

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APLICABILIDADE DE COLETORES SOLARES COM TUBO EVACUADO NO BRASIL

por

Fabio Niemezewski da Rosa

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio 2012

# APLICABILIDADE DE COLETORES SOLARES COM TUBO EVACUADO NO BRASIL

por

Fabio Niemezewski da Rosa

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan: UNISINOS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer: PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider: PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de Maio de 2012

*Dedico este trabalho a minha família, minha esposa Semíramis, minhas filhas Camile e Amanda, que deram todo o apoio necessário, mesmo precisando ficar distante para que este trabalho pudesse ser concluído.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao CNPQ, ao PROMEC e ao Laboratório de Energia Solar pela oportunidade de estudo e pesquisa.

Aos meus pais Gil e Isa, por todo o incentivo e apoio durante a longa jornada da graduação e depois neste mestrado.

Ao meu orientador Arno Krenzinger.

As empresas Porto Solar e EcoConfort pela doação dos coletores para os ensaios.

A minha esposa Semíramis e minhas filhas Camile e Amanda por todo o apoio e incentivo durante esta jornada.

## RESUMO

Os sistemas de aquecimento através da energia solar são uma fonte interessante de energia acessível e distribuída. No Brasil, a utilização de coletores solares planos já é bem conhecida e difundida. Os coletores solares de tubo evacuado até pouco tempo tinham um custo considerado elevado para o nosso mercado, mas atualmente esta tecnologia está cada vez mais difundida no mercado nacional com custos menores. Para se entender se o custo adicional deste coletor quando comparado aos tradicionais coletores planos é vantajoso, são necessários estudos comparativos para determinar as reais vantagens e quando as mesmas podem proporcionar uma maior economia financeira à instalação. Esta dissertação compara as tecnologias atuais de coletores planos com os de tubo evacuado disponíveis no mercado nacional, mostrando comparações em diferentes regiões do país e analisando se as vantagens encontradas são interessantes do ponto de vista do custo da instalação. Para realizar estas análises foram desenvolvidos testes para caracterização dos tubos destes coletores, de forma a determinar os parâmetros de desempenho dos mesmos. Também foi preparada uma bancada de testes para os coletores solares e foram realizados ensaios de comportamento térmico. Conhecendo os resultados foi possível adequar e utilizar um software de simulação desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este *software* visa a simulação de sistemas de aquecimento de água com diferentes configurações em qualquer região do país. Com a implementação dos coletores de tubo evacuado, e com simulações do seu desempenho em diferentes regiões, é possível comparar o seu comportamento em relação ao coletor plano. Nesta dissertação as curvas de desempenho foram comparadas em diferentes situações, onde foi possível verificar em que momentos o coletor de tubos pode ser melhor que o plano. Também foram realizadas comparações entre a área ocupada e o custo destes coletores para instalações em 3 diferentes regiões do país. Com estas comparações ficou evidente que para climas mais frios o coletor de tubos evacuados pode apresentar melhor desempenho que os coletores planos, mas o seu custo ainda é muito maior que os coletores planos nacionais.

Palavras chave: coletor solar, tubo, vácuo, simulação.

## **ABSTRACT**

The solar water heating systems are a interesting source of accessible and distributed energy. In Brazil, the flat plate solar collector use is well known. The vaccum tube solar collectors until little time ago had an elevated cost for our market, but, today, the technology is available in our national market with lower costs. And to understand if this costs, that are higher than the flat plane collectors are worth it, some studies are necessary to understand the real benefits of this technology. This work aims to compare both technologies available in the national market, showing comparisons in different regions of the country and studying if the advantages are interesting in the economical point of view. To achieve that some tests were developed in order to obtain the performance parameters of this collectors. Also an external bench was developed to test this collectors according to the Brazilian standard. With the results and knowing the behavior of this collectors it was possible to program the simulation software that was developed in the Laboratório de Energia Solar of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul. This software aims at the simulation of water heating systems in different regions of the country. With the implementation of the vacuum collectors in the software, it was possible to simulate different climate conditions over the country and compare the behavior with the flat plate collectors. In this work the performance curves were compared in different climate situations, so that was possible to understand when the vaccum collector can be better. Also some comparisons where made between the occupied area and the costs in three different regions of the country. With the results of this comparisons it is evident that for cold climates the vaccum collector can obtain a better performance than the flat plate collectors, but its cost is still higher.

Keywords: vacuum collectors, solar, simulation

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1	Motivação.....	03
1.2	Objetivos.....	04
1.3	Metodologia.....	04
<b>2</b>	<b>ENERGIA SOLAR.....</b>	<b>05</b>
2.1	Radiação Solar.....	05
2.2	Declinação Solar.....	06
2.3	Hora Solar.....	06
2.4	Ângulo Horário.....	07
2.5	Ângulo de Incidência.....	07
<b>3</b>	<b>SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA.....</b>	<b>08</b>
3.1	Coletores Solares.....	08
3.2	Coletores Planos.....	09
3.3	Coletores Tubulares.....	10
3.4	Área do Coletor.....	11
3.5	Principais Diferenças entre coletores planos e tubulares.....	12
3.6	Reservatório Térmico.....	15
3.7	Apoio Auxiliar.....	16
3.8	Circulação Forçada e Termosifão.....	16
3.9	Calor Útil.....	17
3.10	Eficiência do Coletor.....	19
3.11	Coletores Solares no Brasil.....	19
3.12	Análise das curvas de eficiência.....	21
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS COLETORES TUBULARES.....</b>	<b>24</b>
4.1	Ensaio de Perdas Térmicas.....	24
4.2	Ensaio de ganhos térmicos.....	27
4.3	Bancada para caracterização de coletores.....	28

4.4	Ensaio.....	31
<b>5</b>	<b>O PROGRAMA TERMOSIM.....</b>	<b>33</b>
5.1	Radiação Solar Simulada.....	34
5.2	Rotina de cálculo.....	35
5.3	Mudanças e implementações necessárias.....	36
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
6.1	Cenários comparativos.....	40
6.2	Dimensionamento do Cenário.....	41
6.3	Simulações.....	42
6.4	Discussão dos resultados.....	45
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....</b>	<b>51</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Consumo típico de residências brasileiras	01
Figura 1.2	Coletor de tubo evacuado	02
Figura 3.1	Curvas típicas de coletores	09
Figura 3.2	Corte de um coletor plano	10
Figura 3.3	Esquema de um tubo do coletor	10
Figura 3.4	Esquema de funcionamento do coletor evacuado operando na configuração de transferência direta	11
Figura 3.5	Coletor de tubos	13
Figura 3.6	Gráficos de eficiências comparando coletores	14
Figura 3.7	Projeção da área absorvedora em duas condições de incidência	14
Figura 3.8	Reservatório térmico	16
Figura 3.9	Esquema de funcionamento do sistema	17
Figura 3.10	Curva de eficiência de coletores com $T_a=5^{\circ}\text{C}$ e $G=500\text{W}/\text{m}^2$	21
Figura 3.11	Curva de eficiência de coletores com $T_a=15^{\circ}\text{C}$ e $G=500\text{W}/\text{m}^2$	22
Figura 3.12	Curva de eficiência de coletores com $T_a=25^{\circ}\text{C}$ e $G=800\text{W}/\text{m}^2$	22
Figura 3.13	Curva de eficiência de coletores com $T_a=30^{\circ}\text{C}$ e $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	23
Figura 4.1	Parte interna dos tubos	24
Figura 4.2	Esquema da bancada experimental para medidas do coeficiente global de transferência de calor do tubo à vacuo	25
Figura 4.3	Montagem do calorímetro	26
Figura 4.4	Bancada de testes de ganho térmico	28
Figura 4.5	Modelo de estudo da plataforma giratória	29
Figura 4.6	Sistema de segurança do trilho e rodas	30
Figura 4.7	Foto da bancada giratória pronta	30
Figura 4.8	Coletor solar de tubos evacuados montado na bancada	31
Figura 4.9	Montagem da bancada com dois coletores solares	31
Figura 4.10	Comparação em dia nublado com pancadas de chuva	32
Figura 5.1	Tela de escolha do tipo de sistema	33
Figura 5.2	Tela do SeqMET BR	34

Figura 5.3	Comportamento conforme a variação da inclinação do coletor	35
Figura 5.4	Tela de cadastramento de coletores de tubos	36
Figura 5.5	Curva experimental e curva de ajuste	37
Figura 5.6	Curvas de irradiância simulada para Porto Alegre	38
Figura 6.1	Comparação para Porto Alegre/RS	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Diferença da área entre dois coletores	12
Tabela 3.2	Fator modificador da radiação para coletores solares	15
Tabela 3.3	Valores médios de mercado	20
Tabela 3.4	Médias dos valores característicos classificados pelo Inmetro	21
Tabela 4.1	Resultados dos ensaios para o Tubo 1	27
Tabela 4.2	Resultados dos ensaios para o Tubo 2	27
Tabela 6.1	Resultados da simulação para 70% da energia consumida	42
Tabela 6.2	Calor necessário para manter o tanque aquecido	43
Tabela 6.3	Resultados da simulação para 70% da energia total	43
Tabela 6.4	Custos dos coletores da simulação	44

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LABSOL	Laboratório de Energia Solar da UFRGS
NBR	Norma Brasileira
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
TUV	Technischer Überwachungs-Verein
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$	Área do coletor, m <sup>2</sup>
$A_{abs}$	Área do absorvedor, m <sup>2</sup>
$A_E$	Área externa do tubo, m <sup>2</sup>
$A_{ab}$	Área de abertura, m <sup>2</sup>
$A_t$	Área total, m <sup>2</sup>
CAP	Capacidade térmica do coletor, J/K
$C_p$	Calor específico, J/kg.K
E	Equação do tempo, min
$F_R$	Fator de remoção de calor,
G	Irradiância horizontal, W/m <sup>2</sup>
$G_t$	Irradiância no plano do coletor, W/m <sup>2</sup>
HS	Hora solar
HL	Hora local
I	Irradiação horaria total, W/m <sup>2</sup>
$I_b$	Irradiação horaria direta, W/m <sup>2</sup>
$I_d$	Irradiação horaria difusa, W/m <sup>2</sup>
$I_{on}$	Irradiação no plano horizontal, W/m <sup>2</sup>
$I_{SC}$	Constante solar, W/m <sup>2</sup>
$K_{\tau\alpha}$	Fator de modificação do ângulo de incidência
$L_{ST}$	Meridiano padrão para horário padrão, °
$L_{loc}$	Longitude local, °
$\dot{m}$	Taxa mássica do fluido de trabalho, kg/s
$Q_{liq}$	Taxa de calor transferido do tubo para o banho termostático, W
$Q_u$	Calor útil, W
$T_a$	Temperatura ambiente, °C
$T_e$	Temperatura de entrada do fluido de trabalho no coletor, °C
$T_i$	Temperatura da água no interior do tubo, °C
$T_m$	Temperatura média do absorvedor, °C
$T_o$	Temperatura da água externa ao tubo, °C

$T_s$	Temperatura de saída do fluido de trabalho do coletor, °C
$U_L$	Coefficiente global de perdas térmicas, W/m <sup>2</sup> .K
$U$	Coefficiente de transferência de calor do tubo, W/m <sup>2</sup> .K
$\eta$	Eficiência do coletor
$\delta$	Declinação solar, °
$\beta$	Inclinação da superfície, °
$\phi$	Latitude local, °
$\Theta$	Ângulo de incidência, °
$\Upsilon$	Azimute da superfície, °
$\omega$	Ângulo horário, °
$\tau$	Trasmisividade do vidro
$\alpha$	Absortância do absorvedor

# 1 INTRODUÇÃO

Uma das energias disponíveis em maior abundância no mundo é a energia solar. Além de estar disponível em quantidade muito superior a demanda energética mundial, a mesma é renovável e não poluidora. Conforme Abreu, 2003, a energia solar disponível no Brasil é 55 mil vezes maior que a demanda de energia elétrica nacional.

Conforme Pozzebon, 2009, diante do aquecimento global, a energia solar ganha maior atenção sendo umas das energias renováveis a ser empregada em grande escala para substituir alguns tipos de energias poluentes.

De acordo com Rosa, 2010, o Brasil ainda utiliza em larga escala o chuveiro elétrico para aquecimento de água, sendo este consumo em torno de 6% do consumo brasileiro de energia elétrica, e, para agravar a situação, este consumo é em sua maioria no horário de pico, das 18 às 21 horas.

Conforme citado em Naspolini, 2011, pesquisa da Eletrobrás/Procel afirma que o chuveiro elétrico é responsável por uma grande parcela do consumo residencial elétrico no horário de ponta, sendo a sua maior utilização na faixa das 5 as 9 e das 17 as 21. A Figura 1.1 mostra a distribuição típica do consumo de energia elétrica residencial brasileiro.

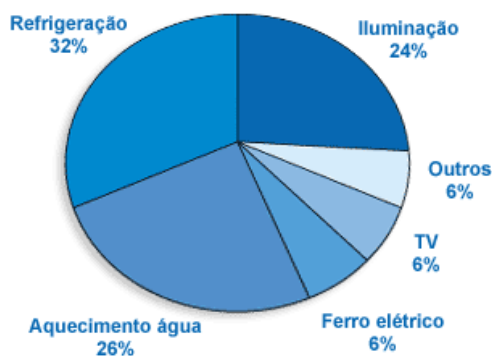


Figura 1.1 - Consumo típico de energia elétrica de residências brasileiras.

Fonte: [www.celpe.com.br](http://www.celpe.com.br).

Uma das maneiras de reduzir este pico de consumo energético é utilizar outras formas para aquecimento de água, como aquecedores a gás, solares, acumuladores onde o aquecimento é feito ao longo do dia.

Tendo em vista a busca constante por energias alternativas e renováveis, os coletores solares são uma maneira interessante e viável de diminuir este pico de consumo de energia,

pois podem proporcionar a água quente necessária ou parte dela, diminuindo o consumo no horário de pico, e inclusive proporcionando economia financeira. Inúmeras tecnologias de aquecimento de água já foram desenvolvidas e estudadas, e algumas estão presentes comercialmente no mundo todo.

Considerando o mercado brasileiro, os coletores planos já são bem conhecidos e fabricados no Brasil, com custo relativamente baixo. Mas, existem outras tecnologias como por exemplo os coletores tubulares que ainda não são fabricadas aqui, e com isto o seu preço normalmente era mais alto e muitas vezes não se tornavam competitivos no mercado nacional.

Nos últimos anos, com a diminuição do preço de destas tecnologias de aquecimento de água e a entrada em larga escala no mercado brasileiro, é importante estudar e verificar a real diferença entre os sistemas disponíveis, comparando os custos de instalação e as reais vantagens entre estes sistemas.

Os coletores de tubo evacuado (Figura 1.2) estão entrando cada vez mais no mercado nacional, e o seu valor esta cada vez menor, se aproximando mais dos coletores planos de fabricação nacional. Os importadores alegam que esta tecnologia é muito superior aos coletores planos.



Figura 1.2 - Coletor de tubo evacuado.

Uma das características destes coletores se deve ao isolamento, que sendo melhor que nos coletores planos, pode proporcionar menor perda térmica, principalmente em locais de clima com temperaturas ambientes baixas.

Em locais de clima tropical, como em algumas regiões do Brasil, onde a temperatura ambiente muitas vezes está acima dos 30 graus, talvez o coletor a vácuo não ofereça vantagem significativa para aplicação doméstica.



