

ESTUDO DA CIRCULAÇÃO NATURAL PARA O PROJETO DE UM REATOR DE
PESQUISAS UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL E COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

André Felipe da Silva de Oliveira

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 PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
REATORES. Aprovada por:

Prof. Maria de Lourdes Moreira, D.Sc.

Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Prof. Luiz Carlos Martins Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2012

de Oliveira, André Felipe da Silva

Estudo da circulação natural para o projeto de um reator de pesquisas utilizando as técnicas de fluidodinâmica computacional e computação evolucionária/André Felipe da Silva de Oliveira. – Rio de Janeiro: PPGIEN/CNEN, 2012.

XII, 67 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Maria de Lourdes Moreira

Celso Marcelo Franklin Lapa

Dissertação (mestrado em engenharia de reatores) – PPGIEN/CNEN/Programa de Engenharia de Reatores, 2012.

Bibliografia: p. 66 – 67.

1. Circulação natural. 2. Escala reduzida. 3. Evolução diferencial. 4. Reator de pesquisas. I. Moreira, Maria de Lourdes *et al.* II. Instituto de Engenharia Nuclear do Rio de Janeiro, PPGIEN/CNEN, Programa de Engenharia de Reatores. III. Título.

Dedico este trabalho a minha família, que nos momentos de minha ausência, quando me dedicava aos estudos, sempre respeitou as minhas escolhas e entenderam que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me concedido vida, saúde e o raciocínio sadio para que eu pudesse contribuir de alguma maneira positiva na sociedade. Agradeço aos meus pais Sérgio e Sueli por tantos esforços empenhados em favor da minha educação e instrução. Sem vocês eu não teria alcançado sucesso nas minhas empreitadas. Agradeço muito a minha irmã Nathália pelo incentivo, sugestões e correções oferecidas. Quero agradecer também a minha namorada Larissa pelo carinho e por tentar compreender a minha ausência em alguns momentos.

Agradeço a todos os professores do programa de pós-graduação do Instituto de Engenharia Nuclear, que dispuseram-se a passar seus conhecimentos e contribuíram para o meu aprendizado neste período de mestrado. Em especial, agradeço à professora Maria de Lourdes Moreira e ao professor Celso Marcelo Lapa, assim como aos professores Paulo Augusto de Sampaio, Reinaldo Jospin e Eugênio Marins que acrescentaram valiosas sugestões para o desenvolvimento deste trabalho. Da mesma maneira agradeço aos funcionários Adino Heimlich, Janaina Maria, Joana Azambuja e Almir Barbio, que sempre estiveram prontos a ajudar em suas funções, e facilitaram o desenvolvimento das minhas atividades de pesquisa. Agradeço também aos amigos e alunos do mestrado, que sempre me incentivaram a prosseguir e muitas vezes sanaram as minhas dúvidas.

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

ESTUDO DA CIRCULAÇÃO NATURAL PARA O PROJETO DE UM REATOR DE
PESQUISAS UTILIZANDO AS TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL E COMPUTAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

André Felipe da Silva de Oliveira

Fevereiro/2012

Orientadores: Maria de Lourdes Moreira

Celso Marcelo Franklin Lapa

Programa: Engenharia de Reatores

Uma das características mais importantes e desejadas em uma planta nuclear é a segurança. E na busca de sistemas que propiciem uma segurança passiva destaca-se atualmente o emprego de sistemas de refrigeração por circulação natural. Estes sistemas podem ser utilizados como mecanismo de retirada de calor residual, ou até mesmo, de refrigeração principal de seções quentes de um reator, como por exemplo, o núcleo. Neste trabalho o código de fluidodinâmica computacional (CFD) chamado CFX é utilizado para simular o processo de circulação natural que ocorre na piscina de um reator de pesquisas logo após o seu desligamento. O modelo físico estudado é semelhante ao do reator OPAL - Open Pool Australian Light water reactor, e é composto pelo núcleo, piscina de refrigeração, tanque refletor, tubos de circulação e chaminé. Para melhor desempenho computacional, a região do núcleo foi modelada como um meio poroso, cujos parâmetros foram obtidos separadamente em uma análise de CFD detalhada. Neste trabalho busca-se também a viabilidade de implementação do algoritmo de Evolução Diferencial para otimização dos parâmetros físicos e operacionais, que obedecendo às leis de similaridade, conduzam a uma seção de teste em escala reduzida da piscina do reator.

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

STUDY OF NATURAL CIRCULATION FOR THE DESIGN OF A RESEARCH
REACTOR USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AND EVOLUTIONARY
COMPUTATION TECHNIQUES

André Felipe da Silva de Oliveira

February/2012

Advisors: Maria de Lourdes Moreira

Celso Marcelo Franklin Lapa

Department: Reactor Engineering

Safety is one of the most important and desirable characteristics in a nuclear plant. Natural circulation cooling systems are noted for providing passive safety. These systems can be used as mechanism for removing the residual heat from the reactor, or even as the main cooling system for heated sections, such as the core. In this work, a computational fluid dynamics (CFD) code called CFX is used to simulate the process of natural circulation in a research reactor pool after its shutdown. The physical model studied is similar to the Open Pool Australian Light water reactor (OPAL), and contains the core, cooling pool, reflecting tank, circulation pipes and chimney. For best computing performance, the core region was modeled as a porous medium, where the parameters were obtained from a separately detailed CFD analysis. This work also aims to study the viability of the implementation of Differential Evolution algorithm for optimization the physical and operational parameters that, obeying the laws of similarity, lead to a test section on a reduced scale of the reactor pool.

Conteúdo

Lista de Figuras	x
1 Introdução	1
1.1 Reatores de pesquisa no Brasil	2
1.1.1 Reator de pesquisa ARGONAUTA	2
1.1.2 Reator de pesquisa IPR-R1	4
1.1.3 Reator de pesquisa IPEN/MB-01	4
1.1.4 Reator de pesquisa IEA-R1	5
1.2 Análise de cenário	6
1.3 Objetivo deste trabalho	7
2 Modelagem Física	10
2.1 Descrição do Reator modelo de estudo	10
2.2 O fenômeno de circulação natural	12
3 Simulação computacional	16
3.1 Ansys CFX (®)	16
3.1.1 Ambiente de Modelagem geométrica	17
3.1.2 Ambiente de geração de malha	18
3.1.3 Ambiente de Pré-processamento	19
3.2 Caracterização do núcleo como meio poroso	22
3.2.1 Processamento	24
3.3 Teste de convecção natural em cavidade cúbica	25
4 Resultados da Simulação	28
4.1 Distribuição de Temperatura	29

4.2	Distribuição de Velocidade	33
5	Modelo de similaridade em escala reduzida	36
5.1	Metodologia	36
5.1.1	Definição do Modelo Físico adequado ao problema	37
5.1.2	Adimensionalização do modelo físico e determinação dos grupos ou números adimensionais relevantes	38
5.1.3	As equações de conservação na forma adimensional	40
5.1.4	Grupos adimensionais de Similaridade Física	40
5.1.5	Grupos adimensionais de similaridade geométrica	41
5.1.6	Análise crítica dos grupos adimensionais	44
5.1.7	Formulação do problema de otimização	45
6	O algoritmo de Evolução Diferencial	47
6.1	Verificação do código	52
6.1.1	Função de Himmelblau	52
6.1.2	Função de Rosenbrock	54
7	Aplicação do algoritmo DE na otimização do problema de similaridade	57
7.1	Avaliação de consistência sobre o problema proposto	57
7.1.1	Teste de consistência do código DE	60
8	Conclusões e considerações	64
8.1	Conclusão	64
	Bibliografia	66

Lista de Figuras

1.1	Reatores de pesquisa no mundo	2
1.2	Esquema do reator Argonauta	3
1.3	Núcleo do reator IPEN/MB-01	5
1.4	Piscina do reator IEA-R1	5
2.1	Esquema de possível núcleo do reator, com as posições de irradiação, placas combustíveis e barras de controle	11
2.2	Refrigeração do núcleo por circulação forçada.	12
2.3	Refrigeração do núcleo por circulação natural.	13
2.4	Esquema de circuito em regime de circulação natural	14
3.1	Modelo da piscina do RMB mostrando o <i>plenum</i> inferior, <i>plenum</i> intermediário, tanque refletor, chaminé e tubos de recirculação.	18
3.2	Detalhe da conexão entre as malhas dos domínios sólido e líquidos.	19
3.3	Malha gerada para reator protótipo.	20
3.4	Curva de calor de decaimento inserida na simulação CFD.	21
3.5	Modelo detalhado do núcleo	22
3.6	Valor do coeficiente quadrático K encontrado para o núcleo.	24
3.7	Problema da cavidade quadrada bidimensional.	25
3.8	Campos de temperatura e velocidade para $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$ e $Ra = 10^6$	27
4.1	Esquema da circulação natural na piscina do reator.	29
4.2	Distribuição de temperatura da piscina ao início da simulação.	30
4.3	Distribuição de temperatura da piscina no instante de tempo 100 s.	30
4.4	Campos de temperatura na piscina nos instantes de tempo $t = 30 \text{ min}$ e $t = 3h$	31

4.5	Campos de temperatura na piscina nos instantes de tempo $t = 6h$ e $t = 12h$	31
4.6	Varição da temperatura da água dentro do núcleo e no ponto P1.	32
4.7	Varição da temperatura da água no ponto P1.	32
4.8	Campos de velocidade na piscina nos instantes de tempo $t = 100s$ e $t = 3h$	33
4.9	Campos de velocidade na piscina nos instantes de tempo $t = 6h$ e $t = 12h$	34
4.10	Vazão no núcleo em função do tempo.	34
4.11	Escoamento através do núcleo.	35
6.1	Procedimento geral de algoritmos evolucionários.	48
6.2	Gráfico do processo de mutação em duas dimensões.	50
6.3	Representação gráfica (didática) para o algoritmo clássico de Evolução Diferencial. PRICE and LAMPINEN [2005]	51
6.4	Função de Himmelblau em 3 dimensões.	52
6.5	Busca dos pontos de mínimo da função de Himmelblau.	54
6.6	Função de Rosenbrock em 3 dimensões.	55
6.7	Busca do ponto de mínimo da função de Rosenbrock.	56
7.1	Esquema de um elemento combustível do núcleo.	60

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros da simulação	20
3.2	Valores referentes a simulação do núcleo detalhado.	23
3.3	Propriedades do fluido e dimensões da cavidade usadas para cálculo.	25
3.4	Dados da simulação e malha usados no problema da cavidade.	26
3.5	Resultados para o número de Nusselt médio.	26
7.1	Dados necessários para cálculo dos grupos adimensionais.	59
7.2	Parâmetros de busca estabelecidos para o problema.	61
7.3	Parâmetros e grupos adimensionais referentes ao protótipo.	61
7.4	Intervalo de busca para os parâmetros de projeto.	62
7.5	Análise preliminar dos parâmetros F e Cr do algoritmo DE.	62
7.6	Parâmetros de projeto obtidos pelas melhores simulações.	63

Capítulo 1

Introdução

Reatores nucleares são instalações construídas para o aproveitamento do processo de fissão nuclear. Nestas plantas, este processo ocorre de maneira controlada, produzindo elementos produtos de fissão, nêutrons e energia em grande quantidade. Esta energia liberada em forma de calor é então utilizada para a produção de energia elétrica, que é o uso mais difundido da energia nuclear.

Os reatores nucleares são classificados em duas categorias, segundo a sua utilização: Os reatores de potência, que utilizam o calor gerado no núcleo para produzir eletricidade; e os reatores de pesquisa, que utilizam o fluxo de nêutrons gerados para realizar estudos e investigações sobre a matéria, assim como para a produção de novos elementos químicos.

Ao contrário dos reatores de potência, os reatores de pesquisa geralmente operam a baixas temperaturas, baixas pressões e utilizam menor quantidade de combustível, gerando menor quantidade de produtos de fissão. Por outro lado, grande parte deles necessita de urânio altamente enriquecido para funcionar (acima de 20% de U-235, chegando até 93%), e da mesma maneira que os reatores de potência, estes também necessitam de sistemas de refrigeração para o núcleo, que podem ser passivos ou forçados.

Esses reatores também necessitam de elementos moderadores que termalizem os nêutrons, favorecendo a reação de fissão. E além disso, podem conter elementos refletores que evitem a fuga de nêutrons, visto que o fluxo neutrônico é o principal produto desses reatores.

Atualmente existem 240 reatores de pesquisa operando em todo o mundo. Segundo dados da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), os países que mais possuem reatores de pesquisa são Rússia (47) e Estados Unidos da América (42), seguidos por

China, Japão, França, Alemanha e Canadá. Na figura 1.1 são mostrados os números referentes a esta distribuição.

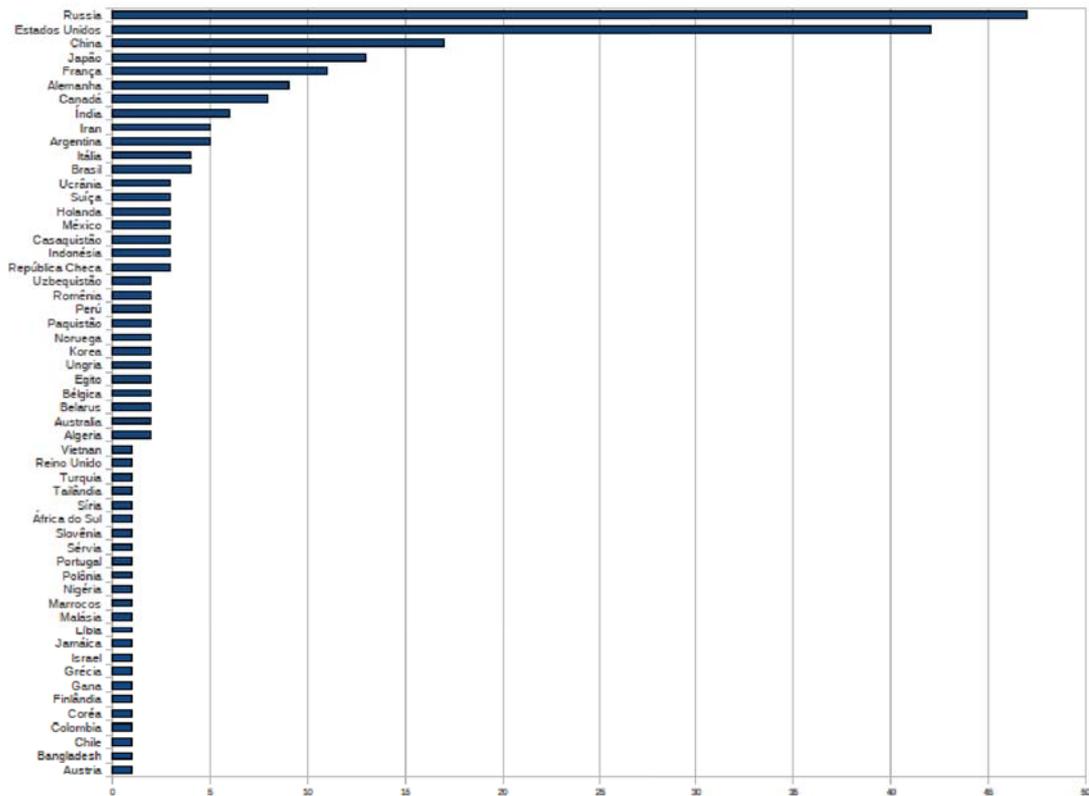


Figura 1.1: Reatores de pesquisa no mundo

1.1 Reatores de pesquisa no Brasil

Como observado na figura 1.1, o Brasil possui quatro reatores de pesquisa em operação: o ARGONAUTA, um reator de pesquisa do tipo Argonaut de 500 W; o IPR-R1, um reator de pesquisa da marca TRIGA, modelo TRIGA Mark 1 de 100 kW; o IPEN/MB-01, uma instalação crítica de 100 W e o IEA-R1, reator de pesquisa do tipo piscina com potência de 5 MW. Esses quatro reatores estão em operação e são certificados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

1.1.1 Reator de pesquisa ARGONAUTA

O Argonauta é um reator do tipo Argonaut (Argonne National Laboratory Nuclear Assembly for University Training) que foi instalado no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) localizado no campus da Universidade do Rio de Janeiro. Ele teve sua primeira

criticalidade em 20 de fevereiro de 1965, e desde então ele é dedicado ao ensino e treinamento em física de reatores, onde também são realizados estudos sobre neutronografia e análises por ativação com nêutrons.

Este reator tem potência máxima de 500 W, e utiliza combustível em forma de placas planas compostas de U_3O_8 disperso em matriz de alumínio e cujo enriquecimento é de 20%.

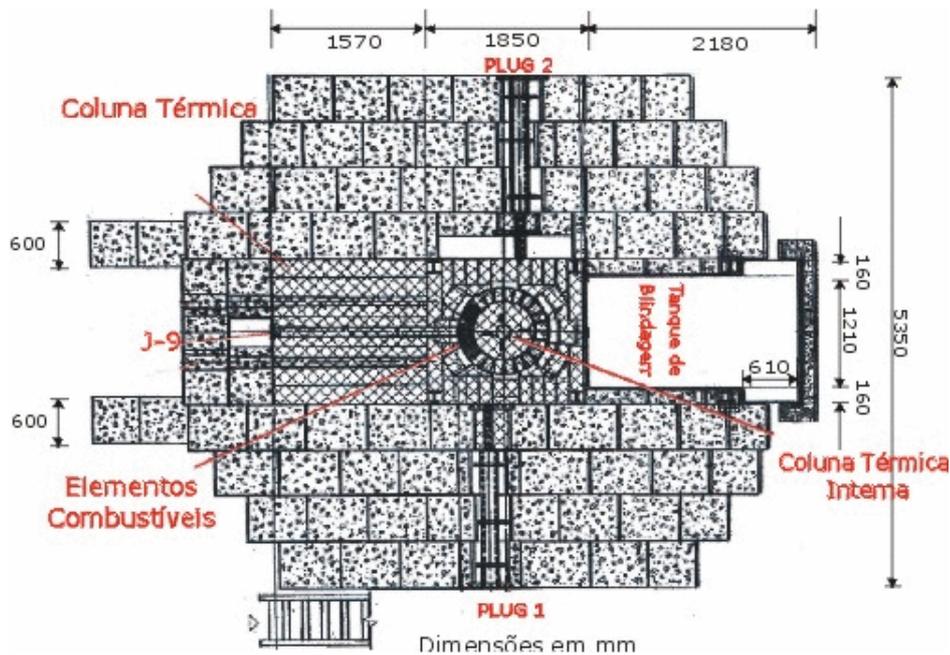


Figura 1.2: Esquema do reator Argonauta

O elemento combustível deste reator é composto por 17 dessas placas de U_3O_8 , e atualmente este reator opera com 8 elementos combustíveis, intercalados por cunhas de grafita que ficam dispostos de maneira a formar uma estrutura anelar. Todo este conjunto fica imerso em água desmineralizada, que serve para refrigeração e moderação dos nêutrons. O Argonauta possui barras absorvedoras de nêutrons compostas por lâminas de cádmio que servem para o controle de reatividade do reator. Ao redor deste tanque onde estão inseridos os elementos combustíveis, refletores e elementos de controle, existe uma blindagem composta por blocos de concreto e aço.

Desde 1965 este reator vem sendo utilizado em pesquisas nas áreas de física de reatores e nuclear. Atualmente as principais pesquisas desenvolvidas no Argonauta são na área de ensaios não destrutivos orientados para biologia, meio ambiente, segurança pública e indústria. Além destas pesquisas o Argonauta produz os radioisótopos Mn-56, La-140, Se-75 e Br-82 que podem ser utilizados como traçadores em setores da indústria e meio

ambiente. A figura 1.2 mostra um esquema do Reator Argonauta.

1.1.2 Reator de pesquisa IPR-R1

O reator IPR-R1 está instalado no campus da Universidade Federal de Minas Gerais, no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN). Ele é um reator do tipo TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomic*s) que utiliza combustível composto por liga metálica de urânio que contém de 8% a 8,5% em peso de urânio enriquecido a 20%.

