

Vitor Luiz Rigoti dos Anjos

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PROCESSOS DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR APLICADOS À
CONCENTRAÇÃO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

Vitória, Julho de 2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

A599a Anjos, Vitor Luiz Rigoti dos, 1981-
Análise experimental dos processos de transferência de calor
aplicados à concentração solar / Vitor Luiz Rigoti dos Anjos. –
2008.
126 f. : il.

Orientador: Rogério Ramos.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia solar. 2. Aquecimento solar. 3. Calor - Transmissão.
I. Ramos, Rogério. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PROCESSOS
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR APLICADOS À
CONCENTRAÇÃO SOLAR”**

Vitor Luiz Rigoti dos Anjos

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Ramos – Orientador

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli – Membro Interno

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Luiz Cláudio Gomes Pimentel – Membro Externo

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória (ES), 28 de julho de 2008

Dedicatória

A Deus, companheiro de todas as lutas.

Aos meus pais, incentivadores, apoiadores, primeiros e maiores zeladores dos meus estudos.

A todos os que se dedicam a uma terra sem males e à pesquisa em fontes renováveis de energia.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Ramos, pelo seu conhecimento, paciência, disponibilidade e apoio constantes demonstrados ao longo de todo esse período de orientação científica e acadêmica.

Às funcionárias Zezé e Celina, respectivamente da Secretaria da Pós-graduação e da Graduação em Engenharia Mecânica, e Izabel, da Seção de Periódicos da Biblioteca Central da UFES, pela presteza e atenção que sempre me atenderam.

Aos meus amigos e aos meus até então colegas de mestrado, pelo interesse, estímulo e torcida que sempre me demonstraram ao longo desses dois anos de estudo. E à CAPES, pela concessão de bolsa de estudo, a qual me permitiu a dedicação exclusiva aos meus estudos.

Resumo

Tendo em vista a necessidade de transportar óleos pesados produzidos em regiões notoriamente ensolaradas do Brasil (tais como o norte do estado do Espírito Santo e estados da região Nordeste), o aproveitamento da radiação solar incidente como fonte de energia térmica alternativa para aquecimento de oleodutos e tanques de armazenamento terrestres (*on-shore*) surge como uma solução para a redução da perda de carga induzida no escoamento através da redução da viscosidade do fluido.

O presente trabalho apresenta de modo sucinto as etapas de dimensionamento, projeto, construção e teste de um protótipo de concentrador solar parabólico, bem como os resultados experimentais obtidos durante as atividades do projeto como um todo, além de apontar também novas possibilidades de melhoria do sistema para futuras operações. A principal proposta deste trabalho é a otimização do tubo absorvedor do concentrador solar, a fim de aumentar o aproveitamento da radiação incidente.

Utilizando configurações distintas de tubos absorvedores instalados sobre o foco do concentrador solar parabólico experimental, o fluido de trabalho é aquecido e, de posse dos dados coletados nos experimentos são feitas as devidas análises para alcançar o objetivo do projeto principal, que é obter uma forma de redução da perda de carga em escoamentos de óleos pesados utilizando a energia solar coletada por um concentrador parabólico.

Palavras-chave: Energia solar; Aquecimento solar; Eficiência energética; Concentrador parabólico.

Abstract

Having in mind the necessity to pump heavy crude oil from notoriously sunny regions of Brazil (northern Brazil regions general speaking or northern Espírito Santo state specifically), the utilization of solar radiation appears as an alternative thermal source to heat on-shore pipelines and storage tanks.

The present work exhibits the basic steps to project, design, construction and test of a parabolic solar concentrator prototype, as well as shows experimental results gotten from the activities developed by the whole project and points out some possibilities to enhance the system for future operations. Here, the main objective is to increase heat transfer to a tube installed on parabolic focus (absorber tube).

Using distinct configurations for the absorbers tubes, the work fluid is heated and analysis are prosecuted over collected data aiming to reach the main goal, which is to study the pressure drop reduction by viscosity decreasing of heavy oils flow using solar energy collected by a parabolic concentrator.

Keywords: Solar energy; Solar heating; Energy efficiency; Parabolic concentrator.

NOMENCLATURA

A	Área [m ²]
$C, n1$ e $n2$	Coeficientes para a correlação de Nusselt
c_P	Calor específico à pressão constante [J/kgK]
d	Diâmetro [m]
DF	Distância focal do concentrador [m]
E	Taxa de calor teórica [W]
ED	Comprimento da faixa de perdas ópticas [m]
f	Fator de atrito de Moody
fa	Fator de ajuste da simulação
FC	Fator de concentração
FF	Fator de forma entre superfícies
G	Radiação [W]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Coeficiente de convecção [W/m ² K]
I	Fluxo de radiação [W/m ²]
k	Coeficiente de condutividade térmica [W/mK]
L	Comprimento [m]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
Nu	Número de Nusselt
P	Altura [m]
R	Resistência térmica [K/W]
r	Raio [m]
Re_D	Número de Reynolds
S	Espaçamento [m]
T	Temperatura [K]
UR	Umidade relativa do ar [%]
W	Potência instantânea [W]
w	Largura da parábola (abertura do concentrador) [m]
w_p	Comprimento do perfil parabólico [m]
∇	Vazão volumétrica [l/s]

Letras Gregas

α	Coeficiente de difusividade térmica [m ² /s]
β	Coeficiente de expansão térmica [K ⁻¹]
ε	Emissividade
ζ	Efetividade
η	Eficiência de cada arranjo [%]
θ	Ângulo de aceitação dos raios solares [°]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa*s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
τ	Transmissividade
φ	Ângulo de incidência dos raios solares [°]
χ	Excesso de temperatura [K]
ψ	Refletividade

Subscritos

A	Água
ABS	Absorvido(a)
aj	Ajustado(a)
AL	Aleta
C	Concentrador solar
CE	Convecção externa ao tubo absorvedor
CÉU	Céu
cond	Condução
conv	Convecção
D	Radiação direta
DISP	Disponível
e	Entrada

E	Estimado(a)
ER	Emitido(a) pela superfície refletora
ESP	Espelho parabólico (superfície refletora)
ET	Emitido(a) pelo tubo absorvedor
ex	Externo(a)
f	Perdas ópticas
G	Global
h	Hidráulico(a)
I	Radiação difusa
in	Interno(a)
m	Médio(a)
máx	Máximo(a)
mín	Mínimo(a)
proj	Projetado(a)
R	Superfície refletora
re	Radiação emitida por um corpo negro a 400 K
s	Saída
SOL	Solar global incidente
sup	Superfície
T	Tubo absorvedor
tr	Transversal
V	Vidro
VIZ	Vizinhanças (exceto a superfície refletora)
∞	Ar ambiente

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Albedo para algumas superfícies no intervalo visível	21
Tabela 2 – Principais características do projeto do concentrador solar projetado	39
Tabela 3 – Arranjos, dias de experimento e resultados obtidos	53
Tabela 4 – Esquema de dados estimados para a determinação de C , n_1 e n_2 , com os termos a serem minimizados em itálico	58
Tabela 5 – Dimensões do concentrador e seus componentes, constantes e propriedades físicas usadas nos cálculos	62
Tabela 6 – Transmissividade do vidro em várias faixas de comprimento de onda e para um corpo negro a 400K	62
Tabela 7 – Eficiências mínima, média e máxima para cada arranjo testado.....	70
Tabela 8 – Média das eficiências mínima, média e máxima em cada arranjo e vazão	72
Tabela 9 – Coeficientes das correlações propostas	75
Tabela 10 – Fatores de ajuste (f_a) e seus significados	80
Tabela A-1 – Temperaturas medidas e reais (°C) dos termopares caracterizados	98
Tabela A-2 – Temperaturas medidas no teste de calibração dos termopares	99
Tabela B-1 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 19/03/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	101
Tabela B-2 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 21/02/2008 com vazão de água a 3,25 ml/s.....	102
Tabela B-3 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 04/03/2008 com vazão de água a 2,25 ml/s.....	103
Tabela B-4 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 05/03/2008 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	104
Tabela B-5 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 20/03/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	105
Tabela B-6 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 21/03/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	106
Tabela B-7 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 26/03/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	107
Tabela B-8 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 19/11/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	108
Tabela B-9 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 23/11/2007 com vazão de água a 3,25 ml/s.....	109
Tabela B-10 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 04/12/2007 com vazão de água a 2,25 ml/s.....	110
Tabela B-11 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 05/12/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s.....	111
Tabela B-12 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 11/12/2007 com vazão de água a 2,25 ml/s.....	112

Tabela B-13 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 04/01/2008 com vazão de água a 3,25 ml/s	113
Tabela B-14 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo5 em 14/02/2008 com vazão de água a 1,25 ml/s	114
Tabela B-15 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo5 em 15/02/2008 com vazão de água a 3,25 ml/s	115
Tabela C-1 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos de todos os experimentos.....	116
Tabela C-2 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 100W	119
Tabela C-3 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 200W	122
Tabela D-1 – Equações das curvas polinomiais e seus respectivos valores de R^2 para cada variável medida	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição percentual da radiação solar incidente	19
Figura 2 – Absortividade de alguns gases da atmosfera e da atmosfera como um todo	22
Figura 3 – Espectro da radiação solar no topo da atmosfera (curva superior) e no nível do mar (curva inferior), para atmosfera média e sol no zênite	23
Figura 4 – Instrumentos de medição da radiação solar.....	24
Figura 5 – Concentradores de receptor central	26
Figura 6 – Concentradores de foco linear	26
Figura 7 – (a) Seqüência de fabricação de uma lente de Fresnel e (b) a concentração dos raios sobre o foco F.....	27
Figura 8 – Princípio de funcionamento do concentrador parabólico.....	31
Figura 9 – Dados geométricos do perfil parabólico	33
Figura 10 – (a) Molde do perfil parabólico (b) Placas laterais confeccionadas com auxílio do molde.	33
Figura 11 – (a) Estrutura com cantoneiras de alumínio (b) Acomodamento da superfície refletora sobre o berço.	34
Figura 12 – (a) Fixação do tubo absorvedor através de cantoneiras de alumínio. (b) Vista do concentrador solar montado. (c) Tubo absorvedor iluminado homoganeamente. (d) Concentrador solar em teste, já instalado sobre a base móvel.	35
Figura 13 – (a) Fator de concentração (b) Ângulo de aceitação	36
Figura 14 – Perdas na extremidade do concentrador solar.....	37
Figura 15 – Detalhes de cálculo das perdas ao final do concentrador solar	38
Figura 16 – (a) Transferidor e (b) Ponteiro solar instalados no concentrador solar	40
Figura 17 – Mini-estação meteorológica	41
Figura 18 – (a) Heliógrafo (b) Detalhe da esfera de vidro do heliógrafo.....	41
Figura 19 – (a) Rotâmetro (b) Rotâmetro com as conexões para as mangueiras.....	42
Figura 20 – Testes de queima de papéis no heliógrafo.....	43
Figura 21 – Desenho esquemático do circuito aberto	44
Figura 22 – (a) Mangueira de borracha recoberta com isolamento térmico. (b) Mangueira com isolamento (acima) e sem isolamento.....	45
Figura 23 – Desenho esquemático do circuito fechado.....	45
Figura 24 – Base móvel do circuito fechado.....	46
Figura 25 – (a) Arame utilizado para aumentar a troca de calor (b) Arame inserido no tubo absorvedor	49

Figura 26 – (a) Vista do tubo de cobre inserido em tubo de vidro (b) Anel de nylon em detalhe	50
Figura 27 – Comparação esquemática entre aletas de (a) 9,5mm e (b) 18mm de comprimento	51
Figura 28 – Comparação do perfil de temperaturas, eficiência e efetividade de aletas de 9,5 e 18mm de comprimento.....	51
Figura 29 – Desenho esquemático do corte transversal dos tubos absorvedores utilizados (dimensões em milímetros).....	53
Figura 30 – Ilustração do experimento para análise do duto de seção transversal quadrada: (a) vista lateral e (b) vista superior	56
Figura 31 – Gráfico com a correlação de Nusselt (Nu) em função da relação $S_{AL} / d_{AL,h} (P_L)$ e o número de Reynolds médio (Re_{av}).....	57
Figura 32 – Esquema da transferência de calor em uma seção reta do arranjo Tubo3.....	61
Figura 33 – Transmissividade do vidro e intensidade de radiação térmica de um corpo negro a 400 K em função do comprimento de onda	63
Figura 34 – Método das linhas cruzadas para determinação do fator de forma.....	64
Figura 35 – Método das linhas cruzadas adaptado para o par céu-tubo.....	64
Figura 36 – Ângulos de basculamento obtidos em três experimentos, a reta média e sua equação.	69
Figura 37 – Ângulos de basculamento de acordo com o procedimento de basculamento não-contínuo a cada 15 min, obtidos em 05/12/2007 com Tubo3.....	69
Figura 38 – Eficiências mínima, média e máxima para cada arranjo testado	71
Figura 39 – Desenho esquemático do corte transversal dos tubos absorvedores estudados (dimensões em milímetros)	74
Figura 40 – Números de Nusselt mínimo, médio e máximo em cada experimento.	74
Figura 41 – Gráfico $Nu \times Re$ com os pontos experimentais e correlações para Tubo4 e a correlação obtida por Dogruoz et al. (2006)	75
Figura 42 – Taxas de calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e quatro opções de fatores de ajuste deste (A, B, C e D) em todos os períodos de todos os experimentos. (conforme Tabela C-1).....	77
Figura 43 – Taxas de calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e seis opções de fatores de ajuste deste (E, F, G, H, I e J) em todos os períodos onde a taxa de calor aproveitado é menor que 100W. (conforme Tabela C-2).....	78
Figura 44 – Taxas de calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e três opções de fatores de ajuste deste (K, L e M) em todos os períodos onde a taxa de calor aproveitado é menor que 200W. (conforme Tabela C-3)	79
Figura 45 – (a) Perfil do futuro concentrador parabólico; (b) Comparação esquemática entre a largura do perfil antigo w_1 e a do perfil novo w_2 ; (c) Nova estrutura do concentrador com cantoneiras para assentamento da placa.....	85

Figura 46 – Tubo absorvedor com 4 aletas longitudinais	86
Figura 47 – Arranjo de tubos absorvedor e de vidro concêntricos	87
Figura A-1 – Esquema do calorímetro para a caracterização dos termopares no LaGePot	95
Figura A-2 – Tubo instrumentado em corte e diagrama de resistência térmica ao fluxo de calor no mesmo	96
Figura A-3 – Disposição dos termopares soldados no tubo absorvedor no LaGePot	97
Figura A-4 – Sistema montado no LaGePot para a caracterização dos termopares soldados a um pequeno tubo	98
Figura D-1 – Gráficos com as variáveis em função da hora do dia e a curva de ajuste dos pontos	126

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Características da energia solar	18
1.1.1 <i>Espalhamento</i>	19
1.1.2 <i>Reflexão na atmosfera</i>	20
1.1.3 <i>Absorção na atmosfera</i>	21
1.1.4 <i>Medição da radiação solar</i>	23
1.2 Formas de conversão da energia solar	25
1.3 Objetivo do experimento	27
1.4 Revisão bibliográfica	28
2 CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO	31
2.1 Características e construção	31
2.2 Parâmetros qualificadores do concentrador solar	35
2.3 Perdas ópticas relacionadas ao projeto	37
2.4 Principais dados do projeto	39
2.5 Instrumentação	39
2.5.1 <i>Instrumentos de orientação</i>	40
2.5.2 <i>Instrumentos meteorológicos</i>	41
2.5.3 <i>Instrumentos de controle e monitoramento do sistema de fluido</i>	42
2.5.4 <i>Utilização dos instrumentos</i>	42
2.6 Sistemas de circulação	44
3 TUBO ABSORVEDOR	47
3.1 Projetos dos tubos absorvedores	47
3.2 Experimentos realizados	53
3.3 Correlação do número de Nusselt	55
3.4 Simulação via balanço global	59
3.4.1 <i>Modelagem matemática</i>	59
3.4.2 <i>Dados e propriedades</i>	61
3.4.3 <i>Definição dos termos das equações do balanço global</i>	63
3.4.4 <i>Metodologia da simulação</i>	66
4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS	68
4.1 Eficiência dos arranjos	70
4.2 Correlação do número de Nusselt efetivo	73
4.3 Simulação via balanço global	76
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	82
5.1 Conclusões	82
5.2 Propostas futuras	84
5.2.1 <i>Geometria do espelho otimizada</i>	84
5.2.2 <i>Tubo absorvedor com vácuo</i>	85
5.2.3 <i>Automatização do concentrador solar</i>	87
5.2.4 <i>Continuidade dos experimentos</i>	88

5.2.5 Simulação numérica dos processos de transferência de calor.....	88
5.2.6 O circuito fechado	89
5.3 Considerações finais	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICES	95
APÊNDICE A – Caracterização das leituras de temperatura	95
APÊNDICE B – Tabelas de dados coletados nos experimentos	100
APÊNDICE C – Tabelas de comparação entre os fatores de ajuste	116
APÊNDICE D – Caracterização dos dias semelhantes	125

Capítulo 1

“A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las.” (Aristóteles)

1 INTRODUÇÃO

Antes de adentrar no tema acerca dos estudos sobre os processos de transferência de calor envolvidas na concentração solar propriamente dita, faz-se necessário uma rápida apresentação sobre as características da energia solar segundo Grimm (1999) e sobre as formas de conversão que são utilizadas no mundo contemporâneo.

1.1 Características da energia solar

A intensidade da radiação solar média anual que atinge a atmosfera terrestre chega a $1,377 \text{ kW/m}^2$, valor este chamado de constante solar. Embora a atmosfera pareça transparente à radiação solar incidente, somente em torno de 25% desse fluxo penetra diretamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera constituindo a insolação direta. O restante é refletido de volta para o espaço ou absorvido ou espalhado em volta até atingir a superfície da Terra ou retornar ao espaço (Figura 1).

Isto depende em grande parte do comprimento de onda da energia que está sendo transportada, assim como do tamanho e natureza do material que intervém. Vapor d'água, aerodispersóides e dióxido de carbono são exemplos de materiais em suspensão na atmosfera que afetam consideravelmente o espectro de radiação recebida.

1.1.1 Espalhamento

Embora a radiação solar incida em linha reta, os gases e aerossóis podem causar seu espalhamento, dispersando-a em todas as direções. A reflexão é um caso particular de espalhamento. A radiação difusa é constituída de radiação solar que é espalhada ou refletida de volta para a Terra. Esta radiação difusa é responsável pela claridade do céu durante o dia e pela iluminação de áreas que não recebem iluminação direta do sol. Esses processos encontram-se sintetizados na Figura 1.

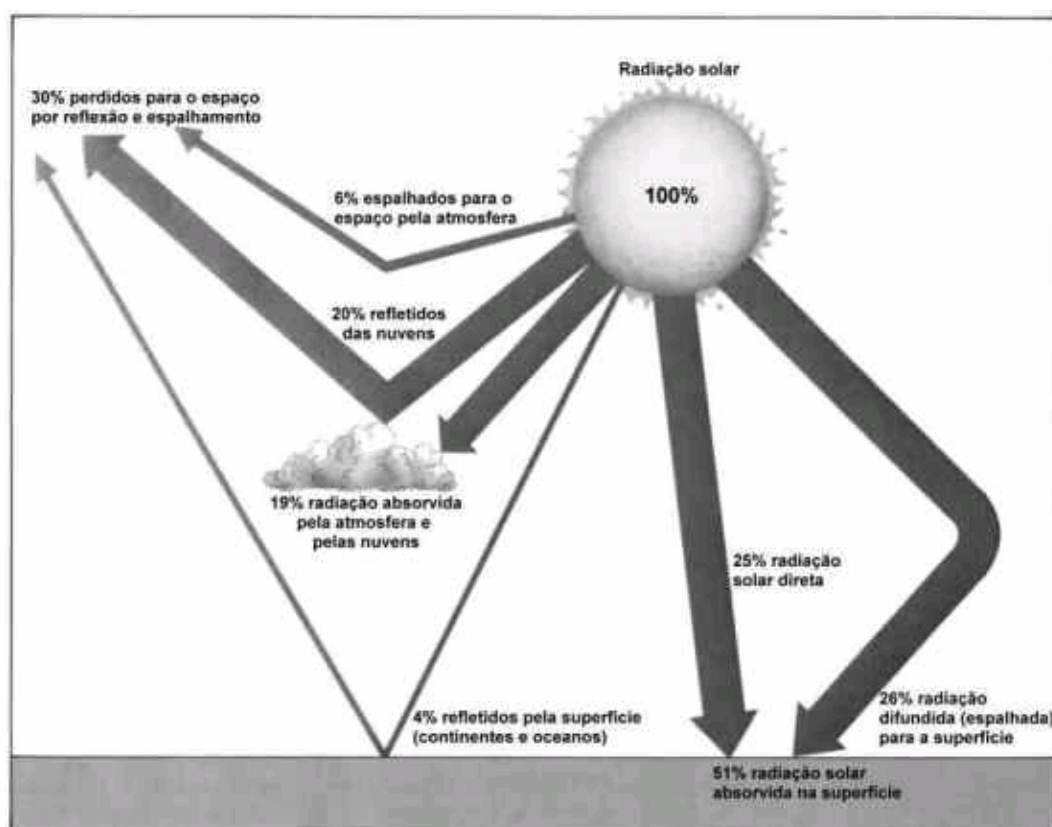


Figura 1 – Distribuição percentual da radiação solar incidente

Fonte: Grimm, 1999.

As características do espalhamento dependem, em grande parte, do tamanho das moléculas de gás ou aerossóis. O espalhamento por partículas cujo raio é bem menor que o comprimento de onda da radiação espalhada, como o caso do espalhamento da luz visível por moléculas de gás da atmosfera, é dependente do comprimento de onda (espalhamento Rayleigh), de forma que a irradiância

monocromática espalhada é inversamente proporcional à 4ª potência do comprimento de onda.

Quando a radiação é espalhada por partículas cujos raios se aproximam ou excedem em aproximadamente até 8 vezes o comprimento de onda da radiação, o espalhamento não depende do comprimento de onda (espalhamento Mie). A radiação é espalhada igualmente em todos os comprimentos de onda. Partículas que compõem as nuvens (pequenos cristais de gelo ou gotículas de água) e a maior parte dos aerossóis atmosféricos espalham a luz do Sol desta maneira. Por isso, as nuvens parecem brancas e quando a atmosfera contém grande concentração de aerossóis o céu inteiro aparece esbranquiçado.

Quando o raio das partículas é maior que aproximadamente 8 vezes o comprimento de onda da radiação, a distribuição angular da radiação espalhada pode ser descrita pelos princípios da ótica geométrica. O espalhamento de luz visível por gotas de nuvens, gotas de chuva e partículas de gelo pertence a este regime e produz uma variedade de fenômenos óticos como arco íris, auréolas, etc.

1.1.2 Reflexão na atmosfera

Aproximadamente 30% da energia solar é refletida de volta para o espaço (Figura 1). Este valor já inclui a quantidade que é retro-espalhada. A reflexão ocorre na interface entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta. Nesta interface, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (lei da reflexão). A fração da radiação incidente que é refletida por uma superfície chama-se albedo; portanto, o albedo da Terra como um todo (albedo planetário) é 30%. O albedo varia no espaço e no tempo, dependendo da natureza da superfície e da altura do Sol (ver Tabela 1). Dentro da atmosfera, os topos das nuvens são os mais importantes refletores. O albedo dos topos de nuvens depende de sua espessura, variando de menos de 40% para nuvens finas (menos de 50m) a 80% para nuvens espessas (mais de 5.000m).

Tabela 1 – Albedo para algumas superfícies no intervalo visível

Superfície	Albedo (%)
Solo descoberto	10-25
Areia, deserto	25-40
Gramma	15-25
Floresta	10-20
Neve (limpa, seca)	75-95
Neve (molhada e/ou suja)	25-75
Superfície do mar (sol a mais de 25° acima do horizonte)	<10
Superfície do mar (pequena altura do sol)	10-70
Nuvens espessas	70-80
Nuvens finas	25-50

Fonte: Grimm, 1999.

1.1.3 Absorção na atmosfera

O espalhamento e a reflexão simplesmente mudam a direção da radiação. Contudo, através da absorção, a radiação é convertida em calor. Quando uma molécula de gás absorve radiação esta energia é transformada em movimento molecular interno, detectável como aumento de temperatura. Portanto, são os gases – bons absorvedores da radiação disponível – que têm papel preponderante no aquecimento da atmosfera.

A Figura 2 fornece a absortividade dos principais gases atmosféricos em vários comprimentos de onda. Na figura, observa-se que o gás N_2O é um fraco absorvedor da radiação solar incidente em comparação aos gases CO_2 e H_2O , enquanto o O_2 e o O_3 absorvem virtualmente toda radiação solar ultravioleta entre 0,1 e 0,2 μm . Estes três últimos respondem pela maior parte dos 19% da radiação solar que são absorvidos na atmosfera.

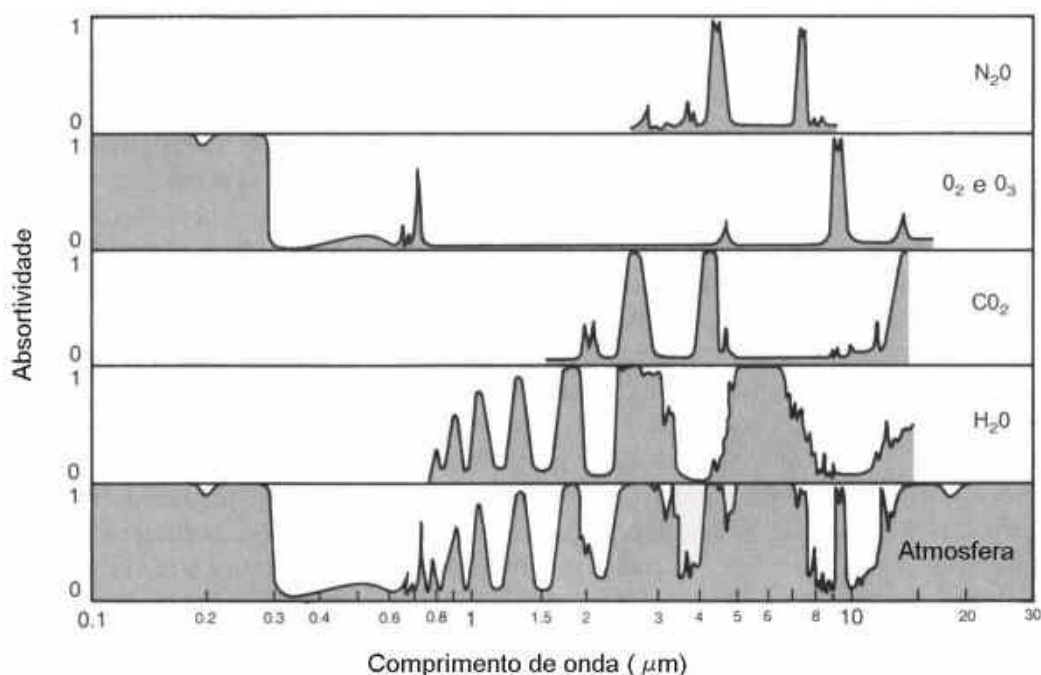


Figura 2 – Absortividade de alguns gases da atmosfera e da atmosfera como um todo
Fonte: Grimm, 1999.

Nota-se ainda que, na atmosfera como um todo, nenhum gás absorve efetivamente radiação entre 0,3 e 0,7 μm . Como esta região do espectro corresponde ao intervalo visível, ao qual pertence uma grande fração da radiação solar, pode-se dizer que a atmosfera é bastante transparente à radiação solar incidente.

A Figura 3 mostra o espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra para o caso do Sol no zênite (altura = 90° , curva inferior), juntamente com o espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera (curva superior). A área entre as duas curvas representa a diminuição da radiação devido a:

- 1) retro-espalhamento e absorção por nuvens e aerossóis, e retro-espalhamento por moléculas do ar (área não sombreada);
- 2) absorção por moléculas do ar (área sombreada).

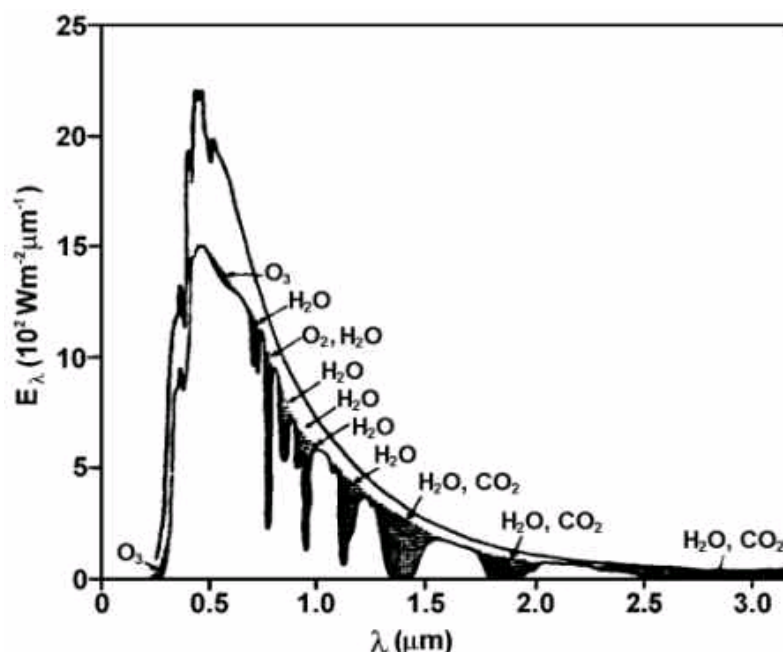


Figura 3 – Espectro da radiação solar no topo da atmosfera (curva superior) e no nível do mar (curva inferior), para atmosfera média e sol no zênite

Fonte: Grimm, 1999.

1.1.4 Medição da radiação solar

Os dados de radiação solar são normalmente fornecidos pelos serviços meteorológicos governamentais, a partir de instrumentos calibrados. Os instrumentos mais comuns são (DMC, 2007):

a) Heliógrafo (Figura 4-a): é o aparelho que mede a duração da radiação direta durante o dia. Um exemplo desse aparelho é o heliógrafo de Campbell-Stokes, composto de uma esfera de vidro com cerca de 10 cm de diâmetro, a qual permite concentrar os raios sobre uma tira especial de papel, queimada lentamente pela radiação ao longo de seu comprimento. A queima é interrompida na ausência de radiação direta e recomeça com o reaparecimento dessa. Ao fim do dia ficam registrados os períodos em que houve radiação direta.

b) Piranômetro (Figura 4-b): registra a radiação solar global recebendo a energia solar de todo o hemisfério celeste, isto é, de horizonte a horizonte em todas as

direções, estando numa base horizontal. Pode receber uma adaptação (Figura 4-c) a fim de medir a radiação solar difusa.

c) *Piro-heliômetro ou pireliômetro* (Figura 4-d): usado para medir diretamente a radiação solar direta; para isso, sua superfície receptora é colocada no extremo inferior de um tubo fino e comprido e deve ser mantida sempre normal aos raios solares.

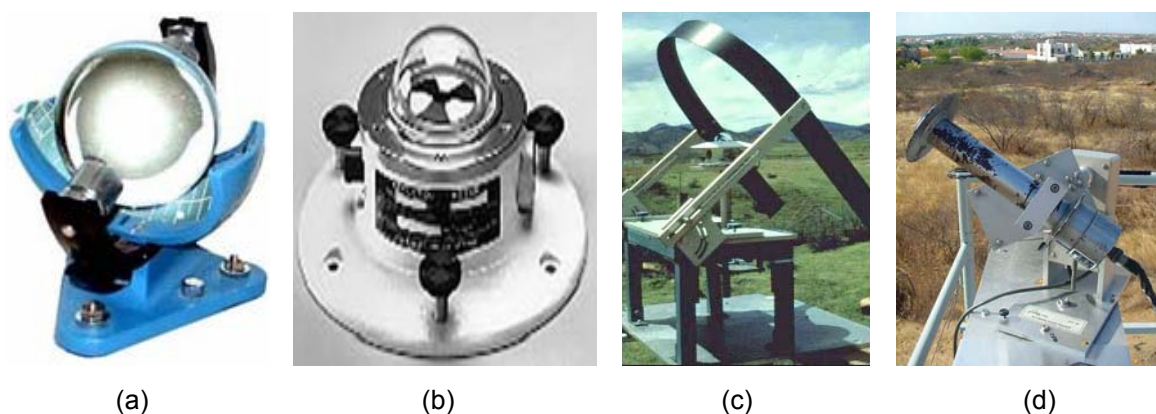


Figura 4 – Instrumentos de medição da radiação solar

Fonte: DMC, 2007.

O INMET – Instituto Nacional de Meteorologia – exibe na sua página eletrônica (www.inmet.gov.br) vários dados meteorológicos, entre eles a radiação global, para um grande número de estações espalhadas pelo Brasil. O piranômetro fornece a radiação global em MJ/m^2 acumulada a cada intervalo de uma hora, permitindo assim que se use os dados ao longo de um determinado período para saber, por exemplo, a média diária de radiação que incide em uma determinada área.

Entretanto, o uso de tais informações deve levar em consideração sua natureza intrínseca a fim de não acarretar em erros conceituais; um exemplo clássico é a utilização de uma curta série de dados (como uma semana) para fazer previsões de longo alcance (como um ano), por não levar em consideração a irregularidade com a qual certos fatos de importância meteorológica ocorrem (como nuvens e a poluição atmosférica). O procedimento de converter a radiação global (MJ/m^2) em taxa de radiação global média (MW/m^2), simplesmente dividindo a radiação global por um período desejado de tempo, pode levar a erros grosseiros, já que a presença

irregular de nuvens durante a medição não é explicitada em números pelo piranômetro para a devida separação entre radiação direta e difusa, separação esta que se faz necessária de acordo com o uso desejado da radiação solar.

Tais problemas podem ser contornados utilizando-se uma longa série de dados (ou seja, dados coletados durante alguns anos) e – caso necessário – um *software* que permita a avaliação, para um determinado período, dos dados de radiação solar que nele são inseridos, através de modelos matemáticos disponíveis na literatura científica.

1.2 Formas de conversão da energia solar

Existem diversas maneiras de se utilizar a energia solar, seja em aplicações de pequeno ou de grande porte. Os principais sistemas de conversão de energia solar podem ser divididos em três grandes categorias:

- a) *Conversão direta para aquecimento*: abrange os sistemas usados para aquecimento de água, de ambientes, secagem de alimentos e materiais, cozinha e aquecimento industrial (incluindo vapor e fornos solares);
- b) *Conversão com etapa termodinâmica intermediária*: refere-se aos sistemas de destilação de água, refrigeração e obtenção de potência mecânica ou de eletricidade a partir do calor (através de motores ou turbinas);
- c) *Conversão direta para eletricidade*: envolve a conversão por meio de fotocélulas (ou conversão fotovoltaica), células fotogalvânicas e fotoválvulas.

