

METODOLOGIA PARA ESTUDOS DE CIRCULAÇÃO NATURAL EM
CIRCUITOS FECHADOS

Rafael de Oliveira Pessoa de Araujo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA DE REATORES.

Orientador: Profa. Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2009

PESS Pessoa de Araujo, Rafael de Oliveira

Metodologia para Estudos de Circulação Natural em Circuitos Fechados/ Rafael de Oliveira Pessoa de Araujo– Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2009.

61f

Orientador: Maria de Lourdes Moreira

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2009.

1. Engenharia de Reatores. 2. Elementos Finitos.
3. Fluidodinâmica Computacional. 4. Equações de Navier-Stokes.

CDD

CDU

METODOLOGIA PARA ESTUDOS DE CIRCULAÇÃO NATURAL EM
CIRCUITOS FECHADOS

Rafael de Oliveira Pessoa de Araujo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA DE REATORES.

Aprovada por:

Profa. Maria de Lourdes Moreira (PPGIEN/CNEN)

Prof. Rubens Souza dos Santos (PPGIEN/CNEN)

Dr. José Luiz Horácio Faccini (IEN/CNEN)

Dra. Alzira Abrantes Madeira (CNEN)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2009

AGRADECIMENTOS

A minha família, meu Pai (Getúlio), minha mãe (Celia) e meus irmãos, Bruno e Ana Alzira que sempre estiveram me apoiando ao longo de minha vida e de meu trabalho.

A orientadora e amiga Professora Maria de Lourdes Moreira, que sempre me incentivou e ajudou em momentos difíceis e que sem a orientação e dedicação este trabalho não seria realizado.

Aos professores do PPGIEN que contribuíram muito para o meu desenvolvimento profissional, em especial aos Doutores David Adjuto Botelho(*in memoria*) por sempre acreditar em mim, Paulo Augusto Berquó de Sampaio por seus ensinamentos e por Reinaldo Jacques Jospin pelo incentivo e ajuda.

A Aline que me apoiou.

Aos amigos e companheiros do mestrado, Altivo, André, Carlos Alberto, Douglas, Marco Aurélio e Stefan que com o companheirismo e otimismo tornaram a convivência mais confortável e alegre. Em especial gostaria de agradecer ao Altivo que sempre me apoiou, ajudou e esteve presente em todos os passos desse trabalho; ao Carlos Alberto por nunca deixar de ajudar em todos os momentos e ao amigo Stefan que me recebeu em sua casa em um dos momentos mais difíceis de minha vida.

Aos amigos José Augusto e sua esposa Ana Paula por me apoiarem e estarem sempre presentes em minha vida.

Aos amigos do IEN que estiveram presentes ao longo do curso, sem esquecer o Milton por sua ajuda fundamental e apoio, Carla, Antônio e o André.

Aos funcionários da biblioteca do IEN, Almir, Luana e Maria Bernarda pelo apoio, dedicação e alegria.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGIEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

METODOLOGIA PARA ESTUDOS DE CIRCULAÇÃO NATURAL EM CIRCUITOS FECHADOS

Rafael de Oliveira Pessoa de Araujo

Março/ 2009

Orientadora: Maria de Lourdes Moreira

Programa: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do IEN

Este trabalho apresenta os resultados de uma análise de estabilidade do fenômeno de circulação natural monofásica unidimensional em um circuito fechado, através de uma simulação computacional com o método de elementos finitos. Para isso utilizaremos as equações de Navier-Stokes em coordenadas cartesianas para os balanços de massa, momento e uma equação de energia. Esta formulação foi implementada em um código computacional, originalmente desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear(IEN-CNEN) estando o mesmo disponível para futuras análises e projetos de usinas nucleares.

Abstract of the thesis presented to PPGIEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Science (M. Sc.)

METHODOLOGY FOR STUDIES OF NATURAL CIRCULATION IN CLOSED CIRCUITS.

Rafael de Oliveira Pessoa de Araujo

March/2009

Advisor: Maria de Lourdes Moreira

School: Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Nucleares do IEN

This work presents the results obtained from the analysis of stability of the phenomenon of the natural circulation for one-dimension single-phase flow in a closed loop, by a computer program with the method of finite element. The Navier-Stokes equations in cartesian geometry were used for the balance of mass, momentum and one equation for energy. The formulation has been implemented in a computer code developed at the Nuclear Engineering Institute(IEN-CNEN) and is now available either for futures analysis or design of nuclear systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO.....	3
2 CIRCULAÇÃO NATURAL.....	4
2.1 SISTEMAS PASSIVOS.....	4
2.2.CIRCULAÇÃO NATURAL.....	4
2.1.1 Vantagens da Circulação Natural.....	5
2.1.2 Desvantagens da Circulação Natural.....	6
2.3.SISTEMA PASSIVO DE REFRIGERAÇÃO DO REATOR AP1000.....	7
2.3.1 Sistema de Resfriamento do Reator.....	8
2.3.2 Sistema de Segurança Passiva.....	10
2.3.2.1 Sistema Passivo de Resfriamento do Reator.....	12
2.3.3 Sistema de Injeção de Alta Pressão.....	15
2.3.4 Sistema de injeção com Acumuladores.....	16
2.3.5 Sistema de injeção de baixa pressão.....	17
2.3.6 Sistema de Despressurização Automática (SDA).....	19
2.3.7 Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual.....	20
2.3.8 Sistema Passivo de Resfriamento da Contenção	22
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 INTRODUÇÃO.....	26
3.2 MODELO FÍSICO.....	27
3.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES NA FORMA ADIMENSIONAL.....	29
3.4 MÉTODO ESTABILIZADO PARA ELEMENTOS FINITOS.....	32
3.5 MÉTODO ESTABILIZADO PARA PASSO DE TEMPO LOCAL E SINCRONIZADO...35	
3.6 RESOLUÇÃO DO MÉTODO ESTABILIZADO PARA FORMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS.....	39
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	40
4.1 CASO EXEMPLO.....	40
4.2 NODALIZAÇÃO DA GEOMETRIA COM O PROGRAMA GID.....	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
6 ANEXO A FORMULAÇÃO DAS MATRIZES.....	48
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

Ω	Domínio limitado aberto
Γ	Contorno de limitação do domínio
u_θ	Componente tangencial de velocidade
u	Componente axial de velocidade
P	Pressão
T	Temperatura
μ	Viscosidade do fluido
k	Condutividade térmica
c	Capacidade térmica
ρ	Densidade do fluido (à temperatura de referência T_0)
β	Coefficiente de expansão volumétrica
x	Componente axial de posição
g_x	Componente axial de aceleração da gravidade
\mathbf{g}	Vetor aceleração da gravidade
n_x	Componente axial do vetor normal ao contorno
D	Diâmetro característico
Re	Número de Reynolds
Ri	Número de Richardson
Pr	Número de Prandtl
Δt	Passo de tempo
ΔP	Variação temporal do campo de pressão
Δu	Componente axial da variação temporal do campo de velocidade
ΔT	Variação temporal do campo de temperatura
$w^{n+\theta}$	Valor de uma variável w no tempo $n + \theta$
\hat{w}	Variável w espacialmente discretizada
w_j	Valor de w no nó j
\bar{w}	Valor prescrito de w
N_j	Função de norma no nó j
λ	Parâmetro de normalização
γ	Parâmetro de normalização

\widehat{R}_x	Componente axial do resíduo da discretização da equação de quantidade de movimento
\widehat{E}	Resíduo da discretização da equação de energia
W_i	Função de peso do nó i
w'	w adimensional
h_e	Tamanho linear do elemento finito
α	Parâmetro ótimo de upwind
Re_h	Número de Reynolds do elemento finito
Pe_h	Número de Peclet do elemento finito
Δt^*	Passo de tempo sincronizado
$\Delta \widehat{w}$	Variações de w obtidas para passos de tempo específicos
Δw_j^*	Valores nodais das variações de w de t^n a t^*
w_j^*	Solução sincronizada em t^*
\overline{G}	Fluxo de massa

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Esquema de um loop de Circulação Natural.....	5
Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da Circulação Natural de reatores de potência.....	7
Figura 2 - Sistemas de injeção de segurança.....	11
Figura 3 – Sistema Passivo de Injeção de Alta Pressão.....	16
Figura 4 – Sistema de injeção de segurança pelos acumuladores.....	17
Figura 5 – Sistema de injeção de baixa pressão.....	19
Figura 6 – Sistema de Despressurização Automática.....	20
Figura 7 – Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual.....	22
Figura 8 – Sistema passivo de resfriamento da contenção.....	25
Figura 9 Representação esquemática de avanço de tempo de solução que usa passos de tempo locais e sincronização no tempo $t^n + \Delta t^*$	37
Tabela 2: Comparação entre o modelo teórico e resultados numéricos para determinada condições físicas e geométricas	41
Figura 10: Esquema da configuração HHHC (aquecedores horizontais e refrigeradores horizontais).....	43
Figura 11– Vazão mássica calculada para os casos TEÓRICO, NUMÉRICO REF. E PABSMALU.....	44
Figura 12 Esquema da malha gerada pelo GID.....	45
Figura 13 Detalhe da malha de elementos finitos no canto superior esquerdo do loop.....	46
Figura 14 Detalhe da malha de elementos finitos no canto superior esquerdo do loop com os valores nodais para temperatura.....	46
Figura 15 Detalhe da malha de elementos finitos na parte inferior do loop referente ao aquecedor e seu valor inicial.....	47
Figura 16 Detalhe da malha de elementos finitos na parte superior do loop referente ao Refrigerador e seu valor inicial.....	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O trabalho proposto engloba diversas áreas da engenharia através dos problemas que envolvem a mecânica de fluidos e a transferência de calor. Esses problemas são resolvidos através de simulações numéricas e experimentais.

Métodos computacionais para estudos de escoamentos de fluidos estão sendo desenvolvidos no mundo todo, inclusive no Brasil, no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN-CNEN). O programa desenvolvido neste trabalho simula computacionalmente a mecânica dos fluidos, modelando o meio contínuo através de suas equações constitutivas. Foi utilizado como base desse código computacional um programa desenvolvido por De Sampaio [1,2]. O desenvolvimento deste trabalho envolve a resolução da equação unidimensional de convecção-difusão em coordenadas cartesianas para um circuito fechado, para simular a convecção natural no mesmo. E é em função desta equação que descreveremos o método numérico aplicado ao código computacional.

Com a evolução dos computadores a aplicação dos métodos numéricos reduziu muito o tempo de resposta dos resultados, e a tendência é diminuir mais ainda na medida em que os computadores e processadores evoluem, tornando viável a utilização de programação em simulações de acidentes e de transferência de calor em reatores.

Outro fator que estimula a produção de programas novos é o fato de o governo brasileiro estar investindo no programa de energia nuclear dando ênfase em reatores. A energia nuclear vive um renascimento mundial e será essencial para garantir a segurança energética no Brasil. Nas próximas décadas, as usinas nucleares terão papel importante na matriz elétrica brasileira como complementação à geração hídrica, cujo aproveitamento se tornará cada vez mais difícil, especialmente depois de 2030, devido às restrições ambientais.[3]

O reator do tipo PWR (Pressurized Water Reactor) produz mais da metade de toda a eletricidade de origem nuclear do mundo. No Brasil, ambas as usinas nucleares existentes (Angra I e II) e a única ainda em processo de construção, Angra III, são deste tipo. Além de ser o mais usado para usinas atômicas no mundo, este tipo de reator é também o mais usado em navios e submarinos nucleares. O funcionamento do PWR é baseado no fato de que a água sob altas pressões se mantém na sua fase líquida a altas temperaturas, não alterando suas propriedades físicas. Nesse tipo de reator nuclear de potência quando ocorre um acidente de

despressurização causado por uma ruptura no circuito principal de refrigeração, uma circulação natural pode ser estabelecida por um longo período. O sistema estudado nesse trabalho é similar ao Reator avançado do tipo AP1000, que é um projeto com certificação da NRC (Nuclear Regulatory Commission) refrigerado a água pressurizada.

Durante o desenvolvimento deste trabalho é feita uma descrição da usina AP1000 levando em conta os seguintes sistemas passivos de segurança: sistema de injeção de alta pressão, sistema de injeção por acumuladores, sistema de despressurização automática, sistema de injeção de baixa pressão, sistema de remoção de calor residual, sistema de recirculação e sistema de resfriamento da contenção.

A circulação natural em reatores pode exibir fluxos de instabilidades conhecidas no fenômeno, sempre que combinações de parâmetros geométricos e operacionais, tais como a altura e o comprimento do circuito, bem como a potência térmica e o fator de atrito, resultar em uma perturbação de temperatura gerada nos aquecedores e nos resfriadores. Algumas dessas instabilidades têm sido estudadas pela comunidade científica em todo o mundo, tanto pela importância para projetos de equipamentos para a transferência de calor, como pelo interesse em aspectos físicos e matemáticos envolvidos na previsão do comportamento instável do transiente. [4,5]

Em conjunto com as tecnologias nucleares, os estudos experimentais do fenômeno da circulação natural, além de estarem relacionados com o interesse para sistemas de segurança passivos, amplamente aprovados na terceira geração de reatores, constituem uma oportunidade para avaliação dos códigos termo hidráulicos utilizados atualmente [6]. Estes códigos são de fato desenvolvidos para análises de acidentes em reatores nucleares, e os mesmos possuem a capacidade de prever o comportamento complexo dinâmico do fenômeno de convecção natural, mesmo sendo de uma forma simples. Entre os modelos clássicos pressupostos adotados nesses códigos, cuja adequação é altamente questionável quando se lida com análises de estabilidade, em uma circulação natural monofásica, algumas suposições devem ser levadas em consideração:

- A utilização de leis constitutivas para o atrito e a transferência de calor derivados de experimentos de convecção forçada no estado estacionário.
- O desenvolvimento da camada limite nas condições de contorno nos aquecedores e resfriadores.
- A utilização de esquemas numéricos de primeira ordem, que são propensos a ter efeitos dissipativos e dispersivos na convergência da solução.

Tendo em conta as eventuais consequências que essas suposições possam ter sobre as previsões da circulação natural, nos experimentos realizados em aparatos simples consegue-se obter valiosas informações. Na verdade, são capazes de evidenciar claramente as necessidades reais para uma melhoria nas ferramentas disponíveis.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo do fenômeno da circulação natural que ocorre em sistemas fechados através e sua simulação em um programa que utiliza a linguagem computacional FORTRAN 90. O programa de pré processamento GID (Graphical Interface Design), é usado para gerar a malhagem de elementos finitos do tipo linear e também para criar uma interface de dados compatível com o código computacional. O código simula a circulação natural para diversos sistemas de um reator nuclear.

O programa tem a capacidade de calcular as distribuições de temperatura, e vazão mássica, ao longo do sistema fechado de um PWR.

2 CIRCULAÇÃO NATURAL

2.1 - SISTEMAS PASSIVOS

Neste capítulo iremos abordar o fenômeno da circulação natural nos reatores nucleares. Na área de fenômenos termo-hidráulicos em reatores avançados resfriados a água, atividades recentes da IAEA tem coletado dados internacionais sobre coeficiente de transferência de calor e queda de pressão [7], e tem compartilhado informações sobre dados dos métodos analíticos da circulação natural [8], e em ensaios experimentais e qualificação de métodos analíticos [9].

2.2 CIRCULAÇÃO NATURAL

Diversos projetos de reatores nucleares avançados utilizam a circulação natural para a refrigeração do núcleo durante a operação normal. Este sistema opera com a potência máxima do reator utilizando o fenômeno da circulação natural para o escoamento através do núcleo. A circulação natural surge por causa da diferença de densidade entre a fonte quente e as bobinas helicoidais do trocador de calor do sistema passivo de remoção de calor residual.

