

**PEDRO JACOB FILHO**

**ESTUDO DO RENDIMENTO TÉRMICO DE UM AQUECEDOR SOLAR  
PARABÓLICO REDONDO PARA VIABILIDADE DE USO COMERCIAL E  
RESIDENCIAL**

**PEDRO JACOB FILHO**

**ESTUDO DO RENDIMENTO TÉRMICO DE UM AQUECEDOR SOLAR  
PARABÓLICO REDONDO PARA VIABILIDADE DE USO COMERCIAL E  
RESIDENCIAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA

Guaratinguetá  
2016

|      |  |
|------|--|
| J15e | <p>Jacob Filho, <u>Pedro</u><br/>Estudo do rendimento térmico de um aquecedor solar parabólico redondo para viabilidade de uso comercial e residencial / Pedro Jacob Filho. – Guaratinguetá, 2016.<br/>65 f. : il.<br/><u>Bibliografia</u> : f. 63-65</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.<br/>Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza</p> <p>1. Radiação solar 2. Aquecedores solares de água 3. Temperatura I.<br/>Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 551.521.1 (043)</p> |
|------|--|

*PEDRO JACOB FILHO*

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: Energia

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. EDERALDO GODOY JUNIOR  
UITAU

**Julho de 2016**

## **DADOS CURRICULARES**

### **PEDRO JACOB FILHO**

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>NASCIMENTO</b> | 12.04.1957 – Cruzeiro / SP  |
| <b>FILIAÇÃO</b>   | Pedro Jacob ( <i>in memoriam</i> )<br>Maria Dóra Mendes Jacob ( <i>in memoriam</i> )                    |
| <b>1978/1982</b>  | Curso de Graduação<br>Engenharia Civil - Universidade de Taubaté  |
| <b>2010/2012</b>  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, nível<br>de Especialização, na Universidade 9 de Julho. |

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus filhos Pedro e Mário e à Luz, Giselia, que me acompanham em todos os momentos desta minha vida, participando e me ajudando a evoluir como um ser humano melhor.

Estou vivendo com o melhor que posso e com muito amor por vocês.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos que acontecem em minha vida.

Agradeço aos meus filhos Pedro e Mário que são presentes, com muito amor, na minha vida. Amo vocês.

Agradeço aos meus pais Pedro e Dórinha (*in memoriam*) que sempre se mostraram felizes e orgulhosos com minhas conquistas. Amo vocês.

Agradeço à Giselia que me questionou, a tempos, sobre voltar a estudar e, desta forma, me incentivou a embarcar nesta aventura do conhecimento. Amo você.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza, que se mostrou paciente e, com muito profissionalismo, orientação e dedicação, me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho. Tenho muito respeito.

Agradeço a todos do Centro de Energias Renováveis, Maria Cláudia, Thaís, Paulo Armando, Pedro, Evaldo, Júlia e Tiago. Foi gratificante e importante estar com vocês.

Agradeço aos Professores das disciplinas que cursei durante todo o Mestrado.

Agradeço às colaboradoras da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pelo carinho no atendimento.

Agradeço à Cristina, Renata e Rodrigo, da secretária da Pós-Graduação pela dedicação, alegria e interesse no atendimento.

Agradeço a todas as pessoas que fazem parte da minha vida e que me auxiliam na missão que tenho neste mundo.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas, graças a Deus, não sou o que era antes”. (Martin Luther King)



JACOB, P. F. **Estudo do rendimento térmico de um aquecedor solar parabólico redondo para viabilidade de uso comercial e residencial**. 2016. 69 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### RESUMO

Esta dissertação teve como objetivo a utilização de uma antena parabólica de diâmetro de 2,20 m como aquecedor solar de água de fluxo contínuo. Para a realização dos experimentos foi necessária a adequação da antena de tal modo que os raios solares refletidos passassem pelo foco da mesma, contendo uma panela de pressão pintada de preto fosco em cujo interior tem uma serpentina de cobre para absorver a radiação solar. A parte experimental contou com as medidas do valor da radiação solar, temperatura de entrada e saída da água, temperatura ambiente ao sol, temperatura no foco e a velocidade do vento. Através das medidas realizadas calculou-se a taxa da quantidade de calor e do rendimento térmico obtidos com vazões de 3,6 L/h até 36 L/h com incrementos de 3,6 L/h. Para a vazão de 25,2 L/h obteve-se o melhor rendimento térmico com 44,45%, num dia típico de intensidade solar de  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ , sem nuvens e com velocidade do vento abaixo de 2m/s. Entretanto para um dia totalmente nublado típico a radiação solar foi de  $120 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  e o valor da temperatura de saída da água do aquecedor foi igual ao valor da temperatura de entrada. Verificou-se, assim, a possibilidade da antena parabólica ser empregada como aquecedor solar de água com fluxo contínuo para fins comerciais e residenciais e, também, como um sistema de pré-aquecimento de fluídos.

**Palavras Chave:** Aquecedor solar. Radiação solar. Vazão. Temperatura. Rendimento térmico.

JACOB, P. F. **Study the thermal efficiency of a solar heater round parabolic for viability of comercial and residential use.** 2016. 69 f. Dissertation (Master's degree of Mechanical Enginnering) – Faculty of Engineering from the Campus of Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### **ABSTRACT**

This dissertation had as objective the use of a satellite dish diameter of 2.20 m as solar heater continuous flow of water. For the realization of experiments was necessary the adequacy of the antenna so that the solar rays reflected received by focus of same, containing a pressure cooker painted black opacities in whose interior has a serpentine of copper to absorb solar radiation. The experimental part featured the measures of the value of the solar radiation, input and output temperature of water, sun ambient temperature, the temperature in the focus and wind speed. Through measurements performed it was calculated the amount of heat obtained with adequate flow of 3.6 L/h up to 36 L/h with increments of 3.6 L/h. For the flow of 25,2 L/h it was obtained the best thermal efficiency with 44.45% on a typical day of solar intensity of  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  without clouds and wind speed below 2 m/s. However for a day totally cloudy typical solar radiation was  $120 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  and the temperature of the water heater's output was equal to the value of input temperature. It was found, so the possibility of satellite dish be used as solar water heater with continuous flow for commercial and residential purposes and also as a pre-heating system fluids.

**Keywords:** Solar heater. Solar radiation. Flow rate. Temperature. Thermal efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Aplicações práticas da energia solar .....   | 20 |
| Figura 2 – Diagramas de radiação solar na atmosfera terrestre.....  | 23 |
| Figura 3 – Variação da massa de ar atravessada pela radiação solar .....  | 24 |
| Figura 4 – Radiação solar global e suas componentes .....   | 24 |
| Figura 5 – Distribuição de energia incidente em um corpo translúcido .....  | 25 |
| Figura 6 – Nível de irradiação solar para diferentes locais da Terra .....  | 26 |
| Figura 7 – Média anual da radiação solar no Brasil .....  | 27 |
| Figura 8 – Participação da energia solar térmica no Brasil .....  | 28 |
| Figura 9 – Expectativa de crescimento de aquecedores solares no Brasil .....  | 30 |
| Figura 10 – Mercado brasileiro de aquecimento solar .....   | 31 |
| Figura 11 – Concentradores de receptor central .....  | 32 |
| Figura 12 – Concentrador heliostático .....   | 33 |
| Figura 13 – Concentrador de foco linear semicilíndrico parabólico .....   | 33 |
| Figura 14 – Concentrador de foco linear de espelhos facetados .....   | 34 |
| Figura 15 – Tipos de sistemas de concentrador solar parabólico .....  | 35 |
| Figura 16 – Antena parabólica e seus componentes para captação da energia solar.....  | 37 |
| Figura 17 – Painel e serpentina interna de cobre .....  | 37 |
| Figura 18 – Instrumentos usados nas medições .....  | 39 |
| Figura 19 – Posicionamento do concentrador em relação ao sol .....  | 41 |
| Figura 20 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  | 48 |
| Figura 21 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$   | 49 |
| Figura 22 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$   | 49 |
| Figura 23 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$   | 50 |
| Figura 24 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$   | 50 |
| Figura 25 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar entre $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ e $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ ..... | 51 |
| Figura 26 – Gráficos taxa quantidade de calor e rendimento térmico para $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$   | 53 |
| Figura 27 – Gráficos taxa quantidade de calor e rendimento térmico para $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  | 55 |
| Figura 28 – Gráficos taxa quantidade de calor e rendimento térmico para $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  | 56 |
| Figura 29 – Gráficos taxa quantidade de calor e rendimento térmico para $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  | 58 |
| Figura 30 – Gráficos taxa quantidade de calor e rendimento térmico para $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados das medições com índice de radiação solar de $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                                | 42 |
| Tabela 2 – Dados das medições com índice de radiação solar de $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                                 | 43 |
| Tabela 3 – Dados das medições com índice de radiação solar de $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                                 | 43 |
| Tabela 4 – Dados das medições com índice de radiação solar de $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                                 | 44 |
| Tabela 5 – Dados das medições com índice de radiação solar de $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                                 | 45 |
| Tabela 6 – Médias e desvios padrões com índice de radiação solar de $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ ...                            | 46 |
| Tabela 7 – Médias e desvios padrões com índice de radiação solar de $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                           | 46 |
| Tabela 8 – Médias e desvios padrões com índice de radiação solar de $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                           | 47 |
| Tabela 9 – Médias e desvios padrões com índice de radiação solar de $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                           | 47 |
| Tabela 10 – Médias e desvios padrões com índice de radiação solar de $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....                          | 48 |
| Tabela 11 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico com índice de radiação solar de $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ ..... | 53 |
| Tabela 12 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico com índice de radiação solar de $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....  | 54 |
| Tabela 13 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico com índice de radiação solar de $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....  | 56 |
| Tabela 14 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico com índice de radiação solar de $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....  | 57 |
| Tabela 15 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico com índice de radiação solar de $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ .....  | 59 |
| Tabela 16 – Preços dos equipamentos.....   | 60 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| ABRAVA  | Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento |
| ANEEL   | Agência Nacional de Energia Elétrica   |
| CRESESB | Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito           |
| IPCC    | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>                                 |
| MDL     | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| a             | altura                   |
| c             | calor específico         |
| d             | diâmetro                 |
| h             | hora                     |
| I             | Índice de radiação solar |
| l             | litro                    |
| m             | metro                    |
| s             | segundo                  |
| <i>m</i>      | massa                    |
| $\eta$        | rendimento               |
| q             | vazão                    |
| Q             | quantidade de calor      |
| r             | raio da circunferência   |
| S             | área                     |
| T             | tempo em segundos        |
| V             | volume                   |
| W             | watt                     |
| $\mu\text{m}$ | $10^{-6}$ m              |
| °C            | graus celsius            |
| %             | porcentagem              |
| $\Delta t$    | diferença de temperatura |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 14 |
| 1.1 OBJETIVOS .....   | 16 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....   | 17 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....  | 17 |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | 18 |
| 2.1 AS ENERGIAS RENOVÁVEIS .....  | 18 |
| <b>2.1.1 A Energia Solar</b> .....  | 19 |
| 2.2 RADIAÇÃO SOLAR .....  | 21 |
| 2.3 AQUECIMENTO SOLAR DE LÍQUIDOS .....   | 27 |
| 2.4 OS AQUECEDORES SOLARES .....  | 29 |
| <b>3 PARTE EXPERIMENTAL</b> .....   | 37 |
| 3.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS .....   | 39 |
| 3.2 EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS .....  | 40 |
| 3.3 EXPERIMENTOS .....  | 41 |
| <b>3.3.1 Condições experimentais com índice de radiação de 1000 W/m<sup>2</sup></b> ..... | 43 |
| <b>3.3.2 Condições experimentais com índice de radiação de 800 W/m<sup>2</sup></b> .....  | 43 |
| <b>3.3.3 Condições experimentais com índice de radiação de 600 W/m<sup>2</sup></b> .....  | 44 |
| <b>3.3.4 Condições experimentais com índice de radiação de 400 W/m<sup>2</sup></b> .....  | 44 |
| <b>3.3.5 Condições experimentais com índice de radiação de 200 W/m<sup>2</sup></b> .....  | 45 |
| <b>4 RESULTADOS DA PARTE EXPERIMENTAL</b> .....   | 46 |
| 4.1 MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES DAS TEMPERATURAS .....                                       | 46 |
| 4.2 GRÁFICOS DAS TEMPERATURAS E DESVIOS PADRÕES .....                                     | 48 |
| 4.3 TAXA DA QUANTIDADE DE CALOR E RENDIMENTO TÉRMICO .....                                | 51 |
| <b>4.3.1 Resultados para o índice de radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup></b> .....     | 53 |
| <b>4.3.2 Resultados para índice de radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup></b> .....        | 54 |
| <b>4.3.3 Resultados para índice de radiação solar de 600 W/m<sup>2</sup></b> .....        | 55 |
| <b>4.3.4 Resultados para índice de radiação solar de 400 W/m<sup>2</sup></b> .....        | 57 |
| <b>4.3.5 Resultados para índice de radiação solar de 200 W/m<sup>2</sup></b> .....        | 58 |
| <b>4.3.6 Considerações gerais sobre os resultados</b> .....                               | 60 |
| 4.4 PREÇOS DOS EQUIPAMENTOS .....   | 60 |
| <b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....   | 61 |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 63 |