Verifica-se que o calor obtido por meio de coletores solares planos é restrito a temperaturas relativamente baixas (até 80 °C), em comparação com as temperaturas obtidas com o uso das técnicas de concentração da radiação solar, as quais permitem atingir temperaturas bem mais elevadas (mais de 300 °C). Esse fator, juntamente com a eficiência maior e a menor área necessária para a

implantação de concentradores solares, podem ser características que venham a compensar a alta sensibilidade dos concentradores solares à nebulosidade e à poluição e viabilizar o seu uso industrial.

Há dois tipos básicos de concentradores solares:

1 – concentradores de receptor central, compreendendo o concentrador parabolóide (Figura 5-a) e o campo heliostático (instalação de espelhos facetados orientados para o topo de uma torre, Figura 5-b);



(a)



(b)

Figura 5 – Concentradores de receptor central

Fonte: PSA, 2007.

2 – concentradores de foco linear, cujos espelhos têm a forma de um semicilindro parabólico (Figura 6-a) ou de faixas de espelhos facetados orientados para o tubo absorvedor (Figura 6-b).



(a)



(b)

Figura 6 – Concentradores de foco linear

Fonte: PESN, 2007.

Também podem ser empregadas as lentes de Fresnel, convergindo em um ponto ou ao longo de uma linha, para se conseguir a concentração dos raios solares. Ao invés de uma lente com superfície esférica contínua, uma lente de Fresnel é feita de um conjunto de seções sucessivas recortadas a partir de uma lente, conforme mostra a figura abaixo, resultando uma lente muito mais leve com a mesma distância focal (Figura 7).

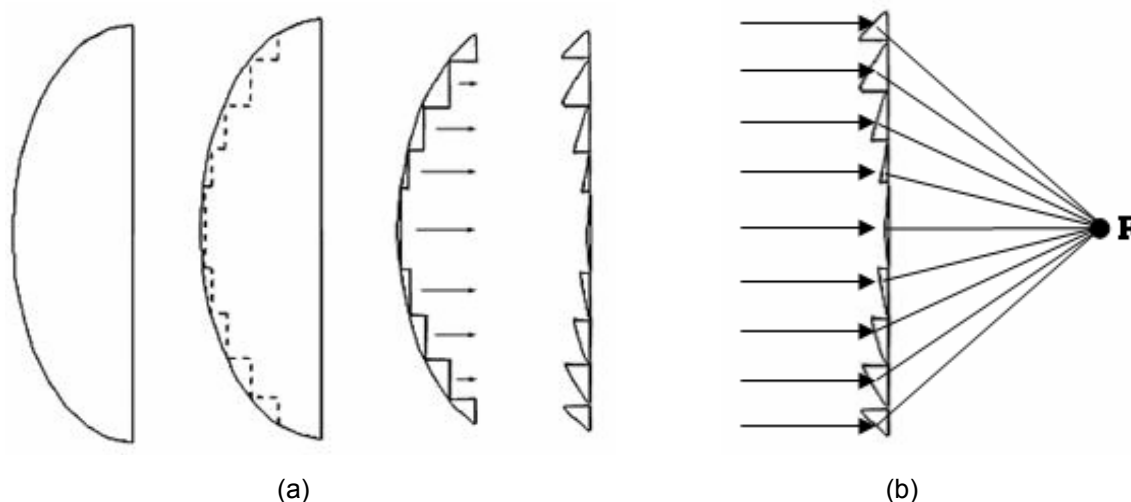


Figura 7 – (a) Seqüência de fabricação de uma lente de Fresnel e (b) a concentração dos raios sobre o foco F

Fonte: PESN, 2007.

1.3 Objetivo do experimento

O início do presente projeto ocorreu com a publicação de Gasparini e Louzada (2006), onde é descrito o objetivo deste projeto que naquela época foi financiado pela Fundação de Apoio a Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (FAPES) ligada à Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Espírito Santo (SECT) e apoiado pela Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), juntamente com o Departamento de Engenharia Mecânica da UFES. Naquele trabalho foi proposta uma metodologia básica visando o desenvolvimento de um equipamento termo-acumulador que tem como meta reduzir a viscosidade de óleos pesados, com conseqüente redução da perda de carga distribuída durante o escoamento no interior de oleodutos terrestres (*on-shore*), utilizando a energia solar como fonte de calor e a fusão de parafina como meio de termo-acumulação.

O projeto, como um todo, tem por objetivo avaliar o desempenho do concentrador solar parabólico linear projetado e construído, bem como dos sistemas de circulação de fluido, isolamentos térmicos necessários e demais dispositivos responsáveis pela intensificação de trocas de calor e aumento de desempenho do mesmo. Neste contexto, a presente dissertação é uma parte deste projeto, visando estudar o escoamento de água pelo tubo absorvedor tendo como parâmetros a eficiência de absorção de calor e o número de Nusselt do escoamento, a fim de avaliar os tipos de tubos absorvedores utilizados e lançar propostas para futuras melhorias nos mesmos em termos de materiais, geometria e outros detalhes de projeto.

1.4 Revisão bibliográfica

Para melhor compreender os fenômenos físicos que regem os processos de troca de calor, mudança de fase e escoamento dos fluidos, bem como suas propriedades físicas, foi realizada uma pesquisa na bibliografia aberta especializada sobre o estado-da-arte dessa área de estudo.

Dentre os trabalhos de maior contribuição para o presente projeto situa-se o trabalho desenvolvido por Su e Estefen (2005), que propõe o aquecimento elétrico de oleodutos submarinos compostos de multicamadas utilizados no transporte de óleos pesados, a fim de avaliar a queda de pressão entre o poço e o separador e a potência requerida pelo processo. Através deste método conseguiu-se uma significativa redução da queda de pressão, com conseqüente redução da potência de bombeamento de 10,0%, 16,1% e 31,1% para uma taxa de aquecimento de 40 W/m respectivamente em vazões de 30, 25 e 20 kg/s de óleo pesado (18° API) numa tubulação de 25 km de comprimento.

Outro trabalho com informações representativas para o presente projeto é o proposto por Trp (2005), no qual é modelado o processo de fusão e a solidificação da parafina como elemento termo-acumulador em um trocador de calor do tipo casco-tubo. Além da modelagem adimensional dos fenômenos de solidificação e fusão da parafina, também foi avaliada a troca de calor com o Número de Prandtl. Ao final deste trabalho, concluiu-se que a fusão da parafina não se processa de

forma isotérmica, enquanto que na solidificação o processo ocorre isotermicamente. Esse processo de acúmulo de energia por mudança de fase está previsto para ser utilizado em fases mais adiantadas do presente projeto.

Por outro lado, Wang et al. (2004) investigaram experimentalmente trocadores de calor para aquecimento de óleo cru usando energia solar e obtiveram elevações de temperatura do óleo de 25 a 30 °C, através de coletores solares planos. Isso veio a consolidar a idéia do presente projeto, tendo em vista os resultados obtidos com coletores solares planos, que normalmente fornecem temperaturas de operação inferiores àsquelas obtidas por meio de concentradores solares parabólicos tal como é proposto no presente trabalho.

Na concepção, projeto e montagem do concentrador solar e sistemas correlacionados aqui utilizados, foi de crucial importância o trabalho de Villalobos (1995), que fornece informações detalhadas sobre os fenômenos envolvidos com sistemas de aproveitamento de energia solar, bem como os tipos e suas respectivas aplicações.

Já o trabalho de Pérez (2005) traz informações e detalhes técnicos construtivos dos concentradores solares, como, por exemplo, métodos que visam aumentar a captação de calor.

No trabalho de Dogruoz et al. (2005), vários experimentos foram realizados a fim de encontrar as características de transferência de calor e queda de pressão em escoamentos laminares dentro de um duto com aletas internas alinhadas de seção transversal quadrada, e uma correlação do número de Nusselt para escoamentos com baixos valores do número de Reynolds, entre 230 e 550, em função do espaçamento entre aletas, do diâmetro hidráulico das mesmas e do número de Reynolds, sem levar em consideração o número de Prandtl do escoamento. Tal conhecimento é usado como uma parte dos desenvolvimentos.

Muitos fundamentos teóricos e práticos sobre energia solar – características da energia solar, conceitos sobre transferência de calor por radiação, instrumentos e métodos de medida e tipos de concentradores solares, por exemplo – foram obtidos

a partir de Siegel e Howell (1972), Palz (1981), Acioli (1994), Incropera e DeWitt (1998) e Grimm (1999).

Um dos parâmetros que têm grande influência na análise óptica dos concentradores solares é o tamanho efetivo do disco solar (e conseqüentemente o ângulo de aceitação dos raios solares), o qual é identificado por meio de simulações para uma gama de condições atmosféricas (Buie, Dey e Bosi, 2003). A definição sobre este parâmetro afeta diretamente a máxima eficiência de absorção de calor e a temperatura de operação ótima em qualquer concentrador solar (Schubnell, 1992), o que faz deste um parâmetro essencial a ser levado em consideração – juntamente com outras variáveis como insolação, propriedades ópticas dos materiais, tipo de tubo absorvedor, etc. – para a otimização dos concentradores solares parabólicos (Rabl, Bendt e Gaul, 1982).

As dimensões, os arranjos e os detalhes operacionais do concentrador parabólico utilizado na coleta dos dados experimentais podem ser encontrados no trabalho de Gasparini e Louzada (2006). Ramos, Gasparini e Anjos (2007) mostram os primeiros resultados deste projeto para o sistema aberto do fluido de trabalho com arranjos distintos de tubos focais e também a ineficiência do uso de arame interno de cobre para aumentar a turbulência e melhorar a transferência de calor para o fluido, enquanto Anjos, Ramos e Gasparini (2007) comparam os resultados de novos testes dos arranjos com e sem tubo de vidro envolvendo-o e mostram a necessidade de se usar o tubo de vidro para reduzir as perdas de calor por radiação e convecção.

O *software* que foi usado para avaliar dados de radiação solar por meio de modelos matemáticos disponíveis na literatura científica é o “Radiasol” (UFRGS, 2001), aplicativo gratuito elaborado por pesquisadores do Laboratório de Energia Solar – LabSolar da UFRGS. Inserindo-se as coordenadas geográficas da estação de medição e, em cada mês, a média mensal da radiação global diária, o aplicativo permite estimar, por exemplo, as radiações difusa e direta durante um dia, permitindo ainda modificar os fatores que influenciam no resultado, tais como ângulo da superfície com o plano horizontal e modelo matemático para definir a radiação difusa.

Capítulo 2

“A força não provém da capacidade física e sim de uma vontade indomável.” (Mahatma Gandhi)

2 CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO

2.1 Características e construção

O projeto e a montagem do concentrador solar teve início em agosto de 2005, sendo sua montagem finalizada no início de janeiro de 2006, período no qual foram realizados os primeiros testes e conseqüentemente verificados os primeiros problemas.

O concentrador solar projetado é de seção parabólica com foco linear, cilíndrico e articulado em apenas um eixo com a liberdade de girar em até 90° (de 45° leste para 45° oeste). Seu princípio de funcionamento baseia-se no fato de que todos os raios incidentes paralelamente ao eixo central sobre a superfície do espelho parabólico devem ser refletidos para o foco F (Figura 8).

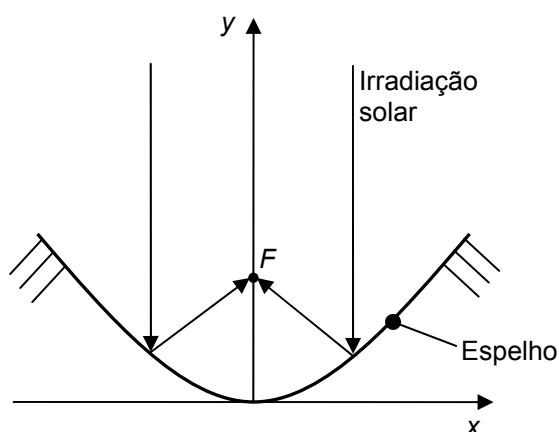


Figura 8 – Princípio de funcionamento do concentrador parabólico

Este tipo de concentrador solar foi escolhido por atingir temperaturas da ordem de 300 °C em detrimento, por exemplo, de coletores planos convencionais, que normalmente atingem temperaturas inferiores a 80 °C. Também foi levada em consideração a relativa facilidade de fabricação deste tipo de concentrador.

Devido a limitações de peso e transporte da estrutura do concentrador, as dimensões deste foram limitadas a 2 metros de comprimento (L_C) e 1 metro de largura, esta representada na Figura 9 por w . A equação do perfil parabólico é dada por:

$$y = x^2 / 4 DF \quad (1)$$

Na Equação (1), DF é a distância focal do concentrador. O comprimento do perfil parabólico (wp) pode ser obtido pela Equação (2):

$$wp = 2 \left[\frac{x}{2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4 DF^2}} + \frac{2 DF^2 \sqrt{1 + \frac{x^2}{4 DF^2}} \ln \left(x + \sqrt{4 DF^2 + x^2} \right)}{\sqrt{4 DF^2 + x^2}} \right]_0^{0.5} \quad (2)$$

a qual foi obtida após a integração entre 0 e 0,5 (= $w / 2$) da equação:

$$dwp^2 = dx^2 + dy^2 \quad (3)$$

Como superfície refletora optou-se por se utilizar uma chapa comercial de aço inoxidável espelhada AISI 430 de dimensões 2000 x 1220 x 0,6 mm, que possui boa refletividade (estimada entre 80 e 90%), facilidade de conformação e baixo peso, além de resistência a corrosão. Sabendo-se que a largura da chapa de aço inox espelhado é de 1,22 m – então $wp = 1,22$ m –, foi possível obter, após várias tentativas através da Equação (2), uma distância focal (DF) ideal, mostrada na Figura 9, de 0,20 metros.

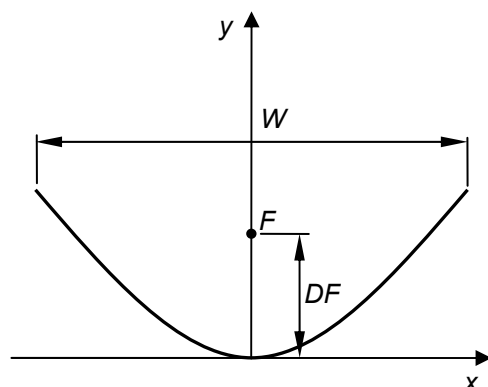
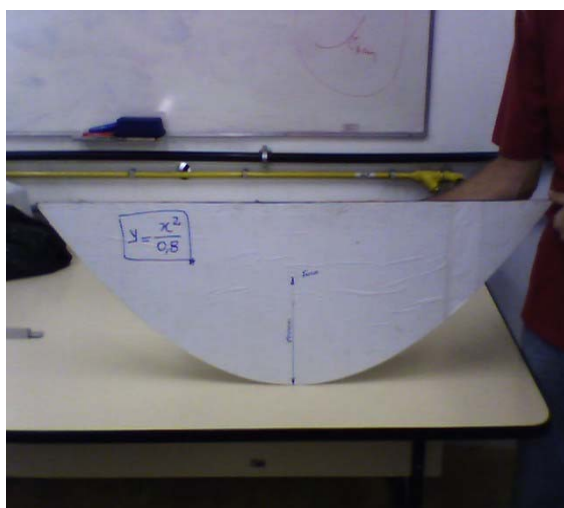


Figura 9 – Dados geométricos do perfil parabólico

Logo a área do espelho (A_{ESP}) é de $2,44 \text{ m}^2$, conforme a Equação (4):

$$A_{ESP} = L_C W_P \quad (4)$$

Com estas dimensões definidas, foi confeccionado o molde do perfil parabólico em uma fina placa de compensado (Figura 10-a), a fim de facilitar o processo de corte das placas laterais da estrutura (Figura 10-b).



(a)



(b)

Figura 10 – (a) Molde do perfil parabólico (b) Placas laterais confeccionadas com auxílio do molde.

Optou-se por construir a estrutura do concentrador solar em madeira, devido a maior facilidade de fabricação e menor custo quando comparada com aço e outros materiais. Apesar disso, as altas tolerâncias dimensionais do processo de corte da

madeira acarretam desvios no perfil parabólico e, conseqüentemente, a redução da eficiência do equipamento.

Após a construção, ainda foram necessários pequenos ajustes para manter a chapa espelhada no perfil desejado, ou o mais próximo deste, aplicando-se cantoneiras de alumínio nas laterais da estrutura (Figura 11-a), bem como pequenos calços abaixo da chapa, entre outros ajustes, até que a superfície refletora atinja o perfil parabólico desejado (Figura 11-b). Mesmo com tais ajustes, notou-se ainda a presença de ondulações nas laterais da superfície, as quais afetam a perfeita reflexão dos raios incidentes no tubo absorvedor.



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Estrutura com cantoneiras de alumínio (b) Acomodamento da superfície refletora sobre o berço.

No primeiro momento, foi instalado como tubo absorvedor um tubo com diâmetro externo de 19 milímetros (ou 3/4") e 1 milímetro de espessura de parede, com comprimento de 2 metros, feito de cobre, material que possui alta condutividade térmica e que é de fácil conformação mecânica. Esse tubo é fixado nas cantoneiras de alumínio frontais do concentrador e está conectado nas suas extremidades a sifões, que garantem o preenchimento completo do tubo absorvedor com o fluido de trabalho.

Por fim, o conjunto foi montado sobre um cavalete de madeira, permitindo o giro do espelho em pouco mais de 90 graus, e toda esta estrutura foi montada sobre uma

base de sustentação em alumínio sobre rodas a fim de facilitar a locomoção do equipamento e evitar constantes desmontagens da estrutura, conforme Figura 12.

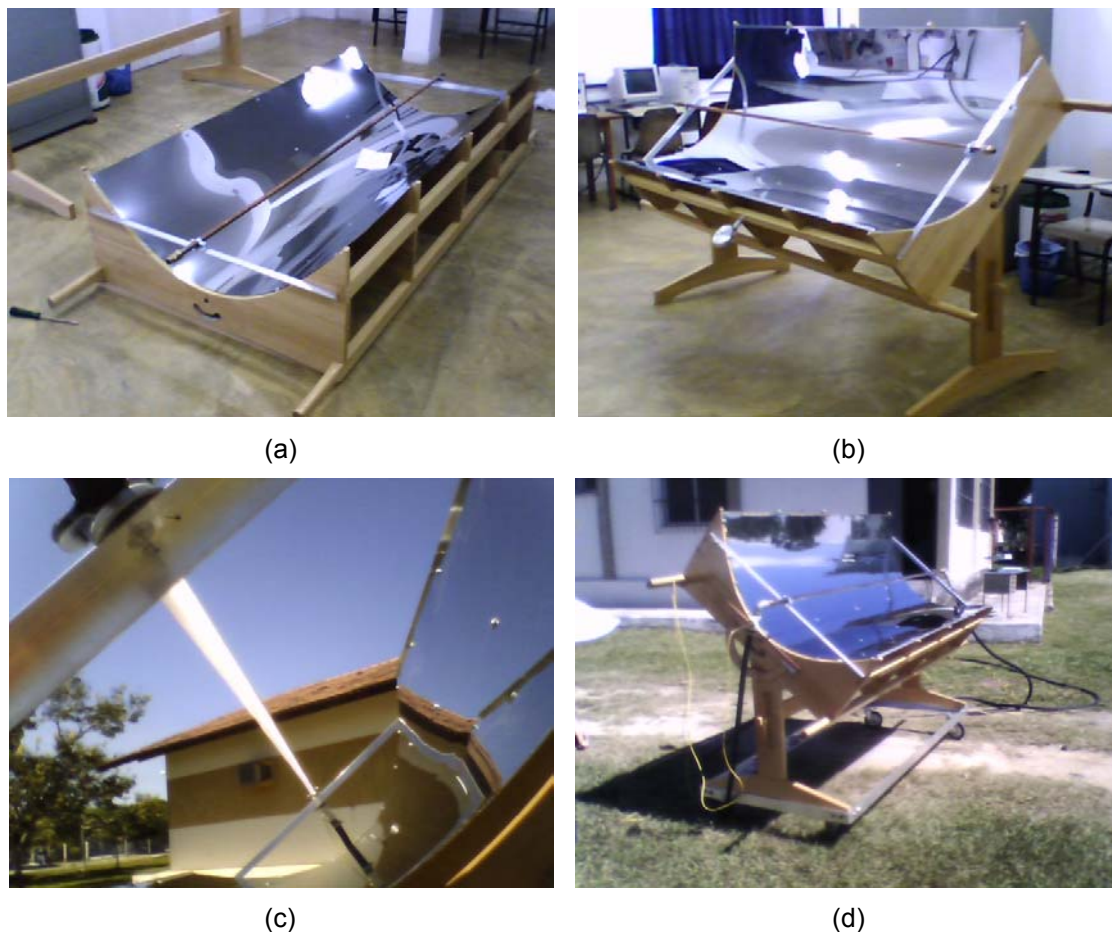


Figura 12 – (a) Fixação do tubo absorvedor através de cantoneiras de alumínio. (b) Vista do concentrador solar montado. (c) Tubo absorvedor iluminado homogeneamente. (d) Concentrador solar em teste, já instalado sobre a base móvel.

2.2 Parâmetros qualificadores do concentrador solar

Uma vez dimensionado o concentrador solar é possível analisar os principais parâmetros e perdas agregadas ao processo de concentração solar.

Um parâmetro importante é o fator de concentração solar, o qual é a relação entre a área projetada da superfície refletora parabólica e a área da superfície do tubo absorvedor, conforme mostrado na Figura 13-a.

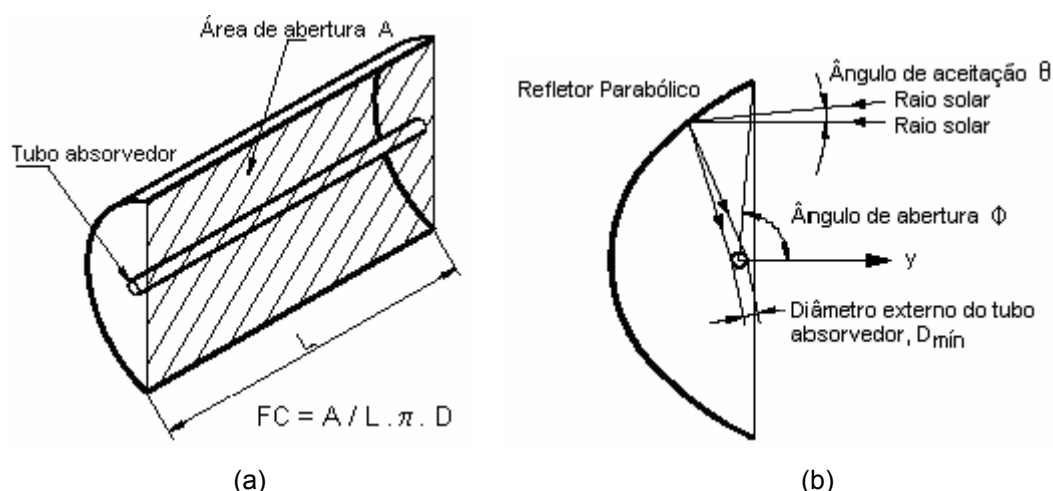


Figura 13 – (a) Fator de concentração (b) Ângulo de aceitação

Fonte: Perez, 2005.

Para concentradores parabólicos lineares, o fator de concentração máximo ($FC_{máx}$) é definido por (Perez, 2005):

$$FC_{máx} = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (5)$$

onde θ é o ângulo de aceitação dos raios solares (Figura 13-b), definido como o ângulo sob o qual o disco solar é visto na Terra; o valor deste ângulo varia muito pouco em função do local sobre a superfície terrestre e deve ser determinado por meio de simulações no local onde se deseja aplicar a concentração solar (Buie, Dey e Bosi, 2003). Contudo, para os fins deste trabalho, será adotado o valor de $0,533^\circ$ no verão (Palz, 1981), e por meio deste obteve-se um fator de concentração máximo de 108,11 para este tipo de espelho.

Um dado importante que é possível de se obter a partir do conhecimento do ângulo de aceitação é o valor do diâmetro mínimo do tubo absorvedor (D_{min}) para que o mesmo receba, ao longo da sua circunferência, toda a radiação solar refletida pelo espelho. Este valor é obtido pela interseção entre os raios solares refletidos e o eixo y, conforme mostra a Figura 13-b.

Dado que a área projetada da superfície parabólica do espelho construído ($A_{ESP, proj}$) é de 2 m² e a área da superfície do tubo absorvedor ($A_{T, sup}$) é de 0,12 m², pode-se calcular o fator de concentração do concentrador (FC), através da equação:

$$FC = \frac{A_{ESP, proj}}{A_{T, sup}} \quad (6)$$

Logo, o fator de concentração do concentrador solar construído foi igual a 16,71. Então o fator real corresponde a 15,5% do máximo fator teórico, nesse caso.

2.3 Perdas ópticas relacionadas ao projeto

Na operação com o tubo absorvedor orientado no sentido norte–sul, existe a perda óptica relacionada à reflexão dos raios solares em uma pequena faixa da superfície refletora na extremidade do concentrador solar (Figura 14).

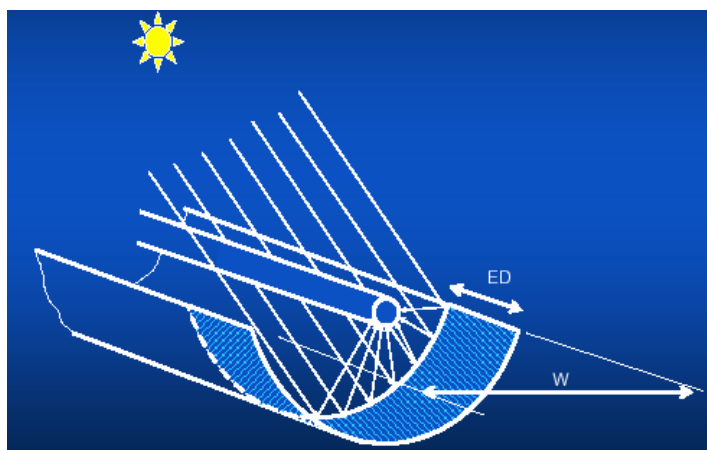


Figura 14 – Perdas na extremidade do concentrador solar

Fonte: Villalobos, 1995.

Logo a área útil será reduzida, pois na extremidade os raios solares serão refletidos para fora do concentrador solar. Pode-se resolver este problema prolongando o tubo absorvedor após o fim do concentrador solar, ou inclinando a superfície refletora de um ângulo ϕ (ângulo de incidência dos raios solares).

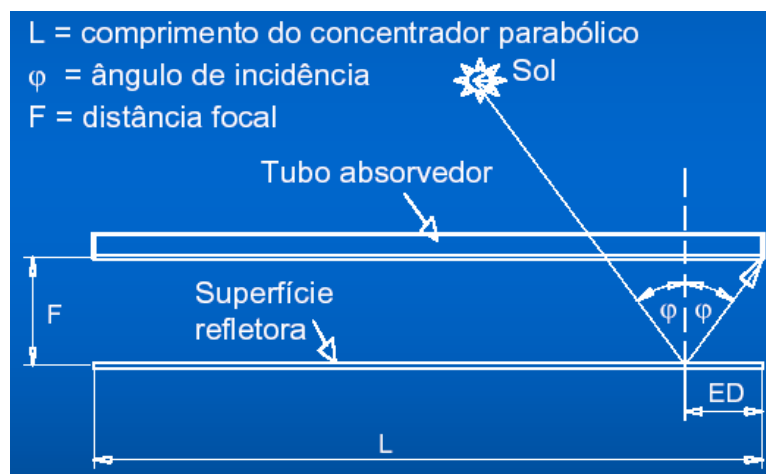


Figura 15 – Detalhes de cálculo das perdas ao final do concentrador solar

Fonte: Villalobos, 1995.

É possível quantificar esta perda, considerando que em Vitória-ES o ângulo φ gira em torno de 20° , e segundo o projeto do concentrador solar, os valores da abertura (w) e da distância focal (DF) são respectivamente 1 metro e 0,2 metros, pode-se obter a área de perdas ópticas (A_f), através da seguinte equação (Perez, 2005):

$$A_f = w \, ED = w \, DF \tan(\varphi) \quad (7)$$

onde ED é o comprimento da faixa de perdas ópticas, o qual vale 7,28 cm e, assim, a área de perdas ópticas é igual a aproximadamente $0,0728 \, \text{m}^2$.

Outras perdas ópticas ocorrem devido à presença, nas bordas da superfície refletora, de ondulações e deformações impostas pelo próprio processo de fabricação. Após os testes do concentrador solar foi possível estimar uma área aproximada de $0,8 \, \text{m}^2$ de perdas nos bordos, medindo-se sobre o espelho, a partir da borda em direção ao seu centro, o tamanho do trecho que, ao ser coberto, não interfere no tubo absorvedor produzindo sombra sobre o mesmo, e tal medida foi multiplicada pelo comprimento do concentrador.

Logo a área útil real da superfície refletora é de aproximadamente $1,55 \, \text{m}^2$, ou 64% da área total ($2,44 \, \text{m}^2$), indicando que a área projetada da superfície refletora será de $1,28 \, \text{m}^2$ (64% de $2 \, \text{m}^2$).

Como a irradiação média no Brasil está em torno de 700 W/m^2 (Cometta, 2005), supondo-se que esta seja totalmente radiação direta e tendo em vista que a superfície refletora possui uma área projetada de 2 m^2 , a máxima energia captada por essa seria de 1400 W , mas somente 896 W ($1,28 \text{ m}^2 \times 700 \text{ W/m}^2$) seriam efetivamente aproveitados pelo concentrador solar.

2.4 Principais dados do projeto

A Tabela 2 apresenta os principais dados construtivos do projeto do concentrador solar bem como as suas perdas, conforme estimativas anteriormente feitas.

Tabela 2 – Principais características do projeto do concentrador solar projetado

Perfil parabólico		$y = x^2 / 0,8$
Comprimento do concentrador		2 m
Abertura do concentrador		1 m
Distância focal do concentrador		200 mm
Fator de concentração		16,71
Área total da superfície refletora		$2,42 \text{ m}^2$
Área útil da superfície refletora		$1,55 \text{ m}^2$
Razão (Área útil / Área total) da superfície		64%
Material da superfície refletora		Aço inox espelhado
Ângulo de aceitação dos raios solares		$0,533^\circ$
Tubo absorvedor	Diâmetro externo	19,05 mm
	Espessura da parede	1 mm
	Comprimento	2 m
	Material e Especificação	Cobre fosforoso ASTM CDA C12200
Perdas ópticas:		
– devido às deformações nos bordos		$0,8 \text{ m}^2$
– ao final do concentrador		$0,0728 \text{ m}^2$

2.5 Instrumentação

Os instrumentos utilizados durante a operação do concentrador solar podem ser divididos em três grupos: (i) instrumentos de orientação do concentrador solar, (ii)

instrumentos meteorológicos e (iii) instrumentos de controle e monitoramento do fluido.

2.5.1 Instrumentos de orientação

O primeiro instrumento a ser utilizado nos experimentos como orientador é a bússola, que tem por objetivo a exata orientação do tubo absorvedor na direção norte–sul.

O transferidor 180° de madeira com 40 cm de diâmetro, resolução de 1° e precisão de 0,5° (Figura 16-a), instalado perpendicularmente ao tubo absorvedor, isto é, na parte frontal da estrutura do concentrador solar, tem como finalidade permitir o monitoramento do ângulo de incidência dos raios solares.

O ponteiro solar (Figura 16-a), instalado sobre a placa estrutural central do concentrador, é usado para monitorar a posição do sol a fim de garantir que os raios solares incidam paralelamente ao eixo vertical do concentrador. Tal garantia se tem após a verificação de ausência de sombra de uma haste sobre um disco base, arranjo conhecido como ponteiro solar (Figura 16-b), ou de presença de sombra na direção norte–sul.



(a)



(b)

Figura 16 – (a) Transferidor e (b) Ponteiro solar instalados no concentrador solar

2.5.2 Instrumentos meteorológicos

Estes instrumentos meteorológicos são responsáveis pelo monitoramento das condições climáticas locais, formando uma mini-estação meteorológica, conforme mostrado na Figura 17.

A mini-estação meteorológica é constituída de:



Figura 17 – Mini-estação meteorológica

- a) um anemômetro tipo turbina para monitorar a velocidade do vento nas proximidades do concentrador solar;
- b) um ponteiro de mesa fixo, responsável por monitorar a posição do sol;
- c) um termo-higrômetro para medir a umidade e temperatura ambiente;
- d) um heliógrafo confeccionado pela equipe do projeto de concentração solar (Figura 18) composto de uma esfera de vidro de 8 cm de diâmetro e de uma estrutura feita com tubos de PVC.

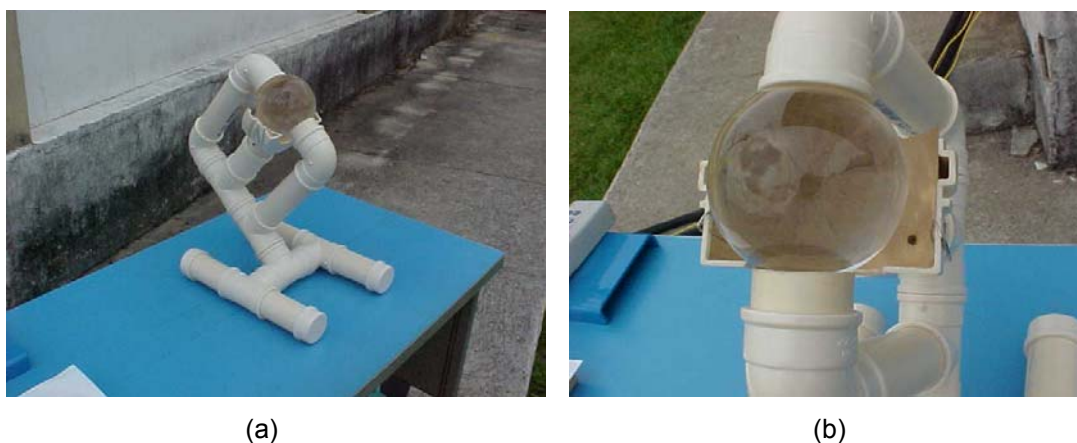


Figura 18 – (a) Heliógrafo (b) Detalhe da esfera de vidro do heliógrafo

2.5.3 Instrumentos de controle e monitoramento do sistema de fluido

Nesta categoria estão:

- a) os termopares utilizados para medir a temperatura do fluido de trabalho nos diversos pontos do circuito; dentre esses, apenas os termopares soldados ao tubo absorvedor necessitaram de calibração no local (ver Apêndice A para maiores detalhes);
- b) um multímetro com leitura de temperatura;
- c) um seletor de canais, montado na estrutura no lado oposto ao ponteiro solar;
- d) manômetros utilizados para monitorar a pressão do sistema;
- e) um rotâmetro calibrado (Figura 19) utilizado para controlar e medir a vazão de fluido.



