

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO
ESCOAMENTO INTERNO EM UM COLETOR SOLAR PLANO**

Renato Cardoso de Menezes

BELO HORIZONTE

2008

Renato Cardoso de Menezes

**ANALISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO
ESCOAMENTO INTERNO EM UM COLETOR SOLAR PLANO**

*Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Pontifícia Universidade Católica de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.*

Orientadora: Elizabeth Marques Duarte Pereira.

Co-orientador: Rudolf Huebner.

BELO HORIZONTE

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

M543a Menezes, Renato Cardoso de
Análise numérica e experimental do escoamento interno em um coletor solar plano /
Renato Cardoso de Menezes. Belo Horizonte, 2010.
110f. : il.

Orientadora: Elizabeth Marques Duarte Pereira
Co-orientador: Rudolf Huebner
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Coletores solares. 2. Escoamento. 3. Métodos de simulação. 4. CFX (Programa de computador). I. Pereira, Elizabeth Marques Duarte. II. Huebner, Rudolf. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 620.91

Renato Cardoso de Menezes

Análise numérica e experimental do escoamento interno em um coletor solar plano

*Trabalho apresentado à disciplina Engenharia
Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de
Minas Gerais.*

Dr. Elizabeth Marques Duarte Pereira (Orientadora) - PUC Minas

Dr. Rudolf Huebner (Co-Orientador) – UFMG

Dr. Sérgio de Moraes Hanriot - PUC Minas

Dr. Cristiana Brasil Maia - PUC Minas

Dr. Wanyr Romero Ferreira - UNA

Belo Horizonte, 20 de outubro de 2008.

Agradeço o apoio dos meus irmãos, meus pais Djalma e Elizabeth, minhas tias e meus amigos, minha orientadora Elizabeth Marques, meu co-orientador Rudolf Huebner e a minha esposa Carolina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela oportunidade, ao CNPq pelo apoio financeiro, ao Grupo de Estudos em Energia (GREEN) e aos meus professores que me apontaram o caminho certo a seguir.

RESUMO

Os textos clássicos que apresentam a modelagem dos processos de transferência de calor em um coletor solar plano consideram como premissa a uniformidade da vazão do fluido de trabalho em seus respectivos tubos de elevação. Este estudo é uma contribuição para a análise detalhada dos mecanismos de troca de calor em um coletor solar incluindo-se os efeitos da não-uniformidade da vazão e sua influência sobre a eficiência térmica dos coletores solares. A abordagem desenvolvida pode ser dividida em duas fases. Na primeira etapa, a modelagem matemática foi realizada considerando-se o processo de escoamento isotérmico para avaliação em separado da influência da perda de carga sobre a distribuição da vazão nos tubos de elevação do coletor solar. A rotina foi implantada no programa CFX-11, gerando um perfil crescente para a vazão ao longo de sua dimensão x . Tais resultados corroboraram estudos desenvolvidos por Jones e Lior, enquanto os modelos analíticos, propostos por Kikas e Hardy-Cross, propunham perfis de escoamento simétricos. Na segunda etapa deste trabalho, a rotina elaborada incluiu os efeitos da transferência de calor, decorrente da incidência da radiação solar. Os resultados demonstraram que os efeitos da perda de carga são mais significativos sobre o perfil de escoamento do que os efeitos decorrentes da transferência de calor. Estes resultados foram comparados com os estudos realizados por Weitbrecht et al. e com valores experimentais obtidos em testes realizados no Simulador Solar do Laboratório GREEN da PUC Minas, apresentando boa concordância. Os resultados deste trabalho demonstram a necessidade de se extrapolar o estudo para baterias de coletores solares em associação série-paralelo.

Palavras-chave: Coletor Solar Plano, Uniformidade de Escoamento, Simulação Numérica, CFX.

ABSTRACT

The classic texts that present the modeling of the processes of heat transfer in a flat-plate solar collector consider the assumption of the uniformity of the flow of working fluid in their respective risers. This study is a contribution to the detailed analysis of the mechanisms of heat transfer in a solar collector including the effects of non-uniform flow and its effects on the thermal efficiency of solar collectors. The approach can be divided into two phases. In the first stage, the mathematical modeling was carried out considering the process of isothermal flow to evaluate separately the influence of pressure loss on the flow distribution in the risers. The routine was implemented in the program CFX-11, generating an increasing profile of the flow over its coordinate $-x$. These results corroborate the studies developed by Jones and Lior, while the analytical models proposed by Kikas and Hardy-Cross, proposed symmetrical flow profiles. In the second stage of this work, the routine developed included the effects of heat transfer, due to solar radiation. The results showed that the effects of pressure loss are more significant on the flow profile than the effects due to heat transfer. These were compared with studies carried out by Weitbrecht et al. and with experimental values obtained in tests performed in Solar Simulation in the Laboratory GREEN in PUC Minas, which showed a good agreement. The results demonstrate the need to extrapolate the study of batteries of solar collectors in series-parallel association.

Keywords: Flat-plate Solar Collector, uniform flow, Numerical Simulation, CFX.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Produção de Energia por Fonte Primária no Brasil.....	17
Figura 2: Consumo de eletricidade no setor residencial.....	18
Figura 3: Elementos de um coletor solar de placa plana	22
Figura 4: Vista em perspectiva de uma Instalação de Termosifão	24
Figura 5: Circulação Forçada.....	24
Figura 6: Configuração de Coletores.....	25
Figura 7: Coletores conectados em paralelo e em série.....	26
Figura 8: Distribuição de fluxo nos tubos de elevação de um coletor tipo “Z”, obtido experimentalmente.....	30
Figura 9: Distribuição de fluxo nos tubos de elevação de um coletor tipo “Z”, analisado numericamente.....	31
Figura 10: Esquema de distribuição de fluxo de acordo com diferentes autores.	32
Figura 11: Coletor solar tipo “Z”	33
Figura 12: Exemplo de uma malha calculada pelo método de Hardy Cross	36
Figura 13: Modelo de um elemento tetraédrico.....	43
Figura 14: Desenho 3D do coletor utilizado na simulação numérica.....	56
Figura 15: Desenho 3D da placa do coletor utilizado na simulação numérica.....	58
Figura 16:Desenho 3D da área molhada do coletor utilizado na simulação numérica.....	58
Figura 17: Visualização da malha da placa	59
Figura 18:Visualização da malha do tubo	60
Figura 19: Visualização do “inflation” utilizado na malha do tubo	60

Figura 20: Simulador Solar do Laboratório GREEN Solar da PUC Minas	66
Figura 21: Coletor utilizado no teste experimental mostrando os Termopares instalados na placa.	69
Figura 22: Medidor de inclinação.....	69
Figura 23: Sensor de temperatura na entrada do coletor solar.....	70
Figura 24: Sensor de temperatura na saída do coletor solar.	70
Figura 25: Gerador de vento do simulador solar.	70
Figura 26: Medidor de vazão.	71
Figura 27: Sensor de temperatura ambiente (PT-100).....	71
Figura 28: Escoamento de partículas de um fluido em um coletor solar.....	75
Figura 29: Pontos de coleta de temperatura para os métodos experimental e numérico...	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição de Temperaturas de Saída do Fluido no Coletor.....	52
Tabela 2: Dados da malha do tubo	61
Tabela 3: Dados da malha da placa	61
Tabela 4: Vazão Mássica de entrada	62
Tabela 5: Radiação Solar sobre a placa absorvedora do Coletor Solar	63
Tabela 6: Temperatura de referência para o cálculo da aproximação de Boussinesq	64
Tabela 7: Decomposição da gravidade.....	65
Tabela 8: Distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação obtida experimentalmente.....	85
Tabela 9: Distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação obtida numericamente.....	85
Tabela 10: Diferença da distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação entre o método experimental e numérico.....	86
Tabela 11: Distribuição de temperatura na calha de distribuição nos métodos experimental e numérico.....	88
Tabela 12: Diferença de distribuição de temperatura na calha de distribuição entre o método experimental e numérico.....	88
Tabela 13: Distribuição de temperatura na calha de coleta nos métodos experimental e numérico.	90
Tabela 14: Diferença de distribuição de temperatura na calha de coleta entre os métodos experimental e numérico.	90
Tabela 15: Diferença de temperatura de saída do coletor entre os métodos experimental e numérico.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Perfil de Vazão nos Tubos de Elevação X Número de Nodos.....	52
Gráfico 2: Comparação entre as distribuições de vazão mássica nos métodos estudados na vazão 2,06l/min para os tubos de elevação.	74
Gráfico 3: Comparação entre as distribuições de vazão mássica nos métodos estudados na vazão 2,06l/min para a calha de distribuição.	76
Gráfico 4: Comparação entre as distribuições de vazão mássica nos métodos estudados na vazão 2,06l/min para a calha de coleta.	77
Gráfico 5: Distribuição de vazão mássica no método CFX nos tubos de elevação.....	78
Gráfico 6: Distribuição de vazão mássica no método CFX na calha de distribuição.....	79
Gráfico 7: Distribuição de vazão mássica no método de CFX na calha de coleta.	80
Gráfico 8: Distribuição de vazão mássica nos tubos de elevação para as simulações computacionais com escoamento com incidencia de radiação e escoamento isotérmico.	81
Gráfico 9: Distribuição de temperatura do tubo de elevação 1.	83
Gráfico 10: Distribuição de temperatura do tubo de elevação 4.	83
Gráfico 11: Distribuição de temperatura do tubo de elevação 7.	84
Gráfico 12: Distribuição de temperatura da calha de distribuição.	87
Gráfico 13: Distribuição de temperatura da calha de coleta.....	89

NOMENCLATURA

Símbolos Latinos

A_{ext}	– área externa do coletor [m^2]
A_{transp}	– área transparente do coletor solar
c_p	– calor específico à pressão constante do fluido [J.kg^{-1}]
c	– cobertura (vidro)
d_i	– diâmetro interno [m]
D	– diâmetro externo dos tubos [mm]
D_i	– diâmetro interno dos tubos [mm]
D_i	– diâmetro em [m]
d_h	– diâmetro interno da calha [m]
d_r	– diâmetro interno do tubo de elevação [m]
Fr	– fator de remoção
F	– eficiência das aletas
F'	– fator de eficiência do coletor solar
G	– radiação solar global instantânea incidente no plano do coletor [W.m^{-2}]
g	– aceleração da gravidade [m.s^{-2}]
$h_{f,i}$	– coeficiente de transferência convectiva de calor entre a superfície interna dos tubos e o fluido [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

h_{tot}	– entalpia específica total [J.kg^{-1}]
i	– número do tubo de elevação
J	– perda de carga adimensionalizada
L_r	– comprimento do tubo de elevação [m]
L_h	– comprimento da calha [m]
\dot{m}_T	– vazão mássica de entrada do coletor em [kg.s^{-1}]
\dot{m}_i	– vazão mássica em cada tubo de elevação em [kg.s^{-1}]
\dot{m}	– vazão mássica do fluido [kg.s^{-1}]
N_i	– função de forma para o nó i
n_j	– vetor da superfície externa
p	– placa do coletor
$Q_{\text{útil}}$	– calor útil absorvido pela água [W]
$Q_{\text{útil}} (\text{máximo})$	– calor útil máximo absorvido pela água [W]
\hat{Q}_j	– vazão no tubo de elevação adimensionalizada
Q_i	– vazão volumétrica de entrada [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
Q_o	– vazão volumétrica de saída [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
R_r	– resistência total do tubo de elevação [Pa.s.kg^{-1}]
R'_{cont}	– resistência térmica de contato entre a placa absorvedora (aletas) e os tubos, por unidade de comprimento, na direção do escoamento do fluido [m.K.W^{-1}]
Re	– número de Reynolds

R_h	– resistência total das calhas [Pa.s.kg ⁻¹]
R_{pr}	– resistência de uma seção reta do tubo de elevação [Pa.s.kg ⁻¹]
R_{ph}	– resistência de uma seção reta de uma calha [Pa.s.kg ⁻¹]
R_{fr}	– resistência da junção conectada à taxa de fluxo do tubo de elevação [Pa s kg ⁻¹]
R_{fh}	– resistência da junção [Pa.s.kg ⁻¹]
R_{fm}	– resistência da junção [Pa.s.kg ⁻¹]
r	– razão das resistências hidráulicas
S	– radiação solar absorvida pelo coletor [W.m ⁻²]
T_{dep}	– temperatura do tanque [°C]
T_i	– Temperatura do Fluido na Entrada do Coletor [K]
T_{out}	– temperatura de saída do coletor [K]
T_{o1}	– temperatura de saída do primeiro coletor [K]
T_{amb}	– temperatura ambiente [K]
U_L	– coeficiente global de perda de calor [W.m ⁻² .K ⁻¹]
U_{parede}	– velocidade na parede de um tubo
u	– velocidade na direção da coordenada x
V	– quantidade de movimento por unidade de massa
v	– velocidade na direção da coordenada y
W	– espaçamento entre os tubos [m]
w	– velocidade na direção da coordenada z
x	– coordenada de direção do escoamento do fluido no coletor solar [m]

Símbolos gregos

α	– absorvidade do vidro
Δ	– Variação
ϕ	– elemento da função de forma de elementos finitos
ϕ_i	– valor ϕ de para o nó i
η	– Eficiência térmica instantânea
ρ	– refletividade
τ	– Transmitância do vidro
ν	– viscosidade cinemática do fluido [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Histórico	17
1.2	Estado da Arte	19
1.3	Motivação	20
1.4	Objetivos geral e específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Tipos de sistemas de escoamento em coletores	23
<i>2.1.1</i>	<i>Termossifão.....</i>	<i>23</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Sistema bombeado ou de circulação forçada</i>	<i>24</i>
2.2	Configurações de Coletores	25
2.3	Eficiência térmica instantânea	26
2.4	Cálculo Analítico do problema.....	30
<i>2.4.1</i>	<i>Distribuição do escoamento laminar em sistemas de aquecimento - Método de Kikas et al. (1995).</i>	<i>32</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Método Hardy Cross.....</i>	<i>36</i>
2.5	Estudo Numérico do problema.....	37
<i>2.5.1</i>	<i>Geração da Malha</i>	<i>40</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Pré-Processamento</i>	<i>44</i>
<i>2.5.3</i>	<i>Solvers</i>	<i>49</i>
<i>2.5.4</i>	<i>Pós-Processamento.....</i>	<i>50</i>
2.6	Metodologia numérica do modelo integral.....	51

3	METODOLOGIA NUMÉRICA	53
3.1	Introdução	53
3.2	Equações governantes	53
3.3	Etapas da simulação	55
3.3.1	<i>Geometria do coletor solar utilizado</i>	<i>56</i>
3.3.2	<i>Geração da malha.....</i>	<i>59</i>
3.3.3	<i>Pré-Processamento</i>	<i>61</i>
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	66
4.1	Instrumentos utilizados.....	68
4.2	Definição do procedimento para o teste experimental.....	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1	Distribuição de Vazão Mássica nos tubos	73
5.1.1	<i>Escoamento Isotérmico</i>	<i>73</i>
5.1.2	<i>Escoamento com transferência de calor (com incidência de radiação solar).....</i>	<i>78</i>
5.2	Temperatura do coletor solar.....	82
5.2.1	<i>Escoamento com transferência de calor (com incidência de radiação solar).....</i>	<i>82</i>
5.3	Temperatura de Saída do coletor.....	91
5.3.1	<i>Escoamento com Transferência de Calor (com incidência de radiação solar)</i>	<i>91</i>
6	CONCLUSÕES.....	93
7	PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

O Brasil é um dos poucos países no mundo com grande potencial de aproveitamento da energia hídrica, renovável e não poluente. Segundo o Balanço Energético Nacional (MME, 2006) cerca de 89,4% de toda energia elétrica gerada no país é de origem hidráulica.

A Figura 1 demonstra a evolução temporal das fontes primárias utilizadas na geração de energia no país, onde se constata que a sociedade brasileira utiliza, ainda, grande quantidade de energia proveniente de fontes poluentes.

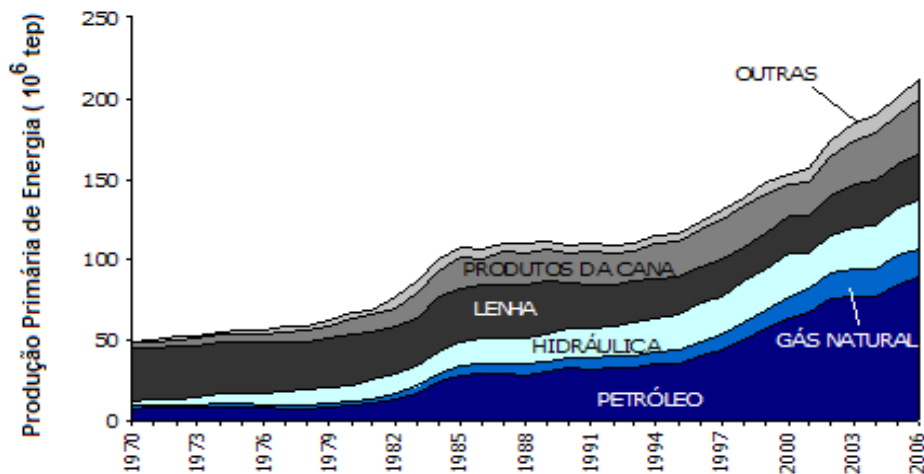


Figura 1: Produção de Energia por Fonte Primária no Brasil.

Fonte: BEN (MME, 2006)

Sabe-se que a geração atual não é suficiente para atender satisfatoriamente à demanda de energia, mantidos os níveis de crescimento econômico desejáveis para o país. Por isso, mecanismos que promovam o combate ao desperdício de energia nos setores residencial e industrial tornam-se a cada dia mais urgentes.

A Figura 2 mostra a evolução do consumo de energia elétrica no setor residencial nos últimos 36 anos, evidenciando que tal consumo já retornou ao nível pré-acionamento de 2001. Dentre as alternativas energéticas mais efetivas para o uso racional de energia no setor residencial, destaca-se a substituição dos chuveiros elétricos pelos aquecedores solares. Com essa substituição maciça ter-se-ia uma significativa geração virtual de energia elétrica para o país.

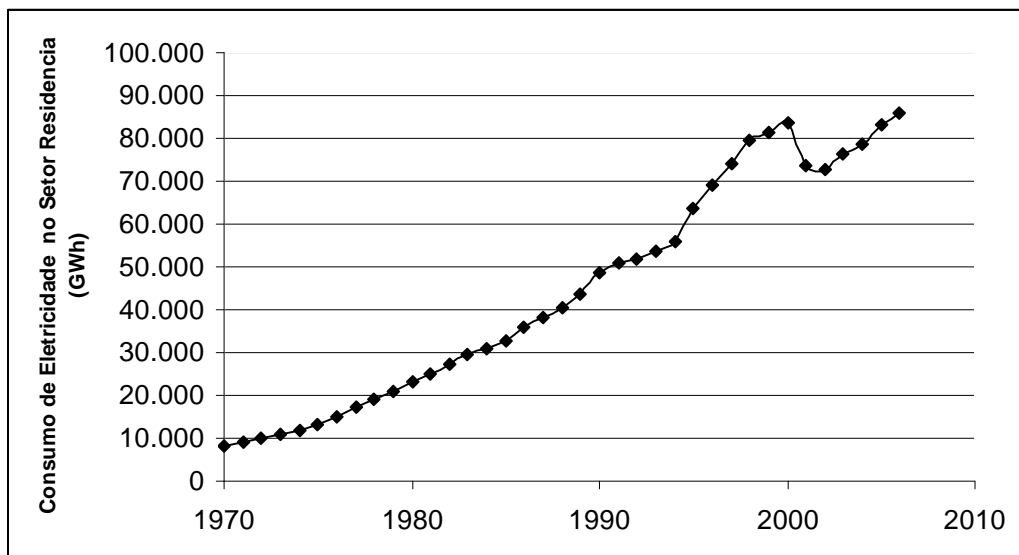


Figura 2: Consumo de eletricidade no setor residencial.

Fonte: BEN (MME, 2006)

Este trabalho busca contribuir na criação de ferramentas de modelagem numérica de coletores solares, visando à criação de recomendações de boas práticas para a instalação de grandes baterias de coletores. A modelagem foi implementada com a técnica de volumes finitos, sendo utilizado o Software CFX-11 da ANSYS. A validação do modelo desenvolvido foi

realizada por meio da comparação entre os resultados da simulação numérica e dados experimentais.

1.2 Estado da Arte

Apresentam-se, a seguir, breve relato dos principais trabalhos correlatos ao tema proposto. Estes estudos experimentais e numéricos realizados sobre o escoamento interno do fluido de trabalho nos tubos de distribuição de um coletor solar têm o objetivo de maximizar seu rendimento térmico.

Faria (2007) desenvolveu um modelo matemático que permite avaliar o rendimento global de associações de coletores em grandes baterias a partir das eficiências individuais dos coletores e da consideração dos efeitos da não-uniformidade do escoamento da água através dos tubos de distribuição. Foi implementado as rotinas computacionais nos programas Engineering Equation Solver – EES e MatLab.

Chiou (1982) desenvolveu um método matemático que determina o efeito da não uniformidade do escoamento do fluido de trabalho nos tubos de elevação. Considera que a distribuição de vazão nos tubos de elevação é usualmente não uniforme sobre condições normais de operação. Tal condição pode estar associada a imperfeições na construção, instalações impróprias dos coletores solares ou problemas de deposição e entupimento dos tubos.

A presente dissertação busca o aumento do campo de aplicações de volumes finitos com a implementação do software CFX a processos de aquecimento com energia solar. A análise feita por este software possibilita uma visualização em maiores detalhes do escoamento interno, visando aumentar a eficiência de cada coletor e de sua associação em grandes baterias.