## 1 INTRODUÇÃO

A segunda década do século XXI está passando por uma fase de ocupação em atividades e ações, para reduzir o aquecimento global, causado pelo consumo excessivo dos combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o xisto betuminoso. Essas ações, junto com a pesquisa e educação, vêm usando fontes de energias alternativas com características renováveis e com o menor dano ambiental e social.

As energias mecânica, elétrica e térmica são fundamentais na vida do ser humano. Todas as atividades elaboradas e executadas pelo homem fazem uso da energia, sejam elas domésticas, de serviços, agropecuária e industriais.

Entre as fontes de energia, o consumo de energia elétrica vem aumentando paulatinamente, decorrente da necessidade de projetar, desenvolver e fabricar produtos para uma população que está exigindo uma melhor qualidade de vida. Como as fontes convencionais oriundas do carvão e do petróleo têm características poluidoras e a de origem hídrica promove danos ambientais como inundações, é necessária a busca por fontes de energias alternativas, com o uso principal de fontes renováveis.

Com o uso das energias renováveis procura-se atender as necessidades humanas e ambientais de modo a minimizar a alteração do clima do planeta. Com elas, há contribuição com soluções sociais, comerciais e industriais, para os desafios relacionados com a grande demanda do uso da energia. Essas soluções podem permitir um melhor nível de vida, menor dependência econômica com a importação de carvão e derivados de petróleo e reduzir os impactos gerais com a utilização desses combustíveis fósseis.

Segundo Oliveira (2011), dentre as energias renováveis, a energia solar se destaca e apresenta vantagens:

- enorme potencial, pois a energia incidente durante um ano, nos continentes, é mil vezes superior ao consumo mundial de energia durante o mesmo período;
- a descentralização, pois a energia solar está presente em todas as regiões do planeta;
- a pouca necessidade das linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica.

Com relação às energias renováveis, o sol é uma fonte gratuita, limpa, renovável e inesgotável de energia. Ela é usada de forma direta, com capacidade de fornecer calor em setores como o residencial, comercial e industrial pelos coletores solares de aquecimento de água e ambiente interno. Também através dos painéis fotovoltaicos pode ser obtida energia elétrica para aparelhos eletroeletrônicos e sistemas de bombeamento de água.

Assim a energia solar pode ser aplicada em coletores solares para aquecer fluídos, na produção de água quente sanitária, aquecimento de piscinas, aquecimento e arrefecimento de



ambientes, produção de água a altas temperaturas em processos industriais e produção de água em temperaturas baixas ou intermediárias em processos de estufa, secadores, dessalinizadores, fornos solares e painéis fotovoltaicos.

Pode ser aproveitada utilizando o calor e a luz com o nome de arquitetura solar.

A utilização da energia solar para aquecimento e geração de energia apresenta benefícios econômicos, energéticos, reduzindo a demanda energética. Do ponto de vista ambiental, contribui para a redução da emissão de carbono para a atmosfera e minimiza a quantidade de gases de efeito estufa.

O aquecimento de água está se desenvolvendo devido à facilidade e simplicidade de instalação e manutenção e custo cada vez mais acessível. A geração de energia elétrica está se apresentando como uma possibilidade cada vez mais viável para o aproveitamento da energia solar.

O potencial de energia solar do Brasil permite a utilização de tecnologias para o seu aproveitamento e é fundamental que se criem políticas, programas e incentivos para o desenvolvimento, a exploração, aplicação e uso da energia solar. É preciso, também, muita informação, educação, formação e treinamento de profissionais para projetos, instalações, operações e manutenção dos equipamentos que utilizam a energia solar. O usuário dos benefícios da energia solar também deve receber treinamentos específicos da utilização dos equipamentos que funcionam à base de energia solar, para um melhor aproveitamento dos recursos dos mesmos.

De acordo com a ABRAVA (2014) (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento) o sistema de aquecimento de água através da utilização da energia solar está participando com 1,03% da matriz energética brasileira.

O governo tem investido em sistemas que utilizam a energia solar para aquecimento de água, nos projetos de conjuntos habitacionais de baixa renda, como exemplo para iniciativas de utilização de energia proveniente de fontes limpas e não poluidoras. Esses sistemas são contemplados com coletores solares planos, que apresentam uma tecnologia simples, preço acessível e que funcionam através do efeito de termosifão, não precisando de energia para seu funcionamento.

Os sistemas de aquecimento solar apresentam tecnologias que possibilitam a conversão da energia solar, em energia térmica com aplicações distintas de acordo com as temperaturas necessárias. As temperaturas abaixo de 90°C são utilizadas, de forma direta, para uso doméstico e comercial e temperaturas médias e altas são utilizadas para fins industriais e

para geração de energia elétrica, de forma indireta. As temperaturas baixas e intermediárias também podem ter a sua aplicação em estufas, secadores, dessalinizadores e cozinhas solares.

São várias as técnicas de utilização da energia solar para aquecimento de água e os concentradores solares se apresentam como uma solução eficiente para atingir temperaturas mais elevadas.

A energia solar gerada através da radiação emitida pelo sol sobre a superfície terrestre é captada por concentradores solares e painéis fotovoltaicos de diversos modelos e estão em constante evolução tecnológica para ampliar a sua capacidade de absorver ou refletir os raios luminosos, elevando o seu rendimento.

O setor de hotéis e hospitais é considerado como grande consumidor de água quente, para atender as necessidades de seus clientes e pacientes e pode se beneficiar técnica e economicamente com o uso da energia solar. O setor industrial requer, em diversas operações do processo, o uso de água quente ou vapor que também pode ser transferido para um gerador produzir energia elétrica.

Este trabalho apresenta um estudo do rendimento térmico de um Concentrador Solar Parabólico Redondo, com resultados práticos e teóricos para viabilizar a utilização no uso doméstico, comercial e industrial, com base no emprego de materiais reciclados, com mecanismos simples e um baixo custo de investimento.

Os resultados dos rendimentos térmicos encontrados podem permitir a viabilidade de geração de vapor, de aquecimento de fluídos e de operações com diferentes volumes de vazão, colaborando com a redução dos custos operacionais.

Este modelo, construído com um baixo custo e manutenção simples, procura atender as necessidades tanto econômicas e sociais, quanto de eficiência energética e ambientais.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto foi analisar e apresentar a eficiência de um concentrador solar parabólico redondo, buscando atingir temperaturas elevadas para utilização em fins industriais, comerciais e residenciais.

O trabalho foi desenvolvido no Centro de Energias Renováveis da UNESP, Campus de Guaratinguetá, com os seguintes objetivos:

- Analisar a viabilidade da reutilização de antenas parabólicas para produção de água quente.

- Analisar o desempenho do equipamento em diferentes situações de radiação solar.
- Determinar temperatura máxima atingida em diferentes vazões.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização da energia solar para aquecimento e geração de energia apresenta um grande benefício, tanto do ponto de vista energético, reduzindo a demanda energética, quanto do ponto de vista ambiental contribuindo, significativamente, com o reaproveitamento de equipamentos, como a antena parabólica de grandes dimensões para aquecimento de água e visando a redução da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, minimizando a quantidade de Gases de Efeito Estufa.

Com o aquecimento de água utilizando a energia solar, pode-se conseguir uma redução de consumo de energia elétrica, combustíveis líquidos e gases.

Procurou-se construir um equipamento com um baixo custo e manutenção simples para atender as necessidades econômicas e ambientais.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é constituída de cinco capítulos, ou seja, Introdução, Revisão Bibliográfica, Parte Experimental, Resultados e Conclusões.

