a alta velocidade incide diretamente na fileira seguinte. Logo, quando a queda de pressão e a capacidade de limpeza são de pouca consequência, o arranjo triangular é preferível na montagem do trocador de calor. (Kern [7])

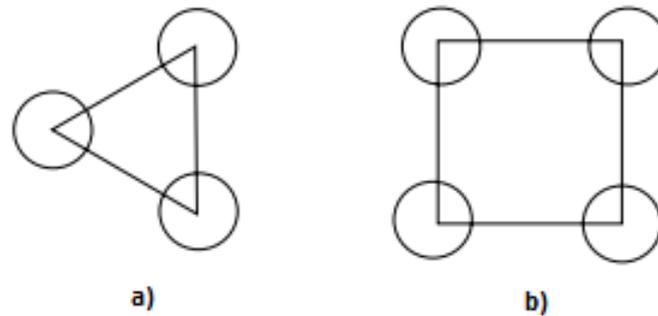


Figura 2.4: Arranjo a) triangular e b) quadrados

Neste trabalho, será feita uma análise unidimensional estacionária de dois trocadores de calor. Para tal análise, as hipóteses adotadas são que os trocadores de calor operem em estado estacionário, o calor trocado com o ambiente é desprezado, a resistência térmica é uniforme ao longo do trocador de calor e não há depósitos ou geração de energia térmica dentro dos trocadores de calor.

2.3 Proposta de Sistema de Remoção de Calor Residual

O Sistema de Remoção de Calor Residual proposto neste trabalho, Fig 2.5, é composto de dois trocadores de calor. O primeiro trocador de calor tipo casco e tubo está localizado em uma região acima do núcleo do reator e conectado por tubulações na perna quente (riser primário) e na perna fria (downcomer do primário) ao vaso do reator. O segundo trocador de calor, tipo tubular está localizado na parte inferior da piscina, acima do primeiro trocador de calor e conectado a ambos por meio de tubulações, riser e downcomer do secundário. Ambos trocadores de calor foram

considerados funcionando em contra-corrente.

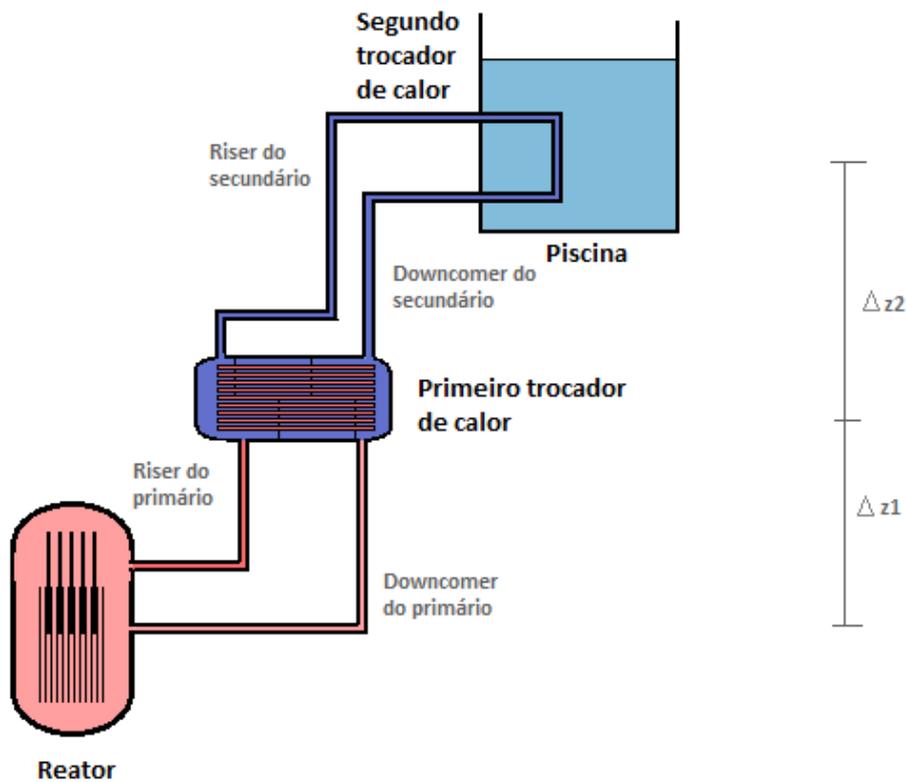


Figura 2.5: Sistema de Remoção de Calor Residual.

O líquido refrigerante, água, é aquecido no núcleo. Devido à diferença de densidade e altura inicia-se uma circulação natural da água do núcleo para o primeiro trocador de calor. Da mesma forma, o trocador calor, terá um gradiente de temperatura e densidade em relação ao segundo trocador de calor iniciando uma circulação da água com o mesmo, que trocará calor com a piscina. A piscina absorve o calor de decaimento durante horas antes que sua água alcance a temperatura de saturação, sendo necessários alguns dias para que haja uma perda significativa de água que interrompa a remoção do calor residual do combustível. O que difere de outros sistemas de remoção de calor é o fato de possuir dois trocadores de calor, o que permite que em um só loop haja mais troca de calor, podendo continuar resfriando o núcleo do reator dias após o seu desligamento.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são revisados os estudos analíticos na literatura, sobre circulação natural e sistemas passivos de remoção de calor residual.

3.1 Circulação Natural em Sistemas Passivos

Os estudos sobre circulação natural em circuitos começaram em meados da década de 60, com Keller [8] e Welander [9] que propuseram modelos unidimensionais no estado estacionário, considerando escoamentos monofásicos. Zvirin [10], Lavine et al. [11] e Huang e Zendaya [12] estudaram circulação natural em circuitos de diferentes formatos, fazendo análises numéricas e experimentais, utilizando modelos tridimensionais.

Zvirin [10] observou que na maioria dos casos, transientes encontrados em circuitos de remoção de calor de decaimento de núcleos de reatores nucleares e aquecedores de água solares termostáticos levam a fluxos estáveis –ou quase-estáveis. Ele também observou que os métodos de modelagem teórica existentes produzem resultados aproximados da ordem de 30% em relação a dados experimentais.

Pesquisadores do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) desenvolveram um código, HCNR (Modelo Termo-Hidráulico e de Convecção Natural em Reatores), que simula a convecção natural que ocorre em um reator tipo piscina após seu desligamento. O código resolve as equações unidimensionais de movimento, energia e condução de calor nas varetas combustíveis, calculando a transferência de calor

por convecção e a vazão mássica do reator. Os resultados podem ser utilizados para um dimensionamento de um sistema passivo de remoção de calor residual [13].

Xinian [14] desenvolveu um código SGSPRHR para calcular as características transitórias do sistema de remoção de calor em caso de acidente de perda de energia elétrica na estação. O sistema analisado consiste de um circuito no qual o gerador de vapor é conectado a uma torre de resfriamento, trocando calor com o ambiente externo. Esse sistema foi capaz de remover o calor de decaimento.

Krepper e Beyer [15] investigaram experimentalmente e numericamente os fenômenos de circulação natural em um sistema passivo de remoção de calor de decaimento em grandes piscinas para reatores de água fervente (*Boiling Water Reactor*, BWRs) e reatores de água fervente econômicos e simplificados (*Economic Simplified Boiling Water Reactor*, ESBWR). Os resultados de cálculo indicaram que o sistema de remoção de calor poderia efetivamente transportar o calor de decaimento do núcleo.

3.2 Sistemas Passivos Avançados

Um novo conceito projetado de PRHRS foi proposto por Xing [16], consistindo de um tanque de refrigeração conectado a dois geradores de vapor. O tanque é conectado a um trocador de calor em uma torre de resfriamento. O código RELAP5 / MOD3.4 foi usado para analisar as características de operação do PRHRS na ocorrência de um acidente, mostrando que o sistema pode remover o calor de decaimento no núcleo.