(a)



(b)

Figura 19 – (a) Rotômetro (b) Rotômetro com as conexões para as mangueiras

2.5.4 Utilização dos instrumentos

Cabe aqui ressaltar que nem toda a instrumentação citada foi construída, adquirida e até mesmo usada ao longo de todo o projeto. Alguns desses instrumentos foram utilizados apenas no início dos estudos ou, então, deixados para uma futura melhoria no seu funcionamento a fim de fornecer dados mais precisos em sua utilização, enquanto outros são utilizados até a data presente.

A medição de umidade relativa e velocidade do vento local, por exemplo, não mais foi realizada pela equipe pelo fato de, atualmente, se ter livre acesso aos dados meteorológicos automáticos da estação do INMET que se situa no campus de Goiabeiras, a cinquenta metros de distância de onde foram feitos os experimentos – próximo à gráfica e à prefeitura universitárias da UFES –, por meio da página eletrônica do referido instituto.

Já a medição das horas de radiação direta pelo heliógrafo não foi continuada, pois ainda são necessárias melhorias no sentido de obter uma queima mais precisa do papel pelo heliógrafo, ajustando o local onde o papel fica assentado e utilizando um tipo do papel especial, a fim de que o heliógrafo não queime descontroladamente o papel inteiro. A Figura 20 mostra as tentativas feitas com papéis distintos no heliógrafo, onde se nota a falta de resolução na queima que serviria como parâmetro qualificador do tempo de radiação direta.

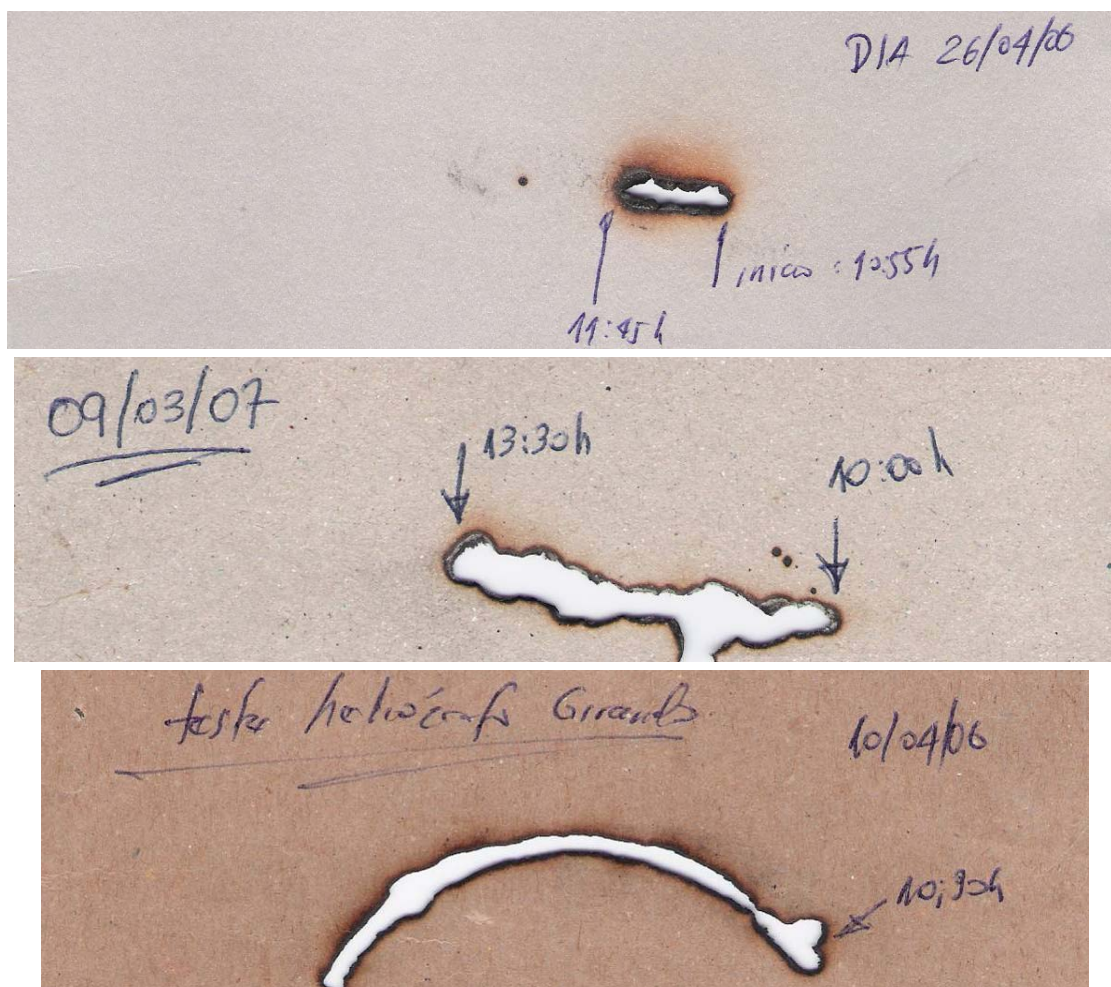


Figura 20 – Testes de queima de papéis no heliógrafo.

2.6 Sistemas de circulação

O projeto do concentrador solar também inclui os sistemas de circulação do fluido de trabalho, que são o circuito aberto e o circuito fechado, os quais serão detalhados a seguir.

No circuito aberto, o fluido escoar da válvula de alimentação até o concentrador solar onde recebe energia na forma de calor sensível e, do concentrador, o fluido é conduzido ao interior do laboratório; assim, em circuito aberto o fluido atravessa o concentrador solar uma única vez, conforme desenho esquemático da Figura 21.

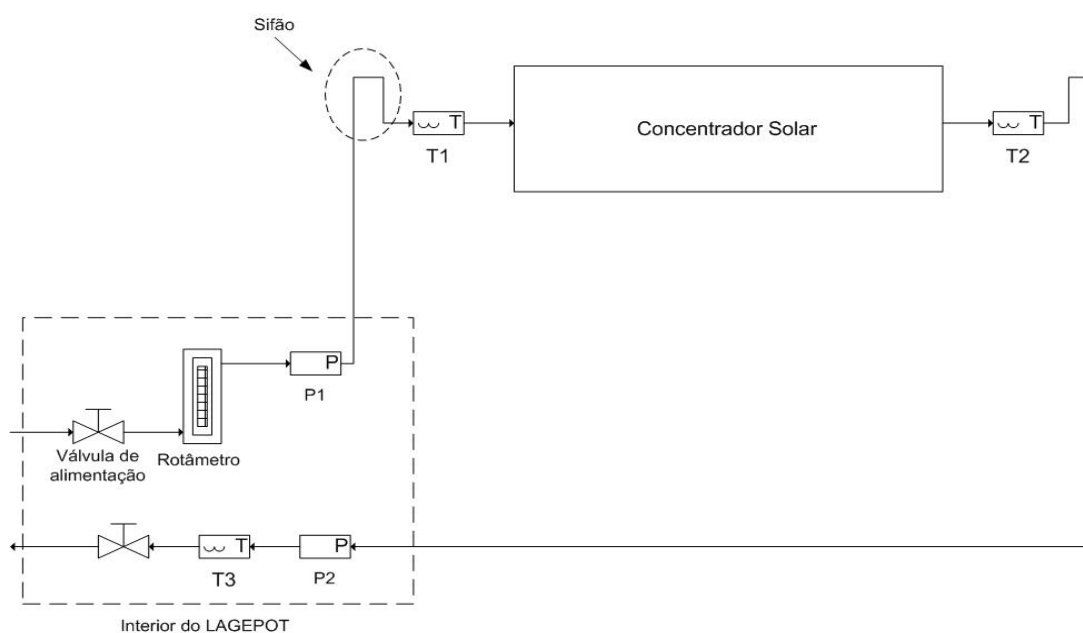


Figura 21 – Desenho esquemático do circuito aberto

Mangueiras de borracha resistentes à pressão e ao calor, que receberam isolamento térmico (Figura 22) devidamente projetado para esse fim, foram usadas inicialmente para conduzir o fluido até o tubo absorvedor e deste até o laboratório; posteriormente, mangueiras de PVC transparente substituíram as de borracha pelo seu menor peso e maior facilidade de instalação e manutenção.



Figura 22 – (a) Mangueira de borracha recoberta com isolamento térmico. (b) Mangueira com isolamento (acima) e sem isolamento.

No circuito fechado (Figura 23), uma determinada massa do fluido de trabalho escoa através do concentrador solar por meio de uma bomba centrífuga de pequena potência.

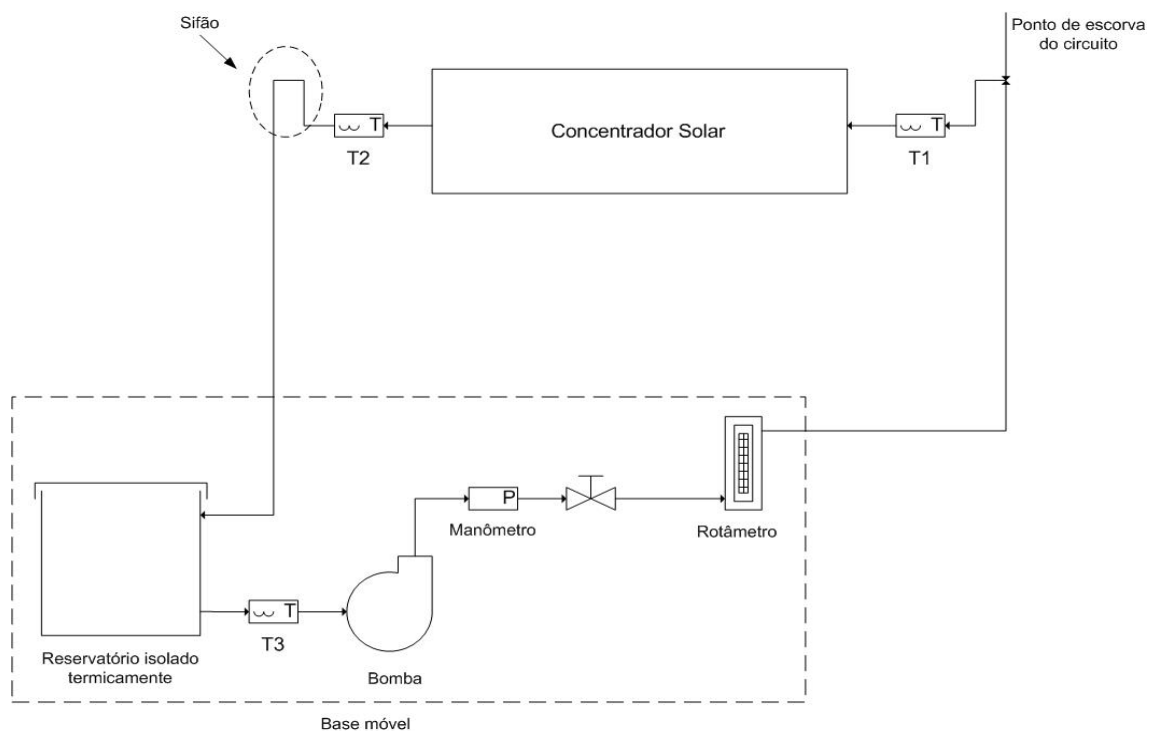


Figura 23 – Desenho esquemático do circuito fechado

O sistema é constituído de um reservatório termicamente isolado com volume interno de 30 litros, que alimenta a bomba centrífuga que opera afogada; esta tem sua vazão controlada por uma válvula ligada em série com o rotâmetro, medindo-se

assim a vazão do fluido, o qual é conduzido por mangueiras de borracha com isolamento térmico.

Após escoar pelo interior do tubo absorvedor, o fluido retorna ao reservatório, onde se espera que a temperatura da massa de água contida em seu interior se eleve pouco a pouco, isto é, as temperaturas medidas pelos termopares T1 e T3 aumentariam com o passar do tempo considerando que a radiação solar permaneça a mesma.

Uma base móvel (Figura 24), semelhante à utilizada pelo concentrador solar, foi construída para alocar o reservatório termicamente isolado, bomba, válvula e rotâmetro, proporcionando a redução do comprimento das mangueiras de alimentação e saída do tubo absorvedor e, com isso, a redução das perdas térmicas durante o escoamento.



Figura 24 – Base móvel do circuito fechado

Com o circuito fechado funcionando, espera-se o aumento da eficiência do concentrador solar, desenvolvendo-se um sistema de acumulação de energia térmica na forma latente – uma das finalidades do projeto – assim como o sistema trabalhado por Trp (2005).

Capítulo 3

“A distância não é nada. O importante é o primeiro passo.” (Marqueza de Deffand)

3 TUBO ABSORVEDOR

O tubo absorvedor é onde o fluido de trabalho absorve o calor concentrado pela superfície refletora na linha focal; portanto a montagem do tubo e a sua concepção devem ser tais que haja a maior troca térmica entre o tubo e o fluido possível, promovendo o melhor desempenho do sistema.

Neste capítulo serão mostrados os tipos de arranjos de tubo absorvedor usados em vários testes do concentrador solar, suas características e os resultados obtidos após cada experimento, visando identificar as melhores opções de montagem e fornecer uma idéia precisa sobre as melhorias que ainda poderão ser feitas a fim de se melhorar a eficiência de aproveitamento da radiação incidente. A única semelhança entre os arranjos é o material do tubo (cobre) e a pintura negra fosca na sua superfície externa, além do uso de água como fluido de trabalho em todos os testes.

3.1 Projetos dos tubos absorvedores

O primeiro tubo a ser utilizado como absorvedor é o tubo de cobre, nas dimensões citadas na Tabela 2, seção 2.4, que recebeu uma camada de tinta negra fosca ao longo de toda a superfície externa visando a diminuição da refletividade superficial da mesma, com conseqüente aumento da absortividade; tais fatos foram comprovados experimentalmente (Gasparini et al, 2006) e tal arranjo será chamado daqui em diante de “Tubo1”.

Já nos primeiros experimentos com o arranjo Tubo1, notou-se que a água atingia valores mais altos de temperatura na saída do tubo à medida que se diminuía a vazão; em um dia típico de verão com céu sem nuvens, a temperatura da água aumentou cerca de 30 °C para uma vazão volumétrica de $1,25 \cdot 10^{-3}$ l/s, o que forneceu um número de Reynolds médio ($Re_{D,m}$ na Equação 8) igual a 96, indicando que o escoamento é laminar.

$$Re_{D,m} = \frac{\rho_A 4 \nabla_A}{\mu_A \pi d_{T,in}} \quad (8)$$

Na Equação (8), $d_{T,in}$ é o diâmetro interno do tubo em metros, ∇_A é a vazão volumétrica da água em l/s, ρ_A é a massa específica da água em kg/m³ e μ_A é a viscosidade dinâmica da água em Pa*s, estas duas avaliadas à temperatura média $T_{A,m}$:

$$T_{A,m} = (T_{A,e} + T_{A,s})/2 \quad (9)$$

Na Equação (9), $T_{A,e}$ e $T_{A,s}$ são as temperaturas da água na entrada e na saída do tubo absorvedor, respectivamente.

Além disso, a baixa vazão tornou necessário o uso de sifões, na entrada e saída do tubo absorvedor, a fim de garantir o completo preenchimento do tubo pela água e o conseqüente aumento da troca térmica entre a parede interna do tubo e água.

Visando aumentar a turbulência do fluido de trabalho e obter algum “efeito aleta”, conseqüentemente aumentando a troca de calor, foi inserido um arame de cobre retorcido de forma irregular (Figura 25) no interior do tubo absorvedor, visando simular o processo de pinagem de tubos utilizados em caldeiras. Este arranjo será chamado daqui em diante de “Tubo2”.

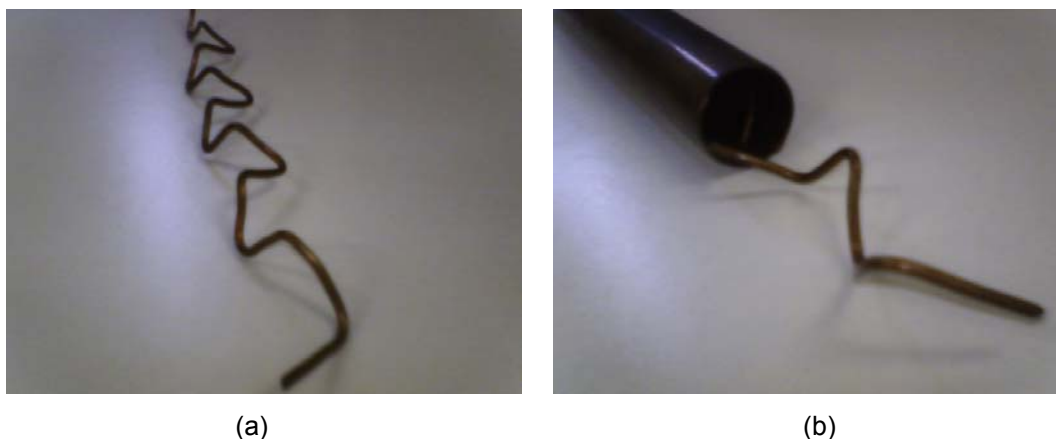


Figura 25 – (a) Arame utilizado para aumentar a troca de calor (b) Arame inserido no tubo absorvedor

Através de testes realizados com o arranjo Tubo2, Ramos et al. (2007) estimaram que a alta resistência térmica de contato entre o arame e a parede interna do tubo absorvedor, aliada à pequena vazão e conseqüente pequeno número de Reynolds num escoamento em regime laminar, torna ineficaz a aplicação do arame. Além disso, este não mostrou o efeito desejado de operar como aleta interna e a eficiência de absorção do tubo não aumentou significativamente, e assim o arranjo Tubo2 foi abandonado.

Além da baixa turbulência do escoamento, estima-se que o pequeno aumento da temperatura da água seja causado, em boa parte, por uma grande perda de calor por convecção, ocasionada pelo vento escoando ao redor do tubo; considerando que, em média, a velocidade do vento no local dos experimentos seja igual a 1 m/s e sua temperatura seja igual a 27°C, e que a temperatura do tubo absorvedor esteja a 100°C, a perda de calor por convecção atinge 200 W, aproximadamente. Perez (2005) sugere o uso de um tubo de vidro, externo ao tubo absorvedor, para reduzir essa perda e a perda de energia por radiação.

Como tubo de vidro foi utilizada uma lâmpada fluorescente de 2 metros de comprimento, 1mm de espessura e diâmetros interno e externo com respectivamente 36 e 38 mm, de baixíssimo custo e boa transmissividade. Para contornar o problema da pequena espessura da parede, a qual poderia se romper durante o transporte do concentrador, foram confeccionados anéis de nylon instalados ao longo do tubo de cobre centralizando-os e proporcionando maior

rigidez durante o transporte. O aspecto deste arranjo, chamado de “Tubo3”, pode ser visto na Figura 26.

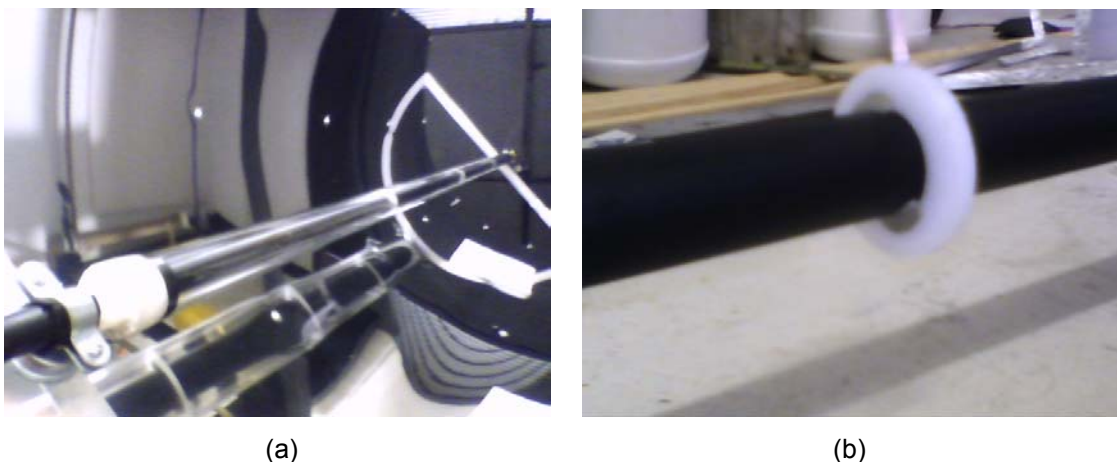


Figura 26 – (a) Vista do tubo de cobre inserido em tubo de vidro (b) Anel de nylon em detalhe

Sabendo-se que o uso de aletas permite uma maior taxa de transferência de calor entre um sólido e um fluido adjacente, aumentando a turbulência do fluido no local e a área de transferência de calor, foi planejada a instalação de aletas piniformes (pinos) de cobre internamente ao tubo absorvedor, soldadas em sua base na parede do tubo absorvedor e uniformemente distribuídas ao longo do seu comprimento. Instalação semelhante foi executada e avaliada para números de Reynolds entre 250 e 550 por Dogruoz et al. (2006), embora este disserte sobre escoamentos em um duto aletado de seção retangular.

Sobre o projeto de instalação de aletas internas no tubo focal, foi selecionado um fio de cobre de seção quadrada com 3mm de lado, com comprimento de 18mm (Figura 27-b), tamanho escolhido em virtude de uma mais fácil instalação e soldagem no interior do tubo focal; embora uma aleta com 9,5mm de comprimento (Figura 27-a) tenha uma maior eficiência como mostrado na Figura 28. Tais resultados foram obtidos considerando-se as equações de eficiência (η_{AL}) e efetividade (ζ_{AL}) da aleta em função do excesso de temperatura (χ), respectivamente definidas pelas Equação (10), (11) e (12) (Incropera e DeWitt, 1998), e em função da potência incidente na aleta (W_{AL}), cujo valor é estimado através da radiação média em um dia típico de Vitória-ES (obtida a partir do *software* Radasol) distribuída uniformemente ao longo de toda a circunferência externa no tubo absorvedor.

$$\eta_{AL} = \frac{W_{AL}}{h_A A_{AL,sup} \chi_{x=0}} \quad (10)$$

$$\zeta_{AL} = \frac{W_{AL}}{h_A A_{AL,tr} \chi_{x=0}} \quad (11)$$

$$\chi_{x=0} \equiv T_{AL,x=0} - T_A \quad (12)$$

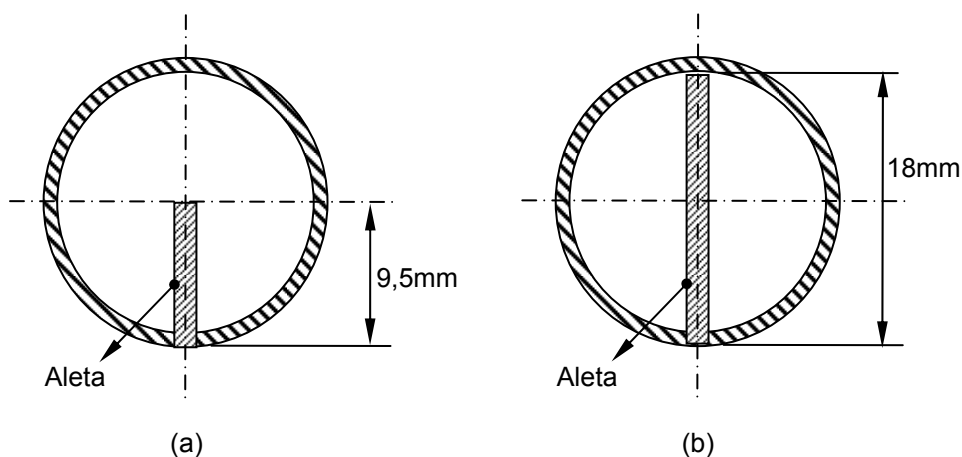


Figura 27 – Comparação esquemática entre aletas de (a) 9,5mm e (b) 18mm de comprimento

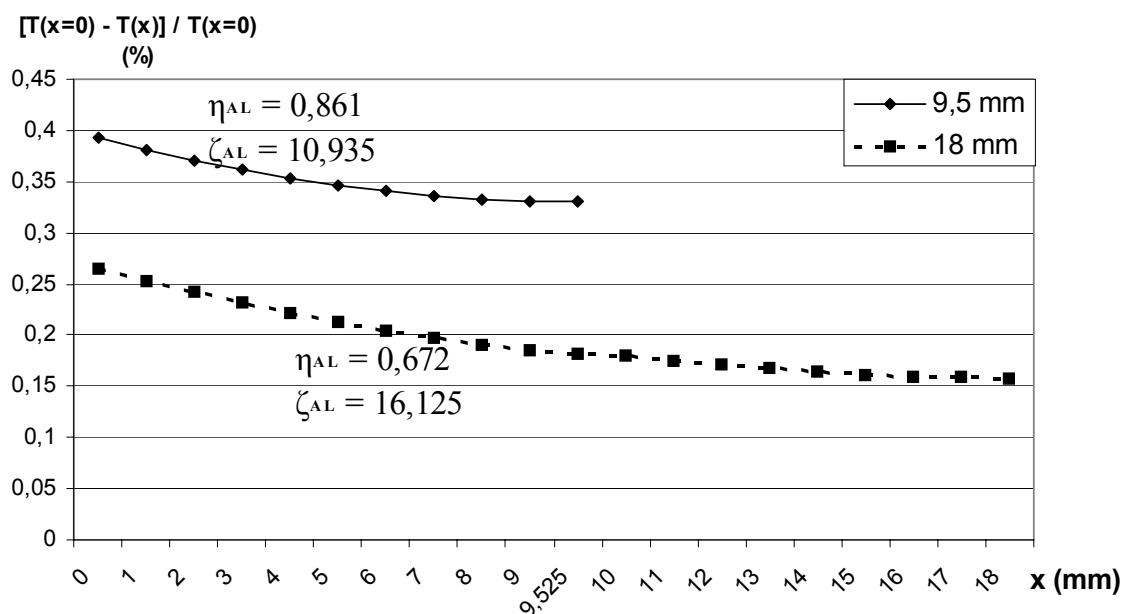


Figura 28 – Comparação do perfil de temperaturas, eficiência e efetividade de aletas de 9,5 e 18mm de comprimento

Embora a aleta de 9,5mm permita uma maior transferência de calor com o fluido, sua instalação se mostrou mais complicada, uma vez que a mesma deve possuir uma extremidade que a mantenha na posição desejada para soldagem e que deve

ser retirada após a soldagem, comprometendo a estanqueidade do tubo. Como a aleta de 18mm apóia-se na parede oposta ao furo feito para sua inserção, então a questão do posicionamento e da solda ficou melhor resolvido.

Assim, foram soldadas 100 aletas piniformes de base quadrada com 18mm de comprimento distribuídas ao longo do tubo, acrescentando em 18,05% (ou 0,0216 m²) a área interna do tubo. À essa maior área interna corresponde um tubo com 2,36m, 36cm a mais do que o tubo utilizado; esta maior área de transferência de calor, somada ao aumento da turbulência do fluido e à ausência do problema de resistência de contato que houve com o arame de cobre, sugere que o tubo absorvedor aletado proporcionará aumento na energia absorvida pelo fluido.

Logo após a conclusão do processo de soldagem, o tubo absorvedor recebeu anéis de nylon e um tubo de vidro para compor assim o arranjo “Tubo4”.

O último arranjo que foi montado e testado no concentrador solar é o “Tubo5”, composto de um tubo de cobre com 2 metros de comprimento, porém com diâmetro externo de 9,6mm e interno de 7,9mm, pintado em negro-fosco e envolto por um tubo de vidro com as mesmas dimensões anteriormente citadas sustentado por anéis de nylon.

Este diâmetro não foi escolhido por acaso; seu valor deriva dos cálculos de otimização geométrica do tubo absorvedor para o perfil parabólico usado no concentrador solar, sendo o valor mínimo do diâmetro para que o tubo receba, ao longo da sua circunferência, toda a radiação solar refletida pelo espelho, levando em consideração o ângulo de aceitação conforme descrito na seção 2.2. Como uma mesma quantidade de radiação será concentrada numa área menor de tubo, resultando num fator de concentração de 33,16 – o dobro do mesmo fator para o tubo com 19,05 mm de diâmetro externo, 30,67% do fator de concentração máximo –, espera-se que o fluido receba mais calor ao passar pelo Tubo5 em comparação com o arranjo Tubo3.

A Figura 29 mostra os croquis da seção transversal dos respectivos tubos descritos acima.

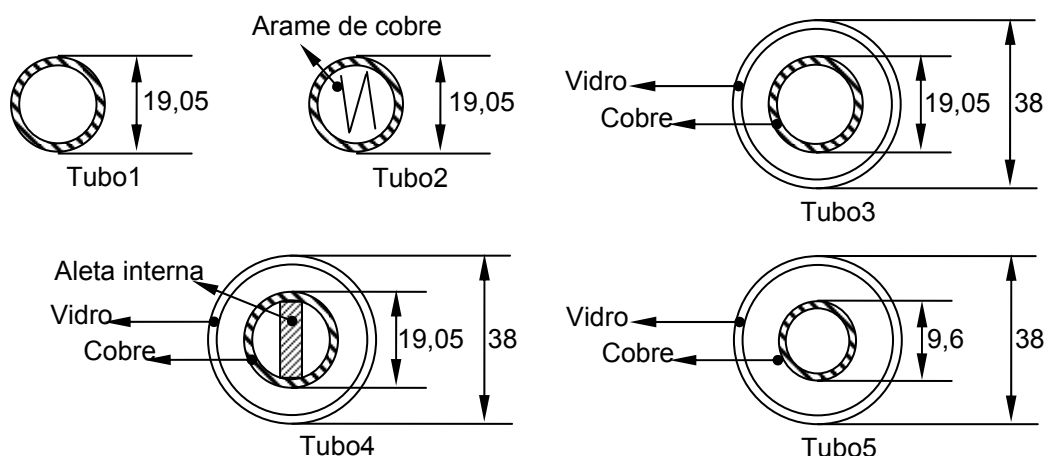


Figura 29 – Desenho esquemático do corte transversal dos tubos absorvedores utilizados (dimensões em milímetros)

3.2 Experimentos realizados

Para avaliar cada arranjo de tubo absorvedor e compará-los entre si, foram conduzidas campanhas de experimentos em vários dias de 2006, 2007 e 2008, com condições atmosféricas semelhantes em termos de temperatura ambiente, umidade relativa do ar, níveis de irradiação solar global e ausência de nuvens. Em função dessa seleção, muitos experimentos foram expurgados por vários motivos: ameaça de chuva, falta de água no laboratório, variação da cobertura de nuvens ao longo do dia, etc., de modo que aqui serão mostrados apenas os experimentos considerados satisfatórios.

Tabela 3 – Arranjos, dias de experimento e resultados obtidos

Arranjo	Dia(s)	Resultados obtidos
Tubo3	19/03/2007 (CF)	Calor absorvido, eficiência
Tubo3 (I)	21/02, 04/03 e 05/03/2008	Calor absorvido, eficiência, n° de Nusselt
Tubo4	20, 21 e 26/03/2007 (CF)	Calor absorvido, eficiência
Tubo4 (I)	19/11, 23/11, 04/12, 05/12, 11/12/2007 e 04/01/2008	Calor absorvido, eficiência, n° de Nusselt, correlação
Tubo5	14 e 15/02/2008	Calor absorvido, eficiência

(CF): Circuito fechado de água (I): Tubo instrumentado com termopares

No presente trabalho não serão comparados os arranjos Tubo1 e Tubo2, os quais Ramos et al. (2007) já mostraram experimentalmente serem de baixa eficiência em relação ao arranjo Tubo3.

A fim de se obter o número de Nusselt global experimental (Nu_G) do tubo – conforme Equação (13), foram soldados quatro termopares ao longo das paredes externas, os dos arranjos Tubo3 e Tubo4, cuja calibração e distância está detalhada no Apêndice A. De forma semelhante ao trabalho de Dogruoz et al. (2006), o objetivo é obter uma correlação empírica do número de Nusselt estimado (Nu_E) em função do número de Reynolds ($Re_{D,m}$), do diâmetro hidráulico das aletas ($d_{AL,h}$) e do espaçamento entre elas (S_{AL}), determinando os coeficientes C , $n1$ e $n2$ conforme Equação (14). Tal correlação virá a ser útil para que, conhecendo as características do escoamento e da transferência de calor no tubo, seja possível prever o que ocorrerá em sistemas de concentração solar semelhantes.

$$Nu_G = h_{A,G} \cdot d_{T,in} / k_{A,m} \quad (13)$$

$$Nu_E = C \cdot Re_{D,m}^{n1} \cdot (S_{AL} / d_{AL,h})^{n2} \quad (14)$$

$$h_{A,G} \cdot A_{T,in} \cdot (T_{T,m} - T_{A,m}) = \dot{m}_A \cdot c_{P,A} \cdot (T_{A,s} - T_{A,e}) \quad (15)$$

Na Equação (13), $d_{T,in}$ é o diâmetro interno do tubo em metros e $k_{A,m}$ é o coeficiente de condução da água em W/mK avaliado à temperatura média $T_{A,m}$, enquanto $h_{A,G}$ é o coeficiente de convecção global da água em W/m²K:

$$h_{A,G} = \frac{\dot{m}_A \cdot c_{P,A} \cdot (T_{A,s} - T_{A,e})}{A_{T,in} \cdot (T_{T,m} - T_{A,m})} \quad (16)$$

Nas Equações (15) e (16), $\dot{m}_A$ é a vazão mássica em kg/s, $c_{P,A}$ é o calor específico da água em J/kgK à pressão constante avaliado à temperatura média $T_{A,m}$, $A_{T,in}$ é a área interna do tubo e $T_{T,m}$ é a temperatura média do tubo. A Equação (16) deriva da Equação (15), a qual significa que a água absorve o calor por convecção (termo à esquerda) e esse calor aumenta sua temperatura de $T_{A,e}$ para $T_{A,s}$ (termo à direita).