A circulação natural em um reator do tipo AP1000 ocorre após uma ruptura repentina em todas as tubulações conectadas ao vaso do reator, esse regime de circulação natural é estabelecido à medida que o fluido aquecido sobe para a câmara superior e é substituído pelo fluido da câmara inferior.

A simulação computacional do fenômeno da circulação natural que ocorre nesses tipos de reatores, após a ruptura de todas as tubulações, será definida por uma malha de elementos finitos criados pelo programa de pós e pré-processamento do GID, com as coordenadas definidas e os números de nós semelhantes aos publicados em um trabalho recente [10]

. A figura 1 mostra o esquema de um loop de circulação natural semelhante ao utilizado neste trabalho

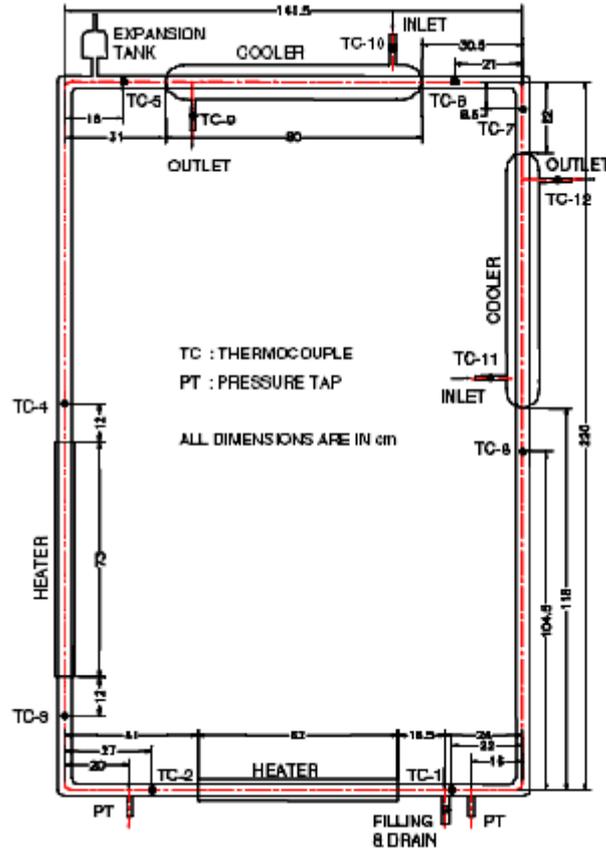


Figura 1 – Esquema de um loop de Circulação Natural.

2.2.1 Vantagens da Circulação Natural

A primeira vantagem da circulação natural está na naturalidade do sistema. As eliminações da fonte de alimentação e bombas ativas podem simplificar muito a construção, operação e manutenção do sistema. Ademais, a eliminação das bombas e tubos de ligação também elimina alguns cenários de acidente associados, como perda de fluxo das bombas, acidentes de ruptura do selo da bomba e efeitos de turbulência durante a parada devida a um pequeno acidente de perda de refrigerante (SBLOCAs).

Outra vantagem é que a distribuição do fluxo em paralelo ao canal do núcleo é muito mais uniforme em um sistema de circulação natural. Além disso, as características do escoamento bifásico em função da potência são também melhores no sistema de circulação natural. Causando um aumento do escoamento com a potência, considerando que o fluxo decresce com o aumento da potência em uma circulação forçada.

Devido aos baixos requisitos, o sistema de circulação natural de um reator tende a ter o fluido com um grande volume e relativamente uma baixa densidade de potência comparado

com o sistema de circulação forçada. Como resultado, a resposta térmica do sistema de circulação natural é lenta, dando tempo suficiente para os operadores responderem às turbulências das plantas. [11]

2.2.2 Desvantagens da Circulação Natural

A primeira desvantagem do sistema de circulação natural é que a velocidade de escoamento é lenta. Para aumento da potência do reator, teria que existir um aumento da altura do loop ou uma diminuição da resistência do loop, o que poderiam ocasionar um aumento nos custos de uma planta de reator.

Em geral, o fluxo de massa através da circulação natural no sistema primário do reator é lento. Como resultado, o canal de potência máxima permitida é menor conduzida para um grande volume do núcleo comparado com o sistema de circulação forçada de mesma classificação. Entretanto, grandes volumes de fluxo de massa no núcleo, podem resultar em problemas de controles por zonas e estabilidades. Enquanto a instabilidade é comum a ambos os sistemas de circulação, a natural e a forçada, inerente a isto, a circulação natural é menos estável do que o sistema de circulação forçada. Este fato está atribuído à não linearidade natural do fenômeno da circulação natural, onde qualquer mudança na direção da força afeta o fluxo que por sua vez afeta a força motriz, o que pode levar a um comportamento oscilatório.

O fluxo de massa na circulação natural de reatores é menor do que na circulação forçada, e tende a usar o escoamento máximo admissível de saída para minimizar o seu tamanho.

A circulação natural em reatores é para ser iniciada a partir da estagnação das condições de pressões e de temperaturas entre a parte superior e inferior do vaso do reator. A pressão ao passar por uma zona instável, tenta evitar uma ocorrência de instabilidade prematura do fluxo crítico de calor. Sob essas circunstâncias, é essencial especificar o início do procedimento que causa a instabilidade [6]. A tabela 1 resume as vantagens e desvantagens do fenômeno da circulação natural em um reator.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da Circulação Natural de reatores de potência

Vantagens da Circulação natural	Desvantagens da Circulação Natural
Custo reduzido através da simplicidade	Baixa velocidade de condução do fluído
As bombas são eliminadas	Menor potência máxima por canal
Possibilidade de melhora da distribuição de fluxo no núcleo	Instabilidades potenciais
Melhoria nas características de duas fases em função da potência.	Baixo fluxo de calor crítico
Grande inércia térmica	Início de procedimentos específicos exigidos

2.3 SISTEMA PASSIVO DE REFRIGERAÇÃO DE REATOR

Um exemplo de reator com sistema passivo de refrigeração é o reator AP1000 que é considerado avançado, e o mesmo servirá de análise para o programa desenvolvido neste trabalho.

O AP1000 é um reator PWR com dois circuitos, projetado para produzir 1000MWe e está classificado como um reator avançado a água leve, utilizando redundâncias de segurança passiva, que são sistemas baseados em forças naturais como gravidade, convecção, condensação, circulação natural, etc. O principal objetivo do reator nuclear AP1000 é proporcionar uma usina com projeto simplificado que possa atender às exigências da NRC (Nuclear Regulatory Commission) no tocante à segurança, além de demonstrar competitividade econômica com outras usinas nucleares durante o ciclo de operação.

A concepção da usina AP-1000 é similar à dos atuais PWR em operação, porém, devido à implementação de sistemas de segurança passiva, esta usina sofreu importantes simplificações que levaram à criação de sistemas redundantes de resfriamento do reator que não necessitam de potência elétrica, além da utilização de 60% menos válvulas, 75% menos conexões, 80% menos cabos de controle, 35% menos bombas em volume construído 50% menor do que os atuais PWR. [12]

Além desses fatores, devido a sua concepção, onde os sistemas de segurança do reator são baseados em forças naturais, não se faz necessária a montagem de uma usina protótipo nem a criação de modelos para a sua regulamentação.

Devido à simplificação dos sistemas da usina combinado ao aumento das margens de operação da mesma, a ação dos operadores durante um evento de acidente é reduzida, cabendo ao operador ações para manter as configurações de segurança da usina seguindo os acidentes de base de projeto.

2.3.1 O Sistema de Resfriamento do Reator

O Sistema de Resfriamento do Reator (SRR) AP1000 consiste de dois circuitos de transferência de calor contendo cada um deles: um gerador de vapor, duas bombas de remoção de calor, uma perna quente e duas pernas frias para circulação de líquido refrigerante, um pressurizador, tubulações, válvulas e instrumentação para controle operacional e monitoramento da segurança da usina nuclear.

O SRR possui as seguintes bases de projeto:

- Transferir o calor produzido durante a operação do reator para o sistema de vapor e de conversão de potência durante a operação da usina nuclear;
- Transferir para o sistema de remoção de calor residual (SRCR) o calor produzido pelos produtos de fissão durante as paradas da usina;
- Manter a integridade do combustível nuclear durante a operação normal ou durante a ocorrência de transientes, incluindo a transição entre a atuação do SRCR e o sistema passivo de remoção de calor residual (SPRCR);
- Fornecer água do inventário utilizada como moderador e refletor de nêutrons, conservando os nêutrons térmicos;
- Manter a homogeneidade de absorvedores de nêutrons para o controle da reatividade;
- Acomodar a pressão e a temperatura do reator durante a operação e ocorrência de transientes;

Os seguintes componentes fazem parte do SRR do AP1000:

- Vaso do reator, incluindo as barras de controle e seus mecanismos;
- As bombas de refrigeração - quatro bombas encamisadas que transferem fluido entre o reator e os componentes de refrigeração;
- Dois geradores de vapor;
- O pressurizador;
- Tubulação de interconexão dos sistemas;
- Válvulas.

Durante a operação, as bombas de refrigeração circulam água pressurizada através do vaso de pressão e dos geradores de vapor. A água, que serve como refrigerante, moderador e solvente para o ácido bórico, aquece ao passar pelo núcleo do reator, removendo o calor produzido por este. Ao passar pelo gerador de vapor, essa água transfere o calor para as linhas de vapor principal, sendo, então, bombeada de volta para o vaso de pressão para repetir o ciclo de remoção de calor.

A pressão do SRR é controlada pelo pressurizador, que mantém água e vapor de água em equilíbrio pela ação de aquecedores elétricos ou sprays ou ambos. No pressurizador, o vapor é gerado pelos aquecedores ou condensados pelos sprays para controlar as variações de pressão que resultam das expansões ou contrações do refrigerante do reator. Há também, conectadas ao pressurizador, válvulas de alívio de pressão para o caso da ação do pressurizador não ser suficiente para controlar o excesso de pressão do reator. Neste caso, as válvulas abrem e proporcionam uma descarga de inventário no prédio da contenção. Além disso, há também dois grupos de válvulas redundantes que compõem os três primeiros estágios do Sistema de Despressurização Automática, que descarregam vapor e água em três estágios de despressurização através de difusores localizados no Tanque de Reserva de Água da Contenção, que faz parte do Sistema Passivo de Resfriamento do Reator [12].

O quarto estágio do sistema de despressurização automática é composto por duas redundâncias de válvulas ligadas à perna quente do SRR, e quando acionadas, descarregam diretamente na atmosfera da contenção.

2.3.2 Sistemas de Segurança Passiva

O reator AP1000 utiliza sistemas passivos de segurança para proporcionar a segurança da usina e atender aos critérios de segurança da NRC.

Nos sistemas passivos de segurança não são utilizadas bombas, ventiladores, geradores diesel ou qualquer outra máquina rotativa, necessitando apenas de válvulas para alinhá-los, quando necessário. Os sistemas passivos de segurança são, significativamente, mais simples do que os sistemas ativos pois, além de mais simples, esses sistemas não necessitam de uma grande rede de outros sistemas de suporte de segurança utilizado em uma típica usina PWR, tal como fornecimento de energia elétrica, HVAC (heating, ventilating, ar conditioning) e prédios para abrigar sistemas de água de resfriamento. Essas simplificações incluem a eliminação dos geradores diesel de emergência e sua rede de sistemas de suporte como tanques de armazenamento de combustível, bombas de transferência de combustível, sistemas de exaustão, etc.

Os dispositivos passivos de segurança do AP1000 incluem a injeção passiva de segurança, o sistema de remoção de calor residual passivo e o resfriamento da contenção, projetados para atender às normas de segurança da NRC. Vejamos agora uma descrição do Sistema Passivo de Resfriamento do Reator e seus subsistemas:

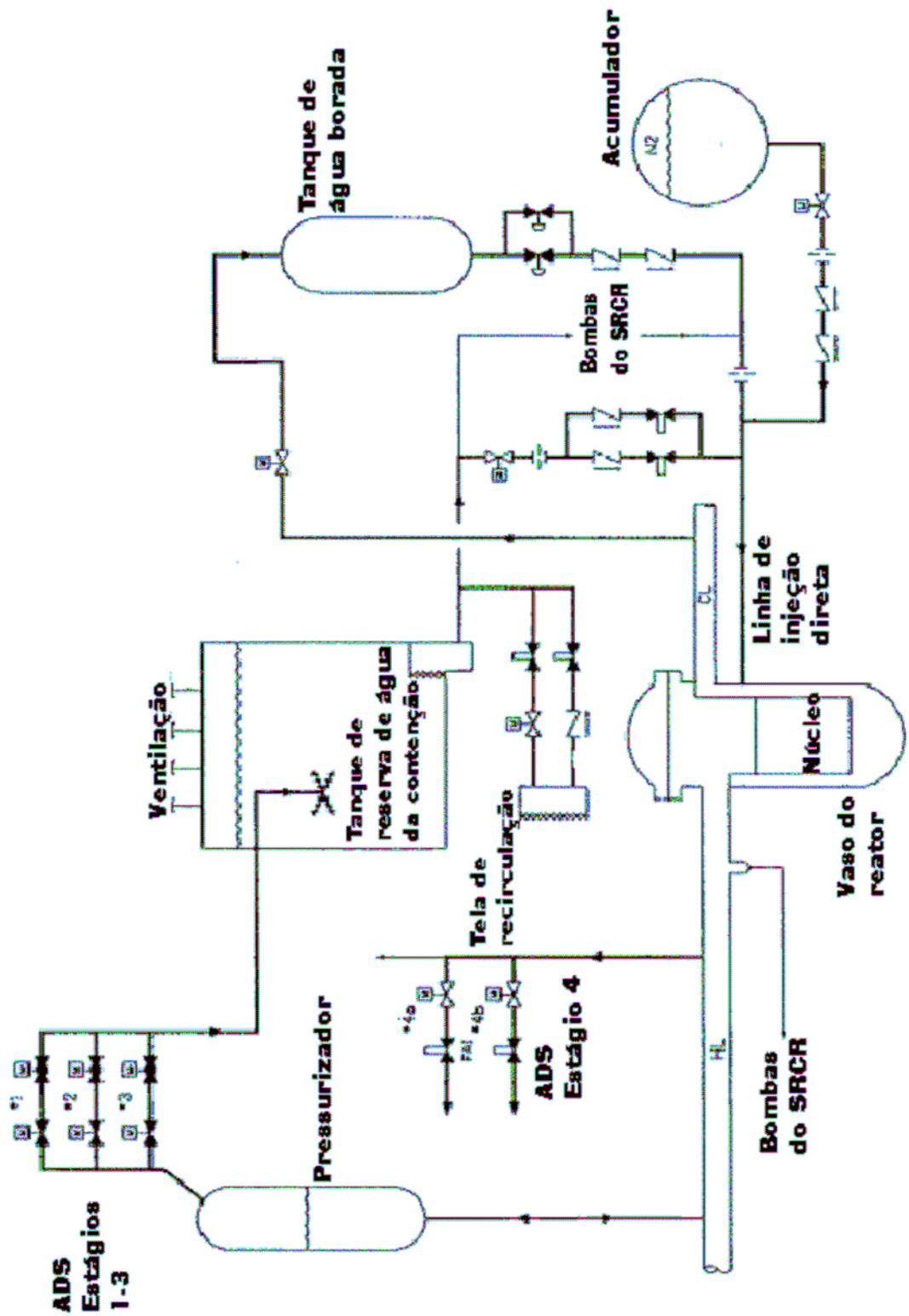


Figura 2 - Sistemas de injeção de segurança

2.3.2.1 Sistema Passivo de Resfriamento do Reator

O Sistema Passivo de Resfriamento do Reator é projetado para exercer as seguintes funções de segurança:

- Remoção de Emergência do Calor de Decaimento dos Produtos de Fissão;
- Compensação e boração de emergência do Sistema de Refrigeração do Reator;
- Injeção de Segurança;
- Controle do pH do poço da contenção.