Devido ao custo mais elevado dos coletores tubulares, uma das possibilidades é utilizar mais coletores planos, pois os mesmos são mais baratos. De acordo com Budihardjo *et al.*, 2009, uma comparação entre um coletor evacuado de 30 tubos e dois coletores planos mostrou que o coletor evacuado operando em Sydney/Austrália teve um rendimento levemente inferior aos coletores planos. Pode-se concluir com o teste realizado na Austrália que dois coletores planos podem ter rendimento similar a um de tubos evacuados e sendo os coletores planos mais baratos, financeiramente poderia ser mais interessante a instalação de dois coletores planos.

Uma das maneiras de realizar estas comparações é simular computacionalmente as diferentes condições climáticas do Brasil, e as diferentes condições dos coletores, para diferentes consumos. Com isto, é possível comparar e estabelecer se a utilização destes coletores tendo em vista o momento econômico atual é viável e principalmente se existe vantagem real na utilização de coletores evacuados, uma vez que estes ainda são mais caros que os coletores planos.

## **1.1 Motivação**

Novos modelos e tecnologias de coletores tubulares estão sendo introduzidas no mercado nacional. É necessário entender estes sistemas e compará-los às tecnologias já conhecidas e presentes no país, de forma a evitar erros de utilização e instalação.

Os recursos de irradiância no Brasil estão entre os maiores do mundo, além de apresentar uma boa uniformidade e pequena variabilidade anual [Pereira, 2006 *apud* Napolini, 2011]. Com isto, pode-se afirmar que é possível ter uma ótima utilização da energia solar em todo território nacional.

Colocando à disposição uma ferramenta capaz de simular em diversas condições climáticas, épocas, e diversos tipos de sistemas de aquecimento, armazenamento e situações de consumo, pode-se melhorar as condições para o dimensionamento adequado e com isto ajudar a determinar que tipo de sistema é mais adequado para determinada situação.

Utilizando um sistema de simulação que permite diversos tipos de dimensionamento de sistemas de aquecimento de água, incluindo o dimensionamento dos coletores, é possível tentar esclarecer as perguntas mais comuns, como por exemplo, qual o coletor mais adequado para determinado local e quais os parâmetros que podem dar um melhor desempenho para a instalação.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo do trabalho é determinar se há vantagens técnicas e/ou econômicas na instalação de coletores com tubos evacuados em diferentes climas no Brasil, em comparação com os coletores planos convencionais.

Como objetivos secundários, salientam-se o aperfeiçoamento de um software de simulação, a determinação de parâmetros térmicos do coletor em estudo e o desenvolvimento de uma bancada e de sua instrumentação para caracterização de coletores solares térmicos.

## 1.3 Metodologia

A primeira etapa do trabalho foi de estudar e conhecer melhor os coletores de tubo evacuados, com análises e testes específicos para determinar as características térmicas dos mesmos.

O Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL) desenvolveu um programa de simulação de sistemas de aquecimento de água denominado Termosim. Este programa permite a simulação de diversos tipos de sistemas de aquecimento de água, com diferentes tipos de energia auxiliar e consumo.

Com estes parâmetros e com o conhecimento do comportamento destes coletores, o programa Termosim foi aperfeiçoado para operar com os coletores tubulares. Para isto diversos testes foram realizados e diversas rotinas e cálculos foram implementados e corrigidos.

No início deste trabalho, a parte de simulação dos coletores tubulares a vácuo encontrava-se desabilitada. Um dos objetivos, portanto, foi de habilitar e fazer a simulação para os coletores tubulares, bem como realizar ajustes e implementações em todo o programa Termosim de forma a possibilitar o seu uso com esta tecnologia.

A partir do *software*, diversas comparações simuladas foram realizadas, e com uma análise teórica sobre os resultados foi possível verificar analisando as curvas de desempenho se a eficiência de coletores planos é similar ou maior que a de coletores evacuados, ou em que situações qual tecnologia pode ser mais interessante.

## 2 ENERGIA SOLAR

Para o correto uso e bom aproveitamento da energia solar, é imperativo que alguns itens sejam estudados, bem como seu desempenho seja estabelecido a fim de se realizar um correto dimensionamento. Um sistema padrão de aquecimento de água para fins domésticos é composto de coletores solares, tubulações, tanque de água quente e em alguns casos sistemas de controle para entrada de água no tanque, circulação forçada e apoio auxiliar de energia.

Um correto dimensionamento destes itens é necessário para que se possa obter o melhor desempenho com o menor custo, fator importante em qualquer projeto para determinar o seu sucesso. Neste capítulo serão apresentados alguns dos conceitos básicos necessários ao estudo de um sistema de aquecimento solar doméstico de água.

### 2.1 Radiação Solar

O Sol é a principal fonte de energia do nosso planeta. Para um correto estudo e uma boa utilização dos recursos naturais, é necessário estudar como a radiação solar chega ao nosso planeta e como se distribui.

O deslocamento aparente do Sol em relação a um observador na Terra é um item importante, e um dos fatores que diferenciam os coletores estudados neste trabalho. Além da rotação diária terrestre, durante o ano, o caminho aparente do Sol muda constantemente. Para melhor captação da radiação solar, é necessário que os coletores sejam instalados em ângulos adequados conforme a latitude do local de instalação e a demanda por aquecimento.

O fluxo da radiação solar que chega na Terra em média anual sobre um plano normal e localizado fora da atmosfera terrestre é denominado de constante solar, e o seu valor ( $I_{SC}$ ) é  $1367 \text{ W/m}^2$  [Dufie e Beckman, 1991]. Como a distância entre o Sol e a Terra sofre uma variação ao longo do ano, tem-se uma variação de  $\pm 3\%$  na irradiância normal extraterrestre, obtido pela equação 2.1,

$$I_{on} = I_{SC} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \quad (2.1)$$

onde  $I_{on}$  é a irradiância que efetivamente chega a um plano normal à radiação,  $I_{SC}$  é a constante solar e  $n$  representa o dia do ano.

A radiação que é transmitida à Terra ao passar pela atmosfera terrestre pode sofrer

absorção, difusão e reflexão. Parte da radiação é refletida, sendo que parte desta reflexão volta ao espaço e parte se espalha na própria atmosfera. Parte da radiação é absorvida e aquece a atmosfera, e a maior parte chega na superfície terrestre como radiação direta. Parte da radiação refletida na atmosfera chega à superfície terrestre como radiação difusa. A superfície terrestre por sua vez também reflete parte desta radiação para a atmosfera.

A irradiância total que atinge a superfície terrestre é a soma das irradiâncias direta mais a difusa

$$G = G_b + G_d \quad (2.2)$$

onde  $G$  é a irradiância total horizontal,  $G_b$  é a irradiância direta e  $G_d$  é a irradiância difusa.

## 2.2 Declinação Solar

O plano do Equador é inclinado em relação ao plano da trajetória da Terra em  $23,45^\circ$ . Esta inclinação é a responsável pela ocorrência das estações climáticas que acontecem no nosso planeta, conforme a época do ano.

Se a Terra for considerada como fixa, pode-se analisar o movimento aparente do Sol. A declinação solar é a posição angular do sol no meio dia solar em relação ao plano do Equador, portanto

$$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$$

onde  $\delta$  é a declinação solar. A declinação solar é obtida pela equação

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.3)$$

onde  $n$  é o número do dia do ano.

## 2.3 Hora Solar

A hora solar é a hora baseada no movimento aparente do sol no céu, sendo o meio dia solar o momento que o sol cruza o meridiano do observador.

A hora solar é utilizada em todas as relações de ângulo do sol, e não coincide com a hora local. É necessário converter a hora local para a hora solar utilizando a equação

$$HS = HL + 4 (L_{ST} - L_{loc}) + E \quad (2.4)$$

onde  $HS$  é a hora solar,  $HL$  é a hora local,  $L_{ST}$  é o meridiano padrão para horário padrão local (em graus),  $L_{LOC}$  é a longitude do local em questão (em graus), e  $E$  é o resultado da equação do tempo (em minutos), mostrada pela equação

$$E = 229,2 (0,000075 + 00,001868 \cos B - 0,032077 \operatorname{sen} B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \operatorname{sen} 2B) \quad (2.5)$$

onde  $B$  é o resultado da equação

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.6)$$

onde  $n$  é o dia do ano, valor entre 1 e 365.

## 2.4 Ângulo Horário

Ângulo horário é o deslocamento do sol (leste ou oeste) do meridiano local devido a rotação da Terra no seu eixo em  $15^\circ$  por hora, sendo negativo pela manhã e positivo pela tarde.

## 2.5 Ângulo de incidência

O ângulo de incidência é o ângulo entre a direção dos raios solares e a normal da superfície. Uma inclinação incorreta no coletor pode levar a ângulos de incidência que diminuam o aproveitamento do mesmo.

O ângulo de incidência da radiação solar direta no coletor pode ser obtido através de um conjunto de outros ângulos, conforme mostra a equação

$$\begin{aligned} \cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega \\ + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de incidência,  $\delta$  é a declinação,  $\phi$  é a latitude do local,  $\beta$  é a inclinação da superfície,  $\gamma$  é o azimute da superfície e  $\omega$  é o ângulo horário.

### **3 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA**

Os sistemas de aquecimento de água são compostos de diversos componentes. Para simular adequadamente todo o conjunto, é necessário conhecer cada um dos componentes importantes do sistema.

É importante salientar que um sistema de aquecimento de água não deve, por questões econômicas, suprir toda a energia necessária para o consumo, devido a ocorrência de significativa variação entre os valores de irradiação em diferentes dias. Um sistema que venha a ser dimensionado para suprir toda a demanda de uma edificação pode ficar excessivamente caro.

#### **3.1 Coletores Solares**

O coletor solar é um dispositivo que converte a radiação solar em energia térmica aquecendo um fluido de trabalho, que pode ser água, ar ou outro fluido térmico.

Os coletores solares tem um caráter modular, ou seja, pode-se aumentar a instalação conforme a demanda aumenta. Eles também são independentes de rede elétrica, portanto pode-se instalar onde não existe rede elétrica disponível. E onde existe, pode proporcionar economia e conforto.

O tipo de coletor solar depende do tipo de aplicação e da temperatura de operação que a aplicação necessita. Para baixas temperaturas, como o uso para aquecimento de piscinas, os coletores podem ser do tipo plano sem cobertura. Para aquecimento para banho doméstico, os coletores já devem ser com cobertura. Para aplicações industriais, os coletores planos de alto desempenho ou os coletores de tubo evacuado, que podem atingir temperaturas acima de 80°C podem ser mais indicados.

Para esta dissertação foi considerado apenas o uso doméstico, considerando coletores planos com cobertura (fechados) e coletores com tubo evacuados. A Figura 3.1 mostra curvas típicas de eficiência que possibilitam distinguir qual o melhor coletor em função da diferença entre a temperatura da água quente desejada e a temperatura ambiente.

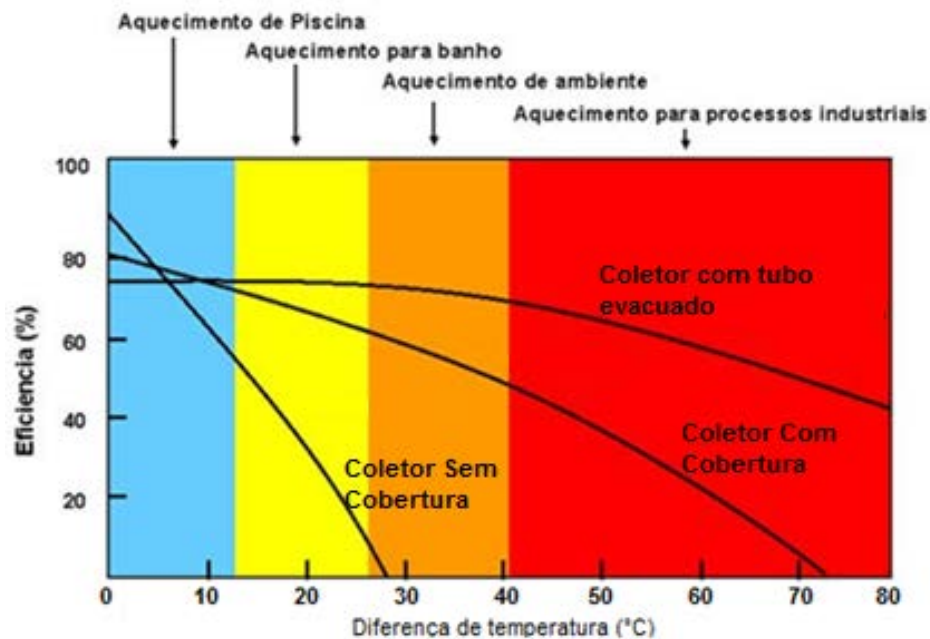


Figura 3.1 - Curvas típicas de eficiência de coletores em função da diferença entre a temperatura de operação e a temperatura ambiente. Adaptado de [www.solarserver.com](http://www.solarserver.com).

### 3.2 Coletores Planos

Um coletor solar plano com cobertura é composto basicamente dos seguintes componentes:

- Caixa externa: é o que mantém e suporta todo o conjunto e pode ser fabricada em alumínio, aço ou material polimérico.
- Isolamento térmico: é responsável por diminuir as perdas de calor do fluido de trabalho para o meio ambiente, podendo ser de lã de vidro, lã de rocha, espuma de poliuretano ou outro material isolante.
- Tubulação: a tubulação é por onde passa o fluido de trabalho e é dividida em tubos do cabeçote e tubos elevadores. Os tubos do cabeçote são os tubos de entrada e saída do coletor. São localizados na parte inferior e superior, e são de maior diâmetro (normalmente) que os tubos elevadores, que interligam os tubos cabeçotes inferior e superior.
- Placa absorvedora: é a principal responsável pela conversão de energia radiante em energia térmica, passando por condução e convecção através dos tubos para o fluido de trabalho. A placa absorvedora pode ser uma única envolvendo todos os tubos, ou particionada. Pode ser de alumínio ou cobre pintadas de preto ou algum tratamento seletivo especial. Existem também alguns coletores com placa absorvedora e tubulação de plástico, mas estes não serão tratados neste trabalho.

- Cobertura: a cobertura pode ser de vidro, policarbonato ou acrílico que permita a passagem da radiação solar. A função da cobertura é minimizar as perdas de calor por convecção e por radiação para o meio ambiente.

Um coletor plano pode ser visualizado em corte na Figura 3.2, onde é possível identificar os componentes do mesmo.

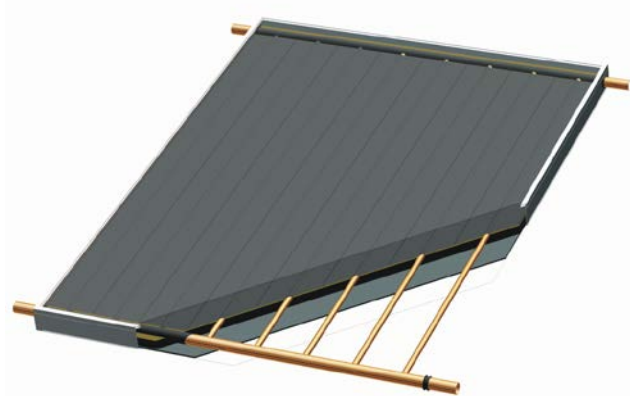


Figura 3.2 - Corte de um coletor plano. Fonte: [www.solares-online.com.br](http://www.solares-online.com.br).

### 3.3 Coletores Tubulares

Os coletores tubulares podem operar com uma de quatro configurações: transferência direta, chapa com tubo em U, tubo metálico concêntrico e tubo de calor. Entre estas configurações a primeira tem tido maior emprego no Brasil e por isto é a configuração descrita nesta dissertação.

Um coletor solar de tubo evacuado é composto basicamente de:

- Tubos: os tubos são de vidro, sendo 2 tubos concêntricos, onde no interno esta o fluido de trabalho, e o mesmo está coberto na parte externa com uma camada seletiva. Entre o interno e o externo, está o isolamento a vácuo, principal responsável por atenuar as perdas térmicas por convecção e condução. Um desenho esquemático do tubo pode ser visto na Figura 3.3.