1.3 Motivação

Os modelos clássicos para avaliação do desempenho de coletores solares têm como uma das premissas básicas a uniformidade do escoamento interno nos tubos de elevação dos coletores. Entretanto, diversos estudos teóricos e experimentais, demonstram que essa hipótese tem aplicação restrita. Avaliações termográficas de coletores solares em operação sob condições transientes e em regime permanente, realizadas pela equipe do GREEN SOLAR (PEREIRA et al., 2008) no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO, evidenciam uma redução significativa da eficiência térmica esperada para determinados coletores solares em decorrência dessa não uniformidade.

1.4 Objetivos geral e específicos

O presente trabalho tem como objetivo geral utilizar uma ferramenta para simulação das condições operacionais de coletores solares planos com escoamento tipo “Z”, individuais e em associações série-paralelo, considerando a não uniformidade da vazão do fluido de trabalho nos tubos de elevação.

Os objetivos específicos são, assim, detalhados:

- a) Estudar o escoamento do fluido em um coletor solar, considerando modelo com condições de contorno de troca de calor com o fluido e de modelo isotérmico.

- b) Utilizar o software CFX para modelar a distribuição de vazão mássica nos tubos do coletor, considerando modelo com condições de contorno de troca de calor com o fluido e de modelo isotérmico.
- c) Validar o modelo numérico por meio de um estudo comparativo dos resultados obtidos pela simulação matemática e testes experimentais.
- d) Disponibilizar ferramentas de modelagem matemática em aquecimento solar, a partir do uso de programas de volumes finitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dentre os dispositivos de conversão ativa da radiação solar, destacam-se os coletores solares e os módulos fotovoltaicos. Este último converte diretamente a energia solar em energia elétrica. A denominação “coletores solares” refere-se aos dispositivos que convertem a energia solar em energia térmica, pelo aquecimento de um fluido de trabalho.

De modo geral, os coletores solares são classificados em coletores planos, concentradores e de tubo evacuado. O escopo deste trabalho se restringe aos coletores planos, mais comumente utilizados no aquecimento de água para fins sanitários no setor residencial. A Figura 3 evidencia os elementos constituintes deste tipo de coletor solar.

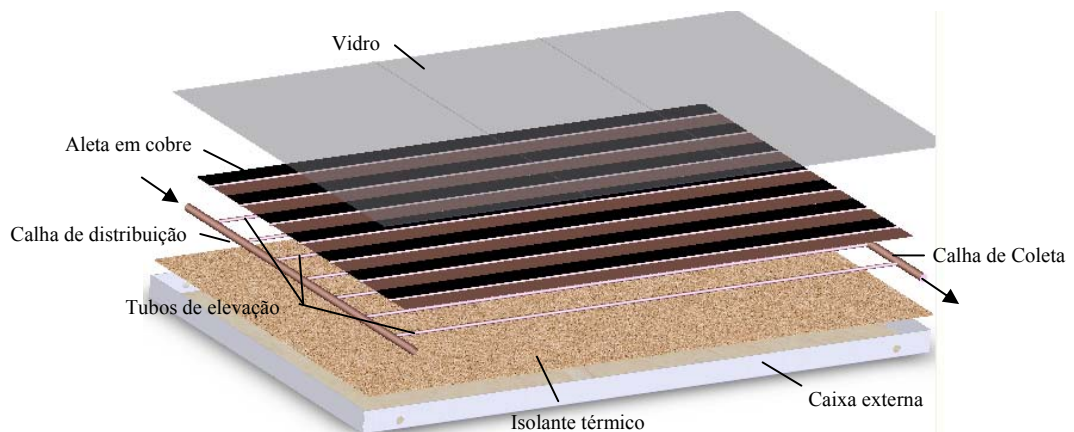


Figura 3: Elementos de um coletor solar de placa plana

Fonte: Desenho do autor

A seleção correta do tipo de coletor e de seus materiais constituintes considera a aplicação final, a temperatura de operação e a qualidade da água.

2.1 Tipos de sistemas de escoamento em coletores

O escoamento do fluido no coletor solar ocorre em circulação natural ou termosifão ou em circulação forçada nos sistemas bombeados. Os componentes básicos para estes tipos de instalação são:

- Boiler – Reservatório térmico, ou seja, um recipiente para armazenamento da água aquecida.
- Coletor – Sistema aquecedor de fluido.
- Caixa d'água – Local onde é armazenada a água a temperatura ambiente.
- Microbomba – Bomba responsável pelo bombeamento do fluido para o coletor solar.

2.1.1 Termossifão

No sistema de termosifão a circulação ocorre devido à diferença de densidade entre a água fria e a quente. A água fria, sendo mais densa, acaba empurrando a água quente que é mais leve, realizando a circulação. Sua vantagem é de não precisar de energia elétrica para a movimentação da água, dispensando qualquer tipo de manutenção, como indica a Figura 4. (VENZON, 2004).

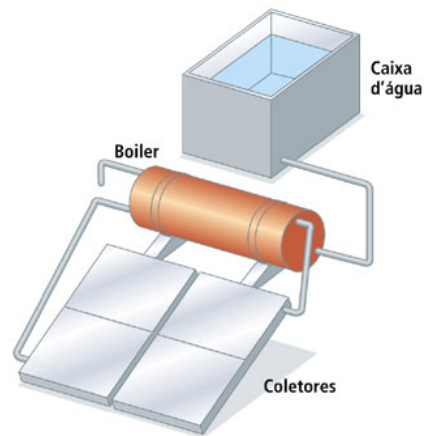


Figura 4: Vista em perspectiva de uma Instalação de Termosifão

Fonte: Venzon, 2004.

2.1.2 Sistema bombeado ou de circulação forçada

No sistema bombeado a circulação da água não ocorre sozinha e sim por auxílio de uma microbomba instalada no circuito. As desvantagens nesse tipo de instalação são a dependência da eletricidade e a possibilidade de ocorrerem problemas na microbomba. O *boiler* sempre ficará abaixo dos coletores como indica a Figura 5 (VENZON, 2004).

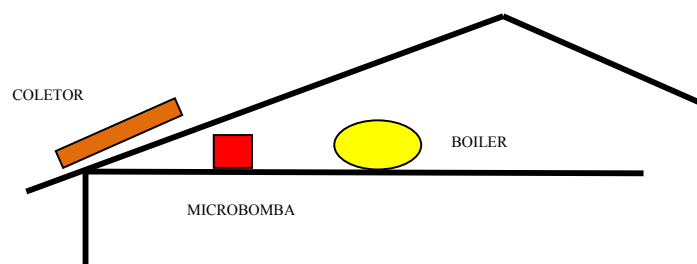


Figura 5: Circulação Forçada

Fonte: Venzon, 2004.

2.2 Configurações de Coletores

A ligação hidráulica dos coletores solares no circuito primário de uma instalação de aquecimento solar, exemplificada na Figura 6, pode ser classificada de acordo com o escoamento interno do fluido térmico dos coletores, conforme proposto por Kikas (1995), a saber:

- Tipo Z: circuito com retorno reverso (o fluido entra em um lado do coletor e sai pelo lado, oposto, Figura 6 (a)). Circuito utilizado neste estudo.
- Tipo U: circuito com retorno direto (a entrada e saída do fluido são promovidas no mesmo lado do coletor, Figura 6 (b)).

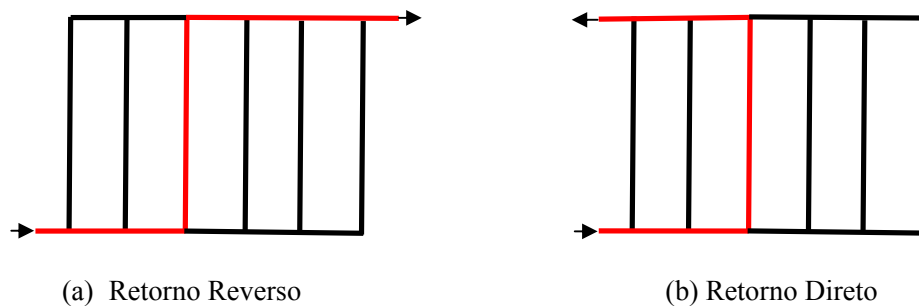


Figura 6: Configuração de Coletores

Fonte: Kikas, 1995.

O projeto das tubulações de elevação, distribuição e coleta é importante para um melhor desempenho das instalações solares.

Os coletores podem ser interligados em serie ou em paralelo conforme mostra a Figura 7, ou uma combinação dos dois casos. No caso de dois coletores associados em paralelo, sendo estes idênticos, classicamente espera-se que a vazão seja a mesma em ambos. Duffie e Beckman (1991) consideram que para temperaturas da água similares à entrada dos coletores, ambos apresentarão o mesmo desempenho.

No caso do arranjo em série, a temperatura à entrada do segundo coletor T_{O1} é sensivelmente maior do que a temperatura à entrada do primeiro, acarretando, assim, um menor rendimento para o segundo coletor. Portanto, para se atingir as vazões e temperaturas requeridas em uma determinada aplicação pode ser proposta uma associação híbrida série e paralelo de vários coletores.

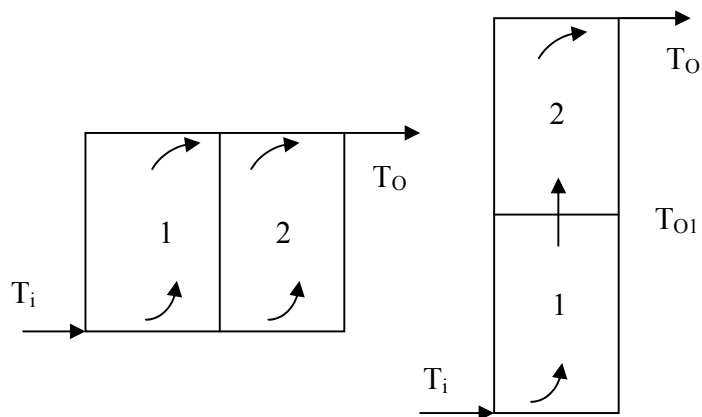


Figura 7: Coletores conectados em paralelo e em série

Fonte: Duffie e Beckman, 1991.

2.3 Eficiência térmica instantânea

A eficiência térmica instantânea (η) de um coletor solar pelo método direto é definida como a razão entre a taxa de transferência de calor para a água (denominada calor útil) e a taxa de energia solar incidente no plano do coletor, ou seja:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{G \cdot A_{\text{ext}}} \quad (1)$$

onde: G : radiação solar global instantânea incidente no plano do coletor [W.m^{-2}];

A_{ext} : área externa do coletor [m^2];

$Q_{\text{útil}}$: calor útil absorvido pela água [W].

Outra forma de se expressar a eficiência de um coletor solar é pelo Método das Perdas. Duffie e Beckman (1991) discutem detalhadamente sobre:

- perdas óticas que podem ser resumidas pelo produto ($\tau_c \alpha_p$): transmissividade da cobertura transparente e absorvidade da tinta aplicada sobre a placa absorvedora, respectivamente;

- perdas térmicas por condução, convecção e radiação pelo topo, base e laterais do coletor solar que compõem o coeficiente global de perdas U_L ;

- fator de remoção de calor do coletor (F_R), definido como a razão entre a taxa de calor útil real transferido entre a placa absorvedora e o fluido ($Q_{\text{útil}}$) e o valor hipotético que seria transferido se toda a superfície da placa estivesse à temperatura da água à entrada do fluido no coletor (T_{fi}), ou seja:

$$F_R = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{útil(máximo)}}} \quad (2)$$

$Q_{\text{útil(máximo)}}$ é expresso pela equação:

$$Q_{\text{útil(máximo)}} = A_{\text{transp}} [S - U_L (T_{fi} - T_{\text{amb}})] \quad (3)$$

Sendo: A_{transp} : área transparente do coletor [m^2];

S : radiação solar absorvida pela placa, calculada como $S = (\tau_c \alpha_p)G$;

T_{amb} : temperatura ambiente [$^{\circ}C$].

Assim, substituindo a eq. (2) em (3), tem-se:

$$Q_{\text{útil}} = A_{\text{transp}} F_R [S - U_L (T_{fi} - T_{amb})] \quad (4)$$

Como nessa equação o ganho útil de energia é calculado como função da temperatura da água à entrada do coletor solar, ela é extremamente útil para análise de sistemas de aquecimento solar, visto que a temperatura do fluido à entrada dos coletores é usualmente conhecida.

Duffie e Beckmann (1991) apresentam, ainda, a dedução da expressão analítica para o fator de remoção de calor do coletor na forma:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_{\text{transp}} U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_{\text{transp}} U_L F'}{\dot{m} c_p}\right) \right] \quad (5)$$

\dot{m} : vazão mássica do fluido [kg/s];

c_p : calor específico à pressão constante do fluido [J/kg.K];

F' : fator de eficiência do coletor solar, determinado pelos parâmetros de projeto, processos de fabricação e condições operacionais da instalação solar, conforme a equação:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + R'_{cont} + \frac{1}{\pi D_i h_{f,i}} \right]} \quad (6)$$

W é o espaçamento entre os tubos [m];

D e D_i são os diâmetros externo e interno dos tubos, respectivamente [m];

F corresponde à eficiência das aletas, formadas pela placa absorvedora e modeladas como aletas de ponta adiabática;

R'_{cont} refere-se à resistência térmica de contato entre a placa absorvedora (aletas) e os tubos, por unidade de comprimento e tomada na direção do escoamento do fluido [m.K.W⁻¹];

$h_{f,i}$ é o coeficiente de transferência convectiva de calor entre a superfície interna dos tubos e o fluido, calculado a partir das equações clássicas da transferência de calor para escoamento interno.

A teoria apresentada por Duffie e Beckmann (1991) baseia-se na premissa de que a vazão de água se distribui uniformemente em todos os tubos de distribuição do coletor solar.

Klein (1974) modelou a perda térmica pelo topo de um coletor solar por meio de uma equação empírica que considera sua inclinação, as temperaturas da placa e do ambiente, o coeficiente convectivo entre a placa e o ambiente e as emissividades do vidro e da placa. Soares et al. (2005) também utilizou a equação de Klein para o cálculo da perda pelo topo em seu estudo. Os resultados teóricos obtidos são comparados com dados experimentais obtidos para um coletor solar plano experimental em operação na cidade de Brasília, validando adequadamente os resultados.

2.4 Cálculo Analítico do problema

Primeiramente é necessário desenvolver um estudo fluido-mecânico do sistema de aquecimento solar, utilizando um modelo isotérmico. As quedas de pressões tanto ao longo das tubulações quanto nas perdas das junções do coletor solar são um dos fatores responsáveis pela não uniformidade do escoamento do fluido nos tubos de distribuição.

Weitbrecht et. al (2002) estudaram a sensibilidade da distribuição de escoamento em um coletor solar com foco especial na quedas de pressão nas junções e na perda de energia do fluido devido ao atrito, desprezando os gradientes de temperatura do fluido. Foram criados vários tipos de modelos, inclusive com a utilização de dados experimentais. Os experimentos, demonstrados na Figura 8, comprovam um crescimento da vazão nos tubos de elevação ao longo do coletor para condições operacionais em regime laminar e de transição. Sendo Q_i/Q_o a razão entre a vazão volumétrica de entrada pela vazão volumétrica de saída do coletor solar.

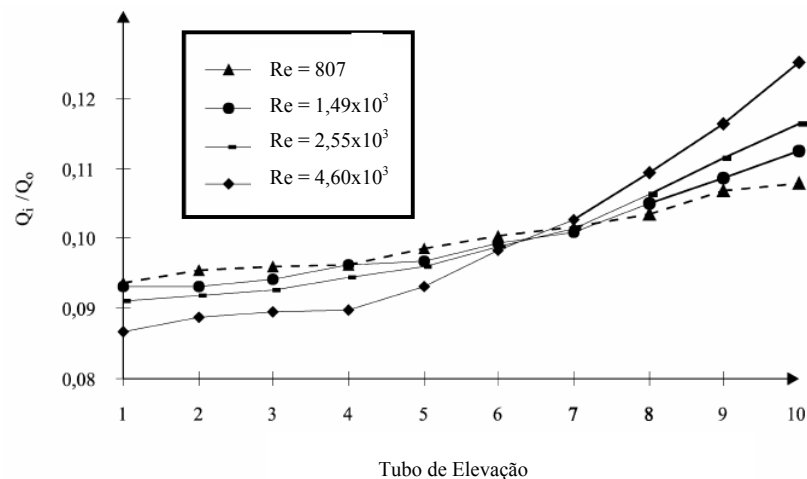


Figura 8: Distribuição de fluxo nos tubos de elevação de um coletor tipo “Z”, obtido experimentalmente.

Fonte: Weitbrecht et al, 2002.

Jones e Lior (1994) também estudaram a distribuição do escoamento do fluido em um coletor, sendo gerado um modelo discreto hidrodinâmico isotérmico, validado com dados experimentais isotérmicos. Este modelo prevê uma distribuição da vazão nas calhas dos coletores solares, negligenciando os efeitos transientes. O mesmo perfil crescente foi obtido para o modelo analítico isotérmico de escoamento no coletor solar e parametrizado para a razão entre o diâmetro dos tubos de distribuição e da calha coletora (d_r/d_i) conforme mostrado na Figura 9. \hat{Q}_j é a vazão no tubo de elevação adimensionalizada.

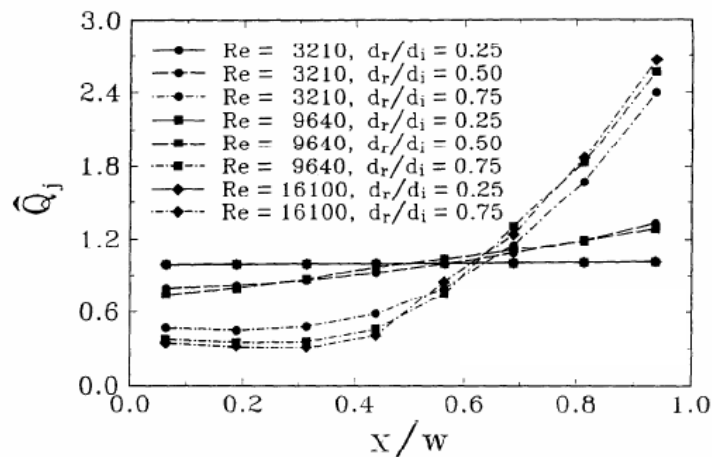


Figura 9: Distribuição de fluxo nos tubos de elevação de um coletor tipo “Z”, analisado numericamente.

Fonte: Jones e Lior, 1994.

Wang e Wu (1990) desenvolveram, através de uma formulação discreta, um modelo para prever a distribuição de escoamento e temperatura dos tubos de elevação com ótimo desempenho. Neste modelo, a não uniformidade de distribuição do escoamento nos tubos de elevação, a condução longitudinal de calor e os efeitos de flutuação foram levados em consideração, sendo realizados experimentos para sua validação. Os estudos mostram uma simetria no escoamento das tubulações de elevação, Figura 10, propondo equações analíticas para modelos isotérmicos e também para modelos com a ação da transferência de calor.

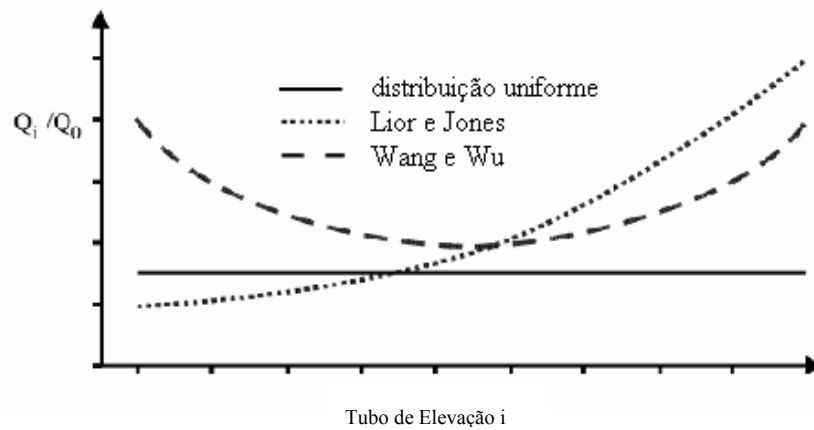


Figura 10: Esquema de distribuição de fluxo de acordo com diferentes autores.

Fonte: Weitbrecht et al, 2002.

2.4.1 Distribuição do escoamento laminar em sistemas de aquecimento - Método de Kikas et al. (1995).

Kikas (1995) propôs um modelo simples e discreto para prever a distribuição do fluido em um coletor solar com fluxo completamente desenvolvido e em regime de escoamento laminar. As propriedades do fluido foram consideradas independentes da temperatura, com exceção da densidade. O método tem a função de calcular a vazão mássica nos tubos de elevação, aplicada a uma configuração de coletor do tipo “Z” com número ímpar de tubos de elevação e escoamento considerado laminar, conforme Figura 11.

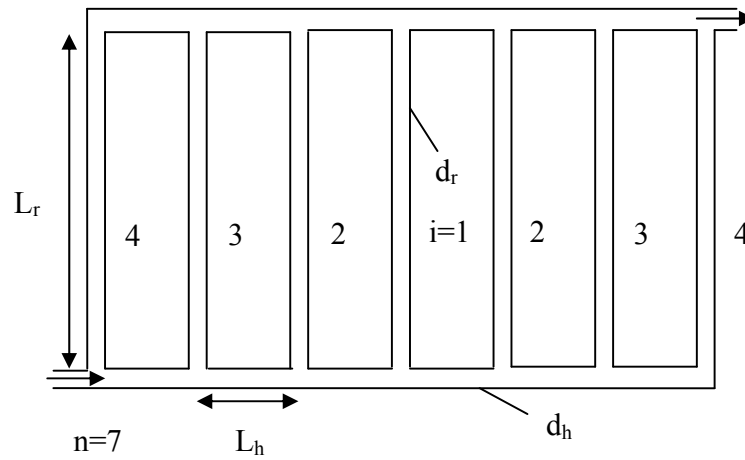


Figura 11: Coletor solar tipo “Z”

Fonte: Kikas, 1995.