O Sistema Passivo de Resfriamento do Reator está localizado dentro do prédio da contenção e seus principais componentes são:

- Tanque de Reserva de Água da Contenção (IRWST);
- Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual;
- Acumuladores;
- Sistema de Despressurização Automática;
- Tanques de Água Borada;
- Sistema de Ajuste de pH do poço da contenção;
- Válvulas, tubulações, e outros componentes associados.

O tanque de reserva de água da contenção é um grande tanque de água borada localizado acima dos circuitos do sistema de refrigeração do reator, que contém água para injeção de segurança em baixa pressão e para trocar calor do sistema passivo de remoção de

calor residual, pois o trocador de calor desse sistema está imerso nessa água. O trocador de calor do sistema passivo de remoção de calor residual está ligado ao sistema de resfriamento do reator através da perna quente e da câmara da perna fria do gerador de vapor (sucção da bomba de refrigeração do reator) e seu funcionamento é garantido usando apenas circulação natural. Os tanques de água borada estão localizados acima dos circuitos do sistema de refrigeração do reator e possuem uma linha de balanço que liga o topo dos tanques de água borada à perna fria do sistema de refrigeração do reator. Isto mantém os tanques pressurizados na pressão do sistema de refrigeração do reator.

A injeção pelos tanques de água borada ocorre em alta pressão e o fluxo sai da base dos tanques e injeta nas Linhas de Injeção Direta do Vaso de Pressão do Reator por ação gravitacional. O Sistema de Despressurização Automática é formado por quatro estágios de válvulas de despressurização. Os três primeiros estágios estão ligados ao topo do pressurizador e descarregam por difusores dentro do Tanque de Reserva de Água da Contenção e o quarto estágio, que está ligado à perna quente do Sistema de Resfriamento do Reator, descarrega dentro do prédio da contenção. O Sistema de Despressurização Automática é projetado para despressurizar gradativamente o Sistema de Refrigeração do Reator para que a água do Tanque de Reserva de Água da Contenção possa injetar água em baixa pressão, por ação gravitacional, no Sistema de Refrigeração do Reator. O acionamento desses estágios de despressurização é feito através do nível dos Tanque de Água Borada. Os Acumuladores são tanques de água borada pressurizada por nitrogênio cuja função é repor rapidamente água do inventário para acidentes com perda de fluido refrigerante. O acionamento dos acumuladores ocorre passivamente quando a pressão do Sistema de Refrigeração do Reator se torna menor do que a pressão dos acumuladores. Assim, as válvulas de descarga se abrem e ocorre a injeção passiva (por ação gravitacional) de água borada através das Linhas de Injeção Direta do Vaso de Pressão do Reator. O Sistema de Ajuste do pH do poço da contenção é composto por reservatórios de “fosfato trisódio”. Quando o poço da contenção é inundado, a água atinge esses reservatórios diluindo o fosfato trisódio e mantendo o pH da água de recirculação durante as condições de acidente. A seguir, descrevemos as funções para quais o Sistema Passivo de Resfriamento do Reator foi projetado.[13]

a) Remoção de Emergência do Calor Residual

Esta função ocorre em eventos em que não ocorra perda de inventário, onde a capacidade de remoção de calor residual através dos geradores de vapor esteja comprometida.

O trocador de calor do Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual atua no sentido de evitar que ocorra alívio de água através das válvulas do pressurizador, resfriar o Sistema de Refrigeração do Reator até 215,6°C em 36 horas [13] com ou sem operação das bombas de refrigeração do reator, manter a remoção de calor residual por um tempo indefinido em conjunto com o Sistema Passivo de Resfriamento da Contenção e reduzir a temperatura e a pressão do Sistema de Refrigeração do Reator durante o evento de ruptura de tubo do gerador de vapor para parar a perda de inventário pela ruptura e evitar o enchimento do gerador de vapor.

b) Compensação e boração de emergência do Sistema de Refrigeração do Reator

Esta função ocorre em eventos sem perda de líquido refrigerante em que haja necessidade de injeção de alta pressão. Neste caso, os tanques de água borada injetam água borada no Sistema de Refrigeração do Reator, que irá controlar a reatividade, permitir a remoção do calor residual sem necessidade de atuação do Sistema de Despressurização Automática e, eventualmente, trazer o reator para uma condição subcrítica.[13]

c) Injeção de Segurança

Esta função proporciona injeção de água suficiente durante acidentes com perda de inventário (LOCA), incluindo desde um pequeno LOCA até um grande LOCA, como por exemplo a ruptura do tipo guilhotina na perna fria. Após a injeção de segurança, ocorre a remoção de calor residual mantendo a integridade do núcleo do reator

d) Parada segura do reator

Quando se faz uma parada, mesmo que segura do reator, há necessidade de manter o reator subcrítico, assim como remover adequadamente o calor residual dos produtos de fissão. Sendo assim, o Sistema Passivo de Resfriamento do Reator também é utilizado para manter o controle da reatividade, assim como para remover calor residual do núcleo.

e) Controle do pH do poço da contenção

O ajuste de pH busca manter o pH da água de recirculação entre 7,0 e 9,5 com o objetivo de prevenir corrosão dos componentes da contenção durante um período de resfriamento em longo prazo .[13]

2.3.3 - Sistema de Injeção de Alta Pressão

O sistema de injeção de alta pressão é utilizado para acomodar pequenas perdas de inventário seguidas de transientes ou quando o Sistema de Compensação não está disponível. Dois tanques de água borada são utilizados para proporcionar esta função em qualquer pressão de operação do Sistema de Resfriamento do Reator (RCS), utilizando apenas a gravidade como força para o funcionamento

Os Tanques de Água Borada são verticais, cilíndricos com partes superior e inferior esféricas, situados na contenção com sua parte inferior a pelo menos 2,3m acima da linha de injeção direta no vaso de pressão do reator. Outra função desses tanques é a injeção de segurança de alta pressão para os casos de LOCA. Cada tanque de água borada possui 70,8m³ e está ligado, através de sua parte superior, à perna fria do Sistema de Refrigeração do Reator por uma linha de balanço que os mantém pressurizados e possui uma válvula moto-operada normalmente aberta e uma válvula de retenção. A descarga do tanque de água borada ocorre através da linha de injeção direta do vaso de pressão do reator e essa linha de injeção possui duas válvulas de controle normalmente fechadas em paralelo e duas válvulas de retenção em série, como mostra a figura 3. Durante a operação normal da usina, esses tanques estão completamente cheios de água a 3400ppm. Esses tanques atuam por abertura das válvulas de isolamento. Essa descarga pode ocorrer através de dois processos. O primeiro deles é a injeção por recirculação de água, onde a água da perna fria entra nos tanques de água borada pela parte superior e a água do tanque descarrega através da linha de injeção direta. O segundo modo é a injeção por compensação de vapor, que ocorre quando o vapor gerado na perna fria entra pela linha de balanço e desloca a água que deve ser injetada para o vaso de pressão do reator

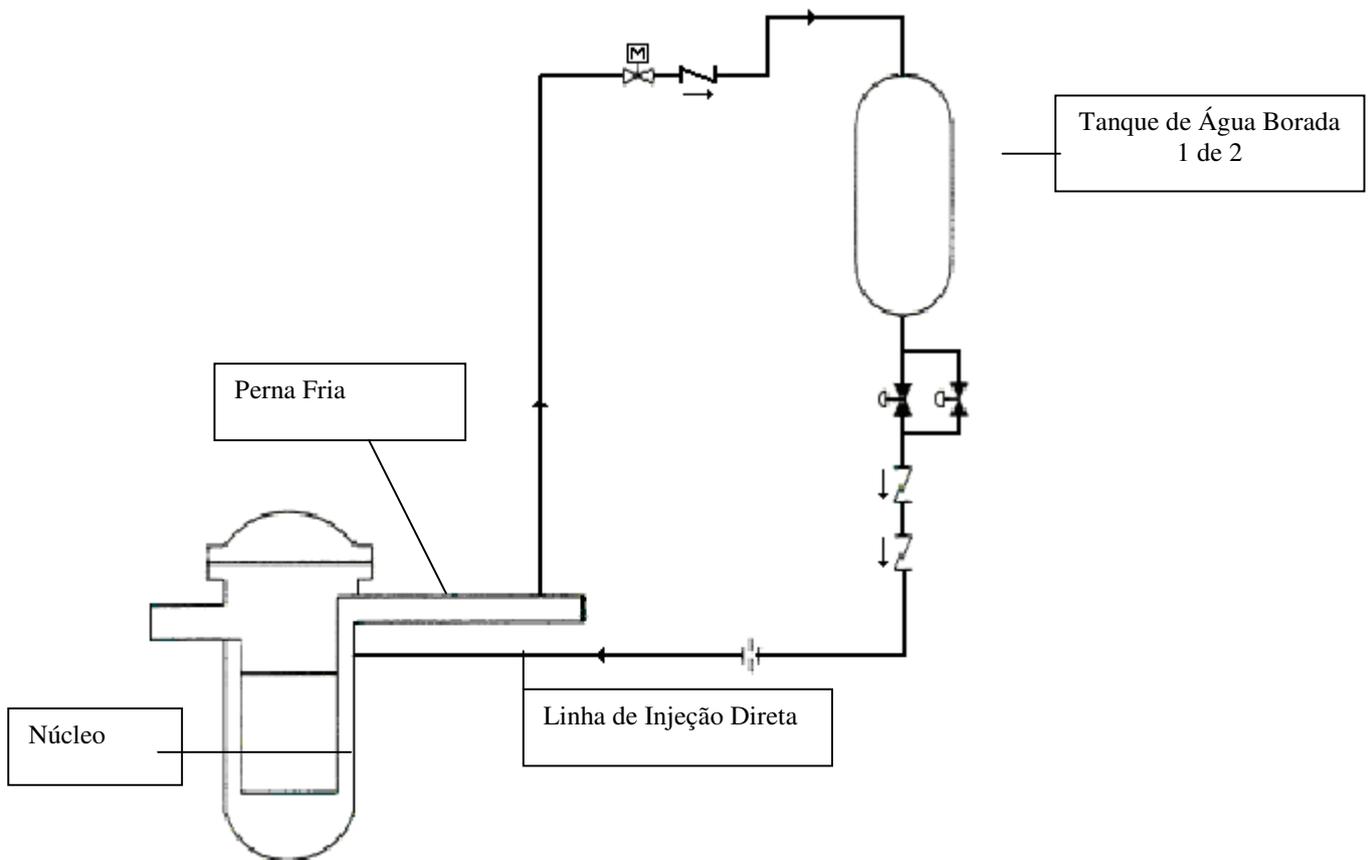


Figura 3 – Sistema Passivo de Injeção de Alta Pressão

2.3.4 - Sistema de injeção com Acumuladores

Da mesma forma que nos PWRs convencionais, os acumuladores são utilizados nos acidentes com grandes perdas de líquido refrigerantes (LOCAs) para suprir rapidamente a grande necessidade de inventário do reator e são projetados de tal modo a corresponder à total necessidade de se reinundar, rapidamente, o núcleo do reator. Os acumuladores são tanques esféricos situados logo abaixo dos tanques de água borada e cada um deles contém $56,63 \text{ m}^3$ de água a 2600ppm pressurizadas com nitrogênio com pressão entre 4,49 e 5,4 Mpa. Cada acumulador descarrega através da linha de injeção direta no vaso de pressão e cada linha de descarga possui uma válvula moto-operada normalmente aberta e duas válvulas de retenção em série. A injeção dos acumuladores ocorre quando há uma despressurização do Sistema de Refrigeração do Reator que necessite de rápida reposição do inventário. Quando a pressão cai abaixo da pressão dos acumuladores, ocorre a ruptura dos discos das válvulas de retenção e a

injeção ocorre devido à pressão maior do gás dentro dos acumuladores em comparação com o Sistema de Refrigeração do Reator. A figura 4 descreve o sistema de injeção de segurança por acumuladores

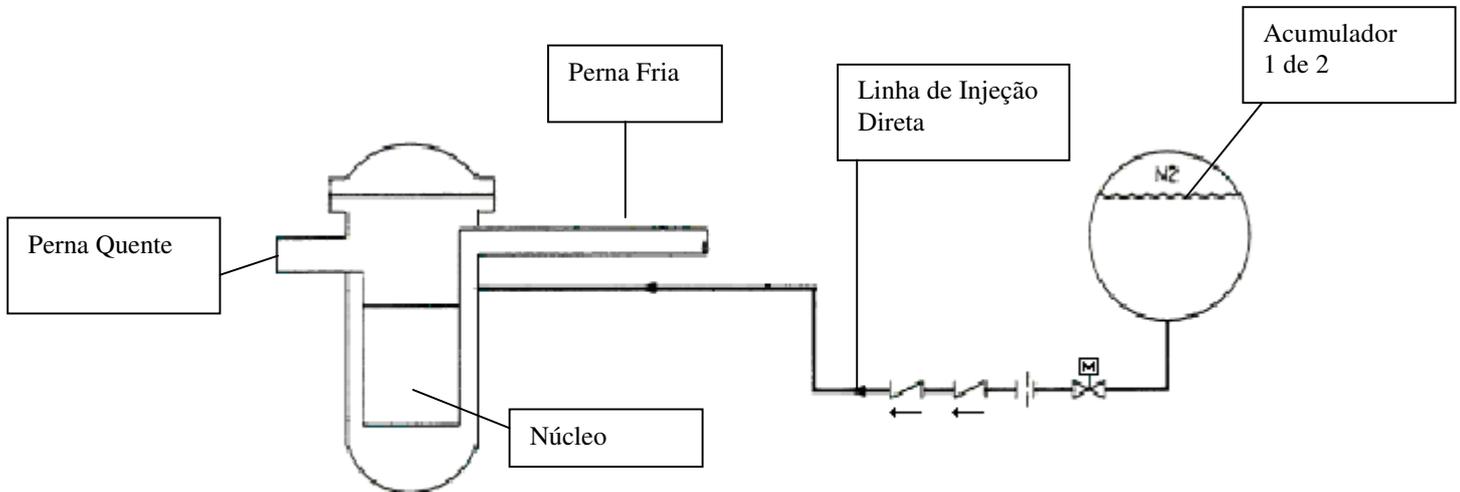


Figura 4 – Sistema de injeção de segurança pelos acumuladores

2.3.5 - Sistema de injeção de baixa pressão

Uma injeção de água prolongada é proporcionada por ação gravitacional a partir do tanque de reserva de água da contenção, localizado na contenção acima dos circuitos do RCS. Este tanque é projetado para atuar sob pressão atmosférica e por esse motivo o RCS deve ser despressurizado antes da injeção de baixa pressão ocorrer. O AP1000 controla a despressurização do RCS automaticamente até que a água do IRWST possa ser injetada no RCS devido a sua baixa pressão que fica em torno de 10psi. Na verdade, o Sistema de Injeção de Baixa Pressão é constituído por dois sistemas redundantes, sendo um deles ativo, pois utiliza as bombas do Sistema de Remoção de Calor Residual Forçado e o outro o Sistema Passivo de Injeção de Baixa Pressão que, na falta das bombas do SRCR forçado atuam por ação gravitacional.