Vários projetos avançados utilizam trocadores de calor imersos em piscinas para remoção de calor de decaimento. A maioria dos sistemas possuem um tempo determinado pela capacidade do trocador de calor e temperatura dos fluidos, variando de 30 a 72 horas, em função do inventário da água de refrigeração contida na piscina. Em alguns projetos o dissipador final de calor é a atmosfera ou o mar, sendo assim o seu tempo útil seria ilimitado. O reator indiano PFBR é um protótipo de um reator nuclear tipo breeder projetado pelo Centro Indira Gandhi de Pesquisa Atômica, Fig.3.1. O Sistema de remoção passivo de calor residual desse reator en-

tra em operação quando o sistema de remoção de calor ativo não está disponível, consistindo de um circuito de sódio conectado ao núcleo e a um segundo circuito de sódio através de um trocador de calor. Um segundo circuito troca calor com a atmosfera através de um trocador de calor localizado fora do edifício da contenção

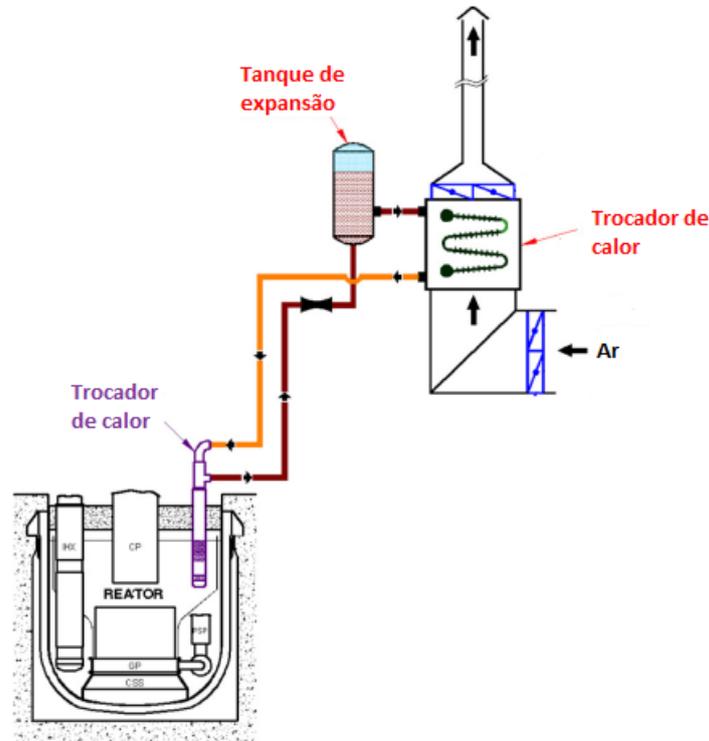


Figura 3.1: Unidade de Remoção Passiva de Calor do PFBR.

Os sistemas de remoção de calor podem ser conectados tanto aos geradores de vapor como diretamente no núcleo do reator. Além disso, os tubos dos trocadores de calor também podem ser em forma de V ou C em vez dos tubos U verticais.

No SWR-1000, um reator de água fervente desenvolvido pela Siemens, Fig. 3.2, trocadores de calor tubulares em formato de V são conectados ao vaso do reator para a remoção passiva de calor. Em caso de acidente, o sistema transfere o calor de decaimento e qualquer calor armazenado e produzido no núcleo, para a água das piscinas de inundações do núcleo, não havendo necessidade de um sistema de injeção de refrigerante de alta pressão.

O AP1000, Fig. 3.3, é um reator tipo PWR produzido pela Westinghouse, que possui dois loops e é capaz de operar até 72 horas em condições de acidente somente

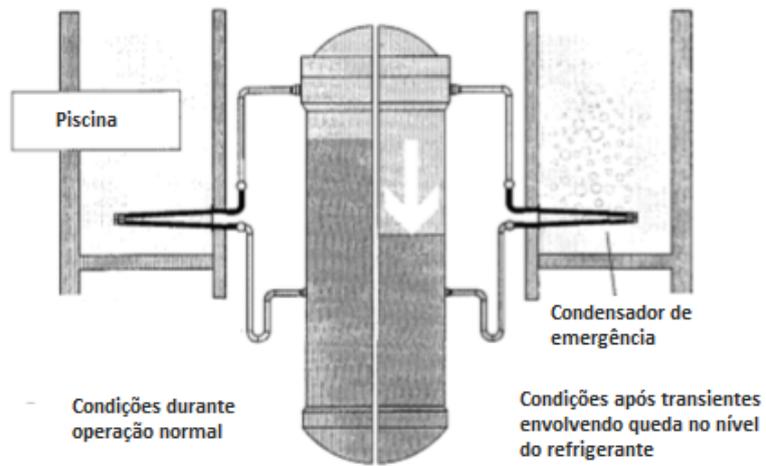


Figura 3.2: Unidade de Remoção Passiva de Calor do SWR-1000.

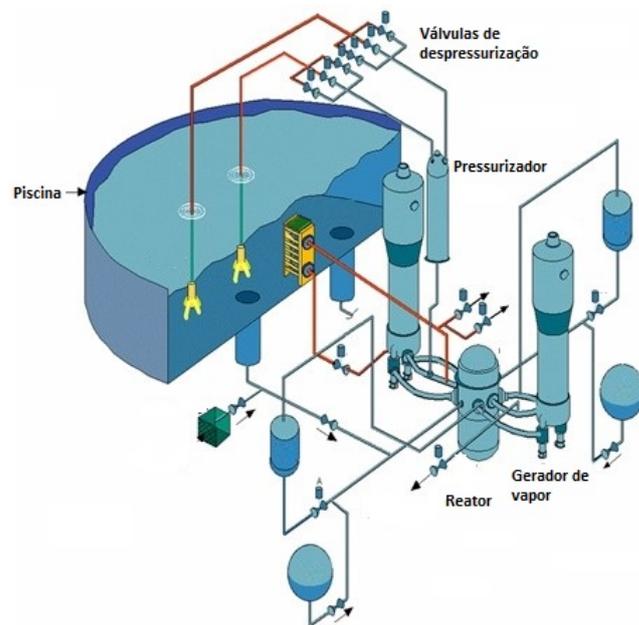


Figura 3.3: Unidade de Remoção Passiva de Calor do AP1000.

com ações passivas no sistema.

O sistema de remoção de calor residual deste reator consiste de um trocador de calor tubular em forma de C instalado dentro do tanque de armazenamento, preenchido com água borada e aberto, dentro da contenção. O sistema é conectado na perna quente do reator e após resfriado retorna ao circuito primário através da linha do sistema passivo que está conectada à cabeça inferior do gerador de vapor, promovendo remoção de calor do sistema primário por meio de circulação natural.

Códigos como o RELAP5, COBRA-III e IV, TRAC, ATHLET, CATHARE e o PARET/ANL fazem simulações reais de um reator de potência, incluindo alguns sistemas de remoção de calor residual.

No trabalho aqui realizado, optou-se pelo modelo mais simples que mostrasse boa concordância com o fenômeno físico, e que fosse possível implementar no software comercial *Mathematica*. A escolha feita não exclui as possibilidades oferecidas pelos outros modelos e cada um possui uma complexidade característica, o que pode acarretar em algumas divergências entre os resultados, dessa forma o projetista deverá selecionar o modelo que melhor se adapta a cada caso.

Capítulo 4

Modelo Matemático

O presente capítulo apresenta as formulações matemáticas necessárias para descrever o comportamento de um fluido em um sistema fechado com troca de calor. Posteriormente são apresentadas as equações utilizadas para o dimensionamento do sistema de remoção de calor residual.