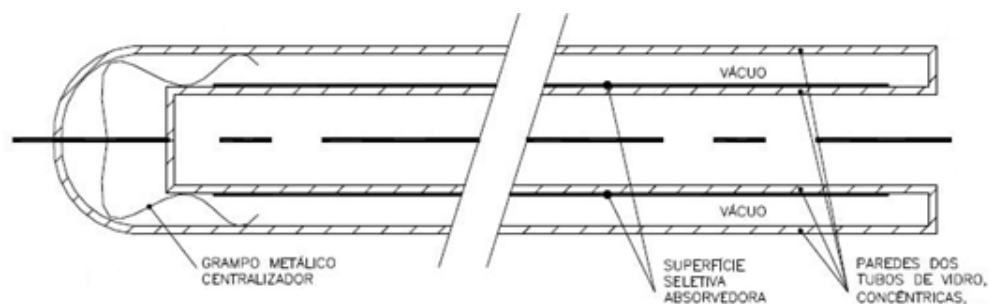


Figura 3.3 - Esquema de um tubo do coletor. Adaptado de Manea *et al.*, 2010.



No grampo metálico existe um capturador de gases que se trata de uma pastilha de material reativo que é colocada dentro do sistema de vácuo com o propósito de mantê-lo praticamente sem matéria. Quando as moléculas de gases contidas no espaço evacuado colidem com o material do capturador, elas combinam-se quimicamente ou por absorção com ele, removendo pequenas quantidades de gás do espaço evacuado que causariam condução de calor indesejada.

- Cabeçote: Os tubos são inseridos no cabeçote, por onde passa o fluido de trabalho. O cabeçote pode ser de aço, alumínio ou cobre, sendo revestido por algum isolamento térmico.
- Estrutura: A estrutura é o que mantém os tubos presos ao cabeçote e na posição adequada a captação da energia solar.

A Figura 3.4 mostra um esquema para o funcionamento do coletor de tubos evacuados operando na configuração de transferência direta. A radiação solar (representada pelas setas amarelas) ao incidir sobre o tubo, aquece o fluido de trabalho. O fluido aquecido (identificado pelas setas vermelhas) sobe por diferença de densidade ao cabeçote, e o fluido mais frio desce aos tubos (identificado pelas setas azuis).

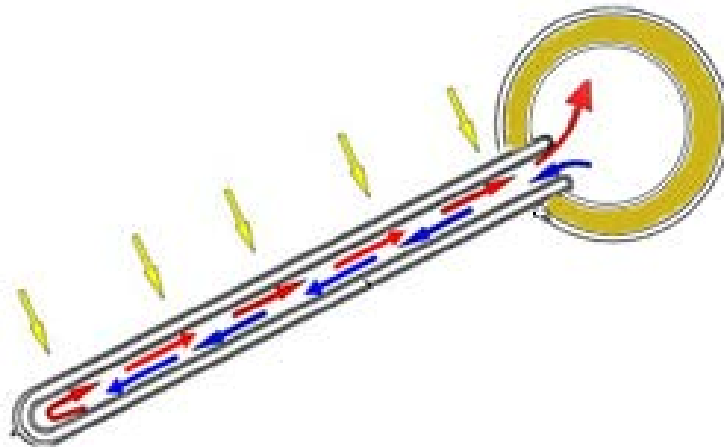


Figura 3.4 - Esquema de funcionamento do coletor evacuado operando na configuração de transferência direta. Adaptado de Tang, 2011.

### 3.4 Área do Coletor

A definição da área do coletor é um item de muita importância quando se mede a eficiência de um coletor. Existem diferentes normas que especificam diferentes áreas e maneiras de calcular estas áreas. Devido a este fator, é necessário definir os tipos de áreas que

serão utilizadas nesta dissertação. Podem-se classificar em três os tipos de áreas de um coletor.

A norma brasileira NBR 15747-2 [ABNT, 2009] determina que absorvedor é o componente de um coletor solar que absorve a energia radiante e transfere essa energia na forma de calor para um fluido. Também determina que a abertura do coletor solar é a abertura através da qual a radiação não concentrada é admitida. A área bruta (total) do coletor é a área máxima projetada do coletor completo, excluindo tubulações externas.

Com base nas informações da norma, define-se que a área do absorvedor ( $A_{abs}$ ) é a área da parte responsável por receber a radiação solar e converter em energia térmica. Em um coletor plano, está sendo considerada a área da placa absorvedora. Em um coletor de tubos evacuados está sendo considerada a soma das projeções das áreas dos tubos internos sobre o plano do coletor.

A área de abertura ( $A_{ab}$ ) é a área da cobertura que permite a entrada da radiação para a parte absorvedora. Em um coletor plano está sendo considerada a área da cobertura. Em um coletor de tubos evacuados está sendo considerada a soma das projeções das áreas dos tubos externos sobre o plano do coletor.

A área total ( $A_t$ ) é a área ocupada pelo coletor. No caso dos coletores planos está sendo considerada a área total ocupada pela caixa externa. No caso dos coletores de tubos está sendo considerada a área total externa, incluindo o cabeçote e suportes inferiores.

A Tabela 3.1 mostra as três diferentes áreas calculadas para um tipo de coletor plano e um tipo de coletor de tubos. Conforme a necessidade ou a norma que esteja sendo usada, a área do coletor assume o valor de uma das áreas definidas.

Tabela 3.1 - Diferença da área entre dois coletores.

Tipo de Coletor	Área absorvedora ( $A_{abs}$ )	Área abertura ( $A_{ab}$ )	Área total ( $A_t$ )
Plano	1,60 m <sup>2</sup>	1,68 m <sup>2</sup>	1,80 m <sup>2</sup>
Tubos	1,60 m <sup>2</sup>	1,92 m <sup>2</sup>	3,05 m <sup>2</sup>

### 3.5 Principais diferenças entre coletores planos e tubulares

Do exame da Tabela 3.1 imediatamente se observam algumas diferenças físicas significativas entre os coletores planos fechados e os coletores evacuados.

A área total de um coletor plano normalmente é pouco maior que a área do absorvedor. Ou seja, quase toda a área ocupada pode absorver radiação. Já em um coletor de

tubos, a área total normalmente é muito maior que a área absorvedora, podendo chegar a ser o dobro.

É muito importante considerar este fator, pois os valores de eficiência dependem diretamente da área, e portanto uma consideração incorreta pode levar a valores incorretos para a eficiência real do sistema.

Analisando a Tabela 3.1 pode-se verificar que no coletor plano, a diferença entre a menor e a maior área é aproximadamente 13% e no coletor de tubos evacuados é de aproximadamente 90%. A Figura 3.5 mostra um coletor de tubos de frente, mostrando o espaçamento entre tubos, cabeçote e suporte inferior.

Conforme Manea, 2012, a curva de eficiência do coletor está diretamente ligada à área, e portanto um mesmo coletor de tubos evacuados pode ter duas eficiências diferentes se for considerada em um caso a área de abertura e em outro a área total. Na Figura 3.6, pode-se observar as curvas de eficiência para 2 coletores planos conforme consta em tabela do INMETRO e para o coletor de tubos ensaiado no LABSOL. A descrição do ensaio pode ser encontrada em Manea, 2012.



Figura 3.5 - Coletor de tubos.

Na Figura 3.6, a curva de eficiência para o coletor de tubos evacuados utilizando a área absorvedora é mais alta que a curva considerando a área total. Isto se deve ao cálculo do valor da radiação incidente. Com uma área maior, é considerada uma maior radiação incidente, e portanto a eficiência é menor.

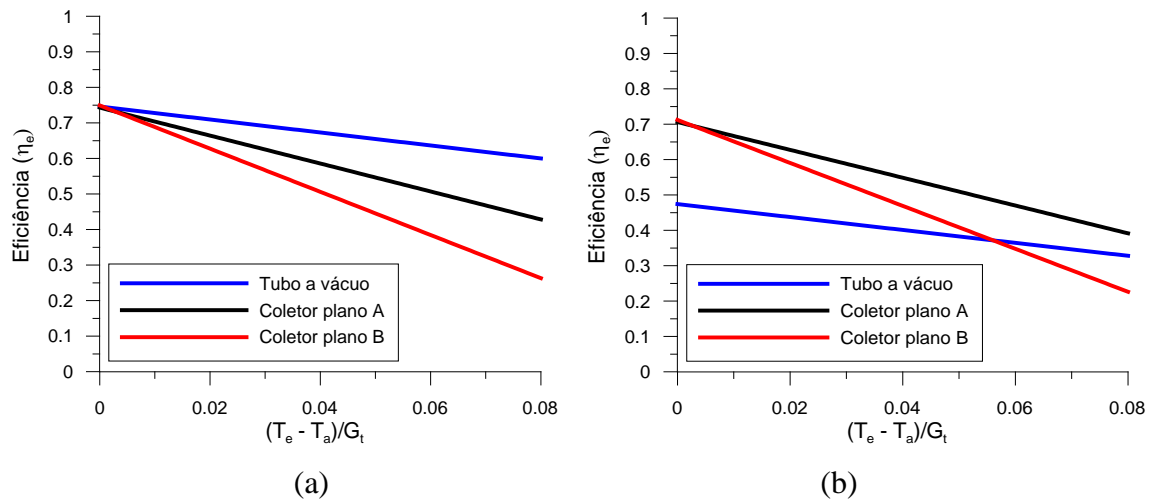


Figura 3.6 – Gráficos de eficiência comparando coletores  
(a) Utilizando área absorvedora, (b) área total. Fonte: Manea, 2012.

Outra diferença significativa deve-se a um fator importante sobre o ângulo de incidência da radiação solar ao longo do dia, e este é um dos fatores mais importantes no desempenho dos coletores. No coletor plano, o ângulo de incidência muda constantemente devido à rotação da Terra. Com isto, tem-se uma radiação incidente que aumenta até o meio dia solar, e depois diminui devido ao ângulo de incidência.

Nos coletores tubulares, este fator é diferente devido à geometria cilíndrica dos mesmos. No início da manhã e final da tarde tem-se o problema da sombra de um tubo no outro, diminuindo assim a área absorvedora. Mas, durante a maior parte do dia, o ângulo de incidência do sol sobre um plano projetado dos tubos pode ser considerado o mesmo. A Figura 3.7 ilustra a projeção da área absorvedora de um tubo em duas condições.

De acordo com He Zinian *et al.*, 1997, a diferença entre uma placa absorvedora plana e uma cilíndrica pode representar no mínimo 15% de energia a mais captada anualmente.

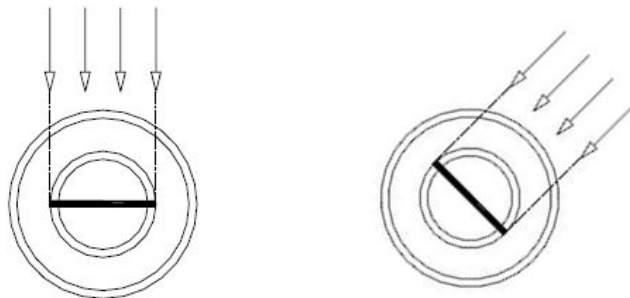


Figura 3.7 - Projeção da área absorvedora em duas condições de incidência.

Adaptado de Manea *et al.*, 2010.

De acordo com Dufie e Beckman, 1991, um fator modificador do ângulo de incidência da radiação é necessário para o correto cálculo da radiação para coletores solares, sendo que este fator é diferente quando aplicado para coletores cilíndricos e para coletores planos.

O fator modificador para coletores planos é sempre menor ou igual a 1. Em coletores tubulares, este fator modificador pode ser maior do que 1 na maior parte do dia, conforme pode ser visto na Tabela 3.2, onde constam os valores de correção para um tubo da marca Sunshore testado e divulgado por Tüv, 2007, e os valores para um coletor plano calculados conforme Dufie e Beckman, 1991.

Tabela 3.2 - Fator modificador da radiação para coletores solares.

Fator modificador	Ângulo de incidência transversal								
	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Coletor Tubular	1,0	1,06	1,13	1,24	1,37	1,53	1,02	0,51	0
Coletor Plano	0,998	0,994	0,985	0,969	0,944	0,900	0,808	0,524	0

Os valores da Tabela 3.2 correspondem ao fator modificador da radiação, que é um fator que considera o posicionamento do coletor em relação ao ângulo de incidência solar. Este fator corrige a radiação para os coletores tubulares, além da correção para a parte inicial e final do dia. Devido a característica cilíndrica, a área aparente não muda como no caso do coletor plano ao longo do dia.

### 3.6 Reservatório Térmico

Para aplicações de aquecimento de água, é necessário armazenar a energia acumulada durante o dia ou durante vários dias de forma a poder utilizar em momentos diversos. Para isto é necessário um reservatório térmico com capacidade para atender à demanda de água quente.

Os reservatórios ou tanques (Figura 3.8) podem ser de aço inoxidável ou material polimérico, revestidos com isolamento térmico.



Figura 3.8 - Reservatório térmico.

### 3.7 Apoio auxiliar

O apoio auxiliar pode ser de diversas formas, sendo o mais comum o apoio elétrico interno ao tanque. Também pode ser um apoio externo, como uma bomba de calor ou um aquecedor a gás. Além disto existem instalações onde o apoio elétrico é de passagem, no caminho para o consumo.

O tipo de apoio é considerado conforme a instalação e o investimento desejado. O mais utilizado para uso doméstico é o apoio elétrico interno ao tanque, e portanto este é o que será considerado para fins de estudo nesta dissertação.

### 3.8 Circulação forçada e Circulação natural

Nos coletores planos, quando o número de coletores é pequeno e as distâncias envolvidas são curtas, é possível utilizar o sistema de circulação natural, também chamado de termosifão. O sistema de termosifão utiliza a diferença de densidade entre a água quente e a fria, de forma a movimentar a água quente de volta ao tanque depois de aquecida no coletor. Com isto água fria desce do tanque para o coletor. Para a utilização deste sistema, algumas regras importantes devem ser observadas, como a diferença de altura entre o coletor e o tanque, sendo que o coletor deve estar mais baixo, permitindo à água quente subir. A Figura 3.9 mostra um esquema simplificado do funcionamento de um sistema para aquecimento de água usando um coletor plano com circulação natural.

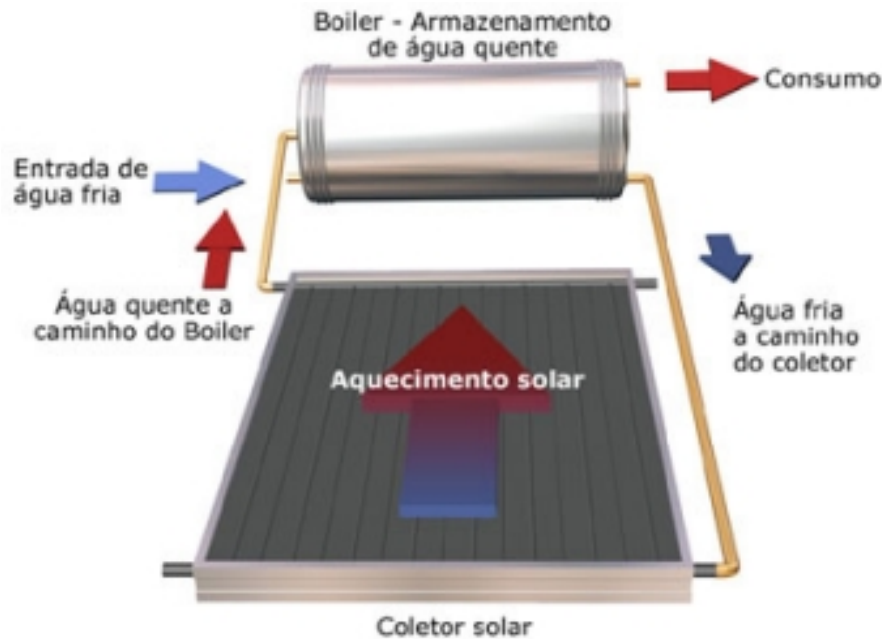


Fig. 3.9 - Esquema de funcionamento do sistema. *Fonte:* www.solares-online.com.br.