A equação 7 descreve o somatório das vazões mássicas em todos os tubos de elevação que deve ser igual à vazão mássica de entrada ou saída:

$$\frac{\dot{m}_r}{2} = \frac{\dot{m}_i}{2} + \dot{m}_{i+1} + \dot{m}_{i+2} + \dot{m}_{i+3} + \dots \quad (7)$$

\dot{m}_r - vazão mássica de entrada do coletor em [kg/s]

\dot{m}_i - vazão mássica em cada tubo de elevação em [kg/s].

As equações que relacionam a razão entre as vazões mássicas dos tubos de elevação são descritas a seguir:

$$\dot{m}_2 = \left(r + \frac{(-1)^n + 1}{2} [r - 1] \right) \dot{m}_1 \quad (8)$$

$$\dot{m}_i = (2r-1)\dot{m}_{i-1} + (r-1)\left(\frac{(-1)^n - 1}{2}\dot{m}_1 + 2\sum_{k=1}^{i-2}\dot{m}_k\right) \quad (9)$$

ou

$$\dot{m}_i = 2r\dot{m}_{i-1} - \dot{m}_{i-2} \quad (10)$$

r é calculada pela razão das resistências hidráulicas.

$$r = \frac{R_r + R_h}{R_r - R_{fm}} \quad (11)$$

O método assume que a resistência total do tubo de elevação R_r pode ser dada por:

$$R_r = \frac{128 \cdot \nu \cdot L_r}{\pi \cdot d_r^4} + 2 \cdot \frac{14000 \cdot \nu}{\pi \cdot d_r^3} \quad (12)$$

R_r - resistência total do tubo de elevação [Pa s kg⁻¹].

d_r - diâmetro interno do tubo de elevação [m].

L_r - comprimento do tubo de elevação [m].

ν - viscosidade cinemática do fluido [m²s⁻¹].

A resistência total das calhas R_h pode ser dada por:

$$R_h = \frac{128 \cdot \nu \cdot L_h}{\pi \cdot d_h^4} + \frac{1100 \cdot \nu}{\pi \cdot d_h^3} \quad (13)$$

d_h - diâmetro interno da calha [m].

L_h - comprimento da calha [m].

R_h - resistência total das calhas [Pa s kg⁻¹].

R_{pr} - resistência de uma seção reta do tubo de elevação [Pa s kg⁻¹].

R_{ph} - resistência de uma seção reta de uma calha [Pa s kg⁻¹].

R_{fr} - resistência da junção conectada à taxa de fluxo do tubo de elevação [Pa s kg⁻¹].

R_{fh} - resistência da junção [Pa s kg⁻¹].

A resistência da junção R_{fm} é calculada por:

$$R_{fm} = \frac{3100 \cdot \nu}{\pi \cdot d_h^3} \quad (14)$$

R_{fm} - resistência da junção [Pa s kg⁻¹].

2.4.2 Método Hardy Cross

O método analítico utilizado foi o Pipe Networks (Hardy cross method). O tradicional método Hardy-Cross se restringe a redes horizontais constituídas de um conjunto definido de ciclos fechados.

A Figura 12 demonstra como é realizado a distribuição de vazão nos segmentos dos ciclos.

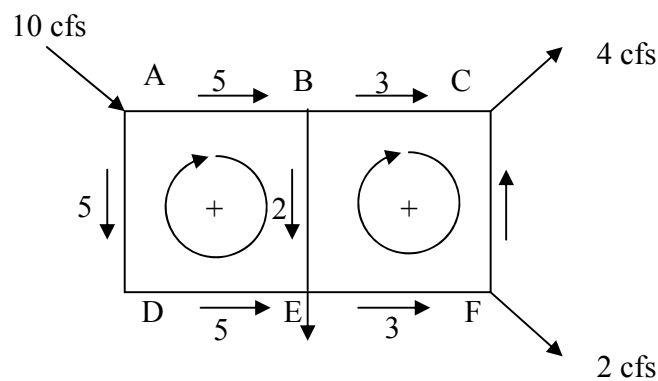


Figura 12: Exemplo de uma malha calculada pelo método de Hardy Cross

Fonte: Baptista e Lara, 2003

Hardy Cross criou este método em 1936, assumindo que cada tubo tem um escoamento de vazão volumétrica (Q), balanceando-se este volume de entrada e saída em cada conexão (BAPTISTA; LARA, 2003).

Este método exige o conhecimento prévio dos dados físicos da malha dos tubos e de uma pré-distribuição dos valores da vazão volumétrica em cada seção dos tubos. Adota-se a equação de Fair Whipple-Hsiao (GHISI, 2004) para cálculo da queda de pressão nos tubos, que é recalculada a cada iteração realizada, até que o escoamento da água em cada tubo esteja

balanceado. Para tal, o valor é ajustado por uma diferença da vazão Q calculada, fazendo-se, então, a correção da vazão do escoamento, com análise concomitante dos resultados da queda de pressão, calculada até que ela se aproxime de zero (GHISI, 2004).

A equação de Fair Whipple-Hsiao, utilizada para a resolução do método aplicada ao coletor em estudo, para tubos de cobre transportando água quente, é escrita na forma:

$$Q = 63,281 \cdot d^{2,714} \cdot J^{0,571} \quad (15)$$

Q : vazão volumétrica [m^3/s]

d : diâmetro em [m]

J : perda de carga em [m/m].

Esta equação é recomendada para diâmetros de tubulações inferiores a 50 mm, faixa normalmente utilizada na fabricação de coletores solares planos. Como Q e d são conhecidos, determinamos o valor de J .

2.5 Estudo Numérico do problema

A segunda parte desta dissertação teve como objetivo o estudo do escoamento do coletor solar, utilizando um software de simulação numérica.

As equações governantes de fenômenos físicos podem ser resolvidas por métodos analíticos ou numéricos, que correspondem à classe dos métodos teóricos. A diferença entre eles

está basicamente no nível de complexidade da equação que cada método propõe solucionar. Os métodos analíticos, que buscam determinar as soluções exatas, têm a desvantagem de serem aplicáveis apenas para geometrias e condições de contorno consideradas simples.

Obviamente, as soluções analíticas não devem ser descartadas e uma das suas importantes aplicações é, exatamente, a validação dos casos limites dos modelos numéricos, auxiliando, assim, no desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos. Se um método analítico for suficiente para resolver o problema de interesse dentro dos níveis de precisão e exigência requeridos, ele deve ser preferido. Uma regra básica que deve ser observada em engenharia é o uso da ferramenta adequada ao tamanho do problema em questão (MALISKA, 1995).

A simulação é uma poderosa ferramenta, pois experimentos laboratoriais são normalmente mais caros e com restrições: mais caros devido ao alto custo dos protótipos e dos instrumentos necessários para avaliar os parâmetros do desempenho.

A simulação possibilita, dentre outras coisas:

- Um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos.
- Auxilia no dimensionamento adequado dos sistemas e seus componentes

Em relação à experimentação numérica, destaca-se que os dados obtidos devem ser confiáveis para que possam ser aplicados, sendo que os desvios da solução correta subdividem-se em duas classes, a saber:

a) Erros puramente numéricos: solução errada que pode ser obtida mesmo a partir de uma modelagem matemática correta. Na grande maioria dessas situações, as causas são devidas à precisão numérica da máquina envolvida ou restrições de convergência dos métodos.

b) Erros da modelagem matemática: as equações aplicadas ao problema físico não o representam satisfatoriamente. A geometria e a malha também podem gerar erros de modelagem.

A modelagem e simulação dos fenômenos associados à dinâmica dos fluidos ganharam um grande impulso com o avanço dos computadores digitais. A modelagem numérica de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) tem sido largamente empregada. Neste campo, os fenômenos são governados pelas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia.

O software CFX é um programa da empresa ANSYS que resolve as equações de Navier-Stokes, conservação da massa e energia. Estas equações estão disponibilizadas em sua forma geral, independente do sistema de coordenadas adotado, devido ao fato de que as equações de conservação são resolvidas no plano transformado e não no plano físico. Essas equações são resolvidas em volumes de controle, escolhidos de acordo com a malha gerada, desde que estes contenham o fenômeno de interesse.

A resolução de problemas, envolvendo a fluidodinâmica computacional, pode ser assim detalhada:

- Criação da geometria.
- Geração da malha.
- Especificação das condições iniciais e de contorno apropriadas.
- Especificação das propriedades físicas do fluido contidas nas equações, as quais podem variar com os parâmetros de interesse.
- Especificação dos parâmetros de controle que afetam a solução numérica das equações (número máximo de iterações, convergência desejada, métodos alternativos de solução).

2.5.1 Geração da Malha

O processo conhecido como de geração de malha trata da subdivisão do domínio criado em pequenos subdomínios, chamados *elementos*.

A precisão da solução em um problema de CFD depende do número de elementos e como estes estão distribuídos na malha. Com o uso de técnicas numéricas de solução de equações diferenciais parciais (EDPs), a região do domínio não é tratada como contínua, mas sim como um conjunto discreto e finito de pontos ou sub-domínios. Nessa região, as variáveis de interesse são calculadas, sendo que quanto maior for o número de elementos, mais convergentes serão as soluções exata e aproximada.

Uma vez que o domínio deva estar discretizado, isto é, dividido em pontos ou células ou nós, deve-se obter um conjunto de equações escritas em função dos valores das variáveis em outros pontos da malha. Este procedimento resultará em um sistema de equações algébricas, geralmente lineares, que representam as EDPs no espaço computacional. Os principais métodos numéricos para discretização de EDPs são, atualmente, o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método de Volumes Finitos (MVF), (MALISKA, 1995). Este último método é o método adotado pelo programa CFX.

Existem basicamente dois tipos de malhas: as estruturadas e as não-estruturadas. Essas últimas representam mais adequadamente as geometrias mais complexas, devido à maior flexibilidade de forma que seus elementos podem assumir.

Se a discretização utilizada for obtida através da utilização de um sistema de coordenadas diz-se que a discretização resultante é *estruturada*, uma vez que cada volume ou ponto interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma seqüência natural. Este tipo de discretização apresenta uma série de vantagens para a implementação do programa computacional, pois a regra de ordenação dos elementos simplifica todas as rotinas. Além disso, e

principalmente, a matriz resultante tem diagonais fixas, permitindo que métodos para matrizes com banda fixa possam ser aplicados (MALISKA, 1995).

Neste trabalho, as técnicas numéricas basearam-se em *malhas não estruturadas*, que, em geral, permitem a discretização de geometrias complexas de maneira mais direta do que seria possível com malhas estruturadas, pois apresentam maiores adaptatividade e versatilidade, devido ao fato de não exigirem a obrigatoriedade e rigidez de ordenação e vizinhança entre células ou pontos.

Cada discretização consiste de um conjunto de pontos e de um sistema de equações algébricas para calcular os valores nos pontos discretos.

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho o escoamento é resolvido com a utilização de um software comercial, o CFX (ANSYS Inc.), na sua versão 11. A geração da malha é feita por outro software comercial, o ANSYS WORKBENCH. Este programa possui um gerador de geometria e um construtor da malha, propriamente dito, que discretiza o domínio representado pela geometria gerada. Este pacote, assim como o CFX, é muito utilizado tanto na indústria quanto em centros de pesquisa e tem se mostrado uma ferramenta bastante confiável.

Neste gerador de malhas, vários tipos de elementos podem ser utilizados para discretizar a geometria, tais como pirâmides, tetraedros, prismas, hexaedros, triângulos, quadriláteros, etc.

Função de Forma

Vários termos das equações requerem soluções ou um gradiente de soluções para possibilitar sua avaliação nos pontos de integração, pois os campos de soluções são armazenados em nós da malha. Assim, precisa-se calcular a variação da solução dentro do elemento e, para isso, recorre-se à função de forma (função de interpolação) de elementos finitos onde a variável ϕ varia num elemento conforme equação 16:

$$\phi = \sum_{i=2}^N N_i \phi_i \quad (16)$$

N_i e ϕ_i correspondem à função de forma e o valor de ϕ , respectivamente, sendo ambos definidos para o nó i .

O somatório é feito sobre todos os nós de um elemento e , dessa forma, pode-se definir como propriedade fundamental das funções de forma a seguinte expressão:

$$\sum_{i=1}^N N_i = 1 \quad (17)$$

Para o nó j , verifica-se que:

$$N_i = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases}$$

A função de forma, utilizada pelo CFX-11, é linear em termos de coordenadas paramétricas, conforme exemplificado na Figura 13, onde um elemento tetraédrico é ilustrado (CFX, 2005).

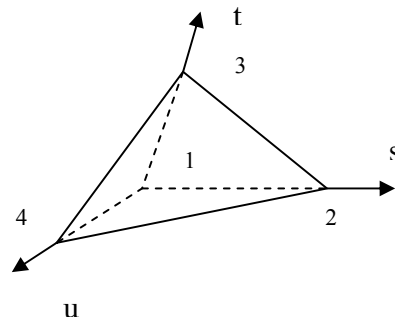


Figura 13: Modelo de um elemento tetraédrico.

Fonte: CFX, 2005

A função de forma para cada nó é expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 N_1(s, t, u) &= (1-s)(1-t)(1-u) \\
 N_2(s, t, u) &= s(1-t)(1-u) \\
 N_3(s, t, u) &= (1-s)t(1-u) \\
 N_4(s, t, u) &= (1-s)(1-t)u
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Várias outras quantidades geométricas, como coordenadas p_i , áreas de superfícies, vetores, dentre outros, são calculadas a partir das funções de forma. Isso é possível porque elas também são empregadas para as coordenadas cartesianas, isto é:

$$x = \sum_{i=1}^{N_\infty} N_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^{N_\infty} N_i y_i, \quad z = \sum_{i=1}^{N_\infty} N_i z_i.
 \tag{19}$$

Função de forma é basicamente uma função de interpolação, ou seja, ela é utilizada para descrever como a variável se comporta ao longo do elemento.

Cada nó do elemento tem sua própria função de forma e a combinação das funções de forma de todos os pontos fornece o valor da variável em qualquer ponto do elemento.

2.5.2 Pré-Processamento

Consiste na modelagem física de um problema de escoamento, esta envolve as seguintes informações:

- Seleção dos fenômenos físicos e/ou químicos que serão modelados e simulados;
- Definição das propriedades dos fluidos relevantes ao problema, como por exemplo: viscosidade, densidade, condutividade térmica, etc.;
- Especificação das condições de contorno apropriadas nos elementos da malha associados ao contorno do domínio.

Os pré-processadores fornecem um banco de dados com as propriedades físicas dos fluidos mais comuns e permitem ao usuário buscar diversos modelos físicos e químicos como: modelos de turbulência, transferência de calor, transferência de massa, reações químicas, já implementados no código ou ainda a implementação de novos modelos, em outras programações.

Transferência de calor em um sólido

Com um domínio sólido, a equação da conservação de energia pode ser simplificada, quando não há escoamento dentro do sólido. Assim, considera-se que o mecanismo de transferência de calor ocorra unicamente por condução, sendo descrita pela equação de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + S_E \quad (20)$$

ρ - massa específica do sólido (kg/m^3).

C_p - calor específico à pressão constante do sólido (kJ/kg.K).

λ - condutividade térmica do sólido ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

S_E – Fonte de energia

Aproximação de Boussinesq

Para solução do problema de convecção, tratado neste trabalho, foi necessário a utilização da aproximação de Boussinesq, (Yariv et al. ,2004). Nesta aproximação assume-se que somente a massa específica relacionada com as forças de corpo, ρg , varia proporcionalmente com a temperatura e pressão, sendo mantida constante nos outros termos. Assim, tem-se:

$$\rho g = \rho(T, P)g \quad (21)$$

Fazendo-se uma expansão em Série de Taylor em torno de uma temperatura de referência T_0 e de uma pressão de referência P_0 , obtém-se:

$$\rho \cong \rho_0 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P (T - T_0) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T (P - P_0) + \dots \quad (22)$$

O termo de flutuação de pressão presente na equação 22 é desprezível em relação ao termo de flutuação de temperatura e, portanto, a equação 22 pode ser reescrita como:

$$\rho \cong \rho_0 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P (T - T_0) \quad (23)$$

Introduzindo-se o coeficiente de expansão volumétrica β definido por:

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (24)$$

e rearranjando a equação, tem-se:

$$\rho \cong \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (25)$$

Substituindo-se a aproximação dada anteriormente pela equação 20, obtém-se

$$\rho g \cong \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] g \quad (26)$$

Entretanto deve-se ressaltar que o gradiente de pressão que age no sistema pode ser decomposto em dois termos, um referente à pressão hidrostática e outro referente à influência do movimento do fluido. Assim, em termos do operador gradiente, escreve-se:

$$\vec{\nabla} P = \rho_0 g + \vec{\nabla} \hat{P} \quad (27)$$

O primeiro termo do lado direito se refere à pressão hidrostática e o segundo termo refere-se ao gradiente de pressão que sofre variações devido ao movimento do fluido.

Acoplamento Pressão-Velocidade

A localização relativa das variáveis na malha é conhecida como arranjo de variáveis, dando a posição relativa entre os componentes do vetor velocidade e a pressão.

Quando se resolve numericamente uma única equação diferencial, a incógnita é localizada (armazenada) no centro do volume de controle, porém, quando se tem mais de uma equação existem diferentes métodos para localizá-la. O CFX-11 utiliza o arranjo chamado de *co-localizado*, em que todas as variáveis são armazenadas no mesmo ponto, com o mesmo volume elementar de integração (MALISKA, 1995).

O grande desafio do estudo do acoplamento entre pressão e velocidade é a determinação de um campo de pressões que, quando inserido nas equações do movimento, origine um campo de velocidades que satisfaça a equação da conservação da massa. Portanto, constata-se que existe um forte acoplamento entre a pressão e a velocidade, que pode vir a causar dificuldades para a solução do sistema de equações.

Para solucionar esse problema do acoplamento, o CFX-11 utiliza-se da seguinte representação unidimensional para a conservação da massa:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\Delta x^3 A}{4\dot{m}} \left(\frac{\partial^4 p}{\partial x^4}\right) = 0 \quad (28)$$

$$\dot{m} = \rho u_j \Delta n_j \quad (29)$$

\dot{m} se refere ao fluxo de massa discreto sobre a superfície de volume de controle. Δn_j é a variação do vetor na superfície externa e u_j é a velocidade na direção x.

Para uma malha refinada, tem-se que o segundo termo na equação 28 tende a zero a uma taxa relativa de Δx^3 para a derivada da velocidade. Para uma malha mais grosseira, esse termo é responsável pela estabilização dos resultados (CFX, 2005).

Termo de Advecção

A variável ϕ_{pi} precisa ser relacionada ao valor no nó de ϕ . Isso é necessário para que haja a discretização do termo advectivo (CFX, 2005). No CFX-11, o esquema de advecção implementada é dado por:

$$\phi_{pi} = \phi_{op} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \bar{r} \quad (30)$$

onde ϕ_{op} é o valor do nó oposto, e \vec{r} é o vetor do nó oposto para PI. Quando se usa um esquema de alta resolução $\nabla\phi$ é o gradiente do nó oposto. Dependendo da escolha feita para β , têm-se diferentes esquemas. No *Esquema de Alta Resolução*, utilizado na simulação desenvolvida neste trabalho, β é computado localmente e será tão próximo de 1 quanto possível.

Assim, tem-se uma ótima precisão, pois este esquema reduz a primeira ordem quando está próximo da descontinuidade e na corrente livre onde as soluções têm pequenas variações. Um fator que precisa ser salientado é que para quantidades vetoriais, como a velocidade, tem-se um β independente, calculado para cada componente vetorial (CFX, 2005).

2.5.3 Solvers

É a parte principal de um pacote de CFD, pois implementa as técnicas numéricas de solução e seus parâmetros para resolver os problemas físicos do modo apropriado. Resumidamente, os métodos numéricos que formam a base do solver passam pelos seguintes passos:

- Aproximação das variáveis incógnitas do escoamento através de funções simples;
- Discretização, pela substituição das aproximações mencionadas acima nas equações de transporte que governam o escoamento, com manipulações matemáticas subseqüentes;
- Linearização do sistema de equações algébricas resultantes;
- Definição da estratégia de solução do sistema de equações algébricas lineares;
- Solução dos sistemas de equações algébricas lineares.

Existem várias técnicas numéricas de solução e suas diferenças estão associadas à forma com que as variáveis incógnitas são aproximadas e ao procedimento de discretização. Todas essas metodologias numéricas levam a sistemas de equações lineares (com matrizes cheias ou esparsas) com um grande número de equações e, portanto, uma abordagem numérica para a solução de tal sistema se torna necessária (CFX, 2005).

2.5.4 Pós-Processamento

Um grande esforço de desenvolvimento no campo do pós-processamento foi realizado nos últimos anos. Devido aos avanços tecnológicos em software e hardware gráficos, os principais pacotes CFD estão equipados com ferramentas versáteis para visualização de campos escalares e vetoriais, incluindo:

- Visualização da geometria e da malha;
- Gráficos de vetores;
- Gráficos de contorno;
- Gráficos sobre superfícies no espaço tridimensional;
- Visualizações de linhas de fluxo e de trajetórias das partículas.

A maioria dessas ferramentas também inclui a possibilidade de criar animações para facilitar a análise dos resultados. Em adição às diferentes formas de visualização, todos os códigos oferecem arquivos de resultados em diferentes padrões, que podem ser exportados para outro software de visualização.