4.1 Resolução das equações governantes

Os circuitos de circulação natural, mostrado na Fig. 2.5, podem ser modelados pelas equações gerais unidimensionais de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia dadas por:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial G_i}{\partial s} = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial G_i}{\partial t} + \frac{\partial G_i^2}{\partial s} = -\frac{\partial p}{\partial s} - \frac{f G_i |G_i|}{2D_h \rho_i} - \rho_i g \cos \theta, \quad (4.2)$$

e

$$\rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} + G_i \frac{\partial h_i}{\partial s} - \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{q'' P_h}{A_i} + \frac{G_i}{\rho_i} \left[\frac{\partial p}{\partial s} + \frac{f G_i |G_i|}{2D_h \rho_i} \right]. \quad (4.3)$$

onde, s é a coordenada espacial na direção ao longo do eixo do canal de escoamento, G_i é a velocidade mássica nos tubos, ρ_i é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, A_i a área da seção transversal, p a pressão do fluido no circuito, P_h o perímetro aquecido e D_h o diâmetro hidráulico do canal. Os índices $i = 1$ se referem ao circuito primário e $i = 2$ ao circuito secundário.

Por se tratar de um circuito fechado, com pressurizador, as variações espaciais da pressão também são desprezadas. As equações são integradas ao longo de cada circuito, considerando a tubulação adiabática e o valor de ρ só muda devido ao aquecimento ou resfriamento no núcleo e no trocador de calor:

$$\Sigma_k L_k \frac{\partial (G_i)_k}{\partial t} = - \left(\frac{f G_i |G_i|}{2 D_h \rho_i} \right)_{nucleo} - \left(\frac{f G_i |G_i|}{2 D_h \rho_i} \right)_{trocadordecalor} - \Delta p_f + \Delta \rho g \Delta z, \quad (4.4)$$

onde Δp_f representa a queda de pressão por atrito nas tubulações que conectam o núcleo e os trocadores de calor. Na modelagem deste trabalho, o fluido é considerado incompressível, as derivadas temporais da densidade são desprezadas. A temperatura e a velocidade são uniformes ao longo das seções transversais dos circuitos. Com essas simplificações, a equação integrada de conservação de quantidade de movimento, se apresenta na seguinte forma:

$$\left(\frac{f G_i |G_i|}{2 D_h \rho_i} \right)_{nucleo} + \left(\frac{f G_i |G_i|}{2 D_h \rho_i} \right)_{trocadordecalor} + \Delta p_f = \Delta \rho g \Delta z, \quad (4.5)$$

e a equação de energia no estado estacionário

$$\dot{m}_i c_p \frac{\partial T}{\partial s} = P_h q'', \quad (4.6)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica, c_p é calor específico, Δz a diferença de altura entre os centros das regiões quente e fria.

A dependência da densidade com a temperatura pode ser considerada linear, utilizando a aproximação de Boussineq:

$$\rho = \rho_i (1 - \beta \Delta T), \quad (4.7)$$

na qual ΔT é a diferença de temperatura do fluido e β é o coeficiente de expansão do fluido, dado por $(\partial \rho / \partial T) / \rho$.

4.1.1 Temperatura no núcleo do reator

Supondo que o fluxo de nêutrons na barra de combustível cilíndrica seja uniforme, a distribuição de energia axial pode ser aproximada por:

$$q'_w(z) = q'_0 \cos\left(\frac{\pi z}{L_r}\right), \quad (4.8)$$

válida para $-L_r/2 < z < L_r/2$, onde L_r é a altura do núcleo e q'_0 a taxa de calor linear no centro do núcleo, obtida através da relação:

$$q'_0 = \frac{Q}{L_r N_r}, \quad (4.9)$$

na qual N_r é o número de varetas combustíveis e L_r é a altura ativa do núcleo.

Utilizando a Eq. 4.6 , no estado estacionário, a temperatura T_r do refrigerante no núcleo do reator é dada por:

$$\dot{m}_1 c_{p1} \frac{\partial T_r}{\partial s} = q'_0 \cos\left(\frac{\pi z}{L_r}\right), \quad (4.10)$$

$$T_r(z) = \frac{L_r N_r q'_0 + \dot{m}_1 c_{p1} \pi T_{c1} + L_r q'_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi z}{L_r}\right)}{\dot{m}_1 c_{p1} \pi}, \quad (4.11)$$

onde T_{c1} é a temperatura no downcomer do primário, c_{p1} o calor específico da água \dot{m}_1 é a vazão mássica da água no circuito primário.

4.1.2 Temperatura no primeiro trocador de calor

A temperatura da água no interior dos tubos do primeiro trocador de calor é obtida através da equação:

$$\dot{m}_1 c_{p1} \frac{\partial T_p}{\partial s} = -Ph_{t1} U_t (T_p - T_c), \quad (4.12)$$

Na qual Ph_{t1} é o perímetro hidráulico no interior dos tubos e U_t o coeficiente de transferência de calor do trocador de calor.

A temperatura da água no casco do trocador de calor, T_c , é dada por:

$$\dot{m}_2 c_{p2} \frac{\partial T_c}{\partial s} = -Ph_{t2} U_t (T_p - T_c), \quad (4.13)$$

Na qual Ph_{t2} é o perímetro hidráulico no casco, \dot{m}_2 é a vazão mássica no circuito secundário e c_{p2} o calor específico da água no circuito secundário.

4.1.3 Temperatura no segundo trocador de calor

A temperatura da água no interior dos tubos do segundo trocador de calor é dada por:

$$\dot{m}_2 c_{p2} \frac{\partial T_c}{\partial s} = -P_c U_c (T_p - T_t), \quad (4.14)$$

Na qual Ph_c é o perímetro hidráulico no interior dos tubos do segundo trocador de calor e U_c o coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos.

A temperatura da piscina de água, T_t , é obtida através da equação:

$$\dot{m}_2 c_{p2} \frac{\partial T_t}{\partial s} = -P_c U_c (T_t - T_{ar}), \quad (4.15)$$

Onde T_{ar} é a temperatura do ambiente na qual a piscina se encontra.

4.1.4 Cálculo das temperaturas nos canais

Considerando a tubulação adiabática, a obtenção da temperatura no riser primário, T_{h1} , é igual a temperatura da água na saída do reator, $T_r(L_r/2)$, ou seja:

$$T_{h1} = \frac{2L_r N_r q'_0 + c_{p1} \dot{m}_1 \pi T_{c1}}{c_{p1} \dot{m}_1 \pi} \quad (4.16)$$

A temperatura do downcomer do primário, T_{c1} , é obtida através da temperatura de saída da água do primeiro trocador de calor no primeiro circuito, utilizando a Eq. 4.12, obtém-se

$$T_{c1} = (c_{p2} \dot{m}_2 Ph_{t1} U_{t1} [T_{c2} e^{\frac{L_t Ph_{t1} U_t}{c_{p1} \dot{m}_1}} + (T_{h1} - T_{c2}) e^{\frac{L_t Ph_{t2} U_t}{c_{p2} \dot{m}_2}}] - c_{p1} \dot{m}_1 Ph_{t2} U_t T_{h1} e^{\frac{L_t Ph_{t2} U_t}{c_{p2} \dot{m}_2}}) / (c_{p2} \dot{m}_2 Ph_{t1} U_{t1} e^{\frac{L_t Ph_{t1} U_t}{c_{p1} \dot{m}_1}} - c_{p1} \dot{m}_1 Ph_{t2} U_t e^{\frac{L_t Ph_{t2} U_t}{c_{p2} \dot{m}_2}}), \quad (4.17)$$

onde T_{c2} é a temperatura do downcomer do secundário.