A distância das tubulações e o número de coletores também é um fator importante, pois se a distância a ser percorrida pela água quente for muito grande, a perda de carga pode prejudicar a circulação no sistema.

Quando a distância for grande, o número de coletores for grande ou os coletores precisarem estar mais altos que o tanque, é necessário empregar o sistema de circulação forçada. Este sistema prevê que uma bomba com controladores de temperatura ou temporizador faça a circulação da água pelos coletores.

No caso dos coletores de tubo evacuados, a maioria prevê que a circulação seja forçada, pois não existe diferença de altura entre a entrada e a saída do coletor na montagem padrão.

### 3.9 Calor Útil

O calor útil é definido como a potência transferida para o fluido de trabalho pelo coletor. O calor útil pode ser calculado pela expressão

$$Q_u = A_{abs} [F_R(\tau\alpha) G_t - F_R U_L (T_e - T_a)] \quad (3.1)$$

onde  $Q_u$  é o calor útil,  $A_{abs}$  é a área absorvedora do coletor,  $F_R$  é o fator de remoção de calor,

$(\tau\alpha)$  é o produto da transmissividade do vidro e a absorptância do absorvedor,  $G_t$  é a irradiância no plano do coletor,  $U_L$  é o coeficiente global de perdas térmicas,  $T_e$  é a temperatura de entrada do fluido de trabalho no coletor e  $T_a$  é a temperatura ambiente.

Pode-se definir o fator de remoção de calor ( $F_R$ ) como a razão entre a taxa de calor útil transferida entre o absorvedor e o fluido de trabalho e o valor teórico que seria transferido se toda superfície absorvedora estivesse à temperatura do fluido na entrada do coletor.

Absortância ( $\alpha$ ) é fração de energia radiante incidente que é absorvida pela placa absorvedora. Transmissividade ( $\tau$ ) é razão entre a energia solar transmitida pela cobertura e a energia solar incidente.

O coeficiente global de perdas ( $U_L$ ) é coeficiente associado à perda total de energia por condução, convecção e radiação entre o absorvedor e o ambiente.

Os valores para  $F_R\tau\alpha$  e  $F_RU_L$  podem ser encontrados para a maioria dos coletores nos dados dos fabricantes bem como em tabelas de classificação dos coletores, como a tabela apresentada pelo INMETRO, 2012.

Outra maneira de determinar o calor útil em regime permanente é através da expressão

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad (3.2)$$

onde  $\dot{m}$  é a taxa mássica de fluido de trabalho,  $C_p$  o calor específico,  $T_s$  a temperatura de saída do coletor e  $T_e$  a temperatura de entrada no coletor.

Combinando as equações 3.1 e 3.2, pode-se obter a temperatura do fluido na saída do coletor quando se conhece a vazão e os dados de temperatura do fluido na entrada, temperatura ambiente e irradiância solar:

$$T_s = T_e + A_{abs}[F_R(\tau\alpha) G_t - F_RU_L(T_e - T_a)] \frac{1}{\dot{m} C_p} \quad (3.3)$$

Quando a água não está circulando no coletor, não há entrega de energia ao sistema e o calor útil passa a ser nulo. No entanto, parte da energia recebida do sol passa a ser acumulada no fluido e nos materiais do coletor. Neste caso o regime permanente não pode mais ser considerado, mas a equação de energia permite calcular a taxa de aumento da



temperatura no coletor pela diferença entre a energia solar absorvida e a energia térmica transferida ao ambiente:

$$CAP \frac{dT_m}{dt} = A_{abs}[(\tau\alpha)G_t - U_L(T_m - T_a)] \quad (3.4)$$

onde  $CAP$  é a capacidade térmica do coletor que pode ser obtida da soma dos produtos entre massa e calor específico de cada elemento do absorvedor, inclusive a água, e  $T_m$  é a temperatura média do absorvedor que, nesta condição de vazão nula, pode ser considerado igual à temperatura média do fluido no interior do coletor. Da discretização da equação 3.4 é possível obter a temperatura do fluido no coletor em um instante  $i+1$  ( $T_{m(i+1)}$ ) a partir da temperatura no instante  $i$  anterior ( $T_{m(i)}$ ), considerando que o intervalo de tempo  $\Delta t$  seja um valor pequeno (~60 segundos):

$$T_{m(i+1)} = T_{m(i)} + A_{abs}[(\tau\alpha)G_t - U_L(T_{m(i)} - T_a)] \frac{\Delta t}{CAP} \quad (3.5)$$

### 3.10 Eficiência do Coletor

A eficiência do coletor pode ser definida como

$$\eta = \frac{Q_u}{G_t A_c} \quad (3.6)$$

onde  $\eta$  é a eficiência do coletor,  $Q_u$  é o calor útil em W,  $G_t$  é a radiação incidente no plano do coletor em W/m<sup>2</sup> e  $A_c$  a área do coletor em m<sup>2</sup>.

Juntando as equações 3.1 e 3.5 pode-se obter a equação

$$\eta = F_R \tau \alpha - F_R U_L \left( \frac{T_e - T_a}{G_t} \right) \quad (3.7)$$

que é a equação da eficiência do coletor.

### 3.11 Coletores solares no Brasil

No Brasil podem-se encontrar muitos coletores solares a venda, tanto importados como fabricados nacionalmente. Os coletores planos tem uma oferta ampla, principalmente os

fabricados no país. Encontram-se facilmente os coletores planos com e sem cobertura.

Os coletores planos sem cobertura não foram considerados interessantes para serem comparados com os coletores de tubo evacuado, devido às suas características que envolvem um uso de baixa temperatura, como aquecimento de água para piscina.

Optou-se por realizar a comparação com coletores planos com cobertura fabricados nacionalmente. Os coletores de tubo evacuado são todos importados, a sua maioria da China.

Os coletores planos fabricados no Brasil, considerando coletores com cobertura de vidro, isolados termicamente, e com absorvedor de metal pintado de preto fosco, tem um custo médio de R\$ 500,00 a R\$ 700,00 para tamanhos que variam de 1,4 a 2,0 m<sup>2</sup> de área absorvedora. Podem ser encontrados coletores mais baratos e inclusive mais caros, até com absorvedor com pintura seletiva e cobertura especial de policarbonato.

Os coletores de tubo evacuado a venda no Brasil, considerando coletores de tubo evacuado na condição de transferência direta, sem acumulador integrado ao cabeçote e para baixas pressões, tem um custo que varia de R\$ 1500,00 a R\$ 2000,00, para 24 tubos e uma área absorvedora de 1,6 m<sup>2</sup>. Obviamente podem-se encontrar modelos de coletores com preços mais elevados no mercado.

Para este trabalho foram considerados os valores da tabela 3.3 para as comparações de custo entre os coletores. Com base nestes parâmetros, foi possível realizar uma comparação da viabilidade e vantagem econômica do uso desta tecnologia no Brasil.

Tabela 3.3 – Valores médios de mercado.

Tipo de Coletor	Custo médio aproximado por m <sup>2</sup> de área absorvedora
Plano com cobertura – tipo B	R\$ 300,00
Plano com cobertura – tipo A	R\$ 320,00
Tubo evacuado	R\$ 1050,00

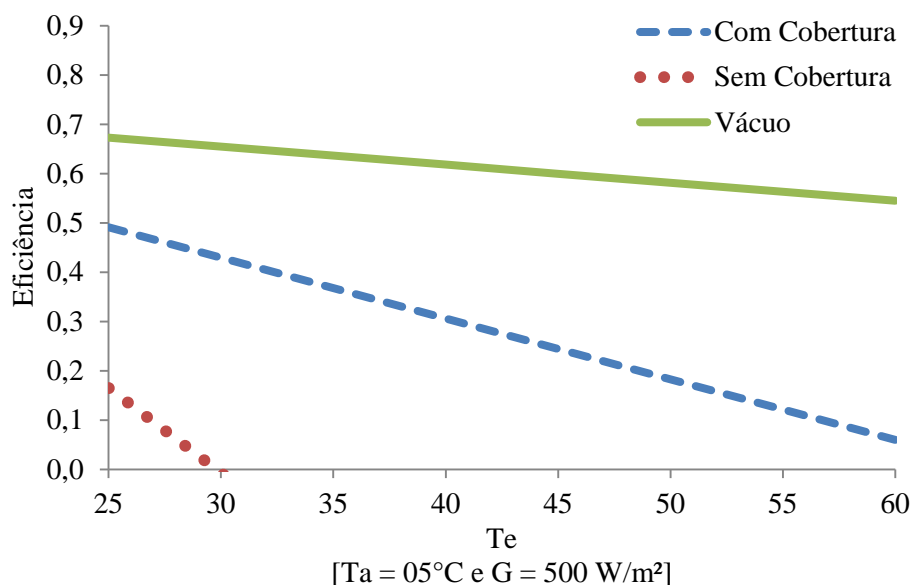
Para obter valores médios das características para simular os coletores planos, foi calculada uma média a partir da tabela do INMETRO e considerando a classificação que este órgão atribui aos coletores. Os valores mostrados na tabela 3.4 foram definidos como a média do tipo de coletor.

Tabela 3.4 - Médias dos valores característicos classificados pelo INMETRO.

Classificação	$F_R\tau\alpha$	$F_RU_L$
A	0,738	6,165
B	0,700	6,387
C	0,657	6,287

### 3.12 Análise das curvas de eficiência

Realizando uma análise sobre a equação da eficiência 3.7, podem-se traçar retas de eficiência dos coletores para algumas situações que podem representar uma região do país ou determinada época. A Figura 3.10 mostra as curvas traçadas para uma irradiância de 500 W/m<sup>2</sup> com uma temperatura ambiente de 5°C.

Figura 3.10 – Curva de eficiência de coletores com  $T_a = 5\text{ °C}$  e  $G = 500\text{ W/m}^2$ .

Observando a Figura 3.10 pode-se verificar que um coletor plano sem cobertura tem quase nenhuma eficiência sobre estas condições. E que um coletor de tubos evacuados tem um desempenho muito bom sob estas condições.

A Figura 3.11 mostra a curva para uma situação menos rigorosa, com a temperatura ambiente considerada de 15°C, com pouca irradiância.

Observando a Figura 3.11 pode-se verificar que o coletor plano sem cobertura

apresentou alguma melhora, podendo trabalhar com temperaturas da ordem de 30 °C. O coletor de tubos tem um desempenho muito superior aos outros, mas seu comportamento não variou tanto.

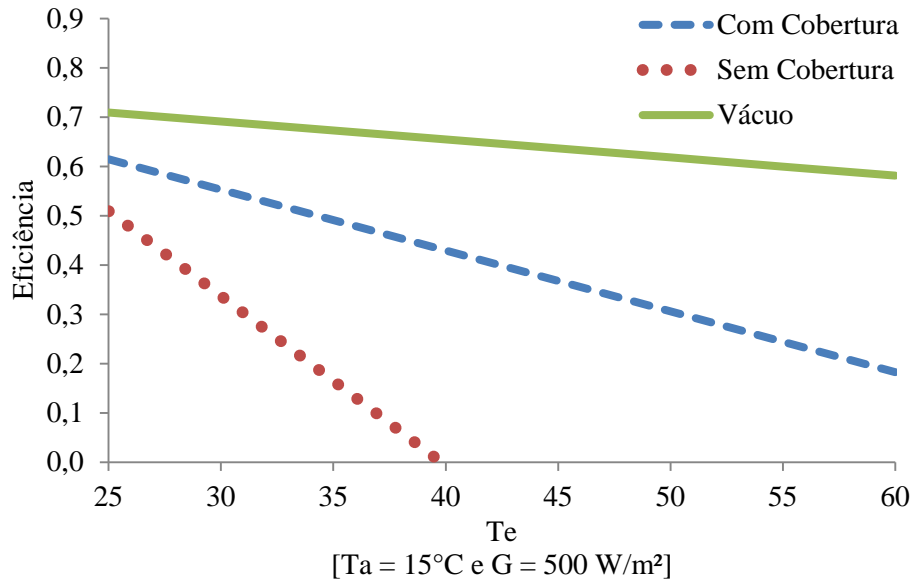


Figura 3.11 – Curva de eficiência de coletores com  $T_a = 15\text{ °C}$  e  $G = 500\text{ W/m}^2$ .

A Figura 3.12 já considera uma situação mais típica, com temperatura ambiente de 25°C e uma irradiância de 800 W/m². Com isto, pode-se observar que existe um cruzamento nas curvas de eficiência para quando a água de entrada do coletor está próxima a ambiente.

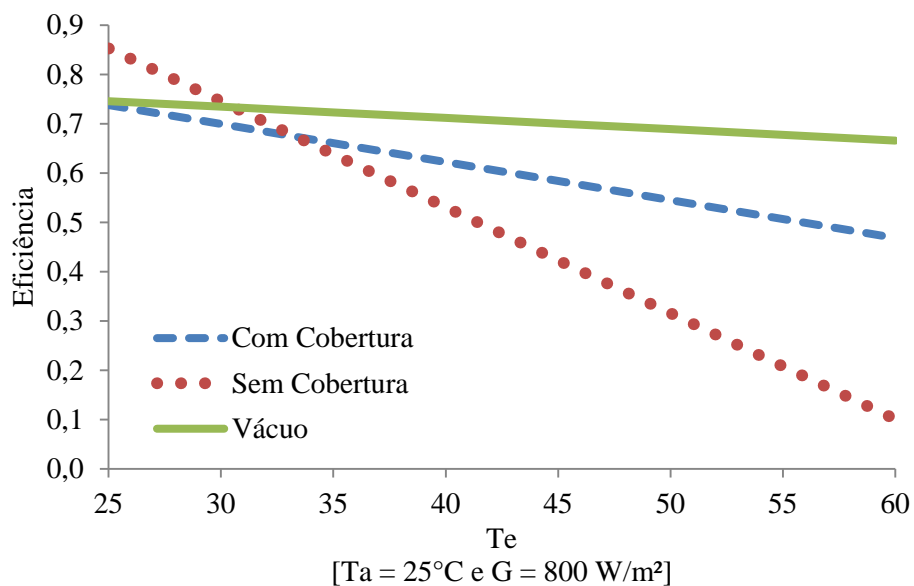


Figura 3.12 – Curva de eficiência de coletores com  $T_a = 25\text{ °C}$  e  $G = 800\text{ W/m}^2$ .

De acordo com a Figura 3.12, pode-se verificar que os 3 coletores conseguem aquecer a água, mas novamente o de tubos é mais eficiente. Só que desta vez a diferença entre o coletor plano com cobertura e o coletor de tubos é menor. O mesmo acontece para a situação descrita na Figura 3.13, onde a mesma expressa o comportamento para uma temperatura ambiente de 30°C e uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>.