A modelagem e simulação dos fenômenos associados à dinâmica dos fluidos ganharam um grande impulso com o avanço dos computadores digitais. A modelagem numérica, conhecida dentro dos meios de utilização tais como indústria e laboratórios de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), tem sido largamente empregada.

Estivam (2002) utilizou o código computacional CFX-4 e o programa ICEM-CFD para a simulação numérica do escoamento laminar incompressível entre duas placas planas paralelas e infinitas. A utilização do software tem como objetivo analisar o escoamento do fluido, fornecendo informações mais detalhadas.

Moura e Lima (2005) realizaram simulações, usando o código computacional CFX-3D, em escoamento de petróleo e óleo diesel em conexões tipo T. Este estudo visava aumentar a confiabilidade operacional e a vida útil da malha de dutos, prevendo a existência de vazamentos e obstrução do fluxo de fluido, além de minimizar seus os custos operacionais.

2.6 Metodologia numérica do modelo integral

O modelo integral para o mesmo objeto de pesquisa foi desenvolvido por Farias (2007) e implementado nos programas Engineering Equations Solver (EES) e Matlab,. Sua modelagem baseia-se nas equações da Continuidade, Quantidade de Movimento e Energia de Bernoulli, sendo também utilizado o modelo de Hardy Cross para estimar as velocidades de entrada em cada um dos tubos de elevação e em cada calha divisora, conforme o Gráfico 1.

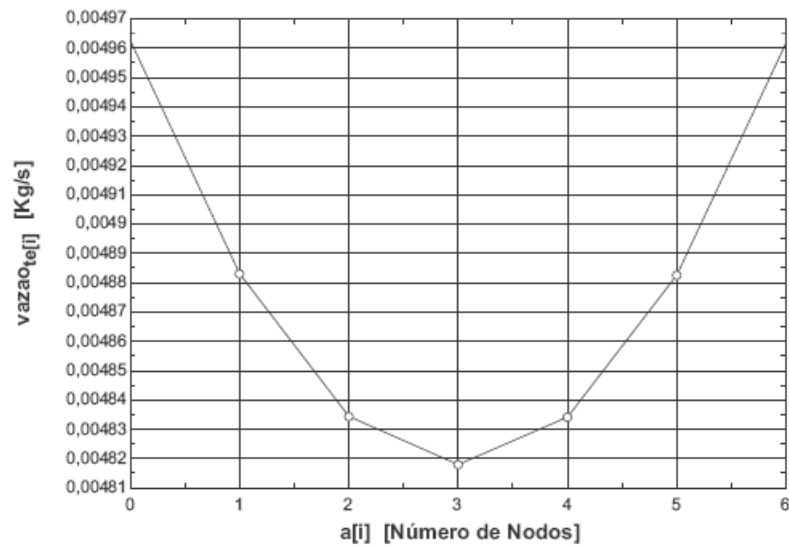


Gráfico 1: Perfil de Vazão nos Tubos de Elevação X Número de Nodos

Fonte: Faria, 2007

Essa metodologia consiste em dividir o coletor solar em nodos e em equações de transição. Para as calhas e segmentos combinadores o balanço de massa é calculado a partir da equação do momentum para cálculo da temperatura da água à saída dos tubos de elevação.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos pelos métodos numérico e experimental na distribuição de temperatura do fluido à saída do coletor solar.

Tabela 1: Distribuição de Temperaturas de Saída do Fluido no Coletor

Vazão	Numérico	Experimental		Delta (Temp. Fluido Exp - Num.)
	Temp. Fluido	Temp. Fluido	Temp. Placa	
0,52	49,78	48,47	55,64	1,31
1,03	39,4	39,16	51,57	0,24
1,55	35,65	35,52	49,21	0,13
2,06	33,76	33,76	47,99	0
2,58	31,37	32,52	47,01	1,15
3,1	31,58	31,67	46,43	0,09
3,61	31,08	30,95	46,22	0,13
4,13	30,64	30,53	45,72	0,11
4,64	30,26	30,18	44,88	0,08

Fonte: Faria, 2007

3 METODOLOGIA NUMÉRICA

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as equações matemáticas usadas para o escoamento, transferência de calor e conservação da massa pelo CFD utilizado, (CFX, 2005) e as etapas das simulações realizadas.

3.2 Equações governantes

O CFX baseia seu cálculo em três equações governantes clássicas, a saber:

Equação da continuidade ou Equação diferencial da conservação da massa

$$\dot{m}_{entra} - \dot{m}_{Sai} + \left. \frac{\Delta m}{\Delta t} \right|_{sist} = \left. \frac{\Delta m}{\Delta t} \right|_{VC} \quad (31)$$

Fox (2001) verifica a hipótese do contínuo, a qual um fluido pode ser tratado como uma distribuição contínua da matéria. Os campos de propriedades são definidos por funções contínuas

das coordenadas espaciais e do tempo. Os campos da massa específica e da velocidade são relacionados através da conservação da massa.

Equação da quantidade de movimento

$$\dot{m}V|_{entra} - \dot{m}V|_{sai} + \sum F = \frac{\Delta}{\Delta t} (mV)_{VC} \quad (32)$$

A equação de conservação da quantidade de movimento para um volume de controle mostra que a vazão mássica que atravessa as fronteiras do volume de controle transporta, por advecção, a propriedade V (quantidade de movimento por unidade de massa) para o interior do volume de controle, (MALISKA, 1995).

Equação da energia

$$\dot{Q}_{entra} - \dot{W}_{Sai} + \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sai} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \Big|_{VC} \quad (33)$$

O primeiro termo do lado esquerdo da eq. 33 representa o calor por difusão que atravessa as fronteiras do volume de controle. O segundo termo representa o trabalho realizado/recebido pelo sistema e, de acordo com a convenção adotada, é positivo quando o trabalho é realizado pelo sistema. Nesse termo está incluído o trabalho por um eixo, ou a energia transferida, por exemplo, por uma resistência elétrica, no interior do sistema, alimentada por energia elétrica externa, ou o trabalho realizado pelas forças viscosas sobre o sistema, entre outras formas de transferência de energia entre o sistema e o exterior. Nesse termo inclui-se, portanto, a chamada geração interna de calor, que, de fato, não se trata de uma geração propriamente, mas sim de uma transformação,

uma vez que não existe geração de energia e, sim, apenas transformação. O terceiro e quarto termos representam a energia líquida advectada para o interior do volume de controle, (MALISKA, 1995).

3.3 Etapas da simulação

De modo a fornecer um meio mais fácil de resolver e analisar problemas de escoamentos de fluidos, a grande maioria de programas computacionais de CFD é subdividida em cinco etapas principais: um gerador de geometria, um gerador de malha, um pré-processador, um processador que obtém a solução e um pós-processador.

No caso do presente trabalho, foram utilizados os seguintes programas:

1. Gerador de geometria: SOLIDWORKS 2004
2. Gerador de malha: Ansys Workbench - Versão 11.0
3. Pré-processamento: CFX-Pré - Versão 11.0
4. Processador: CFX-Solver - Versão 11.0
5. Pós Processador: CFX-Post - Versão 11.0

3.3.1 Geometria do coletor solar utilizado

A primeira informação a ser introduzida no ambiente computacional para resolver um problema de CFD é o domínio de solução do problema. Esse domínio normalmente é implementado através de programas de CAD (Computer Aided Design) que permitem modelar qualquer objeto no espaço tridimensional. Entretanto, neste estudo foi adotado o programa SolidWorks por se tratar de um software de mais fácil construção de desenhos em três dimensões para geometrias de difícil modelagem. O ANSYS Workbench, que também possui um gerador de geometrias, importa diretamente as geometrias geradas pelo SolidWorks.

O coletor solar utilizado neste estudo é mostrado na Figura 14.

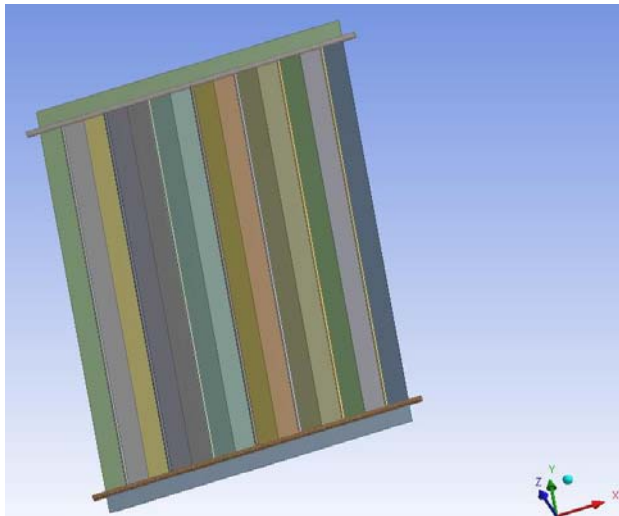


Figura 14: Desenho 3D do coletor utilizado na simulação numérica

Fonte: Figura do programa CFX-11

Os parâmetros geométricos do coletor solar utilizado no experimento são:

Calhas de Coleta e Distribuição:

- Diâmetro interno: 21 mm
- Diâmetro externo: 22 mm
- Comprimento: 1062 mm

Tubos de Elevação:

- Diâmetro interno: 8,72 mm
- Diâmetro externo: 9,52 mm
- Comprimento: 1521 mm

As placas absorvedoras (aletas) que transmitem calor para os tubos de elevação têm as seguintes dimensões:

- 1521 mm de comprimento
- 130 mm de largura
- 0,5 mm de espessura

e as que transmitem calor para as calhas de coleta e distribuição têm :

- 980 mm de comprimento
- 69 mm de largura
- 0,5 mm de espessura

A transferência de calor das placas para o fluido acontece por contato direto entre a placa e o fluido. Nas Figura 15 e Figura 16, mostra-se a placa e os tubos separados para melhor entendimento das diferentes superfícies, definidas anteriormente.

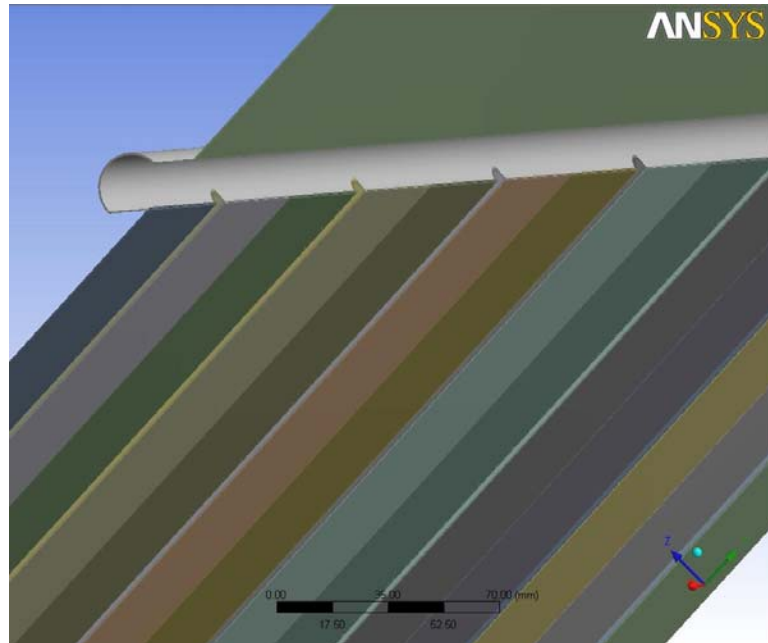


Figura 15: Desenho 3D da placa do coletor utilizado na simulação numérica.

Fonte: Figura do programa CFX-11

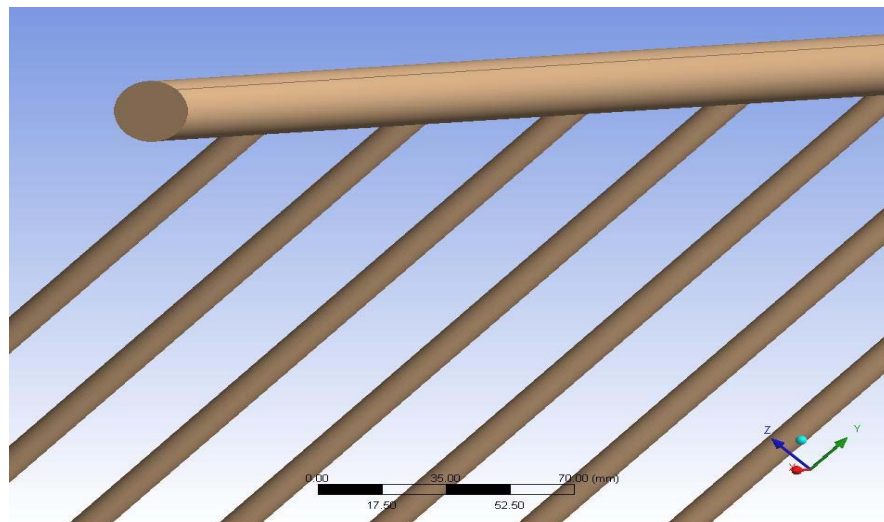


Figura 16: Desenho 3D da área molhada do coletor utilizado na simulação numérica

Fonte: Figura do programa CFX-11

3.3.2 Geração da malha

Conforme mencionado no Capítulo 2, o domínio é criado a partir de sua divisão em pequenos subdomínios, chamados elementos. Nas Figura 17 a Figura 19, são mostradas a geração de malhas para diferentes partes do coletor solar. A Figura 19 indica um refinamento da malha na superfície do tubo, função “inflation”. O gerador de malha do pacote CFX proporciona uma ferramenta de refinamento de malha na proximidade de paredes. Este recurso é denominado inflation e consiste em posicionar camadas de elementos prismáticos gerados paralelamente a superfície sólida próxima da qual se deseja o adensamento.

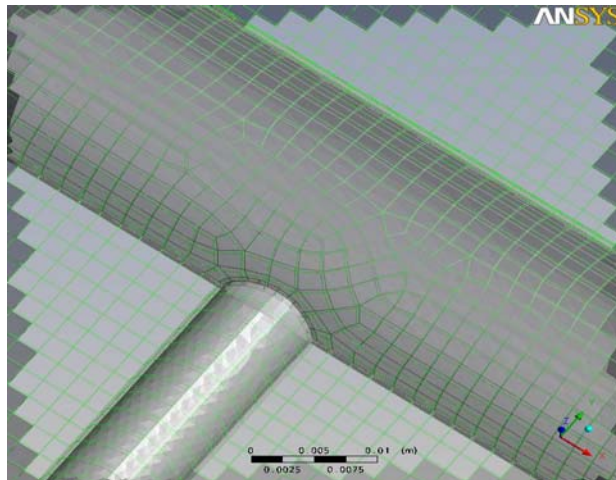


Figura 17: Visualização da malha da placa

Fonte: Figura do programa CFX-11

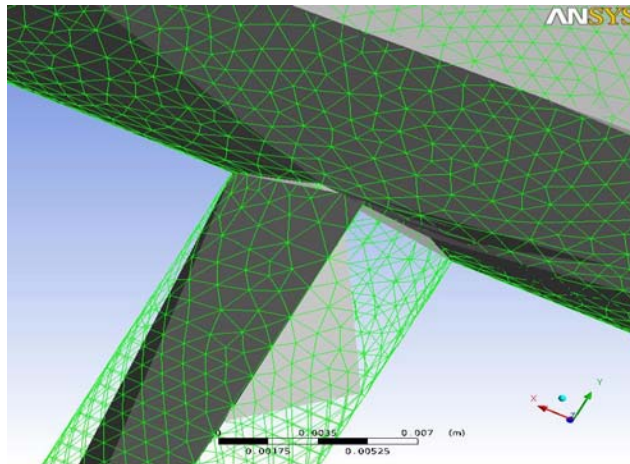


Figura 18: Visualização da malha do tubo

Fonte: Figura do programa CFX-11

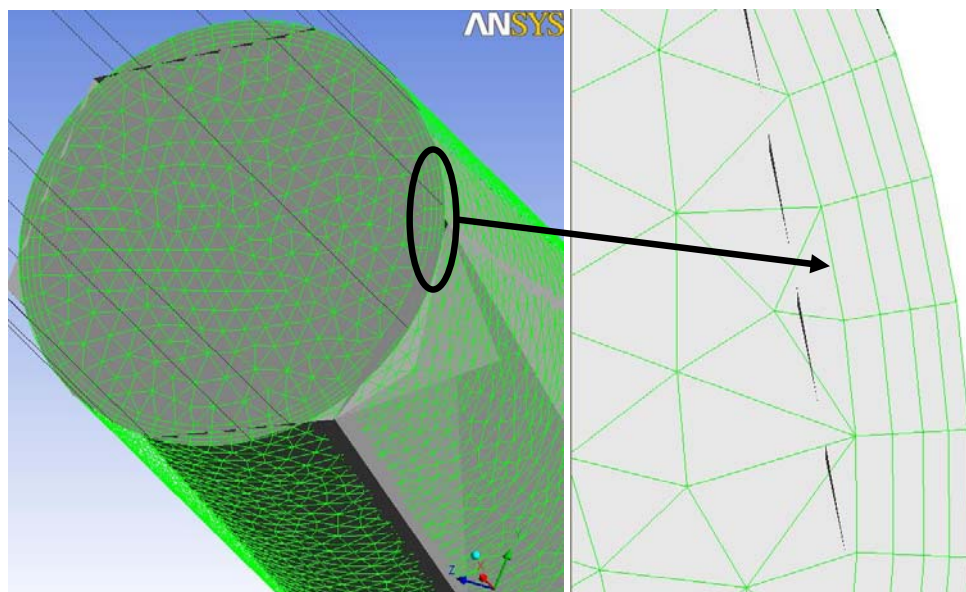


Figura 19: Visualização do “inflation” utilizado na malha do tubo

Fonte: Figura do programa CFX-11

Os dados referentes ao número e forma de elementos gerados são mostrados nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2: Dados da malha do tubo

Malha do tubo		
Número de nós		3.769.126
Número de elementos		13.055.368
	Tetraedros	9.158.328
	Corpo Triangular	3.897.040

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3: Dados da malha da placa

Malha da Placa		
Número de nós		930.432
Número de elementos		446.531
	Hexaedros	446.517
	Corpo Triangular	14

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.3 Pré-Processamento

Neste trabalho, o regime de escoamento é considerado laminar e as vazões mássicas utilizadas na simulação são apresentadas na Tabela 4. Foram divididas em nove vazões de entrada:

Tabela 4: Vazão Mássica de entrada

Número da Simulação	Vazão Mássica [x10⁻² kg/s]
1	0,82
2	1,74
3	2,61
4	3,40
5	4,26
6	5,12
7	6,00
8	6,76
9	7,63

Fonte: Elaborado pelo autor

A vazão recomendada por norma para ensaios de eficiência térmica de coletores solares é de 0,02kg/s por metro quadrado de sua área externa. Como o coletor solar em análise possui uma área de 1,72 m², a vazão mássica normalizada é igual a 3,40x10⁻⁰² kg/s. Com objetivo de validar o modelo desenvolvido para todas as vazões, os testes foram realizados com nove vazões diferentes entre 8,27x10⁻⁰³ kg/s e 7,63x10⁻⁰² kg/s, que é a faixa em que o medidor de vazão, disponível no laboratório.

Condições de contorno

- Pela condição de não-deslizamento, as fronteiras sólidas (placa do coletor solar) têm as componentes do vetor velocidade consideradas nulas ($u = v = w = 0$).

- Para não influenciar o escoamento interno do coletor, o gradiente de pressão de saída foi considerado nulo, assim a pressão externa que faria uma força contrária a saída do fluido do coletor solar não terá efeito.
- Setada a função do CFX “NO SLIP”, a qual a velocidade na parede do tubo do coletor é considerada nula, $U_{\text{parede}}=0$.

A Tabela 5 mostra os níveis de radiação solar incidente no plano do coletor solar.

Tabela 5: Radiação Solar sobre a placa absorvedora do Coletor Solar

Número da Simulação	Radiação [W/m ²]
1	430,77
2	484,62
3	501,67
4	507,88
5	509,99
6	515,92
7	512,14
8	517,00
9	531,01

Fonte: Elaborado pelo autor

Estes valores foram calculados a partir do calor útil absorvido pelo fluido de trabalho obtido nos testes experimentais. Através do cálculo da eficiência do coletor, eq. 1, pode-se calcular o valor da radiação que o fluido absorveu.

Aproximação de Boussinesq

Para resolver o problema de convecção, utilizou-se a aproximação de Boussinesq. O cálculo da massa específica de referência foi feito com a média entre as temperaturas da água à entrada e à saída do coletor solar. Para cada simulação, foi utilizado um valor de referência de acordo com a Tabela 6:

Tabela 6: Temperatura de referência para o cálculo da aproximação de Boussinesq

Número da Simulação	Temperatura de referência [°C]
1	37,75
2	33,42
3	31,56
4	30,68
5	30,05
6	29,59
7	29,19
8	28,95
9	28,75

Fonte: Elaborado pelo autor

Outros parâmetros de simulação

Em todas as simulações, foram consideradas as seguintes premissas:

- Fluido Newtoniano;
- Escoamento laminar;
- Escoamento incompressível;

- Regime permanente.

O número máximo de iterações, assumidas para as simulações, foi de 200, e o resíduo de massa igual a $5,0 \times 10^{-05}$.

Para simular as condições operacionais do coletor solar, adotou-se uma inclinação de 45° , de acordo com a norma europeia para teste de banho para um coletor solar plano ($45^\circ \pm 5$). Assim, foi calculada a influência da gravidade para cada coordenada do sistema, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Decomposição da gravidade

Coordenada	Decomposição da gravidade [m/s ²]
X	0
Y	-6,936
Z	-6,936

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre as contribuições deste trabalho, destaca-se o acoplamento do modelo termodinâmico com um software comercial de CFD – CFX-11. Para tal, uma série de experimentos numéricos e analíticos será realizada através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) e técnicas analíticas, visando à avaliação e validação de um modelo computacional. Os casos simulados procurarão reproduzir a geometria e as condições operacionais de coletores solares planos.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesse capítulo, apresenta-se a metodologia experimental realizada com o objetivo de validar os resultados numéricos obtidos através da simulação computacional com o programa CFX.