Durante os testes, o concentrador é basculado manualmente a cada 15 minutos no sentido Leste-Oeste e em cada dia foi utilizada uma vazão de água constante,

controlada pelo rotâmetro, durante o experimento. A potência instantânea disponível (W_{DISP}) e absorvida pela água (W_{ABS}) e o valor da eficiência de cada arranjo (η) são calculados conforme as seguintes equações:

$$W_{ABS} = \dot{m}_A \cdot c_{P,A} \cdot (T_{A,s} - T_{A,e}) \quad (17)$$

$$W_{DISP} = I_{SOL} A_{ESP,proj} \quad (18)$$

$$\eta = W_{ABS} / W_{DISP} \quad (19)$$

Na Equação (18), I_{SOL} é o fluxo de radiação solar global incidente em W/m^2 , e $A_{ESP,proj}$ é a área projetada do espelho (igual a $2m^2$).

O valor da radiação solar nos experimentos em circuito aberto é oriundo do *software* Radiasol (UFRGS, 2001), que simula as radiações solares diária, mensal e anual para várias cidades do país, incluindo Vitória-ES, já que na época desses primeiros experimentos não foi possível ter acesso a dados medidos. Para os experimentos em circuito fechado, I_{SOL} foi obtido através do mesmo *software* após receber dados atualizados de radiação solar retirados da página eletrônica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), cuja estação automática situa-se a poucos metros do local de realização dos experimentos.

Todas as tabelas contendo os dados coletados (e devidamente ajustados, no caso das temperaturas medidas) durante os experimentos, bem como os dados resultantes dos cálculos (eficiência, número de Nusselt, etc.) encontram-se no Apêndice B e serão analisados em detalhes no capítulo 4.

3.3 Correlação do número de Nusselt

Conforme mencionado anteriormente, os cálculos do número de Nusselt e, conseqüentemente, a obtenção de uma correlação para o tubo absorvedor são importantes em termos do projeto do mesmo e do concentrador como um todo, por possibilitarem a comparação entre arranjos, entre um arranjo usado no experimento

e outros semelhantes citados em artigos científicos, e o conhecimento da taxa de calor absorvida pela água em um concentrador hidrodinamicamente semelhante.

Ao se pesquisar trabalhos sobre a otimização do aproveitamento do calor em um tubo, é possível encontrar vários trabalhos, os quais avaliam teórica e/ou experimentalmente a otimização tanto em termos da forma e disposição das aletas internas ao longo do tubo quanto em termos da variação do número de Reynolds do escoamento interno.

O trabalho que serviu de base para as análises aqui citadas é o de Dogruoz et al. (2006), onde são analisadas a queda de pressão e a resistência térmica e é obtida uma correlação de Nusselt para o duto de seção quadrada aquecido em sua base, com aletas de seção quadrada, através de medidas em 8 pontos do duto conforme Figura 30.

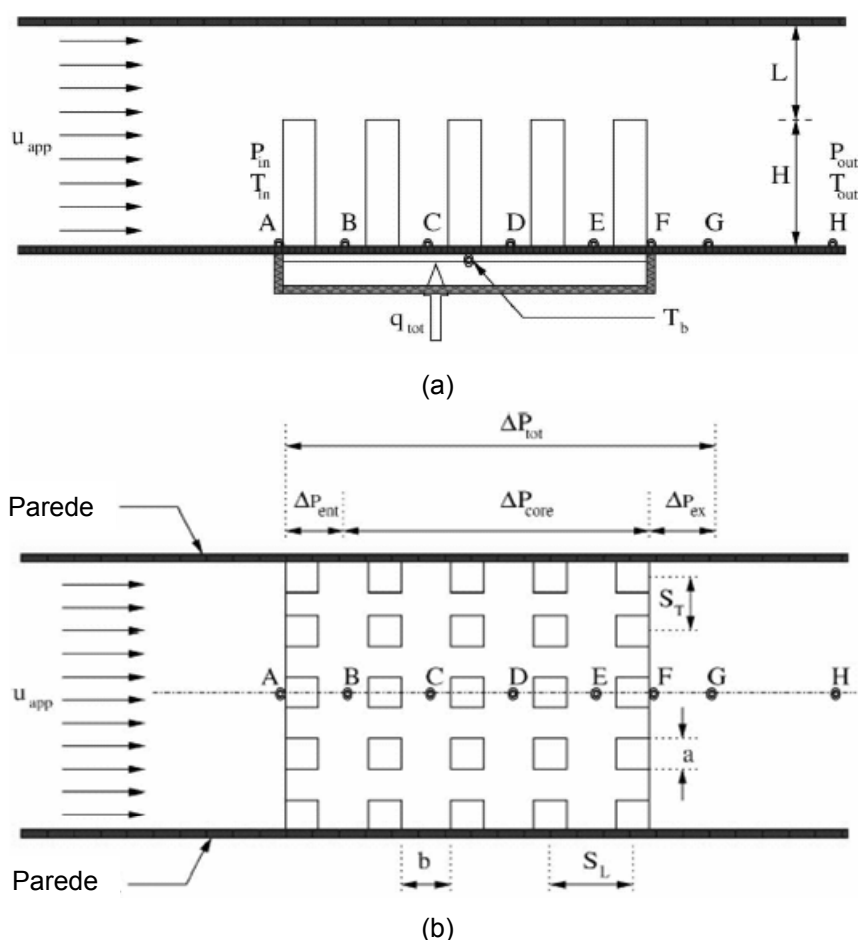


Figura 30 – Ilustração do experimento para análise do duto de seção transversal quadrada: (a) vista lateral e (b) vista superior

Fonte: Dogruoz et al., 2006.

Naquele trabalho foram analisados experimentos com quatro diferentes razões $S_{AL} / d_{AL,h}$ – apenas uma razão é aqui considerada – em um duto onde a seção transversal e a disposição das aletas são diferentes das mesmas aqui apresentadas. Os experimentos no referido duto foram feitos com uma baixa vazão, resultando em uma faixa de valores muito baixos para o número de Reynolds – entre 250 e 550 –, faixa esta bem próxima dos valores mínimo e máximo do número de Reynolds no presente trabalho – respectivamente 127 e 405. Desse modo, a correlação obtida pelo autor para o número de Nusselt:

$$Nu = 0,032 \cdot Re_{D,m}^{0,73} \cdot (S_{AL} / d_{AL,h})^{0,60} \quad (20)$$

com diferença média de 6% para os pontos obtidos (Figura 31), será um parâmetro importante para fins de comparação com as correlações propostas para o arranjo “Tubo3”.

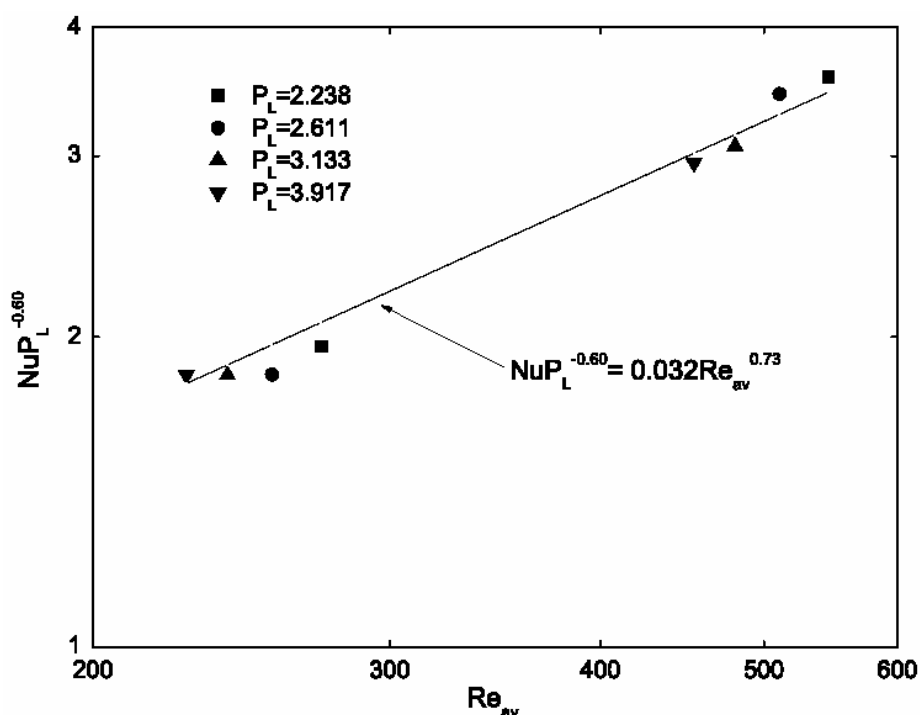


Figura 31 – Gráfico com a correlação de Nusselt (Nu) em função da relação $S_{AL} / d_{AL,h}$ (P_L) e o número de Reynolds médio (Re_{av})

Fonte: Dogruoz et al., 2006.

A obtenção da correlação desejada obedeceu à seguinte seqüência de passos:

- 1) estimativa das propriedades físicas da água à temperatura média $T_{A,m}$;
- 2) estimativa de $h_{A,G}$ pela Equação (16), de Nu_G pela Equação (13) e de $Re_{D,m}$ pela Equação (8);
- 3) estimativa dos coeficientes da Equação (17): C , $n1$ e $n2$ pela minimização da diferença entre os termos Nu_G da Equação (13) e Nu_E da Equação (14) através dos critérios:
 - 3-a) mínimas soma e média das diferenças;
 - 3-b) mínimas soma e média dos módulos das diferenças;
 - 3-c) mínima raiz da soma dos quadrados das diferenças.
- 4) análise das três opções acima descritas e conclusão.

Os coeficientes C , $n1$ e $n2$ são então estimados de forma a se obter a melhor correlação através dos critérios adotados pela seguinte metodologia adotada:

- i) os valores dos coeficientes são iguais para todos os dados;
- ii) o ponto de partida ou valor inicial das minimizações são os coeficientes C , $n1$ e $n2$ da Equação (20), respectivamente 0,032 , 0,73 e 0,60;
- iii) as minimizações são feitas variando-se primeiramente C , depois $n1$ e então $n2$.

Desse modo, obtém-se uma tabela com os termos estimados e os termos a minimizar, cuja aparência é similar à da Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Esquema de dados estimados para a determinação de C , $n1$ e $n2$, com os termos a serem minimizados em *itálico*

Nu_G	$Re_{D,m}$	C	$n1$	$n2$	Nu_E	$Nu_G - Nu_E$	$ Nu_G - Nu_E $	$(Nu_G - Nu_E)^2$
$Nu_{G\ 1}$	$Re_{D,m\ 1}$	α_1	β_1	γ_1	$Nu_{E\ 1}$	$(Nu_G - Nu_E)_1$	$ Nu_G - Nu_E _1$	$(Nu_G - Nu_E)^2_1$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$Nu_{G\ n}$	$Re_{D,m\ n}$	α_n	β_n	γ_n	$Nu_{E\ n}$	$(Nu_G - Nu_E)_n$	$ Nu_G - Nu_E _n$	$(Nu_G - Nu_E)^2_n$
<u>média:</u>						<i>Ma</i>	<i>Mb</i>	<i>Mc</i>
<u>soma:</u>						<i>Sa</i>	<i>Sb</i>	<i>Sc</i>
							<u>raiz:</u>	<i>Rc</i>

3.4 Simulação via balanço global

Ao longo dos experimentos, observou-se a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia de simulação da taxa de calor absorvido pelo fluido de trabalho ao escoar e ser aquecido pelo concentrador solar, a partir de dados medidos ou conhecidos, tais como temperatura ambiente, radiação solar incidente, características do tubo absorvedor, etc. De posse de tal metodologia, é possível prever, a partir dos dados de radiação incidente, a quantidade de calor absorvida pelo fluido ao passar pelo concentrador solar.

Aqui será proposta uma metodologia de simulação via balanço global de energia no tubo absorvedor, baseando-se nos experimentos feitos com o arranjo Tubo3 (tubo absorvedor de cobre de 19,05 mm de diâmetro envolto por um tubo de vidro). Tal metodologia, com algumas modificações, pode ser aplicada a outros arranjos.

3.4.1 Modelagem matemática

O balanço global de energia consiste em obter teoricamente a taxa de calor disponível para o fluido de trabalho no tubo absorvedor, levando em consideração todas as entradas e todas as saídas de calor através da aplicação da lei de conservação de energia ou 1ª Lei da Termodinâmica. Desse modo, a taxa de calor teoricamente disponível (E_{DISP}) é obtida pela lei da conservação de energia em regime permanente aplicada ao tubo:

$$E_{DISP} = E_e - E_s \quad (21)$$

Onde E_e é a soma de todas as taxas de calor que teoricamente entram no tubo absorvedor, e E_s é a soma de todas as taxas de calor que teoricamente saem do mesmo. O termo E_e é dado pela seguinte equação:

$$E_e = G_{CÉU} + G_{VIZ} + G_{D,R} + G_{D,T} + G_I + G_{ER,T} \quad (22)$$

Onde:

$G_{CÉU}$: radiação emitida pelo céu e que incide no tubo absorvedor;

G_{VIZ} : radiação emitida pelas vizinhanças (exceto a superfície refletora) e que incide no tubo;

$G_{D,R}$: radiação direta incidente no tubo após ser refletida pela superfície refletora;

$G_{D,T}$: radiação direta incidente na metade superior do tubo, sem sofrer reflexão;

G_I : radiação difusa;

$G_{ER,T}$: radiação emitida pela superfície refletora que incide no tubo.

Já o termo E_s é dado pela equação:

$$E_s = G_{ET} + E_{CE} \quad (23)$$

Onde:

G_{ET} : radiação emitida pelo tubo para o ambiente em sua volta;

E_{CE} : taxa de calor perdido por convecção externa ao tubo.

Para a presente análise, serão consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- (a) Não será considerado o problema acoplado, onde as temperaturas na superfície refletora e no tubo dependem das taxas de convecção e radiação. Assim, as temperaturas usadas serão fixas, com base nos experimentos feitos;
- (b) Os cálculos não consideram a re-irradiação, ou seja, a re-emissão da energia que veio do tubo de cobre pelo coletor;
- (c) Toda radiação refletida pelo coletor tem como destino o tubo, ou seja, nenhuma parte do coletor recebe radiação de outra parte do mesmo;
- (d) A radiação refletida pelo coletor atinge a metade inferior do tubo apenas (na verdade, é difícil dizer com precisão qual é a área do tubo atingida pela radiação refletida, mas tal aproximação é coerente com o que foi visto durante os experimentos), e a radiação difusa atinge apenas a metade superior do tubo;
- (e) Será desprezada qualquer espécie de transmissão de calor por condução do tubo absorvedor para outras partes conectadas a ele, bem como a emissão

de radiação do tubo de vidro para o tubo de cobre, já que o vidro é um mau absorvedor de calor e o pouco que absorve é rapidamente dissipado por convecção externa com o ambiente (isso explica o fato de a sua temperatura ser pouco acima da temperatura ambiente durante os experimentos);

- (f) O coletor é a única vizinhança a emitir radiação de forma significativa para o tubo, ou seja, $G_{VIZ} = 0$;
- (g) A taxa de calor perdido por convecção externa ao tubo (E_{CE}) é igual a zero para fins de cálculo, por considerar-se que o arranjo está montado de tal forma que o tubo absorvedor se encontra isolado da convecção externa (embora não haja o vácuo entre tubos que garantiria a plena validade desta consideração).

De posse destas considerações, a Equação (21) torna-se (Figura 32):

$$E_{DISP} = G_{CÉU} + G_{D,R} + G_{D,T} + G_I + G_{ER,T} - G_{ET} \quad (24)$$

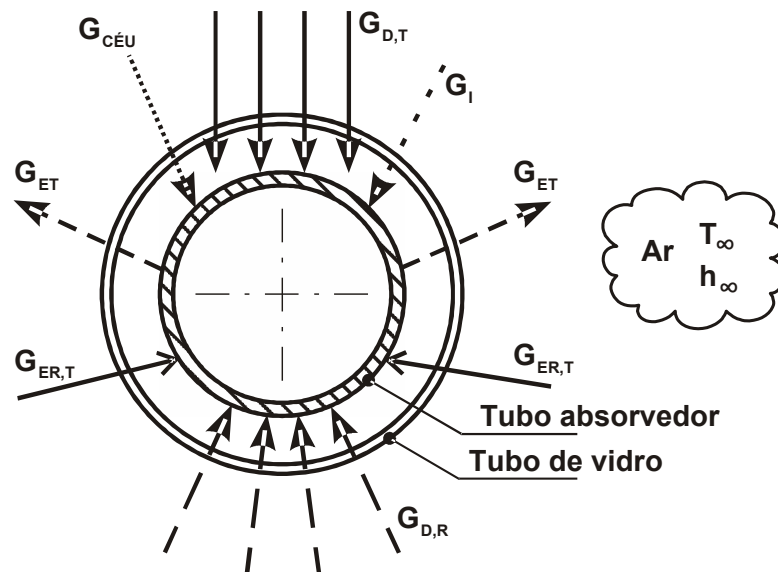


Figura 32 – Esquema da transferência de calor em uma seção reta do arranjo Tubo3.

3.4.2 Dados e propriedades

Além dos valores de radiação direta e difusa obtidos por meio do *software* Radiasol atualizado com dados de radiação locais, de temperatura média do tubo absorvedor

e da temperatura ambiente ao longo de cada experimento, também serão usados os dados relacionados na Tabela 5 para a simulação. As propriedades físicas dos materiais e as constantes, salvo menção em contrário, foram obtidas de Incropera e DeWitt (1998).

A transmissividade $\tau_{V, re}$ do vidro para radiação emitida por um corpo negro a 400K – temperatura inicialmente estimada para o tubo absorvedor – é calculada pela média de $\tau_V(\lambda)$ (transmissividade do vidro em cada faixa de comprimento de onda) ponderada pelo percentual de radiação nas respectivas faixas, conforme Tabela 6. Os valores de τ_V médio foram extraídos da Figura 33 através de medida direta com régua sobre papel e são, portanto, valores aproximados.

Tabela 5 – Dimensões do concentrador e seus componentes, constantes e propriedades físicas usadas nos cálculos

	Dimensão / constante / propriedade:	Símbolo	Valor	Unidade
a.	Constante de Stefan-Boltzmann	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$	W/m^2K^4
b.	Aceleração da gravidade	g	9,81	m/s^2
c.	Temperatura do céu	$T_{C\acute{E}U}$	273	K
d.	Emissividade do céu	$\varepsilon_{C\acute{E}U}$	0,1	
e.	Largura do concentrador	w	1,0	m
f.	Comprimento do concentrador	L_C	2,0	m
g.	Distância focal do concentrador	DF	0,2	m
h.	Comprimento do perfil parabólico	wp	1,22	m
i.	Diâmetro externo do tubo absorvedor	$d_{T,ex}$	0,01905	m
j.	Comprimento do tubo absorvedor	L_T	2,0	m
k.	Emissividade do tubo absorvedor	ε_T	0,8	
l.	Condutividade térmica do tubo absorvedor	k_T	339,206	W/mK
m.	Temperatura média do tubo absorvedor	$T_{T,m}$	347	K
n.	Emissividade da superfície refletora (1)	ε_R	0,15	
o.	Refletividade da superfície refletora (1)	ψ_R	0,85	
p.	Temperatura estimada da superfície refletora	T_R	333	K
q.	Diâmetro do tubo de vidro	d_V	0,0254	m
r.	Comprimento do tubo de vidro	L_V	2,0	m
s.	Transmissividade do vidro	τ_V	0,85	
t.	Transmissividade a 400 K do vidro	$\tau_{V, re}$	0,03	

(1) Fonte: EOI, 2007

Tabela 6 – Transmissividade do vidro em várias faixas de comprimento de onda e para um corpo negro a 400K

λ (μm)	1 – 2,5	2,5 – 4,5	4,5 – 10,5	10,5 – ∞	$\tau_{V, re} = \frac{\sum (\% rad \times \tau_v)}{100}$ $\tau_{V, re} \approx 0,03$
τ_V médio	0,85	0,20	0,00	0,04	
% radiação	0,0321	3,8979	50,95	49,05	

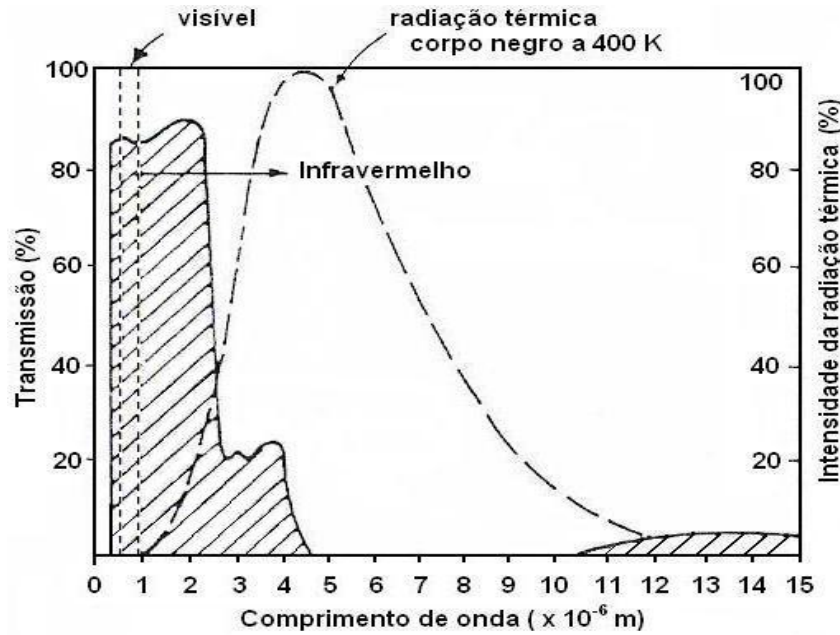


Figura 33 – Transmissividade do vidro e intensidade de radiação térmica de um corpo negro a 400 K em função do comprimento de onda

Fonte: Acioli, 1994.

Embora a temperatura média do tubo absorvedor não atinja 400K e sim 347K, conforme cálculos feitos após os experimentos, a transmissividade $\tau_{V, re}$ pouco se altera, de modo que o valor de 3% (0,03) será mantido para fins de cálculo.

3.4.3 Definição dos termos das equações do balanço global

A radiação emitida pelo céu e que incide no tubo absorvedor ($G_{CÉU}$) é dada pela seguinte equação:

$$G_{CÉU} = \varepsilon_{CÉU} \sigma T_{CÉU}^4 A_{CÉU} FF_{CÉU-T} \quad (25)$$

Onde $A_{CÉU}$ é a área do céu relativa à troca radiante entre céu e tubo e $FF_{CÉU-T}$ é o fator de forma entre as superfícies do tubo e do céu. Como toda a radiação vinda do céu e que atinge o tubo passa pela área projetada do concentrador solar ($A_{ESP, proj}$), considera-se como $A_{CÉU}$ esta área (igual a 2m²). Já o fator de forma $FF_{CÉU-T}$ é obtido pelo método das linhas cruzadas, considerando-se a troca radiante entre as superfícies 1 e 2 mostradas na Figura 34, conforme a Equação (26) (Siegel e Howell, 1972):

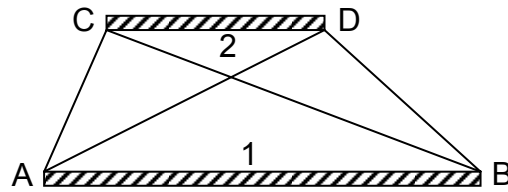


Figura 34 – Método das linhas cruzadas para determinação do fator de forma

$$FF_{1-2} = [(AD + BC) - (AC + BD)] / (2 AB) \quad (26)$$

Aplicando este mesmo conceito ao par céu-tubo, após renomear os segmentos de reta conforme mostra a Figura 35 e sendo o tubo a superfície 2 (receptora) e o céu a superfície 1 (emissora), o fator de forma $FF_{C\acute{E}U-T}$ é dado por:

$$FF_{C\acute{E}U-T} = [(AD + DC) + (BD + DC) - (AC + BC)] / (2 wp) \quad (27)$$

Sendo $AD = BD$ e $AC = BC$, por simetria, a Equação (27) se resume a:

$$FF_{C\acute{E}U-T} = (AD + CD - AC) / wp \quad (28)$$

Onde os segmentos de reta AC e AD valem, respectivamente, 0,5147m e 0,5105m, e o arco CD ($= \pi d_{T,ex} / 2$) é igual a 0,02992m; inserindo-se tais medidas na Equação (28), obtém-se o valor de 0,02572 para $FF_{C\acute{E}U-T}$.

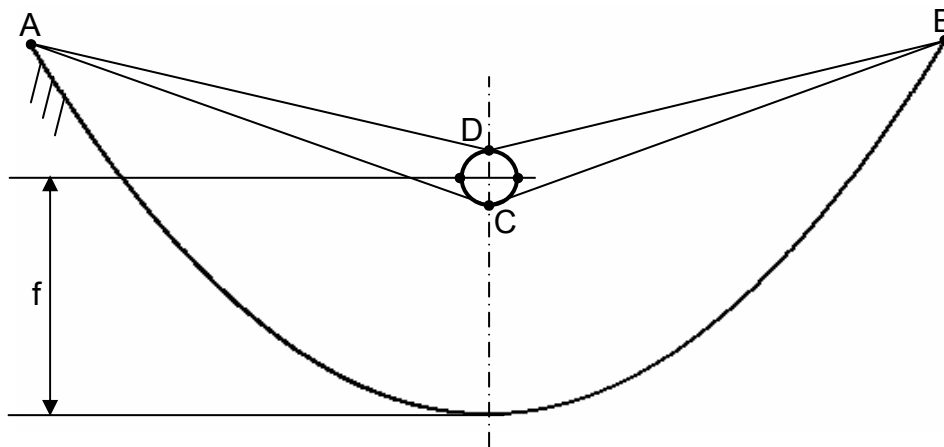


Figura 35 – Método das linhas cruzadas adaptado para o par céu-tubo

A radiação direta incidente no tubo após ser refletida pela superfície refletora ($G_{D,R}$) é calculada pela seguinte equação:

$$G_{D,R} = \tau_V \psi_R I_{GD} (w - d_{T,ex}) L_C \quad (29)$$

Nesta, I_{GD} é o fluxo de radiação direta em W/m^2 , também usada na equação para determinação da radiação direta incidente na metade superior do tubo, sem sofrer reflexão ($G_{D,T}$):

$$G_{D,T} = \tau_V I_{GD} (d_{T,ex} L_T) \quad (30)$$

Já a radiação difusa (G_I), conforme explicado na consideração (d), é dada por:

$$G_I = \tau_V I_{GI} (\pi d_{T,ex} L_T / 2) \quad (31)$$

Onde I_{GI} é o fluxo de radiação difusa em W/m^2 . Por sua vez, a radiação emitida pela superfície refletora para o tubo ($G_{ER,T}$) é:

$$G_{ER,T} = \tau_V \varepsilon_R \sigma T_R^4 A_{ESP} FF_{R-T} \quad (32)$$

Na equação acima, A_{ESP} é a área da superfície refletora, e FF_{R-T} é o fator de forma entre esta superfície e o tubo absorvedor. De modo análogo à adaptação do método das linhas cruzadas feito para o par céu-tubo, este fator de forma é dado pela seguinte equação:

$$FF_{R-T} = [(AC + CD) + (BC + CD) - (AD - BD)] / (2 wp) \quad (33)$$

Sendo $AC = BC$ e $AD = BD$, por simetria conforme Figura 35, a Equação (33) se resume a:

$$FF_{R-T} = (AC + CD - AD) / wp \quad (34)$$

E, inserindo-se as medidas de AC , AD , CD e wp , já mencionadas anteriormente, obtém-se o valor de 0,02795 para FF_{R-T} .

Por fim, a radiação emitida pelo tubo, passando pelo tubo de vidro, para o ambiente em sua volta (G_{ET}) é dada por:

$$G_{ET} = \tau_{V, re} \varepsilon_T \sigma T_T^4 (\pi d_{T, ex} L_T) \quad (35)$$

3.4.4 Metodologia da simulação

A metodologia feita para a simulação teórica da taxa de calor aproveitado pela água no concentrador solar e ajuste desta simulação consiste nos seguintes passos:

- 1 – Obtenção dos valores da taxa de calor aproveitado em cada medida ao longo dos experimentos com o arranjo Tubo3 (tubo absorvedor de 19mm de diâmetro, sem aletas e envolto em tubo de vidro) e com o arranjo Tubo5 (tubo absorvedor de 9,6mm de diâmetro, sem aletas e envolto em tubo de vidro);
- 2 – Obtenção do valor teórico do calor aproveitado, usando a Equação (24) e todas as definições dos seus termos já apresentadas;
- 3 – Ajuste de cada termo da Equação (24) em todas as medidas dos experimentos, por meio de fatores de ajuste (fa) que os multiplicarão, sendo que:
 - i) os termos sobre os quais existe pouca ou nenhuma incerteza acerca de seu valor não serão ajustados (ou seja, receberão fator de ajuste igual a 1);
 - ii) os demais termos a serem ajustados receberão fatores de ajuste de igual valor, dado que as incertezas acerca de seus valores são de igual origem (geométrica ou de propriedade física);
 - iii) várias são as possibilidades de ajuste, as quais variam de acordo com o objetivo a alcançar (mínima média das diferenças entre valor teórico e real, média dos fatores de ajuste, etc.);
 - iv) em cada uma das medidas, a diferença entre valor teórico ajustado e valor real de calor aproveitado deve ser da ordem de 10^{-7} .
- 4 – Comparação entre os valores teóricos ajustados pelas várias possibilidades de fatores de ajuste obtidas e os valores reais da taxa de calor aproveitado em todos os experimentos.

Considerando as premissas expostas em 3-i e 3-ii e a Equação (24), apenas os termos $G_{D,T}$ e G_{ET} não são ajustados, e assim a equação da taxa de calor teoricamente disponível ajustada (a qual pode ser interpretada como a taxa de calor disponível para ser absorvida pela água) é:

$$E_{DISP, aj} = fa (G_{CÉU} + G_{D,R} + G_I + G_{ER,T}) + G_{D,T} - G_{ET} \quad (36)$$

Dentre as opções de fatores de ajuste, aquela que melhor ajustar os valores teóricos aos valores reais da taxa de calor aproveitado em todos os experimentos, exceto nos períodos onde ocorreu sombra (nuvens), será a opção escolhida. O melhor ajuste acima mencionado é aquele que se mostrar melhor por visualização de gráficos e que apresentar, em média, a menor diferença entre valor teórico e real em todos os períodos de todos os experimentos.

A exclusão dos períodos de sombra se deve aos seguintes motivos:

- 1) As nuvens bloqueiam boa parte da radiação direta e, como não existe uma medida desse bloqueio nem um modelo matemático do mesmo, o cálculo da taxa de calor aproveitado fica comprometido;
- 2) Nos poucos períodos de sombra ocorridos a taxa de calor aproveitado pela água no concentrador solar fica muito reduzida, chegando a menos de 100 W e afetando de maneira significativa os fatores de ajuste.

Capítulo 4

“A persistência realiza o impossível”. (provérbio chinês)

4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos experimentos realizados e que compõem o conteúdo das tabelas apresentadas nos Apêndices B e C. O objetivo é oferecer uma série de dados para o julgamento das propostas das análises em relação ao projeto dos tubos absorvedores e da operação do concentrador solar, além de permitir a proposição de melhorias para o futuro funcionamento do mesmo com base na teoria citada nos capítulos anteriores.

Como já foi descrito, o basculamento do concentrador se deu manualmente a uma taxa de 15° por hora, ou $3,75^\circ$ a cada 15 minutos conforme Palz (1981) para concentradores parabólicos orientados na direção Norte-Sul. Contudo, pelo fato de o diâmetro do tubo absorvedor no arranjo Tubo5 possuir 10mm de diâmetro, o intervalo entre basculamentos – e também o ângulo de basculamento – teve que ser reduzido pela metade, a fim de que o tubo não ficasse por muito tempo fora do foco e a absorção de radiação não ficasse afetada.

O transferidor usado para orientar o basculamento do concentrador possui uma definição de escala muito baixa, de modo que não foi possível seguir rigorosamente os ângulos descritos acima. Para contornar esse problema, ao invés de ajustar-se o concentrador apenas pelo ângulo no transferidor, optou-se pelo ajuste do concentrador visualizando se o foco estava situado sobre o tubo absorvedor, e a anotação do ângulo marcado no transferidor foi feita *a posteriori*.

Mesmo assim, tal método não alterou os resultados, o que pode ser visto pela Figura 36, que mostra os ângulos de basculamento em três experimentos, um por arranjo, e

a reta média, na qual y_B é o ângulo (positivo para Oeste, negativo para Leste) e x_B é a fração do dia. Conforme pode ser aferido, a velocidade de basculamento medida é comparável com a reta média – que representa o movimento do sol de 15° por hora – embora não seja um basculamento contínuo, como pode ser visto na Figura 37, onde a linha inteira representa o basculamento não-contínuo e a tracejada o basculamento ideal de 15° por hora. Esse procedimento de basculamento não é, reconhecidamente, a melhor opção, embora tenha sido utilizado em todos os experimentos e deve ser revisto em futuras melhorias do experimento que já estão em andamento.

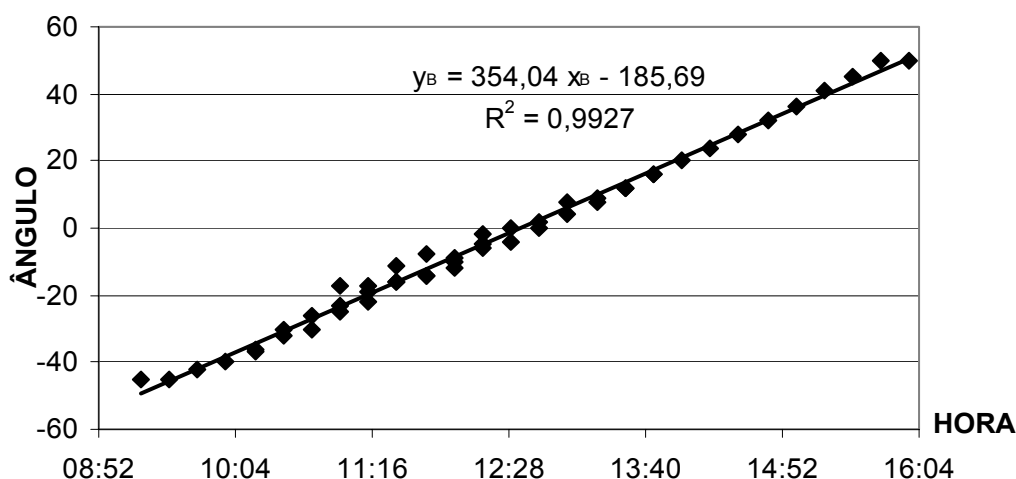


Figura 36 – Ângulos de basculamento obtidos em três experimentos, a reta média e sua equação.