O Tanque de Água de Reserva da Contenção é feito de aço e contém 2.234m³ de água borada a 2600ppm. Esse tanque possui duas funções: a primeira delas é servir de trocador de calor para o trocador de calor do Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual e a segunda é fornecer água para injeção de baixa pressão e resfriamento em longo prazo. O Tanque está 1,04m acima das linhas de injeção direta e é através delas que ele injeta água borada no

Sistema de Refrigeração do Reator. A injeção desse tanque ocorre quando o Sistema de Refrigeração do Reator está despressurizado e isto pode ocorrer após a atuação do Sistema de Despressurização Automática ou após um LOCA. Cada linha de injeção possui uma válvula moto-operada normalmente aberta. Cada linha de injeção possui duas linhas em paralelo contendo, cada uma delas, uma válvula de retenção e uma válvula filtro. Essa linha atua quando a pressão do Sistema de Resfriamento do Reator cai a valores atmosféricos. Após a injeção dos acumuladores e do Tanque de Água de Reserva da Contenção, o poço da contenção possui água suficiente para a recirculação. Há duas linhas de recirculação a partir do poço da contenção cada uma delas conectada à linha de injeção do Tanque de Reserva de Água da Contenção. Cada linha de recirculação possui duas linhas em paralelo: uma delas contendo uma válvula de retenção e uma válvula filtro em série e a outra com uma válvula moto-operada e uma válvula filtro também em série. A recirculação é iniciada quando o nível de água do Tanque de Reserva de Água da Contenção atinge um nível baixo, pois isto garante que há água suficiente no poço da contenção para a recirculação. Além disso, cada poço de recirculação possui uma tela para prevenir que escombros entrem nas linhas de recirculação e prejudiquem o resfriamento do reator em longo prazo. A figura 5 descreve o sistema de injeção de baixa pressão.

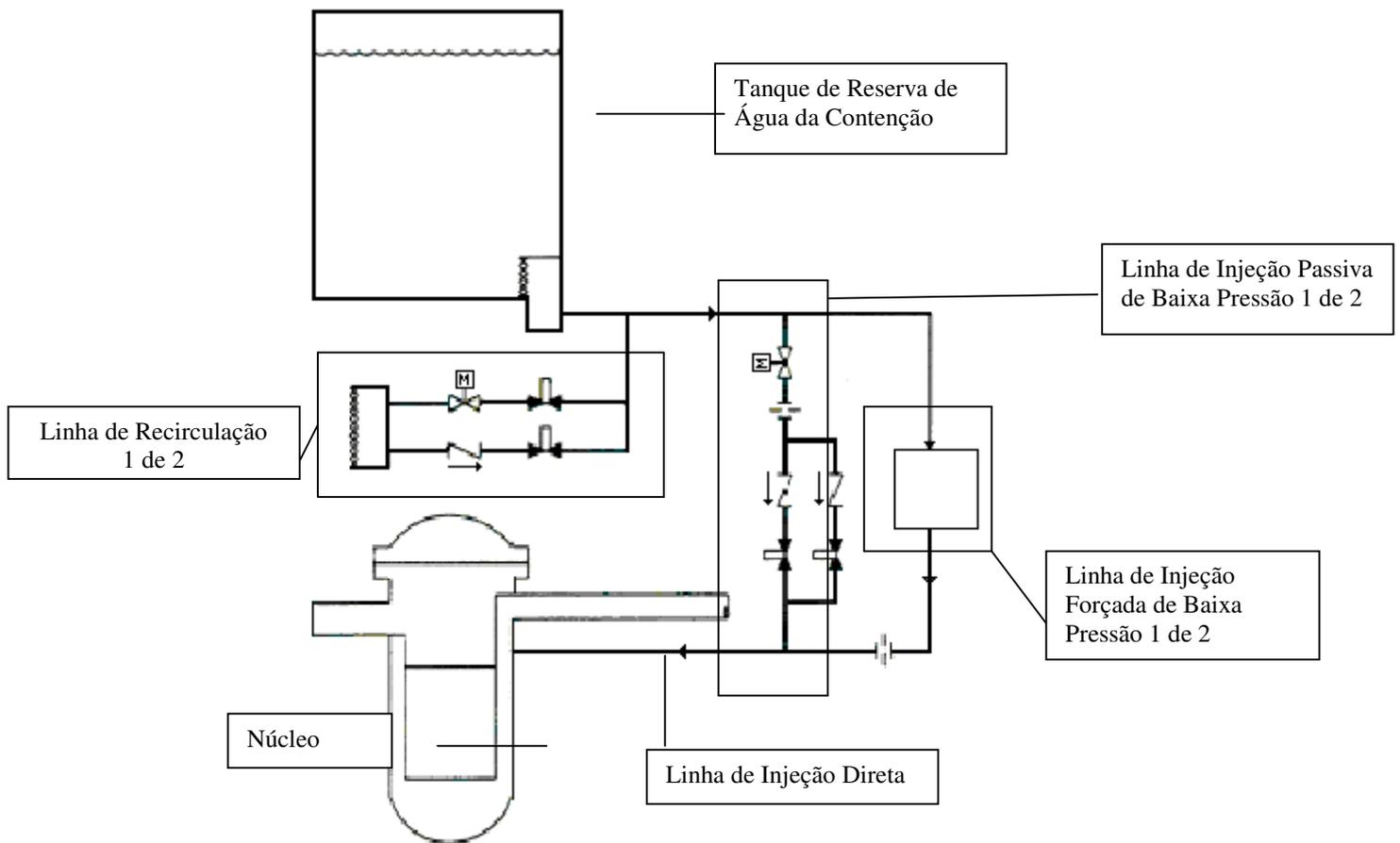


Figura 5 – Sistema de injeção de baixa pressão

2.3.6 - Sistema de Despressurização Automática (SDA)

A despressurização do sistema de refrigeração do reator é feita de maneira gradativa e controlada pelo sistema de despressurização automática que é formado por quatro estágios de válvulas contendo um total de 20 válvulas em dois sistemas redundantes.

Os três primeiros estágios de despressurização estão ligados ao topo do pressurizador e funcionam como módulo de alívio e de segurança. Esses três primeiros estágios são formados por três linhas em paralelo cada uma delas contendo duas válvulas moto-operadas em série e normalmente fechadas e quando acionadas descarregam no tanque de reserva de água da contenção através de difusores imersos na água desse tanque. O quarto estágio é conectado à perna quente e é formado por duas linhas em paralelo contendo, cada uma, uma válvula filtro normalmente fechada e uma válvula moto-operada normalmente aberta em série

que, quando acionadas, descarregam na contenção. A figura 6 descreve o sistema de depressurização automática

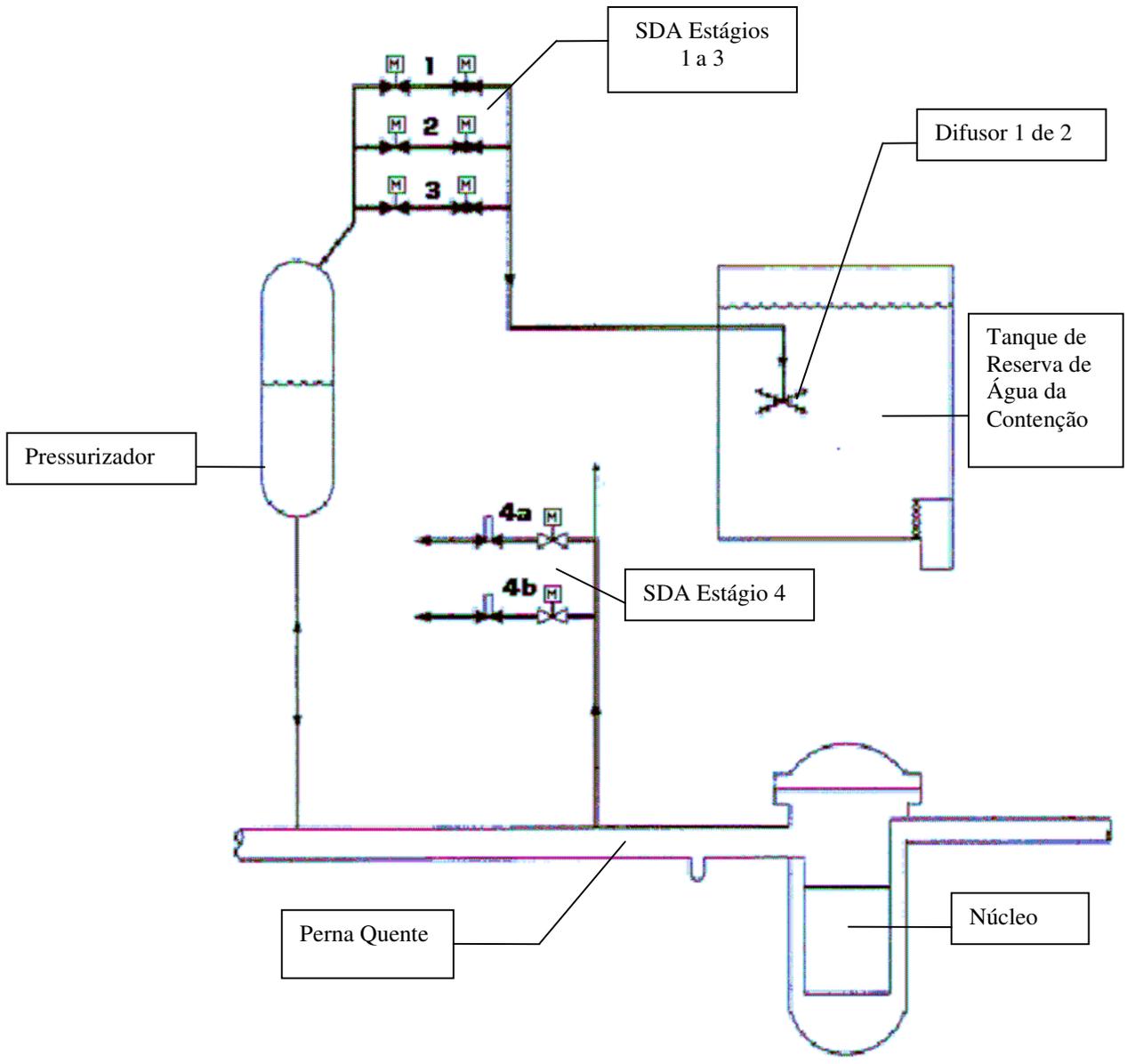


Figura 6 – Sistema de Depressurização Automática

2.3.7 - Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual

O AP1000 possui um sistema de remoção de calor residual passivo que protege a usina contra transientes que perturbam o fornecimento de água para o gerador de vapor e sistemas de vapor, assim como a perda do sistema de remoção de calor residual forçado.

O sistema passivo de remoção de calor residual consiste de um trocador de calor composto de um banco de tubos conectados ao sistema de refrigeração do reator em um circuito de circulação natural. Este circuito é normalmente isolado do sistema de refrigeração do reator por válvulas que estão normalmente fechadas. Este trocador de calor é formado por 689 tubos em C na vertical inseridos na água do Tanque de Reserva de Água da Contenção com capacidade para transportar $2,28 \times 10^5$ kg/h e transferir $2,11 \times 10^{11}$ J/h. O trocador de calor recebe água da perna quente do Sistema de Refrigeração do Reator pela parte superior dos tubos em C cuja saída está ligada à câmara da perna fria do Gerador de Vapor. Esse trocador de calor é projetado para remover calor residual dos produtos de fissão para eventos em que não haja perda de líquido refrigerante e seu funcionamento se dá por circulação natural. A linha de entrada do trocador de calor possui uma válvula moto-operada que fica normalmente aberta para manter o Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual na pressão do Sistema de Refrigeração do Reator. Já a linha de saída do trocador de calor possui duas válvula operadas a ar comprimido em paralelo e normalmente fechada que abrem com perda de pressão do ar ou por ação de um sinal de controle. A água do trocador de calor fica aproximadamente na temperatura da água do Tanque de Reserva de Água da Contenção e como a linha de saída está ligada à sucção das bombas de refrigeração do reator pode ocorrer um fluxo forçado no mesmo sentido do fluxo natural e caso haja uma parada das bombas a circulação é mantida através da mesma tubulação. Com a troca de calor na água do Tanque de Reserva de Água da Contenção, esta água entra em ebulição e o contato do vapor gerado com o sistema passivo de resfriamento da contenção sofre condensação e através de calhas retorna para o Tanque de Reserva de Água da Contenção, permitindo que a remoção passiva de calor residual possa perdurar por um tempo indeterminado. Vale ressaltar que este sistema passivo de remoção de calor do núcleo somente é alinhado quando há comprometimento, por algum motivo, do sistema de remoção de calor residual forçado, e em alguns transientes, como por exemplo, a perda de potência externa, pois como a usina AP1000 não possui geradores diesel de emergência, esta perda provoca o blackout da usina, ou seja, as bombas do sistema de refrigeração do reator não atuam neste cenário.[13]

Por outro lado, o sistema passivo de remoção de calor residual é inoperante em outros transientes como o grande LOCA, visto que a água do Tanque de Reserva de Água da Contenção é utilizada para injeção de segurança de baixa pressão fazendo com que o Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual perca sua capacidade de trocar calor, e então realizar sua função. A figura 7 descreve o sistema passivo de remoção de calor residual.