O procedimento do experimento foi desenvolvido conjuntamente com o mestre Lucas Faria (FARIA, 2007).

Os ensaios experimentais internos foram realizados com o simulador solar de fluxo contínuo do Green Solar, mostrado na Figura 20, em condições de regime quase-permanente, com base na norma europeia EN 12975-2.

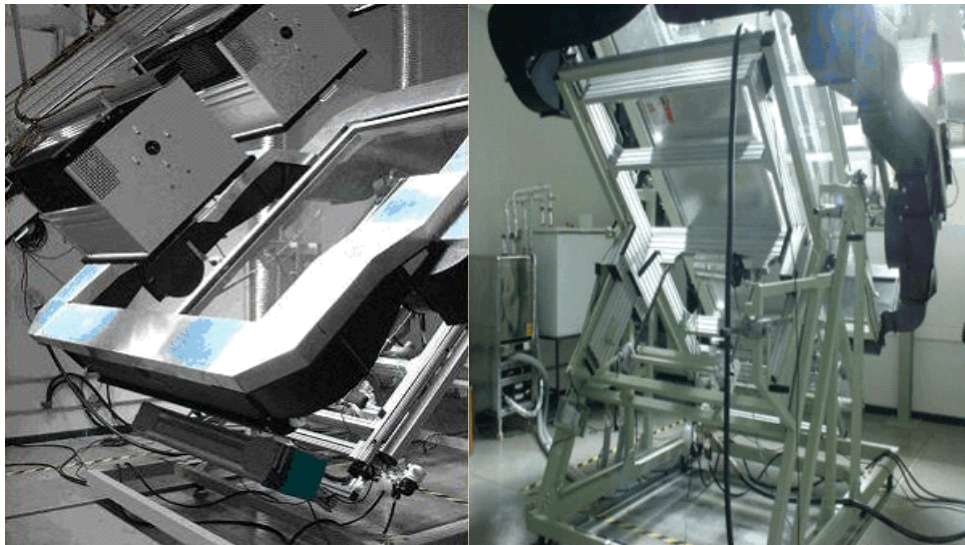


Figura 20: Simulador Solar do Laboratório GREEN Solar da PUC Minas

Fonte: Figura do autor

O simulador é constituído por 8 lâmpadas de vapor metálico, com potência média de 5000W por lâmpada, totalizando 40kW de potência consumida. Este simulador solar dispõe,

ainda, de um céu artificial para reproduzir os níveis das perdas radiantes entre o coletor solar e a abóbada celeste.

O céu artificial possui duas placas de vidro temperado com baixo teor de ferro e com 8 mm de espessura. Entre as duas placas, escoo ar resfriado proveniente de um trocador de calor cujo fluido frio é água gelada. A temperatura do céu é controlada e deve ser mantida pelo menos 6 °C abaixo da temperatura ambiente (DUFFIE; BECKMANN, 1991).

Conforme discutido no Capítulo 2, a velocidade do ar sobre os coletores é um dos fatores determinantes em sua eficiência térmica. Assim, visando maximizar a repetibilidade dos resultados, os coletores foram montados de modo a permitir que o ar passe livremente pela área da abertura, base e laterais do coletor. O sistema gerador de vento opera com velocidades variáveis na faixa de zero até 4,5 m/s.

Durante os testes com os coletores solares foram realizadas três medidas de temperatura: temperatura do fluido à entrada e à saída do coletor e a temperatura ambiente.

Os sensores de temperatura devem ser montados a não mais que 200 mm da entrada e saída do coletor e todas as conexões devem ser bem isoladas termicamente.

O fluido de transferência de calor utilizado no teste do coletor deve ser água ou outro fluido recomendado pelo fabricante do coletor. Neste caso foi utilizada a água como fluido de trabalho.

O coletor solar é fixado na bancada de ensaios (berço do coletor) inclinada de 45° para garantir a incidência normal dos raios luminosos.

A vazão de entrada de acordo com a norma citada anteriormente para coletores solares planos e fechados é igual a 0,02 kg/s para cada metro quadrado de sua área externa. No caso do coletor utilizado no experimento, o valor da área externa é 1,72m².

4.1 Instrumentos utilizados

- (seis) termopares Tipo T Modelo Mineral: para medir temperatura das aletas (incerteza de medição de $\pm 0,2^\circ \text{C}$) (Figura 21).
- Medidor de inclinação (Figura 22).
- Sensores PT 100: código IN083MT para medir a temperatura da água à entrada e à saída do coletor solar. Este arranjo é ilustrado nas Figura 23 e Figura 24. (incerteza de medição de $\pm 0,06^\circ \text{C}$).
- Gerador de vento: para emitir uma velocidade do vento de aproximadamente 1,5 m/s. O gerador é instalado na extremidade inferior da bancada do coletor solar (Figura 25).
- Piranômetro de precisão (Kipp Zonen) de Classe 1: para medir Radiação Solar.
- Medidor de vazão (KHRONE): Código IN171MV, para medir a vazão volumétrica (Figura 26). (incerteza de medição de $\pm 0,2 \text{ l/min}$).
- Sensor tipo PT100: para medir temperatura ambiente. Este sensor foi instalado atrás do coletor no interior de um tubo isolado de modo a impedir a incidência de raios solares sobre ele. Para garantir níveis adequados de ventilação no tubo, é colocado um pequeno ventilador também dentro do tubo de proteção (Figura 27).
- Aquisição de dados foi feita com 02 placas HP Agilent: códigos IN156AD.

Para o ensaio de eficiência térmica instantânea em condições de regime permanente, a norma europeia define o período de aquisição de dados igual a duas vezes a constante de tempo do coletor solar (constante de tempo do coletor em estudo igual a 80 segundos) ou 10 minutos, o que for maior. Ao atingir a condição de regime permanente, os dados foram coletados durante 2

minutos, garantindo assim uma base de dados suficientes para a obtenção de um valor final coerente.



Figura 21: Coletor utilizado no teste experimental mostrando os Termopares instalados na placa.

Fonte: Figura do autor



Figura 22: Medidor de inclinação

Fonte: Figura do autor



Figura 23: Sensor de temperatura na entrada do coletor solar.

Fonte: Figura do autor



Figura 24: Sensor de temperatura na saída do coletor solar.

Fonte: Figura do autor

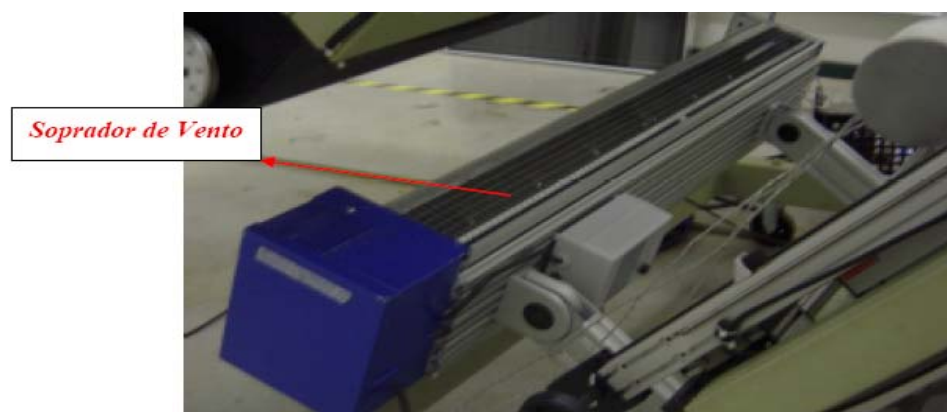


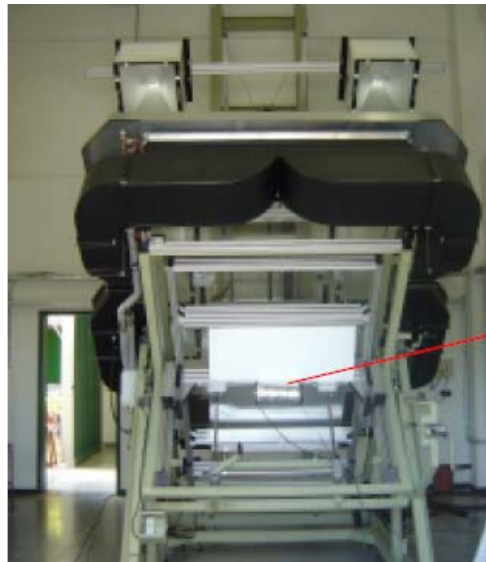
Figura 25: Gerador de vento do simulador solar.

Fonte: Figura do autor



Figura 26: Medidor de vazão.

Fonte: Figura do autor



*Medida da
Temperatura
ambiente (PT-100
protegido contra
radiação)*

Figura 27: Sensor de temperatura ambiente (PT-100).

Fonte: Figura do autor

4.2 Definição do procedimento para o teste experimental

O procedimento definido pelo laboratório GREEN Solar para a realização do teste experimental é descrito a seguir:

- 1) Instalar os sensores de temperatura, termopares tipo T, nas aletas
- 2) Instalar o coletor solar no simulador solar.
- 3) Ajustar a inclinação do coletor solar (45°) em relação ao piso (plano Horizontal).
- 4) Instalar os sensores de temperatura (PT-100) à entrada e saída do coletor.
- 5) Colocar o isolante térmico nas conexões dos sensores de temperatura, para evitar a incidência direta de radiação nestes sensores, distorcendo o resultado final.
- 6) Ajustar o gerador de vento para 1,5 m/s, de acordo com a norma utilizada.
- 7) Ajustar a vazão volumétrica de entrada através do medidor de vazão (KHRONE) para os valores determinados.
- 8) Ligar as lâmpadas para potência de 80% do valor máximo. Esta potência atende ao requisito da norma utilizada que define o mínimo de radiação solar global incidente de 790 W/m^2 , uma vez que utilizando 80% o simulador fornece uma radiação em torno de 840 W/m^2 .
- 9) Aguardar a estabilidade da incidência de radiação emitida pelas lâmpadas (30 minutos).
- 10) Iniciar a coleta de dados do experimento através da placa de aquisição de dados (placas HP Agilent).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelos métodos utilizados neste estudo são apresentados a seguir.

A análise estatística dos resultados está apresentada no Apêndice A, de acordo com Albertazzi, 2002.

A incerteza combinada foi calculada combinando as incertezas da amostra, do instrumento e da placa de aquisição de dados. A incerteza padrão é relativa às medições (amostragem).

5.1 Distribuição de Vazão Mássica nos tubos

5.1.1 *Escoamento Isotérmico*

Tubos de Elevação

O Gráfico 2 apresenta as distribuições de vazões mássicas entre os três métodos apresentados no estudo.

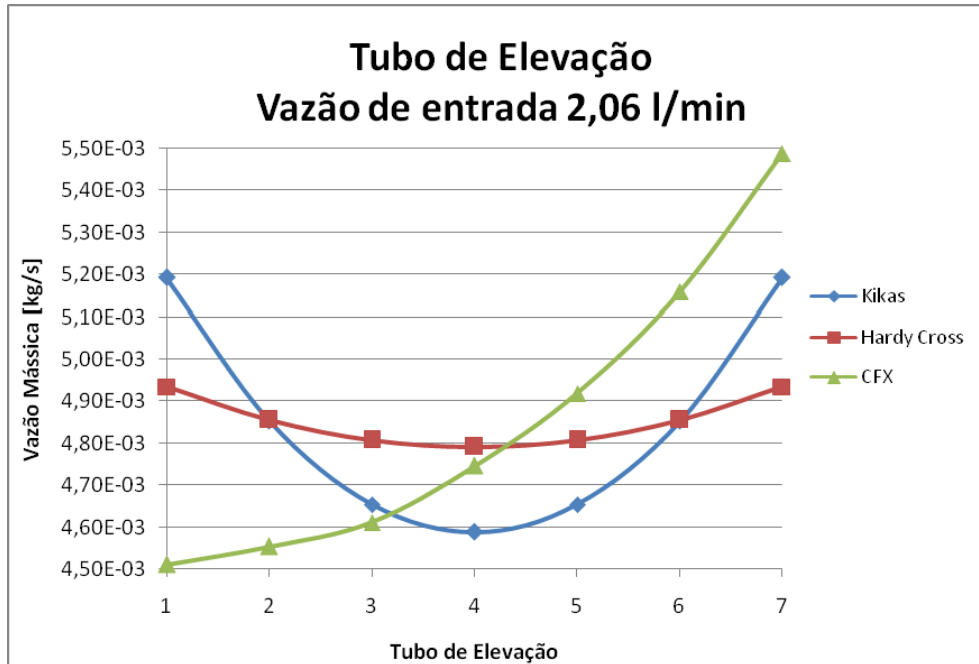


Gráfico 2: Comparação entre as distribuições de vazão mássica nos métodos estudados na vazão 2,06l/min para os tubos de elevação.

Fonte: Elaborado pelo autor

As distribuições de vazão mássica nos métodos de Kikas e Hardy Cross apresentaram perfis simétricos, mas com valores diferentes. Já o perfil obtido pela análise numérica obteve uma distribuição de vazão mássica crescente ao longo do coletor.

Comparando estes resultados com o Figura 9 apresentado pelo método analítico proposto por Lior e Jones (1994) em um modelo de escoamento isotérmico, verifica-se que o perfil traçado pelo programa CFX é qualitativamente o mais aproximado do modelo.

O perfil de escoamento nos tubos de elevação tem uma característica crescente ao longo do coletor devido a influência do atrito sobre o fluido. O fato de o fluido ter maior facilidade de escoar pela calha de distribuição em relação aos tubos de elevação, devido ao atrito presente, o perfil de escoamento nos tubos de elevação tem uma característica crescente ao longo do coletor. Quando o fluido chega ao final da calha a única possibilidade é subir pelo último tubo de

elevação. A Figura 28 representa o escoamento das partículas do fluido nos tubos de um coletor solar.

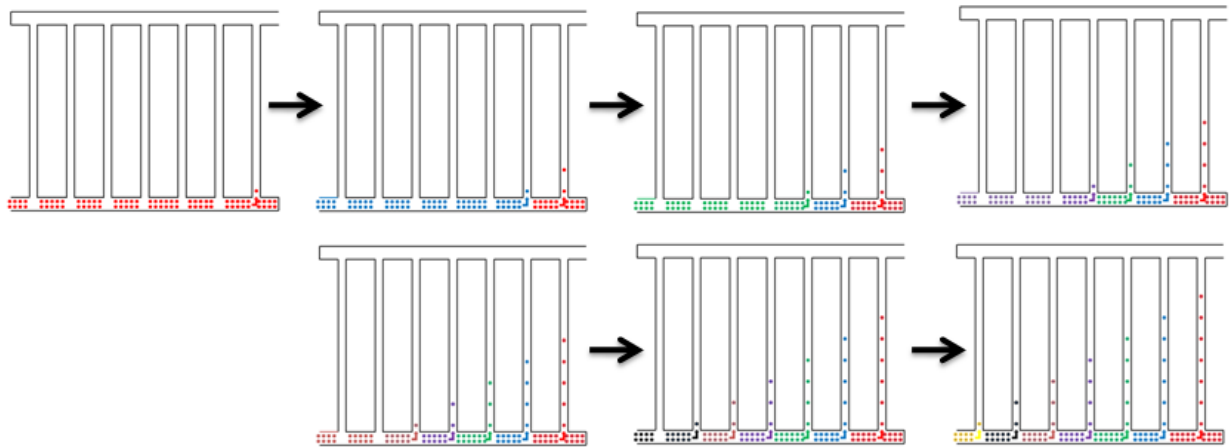


Figura 28: Escoamento de partículas de um fluido em um coletor solar.

Fonte: Figura do autor

Para todos os cálculos e simulações realizadas com as diferentes vazões de entrada, os perfis de distribuição de vazão apresentaram um comportamento semelhante ao apresentado no Gráfico 2.

Calhas de Distribuição e Coleta

Os Gráfico 3 e 4 mostram a comparação entre os perfis das calhas de distribuição e de coleta, respectivamente.

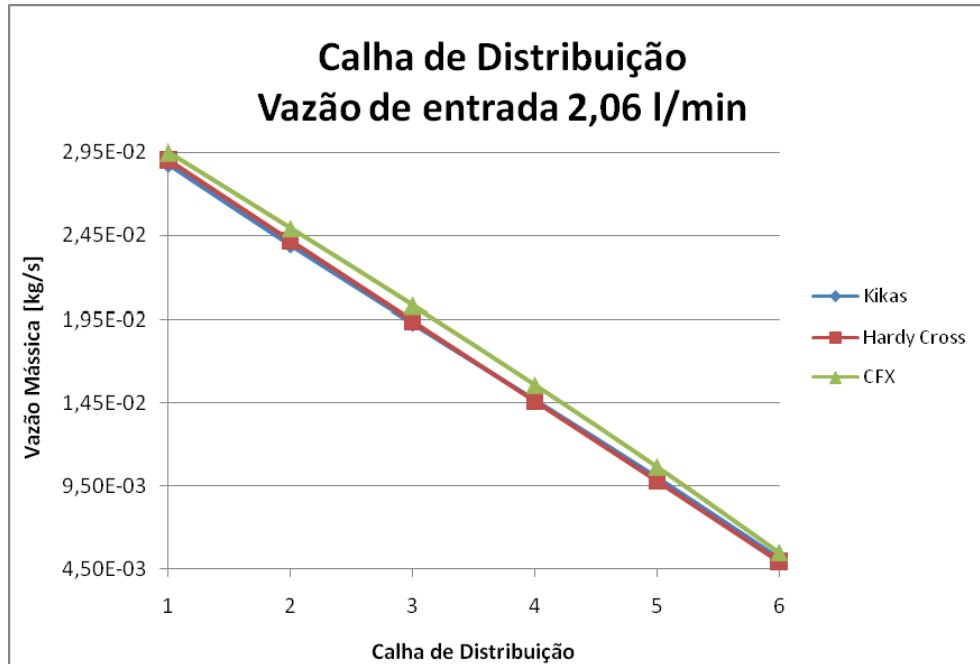


Gráfico 3: Comparação entre as distribuições de vazão mássica nos métodos estudados na vazão 2,06l/min para a calha de distribuição.

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos mostram perfis para a calha de distribuição qualitativamente iguais entre os três métodos, sendo decrescente ao longo do coletor solar. A maior diferença entre os dois métodos analíticos foi de $2,59 \times 10^{-4}$ kg/s. E entre os resultados do método numérico com o método analítico de Kikas (1995) foi de $1,03 \times 10^{-3}$ kg/s.

A *calha de distribuição* recebe este nome, pois tem a função de distribuir a vazão de entrada do coletor para os tubos de elevação. Assim, à medida que o escoamento passa por estes tubos vazão local do fluido na calha decresce.

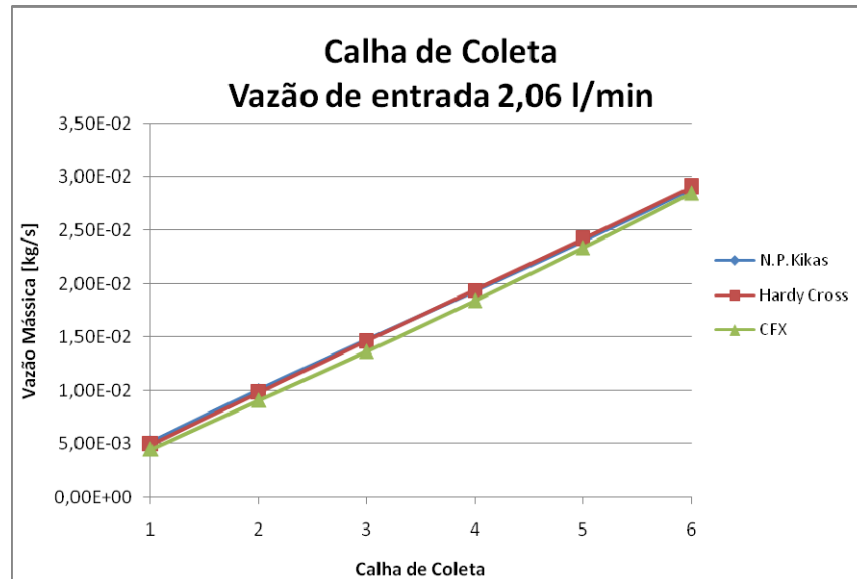


Gráfico 4: Comparação entre as distribuições de vazão mássica nos métodos estudados na vazão 2,06l/min para a calha de coleta.

Fonte: Elaborado pelo autor

Do mesmo modo da calha de distribuição, a calha de coleta também obteve perfis qualitativamente aproximados entre os três métodos utilizados neste estudo. O perfil para esta calha é crescente e recebe a vazão mássica dos tubos de elevação, aumentando seu escoamento ao longo do coletor solar.

A diferença entre os dois métodos analíticos utilizados é de $2,59 \times 10^{-4}$ kg/s, na parte final da calha. E a maior diferença entre o método analítico, Kikas (1995), e o método numérico foi de $1,02 \times 10^{-3}$ kg/s no segmento do meio da calha.

5.1.2 Escoamento com transferência de calor (com incidência de radiação solar)

Tubo de Elevação

O Gráfico 5 mostra a distribuição de vazão mássica nos tubos de elevação para um escoamento com transferência de calor, obtido pelo método numérico.