A Introdução apresentando aquecimento solar e aquecedores solares.

O segundo capítulo apresenta a Revisão Bibliográfica sobre aquecedores solares.

Na Parte Experimental são apresentados o aquecedor parabólico redondo, os instrumentos de medidas e os experimentos. Ainda nesta parte são medidos os valores de radiação solar, vazão de água, temperatura ambiente, temperatura de entrada da água, temperatura de saída da água, temperatura no foco do aquecedor e velocidade do vento predominante.

No capítulo dos Resultados são apresentados todos os parâmetros obtidos através da parte experimental. Também neste capítulo são apresentadas as tabelas, os cálculos e os gráficos resultantes dos experimentos.

Por fim, nas Conclusões são apresentados os atendimentos aos objetivos propostos na Introdução.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho foi iniciado a partir de uma pesquisa nas fontes bibliográficas, objetivando uma melhor compreensão dos fenômenos físicos de trocas de calor, mudanças de fases, escoamento de fluídos e suas propriedades físicas.

### 2.1 AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis são provenientes dos recursos naturais, que apresentam uma capacidade de regeneração, como o sol, vento, chuva, marés e são reabastecidos naturalmente, razão pela qual, pode ser considerada como inesgotável.

Segundo Ismanhoto (2004), o grande desafio de atender as necessidades de insumos para a indústria, comércio, transporte, agricultura, população e o mundo todo, tem motivado o desenvolvimento de fontes alternativas que sejam, ao mesmo tempo, tecnicamente possíveis e economicamente viáveis.

O ser humano está sempre desenvolvendo e aperfeiçoando novas formas de geração de energia, evoluindo para novas fontes de energia e buscando o equilíbrio, que possam contribuir para o futuro do desenvolvimento humano, social, tecnológico e econômico em todos os países.

Em 2008, cerca de 19% do consumo mundial de energia veio de fontes renováveis, com 13% provenientes da tradicional biomassa, que é usada principalmente para o aquecimento e 3,2% a partir da hidroeletricidade (ATOMRA, [s.d.]).

De acordo com MME – Ministério das Minas e Energias, em 2015 as fontes renováveis corresponderam a 42,5 % da matriz energética brasileira.

Um dos maiores benefícios da energia renovável é fornecer fontes de eletricidade limpas e de baixo custo. Há um impacto ambiental positivo com o benefício de minimizar a poluição e realçar a qualidade de todos os setores que a utilizam.

As energias renováveis são consideradas como energias alternativas ao modelo energético tradicional, tanto pela sua disponibilidade garantida no presente e no futuro, como também pelo seu menor impacto ambiental.

Conforme IPCC (2012) - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, políticas governamentais estão facilitando e promovendo a ampliação da capacidade instalada de energias renováveis, com a eliminação de barreiras institucionais referentes à infra-estrutura e regulação da energia e também eliminando falhas de mercado, como custos ambientais e de saúde não internalizados.

### 2.1.1 A energia solar

A energia solar é vital para a existência da vida, responsável pela realização de processos químicos e biológicos. Ela tem se destacado devido ao seu enorme potencial, em todo o mundo, com a vantagem de ser gerada de forma descentralizada, evitando a poluição e os custos da sua transmissão. Também ela é uma fonte de energia limpa, renovável e abundante e sua aplicação está crescendo e se desenvolvendo, tanto para uso residencial quanto para comercial e industrial.

A energia solar traz inúmeros benefícios para um país, pois colabora com uma matriz energética mais limpa e com a diminuição das emissões dos gases de efeito estufa, como consequência da diminuição da dependência dos combustíveis fósseis.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005) quase todas as fontes de energia hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos, são formas indiretas de energia solar.

O sol libera energia radiante para o sistema solar e o planeta Terra recebe uma parcela desta energia, através da atmosfera terrestre que absorve e reflete parte desta energia solar irradiante.

Conforme Oliveira (2011), “energia solar é a denominação dada a toda forma de captação de energia luminosa proveniente do sol, e sua transformação em uma forma utilizável de energia”. O planeta Terra recebe, ao longo de um ano, cerca de  $1,74 \times 10^{11}$  GWh, tendo em vista que o consumo energético anual atinge a marca de  $1,5 \times 10^8$  GWh, conclui-se que a energia solar incidente nos continentes é, aproximadamente, mil vezes o consumo de energia da humanidade.

Os atuais sistemas de captação solar transformam energia luminosa em energia elétrica, sistemas fotovoltaicos, ou em energia térmica para aquecimento de fluidos.

Conforme Vasconcellos e Limberger (2012) a utilização da energia solar térmica pode ser aproveitada, não somente para o aquecimento da água, como também para processos de dessalinização, secagem de grãos, geração de vapor e até para produção de energia elétrica, ampliando a aplicação na indústria.

Segundo Rigoti (2008) a energia solar pode ser aproveitada e utilizada de diversas formas, tanto em aplicações de pequeno ou grande porte, com o emprego de sistemas de conversão em três categorias:

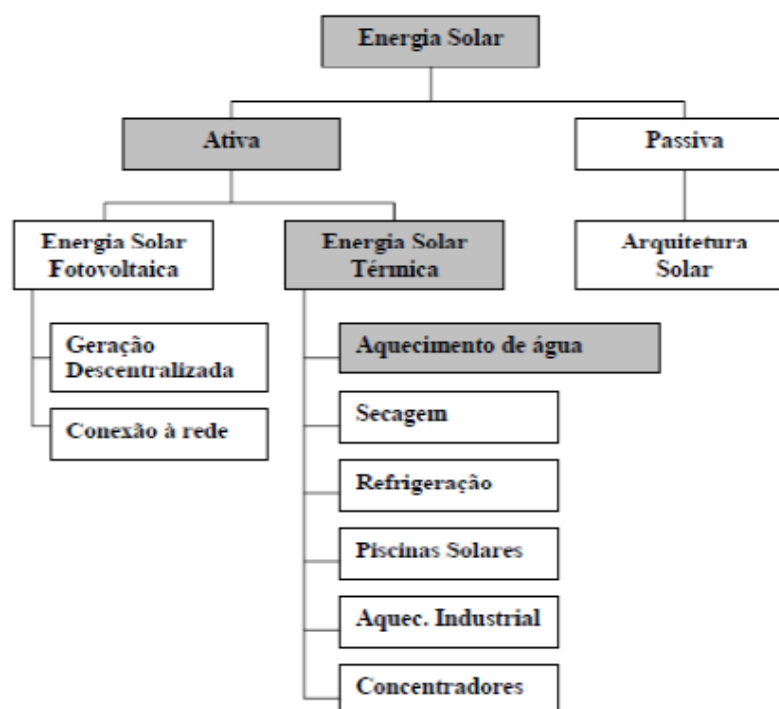
- 1- conversão direta para aquecimento de água, ambientes, secagem, cozinha e industrial;

2- conversão com etapa termodinâmica intermediária como a destilação de água, refrigeração e obtenção de potência mecânica ou eletricidade a partir do calor (com motores térmicos ou turbinas);

3- conversão direta para eletricidade por meio de conversão fotovoltaica.

De acordo com Pereira *et al.* (2003), com tecnologia apropriada, pode-se usar a energia solar em diversas aplicações. A Figura 1 apresenta as diversas aplicações da energia solar.

Figura 1 – Aplicações da energia solar



Fonte: (PEREIRA *et al.*, 2003)

Segundo o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2014), o Relatório Especial sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança Climática, publicado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) caracteriza a energia solar em três blocos:

1- Solar passiva: referente à arquitetura bioclimática;

2- Solar ativa: referente ao aquecimento e à refrigeração solares;

3- Solar fotovoltaica: referente à produção de energia elétrica, com e sem concentradores;

A energia solar não polui durante o seu uso. A poluição decorrente da fabricação dos equipamentos necessários dos coletores térmicos e dos painéis fotovoltaicos solares é totalmente controlável, utilizando as formas de controles existentes atualmente. Os

equipamentos utilizados para captação da energia solar são simples e necessitam de manutenção mínima.

Em países tropicais, como o Brasil, a utilização da energia solar é viável em praticamente todo o território e, em locais distantes dos centros de produção energética, sua utilização ajuda a diminuir a demanda energética.

O uso da energia solar para aquecimento envolve concentradores e absorvedores, transmissão, armazenamento e aplicação do calor. Os absorvedores são usados para absorver a luz do sol e transmitir o calor para o fluido utilizado. A energia solar térmica aplicada para a indústria está voltada, principalmente, para aquecimento de água, climatização de ambientes e produção de energia elétrica (CURINGA, LIMA, SOUZA, 2013).

A intensidade da energia solar pode apresentar uma variação de valores dos níveis energéticos, de acordo com a altitude, a inclinação, a orientação (azimute) e o sombreamento.

De acordo com Prado *et al.* (2007) a energia solar térmica apresenta-se como uma solução técnica e econômica, viabilizando:

- a redução do consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro;
- a modulação da curva de carga das concessionárias de energia;
- ações sob a forma de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

De acordo com Bianchini (2013) o Brasil possui atualmente cerca de 20 MW de capacidade de geração solar fotovoltaica. A energia solar térmica para aquecimento de água está despertando o interesse na indústria, comércio e entre as classes A e B da sociedade, mas faltam informações técnicas e econômicas.

De acordo com Palz (1995, p. 107) “da perspectiva puramente técnica, os sistemas de conversão de energia solar são potencialmente capazes de produzir a maior parte da futura demanda de energia de todo o planeta”.

## 2.2 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é responsável pela vida na Terra e pelo desenvolvimento de todos os seres vivos e processos naturais, como por exemplo, ventos, combustíveis fósseis e florestas. Ela é a propagação de energia eletromagnética, em forma de raios ultravioleta, infravermelhos e luz visível. Grande parte da energia solar que incide em nosso planeta fica retida na atmosfera ou é refletida e uma fração chega à superfície do globo terrestre. Quando essa fração atinge a camada mais externa de nosso planeta, ela naturalmente interfere na organização física da matéria, tendo em mente que, no momento em que a radiação alcança os

átomos, ela eleva a frequência de vibração destes, e, conseqüentemente, a temperatura (CURINGA, LIMA, SOUZA, 2013).

As diversas regiões do planeta apresentam climas variáveis devido à variação da intensidade da radiação solar, e por este motivo, encontramos as diferentes condições de temperatura, ventos e chuvas. Para uma melhor avaliação e análise do potencial e implantação do sistema solar e conhecimento dos recursos de uma determinada região é fundamental a medição da radiação solar.