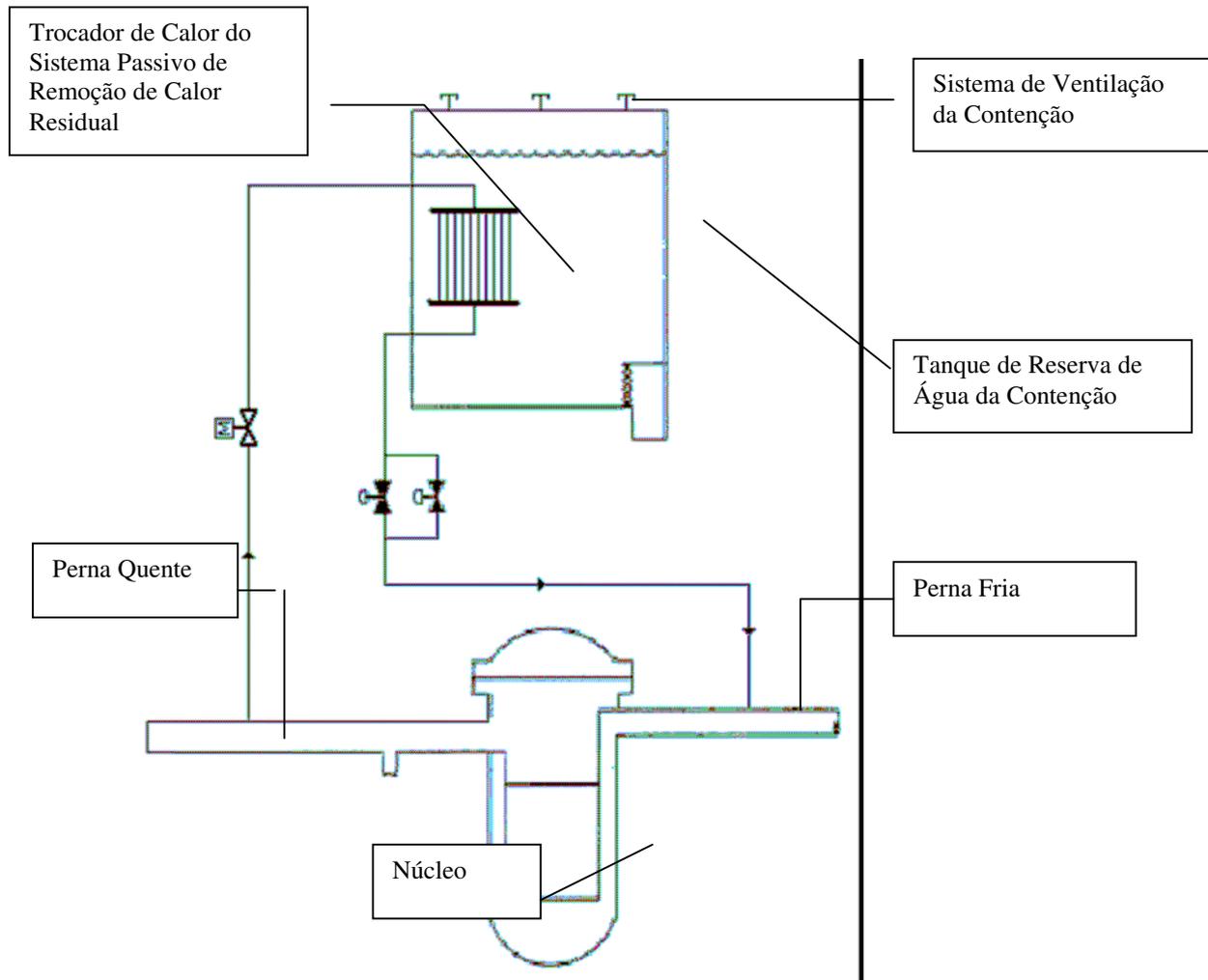


Figura 7 – Sistema Passivo de Remoção de Calor Residual

2.3.8 - Sistema Passivo de Resfriamento da Contenção

O sistema de resfriamento passivo da contenção é utilizado no caso de ocorrência de um acidente de base de projeto onde é necessária a remoção de calor da contenção. Sendo assim, o sistema passivo de resfriamento da contenção visa controlar a pressão e a temperatura do interior da contenção para evitar danos físicos a esta e ao núcleo do reator.

Este sistema é utilizado para remover calor da contenção e transferi-lo diretamente para o meio ambiente, utilizando o vaso de aço da contenção como superfície de transferência de calor e é acionado por indicações de alta temperatura ou pressão no interior da contenção.

O prédio de concreto em torno do vaso de aço da contenção direciona o ar desde as entradas de ar da contenção até a saída para o meio ambiente.

Para que tais funções sejam executadas, é necessária a atuação do sistema passivo de refrigeração da contenção, cuja proposta é prevenir que a contenção exceda os limites de pressão e temperatura, mantendo a integridade da mesma, evitando a liberação de radioatividade para o meio ambiente. Esta função é realizada por evaporação natural, resfriamento por convecção natural e irradiação de calor. Sendo assim, as bases de projeto do sistema passivo de resfriamento da contenção incluem:

- manter a pressão interna da contenção abaixo do valor nominal das bases do projeto por três dias, sem necessidade de ação do operador;
- suportar a perda de componentes ativos, assumindo perda total de potência interna e externa, sem comprometimento de sua capacidade de realizar suas funções de segurança;
- resistir aos efeitos de um acidente de base de projeto e impedir que este evolua para um estado em que se perca o controle da usina.

A principal característica do sistema passivo de resfriamento da contenção é que este sistema depende de fenômenos físicos para realizar sua função. Após um alinhamento inicial, o sistema não depende de nenhum componente ativo para que suas funções sejam executadas, o que contrasta com as usinas PWR convencionais que dependem de sprays, bombas e ventiladores para resfriar a contenção, que necessitam de potência elétrica para funcionarem. Os principais componentes do sistema passivo de resfriamento da contenção são: prédio da contenção, vaso de aço da contenção, tanque de reserva de água do sistema passivo de resfriamento da contenção, parede intermediária entre o prédio de concreto e o vaso de aço da contenção, entradas de ar, difusores de ar, spray e sistema de distribuição de água. A atuação do sistema passivo de resfriamento da contenção inicia sua atuação quando ocorre a abertura das válvulas de isolamento que permite que a água do tanque de reserva de água flua spray, mantendo a injeção de água no vaso de aço da contenção por ação gravitacional. Essas válvulas são redundantes e estão distribuídas em três linhas em paralelo a partir do tanque de reserva de água e são os únicos componentes ativos do sistema. Cada linha contém uma válvula operada a ar comprimido, normalmente fechada, que falha aberta e uma válvula moto-

operada, normalmente aberta. Isto garante que se uma linha de injeção não funcionar há duas redundâncias que proporcionam maior confiabilidade do sistema.[13]

O tanque de reserva de água do sistema passivo de resfriamento da contenção possui capacidade para 2.857.990 litros de água desmineralizada, e o spray serve para distribuir, uniformemente a água do tanque de reserva na superfície do vaso de aço da contenção durante a atuação do sistema. Isto faz com que se forme um filme de água sobre o vaso de aço que flui sobre este por ação gravitacional. Este filme é evaporado removendo o calor conduzido através da parede do vaso de aço para o meio externo. A água não evaporada é coletada na base inferior do espaçamento entre o prédio de concreto e o vaso de aço de onde é drenado. A parede intermediária entre o prédio de concreto e o vaso de aço é suportada pelo prédio de concreto e define um caminho para ocorrência de fluxo de ar. Durante o acidente de base de projeto, o calor removido do interior da contenção aquece o ar do canal externo adjacente ao vaso de aço, reduzindo a densidade do ar ali presente. Isto faz com que este ar suba e vá para o meio ambiente através do difusor de ar na parte superior do prédio de concreto. Este processo faz com que o ar existente entre a parede intermediária e o prédio de concreto e o vaso de aço da contenção ocupe o lugar deste ar que foi liberado para o meio ambiente e, em consequência disto, ar frio do meio ambiente penetre no prédio de concreto através das entradas de ar. Este processo gera um fluxo de ar contínuo que garante a remoção de calor de dentro da contenção para o meio ambiente. Na parte interior da contenção, a remoção de calor condensa o vapor de água na parede interna do vaso de aço que é drenado de volta para o poço da contenção ou para o tanque de reserva de água da contenção. Caso se percam as bombas do sistema normal de remoção de calor residual, que é responsável pela recirculação através do poço da contenção, válvulas podem redirecionar a água condensada na parede interna do vaso de aço para o tanque de reserva de água da contenção para que possa ser novamente injetada por ação gravitacional. A injeção do tanque de reserva de água do sistema passivo de resfriamento da contenção é projetada para atuar por 72 horas e, a partir deste instante, apenas o fluxo contínuo de ar é capaz de remover o calor do interior da contenção. A figura 8 descreve o sistema passivo de resfriamento da contenção

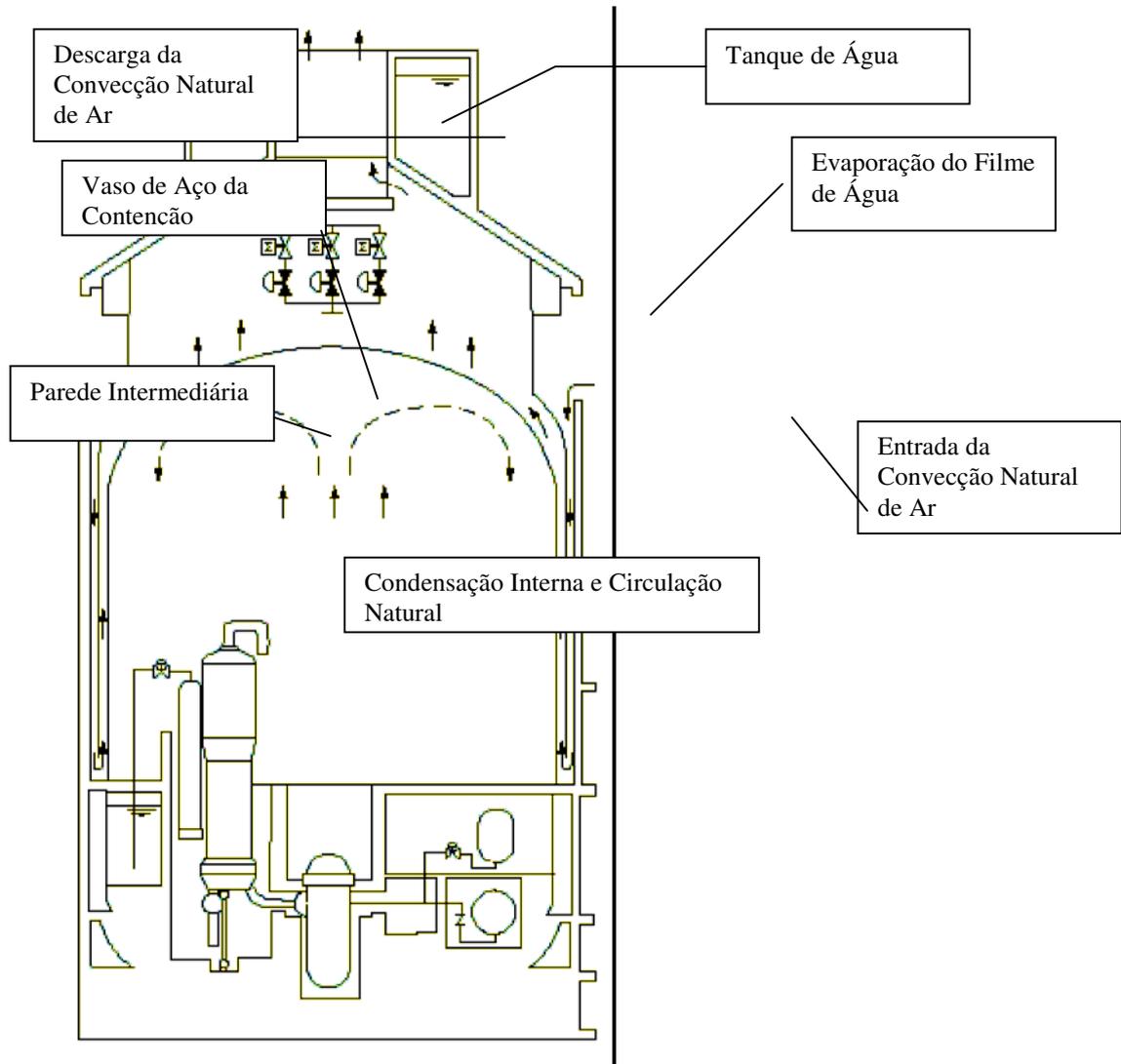


Figura 8 – Sistema passivo de resfriamento da contenção

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Com o advento dos computadores digitais, problemas no discreto em geral, podem ser resolvidos facilmente, mesmo que o número de elementos seja muito grande. À medida que a capacidade de todos os computadores é finita, problemas no contínuo somente podem ser resolvidos com exatidão, pela manipulação matemática.

Muitos problemas do contínuo da engenharia e da física geralmente são colocados pelas equações diferenciais e condições de contorno adequadas que devem ser impostas pela função ou funções características de cada equação. Em algumas situações um modelo adequado é obtido através de um número finito de elementos finitos bem definido. Esses problemas são conhecidos como discretos. Em outros casos a subdivisão é continuada indefinidamente e os problemas poderiam somente ser resolvidos usando uma ferramenta matemática infinitesimal. Isto leva a equações diferenciais ou equivalentes que implicam num número infinito de elementos.

O termo elemento finito foi criado por Colgue, que sugeriu a utilização direta da metodologia aplicável a sistemas discretos. Em nosso trabalho utilizamos um método aplicável nas equações de Navier-Stokes, através do método de resíduos ponderados, conhecido também como procedimento de Galerkin.

O método de Galerkin na forma original é utilizado como ponderação de funções. Este método muitas vezes recai em matrizes simétricas, e por esta razão o mesmo adota o método de elementos finitos. O nome método dos resíduos ponderados é mais antigo do que o método de elementos finitos. O método de resíduos ponderados consiste de uma pequena alteração na expansão de funções, à medida que os processos de expansão sempre levam às equações que, sendo de forma integral, podem ser obtidas pelo somatório das contribuições de vários subdomínios. Então, optamos por redefinir todas as aproximações dos resíduos ponderados sob o nome generalizado, método dos elementos finitos.

Na literatura os nomes Petrov e Galerkin são frequentemente associados com o uso de funções ponderadas. É importante a observação de que o bem conhecido método das diferenças finitas de aproximação é um caso particular de co-instalação localmente com base em funções definidas, sendo assim, um caso particular do método de Petrov-Galerkin.[14]

Uma diferença entre o método de Galerkin e o de Petrov-Galerkin esta no fato de que Galerkin puro resolve somente problemas auto-adjuntos, em contrapartida, o método de Petrov-Galerkin faz uma perturbação na função de Galerkin para torná-la auto-adjunta

3.2 MODELO FÍSICO

Consideramos um modelo contínuo para escoamento incompressível descrito pelas equações de Navier-Stokes em coordenadas cartesianas. O problema será definido em um domínio limitado aberto Ω , com um contorno Γ , contido no espaço Euclidiano unidimensional.

O modelo físico adotado utiliza-se das equações de Navier-Stokes para fluídos incompressíveis e da equação de convecção-difusão de energia em coordenadas cartesianas. As equações (1), (2) e (3) abaixo são as formas simplificadas de massa, momento e energia para um sistema monofásico.[1]

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{m})}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + u \frac{\partial \dot{m}}{\partial s} + \frac{\partial u}{\partial s} \dot{m} + A \frac{\partial P}{\partial s} + \rho g A \cos \theta + P_h \Gamma_w = 0 \quad (2)$$

$$A \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial s} \right) = u A \frac{\partial p}{\partial s} + P_a q_w'' + u P_h \Gamma_w + Q \quad (3)$$

Onde, A = área da seção transversal do tubo

ρ = densidade do fluído

\dot{m} = vazão mássica

s = representa as coordenadas do sistema

u = velocidade do escoamento

p = pressão

g = gravidade

c_p = calor específico

P_a = perímetro aquecido

$q_w'' = \text{fluxo de calor}$

$\Gamma_w = \text{tensor de atrito}$

$Q = \text{Fonte de calor externo}$

$P_h = \text{perímetro hidráulico}$

Para fluido incompressível podemos desprezar a variação temporal da densidade, uma vez que é muito pequena para este tipo de escoamento, e em um circuito fechado desconsideraremos os termos das derivadas de pressão. Os termos de variação de temperatura devido ao atrito também serão desprezados uma vez que são muito pequenos em relação aos outros termos da equação. Considerando o sistema adiabático, o termo de fonte de calor é zerado. Então através de algum algebrismo e algumas considerações, as equações (1), (2) e (3) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\dot{m})}{\partial s} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + \rho g A \cos \theta + P_h \Gamma_w = 0 \quad (5)$$

$$A \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial s} \right) = P_a q_w'' \quad (6)$$

O fluxo de calor que consideramos na equação (6) será dado por: $q_w'' = k \frac{\partial T}{\partial s}$.

O terceiro termo da equação (2), referente ao gradiente de velocidade, é desconsiderado, pois, após algumas manipulações matemáticas, o mesmo se transformará na condição do balanço de massa que é nulo.