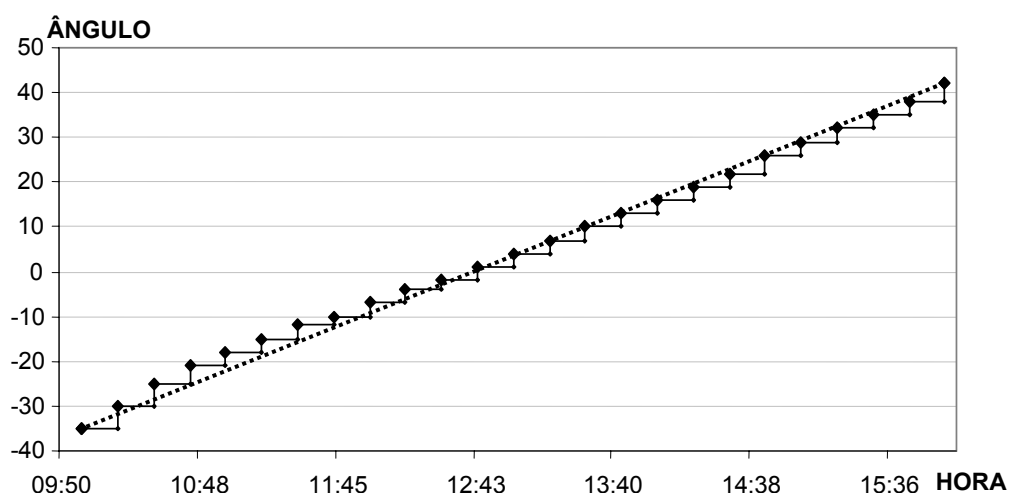


Figura 37 – Ângulos de basculamento de acordo com o procedimento de basculamento não-contínuo a cada 15 min, obtidos em 05/12/2007 com Tubo3.

4.1 Eficiência dos arranjos

Por meio da Figura 38 é possível visualizar e comparar as eficiências mínima, média e máxima de cada arranjo, calculadas segundo a Equação (22), durante os experimentos realizados e que estão listados no Apêndice B. Embora a eficiência média seja o resultado que caracteriza os arranjos permitindo a comparação e escolha do mais eficiente, faz-se necessário conhecer as eficiências mínima e máxima como parâmetros auxiliares nesta escolha.

Os dados usados na Figura 38 estão sistematizados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Eficiências mínima, média e máxima para cada arranjo testado

Arranjo	Vazão (ml/s)	Data	Eficiência (%)		
			Mínima	Média	Máxima
Tubo3	1,25	19/03/2007	12,47	18,52	24,79
	3,25	21/02/2007	16,37	22,93	25,81
	2,25	04/03/2008	1,32	27,93	38,28
	1,25	05/03/2008	17,02	19,84	22,87
Tubo4	1,25	20/03/2007	14,31	18,59	22,14
	1,25	21/03/2007	0,71	21,61	36,67
	1,25	26/03/2007	4,39	11,83	20,34
	1,25	19/11/2007	4,86	15,36	27,01
	3,25	23/11/2007	14,69	29,73	52,41
	2,25	04/12/2007	3,05	18,21	31,76
	1,25	05/12/2007	11,61	18,60	32,54
	2,25	11/12/2007	16,91	23,65	37,38
	3,25	04/01/2008	17,75	24,39	38,05
Tubo5	1,25	14/02/2008	12,06	19,94	33,43
	3,25	15/02/2008	0,79	14,16	28,40

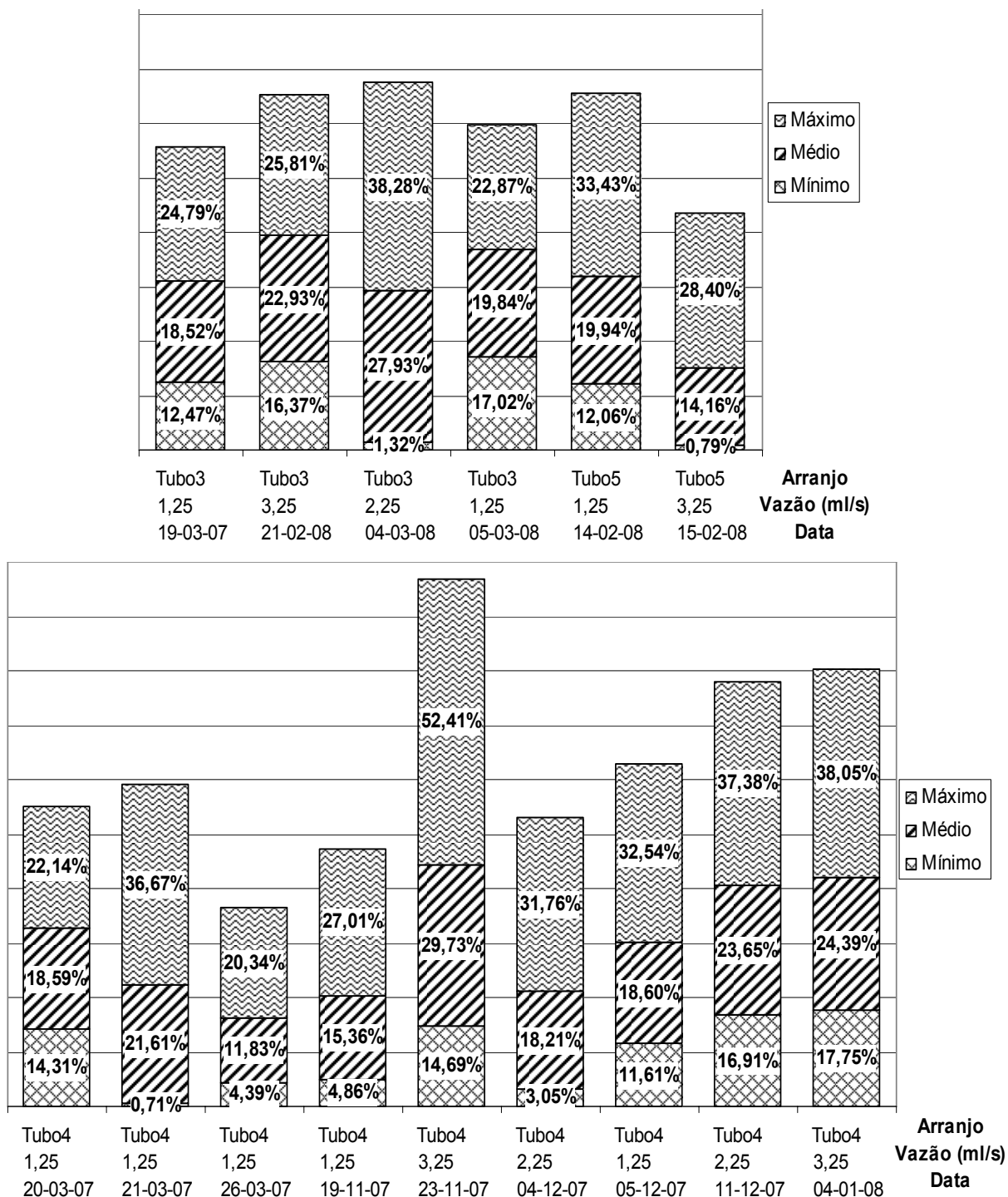


Figura 38 – Eficiências mínima, média e máxima para cada arranjo testado

A partir da Tabela 7, é possível sintetizar as médias das eficiências mínima, média e máxima de cada arranjo de acordo com a vazão utilizada, e tal sintetização é apresentada na Tabela 8 em função da vazão de água no tubo absorvedor.

Tabela 8 – Média das eficiências mínima, média e máxima em cada arranjo e vazão

Vazão (ml/s)	Arranjo	Eficiência (%)		
		Mínima	Média	Máxima
1,25	Tubo3	14,75	19,18	23,83
	Tubo4	7,18	17,20	27,74
	Tubo5	12,06	19,94	33,43
2,25	Tubo3	1,32	27,93	38,28
	Tubo4	9,98	20,93	34,57
	Tubo5	—	—	—
3,25	Tubo3	16,37	22,93	25,81
	Tubo4	16,22	27,06	45,23
	Tubo5	0,79	14,16	28,40

Observando-se a Figura 38 e as Tabelas 7 e 8, nota-se que apenas para o arranjo Tubo4 a eficiência aumenta com o aumento da vazão de água, enquanto que para o arranjo Tubo3 tal aumento só acontece até a vazão de 2,25 ml/s. Para vazões maiores a eficiência se torna menor; isso acontece de maneira similar com o arranjo Tubo5, embora não se saiba o comportamento deste a uma vazão de 2,25 ml/s pois não foi possível fazer um experimento com tal vazão.

Deste modo, tendo em vista a utilização do concentrador solar a vazões mais altas de modo a suprir uma alta demanda de calor no aquecimento de óleos pesados, o arranjo Tubo4 apresenta-se como a melhor alternativa por ter, à vazão de 3,25 ml/s, uma eficiência média de até 27,73%, com a possibilidade de se chegar a uma eficiência máxima de 52,40% e apresentando uma eficiência mínima da mesma ordem de grandeza dos demais arranjos.

Contudo, caso vazões mais elevadas não sejam necessárias, pode-se ainda recorrer ao arranjo Tubo3 para uma vazão menor que a de Tubo4, ou ao arranjo Tubo5 para uma vazão menor que a de Tubo3; isso porque, na vazão de 2,25 ml/s, com o arranjo Tubo3 obteve-se a melhor eficiência média de 27,93%, chegando-se à eficiência máxima de 38,28%, enquanto que, na vazão de 1,25 ml/s, com o arranjo Tubo5 obteve-se a melhor eficiência média de 19,94%, chegando-se à eficiência máxima de 33,43%.

Notou-se também que a presença de nuvens causa uma forte diminuição da eficiência do sistema, de modo que nos instantes de ocorrência de nuvens a eficiência não superou o valor de 10% para qualquer um dos arranjos testados. Isso evidencia o fato de, conforme mencionado no capítulo 1, a concentração solar depender fortemente da radiação direta para produzir os resultados desejados.

É necessário sublinhar que o fato da eficiência ter chegado a 52,40% no arranjo Tubo4 pode não refletir o exato comportamento do concentrador solar, visto que os valores de radiação global obtidos pela simulação com o *software* Radasol não refletem exatamente a radiação incidente durante o experimento, e tal valor – o qual não se repetiu em outros instantes – poderá também não se repetir em futuros experimentos. Mesmo assim, o valor obtido é um bom indicador do incremento da eficiência que a instalação das aletas internas trouxe para a absorção de calor e para a eficiência do tubo absorvedor.

4.2 Correlação do número de Nusselt efetivo

Conforme mencionado na seção 3.2, foram soldados quatro termopares ao longo dos tubos absorvedores dos arranjos Tubo3 e Tubo4 (Figura 39), a fim de se conhecer o comportamento da convecção da água no escoamento interno ao tubo, obtendo-se para isso o número de Nusselt em cada instante desde que as medidas das temperaturas da água e do tubo tornam-se conhecidas. Com essa informação, é possível conhecer a correlação para um número de Nusselt efetivo que melhor se ajusta aos valores resultantes dos cálculos do mesmo, além de se ter uma melhor visão sobre qual é o efeito que a instalação de aletas internas tem sobre o comportamento da absorção de calor pela água.

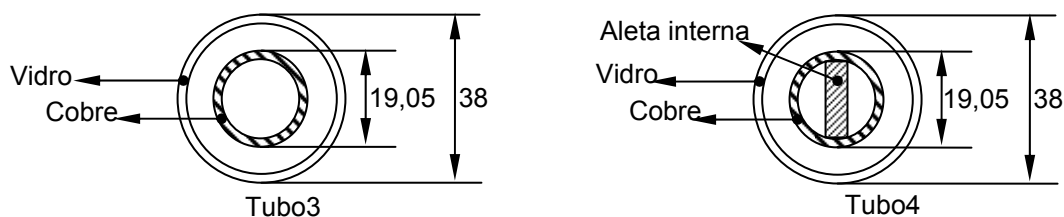


Figura 39 – Desenho esquemático do corte transversal dos tubos absorvedores estudados (dimensões em milímetros)

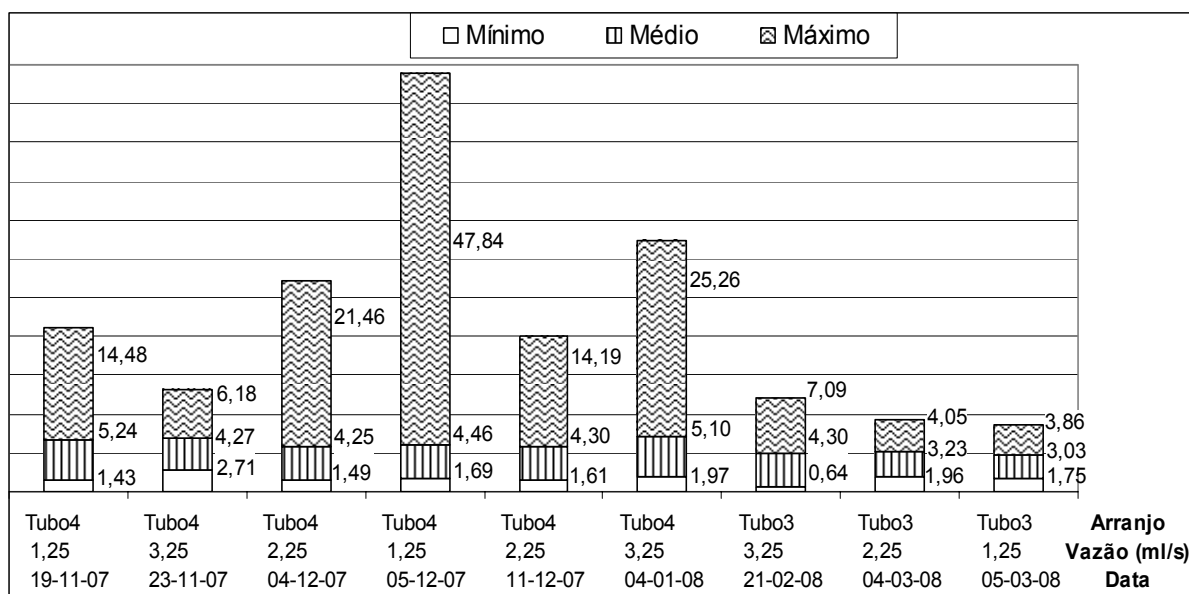


Figura 40 – Números de Nusselt mínimo, médio e máximo em cada experimento.

Analisando-se os números de Nusselt globais médios apresentados na Figura 40, nota-se que, em geral, eles foram maiores no arranjo Tubo4 do que no arranjo Tubo3; embora os valores mínimos sejam bem semelhantes, os valores médios no Tubo4 foram, com exceção de alguns valores iguais, maiores do que no Tubo3 – em média, 4,60 para Tubo4 e 3,52 para Tubo3 – enquanto que os valores máximos no Tubo4 são até 6,75 vezes maiores que no Tubo3.

Como o número de Nusselt no Tubo4 é maior que no Tubo3, deduz-se que as aletas internas produziram um maior coeficiente de convecção interna da água no escoamento, o que resultará numa maior absorção de calor em comparação com o Tubo3 em condições atmosféricas e de radiação incidente semelhantes.

As informações obtidas e apresentadas formam uma base para a escolha e definição do arranjo a ser usado e para a comparação deste com futuros arranjos que venham a ser candidatos para otimizar a absorção de calor pela água. Na figura

a seguir são apresentadas as propostas de correlação para o número de Nusselt efetivo do arranjo Tubo4 conforme descrito na seção 3.3.

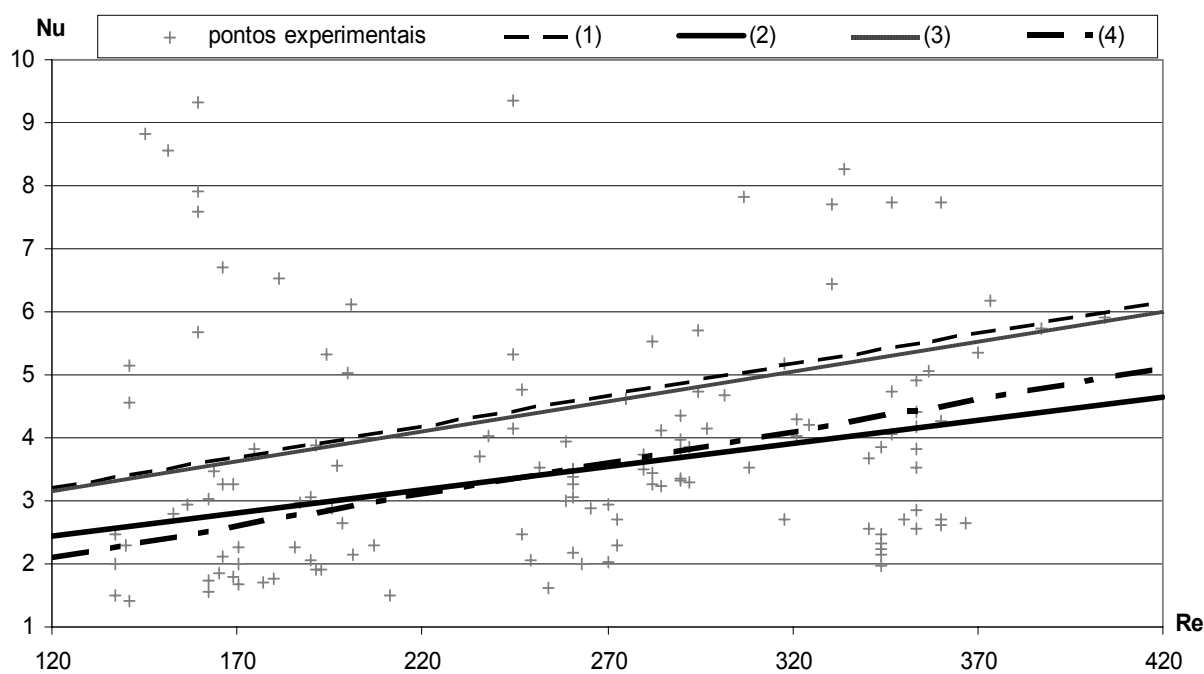


Figura 41 – Gráfico $Nu \times Re$ com os pontos experimentais e correlações para Tubo4 e a correlação obtida por Dogruoz et al. (2006)

Na Figura 41 (na qual foram expurgados alguns poucos pontos cujos valores para o número de Nusselt foram superiores a 10 para facilitar a análise das propostas) estão exibidas as seguintes linhas:

- * (1) – critério de minimização da soma e média das diferenças;
- * (2) – critério de minimização da soma e média dos módulos das diferenças;
- * (3) – critério de minimização da raiz da soma dos quadrados das diferenças;
- * (4) – correlação obtida por Dogruoz et al. (2006) conforme Equação (20).

Os coeficientes obtidos pelos critérios (1), (2) e (3) acima, explicitados na seção 3.3, estão relacionados na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes das correlações propostas

Proposta	C	n1	n2
(1)	0,12043	0,53	0,66
(2)	0,091	0,531	0,65778
(3)	0,11729	0,53	0,663

Nota-se que a diferença entre os ajustes (1) e (3) é quase nula, e que, mesmo havendo diferença entre estes e o ajuste (2), todos os três ajustes produzem retas semelhantes, pois são aproximadamente paralelas entre si. Contudo, ao se fazer a comparação entre os ajustes e a reta (4), é o ajuste (2) aquele que mais se aproxima da reta (4) na faixa de números de Reynolds exposta na figura acima. Acrescentando este fato ao de que a correlação que gerou a reta (4) foi obtida em um experimento com variáveis controladas e medidas com precisão, a proposta (2) foi selecionada como a melhor dentre as propostas.

Assim, usando-se os coeficientes C , $n1$ e $n2$ estimados pela proposta (2), a Equação (14) se torna:

$$Nu_E = 0,091 \cdot Re_{D,m}^{0,531} \cdot (S_{AL} / d_{AL,h})^{0,65778} \quad (37)$$

a qual pode ser considerada a correlação indicada para o arranjo Tubo4 para escoamentos desde que o número de Reynolds esteja entre 127 e 405.

4.3 Simulação via balanço global

A seguir estão mostrados os gráficos relativos às várias tentativas feitas para obter os fatores de ajuste (conforme seção 3.4.4) e que são originados a partir das respectivas tabelas de dados dispostas no Apêndice C.

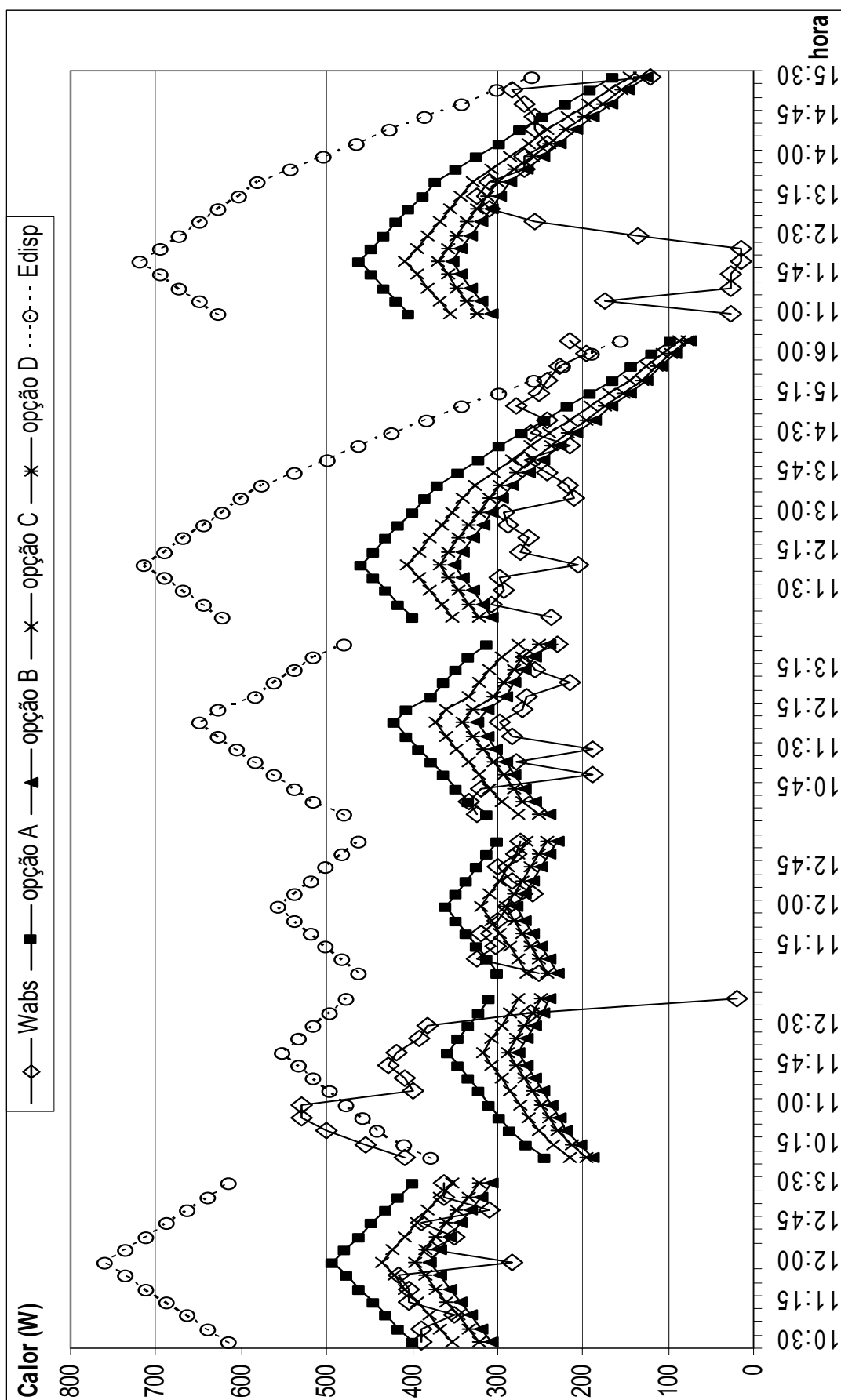


Figura 42 – Taxas de calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}), e quatro opções de ajuste deste (A, B, C e D) em todos os períodos de todos os experimentos. (conforme Tabela C-1)

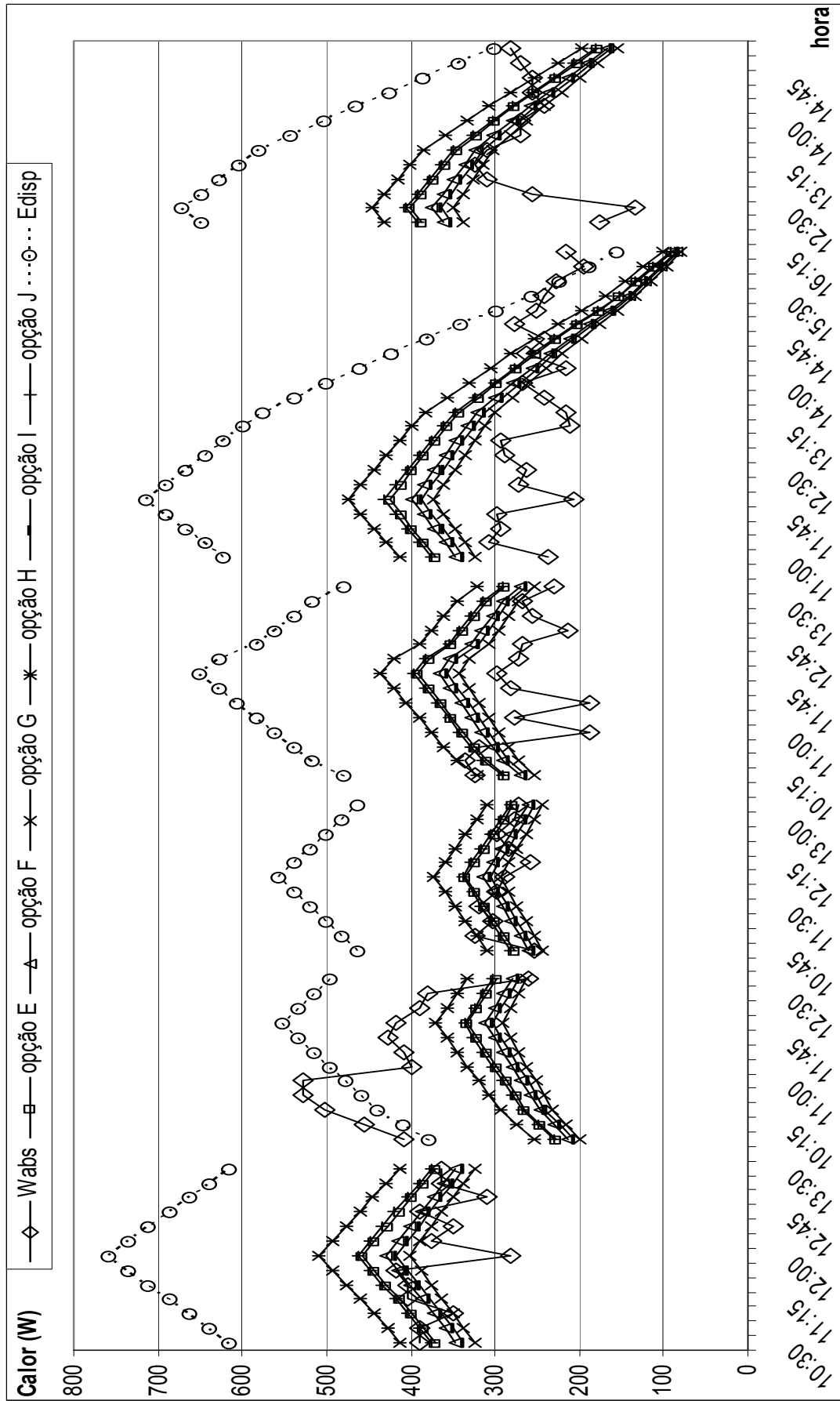


Figura 43 – Taxas de calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e seis opções de fatores de ajuste deste (E, F, G, H, I e J) em todos os períodos onde a taxa de calor aproveitado é menor que 100W. (conforme Tabela C-2)

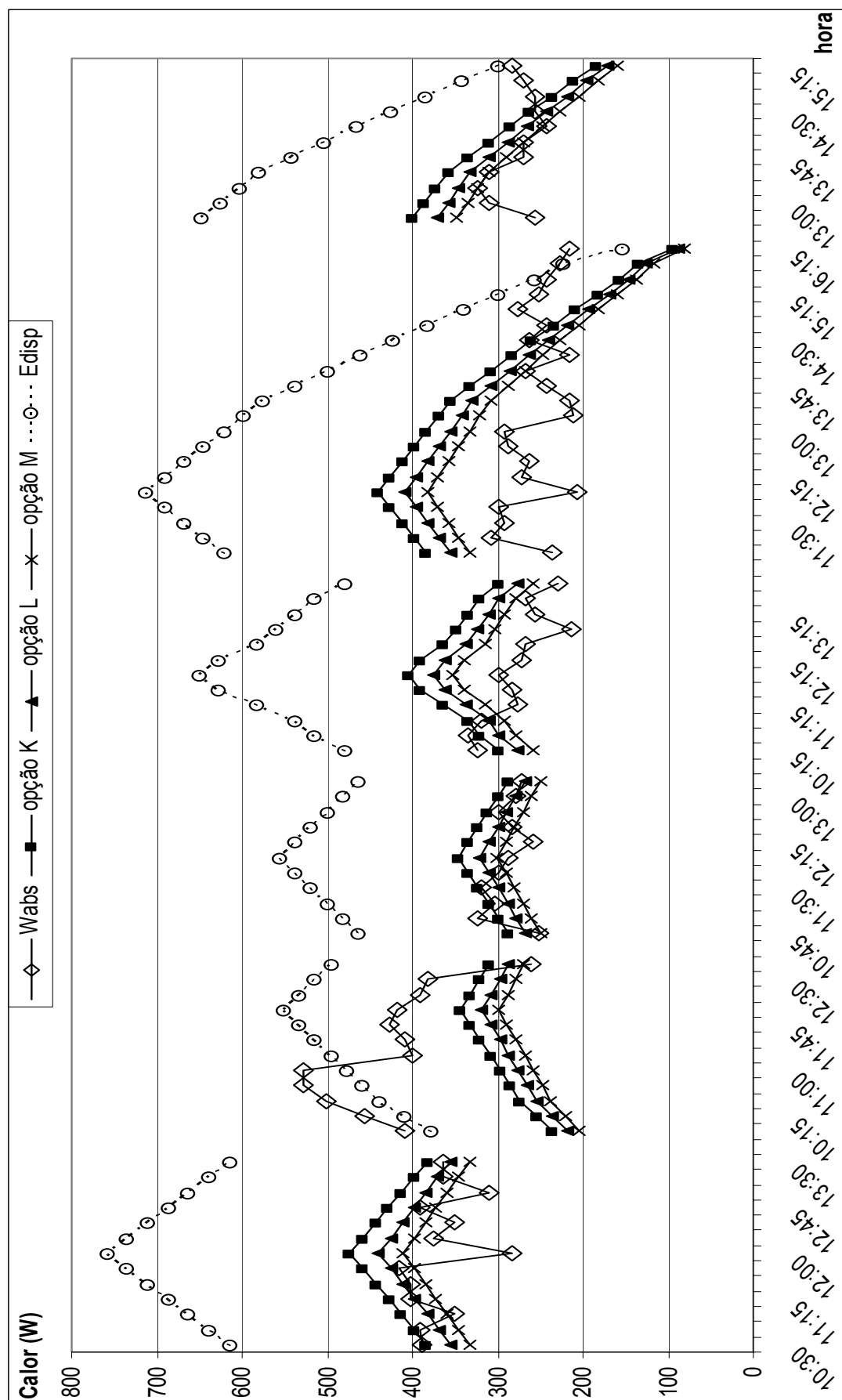


Figura 44 – Taxas de calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e três opções de fatores de ajuste deste (K, L e M) em todos os períodos onde a taxa de calor aproveitado é menor que 200W. (conforme Tabela C-3)

Na Tabela 10 a seguir estão sintetizados os fatores de ajuste e os seus respectivos significados, além dos períodos, em função com o calor aproveitado (W_{ABS}).

Tabela 10 – Fatores de ajuste (fa) e seus significados

Períodos	Opção	Significado	fa	Diferença média (1)
todos	A	média dos fatores de ajuste nos últimos 3 experimentos com Tubo3	0,643	10^{-7}
	B	média dos fatores de ajuste nos experimentos com Tubo5 e com Tubo3 em 19/03/2007	0,490	10^{-7}
	C	média dos fatores A e B	0,567	10^{-7}
	D	fator de ajuste (igual para todos) de modo que a média das diferenças entre teoria e prática seja da ordem de 10^{-7}	0,515	10^{-7}
W_{ABS} maior que 100 W	E	média dos fatores de ajuste	0,596	10^{-7}
	F	fator de ajuste (igual para todos) para que a soma das diferenças entre teoria e prática seja da ordem de 10^{-7}	0,556	10^{-7}
	G	fator de ajuste (igual para todos) para obter-se a mínima soma das diferenças absolutas entre teoria e prática	0,520	-19,16
	H	média dos fatores de ajuste nos últimos 3 experimentos com Tubo3	0,665	10^{-7}
	I	média dos fatores de ajuste nos experimentos com Tubo5 e com Tubo3 em 19/03/2007	0,541	10^{-7}
	J	média dos fatores H e I	0,603	10^{-7}
W_{ABS} maior que 200 W	K	média dos fatores de ajuste	0,617	10^{-7}
	L	fator de ajuste (igual para todos) para que a média das diferenças entre teoria e prática seja 10^{-7}	0,572	10^{-7}
	M	fator de ajuste (igual para todos) para obter-se a mínima soma das diferenças absolutas entre teoria e prática	0,534	-19,86

(1) Entre os valores simulados e experimentais

Avaliando em conjunto as Figuras 42 a 44 e a Tabela 10, conclui-se que o fator de ajuste que melhor atende às premissas anteriormente citadas é a opção de ajuste “L”, que torna os valores da taxa de calor teórico ajustado próximos dos valores reais de calor aproveitado e ao mesmo tempo permite que, na média total, a diferença entre valores teóricos e experimentais seja mínimo; desse modo, considerando-se a quantidade de calor absorvido no total, pode-se dizer que a previsão se realizará com um mínimo de diferença.

Enquanto a opção de ajuste “L” se adequa bem para horas sem nuvens, a opção de ajuste “D” também pode ser utilizada no caso de ser necessário levar em consideração os períodos com nuvens, os quais mesmo não sendo freqüentes em determinadas épocas, não deixam de ter efeito no sistema de concentração solar.