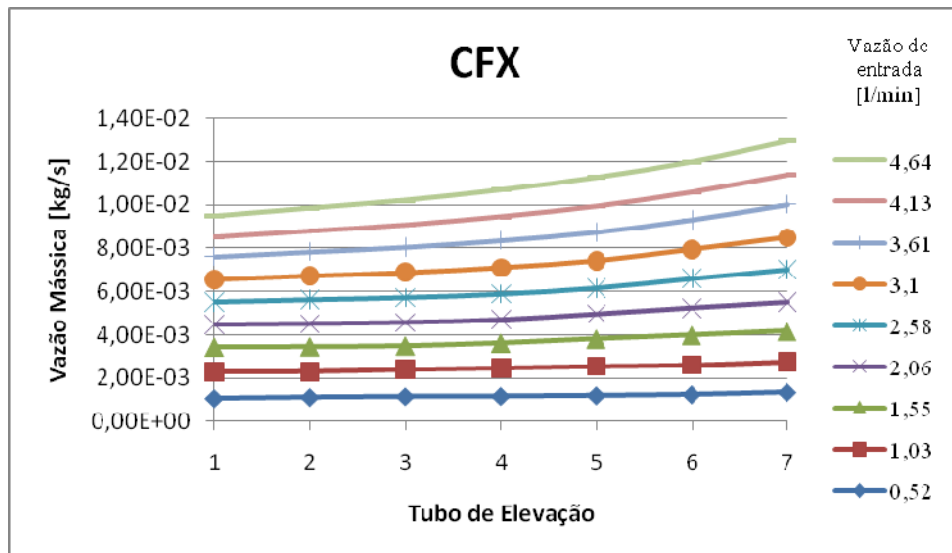


Gráfico 5: Distribuição de vazão mássica no método CFX nos tubos de elevação.

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os Figura 8 e Figura 9, respectivamente, obtidos experimentalmente por Weitbrecht et al (2002) e numericamente por Jones e Lior (1994), pode se constatar que a distribuição de vazão mássica nos tubos de elevação ao longo do coletor é crescente. Verifica-se também que quanto maior a vazão de entrada, maior a inclinação da curva e menor é sua uniformidade de distribuição de vazão entre os tubos de elevação.

Como Weitbrecht et al (2002) realizou experimentalmente um estudo mais detalhado do escoamento interno nos tubos de elevação, então pode se definir que o escoamento real de um coletor solar plano com escoamento tipo “Z”, com incidência de radiação solar é crescente ao longo do coletor. Pode-se então concluir que qualitativamente o perfil traçado pelo software CFX representa uma situação real.

Calhas de Distribuição e Coleta

O Gráfico 6 mostra a distribuição de vazão mássica na calha de distribuição para um escoamento com transferência de calor, obtido pelo método numérico.

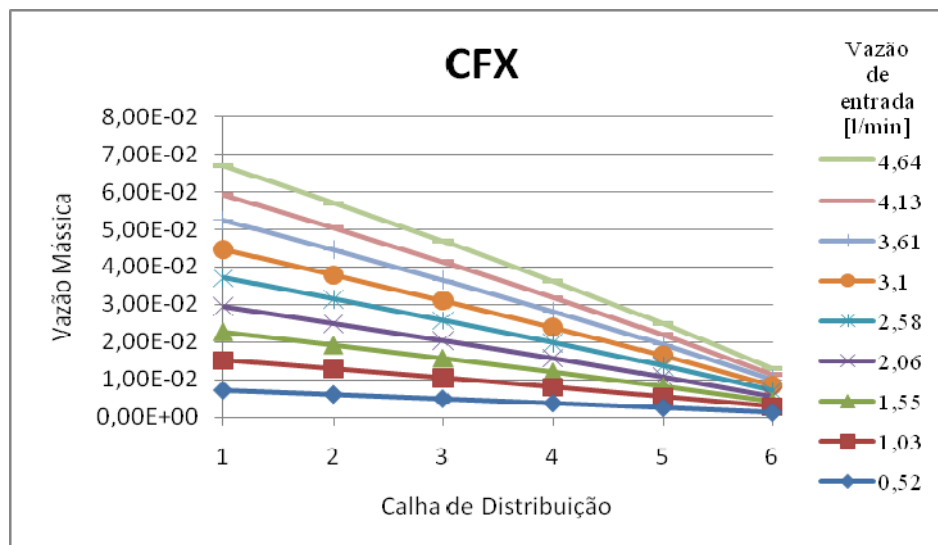


Gráfico 6: Distribuição de vazão mássica no método CFX na calha de distribuição.

Fonte: Elaborado pelo autor

A calha de distribuição obteve uma distribuição decrescente de vazão mássica ao longo do coletor solar. Verifica-se que quanto maior a vazão, maior a inclinação negativa do perfil.

O Gráfico 7 mostra a distribuição de vazão mássica na calha de coleta para um escoamento com transferência de calor, obtido pelo método numérico.

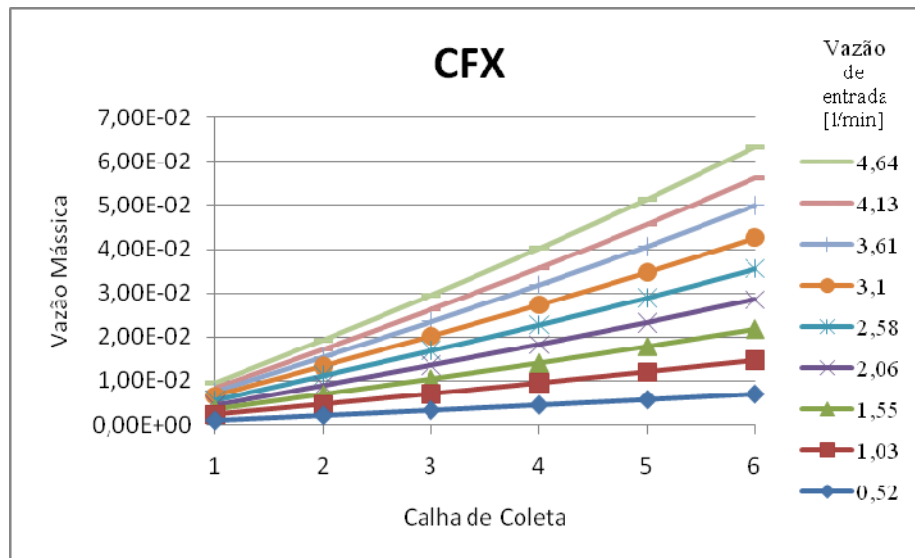


Gráfico 7: Distribuição de vazão mássica no método de CFX na calha de coleta.

Fonte: Elaborado pelo autor

A calha de coleta obteve perfil de distribuição de vazão mássica crescente, pois esta calha recebe a vazão dos tubos de elevação ao longo do coletor solar. A medida que aumenta a vazão de entrada, aumenta a inclinação positiva da curva.

Distribuição de vazão mássica no método CFX

O Gráfico 8 mostra a comparação entre os perfis de distribuição de vazão mássica nas simulações computacionais com escoamento com incidência de radiação e escoamento isotérmico.

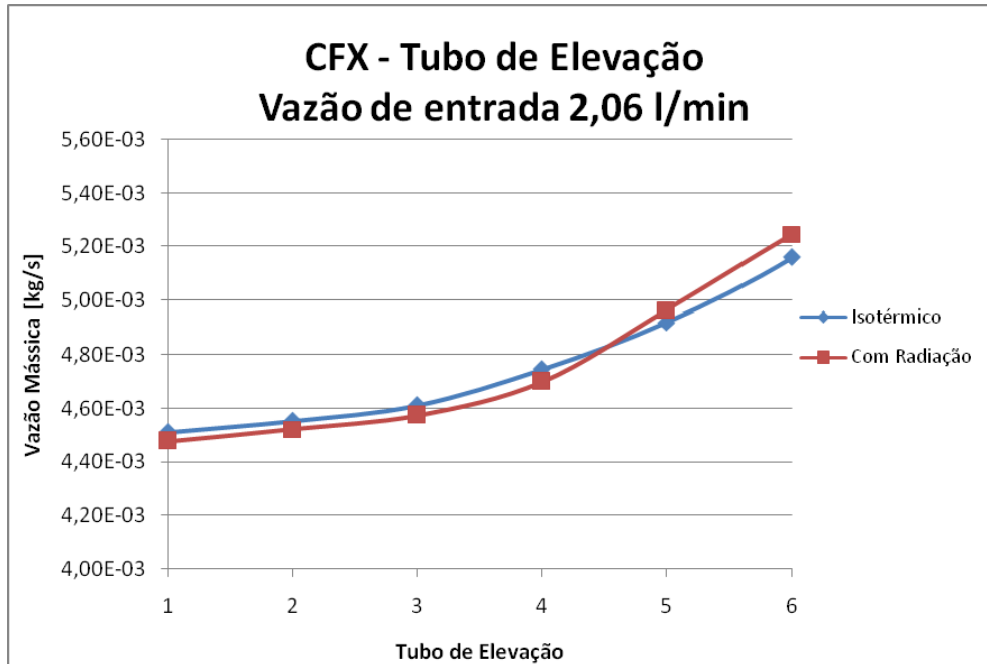


Gráfico 8: Distribuição de vazão mássica nos tubos de elevação para as simulações computacionais com escoamento com incidência de radiação e escoamento isotérmico.

Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 8 pode-se observar que a radiação solar tem pouca influência na distribuição do escoamento em relação à influência das resistências hidráulicas nos tubos de elevação. A pequena diferença entre os valores obtidos pela simulação é devida à diferença de densidade do fluido naquele ponto causada pelo aumento da temperatura.

A maior diferença entre os perfis com uma vazão de entrada de 2,06 l/min ocorreu no tubo de elevação 6 com valor de $8,58 \times 10^{-5}$ kg/s e a menor diferença aconteceu no tubo de elevação 7 com o valor de $1,82 \times 10^{-5}$ kg/s.

5.2 Temperatura do coletor solar

A Figura 29 mostra os pontos de coleta de temperatura para os métodos experimental e numérico.

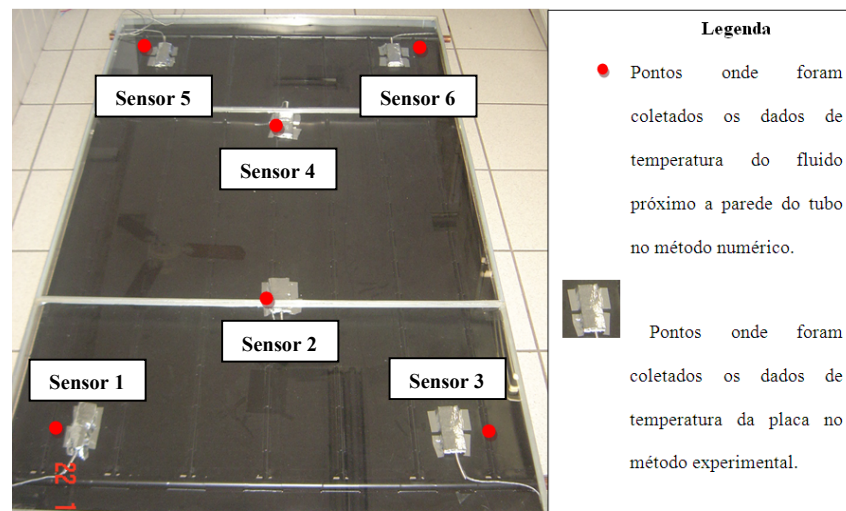


Figura 29: Pontos de coleta de temperatura para os métodos experimental e numérico.

Fonte: Figura do autor

5.2.1 Escoamento com transferência de calor (com incidência de radiação solar)

Tubo de Elevação

Os Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 são resultantes das diferenças de temperatura entre a entrada e saída dos tubos de elevação 1, 4 e 7, respectivamente, para um escoamento com transferência de calor, obtidos pelos métodos numérico e experimental.

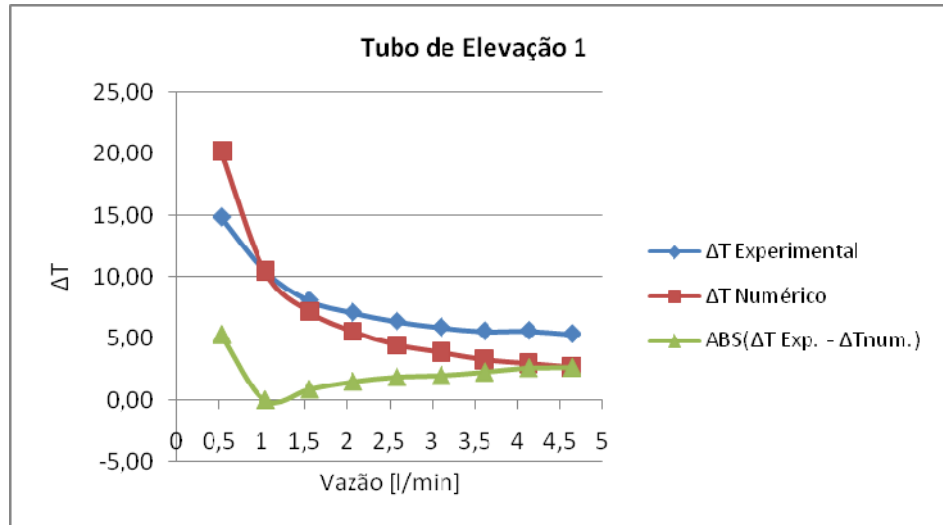


Gráfico 9: Distribuição de temperatura do tubo de elevação 1.

Fonte: Elaborado pelo autor

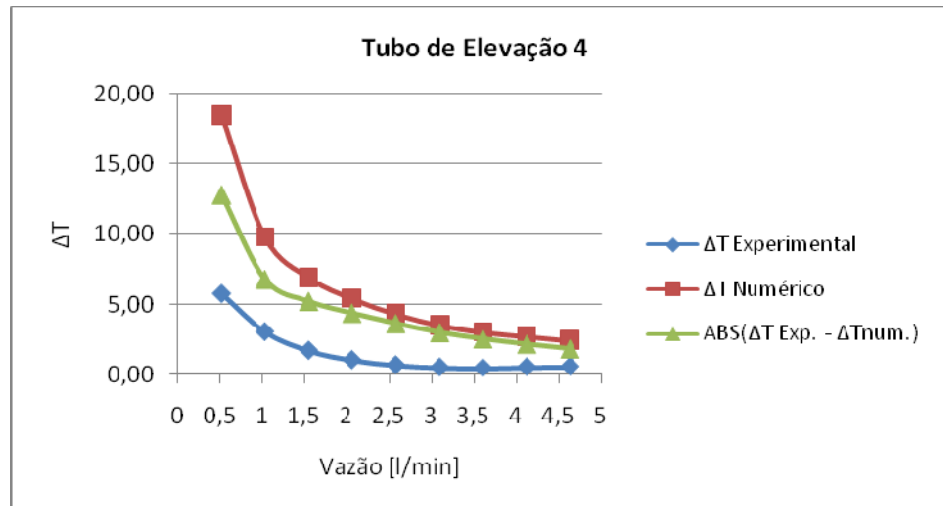


Gráfico 10: Distribuição de temperatura do tubo de elevação 4.

Fonte: Elaborado pelo autor

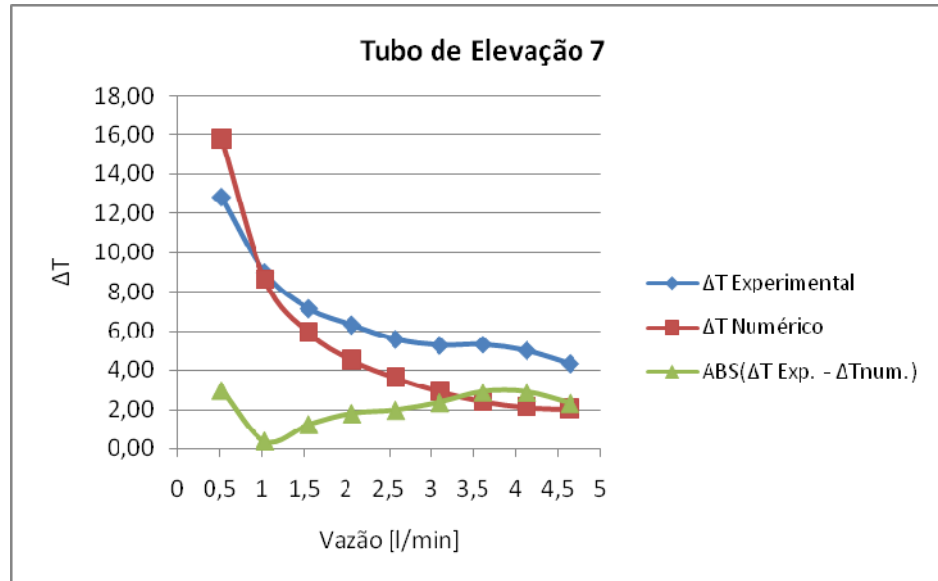


Gráfico 11: Distribuição de temperatura do tubo de elevação 7.

Fonte: Elaborado pelo autor

Os perfis obtidos pelos dois métodos decrescem à medida que aumenta a vazão de entrada. As temperaturas coletadas no método experimental foram obtidas pelos termopares instalados nas aletas do coletor solar e a temperatura obtida pelo CFX foi do próprio fluido, de acordo com a Tabela 8.

As Tabelas 9 e 10 contém os resultados dos métodos experimental e numérico, respectivamente, da distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação.

Tabela 8: Distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação obtida experimentalmente.

	Resultados Experimentais					
	Tubo de Elevação 1		Tubo de Elevação 4		Tubo de Elevação 7	
Vazão [l/min]	Sensor 01 (entrada) (°C)	Sensor 05 (saída) (°C)	Sensor 02 (entrada) (°C)	Sensor 04 (saída) (°C)	Sensor 03 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)
0,52	41,02	55,87	43,54	49,27	42,82	55,64
1,03	40,77	51,27	41,87	44,89	42,61	51,25
1,55	40,42	48,51	41,15	42,84	42,08	48,70
2,06	40,18	47,29	40,86	41,88	41,70	47,37
2,58	39,93	46,33	40,60	41,25	41,46	46,32
3,1	39,68	45,59	40,34	40,84	41,18	45,69
3,61	39,48	45,08	40,09	40,53	40,93	45,46
4,13	39,30	44,93	39,80	40,33	40,74	44,91
4,64	39,10	44,47	39,48	40,04	40,56	44,01

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9: Distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação obtida numericamente.

	Resultados Numéricos					
	Tubo de Elevação 1		Tubo de Elevação 4		Tubo de Elevação 7	
Vazão [l/min]	Sensor 01 (entrada) (°C)	Sensor 05 (saída) (°C)	Sensor 02 (entrada) (°C)	Sensor 04 (saída) (°C)	Sensor 03 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)
0,52	27,55	47,75	28,75	47,25	30,45	46,25
1,03	28,05	38,55	28,85	38,65	29,35	37,95
1,55	27,85	35,05	28,25	35,15	28,65	34,55
2,06	27,85	33,45	27,95	33,35	28,45	32,95
2,58	27,75	32,25	27,85	32,15	28,35	31,95
3,1	27,65	31,55	27,75	31,25	28,35	31,25
3,61	27,55	30,85	27,65	30,65	28,25	30,65
4,13	27,45	30,45	27,55	30,25	28,15	30,25
4,64	27,45	30,15	27,45	29,85	27,95	29,95

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10: Diferença da distribuição de temperatura ao longo dos tubos de elevação entre o método experimental e numérico.

Vazão [l/min]	Diferença entre o método experimental e numérico					
	Tubo de Elevação 1		Tubo de Elevação 4		Tubo de Elevação 7	
	Sensor 01 (entrada) (°C)	Sensor 05 (saída) (°C)	Sensor 02 (entrada) (°C)	Sensor 04 (saída) (°C)	Sensor 03 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)
0,52	13,47	8,12	14,79	2,02	12,37	9,39
1,03	12,72	12,72	13,02	6,24	13,26	13,30
1,55	12,57	13,46	12,90	7,69	13,43	14,15
2,06	12,33	13,84	12,91	8,53	13,25	14,42
2,58	12,18	14,08	12,75	9,10	13,11	14,37
3,1	12,03	14,04	12,59	9,59	12,83	14,44
3,61	11,93	14,23	12,44	9,88	12,68	14,81
4,13	11,85	14,48	12,25	10,08	12,59	14,66
4,64	11,65	14,32	12,03	10,19	12,61	14,06

Fonte: Elaborado pelo autor

Não pode ser feita uma comparação quantitativa entre os resultados apresentados na Tabela 10 e os dados coletados experimental e numericamente. Verifica-se uma diferença notável entre os pontos coletados experimentalmente e numericamente. Esta diferença ocorre devido à localização dos pontos nas coletas dos dados no coletor e o fato de haver condução de calor entre a placa e o fluido. Conforme a Figura 29 observa-se que os pontos coletados experimentalmente foram obtidos pelos PT100 instalados na placa do coletor e os resultados da simulação numérica foi retirado do fluido próximo a placa. O maior desvio médio absoluto para a entrada do tubo de elevação 4 foi de 0,49 °C e 1,89 °C para a saída. Analisando a média das diferenças dos sensores de temperatura entre os métodos experimental e numérico, observa-se que o menor valor obtido foi de 8,15°C e o maior valor de 13,73°C, ou seja, estes valores representam o mínimo e o máximo da perda de temperatura entre o fluido e a placa deste coletor solar.

Calhas de Distribuição e Coleta

O Gráfico 12 é resultante da temperatura da calha de distribuição para um escoamento com transferência de calor, obtido pelos métodos numérico e experimental.