Neste trabalho adotaremos condições de contorno para cada caso estudado pela equação de convecção-difusão. Para o caso da temperatura, a condição de contorno adotada é a seguinte:

$$T = \bar{T}(x, t) \quad x \in \Gamma_T \quad (7)$$

$$q_w'' = \bar{q}(x, t) \quad x \in \Gamma_q \quad (8)$$

Para um fluxo laminar, o tensor de atrito que utilizaremos para o desenvolvimento deste trabalho é com base no fator de atrito de Darcy [15], e este é dado por:

$$f = c + \frac{a}{(\text{Re})^b}$$

onde: a, b e c são constantes adimensionais para a lei de fator de atrito.

Re = número de Reynolds

3.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES NA FORMA ADIMENSIONAL

Uma representação das equações em forma adimensional será útil para uma análise dos escoamentos ao longo do desenvolvimento do mesmo. As variáveis são adimensionalizadas de acordo com escalas de referência escolhidas convenientemente de acordo com os dados do problema. Os campos de velocidade, vazão mássica, e temperatura adimensionais são representados por $u = u' u_0$, $\dot{m} = \rho_0 u_0 L^2 \dot{m}'$, $T = [T'(T_{máx} - T_{mín}) + T_0]$, respectivamente. Repare que u_0 é a escala de referência de velocidade e $T_{máx}$ e $T_{mín}$ são as temperaturas máxima e mínima no problema. As coordenadas espaciais são adimensionalizadas de acordo com o comprimento de referência L, portanto $s = Ls'$. A representação do tempo adimensional é dado por $t = t' L / u_0$. A escala de referência para o perímetro hidráulico e para o tensor de atrito será $P_h = P_h' L$ e $\Gamma_w = \Gamma_0 \Gamma_w'$ onde $\Gamma_0 = \rho_0 u_0^2$. O campo gravitacional será adimensionalizado levando em consideração o seu módulo, ou seja, $g = g' \|g\|$. A adimensionalização da área será dada por $A = A' L^2$ e a da densidade é $\rho = \rho' \rho_0$. Aplicando essas adimensionalizações nas equações (4), (5) e (6), podemos notar que as mesmas ficarão:

$$\rho_0 u_0 L^2 \frac{\partial \dot{m}'}{\partial L s'} = 0 \quad (9)$$

Resolvendo a equação acima, chegamos à forma adimensional para a equação de balanço de massa:

$$\frac{\partial \dot{m}'}{\partial s'} = 0 \quad (10)$$

Aplicando as mesmas adimensionalizações para o balanço de momento, obtemos:

$$\rho_0 u_0 L^2 \frac{\partial \dot{m}'}{\partial (L t') / u_0} + \rho' g' \|g\| \rho_0 A' L^2 \cos \theta + \rho_0 u_0^2 L P_h' \Gamma_w' = 0 \quad (11)$$

Dividindo a equação (11) por $\rho_0 u_0^2 L$, obteremos a seguinte equação para o momento:

$$\frac{\partial \dot{m}'}{\partial t'} + \frac{\rho' A' g' \|g\| L \cos \theta}{\rho_0 u_0^2} + P_h' \Gamma_w' = 0 \quad (12)$$

Aplicando a aproximação de Boussinesq para a convecção natural, supondo que todas as propriedades do fluido são constantes, exceto a densidade no termo da força peso que varia linearmente com a temperatura. O fluido é caracterizado por um coeficiente de expansão térmico positivo β , mas ainda assim assume-se incompressível (a densidade é insensível para variações de pressões fracas encontradas no problema), então: $\rho' = \beta(T - T_0)$, onde teremos de adimensionalizar o coeficiente de expansão térmica como sendo $\beta = \beta' \beta_0$ e lembrando que $T - T_0 = (T_{máx} - T_{mín}) T'$. A equação (14) ficará:

$$\frac{\partial \dot{m}'}{\partial t'} + \frac{\rho_0 \beta' \beta_0 A' (T_{máx} - T_{mín}) T' g' \|g\| L \cos \theta}{\rho_0 u_0^2} + \frac{P_h' \Gamma_w'}{A'} = 0 \quad (13)$$

Semelhante para a equação de balanço de energia poderemos adimensionalizá-la da seguinte maneira:

$$\rho_0 c_{po} L^2 A_t \rho' c'_p \left(\frac{\partial [T'(T_{máx} - T_{mín}) + T_0]}{\partial (Lt')} / u_0 + u_0 u' \frac{\partial [T'(T_{máx} - T_{mín}) + T_0]}{\partial Ls'} \right) = Lq_0 P'_a q_w'' \quad (14)$$

Rearrmando a equação (14) e lembrando que a temperatura inicial é constante, logo sua derivada é nula, obtemos:

$$\rho_0 c_{po} L(T_{máx} - T_{mín}) u_0 A_t \rho' c'_p \left(\frac{\partial T'}{\partial t'} + u' \frac{\partial T'}{\partial s'} \right) = Lq_0 P'_a q_w'' \quad (15)$$

Dividindo a equação (15) por $\rho_0 c_{po} L(T_{máx} - T_{mín}) u_0 A_t$, teremos:

$$\rho' c'_p \left(\frac{\partial T'}{\partial t'} + u' \frac{\partial T'}{\partial s'} \right) = \frac{q_0 P'_a q_w''}{\rho_0 c_{po} (T_{máx} - T_{mín}) u_0 A_t} \quad (16)$$

Da equação de fluxo de calor obtemos o valor de $q_0 = k_0 (T_{máx} - T_{mín}) / L$, substituindo na equação (16)

$$\rho' c'_p \left(\frac{\partial T'}{\partial t'} + u' \frac{\partial T'}{\partial s'} \right) = \frac{k_0 P'_a q_w''}{\rho_0 c_{po} u_0 L A_t} \quad (17)$$

Então as equações governantes para os balanços de momento e energia, em termos das variáveis adimensionais serão escritas por:

$$\frac{\partial m'}{\partial t'} + R_i A' T' \beta' g' \cos \theta + P_h' \Gamma_w' = 0 \quad (18)$$

$$\rho' c_p' \left(\frac{\partial T'}{\partial t'} + u' \frac{\partial T'}{\partial s'} \right) = \frac{1}{Pe} \frac{P_a q_w''}{A_t'} \quad (19)$$

Onde $R_i = \beta(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \|g\| L / u_0^2$ é o número de Richardson, $Pe = k_o / \rho_o u_o c_{po} L$ é o número de Peclet de referência.

3.4 MÉTODO ESTABILIZADO PARA FORMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

No restante deste trabalho, serão empregadas as equações adimensionalizadas. Assim, o sobrescrito “ ’ ” usado para indicar as quantidades adimensionais será abandonado, Derivando uma formulação de elementos finitos, podemos considerar uma discretização temporal nas equações de (10), (18) e (19):

$$\frac{\dot{m}^{n+1} - \dot{m}^n}{\Delta t} + R_i A T^n \beta g \cos \theta + P_h \Gamma_w^n = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \dot{m}^{n+1}}{\partial s} = 0 \quad (21)$$

$$\rho c_p \left(\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} + u^n \frac{\partial T^{n+\theta}}{\partial s} \right) = \frac{1}{Pe} \frac{P_a q_w''^n}{A_t} \quad (22)$$

Os termos subscritos n e n +1 indicam os níveis de tempo e Δt é o passo de tempo. O campo de temperatura possui um nível de tempo de n + θ então; $T^{n+\theta} = \theta T^{n+1} + (1 - \theta) T^n$, onde $0 \leq \theta \leq 1$. As equações (20)-(22) podem ser reescritas em termos da mudança das variáveis de fluxo durante o passo de tempo. E estes podem ser escritos por; $\Delta \dot{m} = \dot{m}^{n+1} - \dot{m}^n$ e $\Delta T = T^{n+1} - T^n$, e substituindo nas equações (20)- (22) as novas formas das equações serão:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\Delta t} + R_i A T^n \beta g \cos \theta + P_h \Gamma_w^n + \frac{\partial \dot{m}^n}{\partial s} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \Delta \dot{m}}{\partial s} = -\frac{\partial \dot{m}^n}{\partial s} \quad (24)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} + \theta u^n \frac{\partial \Delta T}{\partial s} \right) = \frac{P_a q_w^n}{Pe A_t} - \rho c_p u^n \frac{\partial T^n}{\partial s} \quad (25)$$

Isolando os termos no passo de tempo n nas equações (23) e (25), obteremos a seguintes equações:

$$\frac{\Delta \dot{m}}{\Delta t} = F \quad (26)$$

Onde F é dado por: $F = -(R_i A T^n \beta g \cos \theta + P_h \Gamma_w^n)$

$$\rho c_p A \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} + \theta u^n \frac{\partial \Delta T}{\partial s} \right) = Q \quad (27)$$

Onde Q é dado por: $Q = -\left(\frac{P_a q_w^n}{Pe A_t} - \rho c_p u^n \frac{\partial T^n}{\partial s} \right)$

As equações acima são discretizadas no espaço usando elementos finitos de igual ordem para aproximar as grandezas de vazão mássica e temperatura. Vamos considerar as seguintes discretizações espaciais para as variáveis $\hat{\dot{m}}_j^n = N_j \dot{m}_j^n$; $\hat{T}^n = N_j T_j^n$; $\Delta \hat{\dot{m}}_j = N_j \Delta \dot{m}_j$; e $\Delta \hat{T}^n = N_j \Delta T_j$. Utilizando as variáveis discretizadas, podemos escrever as expressões para os resíduos quadráticos de momento e temperatura.

$$S = \int_{\Omega} \lambda \hat{R}^2 d\Omega \quad (28)$$

$$U = \int_{\Omega} \gamma \hat{E}^2 d\Omega \quad (29)$$

Onde λ e γ são parâmetros de escala a serem definidos mais adiante nesse trabalho, e \hat{R} e \hat{E} são dados por:

$$\hat{R} = \frac{\Delta \hat{m}}{\Delta t} - F \quad (30)$$

$$\hat{E} = \rho c_p \left(\frac{\Delta \hat{T}}{\Delta t} + \theta u^n \frac{\partial \Delta \hat{T}}{\partial s} \right) - Q \quad (31)$$

Minimizando o resíduo quadrático médio do momento S, dado pela equação (28) em relação a $\Delta \hat{m}_i$ livre, obteremos os valores nodais.

$$\int_{\Omega} \lambda \frac{1}{\Delta t} [(N_i)] \hat{R} d\Omega = 0 \quad \forall \Delta \hat{m}_i \text{ livre} \quad (32)$$

Similarmente, minimizando o resíduo quadrático da energia U, dado pela equação (29), com relação à ΔT_i livre, teremos os valores nodais para a temperatura de:

$$\int_{\Omega} \gamma \frac{\rho c_p}{\Delta t} \left[\left(N_i + \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} \right) \right] \hat{E} d\Omega = 0 \quad \forall \Delta T_i \text{ livre} \quad (33)$$

Os parâmetros λ e γ são escolhidos da seguinte forma: $\lambda = \Delta t$ e $\gamma = \rho c_p / \Delta t$, de modo a normalizar as funções peso das equações (32) e (33). Repare que as funções peso nessas equações possuem uma estrutura SUPG (Streamline Upwind Petrov-Galerkin) de Hughes e Brooks [16]

Reescrevendo a equação (32), teremos:

$$\int_{\Omega} \frac{(N_i)}{\Delta t} \left(\Delta \hat{m} \right) d\Omega = - \int_{\Omega} N_i \left(R_i A T^n \beta g \cos \theta + P_h \Gamma_w^n \right) d\Omega \quad \forall \Delta \hat{m}_i \text{ livre} \quad (34)$$

E a minimização para o campo de energia, teremos da equação (33):

$$\int_{\Omega} \left(N_i + \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} \right) \rho c_p \left(\Delta \hat{T} + \theta u^n \Delta t \frac{\partial \Delta \hat{T}}{\partial s} \right) d\Omega = \int_{\Omega} \left(N_i + \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} \right) \hat{Q} d\Omega$$

$\forall \Delta T_i \text{ livre}$ (35)

Separando cada termo das integrais, teremos:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (N_i) \rho c_p \left(\frac{\Delta \hat{T}}{\Delta t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \rho c_p \left(\frac{\Delta \hat{T}}{\Delta t} \right) \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} d\Omega + \int_{\Omega} \rho c_p N_i \theta u^n \frac{\partial \Delta \hat{T}}{\partial s} d\Omega + \int_{\Omega} \rho c_p \theta^2 u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} u^n \frac{\partial \Delta \hat{T}}{\partial s} d\Omega \\ & - \int_{\Omega} N_i \frac{P_a q_w^n}{Pe A_t} d\Omega - \int_{\Omega} \frac{P_a q_w^n}{Pe A_t} \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} d\Omega - \int_{\Omega} \rho c_p u^n N_i \frac{\partial T^n}{\partial s} d\Omega - \int_{\Omega} \rho c_p \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} u^n \frac{\partial T^n}{\partial s} d\Omega \end{aligned} \quad (36)$$

Utilizando a condição de contorno para o fluxo de calor, aplicando a identidade de Green, a equação da temperatura ficará:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (N_i) \rho c_p \left(\frac{\Delta \hat{T}}{\Delta t} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \rho c_p \left(\frac{\Delta \hat{T}}{\Delta t} \right) \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} d\Omega + \int_{\Omega} \rho c_p N_i \theta u^n \frac{\partial \Delta \hat{T}}{\partial s} d\Omega + \int_{\Omega} \rho c_p \theta^2 u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} u^n \frac{\partial \Delta \hat{T}}{\partial s} d\Omega \\ & \int_{\Omega} \frac{P_a q_w^n}{Pe A_t} \frac{\partial N_i}{\partial s} d\Omega + \int_{\Gamma} \frac{P_a}{Pe A_t} N_i q d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{P_a q_w^n}{Pe A_t} \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} d\Omega - \int_{\Omega} \rho c_p u^n N_i \frac{\partial T^n}{\partial s} d\Omega \\ & - \int_{\Omega} \rho c_p \theta u^n \Delta t \frac{\partial N_i}{\partial s} u^n \frac{\partial T^n}{\partial s} d\Omega \end{aligned} \quad (37)$$

3.5 MÉTODO ESTABILIZADO PARA PASSO DE TEMPO LOCAL E SINCRONIZADO

Ao utilizarmos o valor de $\theta = 1/2$, a função peso obtida para os balanços de quantidade de movimento e energia, é dado por:

$$W_i = N_i + \frac{\Delta t}{2} \hat{u}^n \frac{\partial N_i}{\partial x} \quad (38)$$

Esta função peso nos sugere um critério para selecionar o passo de tempo adequado: comparando a Eq. (38) com a função peso do SUPG [1], verificamos que, para elementos lineares, uma quantidade apropriada de “upwind” é introduzida no balanço de quantidade de movimento, Eq. (35), se escolhermos o passo de tempo como:

$$\Delta t = \alpha \frac{h_e}{\|\mathbf{u}^n\|} \quad (39)$$

Onde

$$\alpha = \left[\coth\left(\frac{\text{Re}_h}{2}\right) - \frac{2}{\text{Re}_h} \right] \quad (40)$$

Nas equações acima $\|\mathbf{u}^n\| = \sqrt{u^n u^n}$ é o módulo da velocidade local e h_e é o tamanho característico do elemento (tomamos a raiz quadrada da área do elemento). O número de Reynolds do elemento é $\text{Re}_h = \rho \|\mathbf{u}^n\| h_e / \mu$. Note que α , definido pela Eq. (40), é o chamado parâmetro ótimo de “upwind”, cuja escolha conduz a soluções nodalmente exatas para problemas unidimensionais estacionários de convecção-difusão. Além disso, como mostrado por Sampaio [17,18,19], a escolha do passo de tempo é feita de acordo com as Eqs. (39) e (40).