Como a opção de ajuste “D” é menor que a opção “L”, selecionou-se utilizar a opção “D” por ser mais conservadora. Desse modo, a Equação (36) se torna:

$$E_{DISP, aj} = 0,515 (G_{CÉU} + G_{D,R} + G_I + G_{ER,T}) + G_{D,T} - G_{ET} \quad (38)$$

Tal fator de ajuste faz com que, em média, cada uma das parcelas da Equação (38) tenha os seguintes percentuais em relação a energia disponível ajustada média:

$G_{CÉU} : 0,165\%$	$G_{D,R} : 94,036\%$	$G_{D,T} : 2,941\%$
$G_I : 2,639\%$	$G_{ER,T} : 0,808\%$	$G_{ET} : 0,589\%$

Visto que os fatores de ajuste apresentados são obtidos com base nas radiações direta e difusa estimadas pelo *software* Radasol atualizado com dados do INMET sendo portanto estimativas de radiação, é esperado que a existência de dados reais de radiação direta e difusa efetivamente medidos durante os experimentos proporcionará o cálculo de fatores de ajuste mais realistas.

Capítulo 5

“A confiança em si próprio é o primeiro segredo do êxito.” (R.W. Emerson)

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

De forma a dar continuidade aos estudos e às análises exibidas no capítulo anterior, tendo em vista as conclusões já expostas anteriormente e exibidas a seguir, serão apresentados neste capítulo algumas propostas de melhoria do concentrador solar como um todo, que visam manter a busca pelo contínuo aumento da eficiência de absorção de calor e melhorar a operação do mesmo.

5.1 Conclusões

Em resumo, as seguintes conclusões foram tiradas após realização de análises conforme as explicações do capítulo 4:

- Notou-se que o arranjo Tubo5 teve maior eficiência que os demais com a vazão de 1,25 ml/s, enquanto que para Tubo3 a maior eficiência se deu com a vazão de 2,25 ml/s e, no arranjo Tubo4, com a vazão de 3,25 ml/s. Assim, tendo em vista a utilização do concentrador solar a vazões mais altas, o arranjo Tubo4 apresenta-se como a melhor alternativa por ter, à vazão de 3,25 ml/s, uma eficiência média de até 27,73%, podendo se chegar ao máximo de 52,40% e com uma eficiência mínima da mesma ordem de grandeza dos demais arranjos. É necessário sublinhar que este fato pode não refletir o exato comportamento do concentrador solar, visto que os valores de radiação global obtidos pela simulação com o *software* Radasol

não refletem exatamente a radiação incidente durante o experimento, e tal valor – o qual não se repetiu em outros instantes – poderá também não se repetir em futuros experimentos.

- Os números de Nusselt globais médios foram maiores no arranjo Tubo4 do que no arranjo Tubo3 – em média, 4,60 para Tubo4 e 3,52 para Tubo3 – enquanto que os valores máximos no Tubo4 são até 6,75 vezes maiores que no Tubo3. Daí deduz-se que as aletas internas produziram um maior coeficiente de convecção interna da água no escoamento, o que resultará numa maior absorção de calor em comparação com o Tubo3 em condições atmosféricas e de radiação incidente semelhantes.
- O melhor ajuste para a correlação do número de Nusselt foi o obtido por meio do critério 2 (critério de minimização da soma e média dos módulos das diferenças), o qual mais se aproxima da reta 4 (correlação feita por Dogruoz, 2005, por meio de experimentos com variáveis controladas e medidas com precisão) na faixa de números de Reynolds entre 127 e 405. Assim, a correlação indicada para o arranjo Tubo4 em escoamentos com número de Reynolds situado na faixa acima citada é:

$$Nu_E = 0,091 \cdot Re_{D,m}^{0,531} \cdot (S_{AL} / d_{AL,h})^{0,65778}.$$
- Em relação a simulação via balanço global, duas opções de fatores de ajuste se mostraram melhores: a opção de ajuste “L” se adequa bem para horas sem nuvens, enquanto a opção de ajuste “D” também pode ser utilizada no caso de ser necessário considerar os períodos com nuvens. Como a opção de ajuste “D” é menor, portanto mais conservadora, a equação ajustada de energia disponível para a água no tubo absorvedor (Eq. 36) se torna:

$$E_{DISP, aj} = 0,515 (G_{CÉU} + G_{D,R} + G_I + G_{ER,T}) + G_{D,T} - G_{ET}$$

5.2 Propostas futuras

5.2.1 Geometria do espelho otimizada

Em relação ao espelho do concentrador, propõe-se que o seu perfil parabólico seja mais “aberto”, conseqüentemente o foco ficará mais “externo” à parábola (Figura 45-a). Tal proposta, que se encontra atualmente em fase de construção (Figuras 45-b e 45-c), está em concordância com os perfis parabólicos usados em “usinas solares” que também operam pela concentração da radiação solar por meio de concentradores parabólicos. Ao se obter um perfil mais “aberto”, a placa de aço inoxidável, que constitui o espelho, sofrerá menos deformações do que em um perfil mais “fechado”, e com isso é esperado um melhor assentamento da placa sobre os suportes do concentrador (Vianna e Sousa, 2008).

O perfil mais “aberto” também permite que a parábola tenha uma maior área projetada do que em um perfil mais “fechado”, acarretando o aumento da taxa de calor absorvido pela água no tubo absorvedor e, conseqüentemente, a eficiência do mesmo.

Também vale ressaltar a importância de se avaliar com maior rigor o perfil parabólico, através da implementação de novas técnicas de montagem e modelagem da superfície refletora, pois grande parte da eficiência do concentrador solar está intimamente associada a este. Enquanto a técnica usada consiste em se instalar calços na estrutura de madeira a fim de obter a forma parabólica desejada ao espelho, a técnica em andamento consiste em substituir os calços por perfis “L” de mesmo comprimento do concentrador, que apoiarão o espelho de forma mais regular ao longo do comprimento.

Também deve ser avaliada a possibilidade de substituição da placa metálica por um espelho vítreo ou similar, que embora seja de maior custo deve propiciar uma melhor refletividade e forma parabólica.

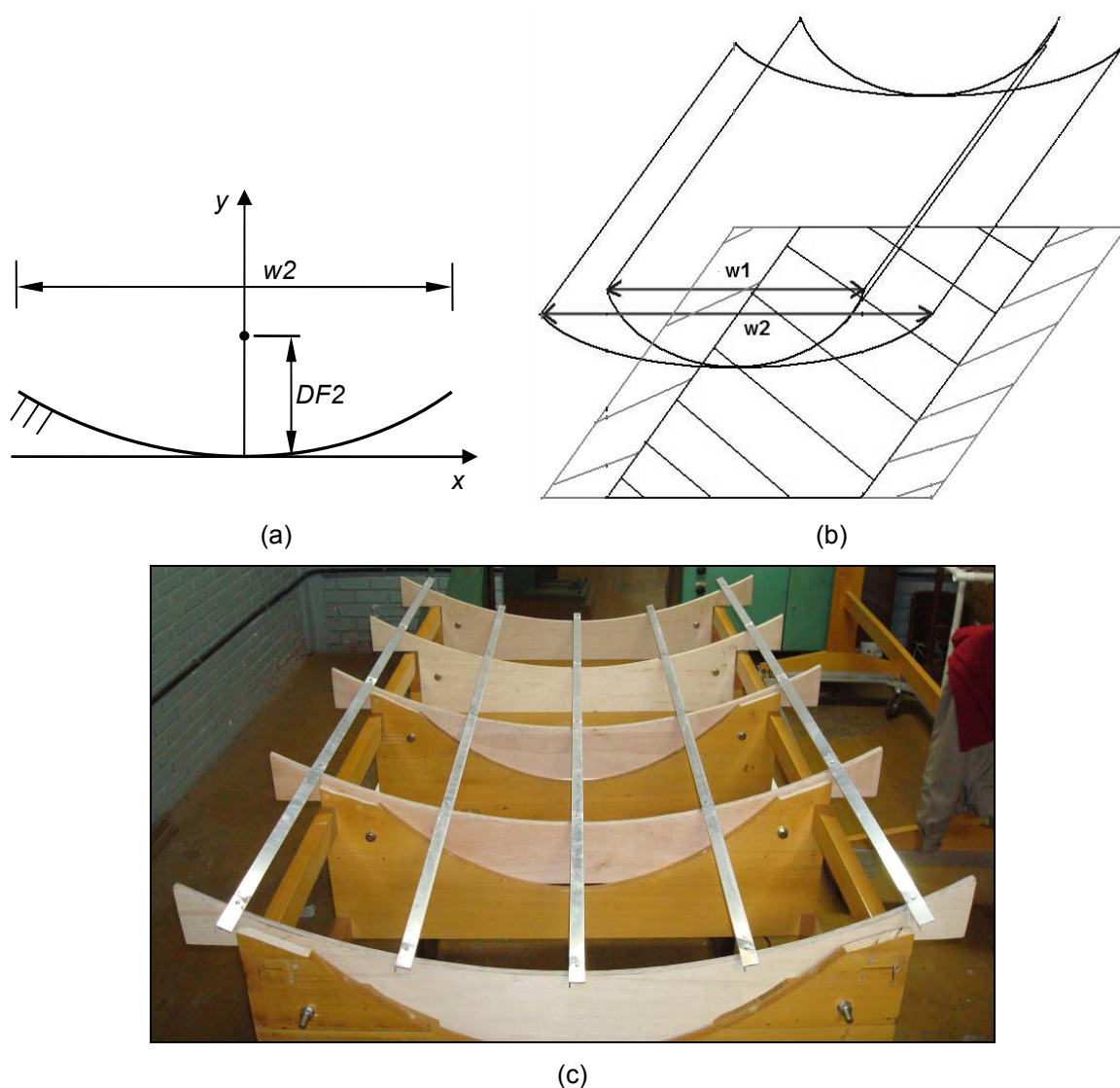


Figura 45 – (a) Perfil do futuro concentrador parabólico; (b) Comparação esquemática entre a largura do perfil antigo $w1$ e a do perfil novo $w2$; (c) Nova estrutura do concentrador com cantoneiras para assentamento da placa

Fonte: Vianna e Sousa, 2008.

5.2.2 Tubo absorvedor com vácuo

Conforme já mostrado anteriormente, dentre todos os arranjos testados o arranjo “Tubo4” foi o que permitiu uma maior eficiência na absorção de calor pela água, devido a presença de aletas piniformes instaladas ao longo do mesmo. Em seguida, o arranjo “Tubo5”, cujo diâmetro é otimizado geometricamente, mostrou-se algo melhor do que o arranjo “Tubo3”. Assim, propõe-se o uso de um arranjo cujo tubo

absorvedor seja aletado e seu diâmetro seja otimizado de acordo com o perfil parabólico, de modo a unir as duas melhorias trazidas pela otimização do diâmetro e a instalação de aletas. Como esta última é uma tarefa difícil levando em consideração a fragilidade de tubos de cobre de pequeno diâmetro e a fragilização deste devido ao aumento de temperatura do processo de soldagem, sugere-se a aquisição de um tubo absorvedor com aletas longitudinais como, por exemplo, o tubo mostrado na Figura 46, cujo número de aletas e suas alturas P_{AL} podem ser analisadas por métodos numéricos ou analíticos (Campo e Morales, 1993) visando a sua otimização.

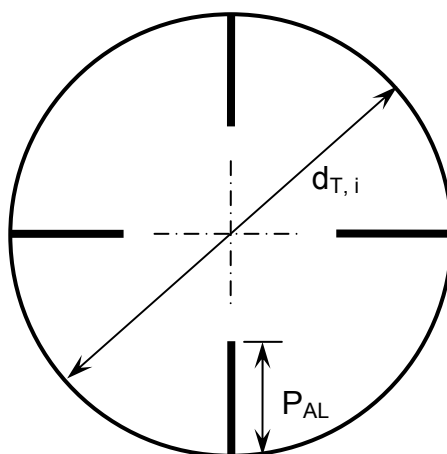


Figura 46 – Tubo absorvedor com 4 aletas longitudinais

A existência de vários trabalhos onde se analisa numérica e experimentalmente o escoamento no interior de tal tubo permite que se façam análises semelhantes no tubo sugerido e que os resultados destes trabalhos e do tubo sugerido sejam comparados, além de servir de inspiração para que sejam feitas análises numéricas computacionais a fim de determinar o comportamento do escoamento e prever precisamente a quantidade de calor que a água absorve, o que permitirá a elaboração de um projeto mais preciso caso sejam usados concentradores de maior porte.

A obtenção de vácuo entre tubo absorvedor e tubo de vidro também se mostra como um objetivo a ser alcançado, visto que mesmo com o uso de um tubo de vidro, a convecção na região anular entre os tubos no arranjo não deixa de existir. Um

exemplo de arranjo concebido para que se faça vácuo entre os tubos absorvedor e de vidro é mostrado na Figura 47.

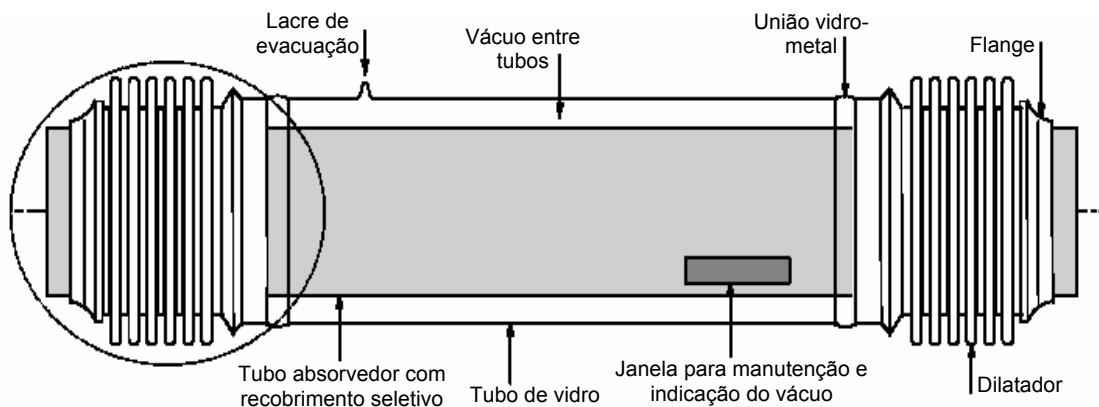


Figura 47 – Arranjo de tubos absorvedor e de vidro concêntricos

Fonte: Pérez, 2005.

Segundo Pérez (2005), o tubo absorvedor deve receber um recobrimento seletivo que possua uma absortividade elevada ($>90\%$) e uma emissividade no espectro infravermelho baixa ($<30\%$), o que lhe proporciona uma elevada eficiência térmica. O tubo de vidro, além de ter a missão dupla de reduzir as perdas térmicas por convecção no tubo metálico e de proteger seu recobrimento seletivo contra o ambiente, deve receber também um tratamento anti-reflexivo em suas paredes para aumentar sua transmissividade à radiação solar e, conseqüentemente, a eficiência óptica do arranjo.

5.2.3 Automatização do concentrador solar

Uma das maiores dificuldades encontradas durante os experimentos foi o basculamento do concentrador solar, que sendo realizado de forma descontínua e manualmente com o auxílio de um transferidor de pouca precisão, não seguindo precisamente a rotação do sol de 15° por hora. A fim de sanar essa deficiência, sugere-se projetar e instalar um sistema de basculamento automático, o qual facilitará a tarefa de quem opera o concentrador e trará maior confiabilidade aos experimentos realizados.

Essa modificação já foi projetada e orçada pela equipe do projeto, que definiu um sistema de basculamento baseado em fuso tipo sem-fim acionado por motor de passo controlado por uma célula sensora de radiação. No momento, essa inovação está em fase de captação de recursos para ser implementada.

5.2.4 Continuidade dos experimentos

Conforme visto na seção 3.2, em relação ao número de experimentos realizados pode-se notar que a quantidade de experimentos realizados não foi grande o suficiente para que se faça uma análise mais precisa e confiável do comportamento do sistema de concentração solar, tornando-se evidente a necessidade de um histórico de leituras mais longo, evitando-se assim que a variabilidade dos fenômenos ambientais afete a compreensão dos processos físicos envolvidos na concentração solar.

5.2.5 Simulação numérica dos processos de transferência de calor

De forma a obter estimativas mais aproximadas sobre o comportamento de um concentrador solar operando em condições industriais a partir de um protótipo experimental, torna-se mister desenvolver um modelo matemático bidimensional transiente que leve em consideração o aquecimento assimétrico do tubo absorvedor e a variação da radiação solar ao longo do dia, assim como os efeitos da transmissão de calor na região anular. Essa meta foi apenas parcialmente alcançada pelo balanço global e a expectativa é que seja plenamente alcançada através da utilização de um modelo diferencial mais representativo dos fenômenos relacionados.

Também deve ser avaliada a aplicação da técnica de problema inverso no sentido de formalizar o processo de obtenção da correlação empírica para o número de Nusselt.

5.2.6 O circuito fechado

A fim de alcançar os objetivos iniciais do projeto total tal como foi concebido, está em fase de desenvolvimento o circuito secundário fechado que irá aproveitar a água aquecida para transferir calor a um circuito de óleo e, assim, verificar a variação da viscosidade do óleo pelo aumento de temperatura, reduzindo a potência de bombeamento, que é o objetivo final do projeto total.

Esse circuito secundário já está construído e, atualmente, encontra-se em fase de caracterização da operação, isto é, estão sendo realizados experimentos operando com um aquecedor elétrico de forma a manter a transferência de calor e a vazão constantes ao longo do tempo e, assim, caracterizar o desempenho das operações do trocador de calor e do sistema de bombeamento, bem como da variação da temperatura do óleo.

5.3 Considerações finais

Embora a perspectiva da utilização de energia solar em aplicações industriais ainda seja restrita, os autores acreditam que o surgimento de novas pesquisas e trabalhos acadêmicos nesta área, impulse o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de promover sua viabilidade técnica e econômica em um futuro próximo e com esta meta foi desenvolvido este trabalho.

Neste texto foram enfocados os aspectos construtivos do concentrador solar e mecanismos utilizados com o objetivo de intensificar as trocas de calor, assim como

ensaios experimentais destes. Detalhes a respeito do modelo matemático para aquecimento do óleo podem ser obtidos em Ramos, Gasparini e Cardoso (2005).

Após a conclusão do trabalho verificou-se, além da necessidade de maiores estudos na área de transferência de calor no que tange aos fenômenos de radiação, também a necessidade de uma análise estatística, tendo em vista o grande número de variáveis envolvidas no processo, tais como variação da radiação ao longo do dia, velocidade, direção e temperatura do vento, velocidade de rotação do espelho, hora e dia do ano das medições.

REFERÊNCIAS

ANJOS, V. L. R.; RAMOS, R.; GASPARINI, J. C. Estudo experimental da eficiência de captação de calor para concentrador solar parabólico em função do projeto do tubo absorvedor. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA, 8, 2007, Cusco – Peru. **Anales...** Cusco: Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2007.

BUIE, D.; DEY, C. J.; BOSI, S. The effective size of the solar cone for solar concentrating systems. **Solar Energy**, Vol. 74, pp. 417-427, abr. 2003.

CAMPO, A.; MORALES, J. C. Analytical/numerical prediction of the three-dimensional temperature variation in tubes having streamwise internal fins. **Numerical Heat Transfer**, Part A, Vol. 23, pp. 319-339, mar. 1992.

COMETTA, E. **Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos**. São Paulo: Hemus, 2004.

DMC – Dirección Meteorológica de Chile. **Instrumental Meteorológico Electrónico**. Disponível em: <http://www.meteochile.cl/instrumentos/inst_electronico.html>. Acesso em: 03 jun. 2007.

DOGRUOZ, M. B.; URDANETA, M.; ORTEGA, A. Experiments and modeling of the hydraulic resistance and heat transfer of in-line square pin fin heat sinks with top by-pass flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 48, pp. 5058-5071, jul. 2005.

EOI – Electro Optical Industries Inc. **Material Emissivity Properties**, 1997. Disponível em: <http://www.electro-optical.com/html/bb_rad/emissivity/matlemisivty.asp>. Acesso em: 17 abr. 2007.

GASPARINI, J. C.; LOUZADA, D. A. **Análise da redução da perda de carga em escoamentos de óleo pesados por termo-acumulação utilizando energia solar – Projeto e construção de um concentrador solar**. 2006. 115 f. Projeto de graduação (conclusão de curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Curso de Engenharia Mecânica, Vitória.

GRIMM, A. M. **Notas de aula sobre Meteorologia Básica**. Universidade Federal do Paraná, 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acesso em: 10 out. 2007.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados automáticos de radiação solar**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 30 mar. 2007.

PALZ, W. O calor e a radiação solares: fontes de eletricidade. In: PALZ, W. **Energia Solar e Fontes Alternativas**, São Paulo: Hemus, 1981. Cap. 6, p. 165-184.

PÉREZ, M. A. S. **Aprovechamiento de La Energía Solar a Alta Temperatura: Sistemas Termosolares de Concentración**. Sevilla: Universidade de Sevilla, 2005.

PESN – Pure Energy Systems Network Inc. **Fresnel Reflectors Bring Solar Price Down**, 2007. Disponível em: <http://pesn.com/2007/07/13/9500481_Fraunhofer_Institute_Fresnel_Solar>. Acesso em: 23 nov. 2007.

PSA – Plataforma Solar de Almería, 2007. **General Description of the PSA**. Disponível em: <<http://www.psa.es>>. Acesso em: 11 mai. 2007.

RABL, A.; BENDT, P.; GAUL, H. W. Optimization of parabolic trough solar collectors. **Solar Energy**, Vol. 29, N° 5, pp. 407-417, jan. 1982.

RAMOS, R.; GASPARINI, J. C.; ANJOS, V. L. R. Estudo experimental da eficiência de captação de calor em função do projeto do tubo focal para um concentrador solar

parabólico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2, 2007, Vitória. **Anais...** Vitória: Associação Brasileira de Eficiência Energética, 2007.

RAMOS, R.; GASPARINI, J. C.; CARDOSO, M. V. Análise da Redução da Perda de Carga em Escoamentos de Óleos Pesados por Termo-Acumulação Utilizando Energia Solar. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 2005, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2005.

SAHITI, N.; LEMOUEDDA, A.; STOJKOVIC, D.; DURST, F.; FRANZ, E. Performance comparison of pin fin in-duct flow arrays with various pin cross-sections. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 26, pp. 1176-1192, out. 2005.

SCHUBNELL, M. Influence of circumsolar radiation on aperture, operating temperature and efficiency of a solar cavity receiver. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 27, pp. 233-242, fev. 1992.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. Mathematical techniques for the evaluation of configuration factors: Hottel's crossed-string method. In: SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. Londres: McGraw-Hill Inc., 1972. Cap. 7, p. 204-207.

SU, J.; ESTEFEN, S. Thermal-Hydraulic Analysis of Heavy Oil Transportation in Heated Sandwich Pipelines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 24, 2005, Halkidiki, Greece. **Proceedings of the...** Halkidiki: ASME, 2005.

TRP, A. An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer During Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit. **Solar Energy**, Vol. 79, pp. 648-660, mar. 2005.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. **RADIASOL Radiação Solar**. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#radiasol>>. Acesso em: 30 set. 2005.

VIANNA, A. R.; SOUSA, I. A. **Análise da redução da perda de carga em escoamento de óleos pesados por termo-acumulação utilizando energia solar – Projeto e otimização do concentrador solar**. 2008. 98 f. Projeto de graduação (conclusão de curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Curso de Engenharia Mecânica, Vitória.

VILLALOBOS, J. J. H. **Notas Sobre el Curso de Energía Solar**. ITESO – Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, 1995. Disponível em: <http://www.solartronic.com/download/curso_iteso.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2007.

WANG, X.; WANG, R.; WU, J. Experimental Investigation of a New-Style Double-Tube Heat Exchanger for Heating Crude Oil Using Solar Hot Water. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 25, pp. 1753-1763, nov. 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Caracterização das leituras de temperatura

Após a execução da soldagem dos termopares nos tubos absorvedores com e sem aletas internas, feita pelo processo de soldagem por arco elétrico do Laboratório de Geração de Potência (LaGePot) da UFES, procedeu-se a caracterização das leituras de temperatura, visando verificar se e como devem ser corrigidas as temperaturas medidas pelos termopares soldados.

Para tanto foi montado o circuito de testes (Figura A-1), no qual a água, em temperatura estável e conhecida, passa pelo tubo absorvedor e faz-se a medida da temperatura do tubo absorvedor nos quatro pontos indicados.

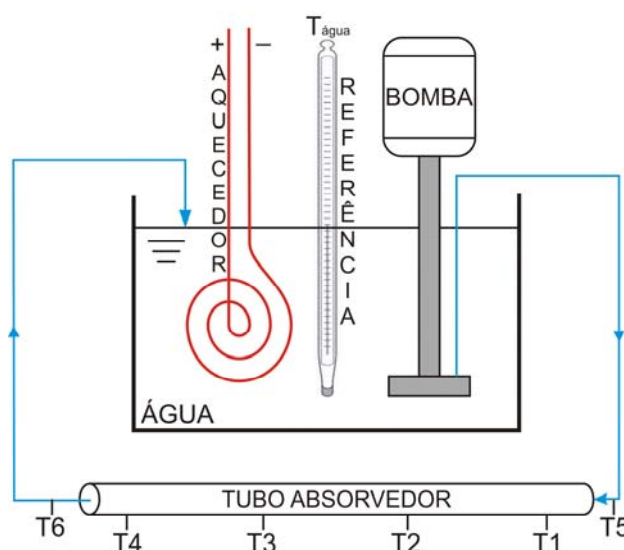


Figura A-1 – Esquema do calorímetro para a caracterização dos termopares no LaGePot

Considerando-se que o sistema esteja em regime permanente, com condução de calor unidimensional na direção radial ao tubo, com propriedades constantes e sem geração de calor, é possível obter-se a temperatura real do tubo no ponto medido por meio do balanço energético na direção radial de uma seção do tubo. Tal balanço consiste em igualar o calor vindo da água no interior do tubo com o calor transmitido pelo tubo por um modelo de condução unidimensional em regime permanente e com o calor que é dissipado por convecção pelo meio externo ao tubo pelo ambiente local conforme representado na Figura A-2, desprezando-se a dissipação de calor

por irradiação, a qual sequer atinge 4 W caso se considere o tubo a uma temperatura de 100 °C envolto em um tubo de vidro.

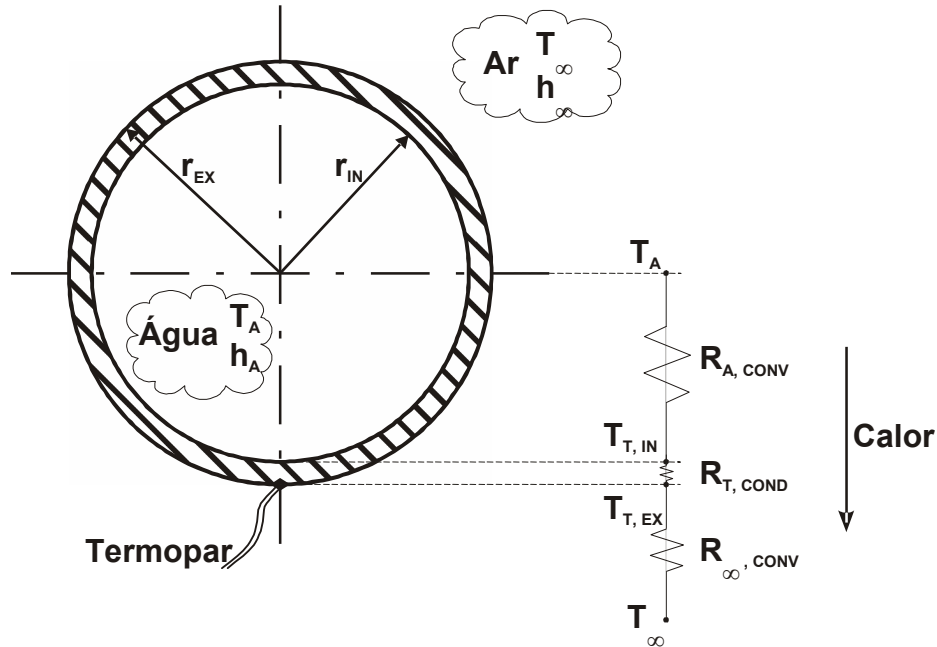


Figura A-2 – Tubo instrumentado em corte e diagrama de resistência térmica ao fluxo de calor no mesmo

A partir dessas premissas, a igualdade do fluxo de calor em cada um dos três meios pode ser expressa por:

$$\frac{T_A - T_{T,IN}}{\left(\frac{1}{2 \pi r_{IN} L_T h_A} \right)} = \frac{T_{T,IN} - T_{T,EX}}{\left[\frac{\ln(r_{EX}/r_{IN})}{2 \pi k_T L} \right]} = \frac{T_{T,EX} - T_{\infty}}{\left(\frac{1}{2 \pi r_{EX} L_T h_{\infty}} \right)} \quad (A-1)$$

Onde os denominadores de cada termo são as resistências térmicas dos respectivos meios. O coeficiente de convecção do ar ambiente (h_{∞}) é determinado por meio da seguinte correlação do número de Nusselt para convecção natural:

$$\overline{Nu}_{D,\infty} = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad (A-2)$$

Onde o número de Rayleigh (Ra_D) é dado por:

$$Ra_D = \frac{g \beta (T_{T,EX} - T_{\infty}) d_{T,EX}^3}{\nu \alpha} \quad (A-3)$$

e o número de Prandtl (Pr):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (A-4)$$

e, por sua vez, g é a aceleração da gravidade, α é o coeficiente de difusividade térmica, β é o coeficiente de expansão térmica e ν é a viscosidade cinemática.

Já o coeficiente de convecção da água (h_A) é determinado por meio da seguinte correlação do número de Nusselt para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos em função dos números de Reynolds, Prandtl e do fator de atrito de Moody (f):

$$\overline{Nu}_{D,A} = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{\left[1 + 12,7 \sqrt{(f/8)} (Pr^{2/3} - 1)\right]} \quad (A-5)$$

válida para os intervalos $0,5 < Pr < 2000$ e $3000 < Re_D < 5 \times 10^6$.

Obtém-se a temperatura estimada em cada um dos pontos do tubo e, comparando-se estas com as temperaturas medidas pelos termopares nos respectivos pontos, obtém-se a relação entre temperatura medida e temperatura real.

A disposição dos termopares soldados ao longo do tubo absorvedor é esquematizada pela Figura A-3.

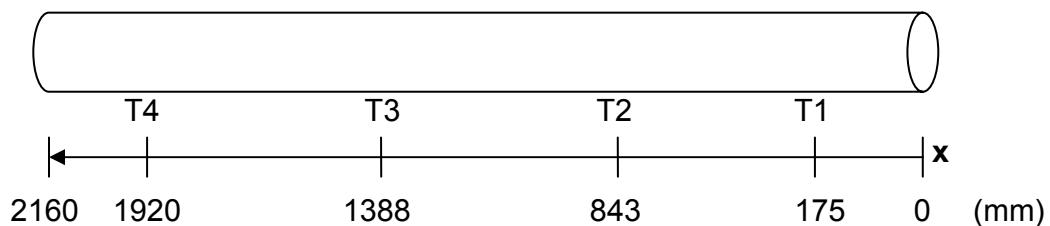


Figura A-3 – Disposição dos termopares soldados no tubo absorvedor no LaGePot

A tabela a seguir exhibe os resultados da caracterização dos termopares soldados nos tubos com e sem aletas internas.

Tabela A-1 – Temperaturas medidas e reais (°C) dos termopares caracterizados

Termopar	Tubo com aletas				Tubo sem aletas			
	medida	real	medida	real	medida	real	medida	real
T1	92,0	95,08	26	27	85	85,27	27	27,05
T2	87,5	94,42	26	27	85	85,27	27	27,05
T3	92,0	93,76	26	27	84	85,27	27	27,05
T4	92,0	93,11	26	27	85	85,27	27	27,05

Nota-se que o processo de soldagem dos termopares feito no LaGePot faz com que a temperatura medida por cada termopar seja sempre menor que a temperatura real; tal diferença é, em média, 1,2 °C. Para dar mais certeza a este fato, foi feita uma caracterização dos termopares soldados, pelo mesmo processo, a um pequeno tubo e feitas as medidas de temperatura do mesmo, cuja instalação está mostrada na Figura A-4 e cujas medidas estão relacionadas na Tabela A-2.

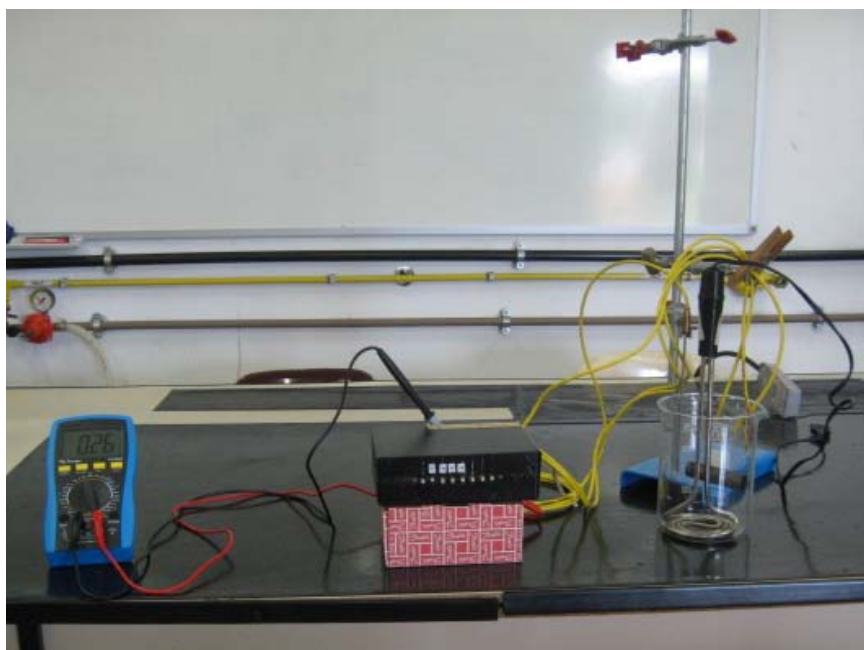


Figura A-4 – Sistema montado no LaGePot para a caracterização dos termopares soldados a um pequeno tubo

Tabela A-2 – Temperaturas medidas no teste de calibração dos termopares

Teste	T_{REF} (°C)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
T_{∞}	30	25	25	25	26
$T_{\text{ÁGUA FRIA}}$	28	24	24	24	24
$T_{\text{ÁGUA QUENTE}}$	100	97	97	97	97

Após a execução dos experimentos de calibração dos termopares, verifica-se que o processo de soldagem dos mesmos faz com que haja uma diferença média de 3,5 °C em relação ao termômetro de referência, cuja medida é indicada por T_{REF} . Assim, conclui-se que os termopares soldados no tubo aletado pelo mesmo processo de soldagem devem apresentar diferenças semelhantes.