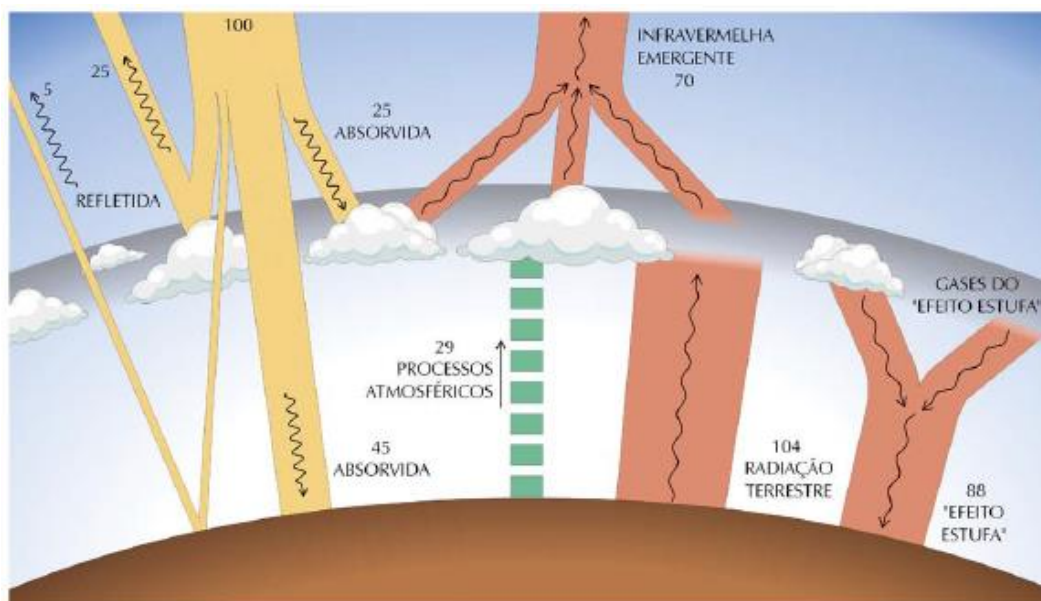
A radiação solar, quando atravessa a atmosfera, é atenuada por processos físicos de espalhamento e absorção com os constituintes atmosféricos e a superfície do planeta. Segundo Pereira *et al.* (2006), as nuvens, os gases, as partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. A Figura 2 apresenta os processos de interação da radiação solar e da radiação térmica no sistema Atmosfera-Terra.

A atmosfera terrestre absorve parte da radiação que chega à sua camada superior, fazendo com que apenas uma parte atinja a superfície terrestre. Esta parcela que chega ao solo é composta por uma componente direta e por uma componente difusa. A soma dessas parcelas representa a irradiação global horizontal que é recebida por uma superfície plana horizontal (BIANCHINI, 2013).

A irradiação normal é a parte proveniente diretamente do sol, sem reflexões, e é muito variável ao longo do dia, devido às condições atmosféricas, principalmente em áreas de grande nebulosidade. Esta variação depende da latitude geográfica, do dia e do ano. Devido à inclinação do eixo da Terra, os dias de verão são maiores que os dias de inverno e as altitudes solares, que o sol atinge, são mais elevadas nos meses de verão do que no inverno. A radiação direta é a parte mais importante para a geração da energia solar térmica (PORTAL ENERGIA, 2004).



Figura 2 – Diagrama de radiação solar na atmosfera terrestre



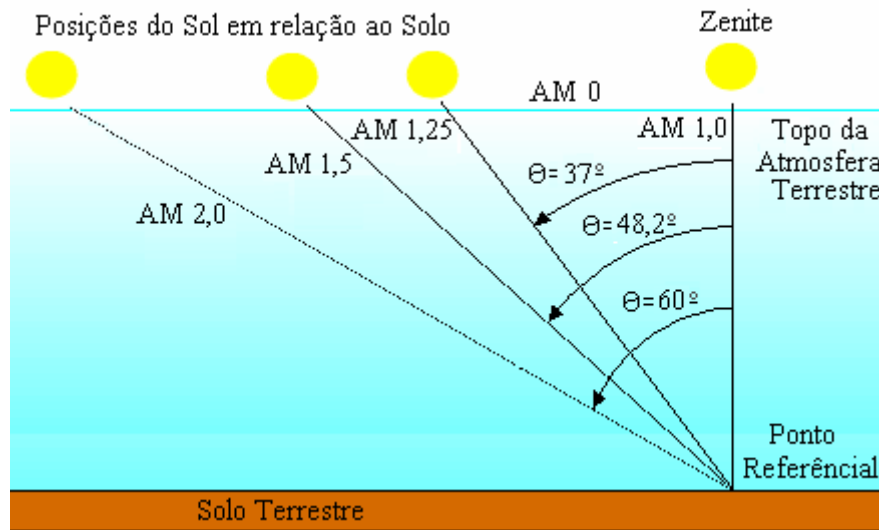
Fonte: Pereira *et al.* (2006)

Segundo Ghensev (2005) a energia solar em forma de luz, ao ultrapassar a superfície terrestre, sofre perdas que dependem da espessura da atmosfera e a radiação direta pode ser determinada em função dos ângulos:

- Latitude – distância angular medida sobre a superfície da Terra a partir da linha do equador até o ponto em questão;
- Declinação – posição angular do sol, ao meio dia, em relação ao plano do equador;
- Inclinação – ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal do local;
- Ângulo Azimutal – distância angular entre a projeção da normal ao plano na horizontal e o meridiano local;
- Ângulo de Incidência – ângulo entre o feixe da radiação direta que incide no plano e a reta normal ao mesmo;
- Ângulo Zenital – ângulo entre o feixe de radiação e a vertical do local;
- Ângulo Horário – distância angular entre o feixe solar e o meridiano local;
- Altura Solar – ângulo entre a radiação direta e o plano horizontal.

A Figura 3, de acordo com Ghensev (2005), ilustra a variação da massa de ar (AM) que um feixe da radiação solar atravessa a atmosfera terrestre.

Figura 3 – Variação da massa de ar atravessada pela radiação solar



Fonte: Ghensev (2005)

A radiação solar total é a soma da radiação solar direta proveniente do sol, que atinge a Terra sem qualquer mudança de direção e a radiação difusa, que é a radiação refletida pela superfície terrestre e a que chega aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Radiação solar global e suas componentes



Fonte: Sentelha e Angelocci (2009)

Conforme Rigoti (2008) a radiação difusa é proveniente do espalhamento em todo o céu e é responsável pela claridade do céu durante o dia e pela iluminação de áreas que não recebem iluminação direta do sol.

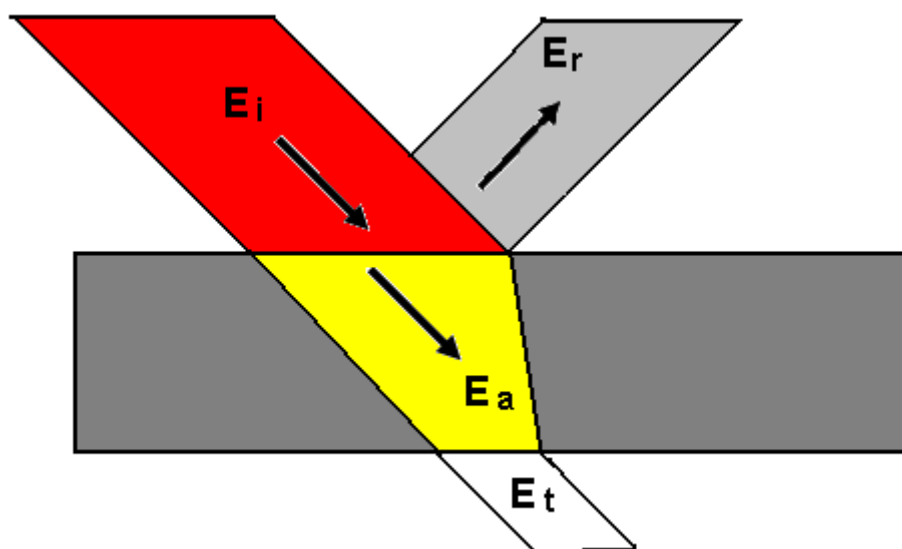
Segundo Bianchini (2013) a radiação direta é a mais importante para a geração solar térmica pois é proveniente diretamente do sol. Devido às condições atmosféricas, principalmente em áreas de grande nebulosidade, a irradiação direta é muito variável ao longo do dia.

De acordo com Mattos (2011) e Finocchio [s.d.], conforme a Figura 5, a radiação é distribuída através de três fatores:

- $E_a$ : fator de absorção – o corpo absorve uma fração da energia incidente total;
- $E_r$ : fator de refletância – uma fração desta energia é refletida deste corpo;
- $E_t$ : fator de transmitância – uma fração desta energia passa através do corpo.

Figura 5 – Distribuição de energia incidente em um corpo translúcido.

Princípio da conservação da energia



Fonte: Finocchio [s.d.]

Conforme Mattos (2011), um corpo negro absorve toda a energia radiante incidente e, um objeto quando é atingido por ondas curtas da luz (comprimento de onda de 0,3 a 3,0  $\mu\text{m}$ ), reflete estas ondas, de acordo com a estrutura da superfície do material, da rugosidade e da cor. Portanto, a percentagem de reflexão está relacionada com o comprimento da onda.