É importante notar que o passo de tempo definido acima é o mais apropriado para seguir a evolução temporal dos processos de convecção-difusão resolvíveis numa malha com

tamanho local h_e [18]. Para convecção forte ($Re_h \gg 1$) obtemos $\Delta t \rightarrow \frac{h_e}{\|\mathbf{u}^n\|}$, enquanto que para difusão pura ($Re_h = 0$), temos $\Delta t = \frac{\rho h_e^2}{6\mu}$.

Por outro lado, com o objetivo de introduzir “upwind” ótimo na equação de energia, o número de Reynolds do elemento na Eq. (35) deve ser substituído pelo número de Peclet do elemento $Pe_h = Pr Re_h$. A menos que o número de Prandtl seja $Pr = 1$ o passo de tempo para as equações de quantidade de movimento e energia serão diferentes (a diferença é maior dentro da camada limite, onde os efeitos de difusão são dominantes). Além disso, repare que o passo de tempo dado pelas Eqs. (39) e (40) varia espacialmente de acordo com a velocidade local, as propriedades físicas e o tamanho local da malha. Portanto, para aplicar “upwind” ótimo tanto para quantidade de movimento quanto para energia, precisamos usar duas variações espaciais distintas para o passo de tempo. Para a quantidade de movimento usamos

$$\Delta t_M = \left[\coth\left(\frac{Re_h}{2}\right) - \frac{2}{Re_h} \right] \frac{h_e}{\|\mathbf{u}^n\|}, \text{ enquanto } \Delta t_E = \left[\coth\left(\frac{Pe_h}{2}\right) - \frac{2}{Pe_h} \right] \frac{h_e}{\|\mathbf{u}^n\|}$$

empregada para energia.

Por utilizarmos passos de tempo ótimos, que variam com a posição e de acordo com a quantidade transportada (movimento ou energia), devemos recorrer a um esquema especial para sincronizar o avanço do tempo durante o cálculo. Neste trabalho, adotaremos um passo de tempo local de forma a manter os cálculos sincronizados.

A figura 9 ilustra distribuições espaciais típicas de passo de tempo para quantidade de movimento e energia, além de um passo de tempo uniforme Δt^* . Este último é escolhido de forma a ficar muito próximo do passo de tempo mínimo do problema, sendo calculado como $\Delta t^* = 0.999 \min\{\Delta t_M(\mathbf{x}), \Delta t_E(\mathbf{x})\}$ onde $\mathbf{x} \in \Omega$. O passo de tempo Δt^* é o passo de tempo usado para sincronizar o avanço da simulação numérica.

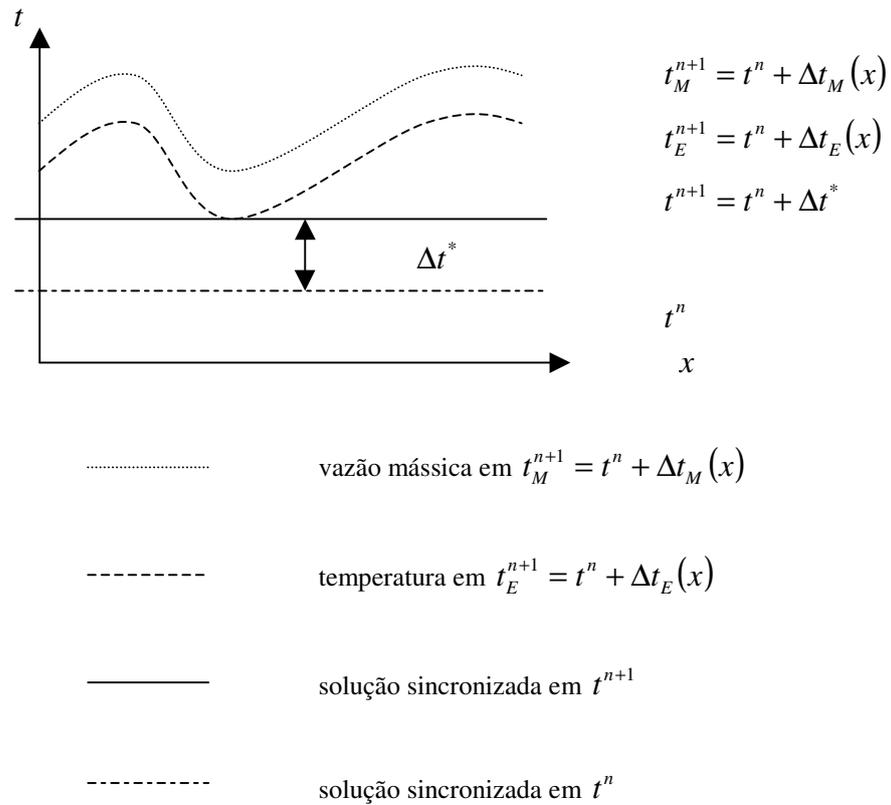


Figura 9 Representação esquemática de avanço de tempo de solução que usa passos de tempo locais e sincronização no tempo $t^n + \Delta t^$.*

Observando a figura 9, considere que comecemos com todas as variáveis sincronizadas no nível de tempo n . Suponha que atualizemos a vazão mássica, que usa passo de tempo Δt_M nas eq. (34) e (35), obtendo vazão mássica no nível de tempo $t^n + \Delta t_M$. De forma análoga, obtemos o campo de temperatura no nível de tempo $t^n + \Delta t_E$. Por outro lado, vamos representar as variações das variáveis do tempo t^n ao tempo $t^n + \Delta t^*$ (o tempo de sincronização) como $\Delta \dot{m}^*$, e $\Delta \hat{T}^*$. Desta forma, mantendo a mesma taxa de variação obtida usando passos de tempo locais, obtemos as seguintes relações:

$$\frac{\Delta \dot{m}^*}{\Delta t^*} = \frac{\Delta \dot{m}}{\Delta t_M} \quad (41)$$

$$\frac{\Delta T^*}{\Delta t^*} = \frac{\Delta T}{\Delta t_E} \quad (42)$$

O processo de solução do problema é segregado. A cada passo de tempo o campo de vazão mássica é atualizado, seguido pelo cálculo da nova temperatura. Todos os sistemas de equações resultam de matrizes simétricas positivas definidas. Os sistemas de equações são resolvidos usando o método de gradientes conjugados com pré-condicionador de Jacobi, em uma implementação Elemento-por-elemento.

3.6 RESOLUÇÃO DO MÉTODO ESTABILIZADO PARA FORMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

Com as soluções das equações 34, 35 podemos escrever em função destas as matrizes e vetores aplicáveis no programa desenvolvido. A princípio consideramos os elementos finitos lineares de primeira ordem pois estamos utilizando uma análise unidimensional. O método utilizado pode ser aproximadamente descrito da seguinte forma: uma solução aproximada é assumida como uma combinação linear de função de base local (elemento). O problema é então determinar os coeficientes desta combinação linear (usualmente valores nodais), de acordo com alguns critérios. Alternativamente, as soluções aproximadas foram determinadas através de uma declaração sobre os resíduos ponderados das equações do referencial que governam o problema. Então escrevemos os elementos finitos de primeira ordem da seguinte forma:

$$N_i = \begin{cases} N(1) = 1 - \frac{s}{h} \\ N(2) = \frac{s}{h} \end{cases} \quad (43)$$

Solucionando os termos da integral da equação (34), e considerando algumas condições de contorno, a equação de vazão mássica em forma de matrizes e vetores pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\{[C_{mij}]\} \frac{\Delta \dot{m}^*}{\Delta t^*} = -([C_{mij}]) (Ri \beta A_{cross} T^n g \cos \theta + P_h \Gamma_w^n)$$

(44)

De forma análoga poderemos calcular as equações 35 em termos dos elementos finitos da equação 44, reescreveremos as equações da seguinte forma:

$$\left\{ [C_{mij}] + \frac{\Delta t_E}{2} ([C_{ij}] + [C_{ji}]) + \frac{\Delta t_E}{4} [E_{ij}] \right\} \frac{\rho c}{\Delta t^*} \Delta T^* = [W_{ij}] \frac{P_a}{Pe A_t} q_{wj}^n -$$

$$([G_i]) \left\{ \frac{P_a}{Pe A_t} \right\} q - \left\{ [C_{ij}] + \frac{\Delta t_E}{2} [E_{ij}] \right\} T_j^n$$

(45)

Onde $[W_{ij}]$, $[C_{mij}]$, $[C_{ij}]$, $[C_{ji}]$, $[E_{ij}]$, $[G_i]$, são matrizes calculadas no anexo A.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo código computacional desenvolvido neste trabalho. Através das equações de Navier-Stokes em coordenadas cartesianas, como já fora mencionado anteriormente no capítulo 3, e da equação de balanço de energia.

Quando trabalhamos com programas computacionais, um importante passo a se fazer são testes de validação do código desenvolvido. Então, para a validação de nosso código computacional, estudaremos a circulação natural em um circuito termohidráulico modelado computacionalmente, comparando as vazões mássicas ao longo do tempo com resultados obtidos com outro tipo de modelagem numérica.

4.1 CASO EXEMPLO

Utilizamos um programa modelo desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN- CNEN) conhecido como NS_SOLVER_2D.f90. Este programa é com geometria bidimensional e desenvolvido em coordenadas cartesianas, e foi modificado para atender a todas as necessidades do modelo adotado neste trabalho, recebendo a nomenclatura de PABSMALU.f90.

No loop experimental foi adotado uma geometria específica em relação às posições dos refrigeradores e dos aquecedores. Essa posição é classificada como HHHC (aquecedores horizontais e refrigeradores horizontais), [20]. Foram realizadas simulações considerando os seguintes valores para os aquecedores e refrigeradores mostrados na tabela abaixo.

Tabela 2: Comparação entre o modelo teórico e resultados numéricos para determinadas condições físicas e geométricas .

a	b	L(m)	T (°C) aquecedor	T (°C) refrigerador	\dot{m} (Kg/s) teórico	\dot{m} (Kg/s) Numérico ref.	\dot{m} (Kg/s) Numérico PABSMALU
0.316	0.25	5.5	30	20	0.287/estável	0.277/estável	0.26/estável

Na tabela acima os coeficientes a e b são os utilizados na equação de Darcy para o fator de atrito.

A validação do código computacional desenvolvido neste trabalho foi feita através da comparação de resultados obtidos num modelo teórico utilizado por Maiani, [15] e de um modelo numérico de um código termohidráulico desenvolvido por Ambrosini e Ferreri,[21].

Assim, dado uma perturbação no estado estacionário de um fluido aquecido escoando em um em um loop com tubo cilíndrico, após algum tempo a estabilização é alcançada.

As principais características de programação e nodalização são descritas abaixo:

- A circulação natural é estabelecida para diferentes seções de tubos circulares, desde que tenham diâmetro uniforme. Cada seção é axialmente discretizada com uma distribuição de nós uniforme.
- A equação de balanço de energia unidimensional é solucionada utilizando o método de Petrov-Galerkin com upwind ótimo.

- A equação de momento é escrita para fluido incompressível na forma integral e discretizada no tempo por uma técnica semi-implícita.
- O coeficiente de transferência de calor no fluido é calculado com uma equação constitutiva.
- A relação de atrito específica para a validação do código será dependente do fator de atrito de Darcy.

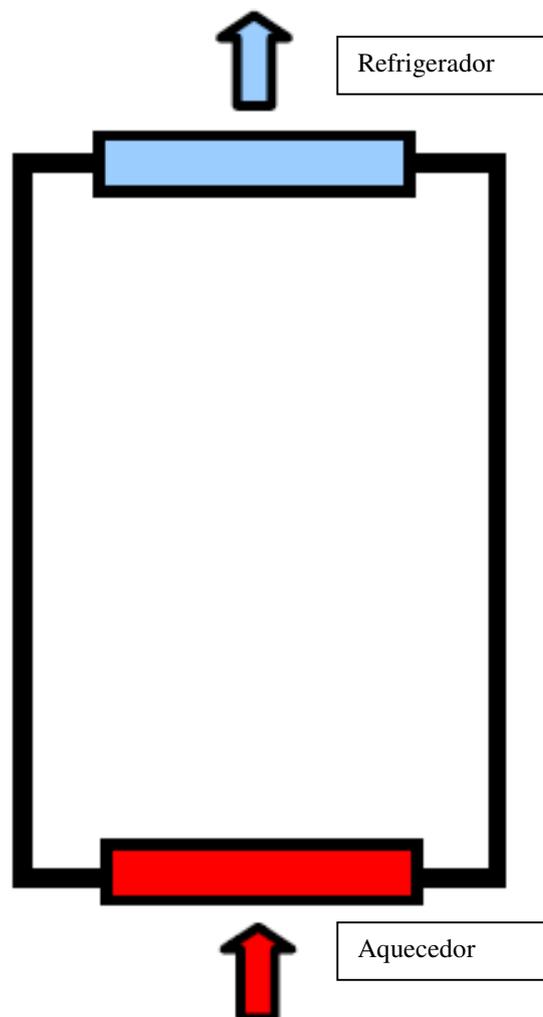


Figura 10: Esquema da configuração HHHC (aquecedores horizontais e refrigeradores horizontais)

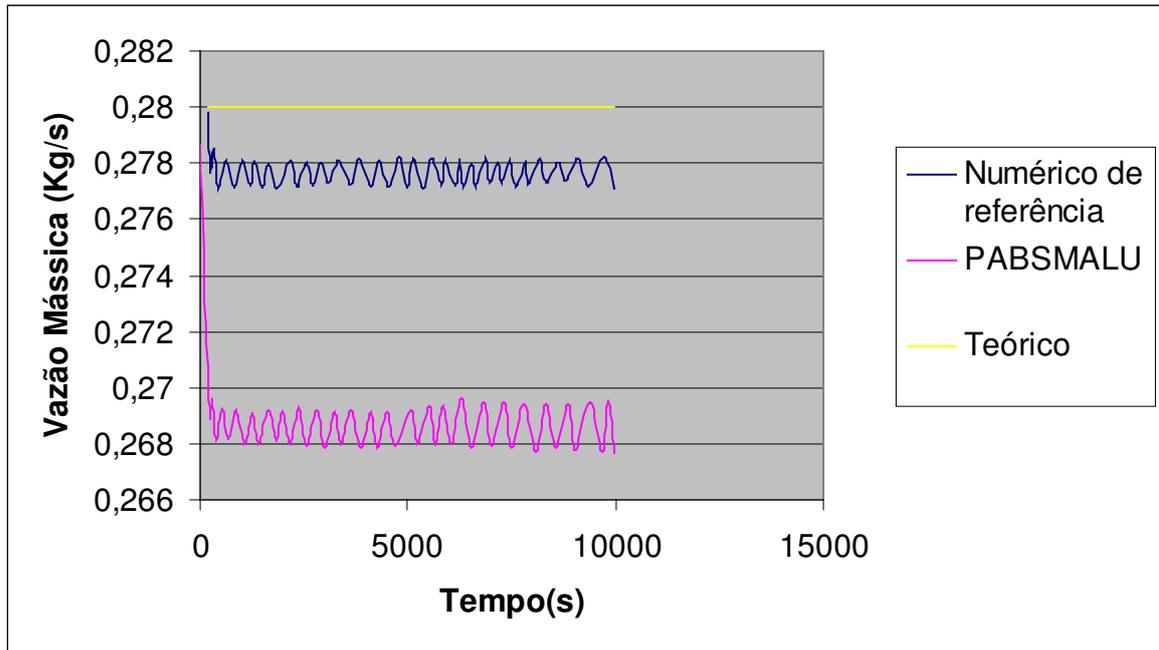


Figura 11– Vazão mássica calculada para os casos TEÓRICO, NUMÉRICO REF. E PABSMALU

4.2 NODALIZAÇÃO DA GEOMETRIA COM O PROGRAMA GID

Neste trabalho podemos observar as variações espaciais das grandezas de vazão mássica e de temperatura, através de um programa de pré e pós-processamento denominado GID. A figura 12 mostra o esquema de uma malha gerada pelo GID, onde os números de nós e elementos finitos são gerados de acordo com os dados deste trabalho.