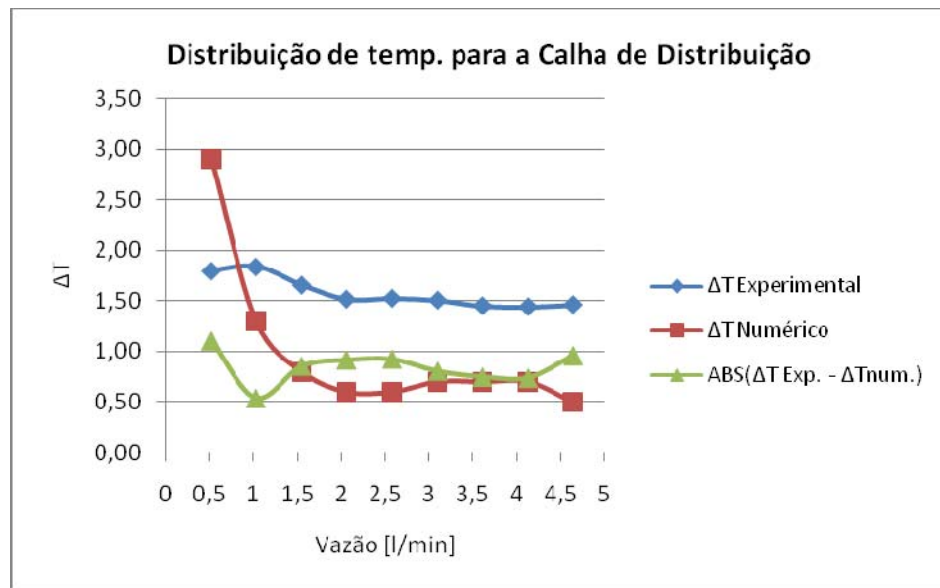


Gráfico 12: Distribuição de temperatura da calha de distribuição.

Fonte: Elaborado pelo autor

À medida que a vazão aumenta o ganho de temperatura diminui. Na calha de distribuição a média da diferença entre os valores obtidos nos dois métodos chegou a 0,84°C. A Tabela 11 mostra os valores das temperaturas nos sensores 1 e 3 obtidos experimentalmente e numericamente.

Tabela 11: Distribuição de temperatura na calha de distribuição nos métodos experimental e numérico.

Vazão [l/min]	Resultados Experimentais		Resultados Numéricos	
	Sensor 01 (entrada) (°C)	Sensor 03 (saída) (°C)	Sensor 01 (entrada) (°C)	Sensor 03 (saída) (°C)
0,52	41,02	2,82	27,55	30,45
1,03	40,77	42,61	28,05	29,35
1,55	40,42	42,08	27,85	28,65
2,06	40,18	41,70	27,85	28,45
2,58	39,93	41,46	27,75	28,35
3,1	39,68	41,18	27,65	28,35
3,61	39,48	40,93	27,55	28,25
4,13	39,30	40,74	27,45	28,15
4,64	39,10	40,56	27,45	27,95

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12: Diferença de distribuição de temperatura na calha de distribuição entre o método experimental e numérico.

Vazão [l/min]	Diferença entre o método experimental e numérico	
	Sensor 05 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)
0,52	13,47	12,37
1,03	12,72	13,26
1,55	12,57	13,43
2,06	12,33	13,25
2,58	12,18	13,11
3,1	12,03	12,83
3,61	11,93	12,68
4,13	11,85	12,59
4,64	11,65	12,61

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Tabela 12 observa-se que a média de temperatura da diferença entre o método experimental e numérico na entrada e saída da calha de distribuição foi de 12,30 °C e 12,90 °C, respectivamente.

Calha de Coleta

O Gráfico 13 mostra a temperatura da calha de coleta para um escoamento com transferência de calor, obtido pelos métodos numérico e experimental.

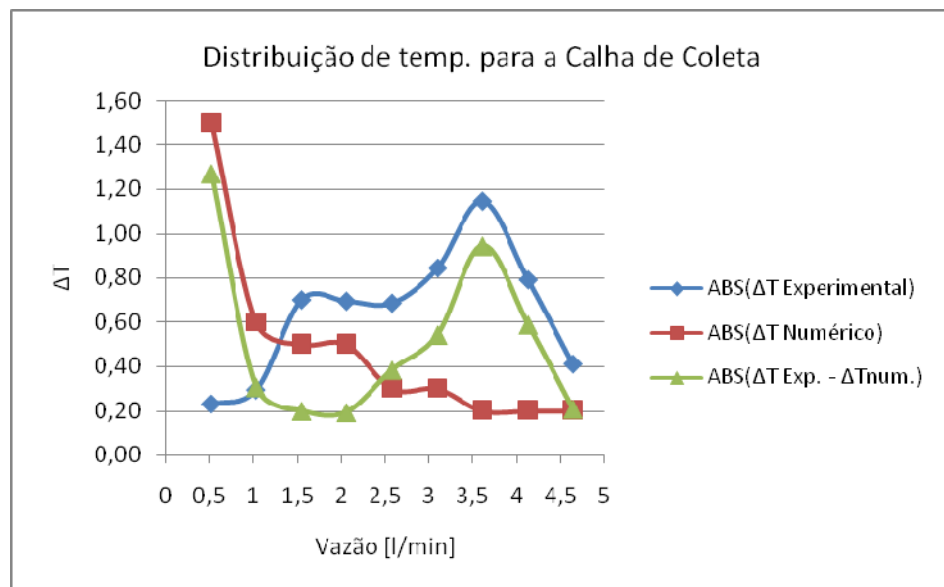


Gráfico 13: Distribuição de temperatura da calha de coleta.

Fonte: Elaborado pelo autor

Na calha de coleta a média do valor obtido entre a diferença dos dois métodos foi de 0,52°C. Observa-se que à medida que aumenta a vazão, o ganho de energia do fluido também diminui conforme o ocorrido nos outros tubos.

Tabela 13: Distribuição de temperatura na calha de coleta nos métodos experimental e numérico.

Vazão [l/min]	Resultados Experimentais		Resultados Numéricos	
	Sensor 05 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)	Sensor 05 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)
0,52	55,87	55,64	47,75	46,25
1,03	51,27	51,25	38,55	37,95
1,55	48,51	48,70	35,05	34,55
2,06	47,29	47,37	33,45	32,95
2,58	46,33	46,32	32,25	31,95
3,1	45,59	45,69	31,55	31,25
3,61	45,08	45,46	30,85	30,65
4,13	44,93	44,91	30,45	30,25
4,64	44,47	44,01	30,15	29,95

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14: Diferença de distribuição de temperatura na calha de coleta entre os métodos experimental e numérico.

Vazão [l/min]	Diferença entre o método experimental e numérico	
	Sensor 05 (entrada) (°C)	Sensor 06 (saída) (°C)
0,52	8,12	9,39
1,03	12,72	13,30
1,55	13,46	14,15
2,06	13,84	14,42
2,58	14,08	14,37
3,1	14,04	14,44
3,61	14,23	14,81
4,13	14,48	14,66
4,64	14,32	14,06

Fonte: Elaborado pelo autor

A média da diferença entre os métodos nos sensores 5 e 6 foram, respectivamente, 13,25°C e 13,73°C. A explicação para os valores obtidos para a vazão 0,52 l/min estar fora das incertezas é a dificuldade de manter a vazão de entrada constante no experimento.

Observa-se que a maior diferença entre o valor experimental e o valor numérico é de 14,66°C e o menor valor de 8,12 °C. Este valor refere-se à perda de energia entre a placa e o fluido.

5.3 Temperatura de Saída do coletor

5.3.1 Escoamento com Transferência de Calor (com incidência de radiação solar)

No APÊNDICE A, apresentam-se os cálculos das incertezas combinadas para cada medida de temperatura em função da vazão do fluido. Os valores obtidos encontram-se entre 0,15 e 0,08°C.

A Tabela 15 descreve a diferença entre os métodos experimental e numérico para temperatura de saída do coletor solar.

Tabela 15: Diferença de temperatura de saída do coletor entre os métodos experimental e numérico

Diferença de temperatura de saída entre Experimental e Numérico									
Vazão [l/min]	0,52	1,03	1,55	2,06	2,58	3,1	3,61	4,13	4,64
ΔT_s [°C]	0,52	-0,01	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,00	-0,01	-0,01

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo apresentado pelo programa CFX foi comparado com os resultados experimentais realizados neste estudo e a diferença apresentada entre os valores de saída para os dois métodos foram bem aproximados. Analisando os resultados, verifica-se que com exceção da vazão de 0,52 l/min os valores obtidos pela simulação numérica foram muito próximos de zero e está dentro da incerteza calculada. A explicação para a vazão de 0,52 l/min ter fornecido um diferença de 0,52°C é devido à dificuldade de manter constante este baixo valor de vazão de entrada durante o experimento.

6 CONCLUSÕES

Dentre as contribuições deste trabalho, destaca-se o acoplamento do modelo termodinâmico com um software comercial de CFD – CFX-11. Para tal, uma série de experimentos numéricos e analíticos foram realizadas através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) e técnicas analíticas, visando à avaliação e validação de um modelo computacional. Os casos simulados procuraram reproduzir a geometria e as condições operacionais de coletores solares planos.

Nesse estudo, pode-se constatar que as técnicas da fluidodinâmica computacional são confiáveis para obtenção de soluções acuradas, onde o modelo computacional criado apresentou resultados coerentes e satisfatórios.

A primeira parte do estudo envolveu simulações preliminares de um escoamento isotérmico em um coletor solar, obtendo assim a influência da fluidodinâmica no escoamento. Na segunda parte, tem-se a simulação numérica de um modelo que envolveu simultaneamente a fluidodinâmica e a transferência de calor. A terceira parte do estudo tratou da validação do modelo através da comparação com resultados obtidos experimentalmente em um simulador solar.

Na análise realizada para um escoamento isotérmico e em regime permanente através dos métodos utilizados, numéricos e analíticos, já descritos ao longo deste estudo, os resultados obtidos mostraram diferenças nos perfis traçados. Para definir qual perfil obtido representa uma situação real, foi necessário comparar estes perfis com o obtido analiticamente demonstrado por Jones e Lior (1994) e experimentalmente por Weitbrecht et al (2002). Através desta comparação qualitativa, pode-se observar que o resultado obtido pela simulação numérica representa uma distribuição real, contrário dos métodos analíticos.

Quando comparado o perfis traçados numericamente com escoamento isotérmico e com transferência de calor observa-se que a resistência hidráulica é a principal responsável pela distribuição de vazão mássica nos tubos de elevação.

Analisando a temperatura de saída do coletor solar, observa-se uma média de $0,07^{\circ}\text{C}$ entre os dados experimental e numérico. Deve-se destacar que tal diferença é inferior à incerteza de medição da temperatura pelo PT-100 ($0,06^{\circ}\text{C}$). Através destes dados pode-se afirmar que o modelo gerado pelo software representa uma situação real de absorção de energia em um coletor solar.

Faria (2007) também realizou o mesmo estudo experimental e comparou com um método numérico integral, este estudo forneceu uma média de $0,36^{\circ}\text{C}$ entre as temperaturas de saída dos dois métodos. O resultado do CFX obteve um erro menor devido a distribuição de vazão nos tubos de elevação, onde Faria (2007) usou uma distribuição calculada pelo método de Hardy Cross, ou seja, uma distribuição simétrica, já o modelo do CFX forneceu um escoamento crescente ao longo dos tubos de elevação, onde este perfil representa um escoamento real nos tubos de elevação.

7 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS

A seguir estão listadas algumas propostas para estudos futuros:

- Refinar o modelo proposto.
- Realizar experimentos com mais sensores instalados no coletor, aumentando assim a captura de outros dados não obtidos neste estudo, como a vazão mássica nos tubos de elevação.
- Analisar mais profundamente o escoamento interno dos tubos de um coletor solar, obtendo assim mais informações para comparação entre os métodos utilizados.
- Realizar estudo em outro tipo de coletor solar, criando assim outros modelos numéricos.
- Estudar mais profundamente a malha gerada pelo software, utilizando mais recursos computacionais.
- Realizar o estudo sob diversas condições de tempo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 2342/1985: **Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors**. Brasília: INMETRO, 2000.

ADECHY, D.; ISSA, R.I. **Modelling of Annular flow through pipes and T-junctions**. London: Science Direct, v.33, n.2, p.289-313, Feb. 2004.

ALBERTAZZI, Armando. **Metrologia parte 1**. Universidade Federal de Santa Catarina: Departamento de engenharia mecânica, Apostila, 2002.

AYALA, David Gudiño; VILLALOBOS, Juan Jorge. **Notas sobre el curso de energia solar**. Tlaquepaque/México: ITESO, 1995.

BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: UFMG, 2003.

BAPTISTA, Alessandra. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARCELLOS, André Luiz. **Análise termoeconômica de coletores solares planos**. PUC Paraná, Curitiba, PR. 2003. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

BEZERRA, Arnaldo Moura. **Você sabe como funciona um Aquecedor Solar de Água?**. Disponível em: <<http://mourabezerra.sites.uol.br>>. Acesso em: 22 set. 2006.

CFX, **MANUAL GUIDE**, CFX International, Oxon, v.10, 2005.

CHIOU, J. P.. **The effect of nonuniform fluid flow distribution on the thermal performance of solar collector**. Washington: Solar energy, v.29, n.6, p.487-502, 1982.

COOK, Malcom J.; LOMAS, Kevin J.. **Guidance on the use of computational fluid dynamics for modelling buoyancy driven flows**. Leicester: Montfort University, 1997.

CUNHA, Alan Cavalcanti da et al.. **Estudo numérico do escoamento superficial na foz do rio Matapi** - Costa interna estuarina do Amapá. Curitiba: ENCIT06, 2006.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, J.; WILLIAM A. **Solar engineering of thermal processes**, 2. ed. Lakewood: John Wiley & Sons Inc., 1991.

DUNKLE, R.V.; DAVEY, E.T., **Flow Distribution in Solar Absorber Banks**. Melbourne: International Solar Energy Society Conference, n.4/35, 1970.

ESTIVAM, Diego Alexandre. **Simulação numérica do escoamento laminar completamente desenvolvido entre duas placas planas paralelas infinitas**. Florianópolis : SINMEC, 2002.

FARIA, Lucas Paglioni. **Modelagem matemática e avaliação experimental da uniformidade do escoamento da água em coletores solares planos**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FOX, Robert W.; McDonald, Alan T.. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 5. ed. LTC, 2001.

GARCIA, César Rabuski. **Simulação numérica de um sistema de armazenamento de calor em estufas de plasticultura**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GHISI, Eneidir. **Instalações Prediais de Água Fria**. Universidade Federal de Santa Catarina: Apostila, 2004.

INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem - Sistemas e Equipamentos para Aquecimento Solar de Água**, Edição 05/06 (2006). Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/PBE12.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2008.

JONES, G. F.; LIOR, Noam. **Flow distribution in manifolded solar collectors with negligible buoyancy effects**. Philadelphia: Solar Energy, v.52, n.3, p.289-300, 1994.

KIKAS, N. P. **Laminar flow distribution in solar systems**. Thessaloniki: Solar Energy, v.54, n.4, p.209-217, 1995.

KLEIN, S. A.. **Calculation of flat-plate collector loss coefficients**. Wisconsin: Solar energy, v.17, p.79-80, 1974.

KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A.. **A design procedure for solar air heating systems**. Wisconsin: Solar Energy, v.19, p.509-512, 1976.

KLEIN, S. A.. **Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces**. Wisconsin: Solar energy, v.19, p.325-329, 1976.

LAVICH, R. R. da et al.. **Simulação de uma coluna de adsorção em leito fixo para a remoção de poluentes da indústria de petróleo e gás**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 2, 2003, Florianópolis.

MARE, Thierry; VOICU, Ionut; MIRIEL, Jacques. **Numerical and experimental visualization of reverse flow in an inclined isothermal tube**. Rennes: Experimental Thermal and Fluid Science, v.30, n.1, p.9-15, out. 2005.

MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, 1. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MENEZES, Renato. **Avaliação numérica do escoamento em um coletor solar**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENERGIA SOLAR, 1, 2007, Fortaleza.

MESQUITA, C.S. Lucio; PEREIRA, M.D. Elizabeth. **An Overview of Solar Water Heating in Brazil** – Germany: ESTEC Freiburg, p. 19-20, jun, 2007.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME**. Balanço Energético Nacional, 2006.

NOVAKOSKI, Marcos José. **Cálculo de pressões e vazões em redes hidráulicas**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PEREIRA, E.M.D., ARREGUY, E.G., DIAS, D.P. **Relatório Técnico de Ensaios de Coletores Solares Abertos**, Belo Horizonte: Fumarc, 2008.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, PROCEL / ELETROBRÁS. **Resultados das ações de eficiência energética**, 2007. Disponível em: <www.eletrobras.gov.br/ELB/procel/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp>. Acesso em: 05 fev. 2008.

RIBEIRO, Diogo Eduardo. **Simulação numérica de aerofólios de alta sustentação**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 9, 2002, Itajubá.

SAGLIETTI, J. R. C.; ESCOBEDO, J. F.; SILVA, L. A.. **Coletor Solar de Polietileno - Uma Alternativa de Baixo Custo**. Jaboticabal: Ciência Rural, v.17, n.1, p.32-43, 1997.

SILVA, Rodrigo Moura; LIMA, Antonio Gilson Barbosa. **Simulação do escoamento isotérmico de petróleo e óleo diesel em junções tipo "T"**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P & D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Campina Grande.

SILVEIRA, Rafael A.; BORTOLI, Álvaro L. **Simulação numérica do escoamento bidimensional sobre uma geometria automobilística**. Florianópolis: Computational Methods in Engineering, 1999.

VENZON Márcio, **Proposta de utilização de energia solar para aquecimentos de água e fluentes para linhas tratamento de superfície na Atlas Indústria de Eletrodomésticos Ltda**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

WEISBACH, Williams; HAZEN, Darcy. **Pipe network calculator**. Disponível em: <<http://www.lmnoeng.com/Pipes/PipeNetwork.htm>>. Acesso em: 10 set. 2007.

WHITE, Frank M.. **Viscous Fluid Flow**. 2. ed., McGraw-Hill Science, 1999.

WANG, X. A.; WU, L. G. **Analysis and performance of flat-plate solar collector arrays**. Shanghai: Solar Energy, v.45, n.2, p.71-78, 1990.

WEITBRECHT, Volker; LEHMANN, David; RICHTER, Andreas. **Flow distribution in solar collectors with laminar flow conditions**. Karlsruhe: Solar Energy, v.73, n.6, p.433–441, 2002.

YARIV, Ehud; BRENNER, Howard. **Flow animation by unsteady temperature fields**. Cambridge: Physics of Fluids, v.16, n.11, p.L95-L98, 2004.

ZUEVA, G. A.; MAGIERA, J.. **Mathematical model of heat transfer in a solar collector and its experimental validation**. Ivanovo: Theoretical Foundations of Chemical Engineering, v.35, n.6, p.604–608, 2001.

APÊNDICE A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados das tabelas A.1 até A.9 foram obtidos experimentalmente e realizada a análise de incertezas de acordo com Albertazzi (2002).

LEGENDA	
Incerteza padrão (uA):	Relativo às medições (amostragem).
Incerteza Combinada:	Combinação das seguintes incertezas: amostra, instrumento e placa de aquisição de dados.