Além de análises por ativação com nêutrons, o IPR-R1 é empregado na produção de radioisótopos utilizados na indústria, agricultura, medicina e engenharia, como também nos treinamentos em física de reatores e nos processos de licenciamento de operadores de reatores no Brasil. No IPR-R1 já foram realizados testes a potência de 250 KW com o incremento de novos elementos combustíveis, e verificou-se novas possibilidades de pesquisas nesta instalação devido ao aumento do fluxo neutrônico. Mas ele continua a operar a 100 KW e está em processo de licenciamento para aumento de potência e ampliação de suas atividades.

1.1.3 Reator de pesquisa IPEN/MB-01

O reator IPEN/MB-01 está instalado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares que é um dos institutos da CNEN, e está localizado no campus da Universidade de São Paulo (USP). Este foi o primeiro reator construído com tecnologia brasileira, e foi projetado com o objetivo de validar metodologias e estudos em física de reatores e obter dados associados a análises de PWRs (*Pressurized Water Reactors*). As varetas combustíveis utilizadas neste núcleo são de Alumínio em formato cilíndrico e contém 52 pastilhas de UO_2 enriquecidas a 4,3% cada uma .

Entre os dados experimentais obtidos no MB-01 estão: valores de reatividade integral e diferencial; ajuste de potência por folhas de ativação e análise de ruído; coeficientes de temperatura e reatividade; distribuição de fluxo espacial e energético por folhas de ativação e detectores do tipo câmara de fissão; taxas de reação e medidas de índice espectral dentro de varetas combustíveis; e testes de criticalidade com diferentes venenos queimáveis. O IPEN/MB-01 também é utilizado para treinamento de operadores e ensino dos alunos de pós-graduação do IPEN.

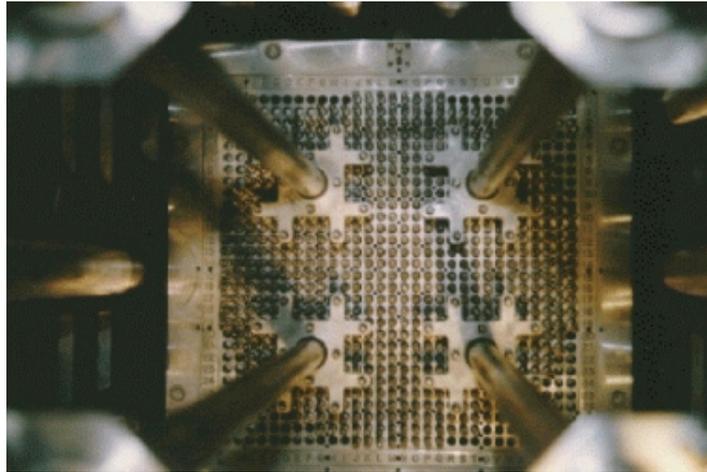


Figura 1.3: Núcleo do reator IPEN/MB-01

1.1.4 Reator de pesquisa IEA-R1

O IEA-R1 é o maior reator de pesquisas do Brasil, com potência máxima de 5 MW. Ele está instalado no campus da Universidade de São Paulo, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e opera desde setembro de 1957, quando atingiu a primeira criticidade.

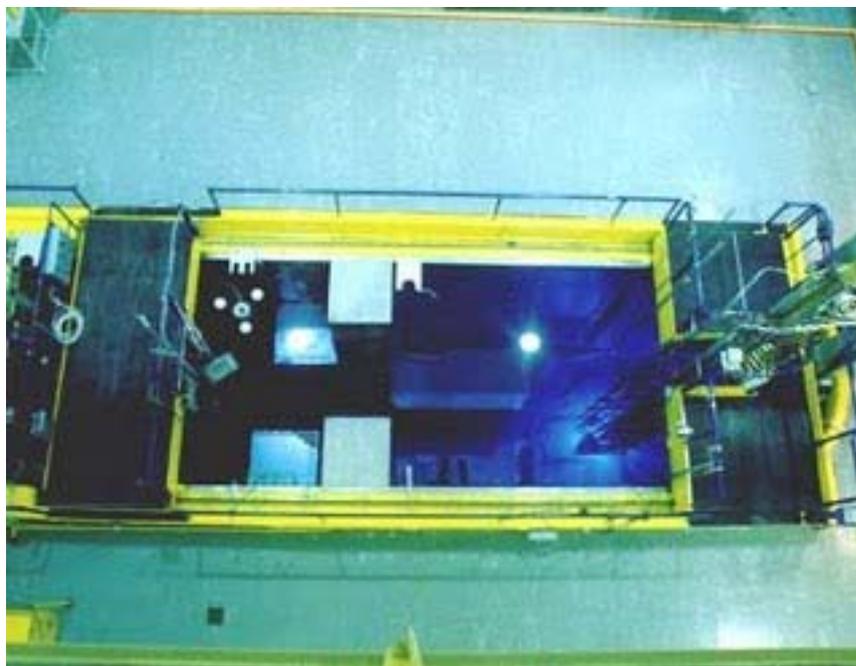


Figura 1.4: Piscina do reator IEA-R1

O IEA-R1 é um reator de pesquisa do tipo piscina, que utiliza água leve como elemento refrigerante e moderador. Possui um núcleo formado por elementos combustíveis do tipo $U^{235}Si_2-Al$ enriquecido a 20%. Em seu núcleo existem 20 elementos combustíveis, que

podem gerar até 5 MW de potência. No IEA-R1 existem 144 posições de irradiação internas ao núcleo e 9 canais de feixes de nêutrons, que são utilizados para produção de Samário-153, Iodo-131 e Irídio-192 - radioisótopos muito utilizados nos tratamentos contra o câncer.

Este reator é utilizado em análises por ativação neutrônica em materiais geológicos, produtos industriais, tecidos humanos e alimentos. Ele tem papel importantíssimo em pesquisas de Física Nuclear, serviços de neutronografia, treinamento e licenciamento de operadores de centrais nucleares.

O IEA-R1 é também utilizado para produção de fontes radioativas usadas em gama-grafia industrial (Cobalto-60) e radioisótopos traçadores como Bromo-82, Mercúrio-203, Criptônio-79, Argônio-40 e Lantânio-140, que são úteis no controle de processos industriais. Segundo PERROTTA [2010], existem estudos para uma futura produção de geradores de Tecnécio-99, Lutécio-177 e Rênio-188.

1.2 Análise de cenário

Em 2006 o governo brasileiro reuniu um grupo de profissionais especializados na área nuclear, para a revisão do programa nuclear brasileiro (PNB). Este grupo traçou algumas diretrizes e projetos a serem seguidos para que o governo brasileiro consiga atender as demandas em energia previstas para 2030.

Segundo PERROTTA [2010], o Brasil conta hoje com uma produção de energia elétrica em torno de 90 GW, dos quais, 70 GW são provenientes de recursos hidráulicos e apenas 2 GW são gerados de plantas termo-nucleares. O plano de fornecimento de energia brasileiro prevê um total de 216 GW de eletricidade instalados até o ano de 2030, onde 164 GW virão de fontes hídricas e 7,3 GW vindas de geração nuclear.

Atualmente o Brasil possui duas usinas nucleares de potência em funcionamento, Angra I e Angra II, que totalizam 2 GW de potência elétrica. Uma terceira usina, Angra III, está em fase de construção e produzirá 1,3 GW. E ainda é prevista a construção de mais quatro usinas de potência do tipo PWR 3+ no Brasil até 2030.

O Brasil têm hoje a sexta maior reserva de urânio do mundo, mesmo com partes de seu território ainda não prospectadas. Isso o coloca numa condição de auto suficiência na produção de combustível nuclear, visto que o país também domina as tecnologias envol-

vidas em todas as fases do processo de produção, incluindo o processo de enriquecimento isotópico do urânio.

No âmbito da medicina nuclear, o Brasil atende a mais de 300 hospitais e clínicas com o fornecimento de *kits* radiofármacos que atendem a mais de 3 milhões de pacientes por ano. Como visto, grande parte desses conjuntos são produzidos no reator de pesquisa IEA-R1 do IPEN. Mas devido ao fato deste reator possuir baixo fluxo de nêutrons para essa atividade, os estes conjuntos geradores de Tecnécio-99 são produzidos a partir da fissão do Mo-99 importado do Canadá.

No Brasil, a aplicação destes *kits* geradores de Tecnécio-99 vêm aumentando a uma taxa anual de 10%, assim como a utilização do I-131, que é produzido por processo de ativação no IPEN e também importado do Canadá, onde a produção se dá por meio da fissão nuclear.

Assim como o Canadá, os principais produtores de radiofármacos no mundo atendem as suas grandes demandas internas, ocasionando eventuais faltas desses produtos em nosso país, conforme ocorrido no ano de 2008. Acrescenta-se ainda como fator preocupante o fato de grande parte desses reatores produtores de radiofármacos estarem chegando a seus prazos de descomissionamento.

Atualmente existem cinco reatores produtores de molibdênio-99 no mundo, sendo que apenas três destes encontram-se em operação. Este fato caracteriza um cenário de insuficiência e talvez crise na produção e distribuição de molibdênio.

Devido a esses motivos, o Brasil necessita desenvolver tecnologia de suporte a fabricação de combustíveis nucleares, testando materiais e realizando testes de pós irradiação, da mesma forma que precisa aumentar a sua capacidade de produção de radiofármacos para o abastecimento nacional. Por isso o programa nuclear brasileiro apontou para a construção de um novo reator de pesquisas, o RMB - Reator Multipropósito Brasileiro, que atenderá aos princípios fundamentais de uso pacífico e não-proliferação da energia nuclear, assim como às normas e tratados internacionais.

1.3 Objetivo deste trabalho

O projeto e construção de uma instalação nuclear é um empreendimento composto por muitas etapas, e que requerem a aplicação de grande quantidade de recursos financeiros.

Desde a concepção, desenvolvimento de projetos e até a efetiva construção da planta, muitos estudos, simulações e testes são realizados para assegurar o perfeito funcionamento da instalação conforme projetada.

Especificamente para o estudo dos sistemas termo-hidráulicos, geralmente são construídas seções de testes em escala reduzida que sejam capazes de reproduzir o comportamento dinâmico destas instalações, de maneira que também possam validar as simulações computacionais.

As instalações de teste são construídas em escala reduzida, porque experimentos em plantas reais apresentam dificuldades inerentes associadas à segurança e também apresentam custos proibitivos para serem levadas a efeito. Portanto torna-se necessário o desenvolvimento de instalações de testes específicas para simulações dinâmicas de escoamentos a fim de conduzir ao projeto de um protótipo e validar códigos que possam ser utilizados para descrever seu desempenho. Mas infelizmente, a obtenção de um circuito de dimensões e condições operacionais mais modestas que represente fidedignamente os fenômenos ocorridos na escala real é impossível. A similaridade absoluta só é possível numa escala de um para um e com as mesmas condições operacionais do sistema original ISHII and KATAOKA [1984].

Ocorre que, caso sejam conhecidos os fenômenos mais representativos e qual o conjunto de características físicas que realmente se deseja simular, pode-se construir seções em escala que sejam similares às reais dentro do escopo de interesse. Assim, o projeto de um circuito similar consiste na melhor combinação de parâmetros (dimensões, condições de operação, etc.) que constituam uma seção que simule os fenômenos mais relevantes dos experimentos que se quer estudar dentro das restrições financeiras e práticas do interessado nas simulações experimentais.

Portanto, fica claro que o projeto de seções experimentais é um problema de otimização que busca a melhor combinação entre os parâmetros físicos e operacionais mais adequados ao experimento que se deseja simular. Recentemente foi proposta uma metodologia para tratar este problema LAPA et al. [2004]. Esta metodologia baseia-se na formulação do problema de dimensionamento de uma seção de teste experimental como um problema de otimização com restrições. O problema de otimização então proposto consiste na busca de variáveis numéricas (pressão de operação, dimensões da seção de teste, etc.) considerando que não se tem conhecimento prévio das características do espaço de

busca. Estas condições, além de eliminarem a possibilidade de utilização das técnicas tradicionais de otimização por programação linear, baseadas em busca de gradiente (que não são aplicáveis a problemas multimodais e não lineares), impedem a utilização dos métodos tradicionais de otimização global, métodos dos intervalos ou programação inteira, dado que estes têm seus desempenhos profundamente ligados às características do primeiro candidato a solução analisado. Finalmente, problemas com estas características e cujo espaço de busca apresenta uma topologia acidentada, multimodal e não linearidade acentuada tem encontrado bons resultados com a aplicação de ferramentas relacionadas a computação evolucionária (PEREIRA et al. [1998] e LAPA et al. [2004]).

Portanto, o presente trabalho busca estabelecer uma metodologia que utiliza fluidodinâmica computacional e algoritmo evolucionário para a obtenção de uma seção de teste em escala reduzida para o núcleo do Reator Multipropósito Brasileiro. Mais especificamente será estudado em Fluidodinâmica Computacional (*CFD - Computational Fluid Dynamics*) a situação logo após o desligamento deste reator. Ou seja, quando o calor residual do núcleo é retirado apenas por circulação natural.

Além de fornecer informações úteis quanto a segurança da instalação, a simulação CFD fornecerá dados para o cálculo dos grupos adimensionais que caracterizam o referido escoamento no protótipo.

Posteriormente os parâmetros físicos e operacionais serão otimizados com um algoritmo de Evolução Diferencial, afim de fornecer uma combinação ótima destes parâmetros, e buscando a similaridade dinâmica entre o modelo em escala e o protótipo.

Capítulo 2

Modelagem Física

2.1 Descrição do Reator modelo de estudo

O Reator Multipropósito Brasileiro será um reator do tipo piscina, cujo projeto está sendo desenvolvido pelos institutos da CNEN, em cooperação com outros países. Seu modelo está sendo construído com grande semelhança ao reator OPAL da ANSTO (*Australian Nuclear Science and Technology Organization*).

Assumindo que o Brasil construa o RMB com características similares ao OPAL, visto que este é um modelo que poderá atender as necessidades supracitadas, adota-se como modelo base de estudo o reator OPAL, que possui uma piscina que é responsável pela refrigeração secundária do reator e retirada do calor de decaimento dos elementos combustíveis usados. Esta piscina têm altura que passa dos 11 m, e diâmetro de aproximadamente 6 m.

O núcleo deste reator têm forma de paralelepípedo e elementos combustíveis compostos de Siliceto de urânio (U_3Si_2) disperso em placas de alumínio, cuja utilização e fabricação já é bastante conhecida em todo o mundo.

Neste estudo adotamos um núcleo composto por 27 elementos combustíveis, que proverão potência de 30 MW, que é a potência provável requerida para o RMB. Entre esses elementos combustíveis haverá posições para irradiação de materiais ou combustíveis. Seis elementos de controle serão dispostos conforme a figura 2.1, de maneira que possam ser utilizados para controle de potência e desligamento do reator.

O sistema de refrigeração primário é do tipo forçado e mantém um fluxo contínuo de água através do núcleo por meio de sucção. Esta sucção é estabelecida por bombas ligadas

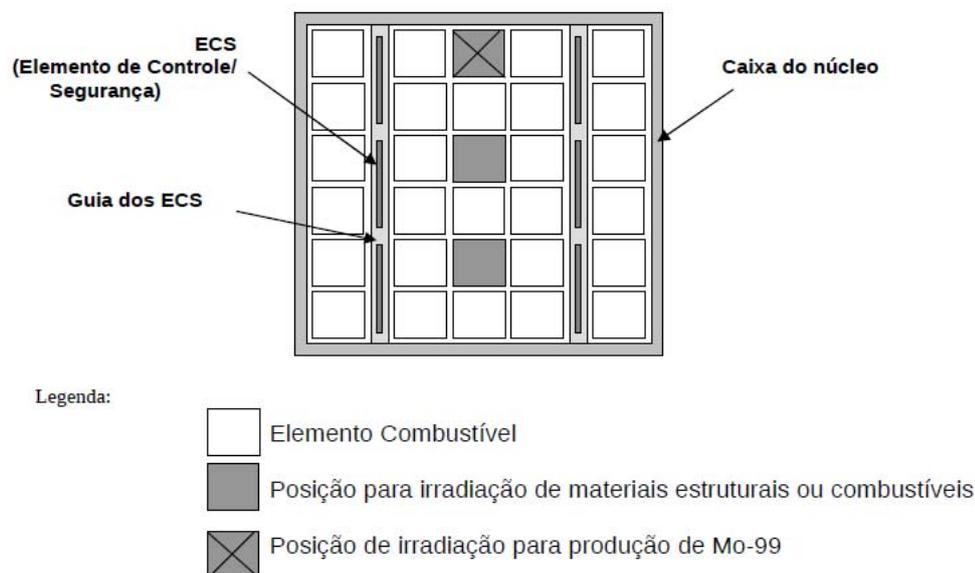


Figura 2.1: Esquema de possível núcleo do reator, com as posições de irradiação, placas combustíveis e barras de controle

a um tubo posicionado na lateral da chaminé que contém o núcleo. Um fluxo de água entra por um plenum inferior através de dois tubos, atravessando o núcleo e extraindo calor. Em operação normal, este fluxo é succionado, arrastando uma parte da água da piscina para os trocadores de calor e tanques de decaimento, formando um circuito fechado que retorna todo esse volume ao plenum inferior. Veja a figura 2.2

O fluxo de água que entra pelo topo da chaminé durante a operação normal evita a liberação hidrogênio para o inventário da piscina, e futura dispersão no ar ambiente.

O núcleo deste reator é rodeado por um tanque refletor de D_2O que possui em seu interior diversos canais para irradiação de materiais. E abaixo deste tanque existe um plano intermediário, de onde saem os feixes neutrônicos, que serão utilizados fora do reator.

Na parte superior da piscina, próximo a borda, há uma camada de água mais quente que a temperatura média do inventário. Este sistema funciona como proteção radiológica para os funcionários que irão trabalhar próximo ao topo da piscina e também fará o controle de nível da água. Mais especificamente, essa camada quente evita que a água ativada suba à superfície da piscina e entre em contato com o ar, portanto ela se estende pelo topo de toda a piscina e tanques de decaimento, reduzindo o risco de contaminação.

Veja na figura 2.2 o esquema da circulação de água durante operação normal do reator.

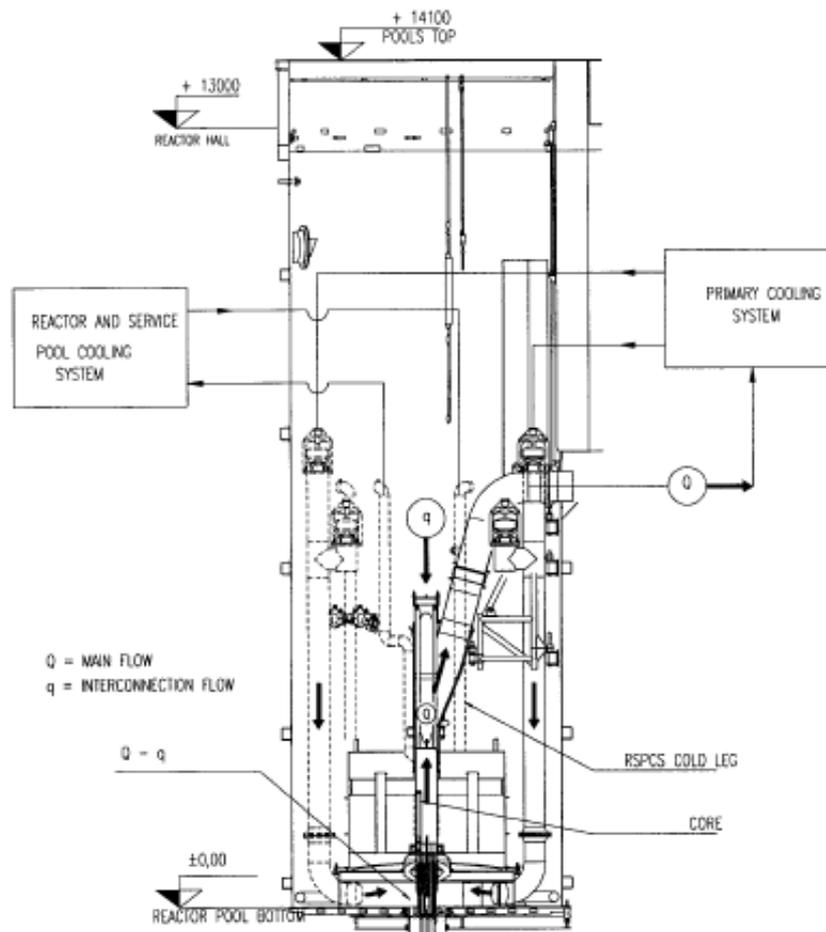


Figura 2.2: Refrigeração do núcleo por circulação forçada.