A temperatura do riser do secundário, T_{h2} , é determinada pela temperatura de saída da água do primeiro trocador de calor no circuito secundário, Eq. 4.12:

$$T_{h2} = (c_{p2} \dot{m}_2 Ph_{t1} U_{t1} T_{c2} + c_{p1} \dot{m}_1 Ph_{t2} U_t (T_{h1} - T_{c2} - T_{h1} e^{\frac{L_t Ph_{t2} U_t}{c_{p2} \dot{m}_2}} - \frac{L_t P_{t1} U_t}{c_{p1} \dot{m}_1})) / (c_{p2} \dot{m}_2 P_{t1} U_{t1} - c_{p1} \dot{m}_1 P_{t2} U_t e^{\frac{L_t Ph_{t2} U_t}{c_{p2} \dot{m}_2}} - \frac{L_t P_{t1} U_t}{c_{p1} \dot{m}_1}). \quad (4.18)$$

Similarmente, a temperatura do downcomer do secundário T_{c2} é determinada pela temperatura da água na saída do segundo trocador de calor,

$$T_{c2} = [T_{h2} + T_{ar}(e^{\frac{L_c P h_c U_c}{c_{p2} \dot{m}_2}} - 1)]e^{-\frac{L_c P h_c U_c}{c_{p2} \dot{m}_2}}. \quad (4.19)$$

As temperaturas T_{h1} , T_{c1} , T_{h2} e T_{c2} são obtidas pela solução simultânea do sistema de equações lineares 4.16 a 4.19

A Eq. 4.4 é resolvida com auxílio das equações de temperatura. A diferença de pressão devida a diferença de altura e densidade nos circuitos é dada, para o primeiro circuito, por:

$$\Delta p_1 = \rho_1 g \beta (T_r L_r + T_{h1} \Delta z_1 - T_{c1} (L_r + \Delta z_1)), \quad (4.20)$$

E para o segundo circuito:

$$\Delta p_2 = \rho_1 g \beta (T_{h2} - T_{c2}) \Delta z_2, \quad (4.21)$$

na qual Δz_1 é a diferença de altura entre o núcleo e o primeiro trocador de calor e Δz_2 é a diferença de altura entre o primeiro e o segundo trocador de calor. Assim as equações de balanço são:

$$\Delta p_1 - f_r \frac{L_r \rho_1 u^2}{2 D h_r} - f_{t1} \frac{L_t \rho_1 u^2}{2 D h_{tr1}} - f_{tb1} \frac{L_{tb1} \rho_1 u^2}{2 D h_{tb1}} \quad (4.22)$$

=0, e

$$\Delta p_2 - f_{t2} \frac{G_{t2} (L_{tr1} / B) D_s}{2 \rho_2 D h_{t2}} - f_c \frac{L_c \rho_2 u^2}{2 D h_c} - f_{tb2} \frac{L_{tb2} \rho_2 u^2}{2 D h_{tb2}} = 0, \quad (4.23)$$

onde u é a velocidade do escoamento da água, Dh o diâmetro hidráulico e f o fator de atrito, os índices $r, t1, t2, c, tb1$ e $tb2$ correspondem as propriedades no reator, nos tubos do primeiro trocador de calor, no casco do primeiro trocador de calor, nos tubos do segundo trocador de calor, na tubulação do primeiro circuito, da tubulação do segundo circuito. D_s é o diâmetro interno do casco, C a folga entre os tubos adjacentes no interior do casco e B o espaçamento entre as chicanas

As Eqs. 4.22 e 4.23 formam duas equações não lineares para obtenção simultânea das vazões mássicas \dot{m}_1 e \dot{m}_2 em função da potência térmica do reator e da temperatura da água no tanque de resfriamento.

4.2 Dimensionamento dos trocadores de calor

Para calcular propriedades de um trocador de calor é utilizada a equação transferência de calor que ocorre em um trocador de calor, definida por Kakac [17] por:

$$Q = UAF\Delta T_m, \quad (4.24)$$

onde U é o coeficiente de transferência total de calor, A é a área de troca de calor do trocador de calor, F é um fator de correção e ΔT_m é a diferença média das temperaturas, definida como:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{c1} - T_{h2})}{\ln[(T_{h1} - T_{c2})/(T_{c1} - T_{h2})]}, \quad (4.25)$$

onde T_{h1} e T_{c1} são as temperaturas de entrada e saída dos tubos e T_{h2} e T_{c2} são as temperaturas de entrada e saída do casco.

O fator de correção é adimensional, sendo menor que a unidade para arranjos de fluxo cruzados e multi-passos. Para o trocador utilizado o valor de F é igual a unidade, pois assume a configuração de contra corrente. O coeficiente de transferência total de calor é dado por:

$$U = 1 / \left(\frac{d_0}{d_i} \frac{1}{h_{t1}} + \frac{d_0 R_{fi}}{d_i} + \frac{d_0 \ln(d_0/d_i)}{2K} + R_{fo} + \frac{1}{h_{t2}} \right), \quad (4.26)$$

onde d_i é o diâmetro interno dos tubos, d_0 é o diâmetro externo dos tubos, R_{fi} e R_{fo} são as resistências térmicas de incrustação interna e externa e h_{t1} é coeficiente de transferência de calor por convecção nos tubos, no lado primário do trocador de calor e h_{t2} é coeficiente de transferência de calor no casco, no lado secundário do trocador de calor. K é a condutividade térmica dos tubos, dado pela correlação de Sweet [18], Eq. 4.27 que utilizou técnicas de flash e de comparação para medir a condutividade térmica da liga de Inconel 718, que possui excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas.

$$K = 11,45 + 1,156 \times 10^{-2} T_m + 7,72 \times 10^{-6} T_m^2, \quad (4.27)$$

O número de Prandtl é um coeficiente que relaciona a difusividade de momento e a difusividade térmica de um fluido, sendo expresso por:

$$Pr_i = \frac{c p_i \mu_i}{k_i}, \quad (4.28)$$

onde cp é a calor específico, k é a condutividade térmica do fluido e μ a viscosidade dinâmica. Os índices $i = 1$ se referem aos parâmetros do fluido no circuito primário e $i = 2$ ao circuito secundário.

O coeficiente de transferência de calor h_{t1} é obtido por meio da correlação de Gnielinski [19], equação 4.29. Gnielinski modificou a correlação de Petukhov-Kirillov [20], comparando-a com os dados experimentais, de modo que a correlação abrange um intervalo maior de escoamento, incluindo a fase de transição laminar-turbulento.

$$\frac{h_{t1}d_i}{k_2} = \frac{(f/8)(Re_{t1} - 1000)(Pr_t)}{(1 + 1,27(f/8)^{1/2}Pr_2^{1/2})}, \quad (4.29)$$

na qual f , quantidade adimensional usada para a descrição de fator de atrito e também utilizada na equação de perda de carga de Darcy-Weisbach, é dada por:

$$f = (0,79 \ln Re_{t1} - 1,64)^{-2}, \quad (4.30)$$

válida para $2 \times 10^3 < Re_{t1} = \frac{G_{t1}d_i}{\mu_1} < 1 \times 10^4$, onde G_{t1} é a velocidade mássica nos tubos.

O segundo trocador de calor é dimensionado da mesma forma, para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor a correlação de Gnielinski [19] também é utilizada para o coeficiente de convecção dentro dos tubos, considerando os parâmetros do circuito primário.

No casco, o coeficiente de convecção é dado pela correlação proposta por McAdams[21]:

$$\frac{h_{t2}Dh_{t1}}{k_2} = 0,36Re_{t2}^{0,55}Pr_2^{1/3}\left(\frac{\mu_2}{\mu_{2w}}\right)^{0,14}, \quad (4.31)$$

válida para $2 \times 10^3 < Re_{t2} = \frac{G_{t2}Dh}{\mu_s} < 1 \times 10^6$, onde μ_{2w} é a viscosidade dinâmica calculada à temperatura da parede dos tubos e G_{t2} é a velocidade mássica no casco.

O diâmetro equivalente Dh_{t1} do casco é tomado como quatro vezes a área livre de fluxo líquido (para qualquer layout de passo) dividido pelo perímetro molhado.

Para um arranjo quadrado, o diâmetro hidráulico é dado por:

$$Dh_{t1} = \frac{4(P_t^2 - \pi d_o/4)}{\pi d_o}, \quad (4.32)$$

e para um arranjo triangular:

$$Dh_{t1} = \frac{4\left(\frac{P_t^2\sqrt{3}}{4} - \frac{\pi d_0^2}{8}\right)}{\pi d_0/2}, \quad (4.33)$$

A velocidade mássica é obtida através da equação:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_i}, \quad (4.34)$$

onde é A_i é a área transversal ao escoamento do casco, calculada através do método de Kern [7].

$$A_i = \frac{D_s BC}{P_t}, \quad (4.35)$$

na qual D_s é o diâmetro interno do casco, C a folga entre os tubos adjacentes, B o espaçamento entre as chicanas, e P_t o pitch, que é a distância entre o centro de dois tubos

O valor do diâmetro interno do casco pode ser obtido através da equação abaixo, que é uma relação empírica baseada no arranjo dos tubos.

$$D_s = d_0 \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n}, \quad (4.36)$$

onde N_t é o número de tubos. Para arranjos quadrados de trocadores com um passo no tubo e com $P_t/d_0 = 1.25$, as constantes assumem os valores $K_1 = 0,215$ $n = 2,207$.