Segundo Rigoti (2008) “a intensidade da radiação solar média anual que atinge a atmosfera terrestre chega a 1,377  $\text{kW/m}^2$ , valor este chamado de constante solar”. Ele relata

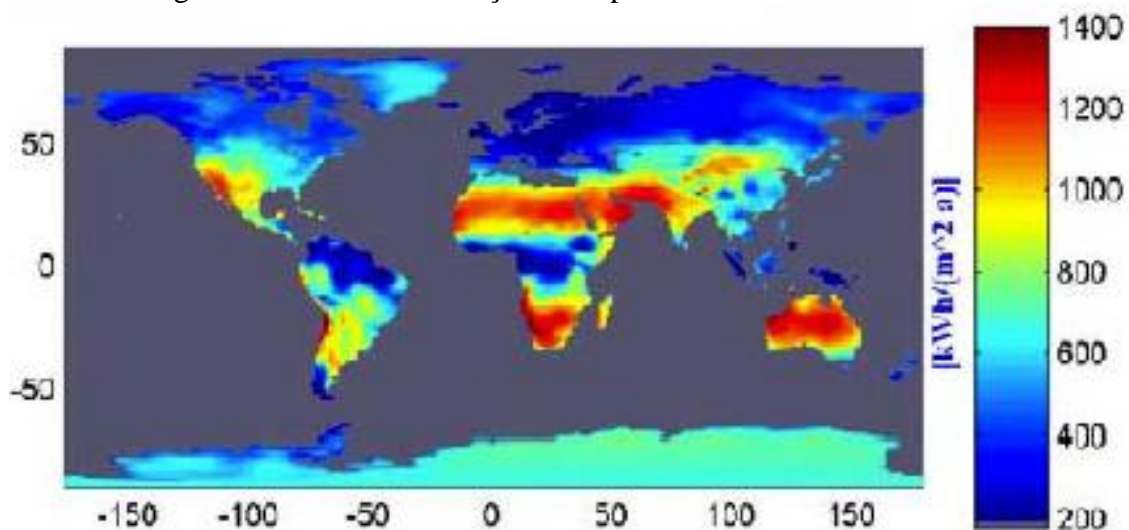
que embora a atmosfera pareça transparente à radiação solar incidente, somente em torno de 25% desse fluxo, penetra diretamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera, constituindo a radiação direta. O restante é refletido de volta para o espaço ou absorvido ou espalhado em volta até atingir a superfície da Terra ou retornar ao espaço. A radiação solar incide em linha reta e pode-se dispersar em todas as direções, por meio dos gases e aerossóis, que causam seu espalhamento.

Segundo Prado *et al.* (2007), podem ser consideradas duas fontes de variação na radiação extraterrestre:

- variação na radiação emitida pelo sol;
- variação da distância entre a Terra e o Sol.

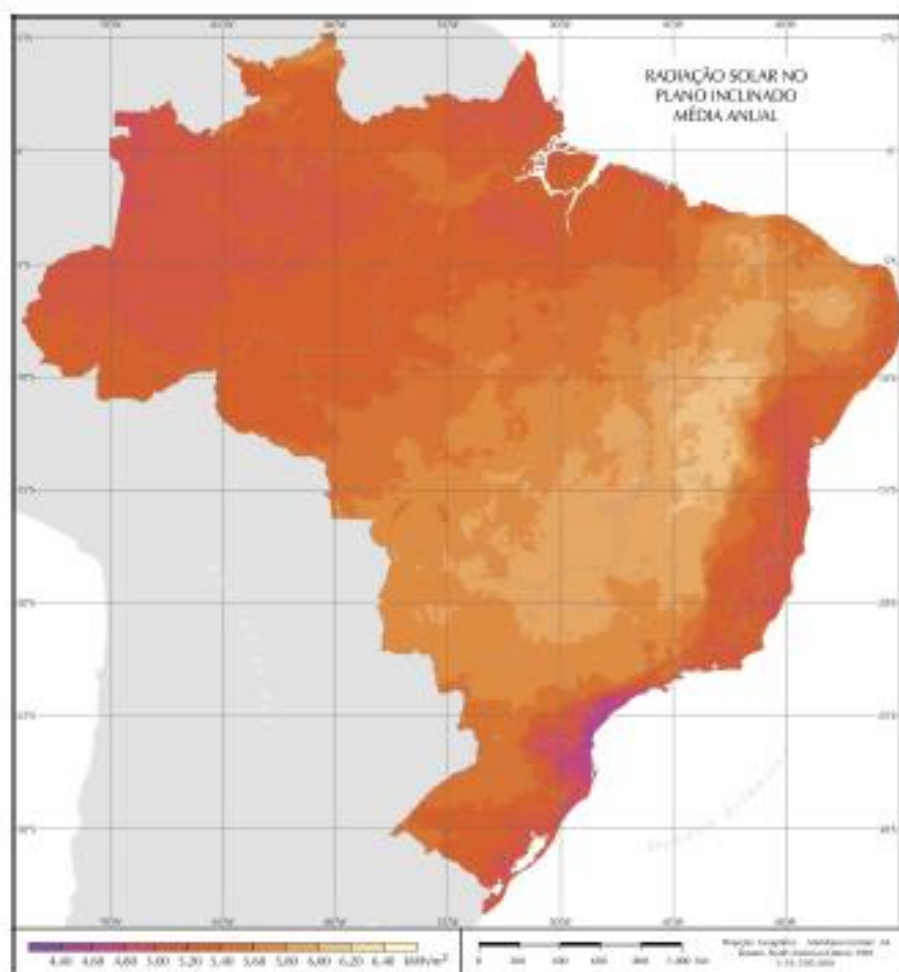
Conforme Vidal e Gava (2007), o Brasil é um país intertropical apresentando uma média entre 400 e 700 W/m<sup>2</sup> (podendo chegar a picos de 1200 W/m<sup>2</sup>) de irradiação solar em seu território. Ele faz uma comparação com a Austrália, localizada em latitudes semelhante, que recebe cerca de 1300 W/m<sup>2</sup> em áreas desérticas. A Figura 6 apresenta o nível de irradiação solar para os diferentes locais da Terra.

Figura 6 – Nível de irradiação solar para diferentes locais da Terra



De acordo com Pereira *et al.* (2006), a Figura 7 apresenta o mapa com a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro, verificando-se uma boa uniformidade com médias relativamente altas.

Figura 7 – Média anual da radiação solar no Brasil



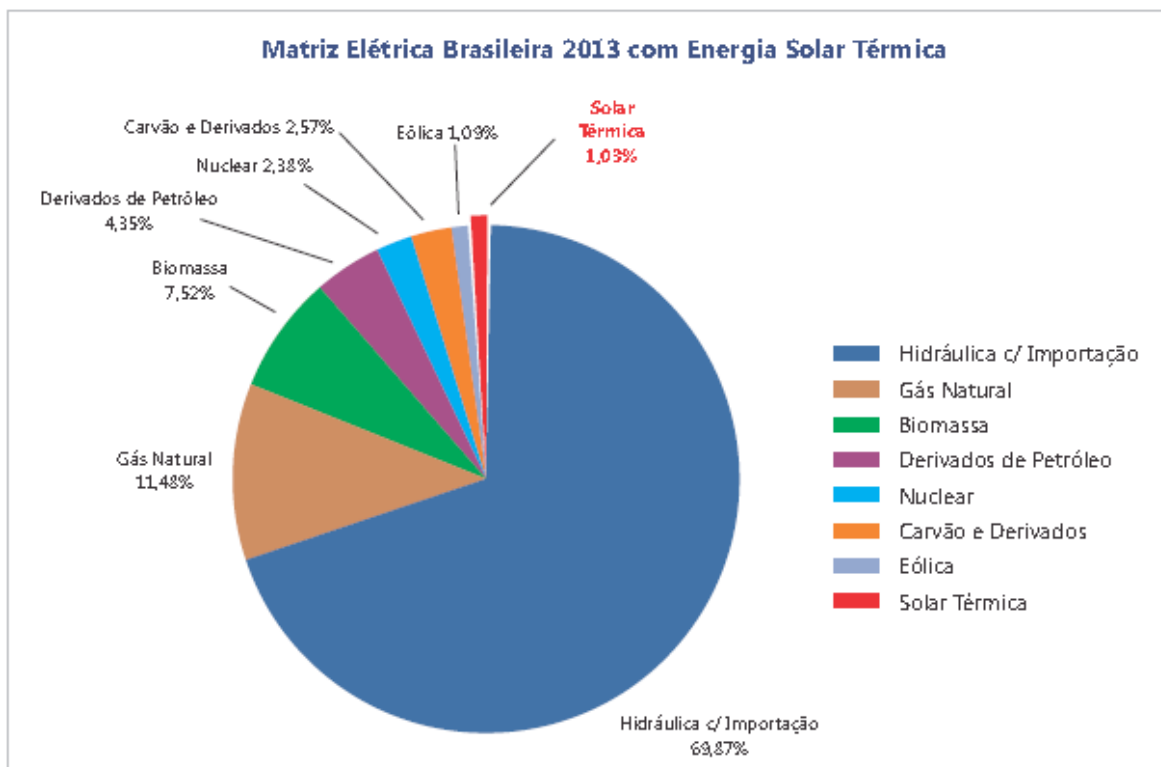
Fonte: Pereira *et al.* (2006)

### 2.3 AQUECIMENTO SOLAR DE LÍQUIDOS

O aquecimento solar de líquidos se apresenta de forma muito simples e, por este motivo, houve um aumento na disseminação, em todas as regiões do mundo. Pela sua viabilidade há um grande crescimento principalmente em países como Alemanha, Áustria e Israel e Espanha. No Brasil com enorme potencial solar a sua utilização é técnica e economicamente viável e tem registrado um aumento de uso a partir de 2000.

O aquecimento de água, através da utilização da energia solar, é uma forma de produzir energia sem poluir, usada pela matriz energética brasileira em pequena escala, trazendo benefícios energéticos e econômicos. A Figura 8 apresenta as fontes de energia que compõem a matriz energética brasileira.

Figura 8 – Participação da energia solar térmica no Brasil



Fonte: ABRAVA (2014)

Um sistema de aquecimento de água por energia solar é realizado através de um coletor térmico solar e um reservatório térmico para armazenar água. Os coletores absorvem a radiação solar e o calor é transferido para a água dentro das tubulações dos mesmos.

O aquecimento solar de água é feito no coletor solar, que é aquecido pela radiação solar captada por placas metálicas. Para uma melhor absorção o coletor solar é pintado na cor preta em textura fosca para um maior poder de absorção da radiação solar.

Segundo Curinga, Lima e Souza (2013) para melhores resultados, pode-se utilizar um fluido industrial térmico para melhorar o desempenho, pois um líquido com um calor específico menor do que a água e um ponto de ebulição maior, conservará a energia térmica excedente necessária para a ebulição da água, prolongando o efeito desejado.

Segundo Oliveira (2011) o aquecimento de água residencial começou nos Estados Unidos quando Clarence Kemp patenteou o aquecedor solar de água em 1891. O aquecimento de água era a forma mais praticada de aplicação da energia solar e era usada nas indústrias na França, Rússia, Israel, Austrália e Japão.