Os dois tubos que enviam água ao plenum inferior possuem duas válvulas que funcionam por diferença de pressão e liberam o fluxo por circulação natural quando cessada a sucção das bombas. Isso é o que ocorre quando o reator é desligado, e o núcleo começa a ser resfriado somente por circulação natural, conforme é mostrado na figura 2.3.

Neste estado de desligamento, a água aquecida pelo núcleo do reator, sobe através da chaminé por convecção natural atingindo a parte superior da piscina, perdendo energia e descendo posteriormente pelos tubos de circulação, gerando um fluxo de água que deverá retirar o calor residual existente no núcleo.

2.2 O fenômeno de circulação natural

Uma boa parte dos equipamentos utilizados em nosso cotidiano dissipam energia em forma de calor, e em muitos casos esse calor é retirado naturalmente dos equipamentos, por um mecanismo que chamamos de convecção natural. A circulação natural de um

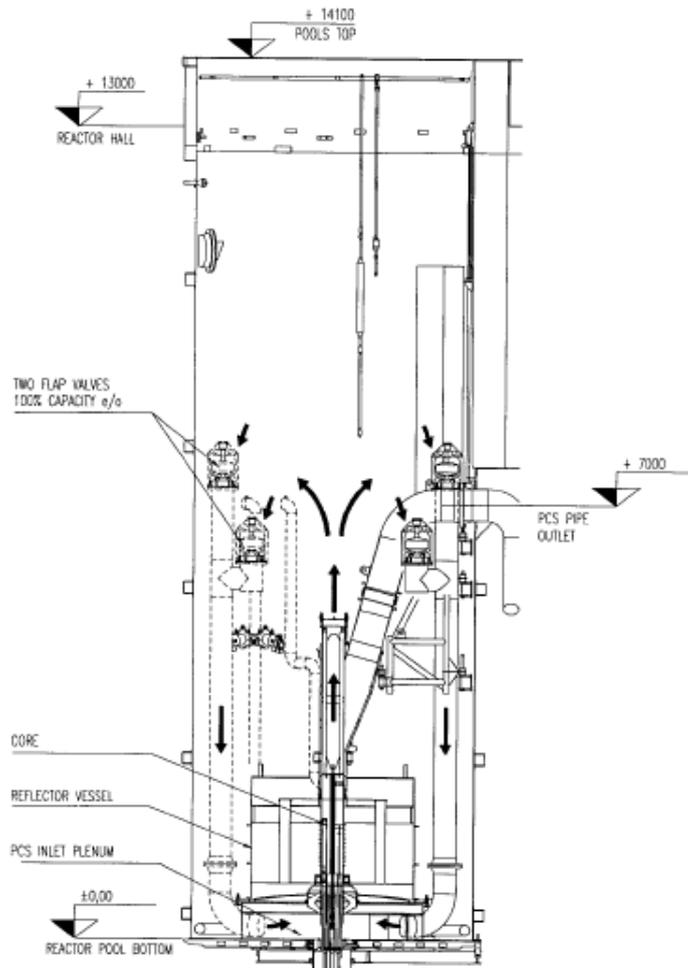


Figura 2.3: Refrigeração do núcleo por circulação natural.

fluido ocorre basicamente pela diferença de densidades entre uma camada mais quente que sobe e outra mais fria que desce. Esse gradiente de densidade pode ser causado termicamente, como acontece nos “loops” do tipo termo-sifão; ou adiabaticamente, como acontece em um reator de pesquisa, onde o núcleo é a fonte que cede calor ao fluido da parte inferior do tanque, e a coluna de fluido acima da chaminé é a fonte fria. Nestes sistemas a circulação é estabelecida sem a utilização de qualquer maquinário. Apenas as leis da física fornecem o mecanismo necessário para a movimentação do fluido.

Os sistemas de circulação natural são empregados largamente em diversos tipos de indústrias e equipamentos. Aplicações tradicionais destes sistemas podem ser encontradas em aquecedores solares, na refrigeração de motores e transformadores, e principalmente em plantas nucleares, onde os sistemas de refrigeração devem estar livres de falhas.

Em um sistema de circulação natural conforme mostrado na figura 2.4, a presença das fontes quente e fria causam uma diferença de densidade entre as pernas verticais do

sistema e conseqüentemente uma diferença de pressão entre os pontos *a* e *b*. Isto é o que mantêm o fluxo de circulação, que pode ser aumentado pela variação da altura entre as fontes quente e fria, ou pela diferença de densidade entre as *pernas* do *loop*.

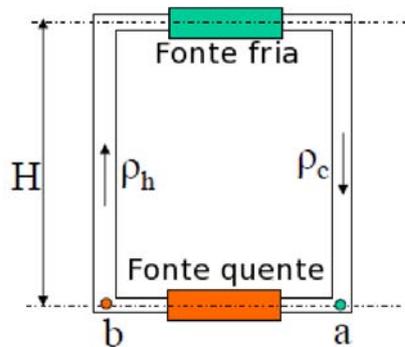


Figura 2.4: Esquema de circuito em regime de circulação natural

A primeira grande utilização de sistemas de circulação natural aconteceu por volta de 1940 na indústria automobilística, e hoje é utilizada largamente nas indústrias químicas e de geração de energia. Atualmente na indústria nuclear os sistemas de circulação natural são adotados como mecanismos de retirada de calor residual do núcleo de PWRs e PHWRs, seja em caso de acidente ou no processo de desligamento do reator.

Em reatores nucleares do tipo BWR (Boiling Water Reactors) ocorre a circulação natural em regime bifásico, e atualmente estão sendo desenvolvidos reatores do tipo água fervente *BWR - Boiling Water Reactors* que funcionam apenas por circulação natural. Alguns desses são o *ESBWR - Economic Simplified Boiling Water Reactor* fabricado pela *General Electric*, o *AHWR - Advanced Heavy Water Reactor* projetado na Índia, e o *VK-300* desenvolvido pela Rússia.

A utilização de sistemas de circulação natural na indústria nuclear apresenta-se muito vantajosa, pois proporciona uma redução no custo total de implantação, operação e manutenção da planta. Isso se deve ao número reduzido de bombas e sistemas secundários que estes projetos necessitam.

Quanto às características do escoamento, verifica-se que a vazão aumenta com a potência do sistema, ou seja, quanto maior for a potência, maior será a velocidade de escoamento, e conseqüente retirada de calor. E um outro fator importante é a capacidade intrínseca dos sistemas de circulação natural equilibrarem eventuais má distribuições de potência no inventário.

Do ponto de vista da segurança, a aplicação de sistemas de circulação natural elimina

os riscos provenientes de falhas nos sistemas de bombeamento e sistemas auxiliares, visto que é um sistema baseado em leis físicas naturais e que não são passíveis de falha.

Capítulo 3

Simulação computacional

Problemas em fluidodinâmica computacional podem ser modelados através das equações de Navier-Stokes, que descrevem os processos de transferência de massa, calor e momento como consequência da aplicação da segunda lei de Newton ao movimento dos fluidos. Estas equações diferenciais parciais não possuem soluções analíticas conhecidas, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

Para avaliação inicial do fenômeno de circulação natural no modelo em estudo, foi utilizado um código comercial de fluidodinâmica computacional chamado CFX. Este código é largamente utilizado para simular escoamentos de fluido com ou sem transferência de calor, em regimes laminares ou turbulentos, bifásicos ou monofásicos, incluindo aqueles onde há processos de combustão e reações químicas. O CFX é um programa amplamente utilizado e testado no meio acadêmico e industrial, pois é um *software* de alta performance, que possibilita alta velocidade no processamento e acurácia nos cálculos, permitindo assim uma ampla aplicação em estudos de fluido-dinâmica.

3.1 Ansys CFX [®]

O CFX é um dos programas que compõem o pacote de mecânica dos fluidos distribuído pela empresa Ansys do calcula as equações de Navier-Stokes utilizando a discretização por volumes finitos. Nesta técnica o domínio de fluido estudado é dividido em pequenas sub-regiões (volumes de controle) onde as equações são resolvidas iterativamente, fornecendo valores médios das variáveis em pontos específicos do domínio. Desta maneira são obtidos os campos de velocidade, temperatura, pressão, densidade, etc do escoamento em regime

estacionário ou transiente. Utilizando a discretização por volumes finitos, assim como em qualquer outro tipo de discretização associado à soluções numéricas, quanto maior e mais complexa for a geometria, maior será o número de volumes finitos requeridos e maiores recursos computacionais serão necessários para resolver o problema.

O pacote Ansys CFX têm sido utilizado para avaliar e resolver diversos tipos de problemas em termo-hidráulica nuclear, como a diluição de boro, a heterogeneidade na distribuição de fluxo, a distribuição de hidrogênio, instabilidade do núcleo e outros. E alguns testes já foram realizados pela IAEA (International Atomic Energy Agency) verificando e validando o mesmo [NEA-CSNI, 2008].

O pacote Ansys CFX 12.1 utilizado neste trabalho possui uma interface gráfica onde é possível o desenvolvimento completo de uma simulação em fluidodinâmica. Desde a construção da geometria do problema até a análise final dos resultados, todas as etapas são realizadas dentro de um única plataforma que integra os ambientes de modelagem geométrica, geração de malha, pré-processamento, *solver*, e pós-processamento.

Para estabelecer uma simulação CFD dentro deste ambiente deve-se realizar as seguintes etapas, que serão explicadas a seguir.

- Desenvolvimento e construção da geometria;
- Especificação e geração da malha de volumes finitos;
- Estabelecimento das condições iniciais, condições de contorno e de solução do problema;
- Execução do *solver* sobre o problema;
- Extração e análise dos resultados.

3.1.1 Ambiente de Modelagem geométrica

Dentro da plataforma Ansys, existe uma interface específica (*Design Modeler*) para a construção dos modelos geométricos necessários para as simulações propostas. Neste ambiente são definidos os domínios e seus limites físicos, sendo possível a importação de geometrias previamente desenvolvidas em outros sistemas, assim como a adição de partes do projeto que tenham sido modeladas anteriormente.

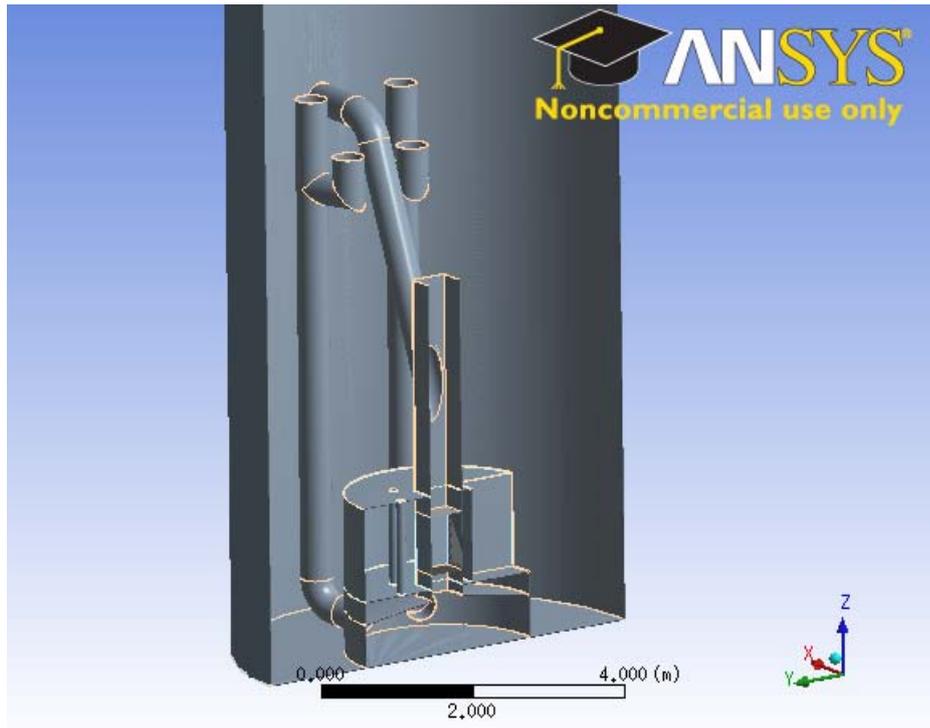


Figura 3.1: Modelo da piscina do RMB mostrando o *plenum* inferior, *plenum* intermediário, tanque refletor, chaminé e tubos de recirculação.

O modelo construído para representar o reator estudado, foi totalmente desenvolvido neste ambiente. Para isto foram utilizadas as informações contidas no FSAR - *Final Safety Analysis Report* do OPAL ANSTO [2001], e considerações geométricas sobre o núcleo pretendido para o RMB, cuja potência máxima pretendida é de 30 MW.

Para o estudo da circulação natural na piscina deste protótipo, foi construído um modelo simplificado, constituído pela piscina, tubos de circulação, *plena* inferior e intermediário, tanque refletor, chaminé e núcleo. Um corte transversal deste modelo é mostrado na figura 3.1.

3.1.2 Ambiente de geração de malha

No ambiente de geração de malha são importados os modelos geométricos construídos, e a partir destes são geradas as malhas que discretizam os domínios. Nesta interface são especificadas todas as características da malha, como o tipo de elemento, dimensão mínima das arestas do elemento e outros parâmetros particulares do programa.

Para o protótipo em estudo foram construídas duas malhas não estruturadas com elementos tetraédricos e número de elementos fixo. A primeira é constituída por 1.273.579

elementos e a segunda por 4.015.417 elementos.

Este alto número de elementos é devido ao fato de estarem sendo discretizados os domínios sólido e líquido correspondentes à estrutura e fluido refrigerante (H_2O).

Simular esta interação fluido-estrutura é muito importante para saber os limites de temperatura do material estrutural e seus coeficientes de transferência de calor, principalmente quando o comportamento do escoamento é desconhecido. Para realizar esta interação é necessário gerar as malhas dos domínios sólido e líquido com seus nós conectados, como mostrado na figura 3.2. Nesta figura vemos os domínios de fluido refrigerante em contato com o domínio sólido (Alumínio), e o domínio de fluido refletor (D_2O).

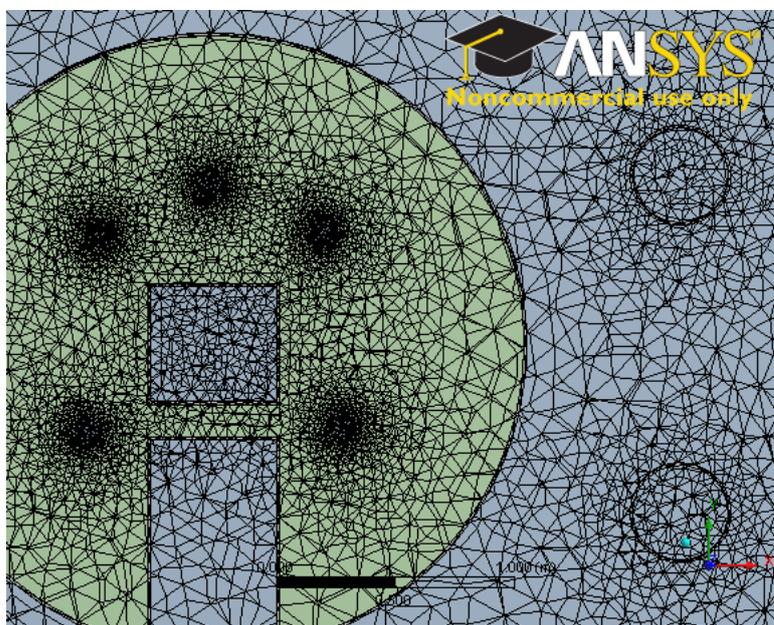


Figura 3.2: Detalhe da conexão entre as malhas dos domínios sólido e líquidos.

Na figura 3.3 é mostrada a malha completa utilizada.

3.1.3 Ambiente de Pré-processamento

O principal fenômeno a ser estudado com este modelo é a circulação natural logo após o desligamento do reator, quando há a inserção das barras de controle e desligamento das bombas de circulação. Sob estas condições as quatro válvulas existentes nos tubos de circulação são fechadas para circulação forçada, liberando a circulação natural no inventário da piscina, que passará a retirar o calor residual do núcleo naturalmente.

Para simular esta situação, e fixar estas condições de operação foi utilizado o ambiente de pré-processamento do Ansys CFX. Neste ambiente são especificados todos os

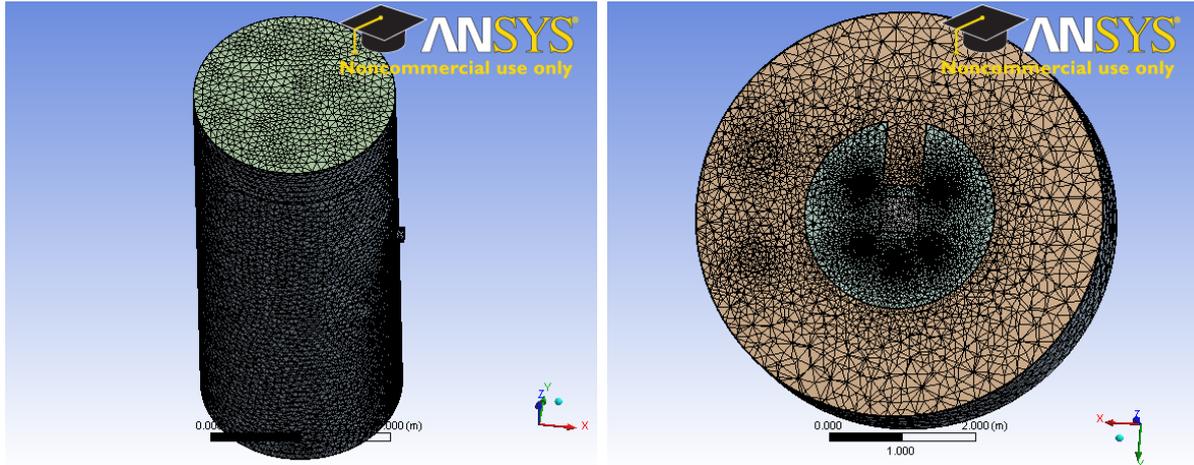


Figura 3.3: Malha gerada para reator protótipo.

parâmetros de cada domínio, como o tipo de fluido, temperatura inicial, tipo de superfície, modelos de turbulência, etc. Além disso são especificadas as condições de contorno em cada domínio e as equações convenientes à solução do problema.

Para a simulação realizada, foram definidos cinco domínios. Três domínios com características de água leve para o inventário da piscina, tanque refletor e camada quente; um domínio sólido com características de aço inoxidável, referente à estrutura do protótipo; e um domínio poroso representando o núcleo.

Esta modelagem do núcleo como meio poroso foi necessária pelo fato deste núcleo possuir 567 placas com dimensões da ordem de $10^{-3} m$, o que implicaria numa grande quantidade de elementos discretizantes. Com essa modelagem, buscou-se reduzir esse número de elementos, e conseqüentemente reduzir o tempo de processamento.

Os principais parâmetros e condições iniciais desta simulação são mostrados na tabela 3.1

Temperatura inicial da camada quente	45 °C
Vazão mássica de entrada da camada quente	3.89 Kg/s
Temperatura de entrada da camada quente	45 °C
Temperatura inicial do inventário da piscina	35 °C
Temperatura inicial do inventário do refletor	35 °C
Potência térmica gerada pelo núcleo ao início da simulação	30 MW

Tabela 3.1: Parâmetros da simulação

Calor de decaimento

Talvez a mais importante condição de contorno imposta ao problema seja aquela que estabelece a fonte de calor no núcleo. Na situação a ser simulada, o calor fornecido ao sistema é proveniente apenas do decaimento dos produtos de fissão existentes no núcleo. E para simular de maneira simplificada esta fonte de calor, foi definido um sub-domínio dentro do domínio núcleo e imposta uma fonte de calor Q dependente do tempo e da potência de operação, conforme a equação 3.1 definida em TODREAS and KAZIMI [1993].

$$\frac{P}{P_0} = 0,066[(\tau - \tau_s)^{-0.2} - \tau^{-0.2}] \quad (3.1)$$

Nesta equação, τ representa o tempo no qual o reator foi ligado, τ_s o tempo em que o reator foi desligado e P_0 a potência de operação antes do desligamento.