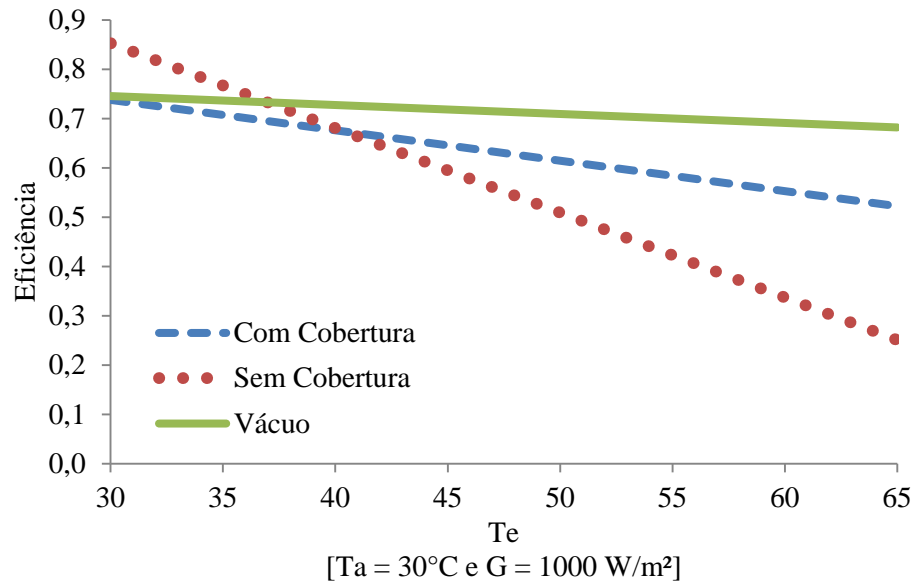


Figura 3.13 – Curva de eficiência de coletores com  $T_a = 30\text{ °C}$  e  $G = 1000\text{ W/m}^2$ .

## 4 CARACTERIZAÇÃO DOS COLETORES TUBULARES

Para entender melhor o funcionamento deste tipo de coletor e determinar alguns parâmetros de forma a simular corretamente os mesmos, alguns ensaios dos tubos foram necessários.

Estes ensaios foram realizados para determinar as características de absorção e de perdas térmicas, desenvolvendo sistemáticas que permitissem a comparação direta entre os tubos de diferentes fabricantes.

Atualmente os tubos são comercializados em dois tamanhos padronizados, o que possibilita um intercâmbio entre componentes de diferentes fabricantes. Assim, realizando ensaios e conhecendo características específicas de cada tipo de tubo, é possível utilizar melhor a tecnologia.

### 4.1 Ensaio de Perdas Térmicas

O primeiro ensaio desenvolvido foi para caracterizar a perda de calor do tubo, com o desenvolvimento de um calorímetro especialmente montado para medir as perdas térmicas por condução e radiação de tubos evacuados.

Para o desenvolvimento deste trabalho, ensaios foram realizados com tubos a vácuo fabricados pela empresa chinesa Jiangsu Sunshore. Os tubos são de vidro borossilicato 3.3, com diâmetro externo de 58 mm. A diferença entre os tubos testados está na superfície seletiva, onde um dos tubos é Al-N/SS/Cu e o outro é Al-N/Al, conforme pode ser visto na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Parte interna dos tubos.

Para o ensaio foi construído uma bancada experimental, denominado calorímetro, que permite avaliar as perdas térmicas de tubos absorvedores aquecendo água em seu interior, e com as medidas da potência e temperatura interna e externa ao tubo determinar a qualidade do isolamento térmico do tubo. Com os dados obtidos, foi possível determinar o coeficiente de transferência de calor do tubo. A montagem do calorímetro conforme o esquema da Figura 4.2 pode ser vista na Figura 4.3.

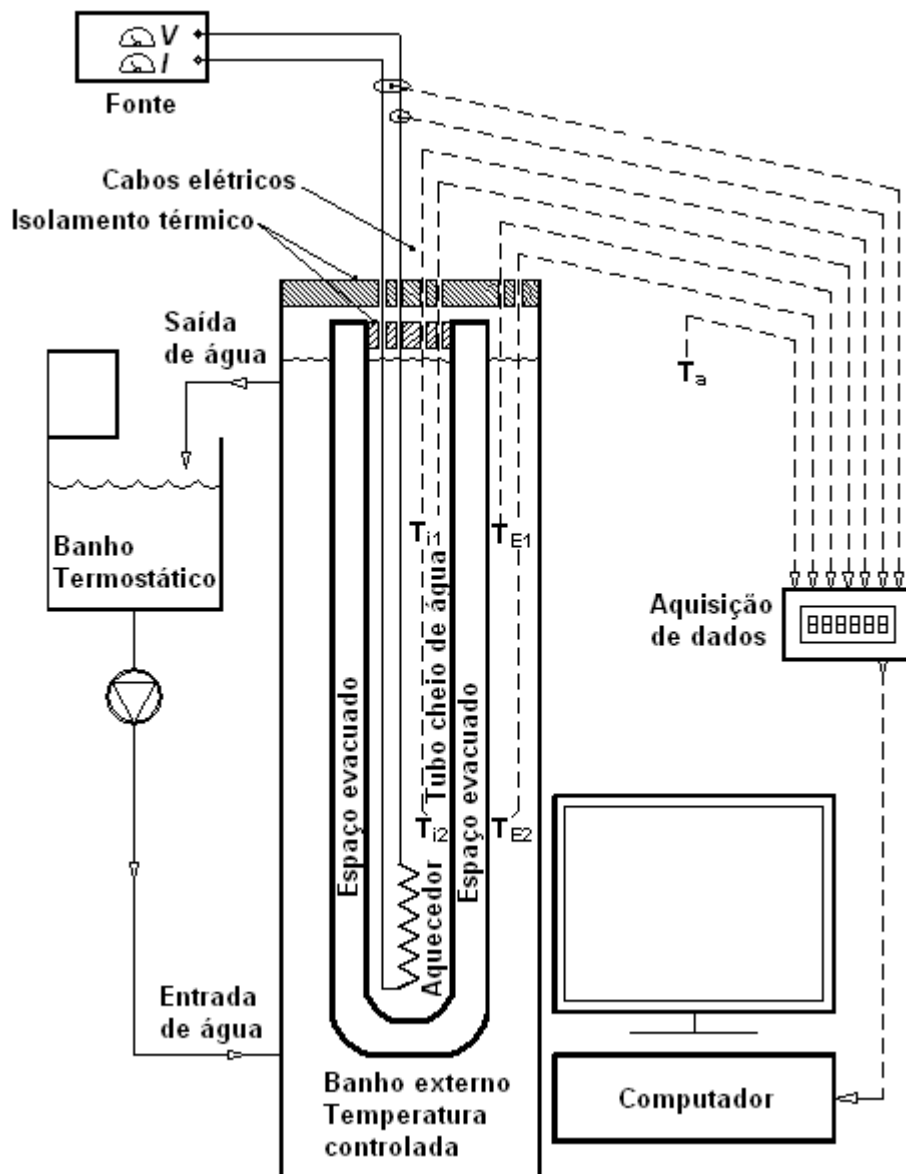


Figura 4.2 – Esquema da bancada experimental para medidas do coeficiente global de transferência de calor do tubo a vácuo. *Fonte:* Manea,2012.

O calorímetro é composto de dois tubos de PVC, onde foram inseridos os tubos com isolamento a vácuo. Nestes tubos de PVC foi mantido um banho com temperatura controlada por equipamento para este fim, a fim de manter o ambiente externo dos tubos controlado.

Dentro dos tubos evacuados foi colocado aquecedor elétrico com potência controlada por fonte de alta estabilidade e precisão, e sensores para medição da temperatura da água ligados a equipamento de aquisição de dados.

Os tubos ensaiados foram preenchidos internamente com água com temperatura conhecida e uniforme. Quando o sistema entra em regime permanente são determinadas as temperaturas interna e externa ao tubo, podendo assim realizar a determinação do coeficiente de perdas térmicas

Na montagem da bancada foram utilizados cinco sensores PT100 classe A com ligação a quatro fios para medição das temperaturas ambiente e da água no interior e exterior aos tubos.

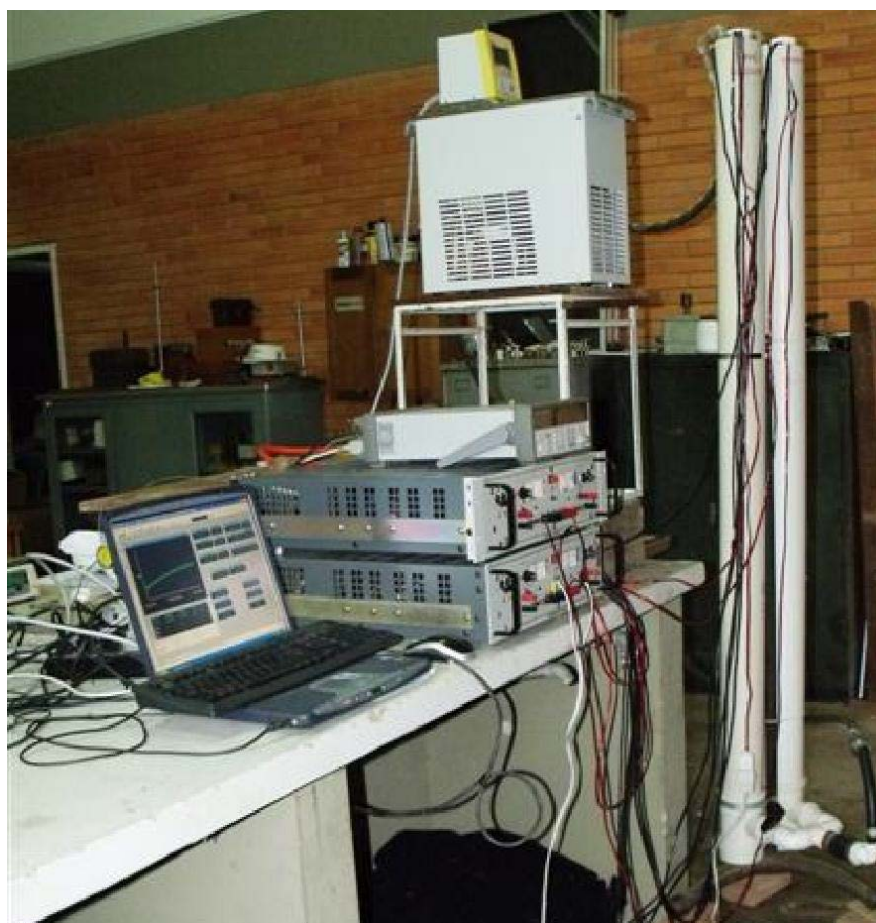


Figura 4.3 – Montagem do calorímetro.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados obtidos em três ensaios comparativos dos dois tubos. No primeiro as potências elétricas das fontes foram mantidas constantes e aproximadamente iguais nos dois tubos e as temperaturas foram medidas. No segundo regularam-se as potências elétricas procurando-se obter temperaturas internas bem próximas



nos dois tubos. O terceiro foi semelhante ao segundo, mas se procuraram obter temperaturas internas maiores. As temperaturas foram medidas com incerteza de 0,1 °C e a potência medida com incerteza de 0,1 W.

Tabela 4.1- Resultados dos ensaios para o Tubo Al-N/SS/Cu.

Tubo Al-N/SS/Cu					
T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	Potência (W)	Q <sub>liq</sub> (W)	U.A <sub>E</sub> (W/°C)
69,9	30,4	31,8	5,0	3,7	0,093±0,004
56,4	25,4	29,0	3,3	2,3	0,075±0,004
66,2	25,0	20,5	5,0	3,4	0,083±0,004

Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios para o Tubo Al-N/Al.

Tubo Al-N/Al					
T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	Potência (W)	Q <sub>liq</sub> (W)	U.A <sub>E</sub> (W/°C)
58,8	30,4	31,8	5,0	4,1	0,143±0,004
54,8	25,7	29,0	5,0	4,1	0,141±0,004
66,7	24,9	20,5	7,5	5,9	0,140±0,004

Os ensaios e resultados foram detalhados em Cardoso *et al.*, 2011, e Manea, 2012.

## 4.2 Ensaio de ganhos térmicos

Um segundo ensaio com os tubos foi realizado a fim de caracterizar o ganho térmico dos mesmos. Com este ensaio foi possível obter os parâmetros de transmitância-absortância solar efetiva ( $\tau\alpha$ ). A Figura 4.4 mostra a bancada utilizada para testar os tubos expostos ao sol.

O ensaio consistiu em preencher os tubos com diferentes camadas seletivas com água próximo a temperatura ambiente, e deixar os tubos expostos ao sol por tempo pré-determinado. Após, a carga térmica da água contida nos tubos era avaliada para determinar qual o calor ganho com a exposição. Com este resultado foi possível determinar a eficiência óptica do coletor.

Neste trabalho o tubo coletor solar foi preenchido com 2,7 kg de água a temperatura

ambiente. Este foi exposto ao sol e mantido nesta condição durante um tempo pré-determinado de 600 s. Após este tempo o tubo foi removido e seu conteúdo foi transferido para um recipiente com sensores do tipo PT100 para medir a temperatura da mistura. O dia e horário escolhido para o ensaio esteve com a irradiância solar aproximadamente constante durante o período do ensaio. Assim foi possível determinar os parâmetros  $\tau\alpha$  como  $0,82\pm 0,07$  para o tubo com camada seletiva Al-N/SS/Cu e  $0,79\pm 0,07$  para o tubo com camada seletiva Al-N/Al.

Os ensaios e resultados foram detalhados em Cardoso *et al.*, 2011, e Manea, 2012.



Figura 4.4 – Bancada de testes de ganho térmico.

### 4.3 Bancada para caracterização de coletores

O LABSOL já realiza há muitos anos ensaios de desempenho de coletores solares, com uma bancada externa [Marroquin, 1989] que atualmente está desativada por não atender a normal atual brasileira.

Com o objetivo de estudar os coletores com tubo evacuado e de atender as mudanças exigidas pela norma NBR 15747-2 [ABNT, 2009] para testes de coletores solares para aquecimento de água, foi necessário desenvolver uma bancada e instrumentação adequados para se enquadrar nas exigências da norma. Esta bancada possibilita o ensaio comparativo de coletores de acordo com as recomendações da norma brasileira.

A primeira parte do projeto foi especificar uma estrutura que além de permitir atender à norma, pudesse suportar dois coletores montados para serem ensaiados simultaneamente.

Conforme a norma, o ângulo de incidência do sol não pode ultrapassar  $20^\circ$ , e com isto uma bancada fixa não permitiria o ensaio em diversos momentos do dia. Assim, uma das possibilidades foi de fazer a bancada giratória, de modo a poder seguir o sol ao longo de todo o dia. Depois de analisadas as possibilidades, um modelo foi criado em software conforme mostra a Figura 4.5.

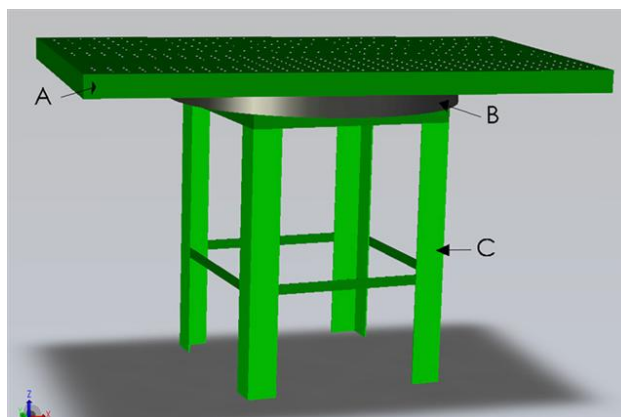


Figura 4.5 - Modelo de estudo da plataforma giratória.

A estrutura projetada possui quatro pés (C), uma plataforma retangular (A) fixada sobre um trilho circular (B). O giro ocorre porque sobre o trilho há rodízios fixados na parte superior dos pés possibilitando o giro de toda a plataforma em  $360^\circ$ . A estrutura foi projetada para suportar o peso próprio somado ao de dois coletores montados com água mais duas pessoas (para manutenção e operação do sistema).