A área de troca de calor é aproximada através da Eq. 4.24, considerando que o trocador de calor retira uma porcentagem x da potência nominal do reator:

$$A = \frac{xQ}{F\Delta T_m U}, \quad (4.37)$$

O comprimento do trocador de calor é obtido através de:

$$L = \frac{A}{\pi d_0 N_t}. \quad (4.38)$$

As equações acima também são utilizadas no dimensionamento do segundo trocador de calor.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos cálculos realizados, posteriormente será feita uma discussão dos gráficos gerados no sentido de avaliar a desempenho do sistema de remoção de calor residual, bem como os princípios físicos associados aos resultados obtidos.

Foi estudado uma situação de perda de energia, na qual o reator é desligado e o resfriamento do núcleo é mantido pela circulação natural. O modelo desenvolvido no Cap. 4 é utilizado para uma avaliação numérica do sistema passivo de remoção de calor residual. O código desenvolvido neste trabalho foi feito através do software comercial *Mathematica*.

5.1 Trocadores de Calor

Os dados do reator CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares), Tab 5.1, foram utilizados no cálculo. O CAREM, desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia Atômica da Argentina e pela INVAP, é um reator o tipo PWR pequeno modular de 100 MW, possuindo geradores de vapor integrados e possui flexibilidade para ser usado para geração de eletricidade, pesquisa ou para dessalinização de água. Os valores utilizados para alguns parâmetros não disponíveis do reator CAREM foram obtidos de outros reatores PWR de mesma potência térmica

Tabela 5.1: Propriedades do Reator CAREM.

| | |
|----------------------------------|-----------|
| Temperatura de entrada no reator | 284°C |
| Temperatura de saída no reator | 326°C |
| Vazão mássica | 410kg/s |
| Pressão no primário | 12,25 MPa |
| Tamanho ativo do núcleo | 1,4 m |
| Número de varetas combustíveis | 6588 |

Para dimensionar os trocadores de calor as propriedades térmicas da água foram tomadas de acordo com temperatura média tanto no circuito primário quanto no circuito secundário em condições normais do reator. As tabelas de propriedades da água e do vapor de Keenan [22] foram utilizadas.

Para os cálculos dos coeficientes de troca de calor por convecção, a vazão de circulação natural para os cálculos iniciais foi estimada como sendo 2% da vazão nominal, considerando o reator funcionando a 100% de potência nominal.

Os dados do trocador de calor casco e tubo desse sistema, que fica localizado entre o circuito primário e secundário, são mostrados na Tab. 5.2.

Tabela 5.2: Dados do primeiro trocador de calor

| | |
|--|--------------------------|
| Diâmetro interno dos tubos | 0,019 m |
| Diâmetro externo dos tubos | 0,022 m |
| Número de tubos | 400 |
| Comprimento dos tubos | 0,88 m |
| Diâmetro interno do casco | 0,66 m |
| Coefficiente de transferência total de calor | 954,66W/m ² C |

Os dados do trocador de calor localizado dentro da piscina desse sistema, são mostrados na Tab. 5.3.

Tabela 5.3: Dados do segundo trocador de calor

| | |
|--|---------------------------|
| Diâmetro interno dos tubos | 0,022 m |
| Diâmetro externo interno dos tubos | 0,025 m |
| Número de tubos | 300 |
| Comprimento dos tubos | 1,06 m |
| Coefficiente de transferência total de calor | 1452,61W/m ² C |

5.2 Análise Térmica

Utilizando os conceitos mencionados no Cap. 4, o sistema de equações é resolvido por fim, utilizando os dados dimensionados para os trocadores de calor.

As Fig 5.1 e 5.2 apresentam os principais resultados de cálculo dos parâmetros da circulação natural no sistema de remoção de calor residual proposto para um reator PWR de pequeno porte de 100 MW. A Fig 5.1 apresenta a evolução da temperatura do downcomer do primário, do secundário, assim como a temperatura do plenum do secundário e primário em relação a potência de decaimento do reator. Aumentando-se a potência, observa-se o aumento das temperaturas e uma troca de calor mais efetiva

Observa-se também que para pequenas potências, a temperatura do downcomer do secundário é bastante próxima do riser do secundário.

Em relação a vazão mássica, Fig 5.2, observa-se que ela é menor que a estimada para o dimensionamento dos trocadores de calor, o que pode ser explicado pelo fato de que a perda de carga nos trocadores de calor do sistema de remoção de calor é diferente da perda de calor dos geradores de vapor, no qual o reator troca calor quando está em operação normal.

As Figs. 5.3 e 5.4 apresentam a evolução da temperatura em relação a mudança no número de tubos do primeiro e do segundo trocador de calor. Pode-se notar que a diferença nas temperaturas no início do gráfico, na qual podemos perceber que aumentando o número de tubos do segundo trocador de calor, a diferença de tempe-

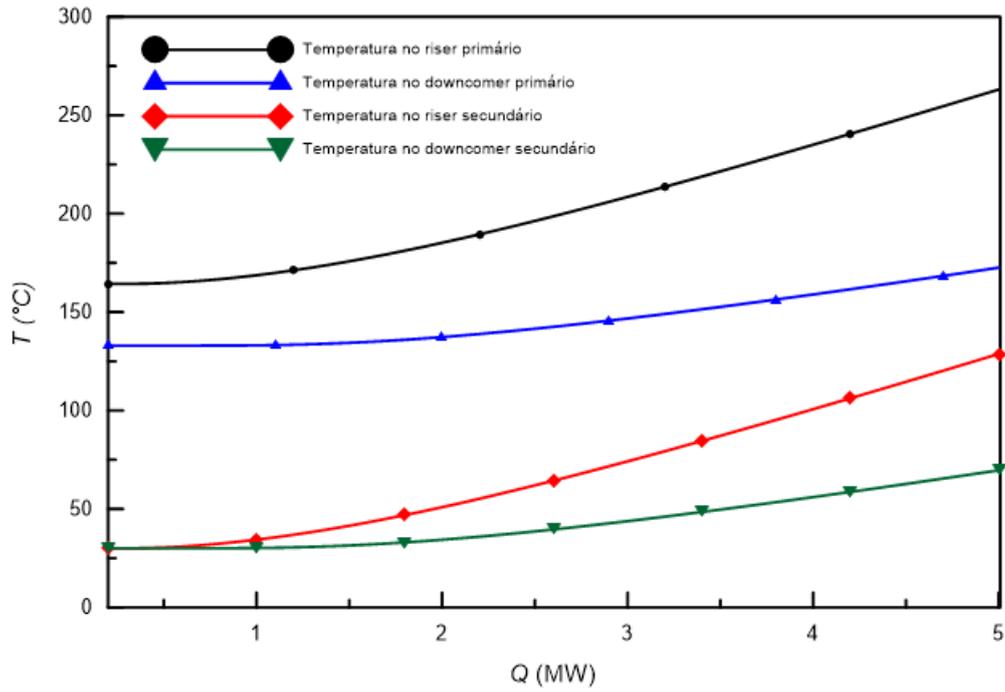


Figura 5.1: Temperaturas do sistema primário e secundário em diferentes potências