O gráfico da figura 3.4 mostra a curva de calor de decaimento inserida na simulação, supondo que o reator esteja com um combustível que operou a uma potência de 30 MW durante 2 anos.

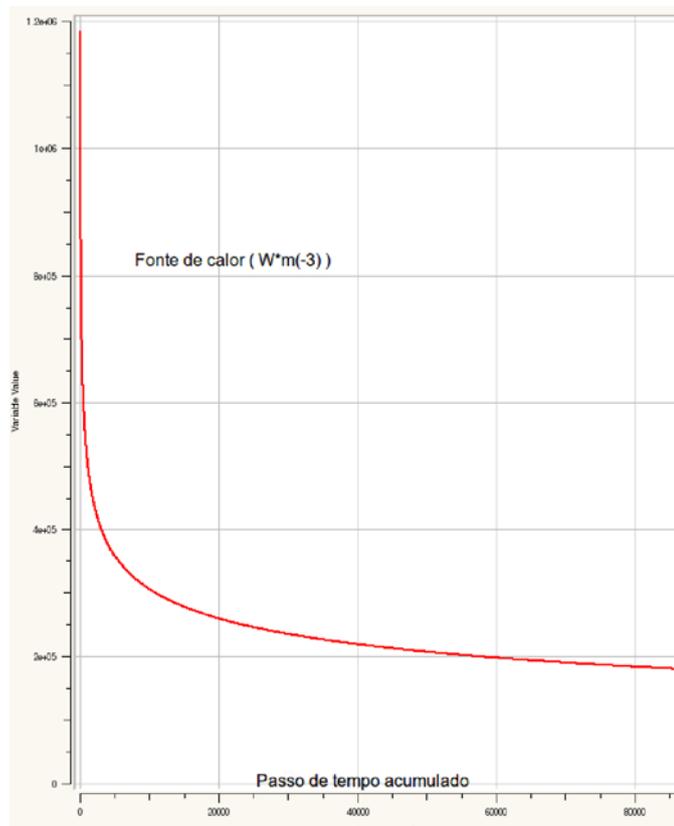


Figura 3.4: Curva de calor de decaimento inserida na simulação CFD.

3.2 Caracterização do núcleo como meio poroso

Ao modelar o núcleo do reator como meio poroso, toda a geometria detalhada das placas combustíveis e suas estruturas são substituídas geometricamente por um paralelepípedo com as mesmas dimensões do núcleo completo. Para estabelecer esta modelagem é necessário especificar as direções de perda de carga e seus respectivos coeficientes de perda. E nas simulações realizadas, estas perdas de carga foram especificadas através do coeficiente quadrático K definido pelo modelo de perda utilizado pelo Ansys CFX.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -K|V|V_z \quad (3.2)$$

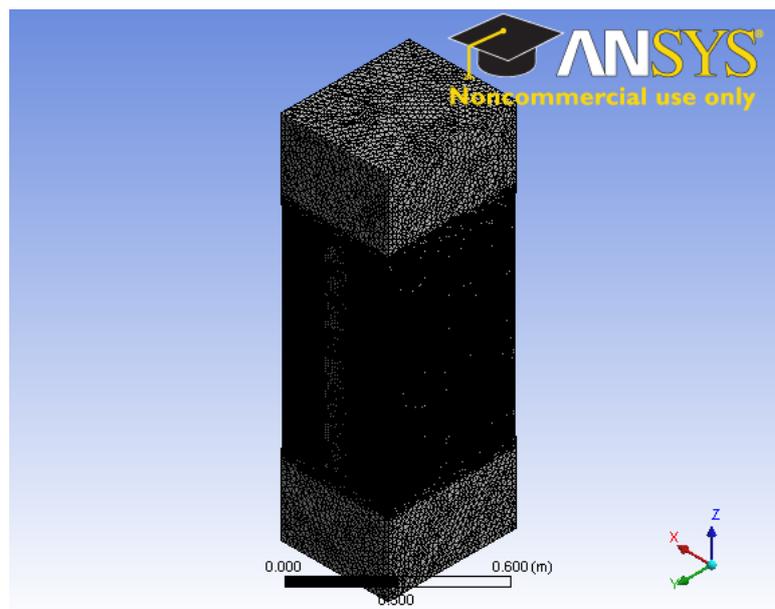
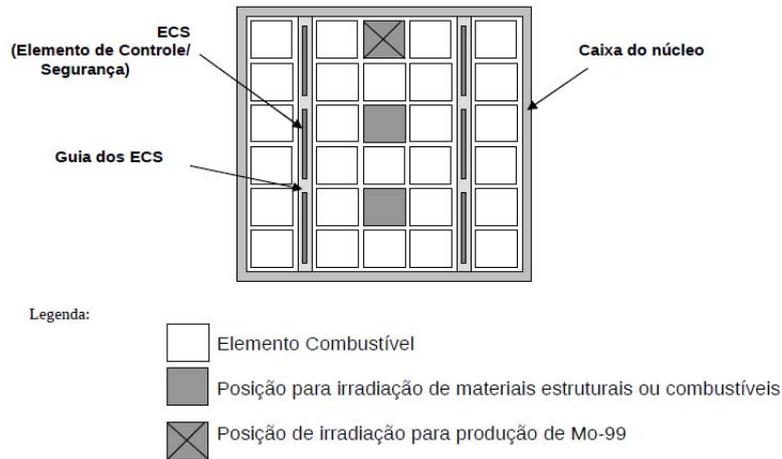


Figura 3.5: Modelo detalhado do núcleo

Para obtenção do coeficiente K da equação 3.2, foram simulados escoamentos estacionários sobre um modelo detalhado do núcleo. Este modelo utilizado é composto pelas placas combustíveis, canais de irradiação e refrigeração, conforme mostrado na figura 3.5.

A partir deste modelo foi gerada uma malha com 6682299 elementos, com a qual foram simulados 11 escoamentos estacionários e variando a velocidade de entrada entre os valores 0,01 m/s e 1,1 m/s. Para estas simulações foram avaliadas as variações de pressão entre a entrada e saída do núcleo, e através de ajuste linear foi estimado o valor de 3509 Kg m^{-4} para o coeficiente quadrático K .

Associando-se o valor obtido para o coeficiente K às informações geométricas do núcleo, foi então especificadas completamente as características do meio poroso que representa o núcleo do protótipo. Os dados desta simulação são mostrados na tabela 3.2 e na figura 3.6, onde ΔP é a variação de pressão devido a perda de carga no núcleo.

Velocidade de entrada <i>m/s</i>	ΔP <i>Pa</i>
0.01	0.82832
0.02	3.19133
0.025	4.96228
0.03	7.13753
0.04	12.6674
0.05	19.81060
0.08	50.92240
0.10	79.71370
0.3	722.2480
0.5	1972.9300
0.7	3723.2100
0.9	5894.300
1.0	7126.2800
1.1	8453.5400

Tabela 3.2: Valores referentes a simulação do núcleo detalhado.

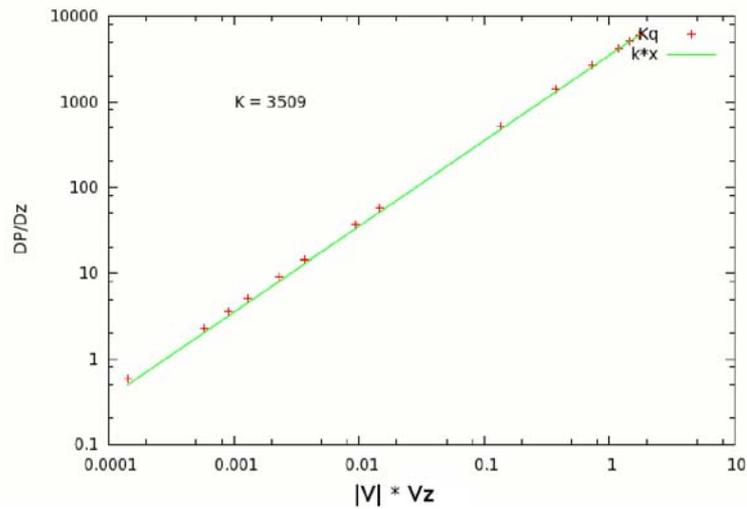


Figura 3.6: Valor do coeficiente quadrático K encontrado para o núcleo.

3.2.1 Processamento

Depois de definidos todos os parâmetros de solução do problema no ambiente de pré-processamento, e após estabelecer as condições de contorno para o protótipo, assim como a caracterização do núcleo como meio poroso, foi especificada uma simulação do tipo transiente com duração de 12 horas, utilizando uma discretização no tempo igual a 0,5 segundos.

Para realizar esta simulação foi utilizada uma estação de trabalho com 12 processadores *Intel Xeon X5660 de 2.8 Gz* e 12 GB de memória RAM, funcionando com o sistema operacional *Suse Server 64-bit*. Esta simulação foi processada utilizando-se os 12 processadores em paralelo sob o protocolo de comunicação MPI (*Message Passing Interface*) local. Neste protocolo a geometria é dividida em um número de partes correspondentes ao número de processadores utilizados, e cada uma dessas partes é calculada por um determinado processador. O programa Ansys CFX possibilita utilizar esta biblioteca de paralelização de maneira simples. Sendo necessário apenas especificar o endereço das máquinas e o número de processadores utilizados para realizar o processamento.

Este processamento foi realizado em várias etapas, que totalizam as 12 horas de transiente calculados.

3.3 Teste de convecção natural em cavidade cúbica

Embora o CFX seja confiável e robusto, desejou-se neste trabalho verificar a sua confiabilidade e correta aplicação sobre um problema simples e bem conhecido na literatura. Com este objetivo, foi avaliado o problema da circulação natural em cavidade quadrada bidimensional, que tem solução referência publicada por DAVIS and JONES [1983], HORTMAN et al. [1990] e DE SAMPAIO [2006].

O problema consiste em uma cavidade bidimensional quadrada com duas paredes verticais mantidas a temperaturas diferentes T_h (temperatura quente) e T_c (temperatura fria), e as paredes horizontais mantidas adiabáticas. Assim, o fluido tende a circular naturalmente através da cavidade. A Figura 3.7 1 mostra um esquema deste problema.

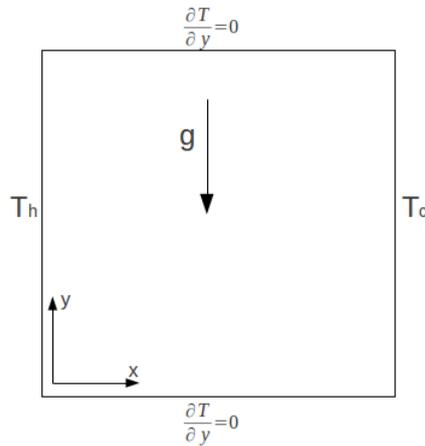


Figura 3.7: Problema da cavidade quadrada bidimensional.

Para esta avaliação foram construídos 3 modelos que simulam diferentes valores para o número de Rayleigh ($Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$ e $Ra = 10^6$), que representa uma razão entre as forças de flutuabilidade e (o produto de) difusividades térmica e dinâmica. Os parâmetros destas simulações são apresentados na tabela 3.3.

Ra	$\rho(kgm^{-3})$	$\mu(m^2s^{-1})$	$\beta(K^{-1})$	Pr	$g(ms^{-1})$	$T_h(K)$	$T_c(K)$	L (m)	H (m)
10^4	1.19	1.8×10^{-5}	0.00341	0.71	9.81	12	2	0.021277	0.021277
10^5	1.19	1.8×10^{-5}	0.00341	0.71	9.81	12	2	0.045841	0.045841
10^6	1.19	1.8×10^{-5}	0.00341	0.71	9.81	12	2	0.098761	0.098761

Tabela 3.3: Propriedades do fluido e dimensões da cavidade usadas para cálculo.

Na tabela 3.3 as variáveis ρ , μ , β e Pr representam respectivamente a densidade, viscosidade, coeficiente de expansividade térmica e o número de Prandtl do fluido. As

simulações desses modelos foram executados no ambiente ANSYS CFX 12.1 conforme a simulação da piscina do reator. E para os três casos, foram utilizados o mesmo número de processadores (12).

Os números destas simulações são apresentados na Tabela 3.4.

Ra	Passo de tempo (s)	Tempo total (s)	Número de elementos	Número de nós
10^4	0.1	30	1228800	1643524
10^5	0.1	30	417316	837218
10^6	0.1	30	976144	1956242

Tabela 3.4: Dados da simulação e malha usados no problema da cavidade.

Nessas simulações foram avaliados os números de Nusselt médio entre as paredes quente e fria das cavidades. E posteriormente estes valores foram comparados com aqueles apresentados por HORTMAN et al. [1990] e DE SAMPAIO [2006], e os resultados são mostrados na tabela 3.5.

A figura 3.8 mostra os campos de temperatura e velocidade dentro de cada cavidade no instante de tempo 30 segundos, que foi suficiente para a convergência do problema ao estado estacionário.

Com os resultados apresentados foi possível verificar o perfeito funcionamento do solver CFX e a sua correta aplicação no problema da cavidade. Isto apenas corrobora para a sua utilização como ferramenta para simulação da piscina do reator, visto que não existe dados experimentais que venham a validar a simulação pretendida.

	Ra = 10^4	Ra = 10^5	Ra = 10^6
	\bar{Nu}	\bar{Nu}	\bar{Nu}
HORTMAN et al. [1990]	2.24475	4.52164	8.82513
DE SAMPAIO [2006]	2.23975	4.51231	8.80761
Resultados obtidos	2.22853	4.51895	8.85647

Tabela 3.5: Resultados para o número de Nusselt médio.

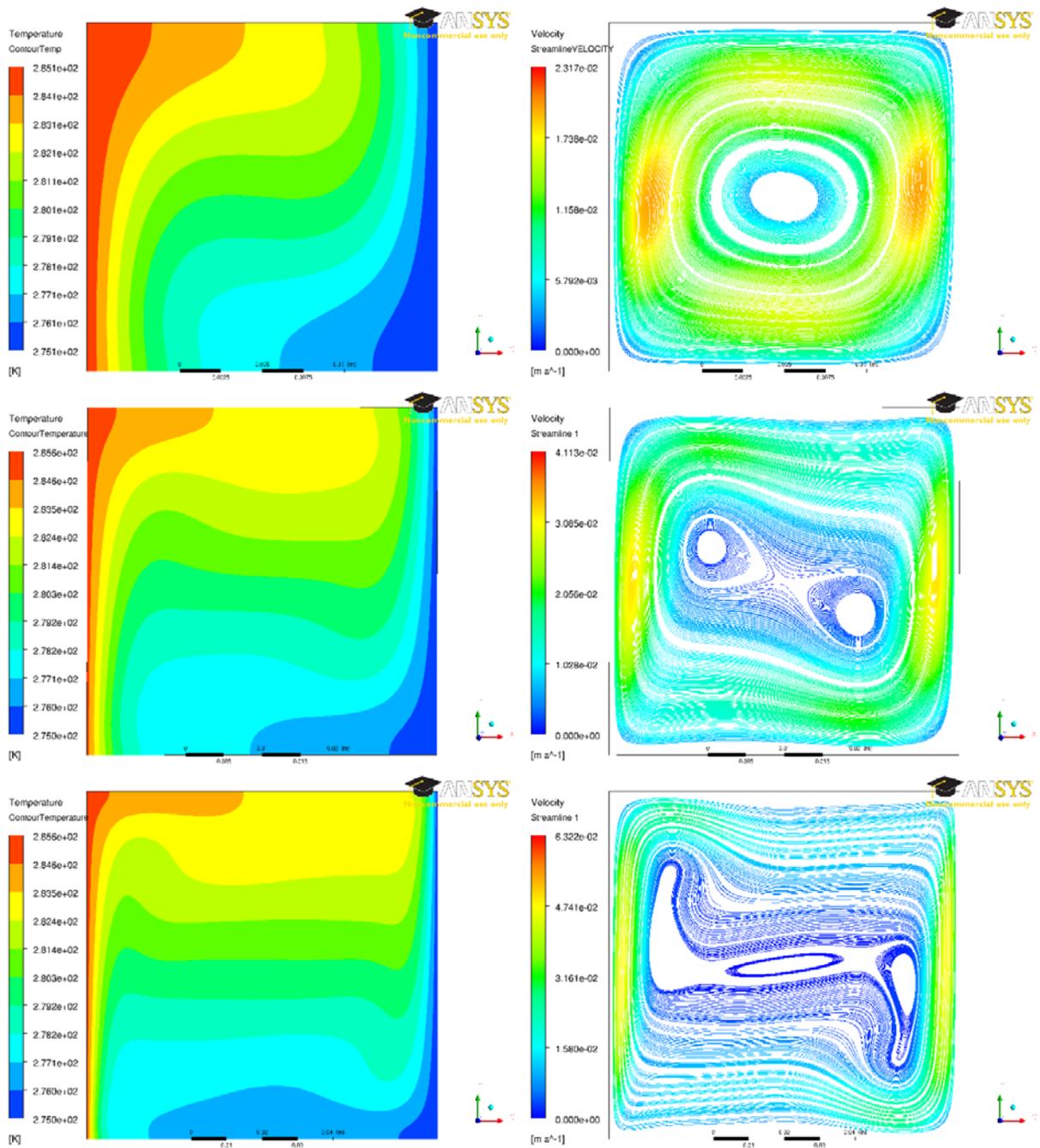


Figura 3.8: Campos de temperatura e velocidade para $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$ e $Ra = 10^6$.

Capítulo 4

Resultados da Simulação

Após o desligamento de um reator nuclear, ainda que as reações de fissão tenham sido cessadas, existe ainda o calor gerado pelo decaimento dos produtos de fissão. Este calor residual deve ser removido do núcleo com máxima eficiência para evitar possíveis danos ao revestimento do combustível e indesejáveis vazamentos de produtos radioativos. Neste reator em estudo, o processo de remoção de calor residual ocorre por circulação natural da água da piscina, conforme explicado no capítulo 2 e mostrado agora na figura 4.1.

Esse estudo do protótipo em fluidodinâmica computacional foi realizado com a intenção de avaliar aspectos referentes a segurança intrínseca da instalação, e principalmente fornecer os dados necessários para calcular os grupos adimensionais que caracterizam o escoamento em circulação natural neste reator.

Depois de realizado o processamento do transiente descrito no capítulo 4, os dados gerados pela simulação foram gravados em arquivos de transientes, que contêm as informações de todas as variáveis do problema no passo de tempo em que o arquivo foi gerado.

Nesta simulação foram gravados arquivos de transiente a cada 200 passos de tempo (equivalente a intervalos de 100 segundos), que são lidos em uma interface de pós-processamento do Ansys-CFX, onde é possível obter valores sobre variáveis, estabelecer equações a serem calculadas, gerar gráficos e tabelas necessários à análise. Neste ambiente foram gerados os campos de temperatura e velocidade na piscina e obtidos os valores de temperatura e velocidade de escoamento no núcleo.

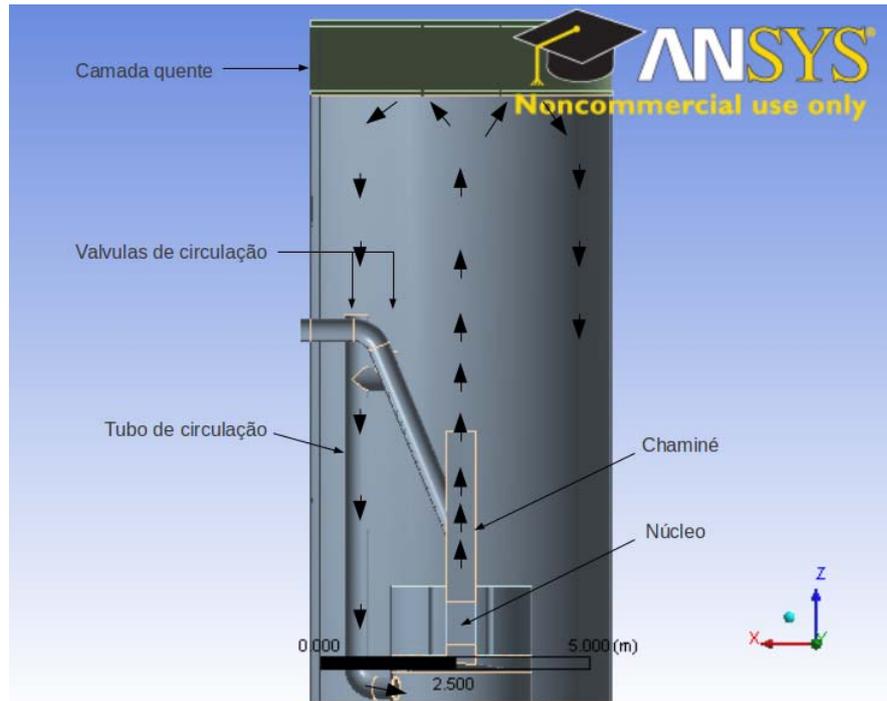


Figura 4.1: Esquema da circulação natural na piscina do reator.

