



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Análise Numérica da Dinâmica do Escoamento em Circuitos de Circulação  
Natural**

**Gabriel Angelo**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia  
Nuclear - Reatores**

**Orientador:  
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo  
2013**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**Análise Numérica da Dinâmica do Escoamento em Circuitos de Circulação  
Natural**

**Gabriel Angelo**

**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia  
Nuclear - Reatores**

**Orientador:  
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**Versão Corrigida**  
**Versão Original se encontra disponível no IPEN**

**São Paulo**  
**2013**

*Dedicado aos meus pais Luiz e Geni. Por seu amor, dedicação e doação,  
a minha amada esposa Karina. Por sua compreensão e carinho, e a meus queridos filhos  
Luiz e Miguel.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer àquele cuja Majestade, Glória, Soberania, Fidelidade, Benevolência, Graça e Misericórdia são infinitas, Àquele sem o qual nada seria possível, Deus.

Ao Prof. Delvonei Alves de Andrade, orientador desta tese, exemplo de pesquisador e professor, com o qual passei muitos momentos aprendendo, discutindo e crescendo profissionalmente.

Aos meus pais, a quem amo muito, cujo incentivo e apoio foram decisivos para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu irmão, um exemplo de vida, um companheiro e um conselheiro nos momentos de dificuldade.

À minha querida esposa Karina, sempre paciente e compreensiva.

Ao Prof. Miguel Mattar Neto, um valioso colaborador, alguém de grande capacidade e visão. Sem os recursos fornecidos por ele a realização deste trabalho não seria possível.

Ao pesquisador Pedro Ernesto Umbehaun, uma fonte de boas ideias e sugestões.

Aos meus amigos Douglas Borges Domingos, Luís Felipe Liambos Mura, Rafael Oliveira Rondon Muniz, Pedro Carlos Russo Rossi e Thiago Carluccio, sempre dispostos a ajudar, a estes devo os incontáveis auxílios no LINUX e LATEX.

Agradeço ao Prof. Walmir Maximo Torres pelas informações fornecidas do seu trabalho experimental que contribuíram para desenvolvimento do presente estudo.

*“Mas a sabedoria que do alto vem é, primeiramente pura, depois pacífica, moderada, tratável, cheia de misericórdia e de bons frutos, sem parcialidade, e sem hipocrisia. Ora, o fruto da justiça semeia-se na paz, para os que exercitam a paz.”*

Tiago 3:17-18

*“Então Deus disse a Salomão: Porquanto houve isto no teu coração, e não pediste riquezas, bens, ou honra, nem a morte dos que te odeiam, nem tampouco pediste muitos dias de vida, mas pediste para ti sabedoria e conhecimento, para poderes julgar a meu povo, sobre o qual te constituí rei,”*

2º Crônicas 1:11

# Resumo

Circuitos de convecção natural ou sistemas de circulação natural são empregados em diversas áreas da engenharia. Reatores nucleares refrigerados a água utilizam circuitos de circulação natural como método passivo de segurança. Em situações críticas, sem qualquer controle externo, o sistema permanece em segurança por suas próprias características de funcionamento (intrinsecamente seguro). O trabalho proposto consiste em estudar numericamente o circuito de circulação natural de água, localizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares / Comissão Nacional de Energia Nuclear em São Paulo, por meio do uso de modelos matemáticos, objetivando determinar o padrão do escoamento em condições sem mudança de fase líquido-vapor. A comparação dos resultados de temperatura obtidos por cada um dos modelos de turbulência aos pontos instrumentados no circuito experimental, na condição transitória, revelou desvios significativos nas respostas do modelo de zero equação. Desvios intermediários foram observados nos modelos de transporte da viscosidade turbulenta (EVTE),  $k - \omega$ , SST e SSG e resultados melhores foram verificados nos modelos  $k - \varepsilon$  e DES (com significativa superioridade do primeiro modelo).

# Abstract

Natural circulation loops apply to many engineering applications such as: water heating solar energy system (thermo-siphons), thermal management of electrical components (voltage converter), geothermal energy, nuclear reactors, etc. In pressurized water nuclear reactors, known as PWR's, the natural circulation loops are employed to ensure passive safety. In critical situations, the heat transfer will occur only by natural convection, without any external control or mechanical devices. This feature is desired and has been considered in modern nuclear reactor projects. This work consists of a numerical study of the natural circulation loop, located at the Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares / Comissão Nacional de Energia Nuclear in São Paulo, Brazil, in order to establish the flow pattern in single phase conditions. The comparison of numerical results to experiments in transient condition revealed significant deviations for the Zero Equation turbulence model. Intermediate deviations for the Eddy Viscosity Turbulence Equation (EVTE),  $k - \omega$ , SST e SSG models. And the best results are obtained by the  $k - \varepsilon$  e DES models (with better results for the  $k - \varepsilon$  model).

## Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática de placa plana aquecida em convecção natural, com indicação ilustrativa dos perfis de velocidade e temperatura . . . . .	21
1.2	Representação esquemática de um circuito fechado de circulação natural . . . . .	22
1.3	a) Desenho esquemático de um termo-sifão, b) Ilustração de um projeto de geração de energia geotérmica (Revkin, 2007) e c) (Modificado pelo autor) Esboço de um reator nuclear do tipo Lead-Cooled Fast Reactor (Ingersoll, 2009) . . . . .	23
1.4	(Modificado pelo autor) Padrões de escoamento bifásicos para uma coluna de líquido submetido a um fluxo de calor constante (Brennen, 2005) . . . . .	24
1.5	(Modificado pelo autor) Dados experimentais realizado no circuito de circulação natural DANTON, localizado na Dresden University of Technology a uma potência de 10kW (Schuster et al., 2000) . . . . .	25
1.6	Desenho esquemático do circuito de circulação natural e indicação dos principais elementos. . . . .	27
1.7	(Modificado pelo autor) Circuito de circulação natural toroidal (Lavine et al., 1986) . . . . .	32
1.8	(Modificado pelo autor) Desenho esquemático do circuito de circulação natural de Huang e Zelaya (1988), todas as dimensões em milímetros . . . . .	33
1.9	a) (Modificado pelo autor) Desenho esquemático do circuito (Bernier e Baliga, 1992), todas as dimensões em milímetros e b) (Modificado pelo autor) Variação axial de temperatura na região de aquecimento: comparação entre resultados numéricos e experimentais (Bernier e Baliga, 1992) . . . . .	35



1.10	(Modificado pelo autor) Regime permanente para diversos circuitos de circulação natural que possuem diâmetro de tubulação constante ou variável (Vijayan, 2002) . . . . .	37
1.11	a)(Modificado pelo autor) Sistema de coordenadas e geometria (Desrayaud et al., 2006) e b) (Modificado pelo autor) Resultado obtido para condição em regime permanente para $Ra = 12000$ , $r_e/r_i = 2,0$ , $Pr = 5$ : (i) função de corrente ; (ii) linhas isotérmicas ; (iii) distribuição de velocidade axial (Desrayaud et al., 2006) . . . . .	40
1.12	a) (Modificado pelo autor) Desenho esquemático do circuito (dimensões em milímetros) (Misale et al., 2007) e b) (modificado pelo autor) fotografia da bancada de testes experimentais (Misale et al., 2007) . . . . .	40
1.13	(Modificado pelo autor) Análise dos resultados para regime permanente (Misale et al., 2007) . . . . .	41
2.1	Diagrama esquemático indicando dimensões principais do circuito e posições dos termopares [desenho sem escala] . . . . .	45
2.2	a) Dimensões e nomenclaturas para a região do aquecedor e b) Dimensões principais para a região do trocador de calor (todas as dimensões em milímetros)	46
2.3	Detalhe esquemático da posição dos termopares centrais . . . . .	48
2.4	Válvula borboleta NIBCO LC2000 1 <sup>1/2</sup> " . . . . .	49
2.5	Ilustração esquemática do desvio horizontal . . . . .	49
2.6	Medidas experimentais de temperatura para o termopar T12 . . . . .	50
2.7	Medidas experimentais de temperatura para o termopar T14 . . . . .	51
2.8	Medidas experimentais de temperatura para o termopar T16 . . . . .	51
2.9	Medidas experimentais de temperatura para o termopar T18 . . . . .	52
2.10	Distribuição inicial de temperaturas no circuito . . . . .	54
2.11	Distribuição espacial dos termopares, todas as dimensões em milímetros . .	55
2.12	Média das temperaturas iniciais do circuito e desvio padrão . . . . .	56
2.13	Média da temperatura em função do tempo para o termopar T12 e desvio padrão . . . . .	57
3.1	Variação da densidade da água em função da temperatura para pressão hidrostática média constante . . . . .	59

3.2	Detalhe de simplificação geométrica . . . . .	76
3.3	Pontos selecionados para verificação da dependência da malha em função dos sucessivos refinamentos (coordenadas indicadas em milímetros) . . . . .	77
3.4	Verificação da dependência dos resultados em função da discretização espacial para região que possui elementos do tipo tetraédricos . . . . .	79
3.5	Verificação da dependência dos resultados em função da discretização espacial para região que possui elementos do tipo hexaédricos . . . . .	80
3.6	Funções de parede para escoamento totalmente desenvolvido e turbulento (White, 1991) . . . . .	81
3.7	Desenho esquemático da discretização nas proximidades da parede . . . . .	82
3.8	Número de Prandtl em função do número de Grashof para modelo bidimensional de placa plana vertical sujeita à convecção natural . . . . .	83
3.9	Primeira verificação para determinação de passo temporal, para pontos $A_t$ e $B_t$ monitorados. Número de Courant igual a dez (potência nominal do aquecedor 1000W) . . . . .	85
3.10	Velocidade média temporal no ponto $A_t$ (-25mm; -450 mm; -736mm) para diversos valores de número de Courant (potência nominal do aquecedor 1000W) . . . . .	86
3.11	Velocidade média temporal no ponto $B_t$ (-10,3mm; -450 mm; -750mm) para diversos valores de número de Courant (potência nominal do aquecedor 1000W) . . . . .	86
3.12	Representação esquemática das condições de contorno impostas nas simulações numéricas do circuito de circulação natural . . . . .	89
4.1	Diagrama esquemático indicativo das dimensões principais do circuito e posições dos termopares [desenho sem escala] . . . . .	92
4.2	Variação da temperatura com o tempo para a posição (0; 85; 1300). (a) experimento, modelo ZE, modelo EVTE, (b) experimento, modelo $k - \varepsilon$ , $k - \omega$ , SST e (c) experimento, modelo SSG, modelo DES . . . . .	93

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