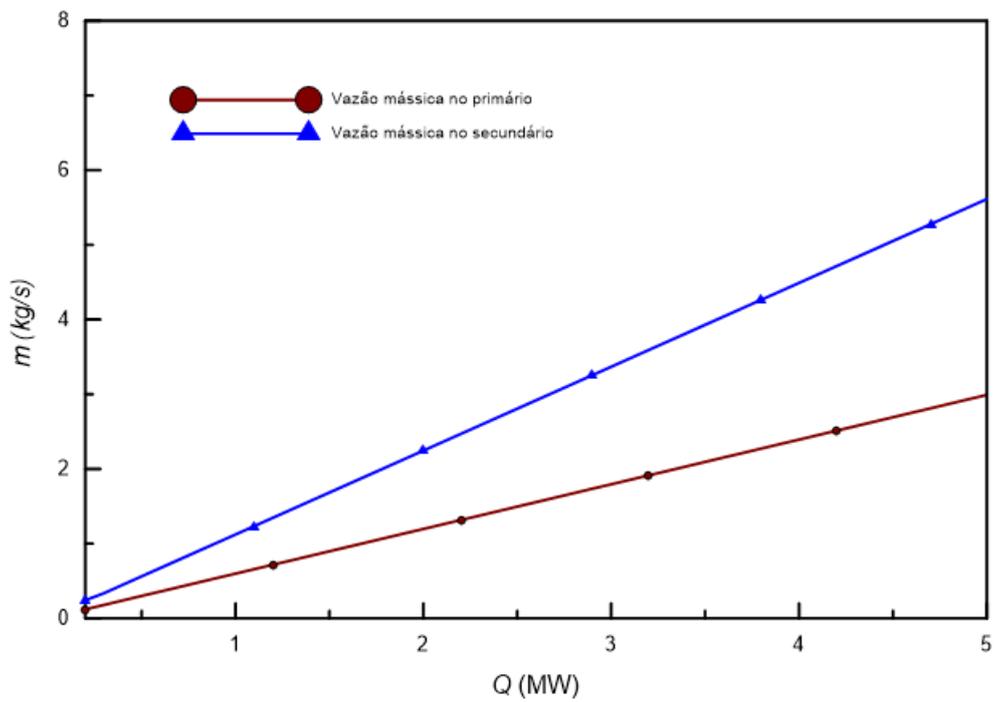


Figura 5.2: Vazão mássica do sistema primário e secundário em diferentes potências

ratura no riser e downcomer do primário vai ser significativa, porém a temperatura do riser não difere muito dos casos com um menor número de tubulações.

A vazão do primário aumenta conforme aumenta o número de tubos do primeiro trocador de calor e diminui conforme o número de tubos do circuito secundário aumenta, conforme as Fig 5.5 e 5.6, porém algumas oscilações foram detectadas no cálculo conforme foi aumentando o número de tubos.

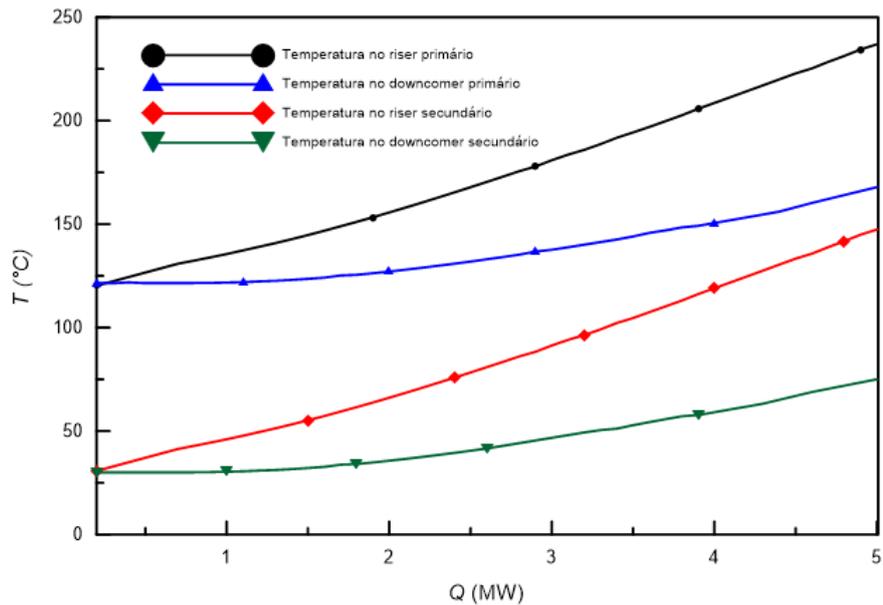


Figura 5.3: Temperaturas do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no primeiro trocador de calor

O modelo utilizado neste trabalho para representação da circulação natural no sistema de remoção de calor foi simples e de pouca sofisticação, o que pode ter ocultado informações devido a simplificação empregada. O uso de modelos mais complexos, ou até mesmo uma simulação transiente, poderiam expressar melhor o fenômeno de forma a se observar outras singularidades que não foram percebidas no trabalho aqui realizado.

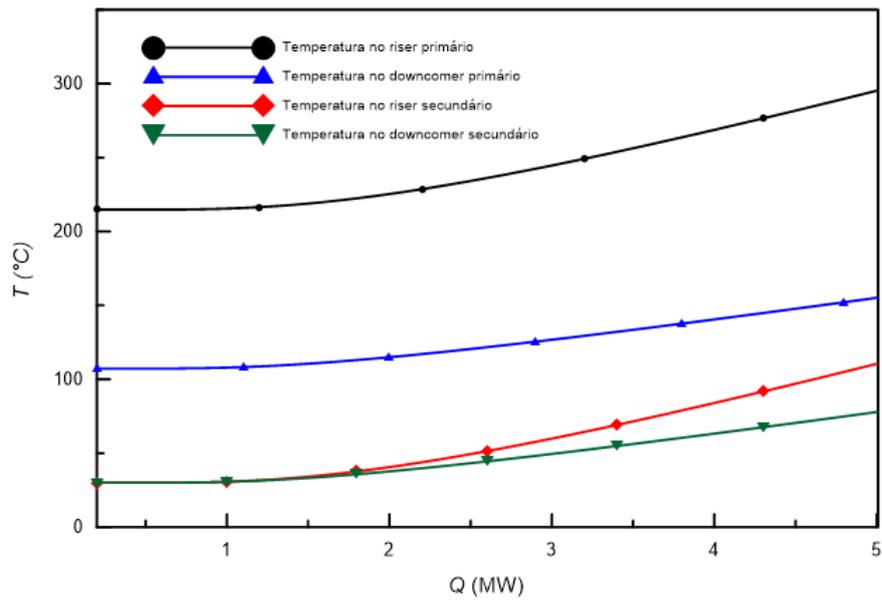


Figura 5.4: Temperaturas do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no segundo trocador de calor

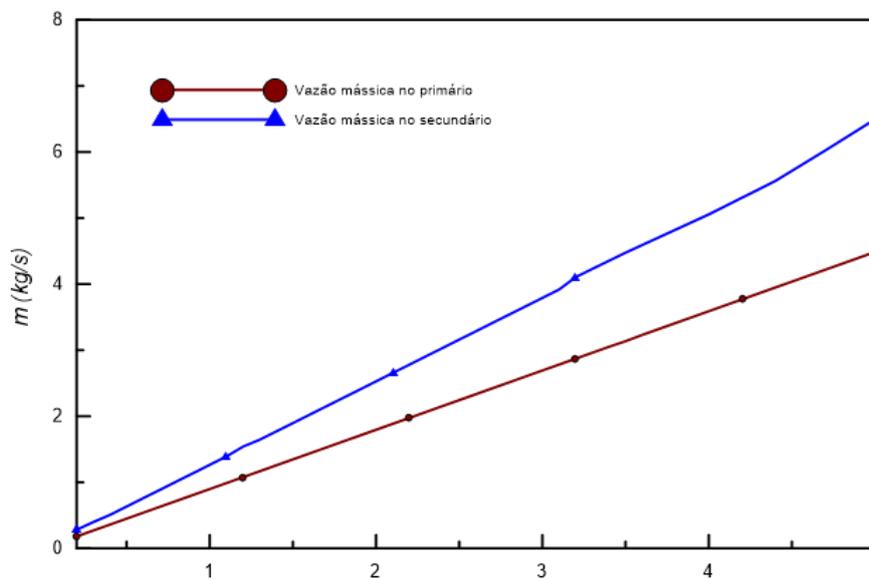


Figura 5.5: Vazão mássica do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no primeiro trocador de calor