4.1 Distribuição de Temperatura

Em operação normal a temperatura média da água da piscina varia em torno de 35°C , e conforme explicado anteriormente, no topo da piscina existe uma camada de água quente, cuja temperatura média é mantida em torno de 45°C . Estas são as condições iniciais de temperatura do problema, que é mostrado na figura 4.2. Este comportamento começa a mudar logo após o desligamento das bombas de sucção e sistemas da camada quente, conforme é mostrado na distribuição de temperatura em 100 segundos (figura 4.3).

As figuras 4.4 e 4.5 mostram a estratificação térmica nos instantes de tempo $t = 30 \text{ min.}$, $t = 3 \text{ h}$, $t = 6 \text{ h}$ e $t = 12 \text{ h}$.

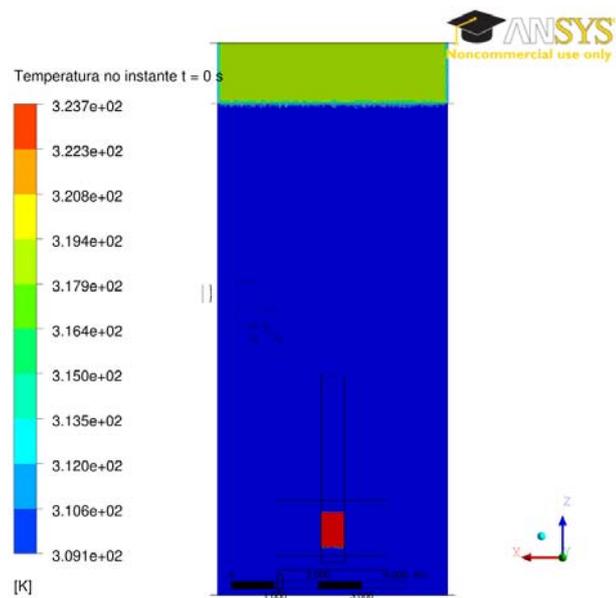


Figura 4.2: Distribuição de temperatura da piscina ao início da simulação.

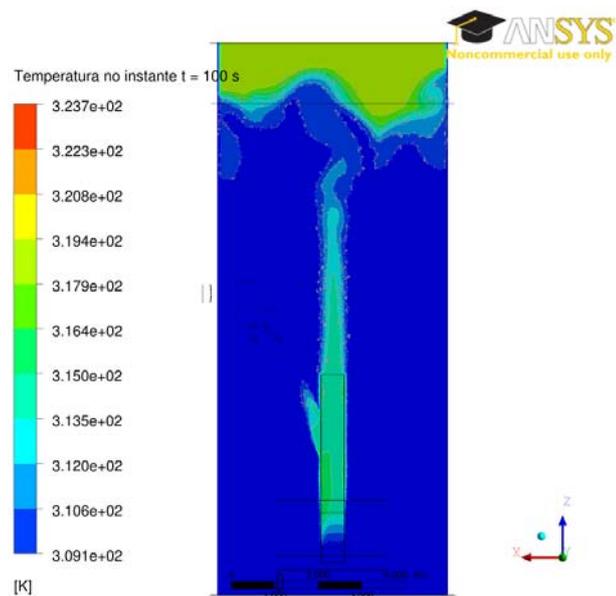


Figura 4.3: Distribuição de temperatura da piscina no instante de tempo 100 s.

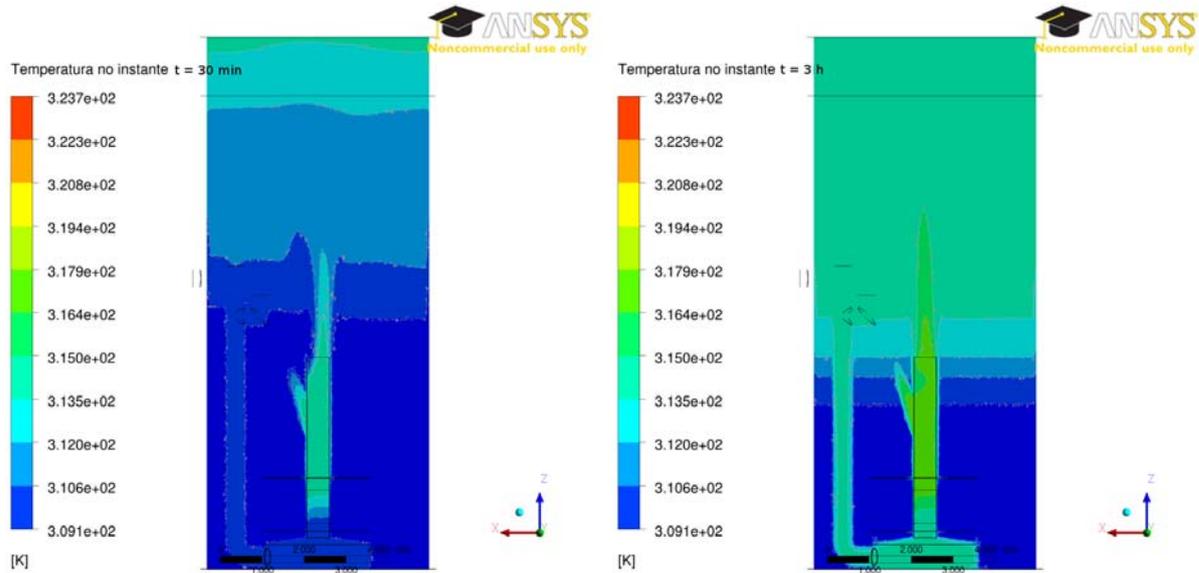


Figura 4.4: Campos de temperatura na piscina nos instantes de tempo $t = 30 \text{ min}$ e $t = 3 \text{ h}$.

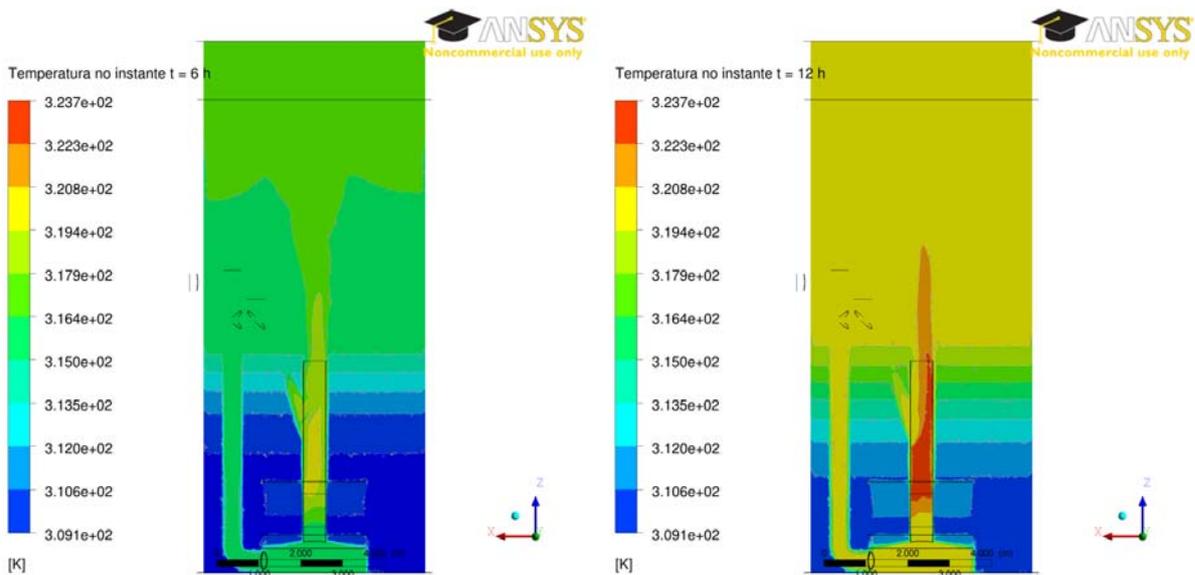


Figura 4.5: Campos de temperatura na piscina nos instantes de tempo $t = 6 \text{ h}$ e $t = 12 \text{ h}$.

Na figura 4.6 é mostrada a temperatura máxima do fluido dentro do núcleo. Esta é uma informação importante para avaliações relativas a segurança do combustível nuclear. Neste gráfico verifica-se uma elevação de apenas 10°C em 12 horas, mostrando que nas condições simuladas, não há risco de fusão do núcleo ou qualquer dano a integridade do revestimento.

A temperatura também foi avaliada como função do tempo em um ponto **P1** ao centro da região onde existia a camada quente. Na figura 4.7 é possível verificar a acentuada mudança de temperatura que ocorre ao início do transiente.

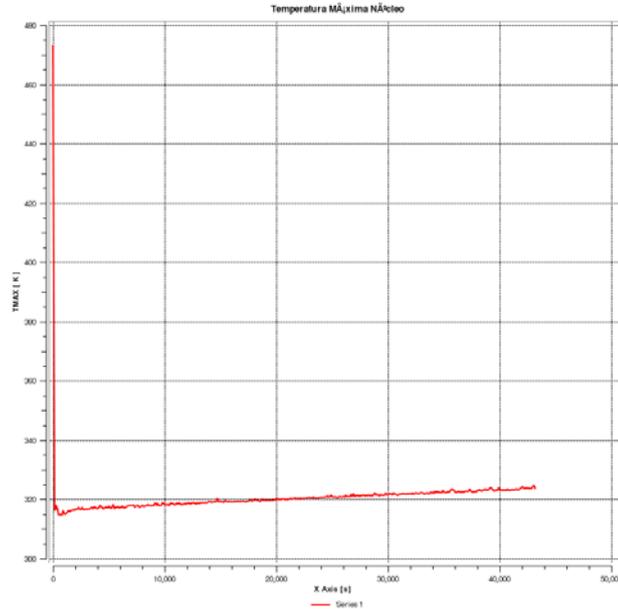


Figura 4.6: Variação da temperatura da água dentro do núcleo e no ponto P1.

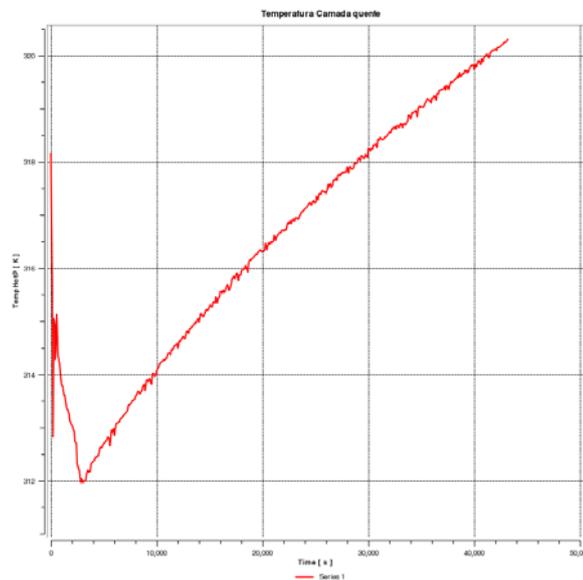


Figura 4.7: Variação da temperatura da água no ponto P1.

4.2 Distribuição de Velocidade

Neste trabalho, serão utilizados dados das simulações em fluido-dinâmica computacional para alimentar o problema de otimização de parâmetros na busca de um projeto de seção de testes em escala para o núcleo do reator.

A principal informação necessária ao modelo matemático que irá estabelecer a similaridade desejada é a velocidade de escoamento no núcleo. As figuras 4.8 e 4.9 mostram os campos de velocidades na piscina nos tempos $t = 100s$, $t = 3h$, $t = 6h$ e $t = 12h$.

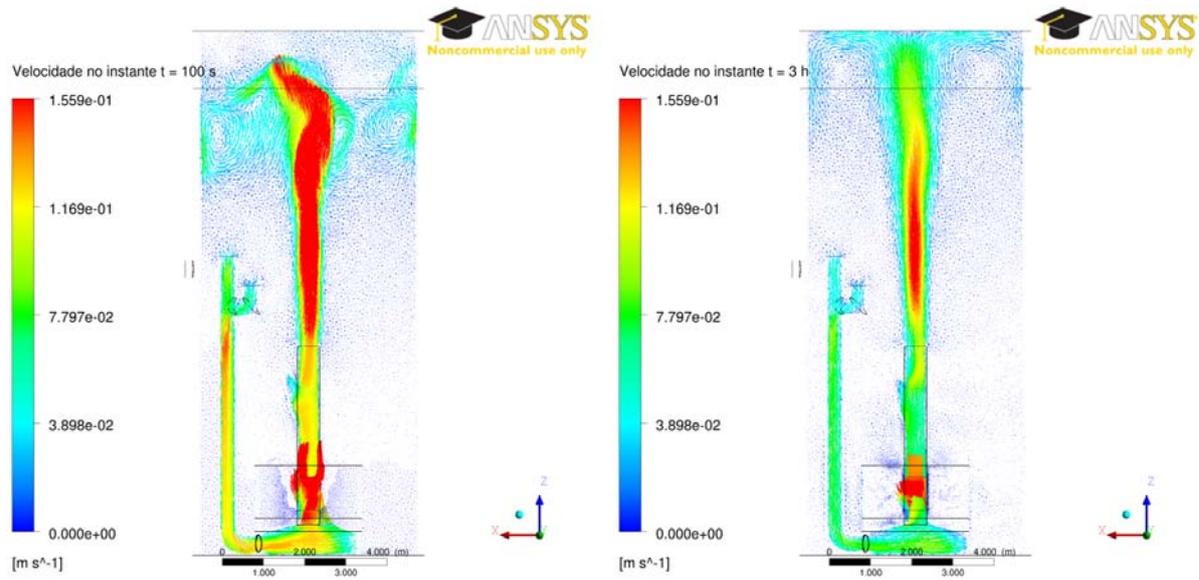


Figura 4.8: Campos de velocidade na piscina nos instantes de tempo $t = 100s$ e $t = 3h$.

Observa-se através do gráfico 4.10 que a vazão no núcleo vai diminuindo com o tempo, e de maneira semelhante ao calor de decaimento.

Na figura 4.11 é possível observar que o escoamento acontece da maneira esperada dentro do núcleo. A modelagem por meios porosos permitiu reduzir o número de elementos de malha, mantendo as características do escoamento entre os canais do núcleo.

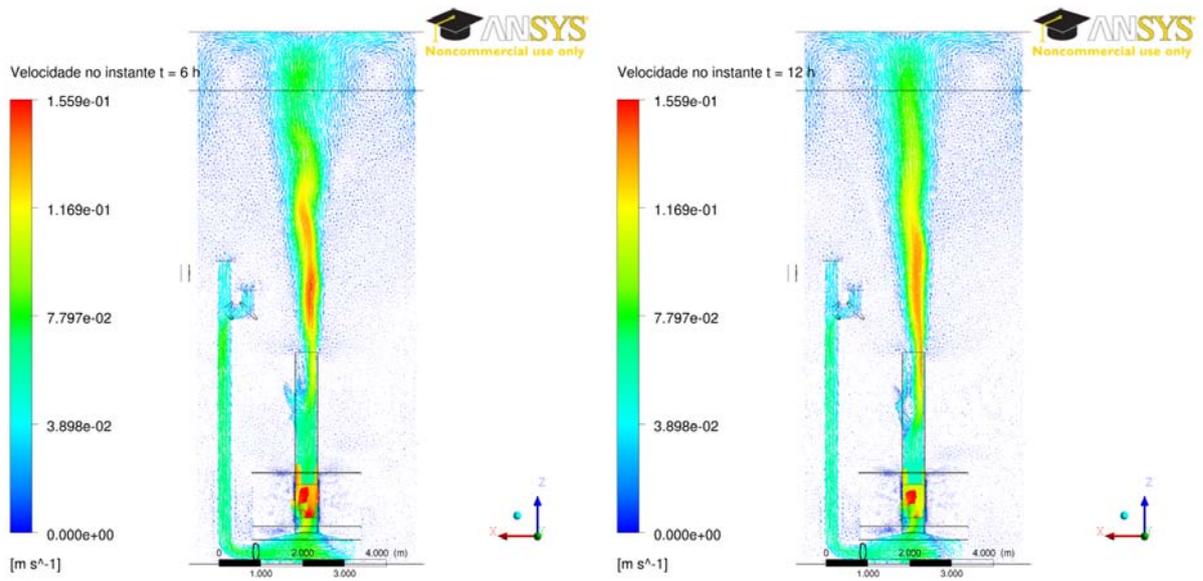


Figura 4.9: Campos de velocidade na piscina nos instantes de tempo $t = 6h$ e $t = 12h$.

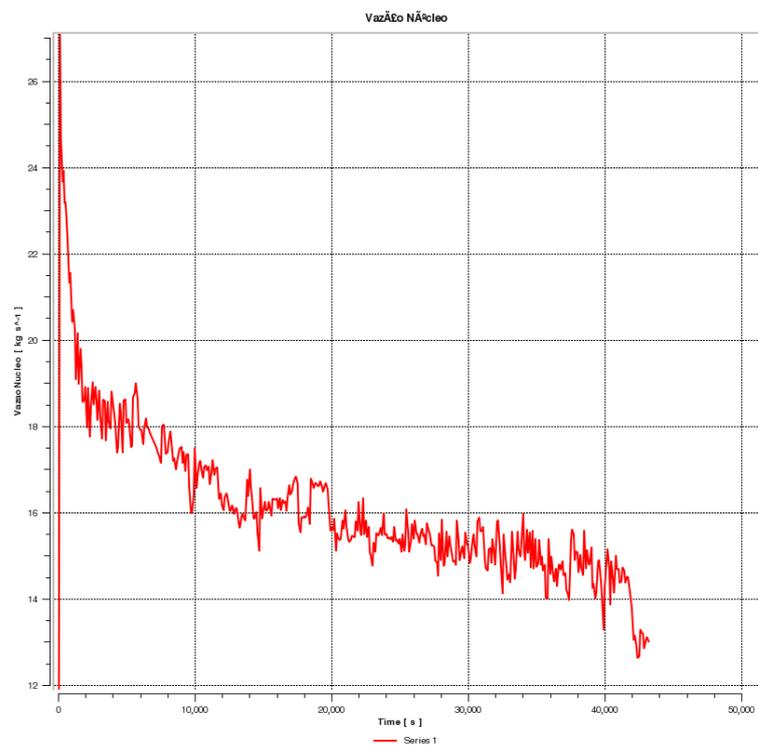


Figura 4.10: Vazão no núcleo em função do tempo.