APÊNDICE B – Tabelas de dados coletados nos experimentos

Abaixo estão descritos os significados dos termos usados nas tabelas a seguir:

W_{ABS} :	potência instantânea absorvida pela água [W];
W_{DISP} :	potência instantânea disponível da radiação global incidente no concentrador solar [W];
η :	eficiência de absorção de calor [%];
$h_{A,G}$:	coeficiente de convecção global da água no escoamento [W/m ² K];
Nu_G :	número de Nusselt global do tubo;
$Re_{D,M}$:	número de Reynolds médio do escoamento;
T_{∞} :	temperatura ambiente [°C];
$T5$:	temperatura da água na entrada do tubo [°C];
$T6$:	temperatura da água na saída do tubo [°C];
$T1$ a $T4$:	temperaturas do tubo nos pontos 1 a 4 [°C] (conforme Figura A-2);
UR :	umidade relativa do ar [%].

Em determinados horários no decorrer dos experimentos houve a presença de nuvens, e tais horários estão em **negrito** para a melhor identificação dos mesmos.

Tabela B-1 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 19/03/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura			UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)	W _{ABS}	W _{DISP}	η
	T5	T6	T _∞							
10:15	33	95	32,0	55,1	2,0	36°	L	323,87	1306,5	24,79
10:30	32	96	32,4	54,5	2,1	30°	L	334,32	1370,0	24,40
10:45	36	97	32,2	56,6	2,0	26°	L	318,65	1404,5	22,69
11:00	34	70	33,7	54,7	2,2	25°	L	188,06	1439,0	13,07
11:15	35	88	33,9	52,9	1,4	22°	L	276,86	1473,5	18,79
11:30	36	72	34,9	50,2	1,5	16°	L	188,06	1508,0	12,47
11:45	37	91	35,0	53,0	2,2	14°	L	282,08	1542,5	18,29
12:00	38	95	33,9	54,8	2,5	12°	L	297,75	1577,0	18,88
12:15	38	90	33,2	55,1	2,5	5°	L	271,64	1542,5	17,61
12:45	36	87	34,7	53,4	3,1	2°	O	266,41	1473,5	18,08
13:00	36	77	33,0	53,3	3,4	8°	O	214,17	1439,0	14,88
13:15	37	86	33,8	53,3	3,4	9°	O	255,96	1404,5	18,22
13:30	34	85	32,5	56,8	4,3	12°	O	266,41	1370,0	19,45
13:45	35	79	33,2	54,8	2,7	16°	O	229,85	1306,5	17,59

Obs.: Às 12:30h houve falha no multímetro.

Tabela B-2 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 21/02/2008 com vazão de água a 3,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T ∞				
10:30	41,10	96,32	62,80	70,22	29	58	31,5	54,0	3,9	22°	L
10:45	38,09	135,47	59,74	65,20	28	57	32,0	53,0	4,1	19°	L
11:00	39,10	182,65	59,74	66,20	29	55	32,0	52,0	4,2	15°	L
11:15	44,12	143,50	64,84	72,22	29	59	32,0	50,9	4,0	13°	L
11:30	43,11	111,37	63,82	72,22	29	59	32,5	49,8	3,2	10°	L
11:45	42,11	143,50	64,84	71,22	28	59	33,0	48,6	3,8	7°	L
12:00	35,08	113,38	49,52	53,15	30	51	33,0	47,5	4,2	3°	L
12:15	44,12	99,33	63,82	58,17	29	57	33,0	48,0	4,0	0°	
12:30	45,12	151,53	61,78	56,16	29	55	33,0	48,5	2,3	3°	O
12:45	46,12	94,31	65,87	58,17	27	56	33,0	49,0	2,1	6°	O
13:00	44,12	88,28	56,67	53,15	29	52	33,0	49,5	2,9	9°	O
13:15	46,12	97,32	63,82	55,16	28	55	33,0	50,0	3,5	12°	O
13:30	44,12	135,47	66,89	56,16	27	54	33,0	50,5	4,4	15°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	W _{DISP}	η
10:30	389,77	148,13	4,05	1510	25,81
10:45	389,91	111,22	3,05	1546	25,22
11:00	349,64	71,32	1,96	1582	22,1
11:15	403,14	99,38	2,71	1618	24,92
11:30	403,14	129,01	3,52	1654	24,37
11:45	416,65	103,41	2,83	1690	24,65
12:00	282,55	116,18	3,2	1726	16,37
12:15	376,4	147,65	4,04	1690	22,27
12:30	349,64	87,42	2,4	1654	21,14
12:45	390,05	145,18	3,99	1618	24,11
13:00	309,46	141,38	3,89	1582	19,56
13:15	363,15	138,03	3,79	1546	23,49
13:30	363,28	94,68	2,61	1510	24,06

Tabela B-3 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 04/03/2008 com vazão de água a 2,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T _∞				
10:00	38,09	115,39	71,99	85,27	24	68	30,0	67,5	1,6	37°	L
10:15	39,10	105,35	71,99	87,28	23	72	30,0	66,0	1,8	34°	L
10:30	39,10	94,31	77,10	94,31	23	77	31,0	64,5	2,0	31°	L
10:45	41,10	96,32	81,19	96,32	24	81	30,5	63,0	2,1	28°	L
11:00	39,10	83,27	76,08	86,28	24	81	30,5	61,5	2,3	24°	L
11:15	41,10	96,32	71,99	70,22	23	66	31,0	61,4	2,3	21°	L
11:30	40,10	87,28	71,99	71,22	23	67	31,0	61,3	2,3	17°	L
11:45	40,10	84,27	74,04	72,22	23	69	31,5	61,1	2,2	14°	L
12:00	44,12	100,33	76,08	73,23	24	69	31,5	61,0	2,2	10°	L
12:15	45,12	103,34	74,04	70,22	24	66	32,0	60,6	2,2	7°	L
12:30	45,12	97,32	74,04	70,22	25	66	32,5	60,3	2,3	3°	L
12:45	37,09	60,18	50,54	57,17	28	56	32,5	59,9	2,3	1°	O
13:00	30,06	53,15	31,14	32,07	28	30	32,5	59,5	2,3	4°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	W _{DISP}	η
10:00	409,05	118,28	3,22	1227,0	33,34
10:15	455,28	146,73	3,98	1287,5	35,36
10:30	501,27	175,28	4,73	1348,0	37,19
10:45	528,61	184,65	4,96	1381,0	38,28
11:00	528,61	259,29	6,97	1414,0	37,38
11:15	399,97	144,24	3,94	1447,0	27,64
11:30	409,19	165,54	4,51	1480,0	27,65
11:45	427,64	180,92	4,92	1513,0	28,26
12:00	418,27	142,27	3,87	1546,0	27,05
12:15	390,60	127,01	3,46	1513,0	25,82
12:30	381,23	133,46	3,63	1480,0	25,76
12:45	260,68	258,39	7,09	1447,0	18,01
13:00	18,70	22,54	0,64	1414,0	1,32

Tabela B-4 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo3 em 05/03/2008 com vazão de água a 1,25 ml/s.

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T ∞				
10:45	48,13	122,42	94,47	83,27	27	76	31,0	67,3	2,8	25°	L
11:00	53,15	119,40	108,77	95,31	30	93	30,0	67,5	2,8	23°	L
11:15	53,15	104,35	106,72	94,31	33	92	30,0	67,4	2,7	20°	L
11:30	44,12	93,30	88,34	92,30	27	89	31,0	67,3	2,6	17°	L
11:45	46,12	103,34	89,36	90,29	26	84	32,0	67,1	2,5	14°	L
12:00	46,12	98,32	86,29	87,28	26	82	32,0	67,0	2,4	10°	L
12:15	44,12	81,26	86,29	84,27	28	78	32,5	68,3	2,5	7°	L
12:30	45,12	86,28	87,32	89,29	28	83	32,5	69,5	2,6	3°	L
12:45	43,11	77,24	86,29	89,29	26	84	33,0	70,8	2,7	0°	
13:00	44,12	78,25	87,32	88,28	28	82	33,0	72,0	2,8	5°	O
13:15	43,11	74,23	83,23	84,27	27	80	33,0	73,0	2,6	8°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	W _{DISP}	η
10:45	252,55	65,06	1,75	1381	18,29
11:00	323,42	90,74	2,40	1414	22,87
11:15	302,75	102,24	2,70	1447	20,92
11:30	318,74	135,75	3,61	1480	21,54
11:45	298,53	100,27	2,68	1513	19,73
12:00	288,35	103,59	2,78	1546	18,65
12:15	257,56	112,46	3,02	1513	17,02
12:30	283,04	120,62	3,22	1480	19,12
12:45	298,53	144,08	3,86	1447	20,63
13:00	277,95	130,66	3,50	1414	19,66
13:15	272,96	141,22	3,79	1381	19,77

Tabela B-5 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 20/03/2007 com
vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura			UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)	W _{ABS}	W _{DISP}	η
	T5	T6	T _∞							
11:15	32	87	36,0	51,0	2,55	20°	L	292,93	1493,47	19,61
11:30	34	75	35,0	49,0	2,24	16°	L	217,72	1521,94	14,31
11:45	36	86	35,0	50,0	2,24	13°	L	266,55	1550,42	17,19
12:00	37	87	35,0	48,0	3,08	10°	L	266,72	1578,89	16,89
12:15	38	90	35,0	50,5	3,94	6°	L	277,75	1572,36	17,66
12:30	38	87	34,8	50,0	4,47	2°	L	261,47	1565,83	16,70
12:45	38	92	34,5	52,0	2,64	1°	O	288,63	1559,31	18,51
13:00	37	90	33,5	51,0	4,30	4°	O	283,00	1552,78	18,23
13:15	36	90	33,7	53,2	3,16	8°	O	288,24	1508,47	19,11
13:30	36	95	33,0	52,6	2,73	14°	O	315,46	1464,17	21,55
13:45	36	87	33,7	52,2	0,99	18°	O	271,97	1419,86	19,15
14:00	37	86	33,6	52,8	4,18	20°	O	261,30	1375,56	19,00
14:15	35	78	33,9	51,6	1,56	22°	O	228,60	1301,94	17,56
14:30	35	80	34,6	51,0	1,57	28°	O	239,38	1228,33	19,49
14:45	36	80	34,2	52,6	1,41	35°	O	234,13	1154,72	20,28
15:00	35	80	33,3	53,1	1,10	35°	O	239,38	1081,11	22,14

Tabela B-6 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 21/03/2007 com
vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura			UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)	W _{ABS}	W _{DISP}	η
	T5	T6	T _∞							
11:30	36	79	33,6	47,8	1,80	16°	L	228,74	1550,0	14,76
11:45	35	97	33,4	46,7	1,50	14°	L	331,62	1586,0	20,91
12:00	35	97	33,6	47,0	2,70	10°	L	331,62	1622,0	20,44
12:15	36	87	34,2	45,8	1,49	6°	L	271,97	1586,0	17,15
12:30	37	96	34,4	45,0	1,62	4°	L	315,68	1550,0	20,37
12:45	37	96	34,6	44,2	3,05	0°		315,68	1514,0	20,85
13:00	38	65	35,0	44,6	2,19	4°	O	143,14	1478,0	9,68
13:15	38	97	35,0	41,8	2,69	8°	O	315,90	1442,0	21,91
13:30	37	96	35,0	41,2	2,69	12°	O	315,68	1406,0	22,45
13:45	38	97	35,4	40,7	2,83	16°	O	315,90	1340,5	23,57
14:00	38	96	34,7	47,9	1,87	20°	O	310,44	1275,0	24,35
14:15	37	95	34,4	53,5	2,55	24°	O	310,22	1209,5	25,65
14:30	37	97	33,4	56,1	2,35	28°	O	321,14	1144,0	28,07
14:45	37	96	32,7	56,0	2,69	32°	O	315,68	1060,5	29,77
15:00	32	92	33,4	54,1	2,50	36°	O	320,06	977,0	32,76
15:15	25	79	33,0	55,0	3,20	41°	O	286,36	893,5	32,05
15:30	24	78	32,0	55,5	3,16	45°	O	286,21	810,0	35,33
15:45	35	85	32,2	53,6	1,62	50°	O	266,38	726,5	36,67
16:00	36	78	31,8	54,0	2,12	50°	O	223,35	643,0	34,74

Tabela B-7 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 26/03/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura			UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)	W _{ABS}	W _{DISP}	η
	T5	T6	T _∞							
09:15	29	38	31,0	57,3	1,90	45°	L	47,35	1079,0	4,39
09:30	29	63	31,0	54,8	1,90	43°	L	179,76	1146,0	15,69
09:45	29	72	32,5	50,0	0,40	41°	L	227,85	1213,0	18,78
10:00	31	80	32,0	49,5	0,90	39°	L	260,35	1280,0	20,34
10:15	34	80	32,2	50,4	0,90	36°	L	244,63	1347,0	18,16
10:30	36	77	31,8	51,0	2,00	32°	L	217,97	1414,0	15,42
10:45	36	79	32,0	50,0	2,00	30°	L	228,74	1450,5	15,77
11:15	34	55	33,7	45,5	2,59	19°	L	110,95	1523,5	7,28
11:30	36	54	32,6	47,2	2,64	16°	L	95,12	1560,0	6,10
11:45	37	63	34,1	45,2	2,20	12°	L	137,73	1596,5	8,63
12:00	36	57	33,9	50,3	1,44	8°	L	111,06	1633,0	6,80
12:15	37	66	32,4	53,3	1,86	4°	L	153,75	1596,5	9,63
12:30	38	58	32,0	54,3	3,48	0°		105,84	1560,0	6,78

Obs.: Às 11:00h houve falha no multímetro.

Tabela B-8 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 19/11/2007 com
vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T ∞				
10:30	78,57	94,97	84,66	79,08	25	73	28,9	53,8	3,6	20°	L
10:45	50,72	70,85	74,54	56,04	26	53	29,1	52,6	3,6	17°	L
11:00	50,72	73,04	76,57	66,06	27	55	29,4	51,5	3,6	15°	L
11:15	47,62	69,75	78,59	84,09	24	74	29,5	52,0	3,8	11°	L
11:30	33,18	39,05	43,18	55,04	27	54	29,5	52,5	4,0	8°	L
11:45	66,19	85,10	81,62	104,13	28	90	29,6	53,0	4,1	5°	L
12:15	37,31	48,92	49,25	56,04	29	53	29,6	53,5	4,3	1°	L
12:30	51,75	64,27	67,46	74,07	27	67	29,5	54,6	4,3	3°	O
12:45	56,91	48,92	53,30	56,04	26	53	29,3	55,8	4,4	7°	O
13:00	45,56	56,60	59,37	62,05	27	54	29,2	56,9	4,4	11°	O
13:15	49,69	62,08	66,45	76,08	26	65	29,1	58,0	4,4	15°	O
13:30	51,75	64,27	65,44	80,09	28	71	29,1	57,9	4,6	18°	O
13:45	33,18	57,69	62,40	73,07	29	67	29,1	57,8	4,8	21°	O
14:00	28,02	63,17	64,43	82,09	27	74	29,1	57,6	4,9	25°	O
14:15	26,99	56,60	61,39	74,07	28	68	29,1	57,5	5,1	28°	O
14:30	26,99	55,50	60,38	75,08	28	68	29,0	58,1	4,9	31°	O
14:45	25,96	75,23	73,53	94,11	27	85	28,8	58,8	4,7	36°	O
15:00	25,96	56,60	57,34	74,07	28	68	28,7	59,4	4,4	39°	O
15:15	24,93	52,21	55,32	65,06	27	65	28,5	60,0	4,2	42°	O
15:30	26,99	51,11	55,32	67,06	28	62	28,3	60,4	4,2	46°	O
15:45	25,96	48,92	52,29	61,05	27	58	28,1	60,8	4,3	49°	O
16:00	25,96	51,11	53,30	62,05	27	55	27,9	61,1	4,3	52°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	Re _{D,m}	W _{DISP}	η
10:30	247,63	64,24	1,74	162,22	1412,0	17,54
10:45	139,77	54,41	1,50	137,25	1443,5	9,68
11:00	144,87	51,86	1,43	141,09	1475,0	9,82
11:15	257,95	112,47	3,04	162,22	1506,5	17,12
11:30	139,72	605,49	16,67	139,81	1538,0	9,08
11:45	318,61	115,56	3,07	189,84	1569,5	20,30
12:15	124,18	165,35	4,55	141,09	1569,5	7,91
12:30	206,51	108,81	2,95	156,84	1538,0	13,43
12:45	139,77	89,60	2,47	137,25	1506,5	9,28
13:00	139,72	83,16	2,29	139,81	1475,0	9,47
13:15	201,46	102,13	2,78	152,85	1443,5	13,96
13:30	221,80	127,92	3,46	163,57	1412,0	15,71
13:45	196,12	209,25	5,67	159,52	1354,0	14,48
14:00	242,34	248,70	6,71	166,29	1296,0	18,70
14:15	206,44	279,66	7,58	159,52	1238,0	16,68
14:30	206,44	291,59	7,90	159,52	1180,0	17,49
14:45	298,42	243,93	6,52	181,45	1105,0	27,01
15:00	206,44	344,29	9,33	159,52	1030,0	20,04
15:15	196,26	532,05	14,48	154,18	955,0	20,55
15:30	175,66	314,22	8,57	151,53	880,0	19,96
15:45	160,31	322,48	8,84	144,97	799,0	20,06
16:00	144,87	186,79	5,14	141,09	718,0	20,18

Obs.: Às 12:00h houve falha no multímetro

Tabela B-9 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 23/11/2007 com vazão de água a 3,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T _∞				
12:30	46,59	58,79	61,39	54,04	25	42	27,2	40,0	3,3	2°	O
12:45	41,44	57,69	49,25	52,04	25	44	27,2	36,8	3,5	5°	O
13:00	42,47	53,31	48,24	47,03	24	40	27,3	33,5	3,8	8°	O
13:15	47,62	57,69	48,24	51,03	24	44	27,1	34,3	3,9	11°	O
13:30	43,50	55,50	48,24	53,04	24	44	27,0	35,0	3,9	15°	O
13:45	51,75	70,85	58,36	65,06	24	51	26,9	35,8	4,0	20°	O
14:00	48,66	89,49	63,41	70,07	24	54	26,8	36,5	4,0	24°	O
14:15	43,50	60,98	62,40	63,06	26	48	26,6	37,6	3,7	27°	O
14:30	32,15	51,11	47,23	49,03	25	42	26,5	38,8	3,4	30°	O
14:45	30,09	81,81	63,41	74,07	25	58	26,3	39,9	3,1	34°	O
15:00	26,99	67,56	65,44	78,08	26	58	26,2	41,0	2,8	37°	O
15:15	25,96	97,16	60,38	65,06	26	52	26,0	42,4	2,7	41°	O
15:30	25,96	84,01	59,37	67,06	26	52	25,9	43,8	2,7	45°	O
15:45	26,99	76,33	62,40	70,07	25	54	25,8	45,1	2,6	49°	O
16:00	28,02	91,68	60,38	69,07	26	54	25,7	46,5	2,5	52°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	Re _{D,m}	W _{DISP}	η
12:30	229,28	96,80	2,71	317,95	1532,0	14,97
12:45	256,17	150,43	4,20	324,32	1501,0	17,07
13:00	215,91	125,53	3,53	308,48	1470,0	14,69
13:15	269,70	144,11	4,03	321,13	1439,0	18,74
13:30	269,70	153,79	4,30	321,13	1408,0	19,15
13:45	363,66	138,81	3,85	343,70	1350,5	26,93
14:00	403,85	128,01	3,54	353,55	1293,0	31,23
14:15	296,36	132,56	3,68	340,44	1235,5	23,99
14:30	229,28	184,60	5,17	317,95	1178,0	19,46
14:45	443,85	195,08	5,36	370,20	1103,5	40,22
15:00	430,32	225,08	6,18	373,56	1029,0	41,82
15:15	350,01	138,59	3,83	353,55	954,5	36,67
15:30	350,01	159,56	4,41	353,55	880,0	39,77
15:45	390,32	183,89	5,07	356,86	799,5	48,82
16:00	376,80	154,91	4,27	360,17	719,0	52,41

Tabela B-10 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 04/12/2007 com
vazão de água a 2,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T ∞				
09:45	54,85	59,88	50,26	45,02	20	41	28,6	66,6	1,9	31°	L
10:00	72,38	91,68	60,38	50,03	20	43	29,0	65,5	2,1	28°	L
10:15	31,12	33,57	33,06	32,00	24	29	29,0	64,1	2,3	25°	L
10:30	70,32	86,20	67,46	60,05	23	56	30,0	62,8	2,6	22°	L
10:45	45,56	68,66	73,53	61,05	25	59	30,0	61,4	2,8	19°	L
11:00	30,09	39,05	46,22	56,04	27	53	30,0	60,0	3,0	16°	L
11:15	55,88	97,16	62,40	72,07	26	61	30,0	59,4	3,1	13°	L
11:30	40,40	56,60	53,30	54,04	26	48	30,0	58,8	3,2	10°	L
11:45	39,37	55,50	53,30	56,04	26	49	30,0	58,1	3,3	7°	L
12:00	49,69	52,21	47,23	53,04	26	52	30,0	57,5	3,4	4°	L
12:15	42,47	56,60	53,30	58,05	27	51	30,0	58,4	3,5	0°	
12:30	48,66	67,56	52,29	60,05	28	53	30,0	59,3	3,5	1°	O
12:45	58,97	99,36	70,50	84,09	26	69	31,0	60,1	3,6	8°	O
13:00	60,00	99,36	69,48	84,09	27	70	30,5	61,0	3,6	11°	O
13:15	53,81	78,52	68,47	81,09	27	68	30,5	61,5	3,7	15°	O
13:30	57,94	87,30	70,50	85,09	27	71	30,2	62,0	3,8	18°	O
13:45	56,91	81,81	68,47	82,09	28	69	30,0	62,5	3,8	20°	O
14:00	50,72	63,17	68,47	73,07	27	58	30,0	63,0	3,9	23°	O
14:15	53,81	98,26	69,48	85,09	28	69	29,5	63,1	3,9	26°	O
14:30	47,62	80,72	75,55	90,10	28	74	30,0	63,3	3,8	30°	O
14:45	48,66	67,56	60,38	71,07	28	57	30,0	63,4	3,8	33°	O
15:00	48,66	91,68	61,39	68,06	28	52	30,0	63,5	3,7	36°	O
15:15	52,78	78,52	61,39	72,07	27	58	30,0	64,5	3,6	40°	O
15:30	28,02	30,28	31,04	33,00	27	31	29,0	65,5	3,4	43°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	Re _{D,m}	W _{DISP}	η
09:45	196,29	81,73	2,30	207,08	1408,0	13,94
10:00	214,91	53,05	1,49	211,39	1472,0	14,60
10:15	46,80	72,21	2,06	190,12	1536,0	3,05
10:30	307,50	89,42	2,47	247,05	1600,0	19,22
10:45	316,54	143,58	3,94	258,62	1635,0	19,36
11:00	242,23	778,79	21,46	249,35	1670,0	14,50
11:15	325,67	105,15	2,88	265,65	1705,0	19,10
11:30	205,18	133,48	3,70	235,69	1740,0	11,79
11:45	214,46	144,99	4,02	237,95	1775,0	12,08
12:00	242,31	192,38	5,31	244,77	1810,0	13,39
12:15	223,67	150,68	4,16	244,77	1775,0	12,60
12:30	232,87	128,24	3,53	251,66	1740,0	13,38
12:45	399,53	119,13	3,23	284,73	1705,0	23,43
13:00	399,38	123,07	3,33	289,56	1670,0	23,92
13:15	380,95	151,93	4,12	284,73	1635,0	23,30
13:30	408,59	142,86	3,86	291,99	1600,0	25,54
13:45	380,81	146,48	3,97	289,56	1536,0	24,79
14:00	288,55	123,78	3,39	260,95	1472,0	19,60
14:15	380,81	123,89	3,35	289,56	1408,0	27,05
14:30	426,84	173,83	4,68	301,77	1344,0	31,76
14:45	269,94	127,39	3,49	260,95	1260,0	21,42
15:00	223,59	74,64	2,06	249,35	1176,0	19,01
15:15	288,55	111,59	3,06	260,95	1092,0	26,42
15:30	37,41	215,93	6,11	200,66	1008,0	3,71

Tabela B-11 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 05/12/2007 com vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T ∞				
10:00	45,56	69,75	68,47	61,05	23	56	29	54,5	3,7	35°	L
10:15	28,02	91,68	106,92	110,14	29	94	29	53,5	4,0	32°	L
10:30	28,02	54,40	67,46	86,10	29	86	29	52,5	4,3	27°	L
10:45	31,12	87,30	95,79	100,12	30	95	29	51,5	4,5	20°	L
11:00	30,09	74,14	88,71	106,13	30	91	29	50,5	4,8	16°	L
11:15	44,53	80,72	93,76	107,13	30	86	30	48,9	4,7	12°	L
11:30	47,62	81,81	87,69	97,12	30	89	30	47,3	4,7	10°	L
11:45	52,78	97,16	108,94	109,14	30	94	30	45,6	4,6	7°	L
12:00	65,16	63,17	57,34	80,09	30	71	31	44,0	4,5	4°	L
12:15	69,29	63,17	65,44	81,09	29	78	31	44,5	4,4	1°	L
12:30	51,75	69,75	69,48	82,09	30	73	31	45,0	4,3	0°	
12:45	70,32	122,38	95,79	108,13	30	90	31	45,5	4,1	1°	O
13:00	67,23	121,28	107,93	109,14	30	96	32	46,0	4,0	4°	O
13:15	67,23	121,28	92,75	110,14	30	89	32	47,0	4,3	7°	O
13:30	67,23	114,71	85,67	105,13	29	82	32	48,0	4,6	10°	O
13:45	67,23	87,30	76,57	89,10	30	74	32	49,0	4,8	13°	O
14:00	65,16	97,16	76,57	95,11	29	74	32	50,0	5,1	16°	O
14:15	65,16	103,74	79,60	98,12	29	75	31	51,0	4,8	19°	O
14:30	69,29	85,10	74,54	81,09	30	70	31	52,0	4,5	22°	O
14:45	56,91	77,43	84,66	82,09	30	71	32	53,0	4,2	26°	O
15:00	68,26	109,22	81,62	97,12	31	78	31	54,0	3,9	29°	O
15:15	69,29	80,72	98,82	107,13	29	86	31	55,3	4,0	32°	O
15:30	67,23	86,20	93,76	108,13	29	93	31	56,5	4,2	35°	O
15:45	69,29	68,66	81,62	91,10	29	75	31	57,8	4,3	38°	O
16:00	60,00	102,64	71,51	87,10	30	68	30	59,0	4,4	42°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	Re _{D,m}	W _{DISP}	η
10:00	170,83	72,10	1,99	137,25	1471,0	11,61
10:15	333,68	134,75	3,57	196,88	1535,5	21,73
10:30	293,10	1795,14	47,84	185,64	1600,0	18,32
10:45	333,54	190,05	5,03	199,71	1635,0	20,4
11:00	313,28	201,21	5,34	194,06	1670,0	18,76
11:15	287,89	112,08	2,98	187,04	1705,0	16,89
11:30	303,13	145,71	3,87	191,25	1740,0	17,42
11:45	328,48	100,31	2,66	198,30	1775,0	18,51
12:00	211,40	121,51	3,28	166,29	1810,0	11,68
12:15	252,36	142,32	3,82	174,52	1775,0	14,22
12:30	221,63	121,10	3,26	169,02	1740,0	12,74
12:45	308,21	72,12	1,91	192,65	1705,0	18,08
13:00	338,60	80,81	2,14	201,13	1670,0	20,28
13:15	303,13	72,42	1,92	191,25	1635,0	18,54
13:30	272,74	66,32	1,77	180,06	1600,0	17,05
13:45	226,74	74,07	1,99	170,39	1535,5	14,77
14:00	231,94	66,41	1,79	169,02	1471,0	15,77
14:15	237,05	62,67	1,69	170,39	1406,5	16,85
14:30	206,28	68,72	1,86	164,93	1342,0	15,37
14:45	211,40	78,19	2,11	166,29	1259,0	16,79
15:00	241,96	64,16	1,72	177,28	1176,0	20,58
15:15	293,10	85,28	2,27	185,64	1093,0	26,82
15:30	328,62	108,19	2,87	195,47	1010,0	32,54
15:45	237,05	84,62	2,28	170,39	919,5	25,78
16:00	196,04	57,36	1,55	162,22	829	23,65

Tabela B-12 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 11/12/2007 com vazão de água a 2,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T _∞				
09:30	21,83	46,73	69,48	89,10	25	73	29,0	52,8	2,9	38°	L
09:45	20,80	63,17	59,37	72,07	25	54	29,0	51,4	3,2	35°	L
10:00	22,87	50,02	52,29	59,05	25	53	30,0	50,0	3,4	32°	L
10:15	26,99	74,14	73,53	87,10	25	69	30,0	49,8	3,5	32°	L
10:30	24,93	85,10	65,44	81,09	27	64	30,0	49,5	3,6	28°	L
10:45	26,99	97,16	66,45	77,08	26	58	30,0	49,3	3,6	25°	L
11:00	31,12	84,01	62,40	75,08	27	58	30,5	49,0	3,7	22°	L
11:15	26,99	85,10	69,48	77,08	27	58	30,0	50,0	3,9	20°	L
11:30	39,37	53,31	79,60	94,11	27	77	31,0	51,0	4,0	17°	L
11:45	47,62	53,31	79,60	93,11	26	73	31,0	52,0	4,2	14°	L
12:00	47,62	64,27	78,59	91,10	28	71	31,0	53,0	4,3	11°	L
12:15	53,81	71,95	78,59	90,10	26	67	30,0	53,9	4,6	8°	L
12:30	64,13	53,31	78,59	89,10	27	70	31,0	54,8	4,8	5°	L
12:45	68,26	104,84	70,50	82,09	27	63	31,0	55,6	5,1	2°	L
13:00	64,13	111,42	67,46	78,08	29	60	30,0	56,5	5,3	1°	O
13:15	61,04	108,13	65,44	78,08	28	58	30,0	57,0	5,4	5°	O
13:30	61,04	93,87	64,43	76,08	28	57	30,0	57,5	5,4	7°	O
13:45	64,13	67,56	76,57	87,10	27	67	30,0	58,0	5,5	10°	O
14:00	65,16	56,60	80,61	91,10	28	69	30,0	58,5	5,5	13°	O
14:15	68,26	55,50	81,62	92,11	28	72	30,0	58,4	5,6	16°	O
14:30	71,35	73,04	77,58	91,10	28	70	30,0	58,3	5,7	19°	O
14:45	71,35	74,14	74,54	84,09	27	63	30,0	58,1	5,7	23°	O
15:00	65,16	68,66	75,55	86,10	28	66	30,0	58,0	5,8	26°	O
15:15	62,07	111,42	65,44	77,08	28	54	29,5	58,5	5,4	30°	O
15:30	65,16	64,27	72,52	80,09	28	61	29,5	59,0	5,1	33°	O
15:45	61,04	57,69	75,55	83,09	28	65	29,5	59,5	4,7	36°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	Re _{D,m}	W _{DISP}	η
09:30	445,74	524,48	14,19	291,99	1342,0	33,21
09:45	270,22	172,49	4,76	247,05	1405,5	19,23
10:00	260,95	338,94	9,36	244,77	1469,0	17,76
10:15	408,90	203,18	5,52	282,32	1532,5	26,68
10:30	344,03	169,12	4,61	275,13	1596,0	21,56
10:45	297,92	109,53	3,01	258,62	1631,0	18,27
11:00	288,55	128,03	3,51	260,95	1666,0	17,32
11:15	288,55	119,28	3,27	260,95	1701,0	16,96
11:30	463,78	291,11	7,83	306,70	1736,0	26,72
11:45	436,37	211,44	5,71	294,43	1771,0	24,64
12:00	399,23	175,05	4,73	294,43	1806,0	22,11
12:15	381,09	128,79	3,50	279,91	1771,0	21,52
12:30	399,38	160,63	4,35	289,56	1736,0	23,01
12:45	334,80	84,23	2,30	272,75	1701,0	19,68
13:00	288,35	73,86	2,02	270,37	1666,0	17,31
13:15	279,20	72,74	1,99	263,30	1631,0	17,12
13:30	269,94	78,89	2,16	260,95	1596,0	16,91
13:45	371,72	126,91	3,45	282,32	1532,5	24,26
14:00	380,81	140,30	3,80	289,56	1469,0	25,92
14:15	408,44	153,55	4,15	296,87	1405,5	29,06
14:30	390,02	122,10	3,30	291,99	1342,0	29,06
14:45	334,80	98,86	2,70	272,75	1259,0	26,59
15:00	353,14	120,43	3,27	282,32	1176,0	30,03
15:15	242,14	58,39	1,61	253,97	1093,0	22,15
15:30	306,95	108,13	2,95	270,37	1010,0	30,39
15:45	343,91	137,94	3,75	279,91	920,0	37,38

Tabela B-13 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo4 em 04/01/2008 com
vazão de água a 3,25 ml/s

Hora	Temperatura							UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T _∞				
09:45	22,87	53,31	58,36	71,07	27	53	28,0	49,4	3,8	40°	L
10:00	23,90	69,75	55,32	57,05	30	48	29,0	48,0	3,8	38°	L
10:15	25,96	50,02	48,24	53,04	26	46	29,0	47,0	3,9	35°	L
10:30	24,93	56,60	50,26	59,05	27	49	29,0	46,0	4,0	32°	L
10:45	25,96	60,98	65,44	63,06	27	49	29,0	45,0	4,0	29°	L
11:00	22,87	54,40	48,24	54,04	25	46	30,0	44,0	4,1	25°	L
11:15	25,96	34,67	41,16	48,03	26	44	29,5	43,5	4,0	22°	L
11:30	25,96	54,40	50,26	52,04	26	45	30,0	43,0	3,9	19°	L
12:15	30,09	68,66	67,46	68,06	27	51	30,5	42,5	3,8	12°	L
12:30	56,91	51,11	67,46	80,09	27	61	31,0	42,0	3,7	10°	L
12:45	58,97	58,79	72,52	84,09	27	66	31,0	42,4	4,0	6°	L
13:00	60,00	75,23	58,36	62,05	27	47	31,0	42,8	4,3	3°	L
13:15	66,19	94,97	62,40	73,07	28	54	31,0	43,1	4,5	1°	O
13:30	65,16	96,07	61,39	72,07	27	53	31,0	43,5	4,8	5°	O
13:45	66,19	105,93	59,37	64,06	27	48	31,0	42,6	4,7	8°	O
14:00	70,32	84,01	59,37	70,07	27	48	31,0	41,8	4,6	11°	O
14:15	66,19	79,62	62,40	66,06	27	48	31,0	40,9	4,5	15°	O
14:30	56,91	73,04	67,46	62,05	28	49	31,0	40,0	4,4	18°	O
14:45	62,07	77,43	62,40	65,06	27	48	31,0	39,8	4,5	21°	O
15:00	68,26	80,72	63,41	66,06	27	48	31,0	39,5	4,7	25°	O
15:15	46,59	64,27	51,27	57,05	28	48	31,0	39,3	4,8	28°	O
15:30	50,72	70,85	68,47	61,05	29	49	30,0	39,0	4,9	31°	O
15:45	62,07	77,43	63,41	67,06	29	51	30,0	39,0	4,8	35°	O
16:00	66,19	81,81	62,40	63,06	28	50	30,0	39,0	4,6	38°	O