De acordo com Oliveira (2011), a utilização do aquecimento solar varia muito, de um país para outro. No Canadá e Estados Unidos utilizam-se os coletores solares planos abertos

para aquecer água da piscina. A Europa, Japão e China utilizam a tecnologia para aquecer ambientes e água. No Brasil usam-se coletores solares planos fechados.

A tecnologia solar para aquecimento tem utilidade para chuveiros ou torneiras de pias e apresentam uma simplicidade de instalação.

No Brasil, encontra-se o emprego do aquecedor solar de água nas casas do Programa Minha Casa Minha Vida, viabilizando o projeto social para habitações de baixa renda com a redução do consumo de energia elétrica.

A emissividade de um material está correlacionada com a capacidade de absorção da superfície. Segundo Novo *et al.* (2014) toda a energia que o material absorveu será emitida para o ambiente, decorrente da lei de Kirchhoff, da radiação térmica, que diz que a emissividade de uma superfície a uma determinada temperatura é igual à absorvidade para uma radiação incidente originada de um corpo á mesma temperatura.

Segundo Dorneles, Caram e Sichert (2013) os indicadores de absorvâncias de uma superfície são, diretamente, afetados pela quantidade de energia que é absorvida e refletida pelas superfícies.

## 2.4 OS AQUECEDORES SOLARES

Segundo Ragheb (2011), a tecnologia de coletores solares se iniciou nos Estados Unidos na década de 1970 e a primeira planta solar com coletores cilíndrico-parabólicos alcançou temperaturas em torno de 500 °C para fins industriais. Na Europa também ocorreu o desenvolvimento do coletor cilíndrico-parabólico com um sistema chamado SSPS/DCS (*Small Solar Power Systems/Distributed collector System*).

Os aquecedores solares são utilizados para produzir energia térmica e, desde a década de 1950, estão sendo pesquisados e desenvolvidos, de modo a se tornarem cada vez mais eficientes.

No aquecimento de água ou de outro fluido captado diretamente do sol, a luz solar é transformada em calor. Há uma absorção da luz difusa e a radiação incidente, mas com ângulos variáveis em função da posição solar, pois a captação depende também do angulo de incidência dos raios solares que varia durante o dia.

A característica de um coletor solar é a sua capacidade de absorver calor. O uso de coletores solares para aquecimento de água é uma tecnologia extremamente viável, em todas as partes do planeta; apresenta um importante benefício ao substituir a energia elétrica para a obtenção de água quente e é um importante instrumento para aliviar a matriz energética

brasileira, com a diminuição do consumo de energia. Também é importante para aumentar receitas e fortalecer a imagem de empresas que venham a utilizar esses sistemas.

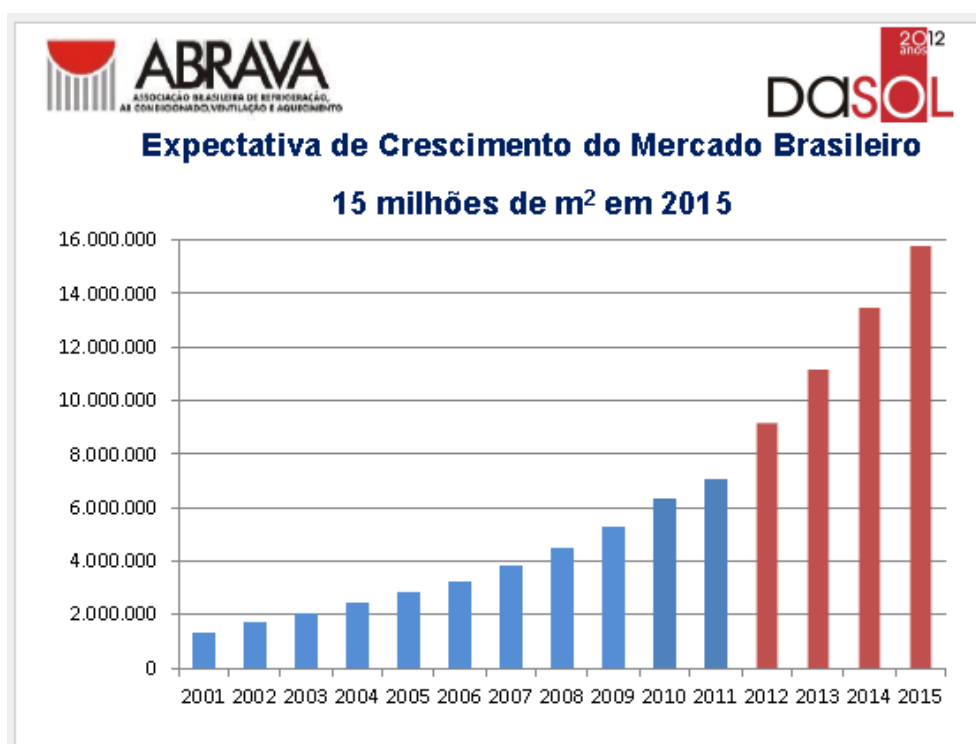
Para a aplicação da energia solar térmica podem ser utilizados coletores e concentradores solares.

De acordo com Medeiros (2012), os coletores solares planos podem ser classificados em três tipos:

- 1- Coletor solar plano fechado: para aplicações de temperaturas até 60° C.
- 2- Coletor solar plano aberto: para aplicações de temperaturas até 30° C para piscinas.
- 3- Coletor solar de tubo a vácuo: permite eliminar perdas térmicas e aumentar a temperatura e, são recomendados para condições ambientais com baixa incidência solar e em regiões frias.

A partir de 2001, devido à crise energética que obrigou à redução do consumo de energia elétrica, o mercado de aquecedores solares cresceu e segundo Oliveira (2011) de 2002 a 2004 o mercado apresentou uma taxa de crescimento de 33% ao ano. De acordo com a ABRAVA (2015) a Figura 9 apresenta a expectativa de crescimento do mercado brasileiro.

Figura 9 – Expectativa de crescimento de aquecedores solares no Brasil

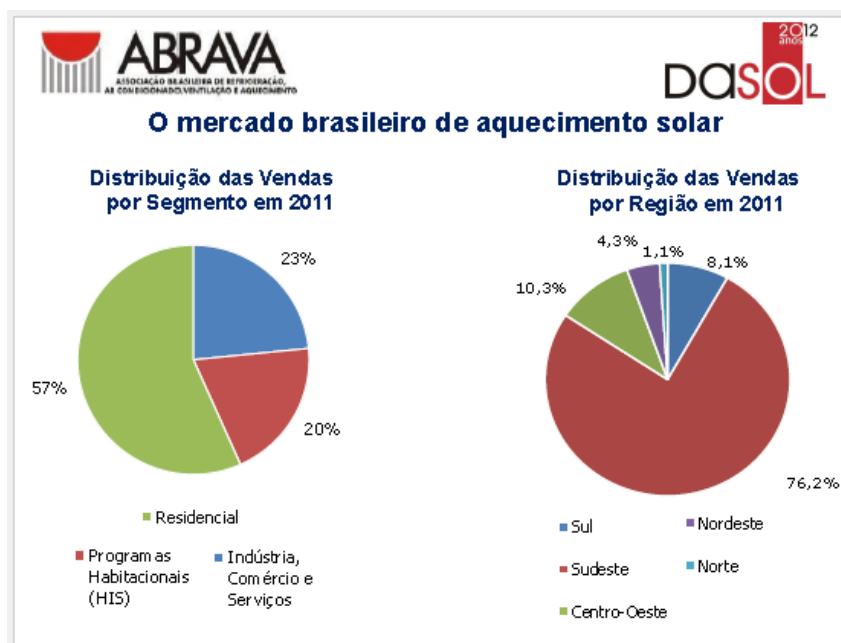


Fonte: ABRAVA (2015)

De acordo com a ABRAVA (2012) a Figura 10 apresenta a distribuição das vendas de aquecedores solares no mercado brasileiro



Figura 10 - Mercado brasileiro de aquecimento solar



Fonte: ABRAVA (2012)

Os concentradores solares são sistemas que concentram a radiação solar para um maior aquecimento de fluídos, que não pode ser obtido com coletores planos, ou para gerar a energia elétrica. A finalidade do concentrador solar é captar a energia solar incidente em uma área relativamente grande e concentrá-la em uma área menor, o foco, de modo que a temperatura dessa última tenha um grande aumento de valor. Essa radiação concentrada pode ter as mais variadas aplicações, seja de maneira direta ou indireta, sendo acumulada, transportada ou utilizada instantaneamente (CURINGA, LIMA e SOUZA, 2013).

A Energia Solar Concentrada (*Concentrated Solar Power*) é uma tecnologia para aproveitamento, que apresenta um fundamento básico de usar superfícies espelhadas para captar a energia solar incidente sobre uma área maior, concentrando-a em uma área menor, o foco, possibilitando um aumento de temperatura para ser usada na geração de energia térmica ou elétrica.

De acordo com Rigoti (2008), o fator de concentração solar é um parâmetro fundamental que é a relação entre a área projetada da superfície refletora parabólica e a área da superfície do absorvedor.

Atualmente são utilizados quatro tecnologias para a geração solar térmica concentrada: cilindro-parabólica, torre solar, CLFR (*Compact Linear Fresnel Reflector*) e disco parabólico.

São classificados segundo o modo como é realizado o foco da radiação solar e o tipo de receptor (PHILIBERT *et al.*, 2010)

De acordo com Rigotti (2008), são dois os tipos básicos de concentradores solares:

- concentrador de receptor central – compreendendo o concentrador parabolóide conforme Figura 11 e o campo heliostático (espelhos facetados orientados para o topo de uma torre, conforme Figura 12).

Figuras 11 - Concentradores de receptor central



Fonte: Rigotti (2008)

Figura 12 – Concentrador Heliostático



Fonte: Rigotti (2008)

- concentrador de foco linear – espelhos com forma de um semicilindro parabólico, conforme Figura 13 e de faixas de espelhos facetados orientados para o tubo absorvedor, conforme Figura 14.

Figura 13 - Concentrador de foco linear semicilíndrico parabólico



Fonte: Rigotti (2008)

Figura 14 – Concentrador de foco linear de espelhos facetados



Fonte: Rigotti (2008)

Os concentradores solares parabólicos são os mais usados para a geração de calor e permitem o aquecimento de fluídos a temperaturas acima de 100 °C (KALOGIROU, 2009).

De acordo com Oliveira (2011) estes sistemas podem concentrar a radiação através de superfícies que refletem os raios solares até 10.000 vezes para aquecer o receptor.