A estrutura foi construída em aço a com a plataforma de 4,20 m x 2,90 m com uma altura de 2,60 m do solo para se evitar sombreamento e influencia de objetos, pessoas e veículos que poderiam passar próximos durante um ensaio.

A estrutura (C) é fixa ao solo, em base de concreto. Foram utilizados perfis de viga U, em dimensão adequada para suportar o peso do trilho e da base giratória, adicionados ao peso dos coletores, instrumentação e pessoal necessário para manipulação dos equipamentos. A estrutura B, é o trilho responsável pelo giro da plataforma. A estrutura C recebeu diversas rodas com rolamentos duplos que deslizam em baixo do trilho (estrutura B). As rodas foram distribuídas uniformemente sob o círculo do trilho. A plataforma (estrutura A) foi construída com vigas de perfil U, com chapa de 3 mm sobre a mesma, furada para possibilitar a montagem dos equipamentos e de diferentes estruturas de coletores solares. O giro da estrutura é controlado manualmente por um operador do solo. O sistema permite que apenas um operador consiga girar a estrutura, mesmo com todo o peso de dois coletores montados

sobre a mesma. Para evitar que a plataforma acabe saindo do trilho, ou, caso um peso maior seja concentrado em uma das pontas, foram colocadas travas de segurança que impedem o movimento vertical da estrutura A, mantendo a mesma sempre em contato com as rodas, conforme pode ser visto na Figura 4.6. Também foi adicionado um sistema de freio que impede o giro acidental da estrutura.



Figura 4.6 - Sistema de segurança do trilho e rodas.

A Figura 4.7 mostra a banca já pronta, onde é possível ver a base e a estrutura giratória que receberá os coletores a serem ensaiados.



Figura 4.7 - Foto da bancada giratória pronta.

Utilizando-se da bancada com um coletor solar de tubos evacuados, pode-se efetuar uma série de ensaios conforme a norma brasileira NBR 15747-2 [ABNT, 2009] determina e obter dados sobre o desempenho do coletor, conforme mostrado na Figura 4.8, onde mostra um coletor montado sobre a bancada.

A construção da bancada, ensaios e resultados foram detalhados em ROSA *et al.*, 2011, e Manea, 2012.



Figura 4.8 - Coletor solar de tubos evacuados montado na bancada.

#### 4.4 Ensaios

Testes realizados mostraram que com baixas irradiância o coletor de tubo evacuado consegue elevar a temperatura do fluido de trabalho, enquanto o coletor plano não. Isto se deve às perdas térmicas que no coletor de tubos são muito menores que no coletor plano convencional. A Figura 4.9 mostra dois coletores sendo testados na bancada.



Figura 4.9 – Montagem da bancada com dois coletores solares.

Em dias nublados, com pancadas de chuvas alternadas, pode-se observar que a partir de irradiâncias como  $100 \text{ W/m}^2$  o coletor de tubos proporcionava um pequeno aquecimento.

Durante as pancadas de chuva, o mesmo mantinha a sua taxa de aquecimento proporcional à radiação recebida, enquanto o coletor plano, com circulação forçada constante, durante o período de chuva esfriava o fluido de trabalho. Estes testes mostram que para dias com pouca radiação, em temporadas de chuva e temperaturas mais baixas, o coletor de tubos pode ser uma melhor opção.

Conforme pode ser observado na Figura 4.10, que representa um período de 7 horas de ensaio em que dois coletores foram submetidos a uma vazão constante de 3 litros/min, a temperatura ambiente média de 25°C e uma radiação média de 220 W/m<sup>2</sup>, o coletor de tubos (1,61 m<sup>2</sup> de área absorvedora) obteve sempre algum ganho térmico, mesmo em momentos de chuva. O coletor plano (1,47 m<sup>2</sup> de área absorvedora), nos períodos de chuva apresentou perdas térmicas, esfriando a água em até 0,5°C.

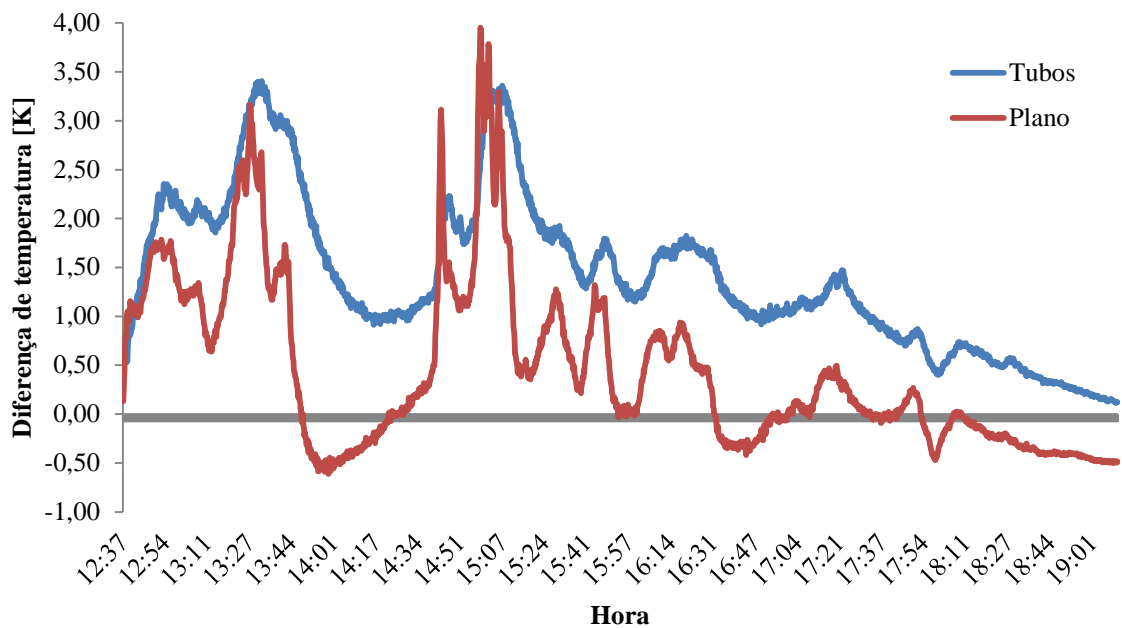


Figura 4.10 - Comparação em dia nublado com pancadas de chuva.

Observando o gráfico, pode-se perceber que a resposta do coletor plano é mais rápida com as variações da irradiância. A sua constante de tempo é muito menor, e portanto a variação da diferença de temperatura é maior.

Com ensaios deste tipo pode-se perceber que o coletor de tubos evacuados tem um melhor desempenho em situações de clima desfavoráveis.

## 5 O PROGRAMA TERMOSIM

O programa Termosim foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da UFRGS como parte de um pacote de programas para calcular e simular sistemas térmicos e fotovoltaicos (Pozzebon, 2009).

Uma das características do programa é de permitir a rápida e fácil caracterização de um sistema térmico para aquecimento de água, de forma visual, permitindo ao usuário configurar quase todos os parâmetros que podem variar em uma instalação, simular diferentes condições de climas, locais e instalações de aquecimento de água, com e sem energia auxiliar.

Ao iniciar o programa, o usuário deve escolher o tipo de sistema térmico que deseja simular. O programa oferece sistemas de aquecimento com e sem energia solar, e também com e sem apoio. O apoio pode ser do tipo elétrico ou a gás. A tela inicial com a escolha do apoio elétrico e suas opções pode ser visualizada na Figura 5.1.

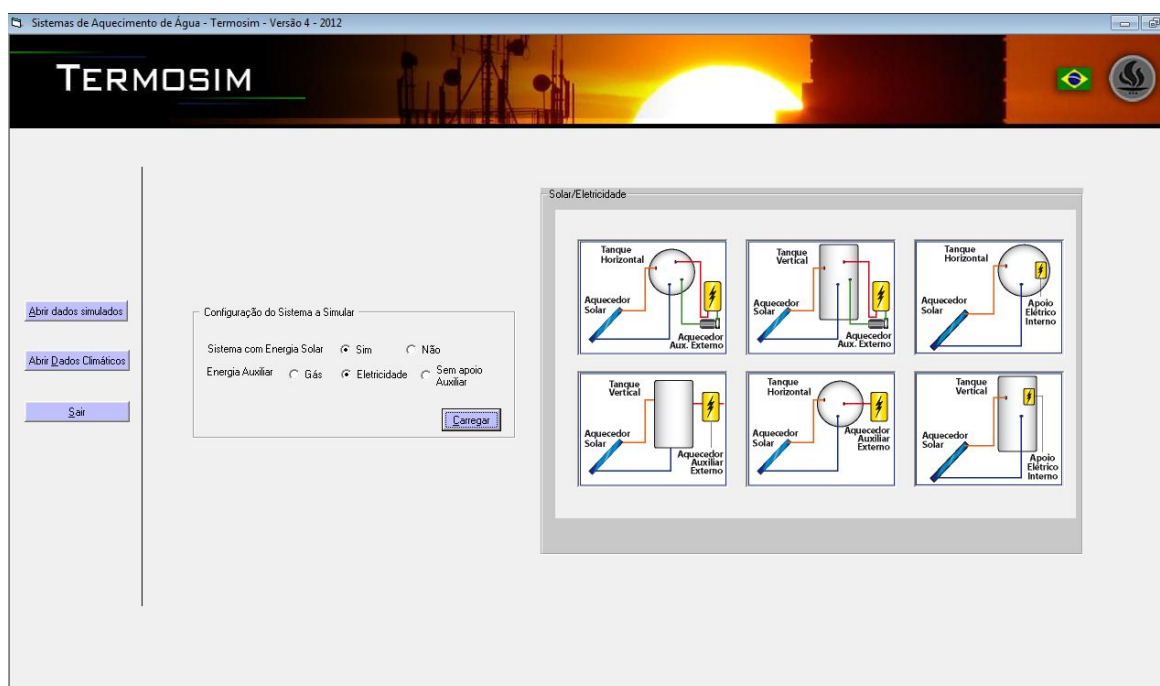


Figura 5.1 – Tela de escolha do tipo de sistema.

Após a escolha do sistema, o usuário deve escolher a geometria do mesmo, como o tipo de tanque, tipo de apoio, se interno ou externo, e outras possibilidades.

O programa foi desenvolvido em Visual Basic, e atualmente está na sua versão 4. Inicialmente o mesmo foi desenvolvido para o uso de coletores planos, com ou sem cobertura, e algumas rotinas do cálculo para os coletores tubulares foram desenvolvidas.

## 5.1 Radiação Solar simulada

O software Termosim utiliza dados de radiação do programa SeqMet BR, criado no LABSOL (Figura 5.2). O programa gera dados de radiação diária de hora em hora para o ano inteiro, incluindo dados de radiação extraterrestre, global, direta, difusa, e no plano inclinado do coletor.

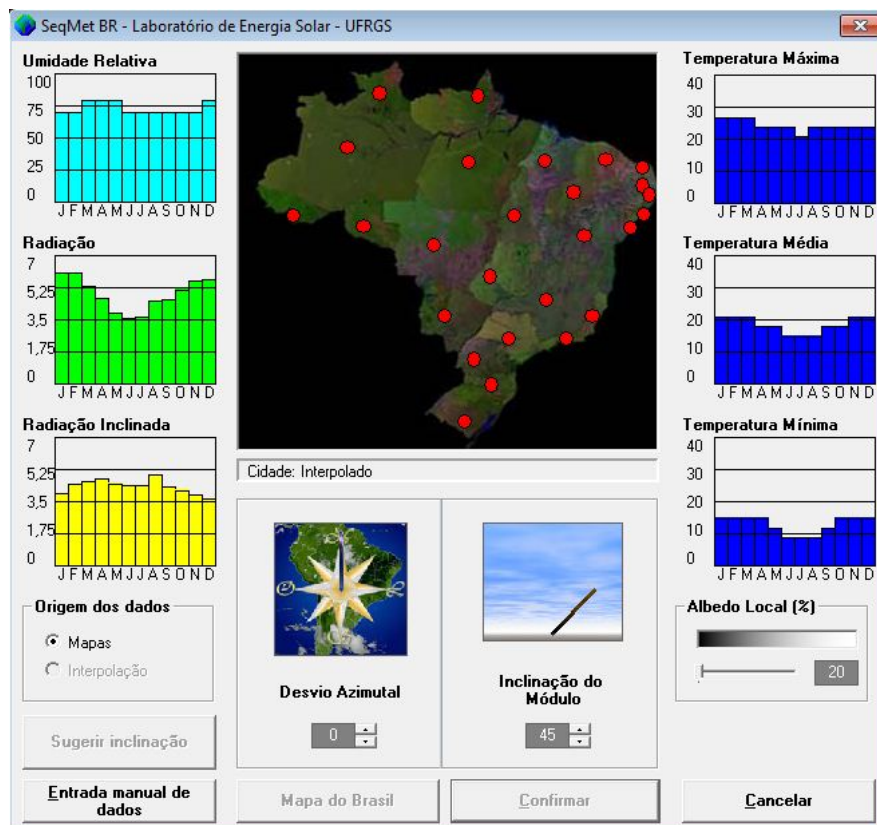


Figura 5.2 – Tela do Seqmet BR.

O usuário deve informar qual a localidade que ele deseja utilizar na simulação, bem como o desvio azimutal em relação ao norte e a inclinação dos coletores. Com estas informações, o programa gera os dados para o Termosim poder simular o comportamento dos coletores. É importante salientar que o SeqMetBR simula condições diversas de clima, como radiação horária compatível com diferentes situações meteorológicas. O mesmo ainda gera dados de temperatura ambiente horário para o ano todo.

Na Figura 5.3 pode-se ver o efeito da diferença na incidência da irradiação sobre o plano do coletor com diferentes inclinações do mesmo, mostrando a variação anual da irradiação mensal para a cidade de Porto Alegre/RS. As três curvas foram obtidas computacionalmente para 1,6 m<sup>2</sup> de área de absorção, orientados para o norte.





Figura 5.3 – Comportamento conforme a variação da inclinação do coletor.

## 5.2 Rotina de cálculo

Após as devidas configurações do sistema e do intervalo a serem calculados, o programa entra nas rotinas de cálculo para simular o comportamento do sistema durante o período estabelecido.

As informações climáticas e de radiação são geradas de hora em hora para o ano inteiro pelo programa SeqMet BR para a localização e inclinação escolhida. A partir destas informações, o programa Termosim recalcula baseado no fator modificador de radiação a radiação de hora em hora usando o valor calculado pela equação 5.1.

O programa então calcula minuto a minuto o comportamento do coletor solar e do tanque. Isto se deve às características de convergência do cálculo da estratificação do tanque.

Conforme a incidência de radiação sobre o coletor, o mesmo sofre aquecimento. Portanto, dependendo das configurações, a bomba para circulação pode ser ligada, recalculando a temperatura no coletor. O cálculo da temperatura do coletor é feito através da equação 3.5.

Todos os cálculos referentes aos coletores e tanque são realizados de minuto a minuto, mas com os dados climáticos e de irradiância horário.

Os resultados posteriormente são apresentados em resumo mensal ou em gráficos horários.

### 5.3 Mudanças e Implementações necessárias

O programa Termosim estava preparado para simular coletores planos, mas não estava ainda preparado para simular os coletores com tubo evacuado devido às características do mesmo. Considerando que para coletor plano normalmente se utiliza termosifão para fins domésticos, o coletor de tubos devido a sua geometria necessita circulação forçada.

Diversas pequenas alterações foram necessárias em todo o programa para preparar o mesmo para os cálculos do tubo bem como ajustar parâmetros novos para outros tipos de cálculos. Dentre estas alterações podem-se citar algumas como a preparação do programa para considerar áreas diferentes de absorvedor, abertura e área total, a inclusão da opção de homogeneizar a temperatura inicial da água para a temperatura ambiente do tanque, o cálculo de volume do tanque e a inserção de algumas imagens de coletores planos e de tubos para diferenciação conforme as escolhas.