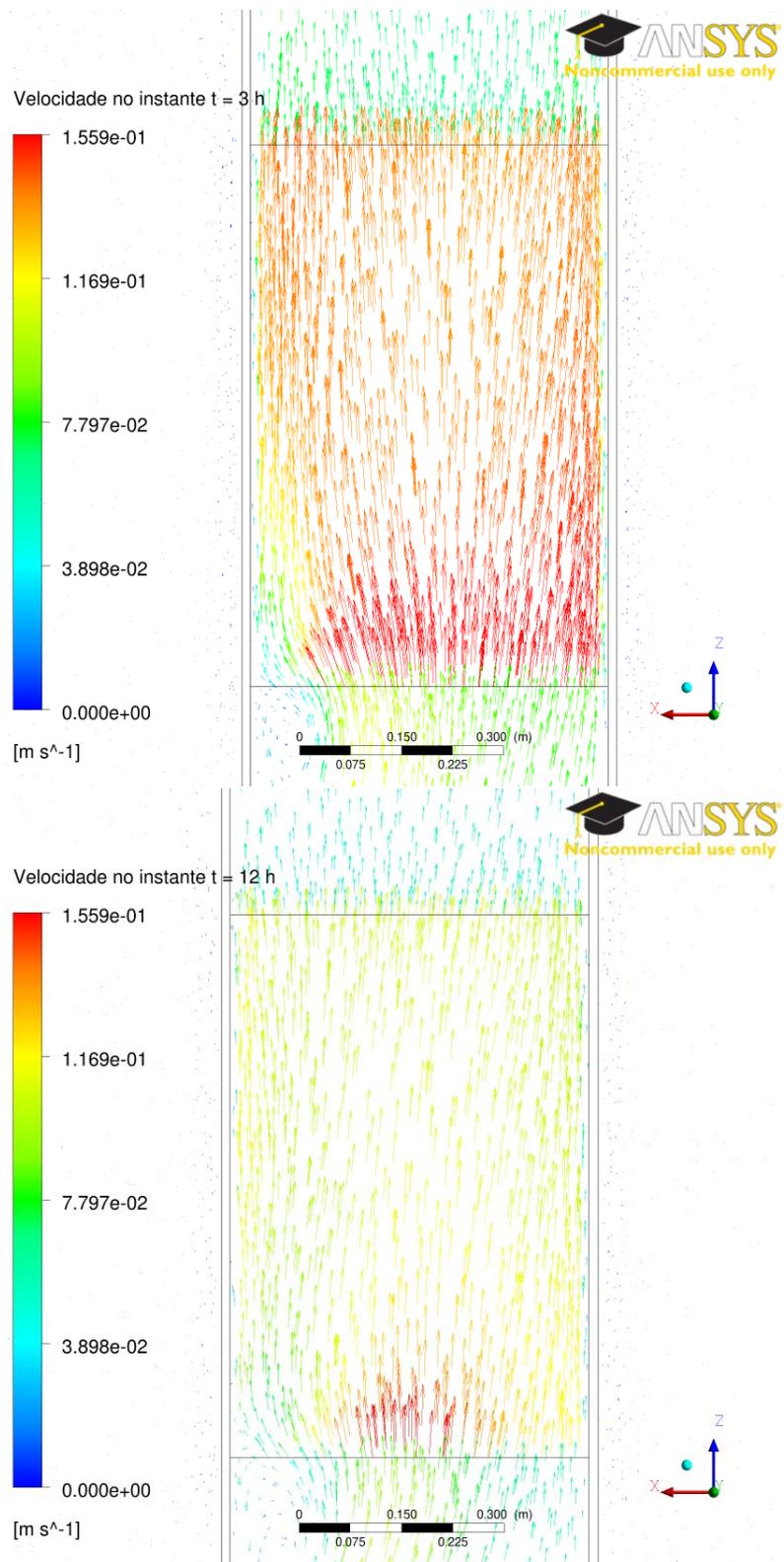


Figura 4.11: Escoamento através do núcleo.

Capítulo 5

Modelo de similaridade em escala reduzida

Nos capítulos anteriores foram mostradas as etapas realizadas para simular computacionalmente o escoamento laminar em regime de circulação natural na piscina do protótipo em estudo. No presente capítulo serão mostradas as equações que envolvem a análise de similaridade neste problema e será apresentada uma metodologia para determinação de um modelo em escala reduzida do núcleo que seja capaz de reproduzir o fenômeno de circulação natural com comportamento similar àquele simulado em CFD.

5.1 Metodologia

Para compor uma metodologia capaz de resolver o problema de otimização com restrições a que está sujeito o projeto em escala reduzida do núcleo deste reator em estudo, sujeito a um escoamento monofásico em regime de circulação natural, foram realizadas as seguintes etapas de maneira análoga àquela proposta em LAPA et al. [2004].

1. Definição do modelo físico adequado ao problema a ser estudado;
2. Adimensionalização do modelo físico e determinação dos grupos ou números adimensionais relevantes;
3. Cálculo dos números adimensionais do sistema real, que servirão como referência para a busca;
4. Formulação do problema de otimização com restrições;

5. Definição das variáveis de busca do problema como sendo o conjunto mínimo e suficiente para o cálculo de todos os grupos adimensionais de interesse;
6. Utilização do método de evolução diferencial para resolver o problema de otimização;
7. Teste de desempenho e validação da metodologia;

A seguir serão analisadas as etapas mais relevantes desta metodologia (1,2,4). As etapas restantes serão apresentadas durante os cálculos dos capítulos seguintes.

5.1.1 Definição do Modelo Físico adequado ao problema

Nesta etapa são estabelecidas as equações de conservação de massa, momentum e energia, assim como as condições iniciais e condições de contorno relativas ao problema.

Tendo em vista o escoamento monofásico sob circulação natural que ocorre no núcleo do reator, será analisado o trabalho de ISHII and KATAOKA [1984] para estabelecer novos critérios de similaridade para um modelo existente, fundamentado em leis físicas empregadas numa configuração média do circuito.

Em ISHII and KATAOKA [1984] foram usadas as equações de momentum e continuidade integrais acrescidas de duas equações de energia e uma condição de contorno em uma dimensão sobre o circuito composto por várias seções.

Equação de continuidade para a i -ésima seção:

$$u_i = \frac{a_0}{a_i} u_r \quad (5.1)$$

Equação de momentum integral:

$$\rho \frac{du_r}{dt} \sum_i \frac{a_0}{a_i} l_i = \beta g \rho \Delta T l_h - \frac{\rho u_r^2}{2} \sum_i \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i \left(\frac{a_0}{a_i} \right)^2 \quad (5.2)$$

Equação de energia para o fluido na i -ésima seção:

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right\} = \frac{4h}{d} (T_s - T) \quad (5.3)$$

Equação de energia para o sólido na i -ésima seção:

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} + k_s \nabla^2 T_s - \dot{q}_s = 0 \quad (5.4)$$

Estas duas equações de energia 5.3 e 5.4 estão relacionadas através da condição de contorno entre fluido e estrutura definida pela equação abaixo.

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h(T_s - T) \quad (5.5)$$

Onde

u_i = velocidade na i -ésima seção,

u_r = velocidade no núcleo,

a_0 = área de escoamento do núcleo, que servirá como área de referência para normalização de outras áreas,

l_h = separação vertical entre os centros térmicos, quente e frio.

A velocidade u_r têm seu valor dependente do tempo, mas no estado de circulação natural em regime estacionário denotaremos seu valor por u_0 , que será utilizado como referência para a adimensionalização. O mesmo será feito com l_0 que representa a altura ativa das placas combustíveis que serão tomadas como comprimento de referência.

5.1.2 Adimensionalização do modelo físico e determinação dos grupos ou números dimensionais relevantes

De posse das equações diferenciais de conservação de massa, momentum e energia que caracterizam o modelo físico, é necessário adimensionalizá-las para obtenção dos grupos que representam fenômenos físicos referentes ao sistema. E para realizar esta adimensionalização serão utilizados os seguintes parâmetros dimensionais:

$$U_i = \frac{u_i}{u_0} \quad \rightarrow \text{Velocidade adimensional na seção } i \quad (5.6)$$

$$U_r = \frac{u_r}{u_0} \quad \rightarrow \text{Velocidade adimensional no núcleo} \quad (5.7)$$

$$L_i = \frac{l_i}{l_0} \quad \rightarrow \text{Comprimento adimensional na seção } i \quad (5.8)$$

$$L_h = \frac{l_h}{l_0} \quad \rightarrow \text{Comprimento adimensional na seção quente} \quad (5.9)$$

$$Z = \frac{z}{l_0} \quad \rightarrow \text{Distância axial adimensional} \quad (5.10)$$

$$\tau = t \frac{u_0}{l_0} \quad \rightarrow \text{Tempo adimensional} \quad (5.11)$$

$$\Theta = \frac{\Delta T}{\Delta T_0} \quad \rightarrow \text{Temperatura adimensional} \quad (5.12)$$

$$A_i = \frac{a_i}{a_0} \quad \rightarrow \text{Área adimensional da seção } i \quad (5.13)$$

$$Y = \frac{y}{\delta} \quad \rightarrow \text{Distância transversal adimensional} \quad (5.14)$$

$$\nabla^{*2} = \delta^2 \nabla^2 \quad (5.15)$$

Na equação 5.12 o valor ΔT_0 representa a máxima diferença de temperatura no circuito durante a circulação natural em estado estacionário. Esta diferença de temperatura é medida entre a parte inferior do núcleo e a altura das válvulas de circulação natural.

Para a análise pretendida, devemos considerar algumas suposições simplificadoras para o escoamento em estado estacionário:

- São desprezíveis os efeitos da dissipação viscosa e da condução axial;
- As perdas por calor para o ambiente também são desprezíveis;
- O fluido é suposto incompressível devido ao fato do escoamento ocorrer em regime monofásico;
- A aproximação de Boussinesq é válida. Ou seja, as propriedades do fluido são consideradas constantes nas equações de conservação, com exceção do termo de empuxo, que supõe-se variar linearmente com a temperatura.

Substituindo os parâmetros apresentados nas equações 5.6 à 5.14 sobre as equações 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, são obtidas as equações de conservação na forma adimensional.

5.1.3 As equações de conservação na forma adimensional

Equação de continuidade para a i-ésima seção

$$U_i = \frac{U_r}{A_i} \quad (5.16)$$

Equação de momentum integral

$$\frac{dU_r}{d\tau} \left(\sum_i \frac{L_i}{A_i} \right) = R(\Theta_h - \Theta_c)L_h - \frac{U_r^2}{2} \sum_i \left(F_i \frac{1}{A_i^2} \right) \quad (5.17)$$

Equação de energia do fluido para a i-ésima seção

$$\frac{\partial \Theta_i}{\partial \tau} + \frac{U_r}{A_i} \frac{\partial \Theta_i}{\partial Z} = St_i (\Theta_{si} - \Theta_i) \quad (5.18)$$

Equação de Energia do Sólido para a i-ésima seção

$$\frac{\partial \Theta_{si}}{\partial \tau} + T^* \nabla_i^{*2} \Theta_{si} - Q_{si} = 0 \quad (5.19)$$

Condição de contorno fluido-estrutura para a i-ésima seção

$$\frac{\partial \Theta_{si}}{\partial Y_i} = B_i (\Theta_{si} - \Theta_i) \quad (5.20)$$

A partir desta adimensionalização surgem então os grupos adimensionais de similaridade física relacionados a seguir.

5.1.4 Grupos adimensionais de Similaridade Física

Número de Richardson

$$R = \frac{g\beta\Delta T_0 l_0}{u_0^2} = \frac{\text{empuxo}}{\text{força de inércia}} \quad (5.21)$$

Número de Fricção

$$F_i = \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i = \frac{\text{fricção}}{\text{força de inércia}} \quad (5.22)$$

Número de Stanton modificado

$$St_i = \left(\frac{4hl_0}{\rho C_p u_0 d} \right)_i = \frac{\text{convecção na parede}}{\text{convecção axial}} \quad (5.23)$$

Número de razão de tempos

$$T_i^* = \left(\frac{\alpha_s l_0}{\delta^2 u_0} \right)_i = \frac{\text{tempo de transporte}}{\text{tempo de condução}} \quad (5.24)$$

Onde α_s representa a difusividade térmica do sólido.

Número de Biot

$$B_i = \left(\frac{h\delta}{k_s} \right)_i = \frac{\text{convecção na parede}}{\text{condução}} \quad (5.25)$$

Número de fonte de calor

$$Q_{si} = \left(\frac{q_s l_0}{\rho_s C_{ps} u_0 \Delta T_0} \right)_i = \frac{\text{calor da fonte quente}}{\text{variação na energia axial}} \quad (5.26)$$

5.1.5 Grupos adimensionais de similaridade geométrica

Além dos grupos adimensionais de similaridade física definidos acima, são definidos também os grupos de similaridade geométricas a seguir.

Escala de comprimento térmico

$$L_i = \frac{l_i}{l_0}, \quad \left(L_h = \frac{l_h}{l_0} \right) \quad (5.27)$$

Escala de área de escoamento

$$A_i = \frac{a_i}{a_0} \quad (5.28)$$

Diâmetro Hidráulico

$$d_i = 4 \frac{a_i}{\xi_i} \quad (5.29)$$

Profundidade de Condução

$$\delta_i = \frac{a_{si}}{\xi_i} \quad (5.30)$$

onde

a_i é a área de fluxo; a_{si} é a seção de área transversal sólida; e ξ é o perímetro molhado da seção i .

Solucionando o sistema de equações de balanço adimensionalizadas para o estado estacionário pode-se determinar a diferença de temperatura de entrada e saída do núcleo e a velocidade de escoamento no mesmo.

$$\Delta T_0 = \frac{\dot{q}_0 l_0}{\rho C_p u_0} \left(\frac{a_{s0}}{a_0} \right) \quad (5.31)$$

onde a_{s0} , l_0 e a_0 são dimensões de referência, tendo como parâmetro a seção aquecida.

Substituindo esta expressão na equação integral de momentum estacionária 5.17, a solução para velocidade é dada por

$$u_0 = \left\{ \frac{\beta \left(\frac{\dot{q}_0 l_0}{\rho C_p} \right) l_h \frac{a_{s0}}{a_0}}{\frac{1}{2g} \sum_i \left(\frac{F_i}{A_i^2} \right)} \right\}^{1/3} \quad (5.32)$$

Desta equação observa-se que existe um acoplamento entre os sistemas dinâmicos e termodinâmicos. O processo de transferência de calor influi diretamente sobre o balanço das forças de inércia e empuxo, portanto não permite resolver a distribuição de velocidade de escoamento independente da distribuição de temperatura. Este comportamento particular torna complexa a análise de similaridade dos escoamentos em regime de circulação natural.

E além desta dificuldade, observa-se nas equações 5.23 e 5.25 referentes aos números de Stanton modificado e Biot, uma dependência com o coeficiente de transferência de calor h .

Este coeficiente de transferência de calor h depende das propriedades do fluido e das condições de escoamento. Usualmente ele é definido em termos do número de Nusselt, conforme a equação 5.33, onde d e k são respectivamente o diâmetro hidráulico e a condutividade térmica do fluido. Conforme explicado em ISHII and KATAOKA [1984], existem três grupos principais de correlações para o número de Nusselt:

$$h = \frac{K}{d} Nu \quad (5.33)$$

Quando o fluxo é laminar e \mathbf{q} é conhecido:

$$Nu = 4.36 \quad (5.34)$$

Quando o fluxo é turbulento e ($1 < Pr < 20$):

$$Nu = 0.0155 Re^{0.83} Pr^{0.5} \quad (5.35)$$

Para metais líquidos e ($Pr < 0.1$):

$$Nu = 4.82 + 0.0185 (Re Pr)^{0.83} \quad (5.36)$$

Através destas relações observa-se que o número de Nusselt é função do número de Reynolds e das propriedades do fluido. Mas por outro lado, nas transferências de calor em escoamentos sob circulação natural, o número de Nusselt é também função do número de Grashof definido pela equação 5.37 e do comprimento da superfície aquecida.

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T_0 l_0^3}{(\mu/\rho)^2} \quad (5.37)$$

E para uma larga faixa do número de Grashof, a correlação entre esses números é dada por:

$$Nu = 0.3 (Gr Pr)^{0.3} \left(\frac{d_0}{l_0} \right) \quad (5.38)$$

Estas diferentes correlações para o coeficiente de transferência de calor mostram que

as especificações de similaridade para os números de Biot e Stanton modificado são difíceis de serem encontradas, principalmente quando pretende-se alcançar esta similaridade utilizando fluidos diferentes.

A partir da adimensionalização das equações governantes do problema foram obtidos seis grupos adimensionais importantes que caracterizam um escoamento monofásico em regime de circulação natural:

- Número de Richardson
- Número de Fricção
- Número de Stanton Modificado
- Número de Razão de tempos
- Número de Biot
- Número de fonte de calor

5.1.6 Análise crítica dos grupos adimensionais

Cada um dos grupos adimensionais acima têm importância relativa, de acordo com o experimento que se pretende reproduzir em escala reduzida. Para o protótipo da piscina do reator estudado, os números de Stanton e Biot podem ser descartados, visto que estes números simulam a queda de temperatura na interface entre sólido e fluido. E mesmo que este comportamento não seja completamente simulado, o sistema ajusta a queda de temperatura na camada limite para um valor diferente. Contudo, o escoamento geral e a distribuição de energia não são muito afetados em transientes lentos que são típicos de circulação natural. Portanto, a violação de similaridade dos números de Biot e Stanton dentro de uma condição de escoamento líquido não deve causar maiores problemas exceto em casos de transientes de potência bruscos, que não é o caso deste estudo.

Da mesma maneira, a utilização do número de razão de tempos, que fornece uma medida da efetividade relativa na qual o sólido conduz e armazena energia térmica, torna-se irrelevante, pois não haverá combustível sólido no experimento gerando calor.

Assim, para simular completamente o escoamento em regime de circulação natural no núcleo do reator estudado serão utilizados os seguintes grupos de similaridade física:

- Número de Richardson
- Número de Fricção
- Número de fonte de calor

E em acréscimo a estes grupos serão utilizados os seguintes grupos de similaridade geométrica:

- Escala de comprimento térmico

$$L_h = \frac{l_h}{l_0} \quad (5.39)$$

- Escala de área de escoamento

$$A_i = \frac{a_i}{a_0} \quad (5.40)$$

- Profundidade de condução

$$\delta_i = \frac{d_i}{4} \left(\frac{a_s}{a} \right)_i \quad (5.41)$$

Portanto o experimento em estudo fica caracterizado por um conjunto de seis grupos adimensionais.

5.1.7 Formulação do problema de otimização

Um experimento termo-hidráulico similar ao protótipo do reator em estudo, pode ser dimensionado, segundo DA CUNHA et al. [2010], pela melhor combinação de parâmetros físicos e operacionais que conduzam a um conjunto de grupos adimensionais com valores mais próximo possíveis daqueles que caracterizam o protótipo. Ou seja, deve-se combinar parâmetros como *comprimento ativo das varetas*, *área da seção de escoamento*, *potência das placas combustíveis*, etc; de maneira que a diferença entre valores dos grupos adimensionais do modelo e do protótipo seja mínima.

Sabendo que estes parâmetros são concorrentes entre si, como evidenciado em LAPA et al. [2004], deve-se fazer um balanço ótimo destes grupos adimensionais, de forma que não seja penalizada a física mais relevante do problema.

Desta maneira o problema consiste em encontrar uma solução ótima, que maximize ou minimize uma função objetivo que represente o fenômeno em estudo, considerando o

fato importante de que a adequação de um parâmetro físico ou operacional às condições de similaridade pode levar à deterioração de outros parâmetros.

Para resolver este problema utilizou-se aqui o método de mínimos quadrados ponderado, conforme utilizado em DA CUNHA et al. [2010], da seguinte maneira: Sejam G_i os grupos dimensionais do protótipo (escala real) e \bar{G}_i os grupos dimensionais do modelo (escala reduzida) que visamos construir, e sejam ainda p_i e \bar{p}_i os parâmetros que compõem os grupos G_i e \bar{G}_i respectivamente, então a função a ser minimizada é:

$$f[\bar{G}_i(\bar{p}_i), G_i(p_i)] = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{G_i - \bar{G}_i}{G_i} \right)^2} \quad (5.42)$$

onde N é o número de de grupos dimensionais escolhidos para caracterizar o modelo em estudo, e os parâmetros \bar{p}_i serão os parâmetros de busca sujeitos a restrições que o algoritmo de Evolução Diferencial irá otimizar.

$$\bar{p}_i \text{ min} \leq \bar{p}_i < \bar{p}_i \text{ max} \quad (5.43)$$

Portanto o problema de otimização consiste em obter o valor de $x(\bar{p}_1, \bar{p}_2)$ que minimize a distância \mathbf{d} entre o valor referência do protótipo e o valor fornecido pelo código de Evolução Diferencial.

Capítulo 6

O algoritmo de Evolução Diferencial

O algoritmo de Evolução Diferencial é um código de otimização por busca estocástica que baseia-se no cálculo da diferença ponderada entre vetores solução (de valores reais) para encontrar uma solução ótima. Este algoritmo foi introduzido por Ken Price's e Rainer Storn em 1996 para ajustar o polinômio de Chebychev. Nesta ocasião Ken teve a ideia de gerar perturbações na população de vetores utilizando a diferença entre eles. Este algoritmo é detalhadamente explicado em PRICE and LAMPINEN [2005] e aqui mostraremos apenas os principais pontos desta técnica.