Disposição dos Termopares no coletor solar

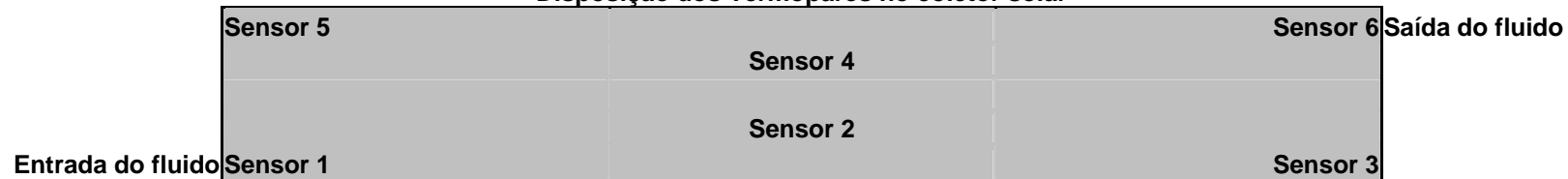


Tabela A.1: Dados experimentais para 0,52l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	41,01	43,37	42,68	49,02	55,43	55,12				
1/3/2007	40,92	43,36	42,66	49,05	55,53	55,32				
1/3/2007	40,94	43,35	42,66	49,06	55,62	55,33				
1/3/2007	40,92	43,44	42,76	49,12	55,62	55,52				
1/3/2007	40,99	43,45	42,77	49,17	55,78	55,44				
1/3/2007	41,03	43,54	42,82	49,22	55,80	55,58				
1/3/2007	41,05	43,59	42,80	49,30	55,88	55,63				
1/3/2007	41,01	43,54	42,86	49,34	55,94	55,76				
1/3/2007	41,03	43,64	42,91	49,32	56,02	55,82				
1/3/2007	41,09	43,66	42,92	49,42	56,07	55,84				
1/3/2007	41,18	43,64	42,98	49,48	56,18	55,99				
1/3/2007	41,05	43,70	42,91	49,50	56,23	55,98				
1/3/2007	41,09	43,71	42,93	49,48	56,24	56,05				
Média	41,02	43,54	42,82	49,27	55,87	55,64				
Desvio Padrão	0,07	0,13	0,11	0,17	0,27	0,29				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,16	0,29	0,24	0,38	0,59	0,64				
Incerteza padrão (uA)	0,04	0,08	0,07	0,10	0,16	0,18				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,78	0,79				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica [kg/m ³]	Vazão (kg/s)	h (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	23,21	27,01	48,19	26,76	0,525					
1/3/2007	23,23	27,01	48,23	26,77	0,487					
1/3/2007	23,23	27,01	48,27	26,77	0,496					
1/3/2007	23,21	27,02	48,27	26,78	0,507					
1/3/2007	23,22	27,02	48,29	26,78	0,485					
1/3/2007	23,20	27,03	48,35	26,79	0,496					
1/3/2007	23,20	27,04	48,47	26,80	0,505					
1/3/2007	23,21	27,04	48,59	26,81	0,509					
1/3/2007	23,21	27,05	48,65	26,82	0,499					
1/3/2007	23,22	27,05	48,67	26,82	0,496					
1/3/2007	23,24	27,05	48,69	26,82	0,476					
1/3/2007	23,26	27,06	48,72	26,82	0,494					
1/3/2007	23,26	27,07	48,77	26,83	0,493					
Média	23,22	27,04	48,47	26,80	0,497	997,60	8,27E-03	89596,83	51,53%	430,78
Desvio Padrão	0,02	0,02	0,21	0,02	0,012					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,05	0,04	0,47	0,05	0,026					
Incerteza padrão (uA)	0,01	0,01	0,13	0,01	0,007					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,09	0,15	0,09	0,200					

Tabela A.2: Dados experimentais para 1,03l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	40,79	41,91	42,54	44,89	51,50	51,41				
1/3/2007	40,66	41,84	42,59	44,88	51,45	51,38				
1/3/2007	40,69	41,83	42,59	44,92	51,44	51,33				
1/3/2007	40,79	41,84	42,59	44,90	51,31	51,32				
1/3/2007	40,81	41,88	42,59	44,95	51,27	51,34				
1/3/2007	40,74	41,80	42,61	44,91	51,28	51,25				
1/3/2007	40,70	41,93	42,54	44,93	51,24	51,24				
1/3/2007	40,82	41,84	42,57	44,84	51,17	51,18				
1/3/2007	40,77	41,84	42,64	44,91	51,23	51,17				
1/3/2007	40,83	41,88	42,59	44,91	51,20	51,25				
1/3/2007	40,80	41,94	42,65	44,80	51,18	51,18				
1/3/2007	40,75	41,91	42,72	44,89	51,15	51,18				
1/3/2007	40,83	41,90	42,65	44,88	51,14	51,12				
Média	40,77	41,87	42,61	44,89	51,27	51,57				
Desvio Padrão	0,06	0,04	0,05	0,04	0,12	1,13				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,12	0,10	0,11	0,08	0,26	2,47				
Incerteza padrão (uA)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,07	0,69				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m3	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	23,96	27,62	39,10	27,26	1,042					
1/3/2007	23,97	27,63	39,10	27,25	1,044					
1/3/2007	23,97	27,64	39,11	27,25	1,043					
1/3/2007	23,96	27,65	39,13	27,24	1,048					
1/3/2007	23,98	27,66	39,14	27,23	1,054					
1/3/2007	24,01	27,67	39,15	27,22	1,047					
1/3/2007	24,05	27,68	39,17	27,21	1,030					
1/3/2007	24,05	27,69	39,17	27,21	1,059					
1/3/2007	24,07	27,70	39,18	27,20	1,052					
1/3/2007	24,11	27,71	39,19	27,19	1,029					
1/3/2007	24,14	27,72	39,23	27,18	1,052					
1/3/2007	24,18	27,73	39,24	27,18	1,033					
1/3/2007	24,20	27,73	39,24	27,16	1,047					
Média	24,05	27,68	39,16	27,21	1,045	997,43	1,74E-02	48004,30	57,97%	484,63
Desvio Padrão	0,09	0,04	0,05	0,03	0,010					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,19	0,08	0,11	0,07	0,021					
Incerteza padrão (uA)	0,05	0,02	0,03	0,02	0,006					
Incerteza Combinada (±)	0,10	0,09	0,09	0,09	0,200					

Tabela A.3: Dados experimentais para 1,55l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	40,47	41,06	42,09	42,88	48,52	48,81				
1/3/2007	40,42	41,18	42,10	42,85	48,57	48,72				
1/3/2007	40,39	41,15	42,05	42,85	48,54	48,71				
1/3/2007	40,47	41,09	42,07	42,83	48,54	48,66				
1/3/2007	40,39	41,18	42,07	42,83	48,52	48,68				
1/3/2007	40,41	41,21	42,18	42,82	48,51	48,72				
1/3/2007	40,41	41,13	42,06	42,84	48,53	48,70				
1/3/2007	40,44	41,19	42,00	42,81	48,47	48,72				
1/3/2007	40,42	41,17	42,07	42,84	48,47	48,71				
1/3/2007	40,48	41,10	42,13	42,83	48,49	48,63				
1/3/2007	40,36	41,15	42,04	42,86	48,47	48,69				
1/3/2007	40,43	41,19	42,09	42,85	48,50	48,63				
1/3/2007	40,43	41,16	42,09	42,80	48,45	48,67				
Média	40,42	41,15	42,08	42,84	48,51	49,21				
Desvio Padrão	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04	1,84				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,08	0,10	0,09	0,05	0,08	4,01				
Incerteza padrão (uA)	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	1,11				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m3	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	24,88	27,60	35,53	27,02	1,574					
1/3/2007	24,91	27,60	35,53	27,02	1,559					
1/3/2007	24,94	27,60	35,53	27,02	1,567					
1/3/2007	24,95	27,60	35,53	27,01	1,569					
1/3/2007	24,92	27,60	35,52	27,02	1,567					
1/3/2007	24,90	27,60	35,53	27,02	1,572					
1/3/2007	24,90	27,60	35,53	27,03	1,566					
1/3/2007	24,92	27,60	35,52	27,02	1,563					
1/3/2007	24,95	27,60	35,52	27,02	1,573					
1/3/2007	24,97	27,60	35,52	27,03	1,566					
1/3/2007	25,01	27,60	35,52	27,03	1,564					
1/3/2007	25,03	27,60	35,52	27,03	1,570					
1/3/2007	25,05	27,60	35,52	27,03	1,563					
Média	24,95	27,60	35,52	27,02	1,567	997,45	2,61E-02	33117,29	60,01%	501,68
Desvio Padrão	0,05	0,00	0,00	0,00	0,005					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,12	0,01	0,01	0,01	0,010					
Incerteza padrão (uA)	0,03	0,00	0,00	0,00	0,003					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,08	0,08	0,08	0,200					

Tabela A.4: Dados experimentais para 2,06l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	40,13	40,81	41,72	41,94	47,25	47,42				
1/3/2007	40,23	40,83	41,67	41,90	47,32	47,46				
1/3/2007	40,16	40,89	41,72	41,86	47,35	47,37				
1/3/2007	40,17	40,88	41,71	41,88	47,31	47,37				
1/3/2007	40,23	40,87	41,68	41,88	47,33	47,48				
1/3/2007	40,16	40,81	41,70	41,90	47,31	47,38				
1/3/2007	40,20	40,88	41,65	41,86	47,30	47,36				
1/3/2007	40,21	40,87	41,71	41,88	47,25	47,37				
1/3/2007	40,19	40,89	41,68	41,89	47,28	47,38				
1/3/2007	40,17	40,86	41,68	41,88	47,28	47,36				
1/3/2007	40,14	40,84	41,70	41,86	47,20	47,27				
1/3/2007	40,19	40,88	41,74	41,78	47,27	47,35				
1/3/2007	40,17	40,86	41,69	41,91	47,35	47,28				
Média	40,18	40,86	41,70	41,88	47,29	47,99				
Desvio Padrão	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	2,21				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,07	0,06	0,05	0,08	0,09	4,81				
Incerteza padrão (uA)	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	1,33				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m ³	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	25,24	27,62	33,75	27,04	2,047					
1/3/2007	25,22	27,61	33,74	27,04	2,052					
1/3/2007	25,18	27,61	33,75	27,03	2,057					
1/3/2007	25,24	27,60	33,75	27,02	2,046					
1/3/2007	25,30	27,61	33,75	27,03	2,047					
1/3/2007	25,29	27,61	33,74	27,03	2,047					
1/3/2007	25,30	27,61	33,75	27,04	2,043					
1/3/2007	25,34	27,61	33,77	27,04	2,038					
1/3/2007	25,36	27,61	33,77	27,04	2,047					
1/3/2007	25,40	27,62	33,78	27,04	2,035					
1/3/2007	25,41	27,61	33,78	27,04	2,045					
1/3/2007	25,40	27,61	33,79	27,04	2,043					
1/3/2007	25,38	27,61	33,79	27,03	2,035					
Média	25,31	27,61	33,76	27,03	2,045	997,45	3,40E-02	25700,55	60,75%	507,88
Desvio Padrão	0,08	0,00	0,02	0,01	0,006					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,17	0,01	0,04	0,01	0,013					
Incerteza padrão (uA)	0,05	0,00	0,01	0,00	0,004					
Incerteza Combinada (±)	0,10	0,08	0,09	0,08	0,200					

Tabela A.5: Dados experimentais para 2,58l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	39,88	40,59	41,47	41,27	46,36	46,32				
1/3/2007	39,93	40,60	41,48	41,26	46,33	46,37				
1/3/2007	39,92	40,65	41,47	41,22	46,37	46,25				
1/3/2007	40,02	40,51	41,46	41,30	46,33	46,36				
1/3/2007	39,88	40,67	41,42	41,21	46,31	46,30				
1/3/2007	40,02	40,61	41,45	41,22	46,35	46,38				
1/3/2007	39,93	40,59	41,41	41,32	46,28	46,32				
1/3/2007	39,94	40,57	41,43	41,32	46,39	46,33				
1/3/2007	39,93	40,60	41,44	41,26	46,31	46,35				
1/3/2007	39,92	40,56	41,46	41,25	46,28	46,25				
1/3/2007	39,94	40,66	41,42	41,21	46,36	46,28				
1/3/2007	39,91	40,57	41,52	41,22	46,33	46,25				
1/3/2007	39,90	40,61	41,49	41,23	46,27	46,32				
Média	39,93	40,60	41,46	41,25	46,33	47,01				
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	2,50				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,10	0,10	0,07	0,09	0,08	5,45				
Incerteza padrão (uA)	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	1,51				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m3	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	25,71	27,59	32,53	27,02	2,564					
1/3/2007	25,74	27,59	32,53	27,02	2,567					
1/3/2007	25,73	27,59	32,53	27,02	2,563					
1/3/2007	25,72	27,59	32,53	27,01	2,557					
1/3/2007	25,73	27,59	32,53	27,02	2,556					
1/3/2007	25,72	27,59	32,52	27,02	2,569					
1/3/2007	25,70	27,59	32,53	27,01	2,558					
1/3/2007	25,67	27,59	32,53	27,02	2,556					
1/3/2007	25,68	27,59	32,51	27,02	2,560					
1/3/2007	25,71	27,60	32,50	27,01	2,573					
1/3/2007	25,71	27,60	32,51	27,01	2,550					
1/3/2007	25,71	27,60	32,51	27,01	2,555					
1/3/2007	25,71	27,60	32,52	27,02	2,564					
Média	25,71	27,59	32,52	27,02	2,561	997,46	4,26E-02	20605,28	61,00%	509,99
Desvio Padrão	0,02	0,00	0,01	0,00	0,006					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,04	0,01	0,02	0,01	0,014					
Incerteza padrão (uA)	0,01	0,00	0,01	0,00	0,004					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,08	0,09	0,08	0,200					

Tabela A.6: Dados experimentais para 3,10l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	39,69	40,37	41,18	40,82	45,65	45,67				
1/3/2007	39,67	40,32	41,13	40,85	45,66	45,73				
1/3/2007	39,74	40,36	41,20	40,85	45,61	45,69				
1/3/2007	39,64	40,38	41,19	40,85	45,59	45,68				
1/3/2007	39,73	40,35	41,15	40,85	45,66	45,70				
1/3/2007	39,69	40,34	41,22	40,84	45,59	45,79				
1/3/2007	39,67	40,40	41,23	40,84	45,58	45,67				
1/3/2007	39,69	40,28	41,17	40,87	45,56	45,61				
1/3/2007	39,71	40,33	41,16	40,84	45,61	45,73				
1/3/2007	39,68	40,34	41,16	40,81	45,52	45,68				
1/3/2007	39,64	40,32	41,19	40,83	45,54	45,68				
1/3/2007	39,64	40,24	41,21	40,83	45,50	45,70				
1/3/2007	39,64	40,43	41,19	40,82	45,62	45,68				
Média	39,68	40,34	41,18	40,84	45,59	46,43				
Desvio Padrão	0,03	0,05	0,03	0,02	0,05	2,67				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,07	0,11	0,06	0,04	0,11	5,82				
Incerteza padrão (uA)	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	1,62				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m3	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	26,06	27,52	31,66	26,94	3,041					
1/3/2007	26,06	27,52	31,67	26,94	3,068					
1/3/2007	26,06	27,52	31,67	26,94	3,085					
1/3/2007	26,06	27,52	31,68	26,93	3,083					
1/3/2007	26,05	27,51	31,67	26,93	3,082					
1/3/2007	26,03	27,51	31,67	26,94	3,077					
1/3/2007	26,03	27,52	31,66	26,94	3,086					
1/3/2007	26,02	27,52	31,67	26,94	3,094					
1/3/2007	26,05	27,51	31,67	26,94	3,088					
1/3/2007	26,10	27,51	31,67	26,93	3,073					
1/3/2007	26,10	27,51	31,66	26,93	3,069					
1/3/2007	26,07	27,51	31,66	26,94	3,087					
1/3/2007	26,05	27,51	31,66	26,93	3,074					
Média	26,06	27,52	31,67	26,93	3,077	997,48	5,12E-02	17345,80	61,71%	515,92
Desvio Padrão	0,02	0,00	0,01	0,00	0,013					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,05	0,01	0,01	0,01	0,029					
Incerteza padrão (uA)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,008					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,08	0,08	0,08	0,200					

Tabela A.7: Dados experimentais para 3,61l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	39,53	40,14	40,95	40,58	45,08	45,47				
1/3/2007	39,42	40,05	40,93	40,56	45,03	45,57				
1/3/2007	39,51	40,11	40,97	40,52	45,02	45,40				
1/3/2007	39,48	40,14	40,97	40,51	45,12	45,53				
1/3/2007	39,51	40,08	40,91	40,51	45,09	45,53				
1/3/2007	39,44	40,09	40,96	40,55	45,09	45,43				
1/3/2007	39,45	40,13	40,96	40,57	45,05	45,49				
1/3/2007	39,44	40,10	40,85	40,53	45,14	45,42				
1/3/2007	39,47	40,12	40,90	40,57	45,10	45,43				
1/3/2007	39,48	40,09	40,97	40,53	45,07	45,39				
1/3/2007	39,53	40,06	40,89	40,48	45,04	45,46				
1/3/2007	39,50	39,99	40,88	40,54	45,09	45,42				
1/3/2007	39,48	40,08	40,93	40,49	45,06	45,40				
Média	39,48	40,09	40,93	40,53	45,08	46,22				
Desvio Padrão	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	2,74				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,08	0,09	0,09	0,07	0,08	5,96				
Incerteza padrão (uA)	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	1,65				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m3	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	26,08	27,44	30,95	26,88	3,607					
1/3/2007	26,08	27,44	30,97	26,87	3,598					
1/3/2007	26,12	27,44	30,98	26,87	3,603					
1/3/2007	26,14	27,44	30,97	26,87	3,605					
1/3/2007	26,16	27,44	30,96	26,87	3,617					
1/3/2007	26,14	27,44	30,95	26,87	3,607					
1/3/2007	26,14	27,44	30,96	26,87	3,599					
1/3/2007	26,16	27,44	30,96	26,87	3,609					
1/3/2007	26,20	27,44	30,94	26,87	3,606					
1/3/2007	26,25	27,44	30,94	26,87	3,611					
1/3/2007	26,24	27,44	30,94	26,87	3,628					
1/3/2007	26,23	27,44	30,93	26,87	3,634					
1/3/2007	26,22	27,44	30,93	26,87	3,611					
Média	26,17	27,44	30,95	26,87	3,610	997,50	6,00E-02	14676,84	61,26%	512,15
Desvio Padrão	0,06	0,00	0,02	0,00	0,011					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,12	0,00	0,04	0,01	0,023					
Incerteza padrão (uA)	0,03	0,00	0,01	0,00	0,006					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,08	0,09	0,08	0,200					

Tabela A.8: Dados experimentais para 4,13l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	39,29	39,85	40,78	40,33	44,91	44,83				
1/3/2007	39,33	39,78	40,72	40,30	44,95	44,95				
1/3/2007	39,30	39,79	40,66	40,33	44,94	44,95				
1/3/2007	39,26	39,76	40,76	40,36	44,96	44,85				
1/3/2007	39,28	39,83	40,72	40,39	44,99	44,92				
1/3/2007	39,30	39,78	40,72	40,35	44,95	44,98				
1/3/2007	39,30	39,80	40,72	40,29	44,90	44,92				
1/3/2007	39,29	39,84	40,73	40,36	44,93	44,95				
1/3/2007	39,36	39,82	40,76	40,31	44,88	44,94				
1/3/2007	39,27	39,78	40,80	40,31	44,93	44,94				
1/3/2007	39,27	39,76	40,74	40,31	44,87	44,86				
1/3/2007	39,27	39,85	40,77	40,33	44,88	44,89				
1/3/2007	39,34	39,82	40,69	40,26	44,96	44,95				
Média	39,30	39,80	40,74	40,33	44,93	45,72				
Desvio Padrão	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	2,89				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	6,29				
Incerteza padrão (uA)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	1,75				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m ³	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	26,62	27,38	30,59	26,80	4,056					
1/3/2007	26,66	27,38	30,57	26,81	4,061					
1/3/2007	26,66	27,38	30,55	26,81	4,068					
1/3/2007	26,69	27,38	30,49	26,81	4,076					
1/3/2007	26,69	27,38	30,50	26,81	4,071					
1/3/2007	26,66	27,38	30,56	26,81	4,086					
1/3/2007	26,63	27,38	30,57	26,80	4,071					
1/3/2007	26,56	27,38	30,51	26,80	4,069					
1/3/2007	26,52	27,38	30,51	26,80	4,056					
1/3/2007	26,51	27,38	30,50	26,80	4,073					
1/3/2007	26,50	27,38	30,51	26,80	4,064					
1/3/2007	26,55	27,38	30,50	26,80	4,080					
1/3/2007	26,64	27,38	30,48	26,80	4,061					
Média	26,61	27,38	30,53	26,80	4,069	997,51	6,76E-02	13148,05	61,85%	517,10
Desvio Padrão	0,07	0,00	0,04	0,00	0,009					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,15	0,00	0,08	0,01	0,019					
Incerteza padrão (uA)	0,04	0,00	0,02	0,00	0,005					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,08	0,09	0,08	0,200					

Tabela A.9: Dados experimentais para 4,64l/min

Data	Sensor 01 (°C)	Sensor 02 (°C)	Sensor 03 (°C)	Sensor 04 (°C)	Sensor 05 (°C)	Sensor 06 (°C)				
1/3/2007	39,10	39,44	40,52	40,02	44,43	43,99				
1/3/2007	39,13	39,47	40,57	40,09	44,49	43,98				
1/3/2007	39,06	39,37	40,55	40,00	44,44	44,03				
1/3/2007	39,06	39,52	40,56	40,05	44,43	44,01				
1/3/2007	39,09	39,56	40,55	40,04	44,42	44,03				
1/3/2007	39,16	39,47	40,58	40,03	44,48	43,94				
1/3/2007	39,10	39,48	40,50	40,03	44,52	44,02				
1/3/2007	39,19	39,51	40,65	40,06	44,46	44,00				
1/3/2007	39,10	39,46	40,58	40,03	44,51	44,00				
1/3/2007	39,05	39,45	40,55	40,05	44,48	44,02				
1/3/2007	39,15	39,55	40,59	39,98	44,46	43,97				
1/3/2007	39,09	39,54	40,55	40,05	44,48	44,07				
1/3/2007	39,07	39,44	40,57	40,03	44,49	44,04				
Média	39,10	39,48	40,56	40,04	44,47	44,88				
Desvio Padrão	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	3,14				
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18				
Repetitividade	0,09	0,12	0,08	0,06	0,07	6,84				
Incerteza padrão (uA)	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	1,90				
Incerteza Combinada (±)	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77				
Data	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura de Entrada da Água (°C)	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura da Água Fria (°C)	Vazão (l/min)	Massa específica kg/m3	Vazão (kg/s)	Δh (J/kg)	Eficiência (%)	Energia Absorvida
1/3/2007	26,80	27,32	30,17	26,75	4,588					
1/3/2007	26,85	27,32	30,20	26,75	4,595					
1/3/2007	26,89	27,33	30,18	26,75	4,604					
1/3/2007	26,86	27,32	30,21	26,76	4,600					
1/3/2007	26,82	27,32	30,19	26,75	4,601					
1/3/2007	26,81	27,32	30,20	26,75	4,589					
1/3/2007	26,81	27,32	30,16	26,75	4,594					
1/3/2007	26,79	27,32	30,20	26,74	4,580					
1/3/2007	26,79	27,32	30,16	26,75	4,584					
1/3/2007	26,81	27,31	30,17	26,75	4,575					
1/3/2007	26,86	27,32	30,21	26,75	4,602					
1/3/2007	26,88	27,31	30,19	26,75	4,586					
1/3/2007	26,88	27,32	30,14	26,74	4,596					
Média	26,83	27,32	30,18	26,75	4,592	997,53	7,63E-02	11963,43	63,52%	531,01
Desvio Padrão	0,04	0,00	0,02	0,00	0,009					
t student	2,18	2,18	2,18	2,18	2,179					
Repetitividade	0,08	0,01	0,05	0,01	0,019					
Incerteza padrão (uA)	0,02	0,00	0,01	0,00	0,005					
Incerteza Combinada (±)	0,09	0,08	0,09	0,08	0,200					