O uso de concentradores solares vem aumentando gradativamente e Arvizu *et al.* (2011) estima reduções dos custos de:

- 35 a 50 % em 2020;
- 40 a 55 % em 2025.

De acordo com Bianchini (2013) e Miller e Lumby (2012), os tipos de concentrador solar parabólico são cilindro parabólico, linear Fresnel, torre de receptor central e prato parabólico. A Figura 15 apresenta alguns tipos de concentradores solares.

Figura 15 – Tipos de sistemas de concentrador solar parabólico



Fonte: Miller e Lumby (2012)

Os concentradores solares cilindro parabólico, linear Fresnel e torre de receptor podem ser utilizados em configurações híbridas ao incluir um sistema de armazenamento e com auxílio de combustível fóssil para a sua operação, proporcionando maior confiabilidade e flexibilidade operacional, segundo Miller e Lumby (2012).

Esta dissertação utiliza o coletor solar parabólico redondo, com materiais de uma antena parabólica convencional, adaptada visando a facilidade de montagem, utilização e manutenção, contendo no foco uma panela pintada de cor preto fosco.

Os raios solares incidem sobre uma parábola redonda e são concentrados no ponto focal da mesma. Conforme Kolagirou (2009) essa radiação solar pode ser usada para aquecer um líquido dentro de uma tubulação.

Segundo Palz (1995) os coletores solares de concentração apresentam algumas desvantagens que precisam ser avaliadas: a componente difusa da radiação solar é totalmente perdida, os refletores devem ser mantidos limpos para manterem a sua qualidade e refletividade ótica, necessita de orientação contínua e podem surgir problemas devido a fortes ventos.

### 3 PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental desta dissertação foi desenvolvida no Centro de Energias Renováveis, do Campus da UNESP de Guaratinguetá, visando atender aos seguintes objetivos:

1- Analisar a viabilidade da reutilização de antenas parabólicas para produção de água quente e vapor.

2- Determinar temperatura máxima atingida em diferentes vazões.

3- Analisar o desempenho do equipamento em diferentes situações ao longo do ano.

Os experimentos consistiram-se na coleta de dados com as medidas de radiação solar, vazões de água, temperaturas de entrada e saída da água e do foco, tempo e velocidade do vento. Estas medições foram realizadas em diferentes situações ambientais.

O presente trabalho apresenta um tema pouco explorado, com relação ao aproveitamento de antenas parabólicas, que estão se tornando obsoletas, transformando-as em concentradores solares para o aquecimento de água.

Este concentrador solar parabólico de foco fixo teve o objetivo de obter água quente em diferentes temperaturas de acordo com as vazões de entrada. O sistema apresenta uma flexibilidade de uso, garantindo uma facilidade na operação que permitam análises em diferentes valores de temperaturas e vazões.

A técnica empregada é de aquecimento da água, por meio da energia solar, em uma estrutura de antena parabólica, conforme a Figura 16. Ela foi reestruturada com a colocação de chapas de aço em forma de pétalas pintadas, com tinta na cor cromada, de tal forma que apresentou uma superfície refletora para concentrar os raios solares em um foco concentrador. Neste foco foi colocada uma panela de pressão de cor escura de seis litros em cujo interior está uma serpentina de cobre com tubos de nove milímetros de diâmetro interno de acordo com a Figura 17. Na Figura 17 os elementos do sistema de aquecedor parabólico são:

1- Rotâmetro para medir a vazão de água em litros/hora

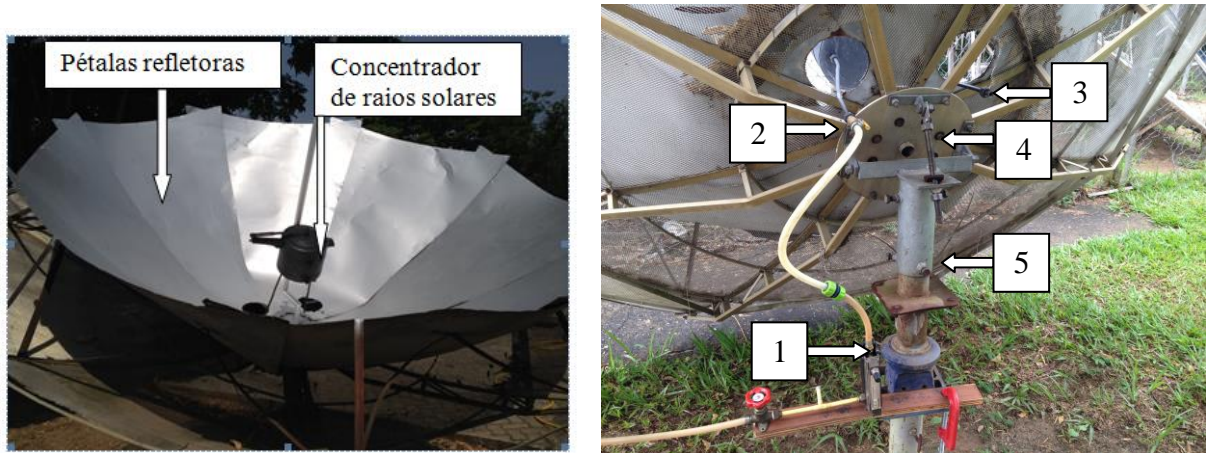
2- Entrada da água na serpentina

3- Saída da água quente da serpentina

4- Ajuste manual da posição da antena em relação à horizontal

5- Ajuste manual da posição da antena de acordo com a rotação

Figura 16- Antena parabólica e seus componentes para captação da energia solar



Fonte: o Autor

Figura 17 – Painel de pressão e serpentina interna de cobre



Fonte: o Autor

A radiação solar incidente na superfície das pétalas metálicas é concentrada sobre a panela localizada no foco da antena parabólica. No foco todos os raios solares concentram-se sobre a panela. Dentro da mesma há um tubo receptor de cobre utilizado para a passagem da água a ser aquecida e a energia solar proporciona o aumento da temperatura do líquido. O

tubo receptor dentro da panela pintado de cor escura tem a propriedade de absorver o calor proveniente da panela aquecida através dos raios solares. O tubo apresenta-se na forma de uma serpentina comercial de 0,018 m de diâmetro e 8,00 m de comprimento.

O diâmetro do aquecedor solar parabólico redondo é 2,50 m, dividido em 3 partes principais, a antena parabólica, o foco onde está a panela e o tubo de circulação de água.

A estrutura, do coletor em estudo, foi desenvolvida com a possibilidade de regular o ângulo de inclinação, com o objetivo de ajustar a incidência dos raios luminosos, de forma a atingir o foco de aquecimento. Essa regulação é feita manualmente, acompanhando o movimento do sol, pelas duas aberturas em círculo, rastreando e sempre posicionando a sombra do foco na parte central da parabólica. A superfície da panela localizada no foco foi pintada com tinta preta fosca, que possui menor refletividade e absorve melhor a energia solar.

O concentrador solar parabólico é suportado por uma estrutura metálica com base móvel, facilitando para operações de rotação e possibilitando instalar um sistema de rastreamento solar, para um melhor posicionamento de absorção da radiação solar.

Com a aplicação de equações da calorimetria, são utilizados cálculos de rendimento térmico ou eficiência térmica do sistema.

De acordo com as medições, são geradas as informações que permitiram determinar a capacidade de aquecimento deste concentrador solar, considerando-se as variáveis não controladas como a temperatura ambiente, nebulosidade, vento, a umidade relativa do ar e a disponibilidade de radiação solar entre outras. Considerou-se, também, variáveis com possibilidades de controle como vazão e posicionamento. Para calcular o rendimento térmico do aquecedor solar parabólico utilizou-se a quantidade de calor transferido para o fluido em um determinado período de tempo.

Com os dados obtidos foram possíveis elaborar as tabelas e gráficos relacionando a vazão com as temperaturas de entrada e saída da água, a quantidade de calor absorvida pela água e o rendimento térmico do sistema com aquecedor parabólico redondo de água.

### 3.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Para a realização dos experimentos foram utilizados os instrumentos proveta, termômetro, medidor de radiação solar, anemômetro, termopar e rotâmetro.

A proveta marca J. Prolab com precisão de  $\pm 0,5$  ml foi usada para medir as vazões conforme número 1 da Figura 18.



O termômetro da marca Instrutherm, modelo TE-400 foi usado para medir as temperaturas ambiente, de entrada e de saída da água, conforme número 2 da Figura 18.

O medidor de radiação solar da marca Instrutherm, modelo MES-100 foi usado para medir a radiação solar, conforme número 3 da Figura 18.

O anemômetro da marca Instrutherm, modelo AD-250 foi usado para medir a velocidade do vento, conforme número 4 da Figura 18.

O termopar da marca Salvterm, modelo 1200 K foi usado para medir a temperatura no foco, conforme número 5 da Figura 18.

O rotâmetro da marca Fischer & Porter foi usado para controlar a vazão da água, conforme número 6 da Figura 18.

Figura 18 – Instrumentos usados nas medições



Fonte: o Autor

### 3.2 EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS

O cálculo da vazão foi realizado através da Equação (1):

$$q = V / t \quad (1)$$

sendo:

q é a vazão em ml/s

V é o volume em ml

t é o tempo em segundos

Para calcular a taxa da quantidade de calor recebida pela água, usou-se a Equação (2):

$$Q = m \times c \times \Delta t \quad (2)$$

sendo:

Q é a taxa da quantidade de calor recebida pela água em J/h

m é a massa da água em kg/h

c é o calor específico da água à temperatura ambiente cujo valor é 1

$\Delta t$  é a diferença entre a temperatura de saída da água e a temperatura de entrada da água no aquecedor solar.

Para calcular o rendimento,  $\eta$ , usou-se a Equação 3:

$$\eta(\%) = [Q / (I \times S)] \times 100 \quad (3)$$

sendo:

$\eta(\%)$  é o rendimento em valores porcentuais

Q é a taxa da quantidade de calor recebida pela água em kcal/h

I é a irradiação solar cujo valor de 1 kWh/m<sup>2</sup>/h equivale a 859,8452 kcal/m<sup>2</sup>/h

S é a área exposta localizada no foco para receber os raios solares em m<sup>2</sup>

Para calcular a área exposta no foco, usou-se a Equação (4):

$$S = 2 \times (\pi \times r^2) + 2 \times \pi \times r \times h \quad (4)$$

sendo:

S área exposta da panela localizada no foco em m<sup>2</sup>

r raio da circunferência da tampa cuja medida é 0,11m

h altura da panela cuja medida é 0,19 m

Assim a área total externa da panela foi calculada usando a Equação 4

$$S = 2 \times (\pi \times 0,11^2) + 2 \times \pi \times 0,11 \times 0,19 = 0,207345 \text{ m}^2$$

### 3.3 EXPERIMENTOS

Os testes foram realizados com um acompanhamento manual da inclinação, de acordo com os ângulos de incidência dos raios solares, de forma a posicionar a sombra do foco no centro da parabólica, conforme Figura 19.