Hora	W _{ABS}	h _{A,G}	Nu _G	Re _{D,m}	W _{DISP}	η
09:45	349,88	281,23	7,75	360,17	919,5	38,05
10:00	242,31	177,56	4,90	353,55	989	24,5
10:15	269,52	297,03	8,26	333,96	1058,5	25,46
10:30	296,26	279,59	7,74	346,97	1128	26,26
10:45	296,26	171,17	4,74	346,97	1182	25,06
11:00	283,04	276,28	7,69	330,73	1236	22,9
11:15	242,65	906,08	25,26	327,52	1290	18,81
11:30	256,08	230,82	6,43	330,73	1344	19,05
12:15	323,08	151,29	4,18	353,55	1431	22,58
12:30	456,89	210,45	5,75	387,12	1460	31,29
12:45	523,61	217,15	5,90	404,32	1489	35,17
13:00	269,42	91,73	2,55	340,44	1518	17,75
13:15	349,76	96,65	2,66	366,84	1489	23,49
13:30	349,88	95,21	2,62	360,17	1460	23,96
13:45	282,84	71,22	1,97	343,7	1431	19,77
14:00	282,84	77,5	2,15	343,7	1402	20,17
14:15	282,84	83,41	2,31	343,7	1373	20,6
14:30	282,75	98,26	2,72	350,26	1344	21,04
14:45	282,84	88,63	2,46	343,7	1290	21,93
15:00	282,84	80,7	2,24	343,7	1236	22,88
15:15	269,33	146,93	4,07	346,97	1182	22,79
15:30	269,24	103,77	2,87	353,55	1128	23,87
15:45	296,06	98,67	2,72	360,17	1058,5	27,97
16:00	296,16	92,41	2,55	353,55	989	29,95

Tabela B-14 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo5 em 14/02/2008 com vazão de água a 1,25 ml/s

Hora	Temperatura			UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)	W _{ABS}	W _{DISP}	η
	T5	T6	T ∞							
11:00	29,0	75,0	33,0	48,5	2,7	34°	L	237,05	1570,0	15,10
11:15	31,0	91,0	31,0	48,8	3,0	31°	L	308,08	1605,0	19,19
11:30	31,0	88,0	31,0	49,0	3,3	28°	L	292,86	1640,0	17,86
11:45	32,0	90,0	31,0	49,3	3,6	24°	L	297,81	1675,0	17,78
12:00	30,0	70,0	31,0	49,5	3,9	22°	L	206,28	1710,0	12,06
12:15	32,0	85,0	31,5	49,4	4,0	19°	L	272,42	1675,0	16,26
12:30	32,0	83,0	31,5	49,3	4,1	16°	L	262,24	1640,0	15,99
12:45	32,0	88,0	31,5	49,1	3,1	12°	L	287,66	1605,0	17,92
13:00	33,0	90,0	31,5	49,0	4,2	8°	L	292,61	1570,0	18,64
13:15	32,0	73,0	32,0	49,6	4,0	5°	L	211,24	1535,0	13,76
13:30	32,0	74,0	32,0	50,3	3,5	1°	L	216,35	1500,0	14,42
13:45	33,0	80,0	32,0	50,9	4,1	2°	O	241,77	1436,0	16,84
14:00	33,0	85,0	31,5	51,5	4,0	5°	O	267,22	1372,0	19,48
14:15	33,0	75,0	31,0	51,1	3,4	9°	O	216,26	1308,0	16,53
14:30	33,0	84,0	31,0	50,8	4,0	13°	O	262,14	1244,0	21,07
14:45	33,0	80,0	31,0	50,4	3,9	16°	O	241,77	1161,5	20,82
15:00	33,0	87,0	31,0	50,0	2,9	21°	O	277,39	1079,0	25,71
15:15	33,0	82,0	32,0	50,4	3,9	24°	O	251,96	996,5	25,28
15:30	34,0	81,0	31,0	50,8	4,0	28°	O	241,67	914,0	26,44
15:45	33,0	77,0	31,0	51,1	3,7	32°	O	226,47	825,0	27,45
16:00	33,0	71,0	31,0	51,5	4,0	35°	O	195,82	736,0	26,61
16:15	33,0	75,0	32,0	53,1	4,1	40°	O	216,26	647,0	33,43

Tabela B-15 – Dados experimentais e calculados para o arranjo Tubo5 em 15/02/2008 com vazão de água a 3,25 ml/s

Hora	Temperatura			UR	Vento (m/s)	Inclinação do coletor	Leste(L) Oeste(O)	W _{ABS}	W _{DISP}	η
	T5	T6	T ∞							
11:00	29,0	31,0	30,0	57,5	1,6	35°	L	27,01	1572,0	1,72
11:15	29,0	42,0	31,0	57,1	2,0	30°	L	175,21	1607,0	10,90
11:30	29,0	31,0	31,0	56,8	2,4	28°	L	27,01	1642,0	1,64
11:45	29,0	31,0	31,0	56,4	2,7	26°	L	27,01	1677,0	1,61
12:00	28,0	29,0	31,0	56,0	3,1	22°	L	13,51	1712,0	0,79
12:15	28,0	29,0	31,0	55,0	3,3	19°	L	13,51	1677,0	0,81
12:30	29,0	39,0	31,0	54,0	3,4	15°	L	134,85	1642,0	8,21
12:45	29,0	48,0	31,0	53,0	3,6	13°	L	255,82	1607,0	15,92
13:00	29,0	52,0	31,0	52,0	3,7	10°	L	309,46	1572,0	19,69
13:15	30,0	54,0	31,0	53,3	3,7	6°	L	322,74	1537,0	21,00
13:30	30,0	53,0	31,0	54,5	3,7	4°	L	309,35	1502,0	20,60
13:45	29,0	49,0	31,0	55,8	3,6	2°	O	269,24	1437,5	18,73
14:00	29,0	49,0	31,0	57,0	3,6	6°	O	269,24	1373,0	19,61
14:15	29,0	47,0	31,0	58,4	3,5	9°	O	242,40	1308,5	18,52
14:30	29,0	48,0	31,0	59,8	3,5	11°	O	255,82	1244,0	20,56
14:45	30,0	49,0	31,0	61,1	3,4	16°	O	255,73	1161,0	22,03
15:00	30,0	50,0	33,0	62,5	3,3	19°	O	269,14	1078,0	24,97
15:15	30,0	51,0	31,0	62,5	3,4	23°	O	282,55	995,0	28,40
15:30	30,0	39,0	31,0	62,5	3,4	27°	O	121,34	912,0	13,31

APÊNDICE C – Tabelas de comparação entre os fatores de ajuste

Tabela C-1 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos de todos os experimentos

(continua)

Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj}$ A	$E_{DISP, aj}$ B	$E_{DISP, aj}$ C	$E_{DISP, aj}$ D
19/3/2007 (Tubo3)	10:15	323,87	478,84	310,89	238,68	274,79	250,32
	10:30	334,32	515,43	334,73	257,03	295,88	269,55
	10:45	318,65	537,65	349,20	268,17	308,69	281,23
	11:00	188,06	559,88	363,68	279,32	321,50	292,91
	11:15	276,86	582,10	378,15	290,46	334,31	304,59
	11:30	188,06	604,32	392,63	301,61	347,12	316,27
	11:45	282,08	626,55	407,11	312,75	359,93	327,95
	12:00	297,75	648,77	421,58	323,90	372,74	339,64
	12:15	271,64	626,55	407,11	312,75	359,93	327,95
	12:45	266,41	582,10	378,15	290,46	334,31	304,59
	13:00	214,17	559,88	363,68	279,32	321,50	292,91
	13:15	255,96	537,65	349,20	268,17	308,69	281,23
	13:30	266,41	515,43	334,73	257,03	295,88	269,55
	13:45	229,85	478,84	310,89	238,68	274,79	250,32
	11:00	237,05	621,05	399,81	305,89	352,85	321,02
	11:15	308,08	643,89	414,60	317,22	365,91	332,91
14/2/2008 (Tubo5)	11:30	292,86	666,73	429,39	328,54	378,97	344,79
	11:45	297,81	689,57	444,18	339,87	392,02	356,68
	12:00	206,28	712,41	458,97	351,20	405,08	368,56
	12:15	272,42	689,57	444,18	339,87	392,02	356,68
	12:30	262,24	666,73	429,39	328,54	378,97	344,79
	12:45	287,66	643,89	414,60	317,22	365,91	332,91
	13:00	292,61	621,05	399,81	305,89	352,85	321,02
	13:15	211,24	598,20	385,02	294,56	339,79	309,14
	13:30	216,35	575,36	370,23	283,24	326,74	297,26
	13:45	241,77	537,22	345,54	264,33	304,93	277,41
	14:00	267,22	499,08	320,84	245,41	283,13	257,57
	14:15	216,26	460,93	296,15	226,50	261,32	237,72
	14:30	262,14	422,79	271,45	207,59	239,52	217,88
	14:45	241,77	381,21	244,53	186,97	215,75	196,25
	15:00	277,39	339,63	217,61	166,36	191,99	174,62
	15:15	251,96	298,05	190,70	145,74	168,22	152,98
	15:30	241,67	256,47	163,78	125,13	144,45	131,35
	15:45	226,47	222,28	141,64	108,17	124,91	113,57
	16:00	195,82	188,09	119,51	91,22	105,36	95,78
	16:15	216,26	153,90	97,37	74,27	85,82	77,99

Tabela C-1 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos de todos os experimentos

(continuação)							
Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj} A$	$E_{DISP, aj} B$	$E_{DISP, aj} C$	$E_{DISP, aj} D$
15/2/2008 (Tubo5)	11:00	27,01	625,34	402,59	308,02	355,30	323,26
	11:15	175,21	648,18	417,38	319,35	368,36	335,14
	11:30	27,01	671,02	432,17	330,67	381,42	347,03
	11:45	27,01	693,86	446,96	342,00	394,48	358,91
	12:00	13,51	716,71	461,74	353,32	407,53	370,79
	12:15	13,51	693,86	446,96	342,00	394,48	358,91
	12:30	134,85	671,02	432,17	330,67	381,42	347,03
	12:45	255,82	648,18	417,38	319,35	368,36	335,14
	13:00	309,46	625,34	402,59	308,02	355,30	323,26
	13:15	322,74	602,49	387,80	296,69	342,25	311,37
	13:30	309,35	579,65	373,01	285,37	329,19	299,49
	13:45	269,24	541,15	348,08	266,27	307,18	279,46
	14:00	269,24	502,64	323,15	247,18	285,17	259,42
	14:15	242,40	464,14	298,22	228,09	263,16	239,39
	14:30	255,82	425,63	273,29	209,00	241,15	219,36
	14:45	255,73	383,70	246,14	188,21	217,18	197,54
	15:00	269,14	341,76	219,00	167,41	193,20	175,73
	15:15	282,55	299,83	191,85	146,62	169,23	153,91
	15:30	121,34	257,89	164,70	125,83	145,26	132,09
21/2/2008 (Tubo3)	10:30	389,77	614,12	399,17	306,68	352,93	321,59
	10:45	389,91	638,12	414,62	318,53	366,57	334,01
	11:00	349,64	662,12	429,90	330,21	380,05	346,27
	11:15	403,14	686,11	445,70	342,42	394,06	359,06
	11:30	403,14	710,11	461,57	354,69	408,13	371,91
	11:45	416,65	734,11	476,98	366,51	421,75	384,31
	12:00	282,55	758,11	493,09	379,01	436,05	397,39
	12:15	376,40	734,11	477,37	366,89	422,13	384,69
	12:30	349,64	710,11	461,40	354,52	407,96	371,74
	12:45	390,05	686,11	446,11	342,82	394,47	359,47
	13:00	309,46	662,12	430,61	330,93	380,77	346,99
	13:15	363,15	638,12	414,86	318,77	366,81	334,25
	13:30	363,28	614,12	398,96	306,47	352,71	321,37

Tabela C-1 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos de todos os experimentos

(conclusão)							
Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj} A$	$E_{DISP, aj} B$	$E_{DISP, aj} C$	$E_{DISP, aj} D$
4/3/2008 (Tubo3)	10:00	409,05	377,49	244,75	187,73	216,24	196,92
	10:15	455,28	408,40	264,94	203,28	234,11	213,21
	10:30	501,27	439,32	285,06	218,77	251,92	229,45
	10:45	528,61	458,00	297,16	228,06	262,61	239,19
	11:00	528,61	476,67	309,53	237,63	273,58	249,22
	11:15	399,97	495,35	321,73	247,03	284,38	259,07
	11:30	409,19	514,03	333,95	256,45	295,20	268,94
	11:45	427,64	532,70	346,11	265,82	305,97	278,76
	12:00	418,27	551,38	358,13	275,03	316,58	288,42
	12:15	390,60	532,70	345,97	265,67	305,82	278,61
	12:30	381,23	514,03	333,84	256,35	295,10	268,84
	12:45	260,68	495,35	322,18	247,48	284,83	259,52
	13:00	18,70	476,67	310,32	238,42	274,37	250,01
5/3/2008 (Tubo3)	10:45	252,55	462,19	299,65	229,92	264,78	241,16
	11:00	323,42	480,87	311,59	239,06	275,33	250,75
	11:15	302,75	499,55	323,90	248,57	286,23	260,71
	11:30	318,74	518,22	336,36	258,24	297,30	270,83
	11:45	298,53	536,90	348,45	267,52	307,98	280,56
	12:00	288,35	555,58	360,69	276,97	318,83	290,46
	12:15	257,56	536,90	348,68	267,76	308,22	280,80
	12:30	283,04	518,22	336,43	258,31	297,37	270,90
	12:45	298,53	499,55	324,35	249,03	286,69	261,17
	13:00	277,95	480,87	312,18	239,65	275,91	251,34
	13:15	272,96	462,19	300,10	230,37	265,24	241,61

Tabela C-2 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 100W

(continua)

Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj E}$	$E_{DISP, aj F}$	$E_{DISP, aj G}$	$E_{DISP, aj H}$	$E_{DISP, aj I}$	$E_{DISP, aj J}$
19/3/2007 (Tubo3)	10:15	323,87	478,84	288,38	269,93	252,76	321,04	262,69	291,87
	10:30	334,32	515,43	310,50	290,65	272,17	345,64	282,86	314,25
	10:45	318,65	537,65	323,94	303,24	283,96	360,59	295,11	327,85
	11:00	188,06	559,88	337,37	315,83	295,76	375,53	307,37	341,45
	11:15	276,86	582,10	350,81	328,41	307,55	390,48	319,62	355,05
	11:30	188,06	604,32	364,25	341,00	319,35	405,42	331,87	368,65
	11:45	282,08	626,55	377,69	353,59	331,14	420,36	344,12	382,24
	12:00	297,75	648,77	391,12	366,17	342,93	435,31	356,37	395,84
	12:15	271,64	626,55	377,69	353,59	331,14	420,36	344,12	382,24
	12:45	266,41	582,10	350,81	328,41	307,55	390,48	319,62	355,05
	13:00	214,17	559,88	337,37	315,83	295,76	375,53	307,37	341,45
	13:15	255,96	537,65	323,94	303,24	283,96	360,59	295,11	327,85
	13:30	266,41	515,43	310,50	290,65	272,17	345,64	282,86	314,25
	13:45	229,85	478,84	288,38	269,93	252,76	321,04	262,69	291,87
14/2/2008 (Tubo5)	11:00	237,05	621,05	370,52	346,54	324,19	413,01	337,12	375,06
	11:15	308,08	643,89	384,23	359,36	336,20	428,28	349,60	388,94
	11:30	292,86	666,73	397,94	372,19	348,20	443,56	362,07	402,82
	11:45	297,81	689,57	411,65	385,01	360,20	458,83	374,55	416,69
	12:00	206,28	712,41	425,36	397,84	372,20	474,11	387,03	430,57
	12:15	272,42	689,57	411,65	385,01	360,20	458,83	374,55	416,69
	12:30	262,24	666,73	397,94	372,19	348,20	443,56	362,07	402,82
	12:45	287,66	643,89	384,23	359,36	336,20	428,28	349,60	388,94
	13:00	292,61	621,05	370,52	346,54	324,19	413,01	337,12	375,06
	13:15	211,24	598,20	356,82	333,71	312,19	397,73	324,64	361,19
	13:30	216,35	575,36	343,11	320,89	300,19	382,46	312,16	347,31
	13:45	241,77	537,22	320,21	299,47	280,15	356,95	291,33	324,14
	14:00	267,22	499,08	297,32	278,06	260,11	331,44	270,49	300,97
	14:15	216,26	460,93	274,43	256,64	240,07	305,93	249,66	277,80
	14:30	262,14	422,79	251,54	235,23	220,03	280,43	228,82	254,62
	14:45	241,77	381,21	226,58	211,88	198,19	252,62	206,11	229,37
	15:00	277,39	339,63	201,63	188,54	176,35	224,82	183,40	204,11
	15:15	251,96	298,05	176,68	165,20	154,50	197,01	160,69	178,85
	15:30	241,67	256,47	151,72	141,85	132,66	169,21	137,98	153,59
	15:45	226,47	222,28	131,21	122,66	114,70	146,34	119,30	132,82
	16:00	195,82	188,09	110,69	103,46	96,74	123,48	100,63	112,05
	16:15	216,26	153,90	90,17	84,27	78,77	100,62	81,95	91,28

Tabela C-2 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 100W

(continuação)									
Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj E}$	$E_{DISP, aj F}$	$E_{DISP, aj G}$	$E_{DISP, aj H}$	$E_{DISP, aj I}$	$E_{DISP, aj J}$
15/2/2008 (Tubo5)	11:15	175,21	648,18	386,81	361,77	338,45	431,15	351,94	391,55
	12:30	134,85	671,02	400,52	374,60	350,45	446,43	364,42	405,42
	12:45	255,82	648,18	386,81	361,77	338,45	431,15	351,94	391,55
	13:00	309,46	625,34	373,10	348,95	326,45	415,88	339,46	377,67
	13:15	322,74	602,49	359,39	336,12	314,45	400,60	326,98	363,79
	13:30	309,35	579,65	345,68	323,30	302,45	385,33	314,51	349,92
	13:45	269,24	541,15	322,57	301,68	282,22	359,58	293,47	326,53
	14:00	269,24	502,64	299,46	280,06	261,99	333,83	272,44	303,13
	14:15	242,40	464,14	276,35	258,44	241,76	308,08	251,41	279,74
	14:30	255,82	425,63	253,25	236,82	221,53	282,33	230,38	256,35
	14:45	255,73	383,70	228,08	213,28	199,50	254,29	207,47	230,88
	15:00	269,14	341,76	202,91	189,74	177,47	226,24	184,56	205,40
	15:15	282,55	299,83	177,74	166,19	155,44	198,20	161,66	179,93
21/2/2008 (Tubo3)	10:30	389,77	614,12	370,33	346,71	324,71	412,17	337,43	374,80
	10:45	389,91	638,12	384,66	360,12	337,26	428,12	350,48	389,30
	11:00	349,64	662,12	398,81	373,35	349,64	443,90	363,35	403,63
	11:15	403,14	686,11	413,49	387,11	362,54	460,21	376,76	418,48
	11:30	403,14	710,11	428,24	400,95	375,52	476,59	390,22	433,41
	11:45	416,65	734,11	442,54	414,32	388,04	492,51	403,24	447,87
	12:00	282,55	758,11	457,52	428,38	401,24	509,12	416,94	463,03
	12:15	376,40	734,11	442,92	414,70	388,42	492,89	403,62	448,25
	12:30	349,64	710,11	428,08	400,78	375,35	476,42	390,06	433,24
	12:45	390,05	686,11	413,90	387,52	362,95	460,62	377,16	418,89
	13:00	309,46	662,12	399,53	374,07	350,36	444,62	364,07	404,35
	13:15	363,15	638,12	384,89	360,35	337,49	428,36	350,72	389,54
	13:30	363,28	614,12	370,12	346,50	324,49	411,95	337,22	374,59

Tabela C-2 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 100W

(conclusão)									
Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj E}$	$E_{DISP, aj F}$	$E_{DISP, aj G}$	$E_{DISP, aj H}$	$E_{DISP, aj I}$	$E_{DISP, aj J}$
4/3/2008 (Tubo3)	10:00	409,05	377,49	226,97	212,41	198,84	252,76	206,69	229,73
	10:15	455,28	408,40	245,71	229,96	215,29	273,60	223,78	248,69
	10:30	501,27	439,32	264,39	247,46	231,69	294,38	240,81	267,60
	10:45	528,61	458,00	275,61	257,97	241,53	306,87	251,03	278,95
	11:00	528,61	476,67	287,11	268,75	251,64	319,63	261,54	290,58
	11:15	399,97	495,35	298,44	279,36	261,59	332,22	271,87	302,04
	11:30	409,19	514,03	309,79	289,99	271,56	344,84	282,22	313,53
	11:45	427,64	532,70	321,08	300,57	281,47	357,40	292,51	324,96
	12:00	418,27	551,38	332,21	310,99	291,22	369,80	302,66	336,23
	12:15	390,60	532,70	320,93	300,42	281,32	357,25	292,37	324,81
	12:30	381,23	514,03	309,68	289,89	271,45	344,73	282,11	313,42
	12:45	260,68	495,35	298,89	279,81	262,04	332,68	272,32	302,50
5/3/2008 (Tubo3)	10:45	252,55	462,19	277,91	260,10	243,51	309,44	253,10	281,27
	11:00	323,42	480,87	288,97	270,45	253,20	321,78	263,18	292,48
	11:15	302,75	499,55	300,41	281,17	263,25	334,48	273,62	304,05
	11:30	318,74	518,22	312,00	292,05	273,46	347,34	284,21	315,78
	11:45	298,53	536,90	323,21	302,55	283,29	359,82	294,43	327,12
	12:00	288,35	555,58	334,58	313,20	293,28	372,46	304,80	338,63
	12:15	257,56	536,90	323,45	302,78	283,53	360,05	294,66	327,36
	12:30	283,04	518,22	312,07	292,12	273,53	347,41	284,28	315,85
	12:45	298,53	499,55	300,87	281,63	263,71	334,94	274,07	304,50
	13:00	277,95	480,87	289,56	271,04	253,78	322,37	263,76	293,06
	13:15	272,96	462,19	278,36	260,55	243,96	309,90	253,56	281,73

Tabela C-3 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 200W

(continua)

Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj} K$	$E_{DISP, aj} L$	$E_{DISP, aj} M$
19/3/2007 (Tubo3)	10:15	323,87	478,84	298,46	277,01	259,33
	10:30	334,32	515,43	321,35	298,27	279,24
	10:45	318,65	537,65	335,25	311,19	291,34
	11:15	276,86	582,10	363,06	337,01	315,53
	11:45	282,08	626,55	390,86	362,84	339,73
	12:00	297,75	648,77	404,76	375,75	351,83
	12:15	271,64	626,55	390,86	362,84	339,73
	12:45	266,41	582,10	363,06	337,01	315,53
	13:00	214,17	559,88	349,15	324,10	303,44
	13:15	255,96	537,65	335,25	311,19	291,34
	13:30	266,41	515,43	321,35	298,27	279,24
	13:45	229,85	478,84	298,46	277,01	259,33
14/2/2008 (Tubo5)	11:00	237,05	621,05	383,64	355,75	332,74
	11:15	308,08	643,89	397,83	368,91	345,06
	11:30	292,86	666,73	412,02	382,08	357,38
	11:45	297,81	689,57	426,22	395,24	369,69
	12:00	206,28	712,41	440,41	408,40	382,01
	12:15	272,42	689,57	426,22	395,24	369,69
	12:30	262,24	666,73	412,02	382,08	357,38
	12:45	287,66	643,89	397,83	368,91	345,06
	13:00	292,61	621,05	383,64	355,75	332,74
	13:15	211,24	598,20	369,45	342,58	320,43
	13:30	216,35	575,36	355,25	329,42	308,11
	13:45	241,77	537,22	331,55	307,44	287,55
	14:00	267,22	499,08	307,85	285,45	266,98
	14:15	216,26	460,93	284,16	263,47	246,41
	14:30	262,14	422,79	260,46	241,49	225,85
	14:45	241,77	381,21	234,62	217,53	203,43
	15:00	277,39	339,63	208,79	193,57	181,01
	15:15	251,96	298,05	182,95	169,60	158,59
	15:30	241,67	256,47	157,12	145,64	136,18
	15:45	226,47	222,28	135,88	125,94	117,74
	16:15	216,26	153,90	93,39	86,53	80,88

Tabela C-3 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 200W

(continuação)						
Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj} K$	$E_{DISP, aj} L$	$E_{DISP, aj} M$
15/2/2008 (Tubo5)	12:45	255,82	648,18	400,50	371,38	347,37
	13:00	309,46	625,34	386,31	358,22	335,06
	13:15	322,74	602,49	372,11	345,06	322,74
	13:30	309,35	579,65	357,92	331,89	310,42
	13:45	269,24	541,15	334,00	309,70	289,66
	14:00	269,24	502,64	310,07	287,51	268,90
	14:15	242,40	464,14	286,15	265,32	248,14
	14:30	255,82	425,63	262,22	243,13	227,38
	14:45	255,73	383,70	236,17	218,96	204,77
	15:00	269,14	341,76	210,11	194,79	182,16
21/2/2008 (Tubo3)	15:15	282,55	299,83	184,06	170,63	159,55
	10:30	389,77	614,12	383,25	355,78	333,13
	10:45	389,91	638,12	398,07	369,54	346,00
	11:00	349,64	662,12	412,73	383,13	358,71
	11:15	403,14	686,11	427,91	397,24	371,95
	11:30	403,14	710,11	443,17	411,42	385,25
	11:45	416,65	734,11	457,96	425,15	398,09
	12:00	282,55	758,11	473,45	439,57	411,63
	12:15	376,40	734,11	458,34	425,53	398,47
	12:30	349,64	710,11	443,00	411,26	385,08
	12:45	390,05	686,11	428,32	397,65	372,35
	13:00	309,46	662,12	413,45	383,84	359,43
	13:15	363,15	638,12	398,31	369,77	346,24
	13:30	363,28	614,12	383,03	355,56	332,91

Tabela C-3 – Calor aproveitado (W_{ABS}), teórico (E_{DISP}) e teórico ajustado ($E_{DISP, aj}$) [W] para quatro opções de fatores de ajuste em todos os períodos onde o calor aproveitado não passou de 200W

Data e Arranjo	Hora	W_{ABS}	E_{DISP}	$E_{DISP, aj}$ K	(conclusão)	
					$E_{DISP, aj}$ L	$E_{DISP, aj}$ M
4/3/2008 (Tubo3)	10:00	409,05	377,49	234,93	218,00	204,03
	10:15	455,28	408,40	254,32	236,01	220,91
	10:30	501,27	439,32	273,65	253,96	237,72
	10:45	528,61	458,00	285,26	264,74	247,82
	11:00	528,61	476,67	297,15	275,80	258,19
	11:15	399,97	495,35	308,87	286,68	268,39
	11:30	409,19	514,03	320,61	297,59	278,61
	11:45	427,64	532,70	332,29	308,44	288,77
	12:00	418,27	551,38	343,82	319,14	298,79
	12:15	390,60	532,70	332,14	308,30	288,63
	12:30	381,23	514,03	320,50	297,49	278,50
	12:45	260,68	495,35	309,32	287,13	268,84
5/3/2008 (Tubo3)	10:45	252,55	462,19	287,64	266,93	249,86
	11:00	323,42	480,87	299,10	277,56	259,80
	11:15	302,75	499,55	310,93	288,56	270,11
	11:30	318,74	518,22	322,91	299,71	280,57
	11:45	298,53	536,90	334,51	310,48	290,66
	12:00	288,35	555,58	346,28	321,41	300,90
	12:15	257,56	536,90	334,75	310,71	290,89
	12:30	283,04	518,22	322,98	299,78	280,65
	12:45	298,53	499,55	311,38	289,01	270,56
	13:00	277,95	480,87	299,69	278,15	260,39
	13:15	272,96	462,19	288,09	267,39	250,31

APÊNDICE D – Caracterização dos dias semelhantes

Conforme foi mencionado na seção 3.2, a decisão sobre se o dia seria bom ou não para a realização de experimentos foi feita qualitativamente, avaliando-se principalmente a ausência ou não de nuvens no céu no início dos experimentos. Contudo, ao se agrupar todos os dados de umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação incidente, nota-se que tais dias são semelhantes entre si em relação a estas variáveis nos dias em que os experimentos ocorreram, conforme pode ser visto na Figura D-1.

Nesta figura estão os gráficos das respectivas variáveis e a curva polinomial, a qual é um ajuste feito automaticamente por meio de planilha eletrônica a partir dos dados do gráfico. As equações resultantes deste ajuste e os valores de R-quadrado[†] (R²) são mostrados na Tabela D-1 a seguir.

Tabela D-1 – Equações das curvas polinomiais e seus respectivos valores de R² para cada variável medida

Variável	Equação da curva polinomial	R ²
Temperatura ambiente (°C)	$y = 16,23 \cdot 10^{-6} x^6 - 0,0012 x^5 + 0,0372 x^4 - 0,606 x^3 + 5,24 x^2 - 20,57 x + 49,52$	0,6973
Umidade relativa (%)	$y = -179,52 \cdot 10^{-6} x^6 + 0,0136 x^5 - 0,4171 x^4 + 6,617 x^3 - 55,99 x^2 + 228,78 x - 257,43$	0,6198
Velocidade do vento (m/s)	$y = -13,41 \cdot 10^{-6} x^6 + 0,0011 x^5 - 0,0349 x^4 + 0,579 x^3 - 5,177 x^2 + 24,03 x - 44,11$	0,4538
Radiação global incidente (kJ/m ²)	$y = -2,63 \cdot 10^{-3} x^6 + 0,1812 x^5 - 3,3895 x^4 - 7,644 x^3 + 731,971 x^2 - 5715,33 x + 12793,54$	0,8826

Embora não seja fácil caracterizar os dias semelhantes em relação à velocidade do vento, esta caracterização é possível em termos da temperatura ambiente, umidade relativa e radiação global incidente, as quais - em média, em horários próximos ao meio-dia - são, respectivamente, iguais a 31°C, 55% e 3500 kJ/m².

[†] Definido como o quadrado do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson através dos pontos de dados. O valor R² pode ser interpretado como a proporção da variância em y (variável) que pode ser atribuída à variância em x (razão entre hora da medida e número de horas do dia).

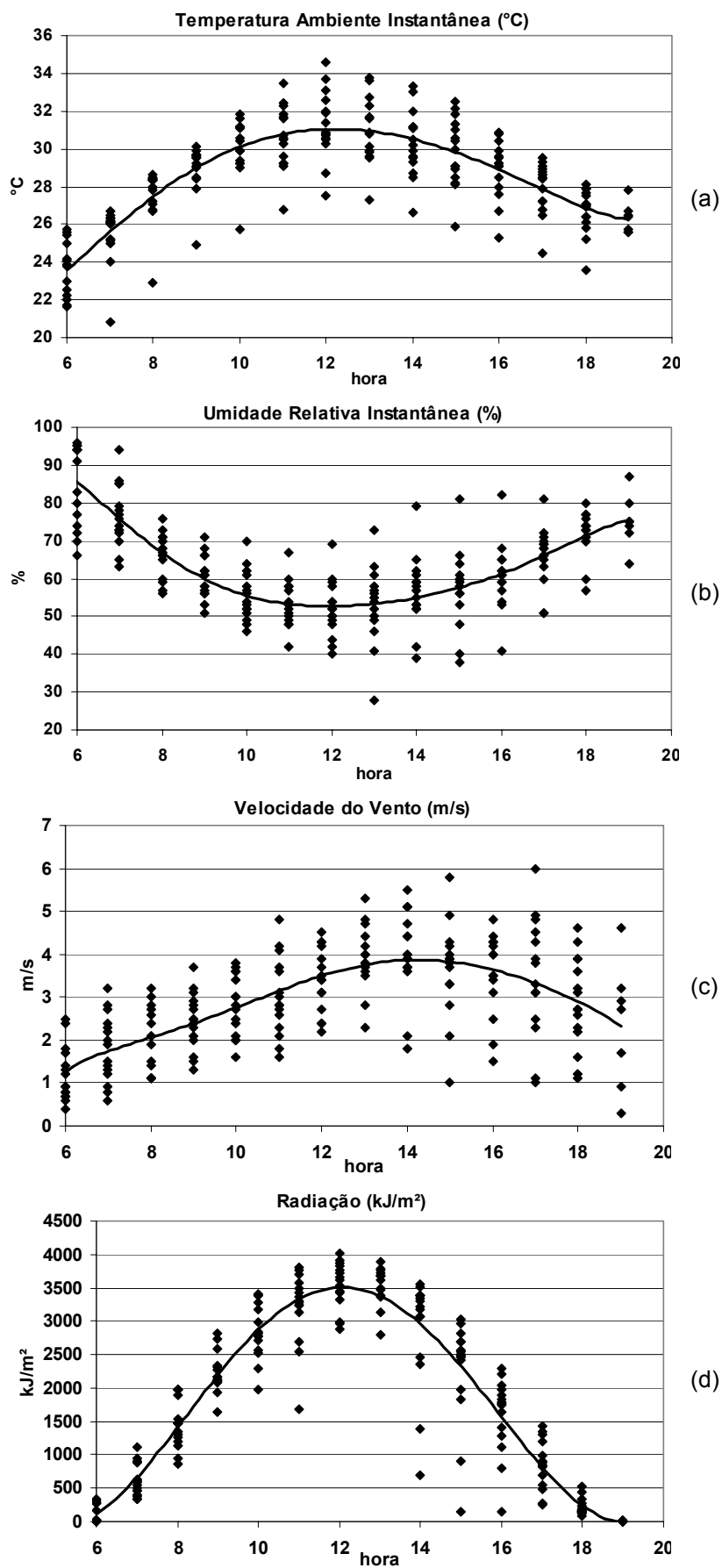


Figura D-1 – Gráficos com as variáveis em função da hora do dia e a curva de ajuste dos pontos