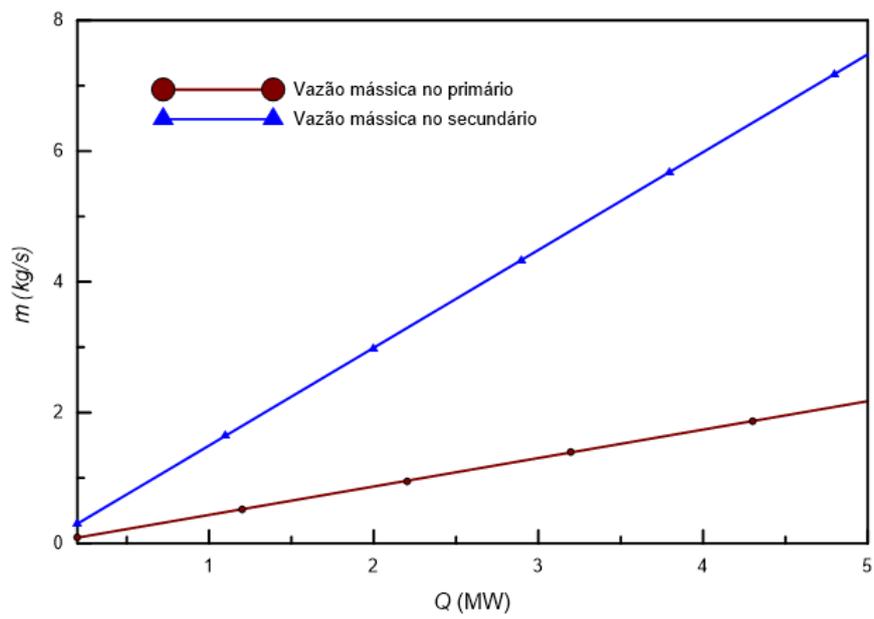


Figura 5.6: Vazão mássica do sistema primário e secundário em diferentes potências com 600 tubos no segundo trocador de calor

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

Neste trabalho estudamos um sistema de remoção de calor residual. Foram realizados um dimensionamento do circuito e cálculos referentes ao seu funcionamento, utilizando o software Mathematica para o cálculo dos perfis de temperatura e vazão mássica.

O uso de dois trocadores de calor pode aumentar a capacidade de uma planta se manter resfriada por mais tempo, sem nenhuma energia ou ação externa. O foco desde trabalho foi avaliar as temperaturas de um sistema com dois trocadores de calor, e estes foram capazes de manter o núcleo resfriado, garantindo a retirada de calor residual do sistema e integridade do reator.

O software Mathematica se mostrou uma ferramenta adequada para estudo e compreensão sobre o fenômeno de circulação natural. O software se mostrou eficiente e rápido para dimensionamento de equipamentos de troca de calor e na resolução de equações, além de possuir grande flexibilidade para a inserção de variáveis e equações mais complexas, podendo ser utilizada em diversos sistemas na área nuclear.

Para trabalhos futuros, é interessante também abordar mais fenômenos que ocorrem dentro do trocador de calor, como a ebulição e condensação, expandindo o uso do software. Apenas alguns equipamentos foram analisados neste trabalho, adotando algumas simplificações, para uma melhor análise do comportamento real da planta e dos sistemas dados experimentais e/ou simulações no mesmo sistema e em diferentes softwares são necessários, a fim de se obter uma validação dos cálculos e fazer uma estimativa de erros.

Referências Bibliográficas

- [1] F. Gonçalves and R. H. Ruiz, “Caderno de energia nuclear,” *FGV Energia*, vol. 6, 2016.
- [2] D. A. Botelho, “Análise simplificada de sistemas passivos de remoção de calor residual de reatores pwr de pequeno porte,” *Comunicação Técnica IEN/DERE/DITRE-C5/34*, 1992.
- [3] N. E. Todreas and M. S. Kazimi, *Nuclear systems I: Elements of thermal hydraulic design*, vol. 1. Taylor & Francis, 1990.
- [4] I. A. R. I. System, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. International Atomic Energy Agency, 2014.
- [5] J. Silva, “Estudo de conabilidade do reator ap1000 no cenário de um grande loca no contexto de uma aps nível 1,” *Tese de Mestrado*, 2007.
- [6] F. Incropera, *Fundamentos de Transferência de calor e Massa*. No. v. 1 in *Fundamentos de Transferência de calor e Massa*, John Wiley, 2007.
- [7] D. Q. Kern, *Procesos de Transferência de calor*. Compañía Editorial Continental, 1965.
- [8] J. B. Keller, “Periodic oscillations in a model of thermal convection,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 26, no. 3, p. 599–606, 1966.
- [9] P. Welander, “On the oscillatory instability of a differentially heated fluid loop,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 29, no. 1, p. 17–30, 1967.

- [10] Y. Zvirin, “A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 67, no. 2, pp. 203 – 225, 1982.
- [11] A. Lavine, R. Greif, and J. Humphrey, “A three dimensional analysis of natural convection in a toroidal loop -the effect of grashof number,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 30, p. 251–262, 1987.
- [12] B. Huang and R. Zelaya, “Heat transfer behavior of a rectangular thermosyphon loop,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 110, p. 487 – 493, 1988.
- [13] D. A. Botelho, “Análise de transientes de reatividade no rpr,” *Nota Técnica NT06-041-006-R.00 – CNEN/IEN/DERE*, 1984.
- [14] Z. Xinian, G. Weijun, B. H., and S. Shifei, “Transient analyses of the passive residual heat removal system,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 206, no. 1, pp. 105 – 111, 2001.
- [15] E. Krepper and M. Beyer, “Experimental and numerical investigations of temperature stratification phenomena in passive safety systems for decay heat removal,” *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE*, vol. 240(10), pp. 3170–3177, 01 2010.
- [16] X. Lv, P. M., Y. X., and G. Xia, “Design and analysis of a new passive residual heat removal system,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 303, pp. 192 – 202, 2016.
- [17] S. Kakaç, H. Liu, and A. Pramuanjaroenkij, *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Third Edition*. CRC Press, 2012.
- [18] J. N. Sweet, E. P. Roth, and M. Moss, “Thermal conductivity of inconel 718 and 304 stainless steel,” *International Journal of Thermophysics*, vol. 8, pp. 593–606, 1987.
- [19] V. Gnielinski, *New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow*, vol. 16. International Chemical Engineering, 1976.

- [20] B. Petukhov and V. Kirillov, "On heat exchange at turbulent flow of liquid in pipes. teploenergetika," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 4, pp. 63 – 68, 1958.
- [21] W. H. McAdams, *Heat Transmission*. No. 3rd ed, McGraw-Hill, 1955.
- [22] J. H. Keenan, *Steam tables: thermodynamic properties of water including vapor, liquid, and solid phases : International System of units-S.I.* Wiley, 1978.