Para o caso estudado, utilizamos 202 elementos lineares com 202 nós distribuídos ao longo da malha construída no GID. Como o circuito é fechado, o número de elementos finitos é igual ao número de nós, caso contrário, o número de elementos finitos seria inferior ao número de nós.

Em cada perna da tubulação foram utilizados 25 nós e nas partes superiores e inferiores foram utilizados um maior numero de nós devido a forma geométrica.



Figura 12 Esquema da malha gerada pelo GID

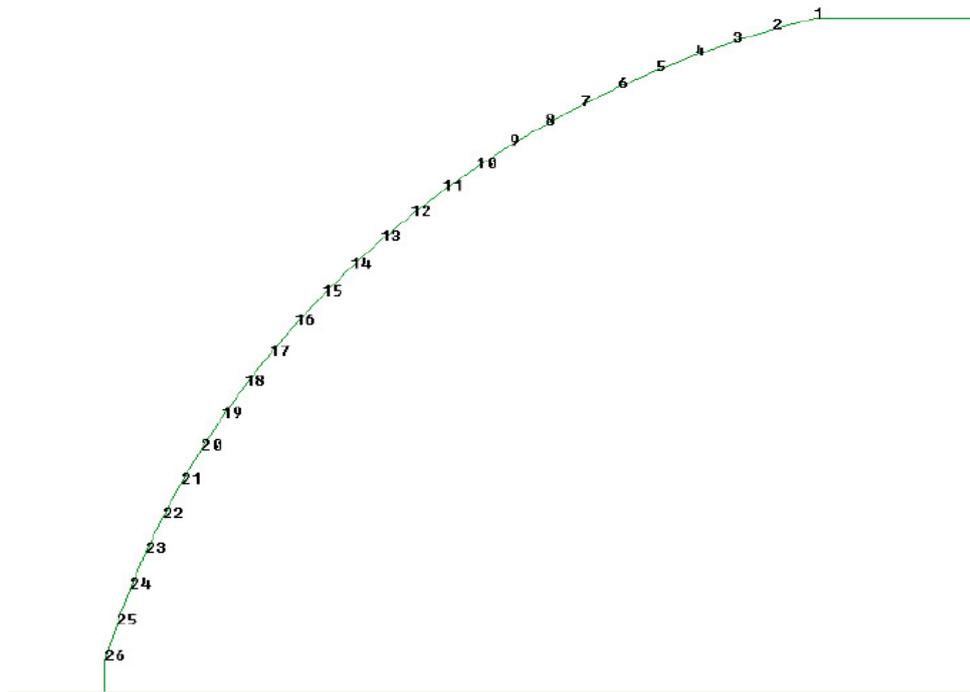


Figura 13 Detalhe da malha de elementos finitos no canto superior esquerdo do loop;

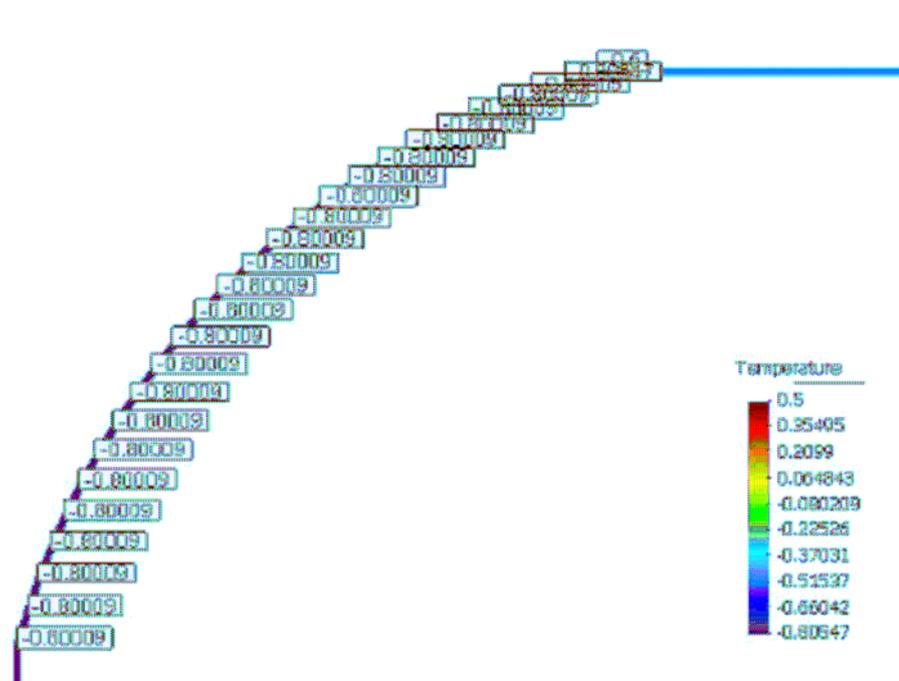


Figura 14 Detalhe da malha de elementos finitos no canto superior esquerdo do loop com os valores nodais para temperatura



Figura 15 Detalhe da malha de elementos finitos na parte inferior do loop referente ao aquecedor e seu valor inicial;

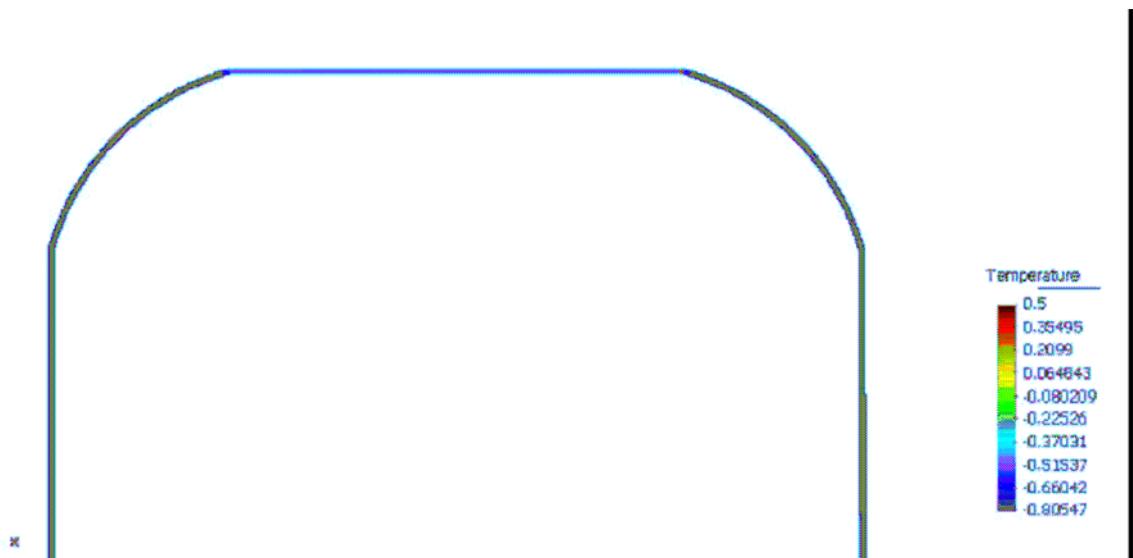


Figura 16 Detalhe da malha de elementos finitos na parte superior do loop referente ao Refrigerador e seu valor inicial;

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos estudos de Maiani,[15] e seus colaboradores, foi feita uma simulação de um sistema primário do reator, em uma geometria retangular, onde foi pré-definido o local onde o aquecedor e o refrigerador ficariam na simulação. Utilizando um código computacional, Maiani e seus colaboradores, extraíram resultados e apresentaram graficamente os mesmos. Com os dados gerados pelo programa PABSMALU.f90 para a mesma geometria adotada por Maiani, obtemos o mesmo comportamento e assim comparamos se a metodologia adotada neste trabalho é ou não adequada para o cálculo de simulação de circulação natural.

A formulação estabilizada obtida foi incorporada no programa NS_SOLVER_2D, que utiliza-se de uma geometria cartesiana. As modificações realizadas no programa original preservaram a estrutura original do mesmo, de forma que foram mantidas suas características avançadas, tais como a de processamento paralelo e de remalhagem adaptativa baseada em estimativa de erros na representação dos gradientes de velocidade.

Foi apresentado uma aplicação de engenharia nuclear em um circuito fechado para circulação natural com boas concordâncias de resultados, e espera-se que o programa desenvolvido neste trabalho, e já incorporado aos recursos do Laboratório de Computação do IEN, venha a ser utilizado em estudos de análise de segurança e de projetos de reatores nucleares para modelos bidimensionais e bifásicos, contribuindo para projetos mais seguros de reatores.

Nosso próximo passo será estender esse estudo para problemas reais da engenharia nuclear, e incorporar as equações que possam modelar escoamentos bifásicos.

6 ANEXO A FORMULAÇÃO DAS MATRIZES

Como fora apresentado no capítulo 3, as matrizes calculadas neste trabalho serão desenvolvidas nesse anexo. A seguir estão descritas as relações entre as matrizes calculadas e as respectivas integrais.

$$[Eij] = \int_{\Omega} u \frac{\partial N_i}{\partial s} u \frac{\partial N_j}{\partial s} ds$$

$$[Cij] = \int_{\Omega} u N_i \frac{\partial N_j}{\partial s} ds$$

$$[Cji] = \int_{\Omega} u N_j \frac{\partial N_i}{\partial s} ds$$

$$[Gi] = \int_{\Omega} N_i ds$$

$$[Wij] = \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial s} N_j ds$$

$$[Cmij] = \int_{\Omega} N_i N_j ds$$

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DE SAMPAIO, P.A.B. “*A Stabilized Finite Element Method for Incompressible Flow and Heat Transfer: A Natural Derivation Based on the use of Local Time-Steps*”. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 195, pp. 6177-6190, 2006.

[2] DE SAMPAIO, P.A.B. “*A Finite Element Formulation for Transient Incompressible Viscous Flows Stabilized by Local Time-Steps*”. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 194, pp. 2095-2108, 2005.

[3] www.eletronuclear.gov.br , ” Energia nuclear será essencial para garantir segurança energética no Brasil.“, 30/01/2009, 22:15horas.

[4] GREIF R, 1988, “*Natural Circulation Loops*” *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 110 (November, 1243-1258.

[5] GREIF R., ZVIRIN Y., MERTOL A., 1979, “*The Transient and Stability Behavior of a Natural Convection Loop*” *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 101 (November), 684-688.

[6] VENKAT RAJ V., 1994, “*Experimental studies related to thermosyphon cooling of nuclear reactors- a review*”. In proceedings of the first ISHMT – Asme Heat transfer and mass transfer conference and twelfth national heat and mass transfer, January 5-7, 1994, Bahbha Atomic Research Centre, Bombay, India.

[7] International Atomic Energy (IAEA), 2005. *Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*, IAEA-TECDOC-1474.

[8] International Atomic Energy (IAEA), 2001. *Thermo Hydraulic Relationship for Advanced Water Cooled Reactors*, IAEA-TECDOC-1203, Vienna.

[9] International Atomic Energy (IAEA), 2002. *Natural Circulation Data and Methods for Advanced Nuclear Power Plant Design*, IAEA-TECDOC-1281.

[10] International Atomic Energy (IAEA), 2000. Experimental Tests and Qualification of Analytical Methods to Address Thermo Hydraulic Phenomena in Advanced Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1149, Vienna.

[11] PILKHWAL D.S., AMBROSINI W., FORGIONE N., VIJAYAN P.K., SAHA D., FERRERI J.C., “*Analysis of the unstable behavior of a single-phase natural circulation loop with one-dimensional and computational fluid-dynamic models*”, Annals of Nuclear Energy 34 (2007) 339–355.

[12] JEFERSON GONÇALVES DA SILVA, 2005, “*ESTUDO DA CONFIABILIDADE DO REATOR AP1000 PARA O CENÁRIO DE UM GRANDE LOCA NO CONTEXTO DE UMA APS NÍVEL 1*”, Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, RJ

[13] AP1000 – Abstract and Table of Contents of NRC Technical Review. http://nuclear.com/archive/2003/07/02/AP-1000-tech_review/ch-01-draft.pdf.

[14] MILTON .A.G. JUNIOR., ”*Implementação Computacional e Reprodução de Exemplos Numéricos Utilizando Formulações Convencionais de Elementos Finitos.*” Relatório de Mecânica de Fluidos , Programa de Engenharia Civil ,COPPE,2007.

[15] MAIANI M., DE KRUIJF W.J.M., AMBROSINI W., 2003, “*Na Analytical model for the determination of stability boundaries in a natural circulation single-phase thermosyphon loop*” International Journal of heat and fluid flow 24, 853-863.

[16] BROOKS, A.; HUGHES, T.J.R., 1982. “*Streamline upwind Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations*”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, p. 199-259.

[17] JOHNSON, C., *Numerical Solutions of Partial Diferential Equations by the Finite Element Method*, Cambridge University Press, 1987.

[18] DE SAMPAIO, P.A.B. “*Petrov-Galerkin Finite Element Formulations for Incompressible Viscous Flows*”. Doctor thesis. Departamento of Civil Engineering, University of Wales, Swansea, 1991.

[19] DE SAMPAIO, P.A.B., 1993. “*Transient solutions of the incompressible Navier-Stokes equations in primitive variables employing optimal local time stepping*”. *Proc. 8th Int. Conf. on Numerical Methods for Laminar and Turbulent Flow*, p. 1493-1504.

[20] VIJAYAN P.K., BHOJWANI V.K., BADE M.H., SHARMA M., NAYAK A. K., SAHA D., SINHA R.K., 2001, “ *Investigations on the effect of heater and cooler orientation on the steady state transient and stability behavior of single-phase natural circulation in a rectangular loop using the computer code athlet.* ” Bhabha atomic research centre, Report Barc/2001/E/034.

[21] AMBROSINI W., FERRERI J.C., 2003, “*Prediction of stability of one dimensional natural circulation with a low diffusion numerical scheme.*” *Ann. nucl. energy* 30(15), 1505-1537.

[22] SHARMA M., PILKHWAL D.S., VIJAYAN P.K., SAHA D., SINHA R.K., 2002, “ *Simulation of single phase instability behavior in a rectangular natural circulation loop using RELAP5/MOD3.2 computer code.* ” Bhabha atomic research centre, BARC/2002/E/012, June 2002.

[23] AMBROSINI W., FORGIONE N., FERRERI J.C.,BUCCI M., 2004, “ *The effect of wall friction in single-phase natural circulation stability at the transition between laminar and turbulent flow.*” *Ann. nucl. energy* 31, 1833-1865.

[24] MINKOWYCZ, W.J., SPARROW, E.M., SCHNEIDER, G.E., PLETCHER, R.H., 1988. “*Handbook of Numerical Heat Transfer. John Wiley and Sons.*”

[25] CREVELING, H.F., DE PAZ, J.F., BALADI, J.Y., SCHOENALS, R.J., 1975. “*Stability characteristics of a single phase free convection loop. J. Fluid Mech.*” 67 (1), 65–84.