A Figura 5.4 mostra a implementação da tela de cadastramento dos coletores de tubo, onde o usuário pode cadastrar os diferentes parâmetros necessários e observar a curva gerada a partir dos dados fornecidos. Nesta tela o usuário também deverá informar o número de coletores e a vazão desejada. O sistema foi implementado com banco de dados de forma que os parâmetros do coletor possam ser salvos e possibilitar utilizá-los em outros momentos.

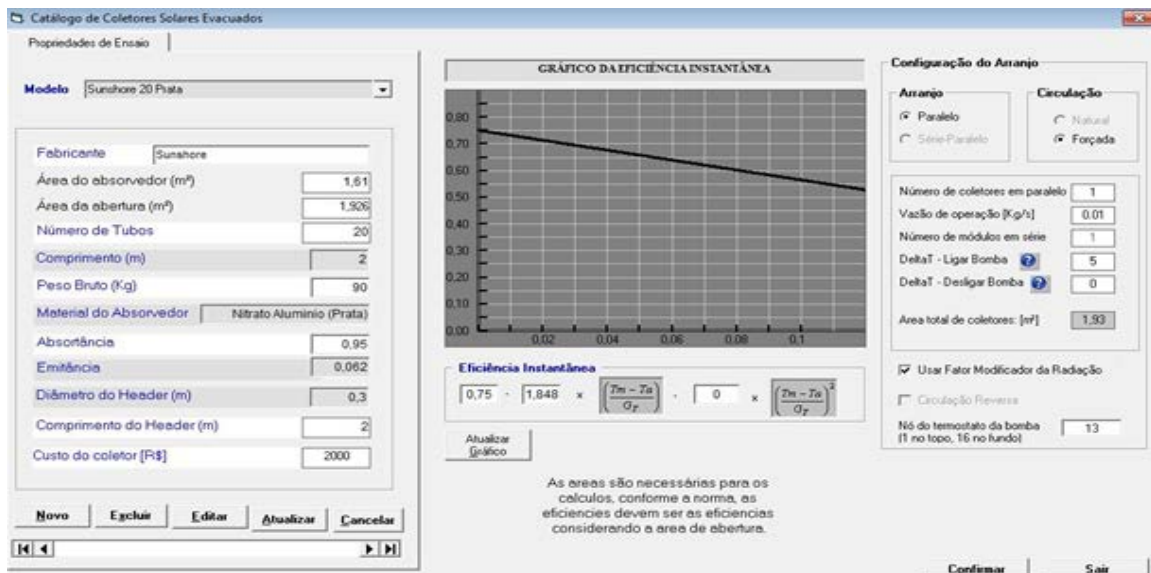


Figura 5.4 – Tela de cadastramento de coletores de tubos.

Algumas rotinas novas de cálculo foram criadas, que permitem ao programa considerar a correção da radiação para o tubo, e calcular as temperaturas no coletor de acordo com a vazão estabelecida e com a radiação simulada.

As estruturas de cálculo do tanque foram mantidas pois o tanque não sofre alteração com o modelo do coletor.

Outra implementação foi a inserção do fator modificador da radiação. Utilizando os valores da Tabela 3.2 pode-se obter uma equação representativa no intervalo de 0° a 90°. A equação foi interpolada utilizando o software Grapher 4.0

$$K_{\tau\alpha} = 1.033253968 - 0.01253944204 \times \theta + 0.0008602092352 \times \theta^2 - 0.000009537037037 \times \theta^3 \quad (5.1)$$

onde  $K_{\tau\alpha}$  é o fator de modificação do ângulo de incidência e  $\theta$  é o ângulo de incidência em graus, calculado a partir da expressão 2.7. A Figura 5.5 mostra a curva obtida pela equação de ajuste (Equação 5.1) à curva dos dados encontrados por Tüv, 2007, conforme a Tabela 3.2.

A radiação solar direta horária deverá ser multiplicada por  $K_{\tau\alpha}$  para um coletor tubular, sendo que ângulos iguais ou superiores a 90° o fator  $K_{\tau\alpha}$  deverá ser 0.

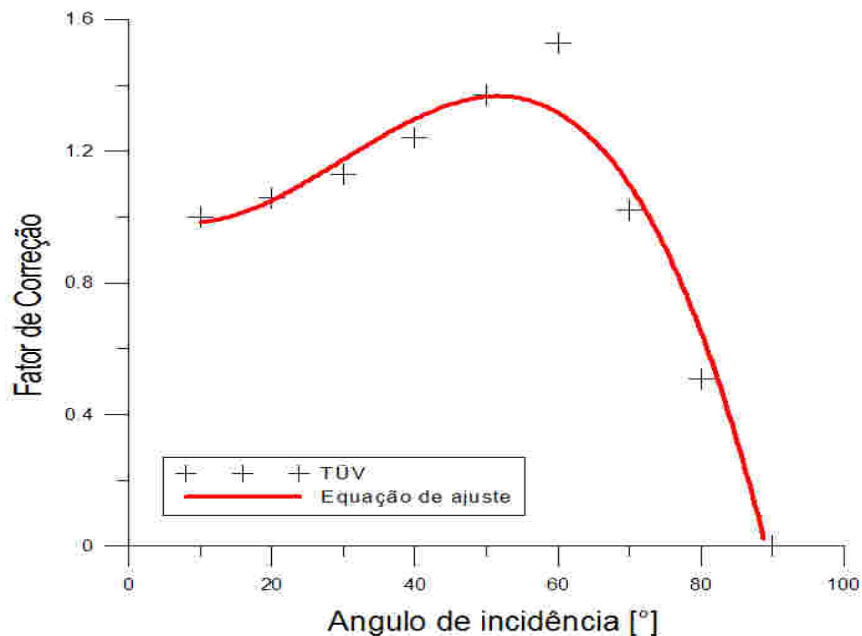


Figura 5.5 – Curva experimental e curva de ajuste.

A Figura 5.6 mostra um exemplo de curvas de radiação simulada sobre o plano inclinado do coletor para Porto Alegre em um dia de Julho. Pode-se observar as curvas da

radiação com e sem a modificação para o coletor de tubos. O coletor está voltado para o norte, com 45° de inclinação.

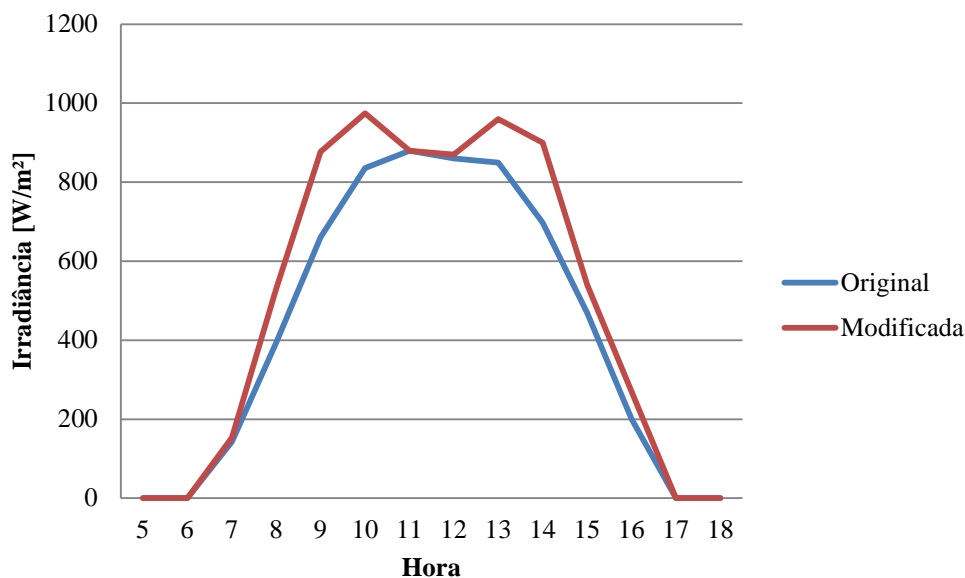


Figura 5.6 – Curvas de irradiância simulada para Porto Alegre.

As rotinas de cálculo com circulação forçada sofreram modificações na parte do tubo evacuado. O programa originalmente calculava a distribuição de temperatura no coletor de hora em hora, e no caso do tanque de minuto em minuto. Para o coletor de tubo evacuado, devido à característica da pouca perda térmica e da circulação forçada, foi necessário programar o cálculo do coletor minuto a minuto.

O coletor de tubos evacuados tem uma capacidade térmica muito grande quando comparado ao coletor plano. Isto se deve ao grande volume de água armazenada. Conforme medições realizadas no laboratório, cada tubo armazena em torno de 2,6 kg de água, e o cabeçote armazena em torno de 10 kg de água. Com isto, o coletor de 20 tubos armazena em torno de 62 kg de água.

Esta água deverá ser considerada para o cálculo da diferença de temperatura entre o tanque e a saída do coletor. Usando a equação 3.5 é possível estabelecer a diferença de temperatura entre a água de entrada e saída do coletor com a bomba desligada. Assim, é possível determinar quando se deve ligar a bomba.

Quando a temperatura de saída for maior que a temperatura no local do termostato mais a diferença de temperatura, conforme configurado na tela de parâmetros do coletor, a

vazão é igualada à vazão pré-estabelecida, o que equivale a dizer que a bomba de circulação foi ligada.

Com a bomba ligada, é recalculada a distribuição de temperatura no coletor, considerando que no primeiro instante a temperatura era da água parada, e depois com a circulação, ao entrar água mais fria, esta temperatura é recalculada ficando menor. Isto acontece até o momento em que a diferença de temperatura fique menor que o configurado no programa, e então a vazão é igualada a zero, ou seja, bomba é desligada.

Estes cálculos são realizados de minuto a minuto, e portanto por questões simplificativas é considerado que a radiação se mantém igual durante 1 hora, e a entrada de água no tanque é igual durante 1 minuto.

A quantidade de calor útil então entregue ao tanque é somada por hora, considerando a quantidade entregue a cada minuto. Somente é entregue calor útil ao tanque nos momentos em que a bomba permaneceu ligada.

## 6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta dissertação foi utilizado o sistema de tanque horizontal com resistência elétrica interna e coletores solares para aquecimento de água. Para simplificar, alguns parâmetros foram tratados como fixos, como a temperatura de consumo de água quente, a demanda diária, e os horários.

Algumas configurações como o volume, tipo, isolamento e outras características do tanque também foram mantidas constantes em todas as simulações.

As simulações foram realizadas observando os seguintes parâmetros:

- Sistema com Energia Solar: sim
- Energia Auxiliar: Eletricidade
- Geometria com tanque horizontal e apoio elétrico interno
- Reservatório Térmico de 600 litros com 1 m de diâmetro e 0,84 m de comprimento
- Temperatura inicial do reservatório térmico a 50 °C
- Resistência elétrica auxiliar com acionamento a 45 °C e desligamento a 50 °C, com potencia de 5000 W
- consumo de 400 litros por dia a 40 °C, dividido em 100 litros as 8 h e 150 litros as 19 h e 20 h.

### 6.1 Cenários comparativos

Para as simulações foi montado um cenário único familiar para ser utilizado em diferentes regiões do Brasil. Este cenário prevê uma estrutura doméstica de 04 pessoas e um consumo diário de 400 litros de água quente por dia (100 litros por pessoa). O consumo foi dividido em 100 litros no início da manhã e 300 litros no final da tarde. Considerando este consumo, foi utilizado um tanque de 600 litros de capacidade.

Os parâmetros das instalações dos coletores foram ajustados conforme a localização, observando a orientação para o norte e a inclinação local adequada.

Para a região sul a cidade escolhida foi Porto Alegre/RS, com inclinação dos coletores a 40°. Para a região central do país a cidade escolhida foi Belo Horizonte/MG, com inclinação dos coletores a 30°. Para a região nordeste a cidade escolhida foi Fortaleza/CE, com inclinação dos coletores de 10°.

A fração solar para esta dissertação foi definida como a parcela do aquecimento necessário que foi oriunda da energia solar, ou seja, a quantidade de energia transferida para a água dividida pela quantidade de energia necessária para a demanda de água quente. A fração solar deve ser definida em uma instalação com um valor que não onere demais a mesma. Uma fração solar muito alta irá requerer alto custo de instalação para pouco ganho térmico adicional. Como um padrão de mercado, os instaladores costumam trabalhar com um valor em torno de 70%.

## 6.2 Dimensionamento do cenário

Para realizar as simulações é necessário um dimensionamento prévio. Este foi estabelecido observando as regras mais comuns de uma instalação de um sistema de aquecimento solar utilizado pelos instaladores na região sul do país. Para cada pessoa costuma-se estimar um consumo de 100 litros de água quente, e para cada 100 litros de água quente, 1,5 m<sup>2</sup> de área de coletores.

Para o tanque foi utilizado um de 600 litros de capacidade (100 litros de armazenamento por m<sup>2</sup> de coletor).

O cenário de consumo considerou que  $\frac{1}{4}$  do consumo aconteceria pela manhã, às 08:00, e o restante  $\frac{3}{4}$  no início da noite, entre às 19 e 21 horas. Este cenário está de acordo com o perfil de consumo de água quente estabelecido pela CEMIG e pela Eletrocel, 2007, conforme citado em Napolini *et al.*, 2011.

Estes parâmetros foram inseridos no *software* de simulação e o mesmo cenário foi considerado em todas as regiões do país. Esta consideração foi feita para a comparação, pois é necessário deixar os parâmetros fixos para poder comparar os coletores em situações de que apenas a temperatura ambiente, radiação e temperatura da água da rede variem.

Os outros parâmetros adotados no *software* foram que o tanque teria sempre uma resistência elétrica interna, com termostato que aciona a resistência quando a água do tanque atinge 45 °C ou menos, e desliga a resistência quando a água do tanque está acima de 50 °C. O termostato foi configurado para estar a 0,5 m do fundo do tanque, ou seja, aproximadamente no meio do tanque. A resistência está instalada a 0,3 m do fundo do tanque e a sua potência é de 5000 W.

Considera-se que o tanque estará inicialmente todo a 50 °C, para a resistência não ligar na primeira noite de simulação.

### 6.3 Simulações

Foi realizado um conjunto de simulações observando que a fração solar fosse aproximadamente 70%, e com isto a área absorvedora dos coletores foi alterada de forma a satisfazer esta condição. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 6.1. De acordo com o consumo estabelecido, a energia consumida para Porto Alegre é de aproximadamente 12800 MJ por ano, para Belo Horizonte é de 11800 MJ por ano e para Fortaleza o valor é de 8500 MJ por ano.

Tabela 6.1 – Resultados da simulação para 70% da energia consumida.

Local	Tipo Coletor	Área total absorvedora necessária [m <sup>2</sup> ]
Porto Alegre/RS 40° inclinação	Plano tipo B	3,03
	Plano tipo A	2,87
	Tubular	2,23
Belo Horizonte/MG 30° inclinação	Plano tipo B	2,74
	Plano tipo A	2,61
	Tubular	2,14
Fortaleza/CE 10° inclinação	Plano tipo B	1,46
	Plano tipo A	1,39
	Tubular	1,10

Outra comparação realizada foi a energia necessária para manter um tanque de 660 litros aquecidos durante 1 ano com temperatura disponível para consumo acima de 45°. Como exemplo na cidade de Porto Alegre são necessários aproximadamente 20.000 MJ para o consumo estabelecido. Este valor varia em função do clima e temperatura de entrada da água além, evidentemente, do próprio consumo.