Apêndice A

Cálculos realizados no Mathematica

Script do programa

Parâmetros

Parâmetros do reator

$$A_r := [\text{Pi}]/4 D_r^2$$

$$V_r := m_1 / (N_v [\text{Rho}]_1 A_r)$$

$$N_{\text{Rer}} := ([\text{Rho}]_1 D_r V_r) / [\text{Mu}]_1$$

Parâmetros do lado primário do IHX

$$A_{x1} := [\text{Pi}]/4 D_{x1}^2$$

$$V_{x1} := m_1 / (N_{\text{ihx}} [\text{Rho}]_1 A_{x1})$$

$$Ph_{x1} := [\text{Pi}] N_{\text{ihx}} D_{x1}$$

$$N_{\text{Rex1}} := ([\text{Rho}]_1 D_{x1} V_{x1}) / [\text{Mu}]_1$$

$$Pr_{x1} := (cp_1 [\text{Mu}]_1) / k_1$$

Parâmetros das tubulações do primeiro circuito

$$A_1 := [\text{Pi}]/4 D_1^2$$

$$V_1 := m_1 / ([\text{Rho}]_1 A_1)$$

$$N_{\text{Re1}} := ([\text{Rho}]_1 D_1 V_1) / [\text{Mu}]_1$$

Parâmetros do lado secundário do IHX

$$A_{x2} := 0.25 (D_{\text{sihx}}^2) ((P_{\text{tihx}} - D_{x2}) / P_{\text{tihx}})$$

$$D_{x2} := (4 (P_{\text{tihx}}^2 - ([\text{Pi}] D_{x2}^2) / 4)) / ([\text{Pi}] D_{x2})$$

$$Ph_{x2} := [\text{Pi}] N_{\text{ihx}} D_{x2}$$

$$Pr_{x2} := (cp_2 [\text{Mu}]_2) / k_2$$

$$Vx2 := m2 / ([Rho]2 Ax2)$$

$$NRex2 := ([Rho]2 Dex2 Vx2) / [Mu]2$$

Parâmetros das tubulações do segundo circuito

$$A2 := [Pi] / 4 D2^2$$

$$V2 := m2 / ([Rho]2 A2)$$

$$NRe2 := ([Rho]2 D2 V2) / [Mu]2$$

Parâmetros do resfriador no lado secundário

$$Ac := [Pi] / 4 Dcz^2$$

$$Prc := (cp2 [Mu]2) / k2$$

$$Phc := [Pi] Nc Dc$$

$$Vc := m2 / (Nc [Rho]2 Ac)$$

$$NRec := ([Rho]2 Dc Vc) / [Mu]2$$

Coefficientes de troca de calor

IHX

$$Nux2 := 0.36 (NRex2)^{0.55} (Prx2)^{1/3}$$

$$hx2 := (Nux2 k2) / Dx2$$

$$f[x_] := (0.790 \text{Log}[x] - 1.64)^{-2}$$

$$Nux1 := ((f[NRex1]/8) (NRex1 - 1000) Prx1) / (1 + 12.7 (f[NRex1]/8)^{1/2} ((Prx1)^{2/3} - 1))$$

$$hx1 := (Nux1 k1) / Dx1$$

$$K[x_] := 11.45 + 1.156 \cdot 10^{-2} x + 7.72 \cdot 10^{-6} x^2$$

$$Uixh := 1 / (Dx2 / Dx1 \cdot 1 / hx1 + (Dx2 Rfi) / Dx1 + (Dx2 \text{Log}[Dx2 / Dx1]) / (2 K[Tixhmed]) + Rfo + 1 / hx2)$$

$$Aixh := (0.01 Q) / (Uixh [CapitalDelta]T)$$

$$Lx := Aixh / ([Pi] Dx2 Nihx)$$

Resfriador

$$f[x_] := (0.790 \text{Log}[x] - 1.64)^{-2}$$

$$Nuc := ((f[NRec]/8) (NRec - 1000) Prc) / (1 + 12.7 (f[NRec]/8)^{1/2} ((Prc)^{2/3} - 1))$$

$$hc := (Nuc k2) / Dc$$

$$Nup := 0.664 (5 \cdot 10^5)^{0.5} ((cp3 [Mu]3) / k3)^{1/3}$$

$hp := (Nup \ k3)/Dc2$
 $K[x \ _] := 11.45 + 1.156 \ 10^{(-2)} \ x + 7.72 \ 10^{(-6)} \ x^2$
 $Uc = 1/(Dc2/Dc \ 1/hc + (Dc2 \ Rfi)/Dc \ (Dc2 \ Log[Dc2/Dc])/(2 \ K[Tcmed]) +$
 $Rfo + 1/ \ hp)$
 $Acc := (0.015 \ Q)/(Uc \ [CapitalDelta]T)$
 $Lc := Acc/([Pi] \ Dc2 \ Nc)$
Distribuição de Temperatura
Temperatura no reator
 $ql0 := (x \ Q)/(Nv \ Lr)$
 $ql[z \ _] := ql0 \ Cos([Pi] \ z)/Lr$
 $eqr := mdot1/Nv \ cp1 \ SubscriptBox[(\partial), (z)](Tmr[z]) == ql[z]$
 $icr = Tmr[z] == Tc1 \ /. \ z -> - (Lr/2);$
 $solr = DSolve[eqr, icr, Tmr[z], z][[1]];$
Temperatura do refrigerante em IHX
 $eqx1 := mdot1 \ cp1 \ SubscriptBox[(\partial), (s)](Tmx1[s]) == -Uixh \ Phx1$
 $(Tmx1[s] - Tmx2[s])$
 $icx1 = Tmx1[s] == Th1 \ /. \ s -> 0;$
 $eqx2 := mdot2 \ cp2 \ SubscriptBox[(\partial), (s)](Tmx2[s]) == -Uixh \ Phx2$
 $(Tmx1[s] - Tmx2[s])$
 $icx2 = Tmx2[s] == Tc2 \ /. \ s -> Lx;$
 $solx = DSolve[eqx1, icx1, eqx2, icx2, Tmx1[s], Tmx2[s], s][[1]];$
Temperatura no resfriador
 $eqc := mdot2 \ cp2 \ SubscriptBox[(\partial), (s)](Tmc[s]) == -Uc \ Phc \ (Tmc[s]$
 $- Ta)$
 $icc = Tmc[s] == Th2 \ /. \ s -> 0;$
 $solc = DSolve[eqc, icc, Tmc[s], s][[1]];$
Temperaturas - Cálculo
 $eqT1 = Th1 == Tmr[z] \ /. \ solr \ /. \ z -> Lr/2;$
 $eqT2 = Tc1 == Tmx1[s] \ /. \ solx \ /. \ s -> Lx;$
 $eqT3 = Th2 == Tmx2[s] \ /. \ solx \ /. \ s -> 0;$
 $eqT4 = Tc2 == Tmc[s] \ /. \ solc \ /. \ s -> Lc;$

```

solT = Solve[eqT1, eqT2, eqT3, eqT4, Tc1, Th1, Tc2, Th2][[1]];
Tmr1[z_] := Tmr[z] /. solr;
Trav = 1/Lr SubsuperscriptBox[(Integral, (-Lr)/2), (Lr/2)](Tmr1[z]) [DifferentialD]z) /. solT;
qT4 = Tc2 == Tmc[s] /. solc /. s -> Lc
Balanço
fshell[x_] := Exp[0.576 - 0.19 Log[x]]
[CapitalDelta]pfx2 := fshell[NRex2] (([Rho]2 Vx2)^2 Dsihx)/(2 [Rho]2 Dex2 )
[CapitalDelta]pfx1 := Nihx f[NRex1] Lx/Dx1 1/2 [Rho]1 Vx1^2
[CapitalDelta]pfr := Nv f[NRer] Lr/Dr 1/2 [Rho]1 Vr^2
[CapitalDelta]pf1 := f[NRe1] L1/D1 1/2 [Rho]1 V1^2
[CapitalDelta]pf2 := f[NRe2] L2/D2 1/2 [Rho]2 V2^2
[CapitalDelta]pfc := Nc f[NRec] Lc/Dc 1/2 [Rho]2 Vc^2
[CapitalDelta]pb1 := [Rho]1 g [Beta] (Trav Lr + Th1 Z1 - Tc1 (Lr + Z1))
[CapitalDelta]pb2 := [Rho]2 g [Beta] ( Th2 - Tc2) Z2
eqb1 := [CapitalDelta]pfr + [CapitalDelta]pfx1 + [CapitalDelta]pf1 == [CapitalDelta]pb1
eqb2 := [CapitalDelta]pfc + [CapitalDelta]pfx2 + [CapitalDelta]pf2 == [CapitalDelta]pb2
sys = eqb1, eqb2 /. solT;

```