O DE (*Differential Evolution*) está incluído na categoria de algoritmos evolucionários, que segundo BERNARDES [2006] constituem uma família de métodos estocásticos de busca multi-objetivo ou mono-objetivo baseados no processo de evolução natural. Nesta mesma classe de algoritmos estão incluídos os algoritmos genéticos HOLLAND [1992] e o PSO (Particle Swarm Optimization) KENNEDY and EBERHART [1995], que já foram utilizados para resolver problemas similares em engenharia nuclear.

A utilização deste algoritmo neste trabalho justifica-se pelo fato de estarmos tratando um problema matemático (função) multidimensional de topologia desconhecida, que pode ser não-diferenciável, descontínuo, não-linear, com restrições e que pode ter vários mínimos locais. Este tipo de problema é muito difícil de ser resolvido analiticamente, desta maneira o DE pode ser aplicado para encontrar soluções aproximadas.

Problemas deste tipo podem ser formulados genericamente da seguinte maneira:

Seja uma função objetivo

$$f : X \subseteq R^D \rightarrow R \tag{6.1}$$

onde a região viável $X \neq \emptyset$,
o problema de minimização é encontrar

$$x^* \in X \text{ tal que } f(x^*) \leq f(x) \forall x \in X \quad (6.2)$$

onde

$$f(x^*) \neq -\infty \quad (6.3)$$

O procedimento geral de algoritmos evolucionários incluem os processos de **inicialização**, **mutação**, **recombinação** e **seleção**, conforme mostrado no esquema da figura 6.1.

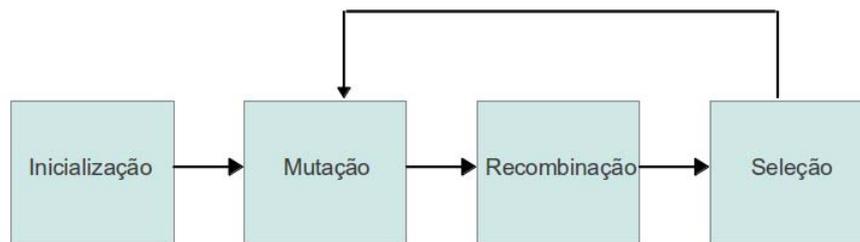


Figura 6.1: Procedimento geral de algoritmos evolucionários.

Inicialização

- Supondo que seja necessário otimizar uma função com \mathbf{D} parâmetros reais, deve-se estabelecer o tamanho da população \mathbf{N} , que não deverá ser menor do que 4, por motivos que veremos a frente.
- Os vetores de parâmetros terão o seguinte formato:

$$x_{i,G} = [x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, \dots, x_{D,i,G}] \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6.4)$$

onde G é o número de gerações.

- Neste processo de inicialização serão também estabelecidos os limites de busca para cada parâmetro;

$$x_j^L \leq x_{j,i,1} \leq x_j^U \quad (6.5)$$

- E posteriormente serão selecionados os valores iniciais de cada parâmetro randomicamente e de maneira uniforme nos intervalos de busca.

$$[x_j^L, x_j^U] \quad (6.6)$$

Mutação

- O processo de mutação serve para dar maior diversidade à população dos vetores soluções, evitando a convergência prematura do algoritmo para mínimos ou máximos globais, permitindo também que novas regiões do espaço sejam pesquisadas.
- Para um determinado vetor $x_{i,G}$ são selecionados três vetores $x_{r1,G}$, $x_{r2,G}$ e $x_{r3,G}$ de maneira que os índices i , $r1$, $r2$ e $r3$ sejam diferentes.
- Em seguida é somado ao terceiro vetor uma diferença ponderada entre os dois primeiros vetores $x_{r1,G}$ e $x_{r2,G}$.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (6.7)$$

Onde F é chamado *Fator de Mutação*, que pode ter qualquer valor maior que zero.

- O novo vetor $v_{i,G+1}$ encontrado é chamado de *vetor doador*, que contém características de cada um dos vetores $x_{r1,G}$ e $x_{r2,G}$.

A figura 6.2 mostra este processo de mutação em duas dimensões.

Recombinação

Após a mutação ocorre a recombinação, que visa incorporar à nova geração de vetores as soluções bem sucedidas das gerações anteriores.

- O vetor tentativa $u_{i,G+1}$ é construído de elementos do vetor alvo $x_{i,G}$ e elementos do vetor doador $v_{i,G+1}$.

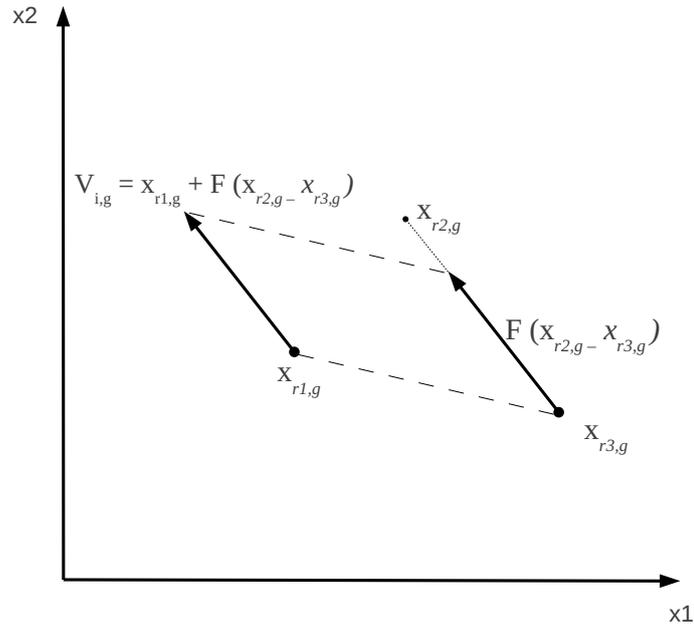


Figura 6.2: Gráfico do processo de mutação em duas dimensões.

- Sendo que os elementos do vetor doador entram no vetor tentativa com uma probabilidade **CR**.

$$u_{j,i,G+1} = \begin{cases} v_{j,i,G+1} & \text{se } \text{rand}_{i,j} \leq \text{CR} \text{ ou } j = I_{rand} \\ x_{j,i,G} & \text{se } \text{rand}_{i,j} > \text{CR} \text{ e } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (6.8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N ; j = 1, 2, \dots, D$$

- Sendo $\text{rand}_{i,j} \sim U[0, 1]$ e I_{rand} um número randômico inteiro entre $[1, 2, \dots, D]$.
- I_{rand} assegura que $v_{i,G+1} \neq x_{i,G}$

Seleção

- No processo de seleção, o vetor alvo $x_{i,G}$ é comparado ao vetor tentativa $v_{i,G+1}$ e aquele que fornecer o menor valor para a função objetivo (menor valor para a

distância \mathbf{d}) é admitido para a próxima geração.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \text{se } f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ \text{senão } & x_{i,G} \end{cases} \quad (6.9)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

Os processos de mutação, seleção e recombinação continuam até que um critério de parada seja atingido.

A figura 6.3 mostra um algoritmo de Evolução diferencial clássico.

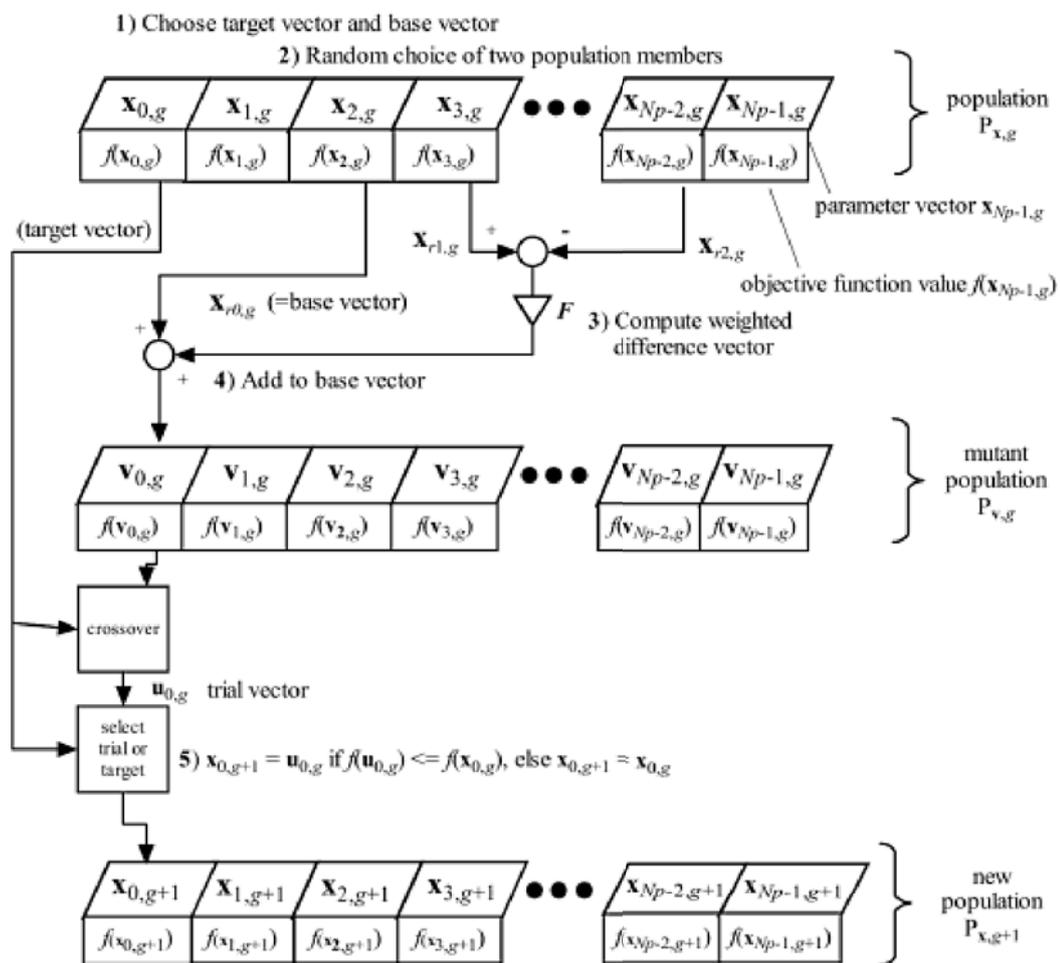


Figura 6.3: Representação gráfica (didática) para o algoritmo clássico de Evolução Diferencial. PRICE and LAMPINEN [2005]

6.1 Verificação do código

Após a implementação de um código de Evolução Diferencial clássico, foram realizados testes de busca com funções matemáticas conhecidas objetivando a verificação do código e a sua correta utilização. Para realizar esses testes foram utilizadas as funções de Himmelblau e Rosenbrock, que são amplamente usadas para testes de performance sobre algoritmos de otimização. A escolha destas funções não-convexas e multimodais é decorrente do fato de o problema abordado também possuir tais características, onde os métodos de otimização por cálculos de gradiente não é viável.

6.1.1 Função de Himmelblau

A função multi-modal de Himmelblau definida na equação 6.10 possui um ponto de máximo em $x = -0.270845$ e $y = -0.923039$ que leva a função ao valor $f(x, y) = 181.617$ e quatro pontos de mínimo idênticos onde a função assume o valor $f(x, y) = 0.0$. Seu gráfico em 3 dimensões é mostrado na figura 6.4

$$f(x, y) = (x^2 + y - 11)^2 + (x + y^2 - 7)^2 \quad (6.10)$$

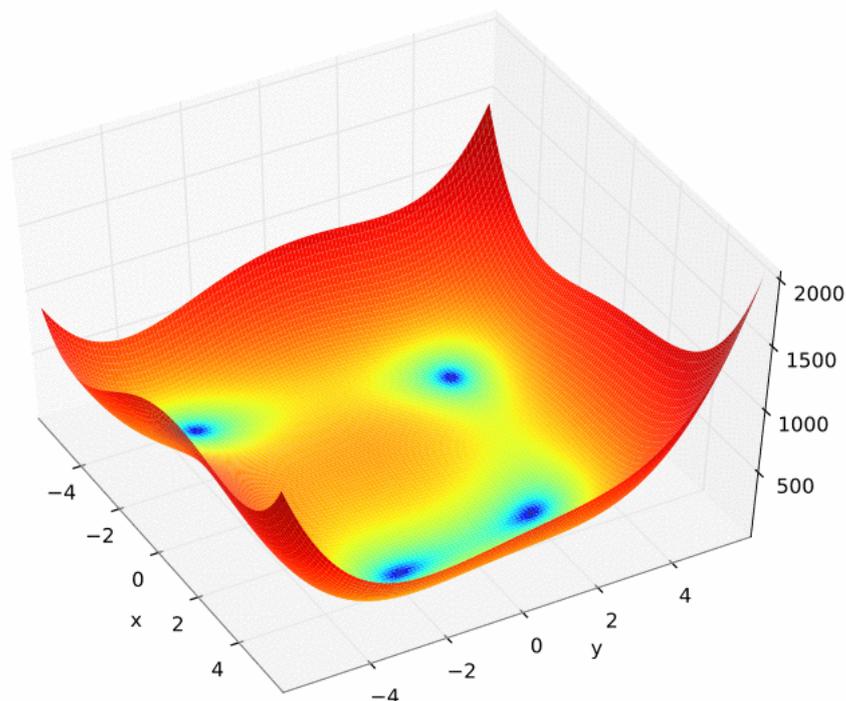


Figura 6.4: Função de Himmelblau em 3 dimensões.

Abaixo são apresentados os pontos de mínimo idênticos desta função.

- $f (3.0 , 2.0) = 0.0$
- $f (-2.805118 , 3.131312) = 0.0$
- $f (-3.779310 , -3.283186) = 0.0$
- $f (3.584428 , -1.848126) = 0.0$

A partir de considerações práticas apresentadas por especialistas STORN [2012], foram utilizados os seguintes parâmetros de ajuste para avaliar a função de Himmelblau:

- Fator de mutação = 0,9
- Fator de multiplicação = 0,8

Para esta função, o algoritmo foi executado 20 vezes a partir de sementes aleatórias e os quatro pontos de ótimo global foram encontrados em todas elas. A figura 6.5 mostra que a população converge para os pontos de mínimo mantendo também uma diversidade fenotípica, ou seja, não ocorre a convergência prematura para um mínimo local.

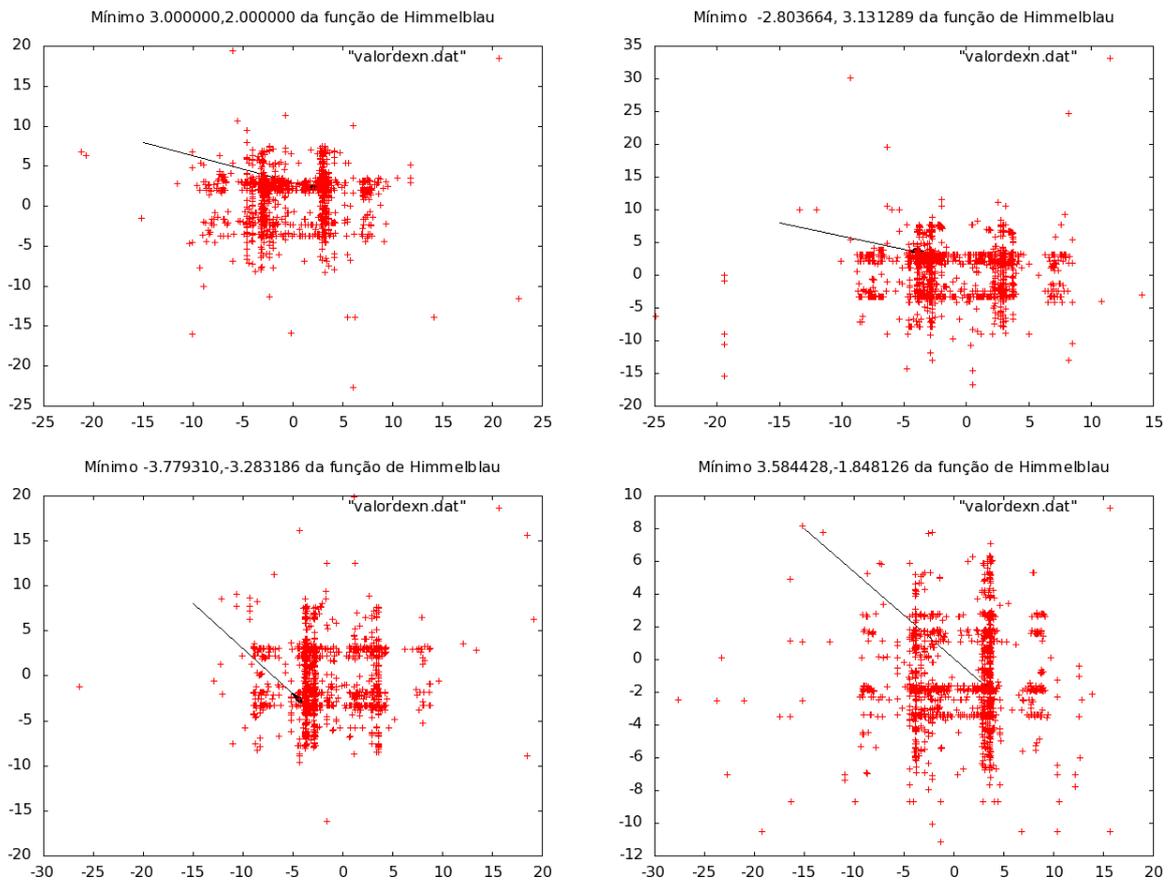


Figura 6.5: Busca dos pontos de mínimo da função de Himmelblau.

6.1.2 Função de Rosenbrock

A função de Rosenbrock é uma função do tipo não-convexa descrita por

$$f(x, y) = (1 - x)^2 + 100(y - x^2)^2 \quad (6.11)$$

e seu ponto de mínimo global, que leva a função ao valor 0.0, está localizado no ponto $(x, y) = (1, 1)$ dentro de um longo vale parabólico. A localização deste ponto de mínimo dificulta consideravelmente a convergência de algoritmos evolucionários. Esta função em duas dimensões é mostrada na figura 6.6.

Novamente o algoritmo implementado foi iniciado com sementes aleatórias e os mesmos fatores de mutação e multiplicação anteriores. Na figura 6.7 é mostrada a evolução da população que se aproxima do ponto (1,1) encontrado pelo código DE. Este exato valor foi encontrado nas 20 simulações realizadas.

A função de Rosenbrock também pode ser generalizada para um número N de dimen-

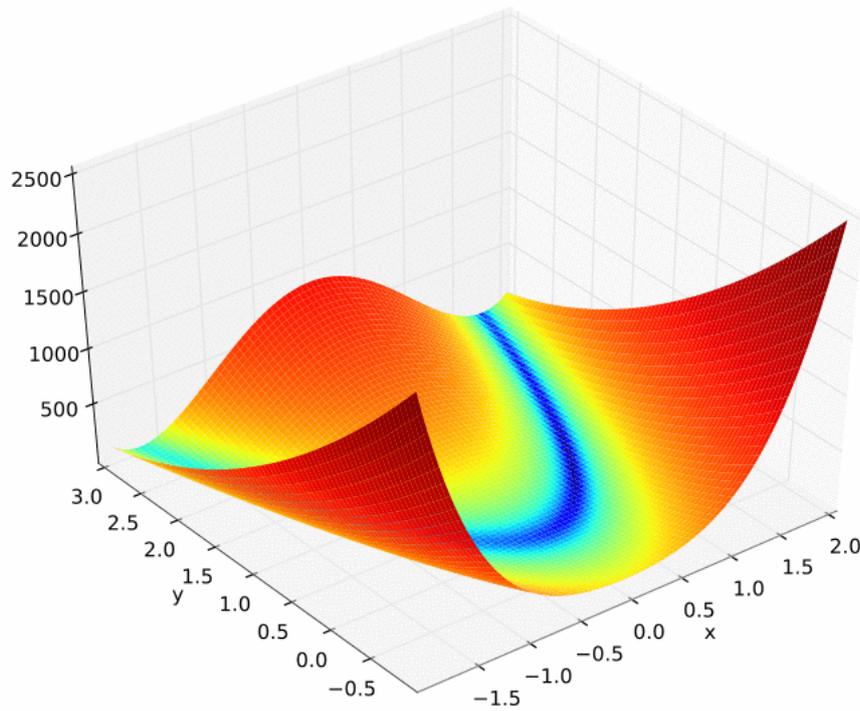


Figura 6.6: Função de Rosenbrock em 3 dimensões.

sões, conforme mostrado na equação 6.12.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [(1 - x_i)^2 + 100(x_{i+1} - x_i^2)^2] \quad \forall x \in R^N \quad (6.12)$$

E visando a aplicação do algoritmo DE no problema de otimização da seção de testes similar ao protótipo do RMB, avaliamos a função de Rosenbrock para N entre 1 e 15 de maneira progressiva.