Considerando que o tanque seja mantido sempre pronto para o consumo, a diferença entre o que o coletor fornece e a demanda deve vir do aquecimento auxiliar. A diferença entre o necessário para consumo e o que se precisa para manter o tanque aquecido se deve às perdas



térmicas da tubulação e do tanque. A Tabela 6.2 mostra os valores aproximados considerando o cenário para as cidades propostas.

Tabela 6.2 - Calor necessário para manter tanque aquecido

Cidade	Energia necessária total [MJ] (elétrica + solar)
Porto Alegre	20.000
Belo Horizonte	17.500
Fortaleza	11.000

Considerando os valores da Tabela 6.2, pode-se recalculá-la a Tabela 6.1 de forma a obter uma fração solar de 70% da energia total necessária para manter o tanque sempre acima de 45°C. A Tabela 6.3 mostra os resultados obtidos considerando a demanda energética proposta na Tabela 6.2.

Tabela 6.3 – Resultados da simulação para 70% da energia total

Local	Tipo Coletor	Área total absorvedora necessária [m <sup>2</sup> ]	Área total Ocupada [m <sup>2</sup> ]
Porto Alegre/RS 40° inclinação	Plano tipo B	6,10	6,84
	Plano tipo A	5,45	6,12
	Tubular	3,34	6,36
Belo Horizonte/MG 30° inclinação	Plano tipo B	4,76	5,22
	Plano tipo A	4,51	5,04
	Tubular	3,17	6,04
Fortaleza/CE 10° inclinação	Plano tipo B	1,89	2,12
	Plano tipo A	1,79	2,01
	Tubular	1,43	2,72

Com estas informações, e considerando os dados constantes na Tabela 3.3 pode-se estabelecer um valor de custo de coletores para cada tipo, conforme mostrado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Custos de coletores da simulação

Local	Tipo Coletor	Custo de área coletora
Porto Alegre/RS 40° inclinação	Plano tipo B	R\$ 1.830,00
	Plano tipo A	R\$ 1.744,00
	Tubular	R\$ 3.507,00
Belo Horizonte/MG 30° inclinação	Plano tipo B	R\$ 1.428,00
	Plano tipo A	R\$ 1.443,00
	Tubular	R\$ 3.328,00
Fortaleza/CE 10° inclinação	Plano tipo B	R\$ 567,00
	Plano tipo A	R\$ 572,80
	Tubular	R\$ 1.501,00

Outras comparações foram realizadas, conforme mostra a Figura 6.1. Nesta comparação foram utilizados coletores conforme especificado na tabela 3.4 para os tipos A e B. O objetivo foi comparar quantos coletores seriam necessário para se obter aproximadamente o mesmo resultado em uma instalação. A Figura 6.1 mostra os resultados obtidos mês a mês para quantidade diferente de coletores de cada tipo.

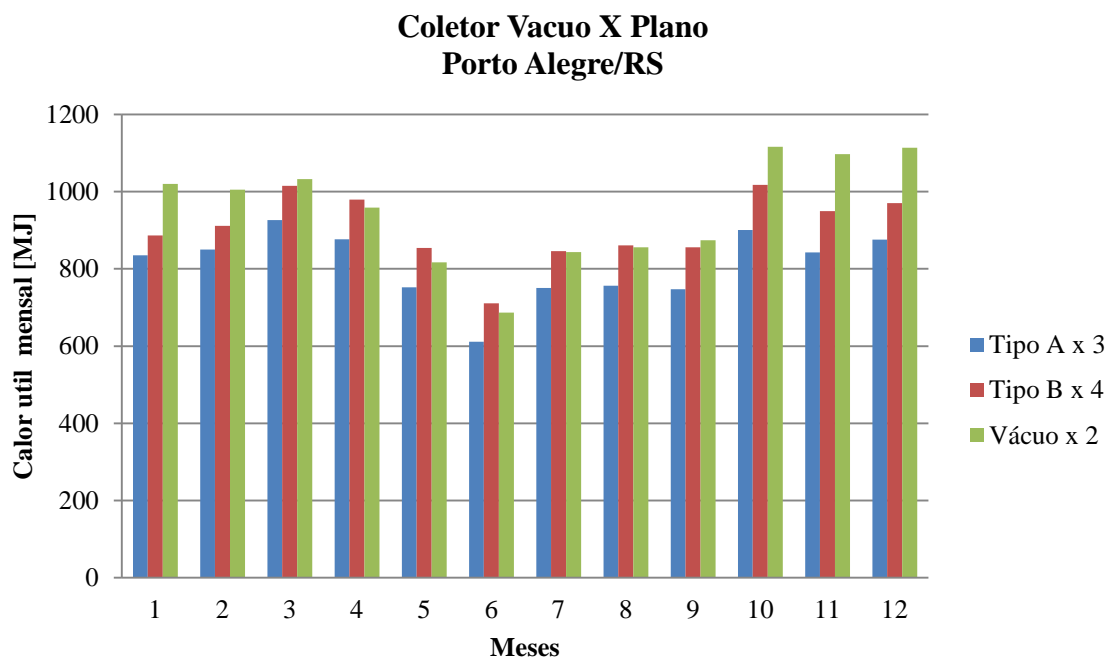


Figura 6.1 – Comparação para Porto Alegre/RS

## 6.4 Discussão dos Resultados

Conforme os resultados obtidos na Tabela 6.1, pode-se observar que quanto mais quente o clima do local onde está a instalação, mais parecido é o comportamento dos coletores. Devido a grande vantagem do coletor tubular ser o isolamento, em locais quentes isto não é tão necessário, e portanto não aparece muita diferença na utilização de um coletor plano ou um a vácuo. No caso de Fortaleza, a área necessária para dar o mesmo resultado é muito próxima no coletor padrão A e no coletor de tubos.

Observando os resultados obtidos, pode-se verificar que o coletor de tubos é melhor que o coletor plano, quando considerada a área de absorção. Analisando a tabela 6.3 pode-se perceber que o coletor de tubos pode gerar muito mais calor útil com a mesma área absorvedora, mas quando a comparação considera a área total ocupada, o ganho real não é significativo.

Considerando a Tabela 3.3, e os valores médios de mercado encontrados, pode-se concluir baseados na tabela 6.1 que diante do cenário atual ainda é mais vantajosa a utilização de mais coletores planos, pois seu valor ainda é muito inferior ao coletor de tubos.

A Tabela 6.4 mostra que entre os coletores planos tipo A e tipo B comuns com cobertura tem-se pouca diferença de custo, mas a relação entre o sul do país e o nordeste do país para os coletores planos e de tubos evacuados é bem diferente. Pode-se perceber que para o sul do país a relação do custo relativo da tecnologia de tubos de vácuo é quase o dobro do valor, enquanto no nordeste é quase o triplo.

Analisando as Figuras 3.10 e 3.13, pode-se verificar que para climas frios com pouca irradiância solar o coletor de tubos evacuados tem uma eficiência instantânea muito maior que os outros coletores. Mas, quando a temperatura ambiente é maior, e a irradiância é mais alta, tem-se uma faixa onde coletores planos tem igual ou maior eficiência que o coletor de tubos. Com isto é possível perceber que em qualquer instalação deve-se considerar o clima e a variação da irradiância anual, pois deve-se considerar em que momentos o aquecimento é mais importante e qual o comportamento que os coletores tem naqueles momentos.

Uma instalação comercial de um hotel em um local da serra do RS onde a predominância do uso é no inverno, ou seja, clima frio, o coletor de tubos pode ser mais indicado devido a sua melhor eficiência. Mas, se a instalação estiver no nordeste, o maior custo pode não ser justificável.

Outra questão observada analisando os gráficos das Figuras 3.10 a 3.13 é que os coletores planos variam muito sua eficiência com as variações climáticas, enquanto o coletor

de tubos pouco muda entre uma situação de clima desfavorável (Figura 6.1) e uma situação mais favorável (Figura 3.13).

Também é importante considerar o valor de área total (Tabela 6.3) em relação a área absorvedora. Nos coletores planos a área total é pouco maior, enquanto nos coletores tubulares a área total é muito maior. Considerando os dados da Tabela 3.1, pode-se considerar uma relação para calcular a área total dos coletores da Tabela 6.3.

## 7 CONCLUSÕES

Para esta dissertação foram desenvolvidos ensaios e testes para caracterização dos tubos e dos coletores tubulares com isolamento a vácuo que estão entrando no mercado nacional brasileiro. Por se tratar de uma nova tecnologia a nível nacional, muitas coisas precisam ser desenvolvidas e ensaiadas, de forma que perguntas simples possam ser respondidas.

Os ensaios dos tubos permitiram verificar que existem produtos com características diferentes no mercado. Inclusive tubos de um mesmo fabricante podem ter características bem diferentes, o que faz com que a eficiência do sistema seja diferente.

A construção da nova bancada para ensaios permite ao laboratório realizar os testes necessários para a caracterização dos coletores, podendo realizar as comparações necessárias entre as tecnologias presentes no mercado nacional.

Conhecendo melhor o comportamento dos coletores a partir dos ensaios realizados, foi possível modificar um programa de simulação computacional desenvolvido no laboratório e para o mesmo simular os coletores de maneira correta. Também foi implementado o fator modificador do ângulo de incidência no programa de simulação de forma a corrigir a radiação solar para os coletores tubulares.

O programa de simulação então pôde ser utilizado para realizar comparações entre os coletores em diferentes situações de instalação e regiões do país.

A partir dos resultados, pode-se verificar que os coletores tubulares são uma opção interessante de tecnologia que está sendo introduzida no mercado nacional. São coletores com algumas vantagens para climas frios em relação aos coletores planos convencionais, mas, para climas tropicais, como ocorre na maioria das regiões do país, possuem desvantagens em relação aos coletores planos nacionais.

Os coletores tubulares ocupam uma área maior que os coletores planos para a mesma área absorvedora. O rendimento extra que os mesmos possuem não justifica a maior área ocupada na maioria das regiões do país. Com um maior número de coletores planos o rendimento é equivalente ao uso de coletores tubulares.

Devem-se considerar em uma instalação alguns fatores, como a área que deverá ser ocupada e a época de principal utilização. Não adianta uma instalação que funcione bem no verão para uma utilização principal no inverno. Assim, conforme o local, clima e utilização, uma tecnologia pode ser melhor que a outra.

A partir dos resultados computacionais, pode-se concluir que em locais com temperaturas baixas e com utilização principal no inverno, o coletor tubular é uma boa opção devido ao rendimento ser maior que o do coletor plano, apesar de que o custo inicial da instalação seja maior.

Os coletores tubulares podem se tornar muito competitivos no momento em que o preço diminuir, e ficarem com custos mais próximos aos dos coletores planos. Atualmente a diferença de custo para a mesma área coletora é de 2 a 3 vezes a mais para um coletor de tubos. Com isto é possível a instalação de mais coletores planos, podendo ter um desempenho melhor em climas moderados com o mesmo custo.

Se a comparação entre os coletores for feita considerando apenas a área absorvedora, o coletor de tubos tende a ter um melhor desempenho, ocupando para climas mais frios como no sul do país, a metade de área absorvedora que os coletores planos. Contudo em climas quentes os valores de área absorvedora se aproximam.

Se a comparação é realizada usando a área total, pode-se perceber que os valores são parecidos em todas das regiões do país entre os dois tipos de coletores.

Com isto, pode-se concluir que a decisão entre a utilização de uma tecnologia ou outra deverá ser embasada primeiramente na região da instalação, e o tipo de clima encontrado. Depois, sobre a utilização e época de utilização, e assim determinar o custo da instalação para comparar a diferença na instalação de mais coletores planos ou coletores de tubo.

Para trabalhos futuros sugere-se a comparação por períodos prolongados na bancada de testes entre os coletores tubulares e planos, de forma a estabelecer o comportamento em diferentes situações climáticas dos mesmos. Também a implementação de cálculos das características físicas dos coletores tubulares, como a superfície seletiva, número de camadas, diâmetro, etc..., similar ao que já ocorre no coletor plano no programa Termosim. Também é sugerida a realização na bancada de ensaio de coletores tubulares com tanque acoplado e a devida implementação no programa Termosim.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15747-2 - Sistemas Solares Térmicos e Seus Componentes - Coletores Solares Parte 2 - Métodos de Ensaio**, Rio de Janeiro, 2009.

Abreu, Samuel L.; **Desenvolvimento de um sistema de aquecimento solar compacto utilizando termossifões bifásicos**, UFCS, 2003.

Budihardjo, I.; Morrison, G.L; Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. **Solar Energy**, v. 83, p. 49–56, 2009.

Cardoso, I.; Rosa, Fabio N.; Manea, T.; Krenzinger, A.; **Comparação de parâmetros de desempenho entre tubos de coletores solares tubulares a vácuo**, CIBEM, 2011.

Dufie, John A.; Beckman, William A.; **Solar Engineering of Thermal Processes**, Editora John Wiley & Sons, EUA, 1991.

He Zinian, GeHongchuan, Jiang Fulin And Li We1, **A comparison of optical performance between Evacuated collector tubes with flat and semicylindric Absorbers**, Beijing solar energy research institute & national engineering research centre for renewable energy, China, 1997.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água - coletores solares**. Rio de Janeiro, 2012.

Manea, T.; Rosa, Fabio N.; Perin, A.; Krenzinger, A.; **Determinação de parâmetros de desempenho para Coletores solares tubulares a vácuo**, ASADES, 2010.

Manea, T.; **Construção de uma bancada para ensaios de coletores solares tubulares a vácuo**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

Marroquin, A. I.; **Relação Custo Benefício para Coletores Solares Planos e Parâmetros de Opção**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 1989.

Napolini, Helena F.; Rütther, R.; Redução da demanda no horário de ponta proporcionada pelo preaquecimento solar da água para o banho, **Revista Brasileira de Energia Solar**, a. 2, v. II, n. 2, p. 138-148, 2011.

Pozzebon, Felipe B., **Aperfeiçoamento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água por energia solar**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

Rosa, Alexandre B.; **Sistema de Aquecimento Solar de Água**, Editora Viena, Brasil, 2010.

Rosa F. N., Manea T. F., Krenzinger A., Cardoso I. A. Projeto e construção de uma bancada de testes para coletores solares no LABSOL-UFRGS. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, 2011.

Tang, R.; Yang, Y.; Gao, W., Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles, **Solar Energy**, v. 85, p. 1381 – 1389, 2011.

Tüv, Technischer Überwachungs-Verein; **Sunshore Solar Keymark Report número 21206678**, 2007.



## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10184 - Coletores Solares planos para líquidos – determinação do rendimento térmico**, Rio de Janeiro, 1988.

AGILENT. **User's Guide, Agilente 34970A, Data Acquisition / Switch Unit**, 2003.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO. Site oficial da empresa – **www.celpe.com.br** – acessado em Março de 2012.

IEC. International Electrotechnical Commission. **IEC 60751 - Industrial Platinum Resistance Thermometer Sensors**. Genebra, 1995.

ISO. International Standard Organization. **Test Methods for Solar Collectors - Part 1 - Thermal Performance of Glazed Liquid Heating Collectors Including Pressure Drop**. Genebra, 1994.

Manea, T.; Rosa, Fabio N.; Krenzinger, A.; **Dispositivo para medir o diferencial de temperatura em coletores solares para aquecimento de água**, ASADES, 2011.

SOLAR SERVER – ONLINE PORTAL TO SOLAR ENERGY. Site oficial da empresa – **www.solarserver.com** – acessado em Janeiro de 2012.

SOLARES AQUECIMENTO SOLAR. Site oficial da empresa – **www.solares-online.com.br** – acessado em Fevereiro de 2012.

Zilles, R. **Comparação Experimental de Testes de Coletores Solares Planos com Simulador e com Radiação Solar**. Dissertação de mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 1987.