Estes testes de avaliação com muitos parâmetros de busca é muito importante, pois o problema de otimização a ser resolvido envolve 7 parâmetros de busca que serão mostrados adiante.

Nesses testes verificou-se que o algoritmo convergiu para o conjunto de soluções exatas que minimizam a função. Foi possível ainda verificar que nesta configuração o algoritmo não convergiu prematuramente em nenhuma das simulações. Desta maneira o algoritmo mostrou possuir as características desejadas para solucionar o problema de otimização proposto.

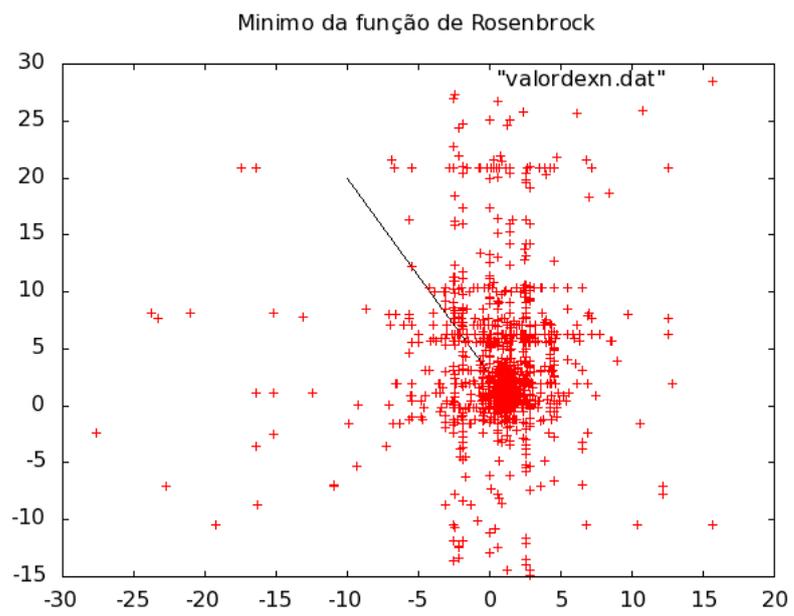


Figura 6.7: Busca do ponto de mínimo da função de Rosenbrock.

Capítulo 7

Aplicação do algoritmo DE na otimização do problema de similaridade

7.1 Avaliação de consistência sobre o problema proposto

Neste capítulo será mostrada a aplicação do algoritmo de evolução diferencial na solução do problema teste que busca a similaridade para um sistema termo-hidráulico em circulação natural.

Neste trabalho não serão apresentadas dimensões para um modelo em escala reduzida do núcleo do reator protótipo, esta busca e consequente análise virá em trabalho posterior, busca-se aqui apenas uma qualificação da metodologia desenvolvida através de um teste de consistência (capacidade de encontrar o ótimo global sistematicamente) e robustez (capacidade de encontrar boas soluções, ainda que não sejam as ótimas).

Conforme estabelecido no capítulo 6, o protótipo estudado fica caracterizado por um conjunto de seis grupos adimensionais que são mostrados abaixo. Os grupos adimensionais padrões G_i são calculados com base nas informações da geometria do protótipo e dados obtidos das simulações CFD apresentadas no capítulo 5.

É aqui nesta etapa em que as simulações computacionais em CFD tornam-se fundamentais nesta metodologia, fornecendo os dados necessários para alimentar o modelo

físico (Capítulo 6) implementado no código DE.

Como foi mostrado pela teoria, não é possível a obtenção da distribuição de velocidades de maneira independente dos valores de temperatura. Estes campos estão acoplados conforme mostrado na equação 5.32 da velocidade em regime de circulação natural. Por conseguinte, esta equação de velocidade é função do número de fricção 5.22, que depende do fator de atrito f .

Existem algumas relações empíricas para obtenção deste fator de atrito, mas para um regime de escoamento monofásico laminar como este estudado, o fator de atrito é função apenas do número de Reynolds, como mostrado na equação 7.1.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (7.1)$$

Disto verifica-se que temos a velocidade dependente da própria velocidade. E para resolver este problema tornou-se necessário estimar por CFD um valor inicial para velocidade deste escoamento, que é corrigido posteriormente pelas equações que descrevem o problema. Os cálculos dos grupos adimensionais que caracterizam o protótipo foram realizados na potência $Q = 2,5 \text{ W/m}^3$, quando o transiente torna-se mais suave.

Foram criadas funções em linguagem C++ para realizar o cálculo automático dos grupos adimensionais padrões, permitindo que o algoritmo DE utilize a cada iteração essas mesmas funções. Com isso, o método de cálculo utilizado para a otimização e busca do modelo é o mesmo utilizado para a definição do protótipo.

- Número de Richardson

$$R = \frac{g\beta\Delta T_0 l_0}{u_0^2} = \frac{\text{empuxo}}{\text{força de inércia}} \quad (7.2)$$

- Número de Fricção

$$F_i = \left(\frac{fl}{d} + K \right)_i = \frac{\text{fricção}}{\text{força de inércia}} \quad (7.3)$$

- Número Fonte de calor

$$Q_{si} = \left(\frac{q_s l_0}{\rho_s C_{ps} u_0 \Delta T_0} \right)_i = \frac{\text{calor da fonte quente}}{\text{variação na energia axial}} \quad (7.4)$$

- Escala de comprimento térmico

$$L_i = \frac{l_i}{l_0}, \quad \left(L_h = \frac{l_h}{l_0} \right) \quad (7.5)$$

- Escala de área de escoamento

$$A_i = \frac{a_i}{a_0} \quad (7.6)$$

- Profundidade de Condução

$$\delta_i = \frac{a_{si}}{\xi_i} \quad (7.7)$$

A tabela 7.1 mostra os parâmetros operacionais e geométricos utilizados para o cálculo dos grupos adimensionais G_i que caracterizam o protótipo em escala real.

Dados físicos e operacionais	Especificação
v_0	Velocidade à entrada do núcleo
ρ_0	Densidade à entrada do núcleo
q_0	Potência da placa combustível
T_0	Temperatura à entrada do núcleo
A	Área de escoamento
μ_0	Viscosidade à entrada
d	Diâmetro Hidráulico
l_0	Comprimento ativo das placas
C_p	Calor específico à pressão constante

Tabela 7.1: Dados necessários para cálculo dos grupos adimensionais.

Como principal objeto de estudo, o núcleo do reator mostrado no capítulo 2, seria constituído por um total de 567 placas combustíveis distribuídas em 27 elementos combustíveis. A figura 7.1 mostra a configuração de um elemento combustível com seus 20 canais de escoamentos.

Considerando o modelo de núcleo descrito, refrigerado por um escoamento em regime de circulação natural, foram escolhidos como parâmetros de busca, aquelas variáveis físicas que são suficientes para calcular todos os números adimensionais referentes ao problema. Estes parâmetros estão especificados na tabela 7.2.

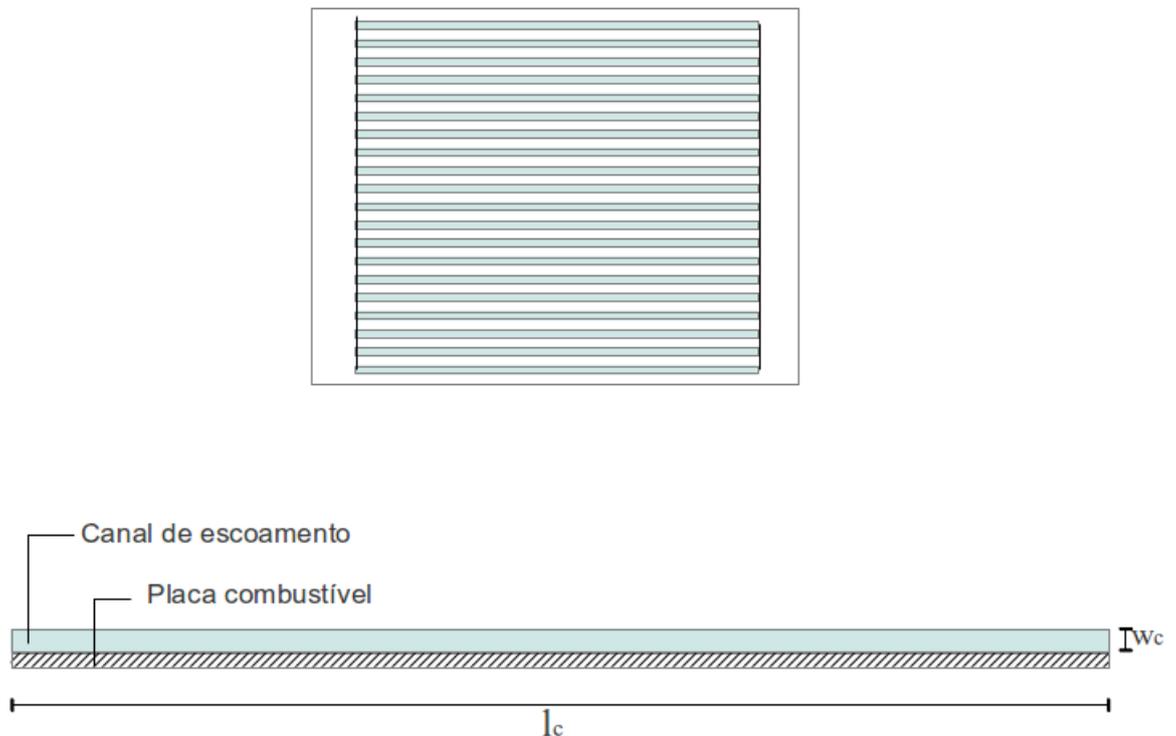


Figura 7.1: Esquema de um elemento combustível do núcleo.

Na tabela 7.3 são mostrados os valores dos parâmetros de projeto e dos grupos adimensionais que caracterizam o protótipo.

7.1.1 Teste de consistência do código DE

Antes de utilizar o algoritmo de evolução diferencial para encontrar um modelo em escala similar ao protótipo em estudo, é necessário verificar se este código é consistente. Isto significa verificar se ele é capaz de convergir sempre para a região onde encontra-se a solução ótima para o problema.

Para realizar esta verificação foram realizadas simulações dentro de um espaço de busca limitado que contém o ótimo global. Para isto foram fixados o número de placas e elementos combustíveis, e os demais parâmetros tiveram seus limites de busca limitados em 50% em torno dos valores do protótipo. Estes limites são mostrados na tabela 7.4.

Depois de limitado o espaço de busca do problema, foi realizada uma análise estatística básica sobre os parâmetros de ajuste do DE, para que fosse encontrada a melhor

Parâmetros de busca	Especificação
n	Número de elementos combustíveis
N	Número de placas combustíveis
l_0	Comprimento ativos das placas combustíveis
l_h	Altura entre os centro térmicos
l_c	Largura das placas combustíveis
w_c	Espessura das placas combustíveis
q_0	Potência de uma placa combustível

Tabela 7.2: Parâmetros de busca estabelecidos para o problema.

Parâmetros de projeto e números adimensionais	Protótipo
l_h (m)	7,0
l_c (m)	0,08
l_0 (m)	0,8
w_c (m)	0,00245
q_0 (W)	441,0
R	0,0305949
F	0,53541
Q	1,19392
L_h	8,75
A_i	1,00
δ_i	0,0113

Tabela 7.3: Parâmetros e grupos adimensionais referentes ao protótipo.

configuração de parâmetros do algoritmo para a solução deste tipo de problema.

Para isto, foi fixada a população no valor de 50, que corresponde a 10 vezes a quantidade de parâmetros de busca; o número de gerações foi limitado em 15000, e o fator de multiplicação fixado em 0.1. Esta configuração foi fixada após a realização de vários testes, onde foi verificado que para valores de F (fator de multiplicação) maiores que 0.1, as soluções encontradas distanciam-se muito da solução padrão. E com esta configuração foram testados valores diferentes para o fator de cruzamento Cr entre 0.1 e 0.9 com variação de 0.1.

Foi estabelecido o critério de aceitação de 10% de erro em torno de cada valor dos parâmetros do projeto real. Portanto, se todos os valores de parâmetros sugeridos pelo DE se encontrarem dentro deste critério de proximidade, então será admitido que a solução

Variáveis de busca	Mínimo	Máximo
l_h (m)	3,5	10,5
l_0 (m)	0,4	1,2
l_c (m)	0,04	0,12
w_c (m)	0,0012	0,0037
q_0 (W)	220,5	661,5

Tabela 7.4: Intervalo de busca para os parâmetros de projeto.

está em torno do ótimo global.

Para estas configurações foram encontrados os resultados apresentados na tabela 7.5.

F (fator de multiplicação)	Cr (fator de cruzamento)	n° de simulações	Erro < 10%
0,1	0,1	1000	32,0%
0,1	0,2	100	18,0%
0,1	0,3	100	9,0%
0,1	0,4	100	10,0%
0,1	0,5	1000	18,0%
0,1	0,6	100	16,0%
0,1	0,7	100	6,0%
0,1	0,8	100	13,0%
0,1	0,9	100	2,0%

Tabela 7.5: Análise preliminar dos parâmetros F e Cr do algoritmo DE.

A partir dos valores mostrados na tabela 7.5, verificou-se que a primeira configuração ($F = 0.1$, $Cr = 0.1$) atingiu consistentemente o ótimo global em 32% das simulações, e as demais configurações atingiram este ótimo em menos de 20% das vezes.

De um total de 1000 simulações levadas a efeito com a primeira configuração, que se mostrou mais adequada a esta classe de problemas, foram selecionados os 3 melhores resultados representados pelos menores valores correspondentes à função objetivo. A tabela 7.6 mostra os valores obtidos nestas 3 soluções.

Estes resultados mostram que as três melhores soluções apresentaram erro menor que 0,5% para todos os parâmetros de busca.

Parâmetro de busca	Projeto padrão	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
l_h (m)	7,00000e+00	6,999999e+00	6,998293e+00	7,000000e+00
l_c (m)	8,000000e-2	8,000000e-2	7,999900e-2	8,000000e-2
l_0 (m)	8,000000e-1	8,000000e-1	7,99811e-1	8,000000e-1
w_c (m)	2,450000e-3	2,450000e-3	2,450000e-3	2,450000e-3
q_0 (W)	441	441,6929	439,4023	441,3062

Tabela 7.6: Parâmetros de projeto obtidos pelas melhores simulações.

Capítulo 8

Conclusões e considerações

8.1 Conclusão

Os estudos realizados neste trabalho mostraram uma possível viabilidade da metodologia proposta para projetar experimentos termo-hidráulicos em escala reduzida em regime de circulação natural. Esta metodologia também vêm colaborar para a construção e desenvolvimento de experimentos mais eficientes e econômicos. Mais especificamente, a sua utilização poderá ajudar no desenvolvimento e construção de seções de teste em escala, que tenham comportamento dinâmico o mais similar possível com relação ao protótipo.

As simulações em fluido-dinâmica computacional permitiram obter informações importantes sobre a dinâmica de escoamento na piscina do reator. Estas informações antes desconhecidas, puderam ser avaliadas e utilizadas para resolver o problema de similaridade. Através delas também foi possível verificar que num período de 12 horas há um aumento de apenas $10C$ na temperatura do fluido dentro do núcleo e no inventário da piscina, mostrando que não há riscos à integridade do revestimento do combustível e à segurança da instalação.

Ainda nas simulações em CFD, foi possível avaliar a vazão no núcleo e utilizar esta informação como dado de entrada para o cálculo de similaridade.

A partir das simulações realizadas, o algoritmo de Evolução Diferencial mostra-se como uma possível ferramenta a ser utilizada para o problema de otimização abordado. Ainda com o estudo preliminar realizado verifica-se que a sua correta utilização e calibração permite obter resultados dentro dos limites esperados, como foi mostrado no teste de consistência do capítulo 7. Considerando a análise realizada sobre os parâmetros de

ajuste, verifica-se que estudos mais aprofundados sobre a consistência e robustez deste algoritmo devem ser realizados antes que uma efetiva busca de parâmetros em escala reduzida seja feita.

Considerando o desempenho do algoritmo DE neste trabalho, e as simulações CFD desenvolvidas, verifica-se que esta associação de técnicas na solução de problemas de similaridade pode trazer grandes benefícios práticos no projeto de instalações nucleares.

Pelas razões apresentadas, este trabalho têm relevante importância acadêmica e prática, fornecendo meios de construir uma instalação de testes em escala que poderá ser utilizada para estudos preliminares para projeto de reatores.

Perspectivas Futuras

Visando complementar esta metodologia e verificar a sua completa eficiência e aplicabilidade, pretende-se dimensionar com esta técnica, uma instalação de testes em escala reduzida similar ao núcleo do reator de pesquisa a ser construído no Brasil. E isto implica em estabelecer restrições aos parâmetros de busca, de maneira que sejam respeitados os limites operacionais existentes no local da instalação.

Deseja-se posteriormente, simular computacionalmente através de CFD este modelo em escala reduzida que seria obtido e verificar o grau de similaridade alcançado e a relativa importância e afetação de cada grupo adimensional utilizado.

Visando aprofundar futuros estudos semelhantes ou correlatos, torna-se interessante realizar o refinamento das simulações em CFD, principalmente no tangente ao tempo de transiente e perda de calor para o meio ambiente. Esta metodologia apresentada deve ainda ser testada para experimentos termo-hidráulicos com circuitos fechados e com diversas seções e componentes para efetivar a sua eficácia.

Bibliografia

- ANSTO. Summary of the Preliminary Safety Analysis Report (PSAR) for the ANSTO Replacement Research Reactor Facility. Technical report, ANSTO, 2001.
- R.O. BERNARDES. Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério. Master's thesis, Escola de Engenharia /UFMG, 2006.
- J. DA CUNHA, C.M.F. LAPA, A.C.M. ALVIM, Jr. C.A.S. LIMA, and C.M.N.A. PEREIRA. Basic investigation of particle swarm optimization performance in a reduced scale PWR passive safety system design. *Nuclear Engineering and Design*, 240:489–499, 2010.
- G. de V. DAVIS and I.P. JONES. Natural Convection in a Square Cavity: A Comparison Exercise. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 3:227–248, 1983.
- P.A.B. DE SAMPAIO. A stabilized finite element method for incompressible flow and heat transfer: A natural derivation based on the use of local time-steps. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195:6177–6190, 2006.
- J.H. HOLLAND. Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267:66–72, 1992.
- M. HORTMAN, M. PERIĆ, and G. SCHEUERER. Finite Volume Multigrid Prediction of Laminar Natural Convection: Bench-Mark Solutions. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 11:189–207, 1990.
- M. ISHII and I. KATAOKA. Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two-phase natural circulation. *Nuclear Engineering and Design*, 81: 411–425, 1984.

- J. KENNEDY and R. EBERHART. Particle Swarm Optimization. *International Conference on Neural Networks*, 4:1942–1948, 1995.
- C.M.F. LAPA, P.A.B. DE SAMPAIO, and C.M.N.A. PEREIRA. A new approach to designing reduced scale thermal-hydraulic experiments. *Nuclear Engineering and Design*, 229:205–212, 2004.
- NEA-CSNI. Assessment of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Problems. Technical report, Nuclear Energy Agency, 2008.
- C.M.N.A. PEREIRA, R. SCHIRRU, and A.S. MARTINEZ. Basic investigations related to genetic algorithms in core designs. *Annals of Nuclear Energy*, 26:173–193, 1998.
- P.A. PERROTTA. Status of Research Reactor Utilization in Brazil. Technical report, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2010.
- K.S.R. PRICE and J. LAMPINEN. *Differential Evolution - A practical Approach to Global Optimization*. Springer, 2005.
- STORN. Differential evolution, January 2012. URL <http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html#deb1>.
- N. E. TODREAS and M.S. KAZIMI. *Nuclear Systems I - Thermal Hydraulic Fundamentals*. Taylor & Francis, 1993.