Figura 19 – Posicionamento da panela no foco do aquecedor solar parabólico redondo



Fonte: o Autor

Observou-se que o vento não interferiu nos dados, pois manteve-se abaixo da velocidade de 2 m/s.

Considerou-se a temperatura de entrada da água equivalente à temperatura ambiente ao sol, pois a água passa pela mangueira que está exposta no ambiente.

As condições experimentais foram realizadas com diferentes índices de radiação, de acordo com as condições do ambiente nos dias dos testes.

As vazões de entrada da água foram controladas através de um rotâmetro, conforme instrumento número 6 da Figura 18. Para verificação da vazão também foram usados uma pipeta conforme instrumento número 1 da Figura 18 e um cronômetro.

Durante os testes foram fixadas as vazões na ordem de 3,6 L/h até 36 L/h com incrementos de 3,6 L/h, para um período de 5 horas de sol por dia. Os testes também foram realizados na ordem, inversa, de 36 L/h até 3,6 L/h com decrementos de 3,6 L/h.

Também foram medidas as temperaturas de entrada e saída da água assim como a temperatura da panela localizada no foco da antena parabólica.

Com os dados obtidos foram possíveis elaborar tabelas e gráficos relacionando a vazão com as temperaturas de entrada e saída da água, a quantidade de calor absorvida pela água e o rendimento térmico do sistema de aquecedor parabólico redondo de água de fluxo contínuo.

Os dados foram obtidos com medições de índice de radiação solar, temperatura ambiente ao sol, temperatura de saída, temperatura no foco, vazão e velocidade do vento.

### 3.3.1 Condições experimentais com índice de radiação solar $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$

A Tabela 1 foi elaborada com os dados coletados com um índice de radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$  e com as seguintes condições:

- Temperatura do ambiente ao sol:  $36 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velocidade do vento  $\leq 2 \text{ m/s}$
- Sem nuvens

Tabela 1– Medições de temperatura com índice de radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

| Vazão (L/h)                      | Índice de radiação solar = $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                  | Medição 1 (°C)   | Medição 2 (°C) | Medição 3 (°C) | Medição 4 (°C) | Medição 5 (°C) | Medição 6 (°C) | Medição 7 (°C) | Medição 8 (°C) |
| 3,6                              | 73,40  | 64,00          | 86,00          | 63,00          | 66,00          | 53,50          | 53,10          | 56,00          |
| 7,2                              | 71,00  | 63,60          | 83,40          | 59,00          | 66,00          | 52,20          | 50,70          | 54,70          |
| 10,8                             | 67,00  | 61,80          | 78,70          | 51,00          | 62,30          | 49,70          | 48,20          | 54,50          |
| 14,4                             | 61,20  | 56,50          | 67,00          | 45,40          | 57,50          | 48,40          | 45,60          | 51,00          |
| 18,0                             | 57,20  | 52,70          | 70,80          | 45,40          | 54,10          | 48,40          | 44,20          | 45,90          |
| 21,6                             | 55,50  | 49,20          | 65,00          | 45,40          | 53,40          | 47,50          | 43,20          | 43,10          |
| 25,2                             | 53,00  | 48,60          | 52,20          | 45,00          | 51,60          | 46,20          | 41,60          | 40,90          |
| 28,8                             | 48,00  | 45,90          | 48,70          | 44,80          | 49,20          | 45,00          | 39,60          | 39,50          |
| 32,4                             | 46,40  | 44,60          | 47,00          | 43,70          | 43,00          | 38,80          | 39,00          | 38,80          |
| 36,0                             | 42,60  | 36,20          | 43,40          | 40,70          | 43,40          | 38,00          | 37,40          | 37,20          |
| Temperatura (°C) ambiente ao sol | 35,50  | 35,10          | 36,70          | 35,50          | 35,40          | 35,00          | 34,80          | 35,10          |

Fonte: o Autor

### 3.3.2 Condições experimentais com índice de radiação solar $800 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$

A Tabela 2 foi elaborada com os dados coletados com um índice de radiação solar de  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$  e com as seguintes condições:

- Temperatura do ambiente no sol:  $33 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velocidade do vento  $\leq 2 \text{ m/s}$
- Com poucas nuvens

Tabela 2 - Medições de temperatura com índice de radiação solar de  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ 

| Índice de radiação solar = $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Vazão (L/h)   | Medição 1 (°C) | Medição 2 (°C) | Medição 3 (°C) |
| 3,6   | 64,00          | 58,10          | 60,20          |
| 7,2   | 63,60          | 57,20          | 59,40          |
| 10,8  | 61,80          | 55,60          | 57,70          |
| 14,4  | 56,50          | 54,30          | 55,80          |
| 18,0  | 52,70          | 52,20          | 53,00          |
| 21,6  | 49,20          | 49,70          | 51,40          |
| 25,2  | 47,80          | 48,10          | 48,80          |
| 28,8  | 45,90          | 46,30          | 47,60          |
| 32,4  | 44,60          | 43,40          | 44,20          |
| 36,0  | 42,10          | 43,00          | 41,30          |
| Temperatura (°C) ambiente ao sol                        | 34,60          | 32,80          | 33,20          |

Fonte: o Autor

### 3.3.3 Condições experimentais com índice de radiação solar de $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

A Tabela 3 foi elaborada com os dados coletados, em dias alternados, com um índice de radiação solar de  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$  e com as seguintes condições:

- Temperatura do ambiente no sol:  $32 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velocidade do vento  $\leq 2 \text{ m/s}$
- Com nuvens

Tabela 3 - Medições de temperatura com índice de radiação solar de  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

| Índice de radiação solar = $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Vazão (L/h)   | Medição 1 (°C) | Medição 2 (°C) | Medição 3 (°C) |
| 3,6   | 44,20          | 45,10          | 46,00          |
| 7,2   | 43,10          | 44,80          | 44,90          |
| 10,8  | 42,00          | 43,40          | 44,20          |
| 14,4  | 42,00          | 43,00          | 43,60          |
| 18,0  | 42,60          | 41,90          | 42,80          |
| 21,6  | 41,50          | 40,80          | 41,70          |
| 25,2  | 39,60          | 40,20          | 41,00          |
| 28,8  | 39,40          | 39,30          | 40,70          |
| 32,4  | 37,60          | 39,00          | 40,20          |
| 36,0  | 36,80          | 37,80          | 39,10          |
| Temperatura (°C) ambiente ao sol                        | 31,80          | 32,10          | 32,50          |

Fonte: o Autor

### 3.3.4 Condições experimentais com índice de radiação solar de $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

A Tabela 4 foi elaborada com os dados de temperatura coletados, em dias alternados, com um índice de radiação solar de  $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  e com as seguintes condições:

- Temperatura do ambiente no sol:  $30 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velocidade do vento  $\leq 2 \text{ m/s}$
- Com nuvens

Tabela 4 - Medições de temperatura com índice de radiação solar de  $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

| Índice de radiação solar = $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                                |                                |                                |                                |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Vazão (L/h)   | Medição 1 ( $^\circ\text{C}$ ) | Medição 2 ( $^\circ\text{C}$ ) | Medição 3 ( $^\circ\text{C}$ ) | Medição 4 ( $^\circ\text{C}$ ) |
| 3,6   | 40,80                          | 40,50                          | 40,60                          | 40,30                          |
| 7,2   | 40,50                          | 40,20                          | 40,00                          | 39,70                          |
| 10,8  | 40,10                          | 38,80                          | 39,10                          | 39,20                          |
| 14,4  | 39,50                          | 37,90                          | 38,40                          | 38,50                          |
| 18,0  | 38,30                          | 36,80                          | 37,90                          | 38,00                          |
| 21,6  | 37,00                          | 35,70                          | 36,30                          | 36,10                          |
| 25,2  | 36,10                          | 35,10                          | 35,00                          | 34,70                          |
| 28,8  | 34,20                          | 33,50                          | 34,60                          | 34,60                          |
| 32,4  | 33,10                          | 32,60                          | 32,40                          | 32,90                          |
| 36,0  | 33,00                          | 32,20                          | 31,80                          | 32,50                          |
| Temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) ambiente ao sol        | 30,40                          | 30,10                          | 30,10                          | 30,30                          |

Fonte: o Autor

### 3.3.5 Condições experimentais com índice de radiação solar de $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

A Tabela 5 foi elaborada com os dados coletados, em dias alternados, com um índice de radiação solar de  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$  e com as seguintes condições:

- Temperatura do ambiente no sol:  $29 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- Velocidade do vento  $\leq 2 \text{ m/s}$
- Com muitas nuvens

Tabela 5 - Medições de temperatura com índice de radiação solar de  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

| Índice de radiação solar = $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|
| Vazão (L/h)   | Medição 1 (°C) | Medição 2 (°C) | Medição 3 (°C) |
| 3,6   | 36,20          | 35,90          | 35,50          |
| 7,2   | 34,70          | 35,60          | 33,60          |
| 10,8  | 33,10          | 35,10          | 33,00          |
| 14,4  | 32,70          | 34,70          | 32,60          |
| 18,0  | 32,40          | 34,20          | 32,20          |
| 21,6  | 31,90          | 33,80          | 31,70          |
| 25,2  | 31,70          | 33,00          | 31,60          |
| 28,8  | 31,70          | 32,10          | 31,60          |
| 32,4  | 31,70          | 31,90          | 31,50          |
| 36,0  | 31,50          | 31,70          | 31,30          |
| Temperatura (°C) ambiente ao sol                        | 29,30          | 28,80          | 28,50          |

Fonte: o Autor

## 4 RESULTADOS DA PARTE EXPERIMENTAL

Os resultados das partes experimentais, referentes às Tabelas 1 a 5, são apresentados nos itens 4.1 a 4.5. Os gráficos dos experimentos são apresentados no item 4.2

### 4.1 MÉDIAS E DESVIOS PADRÕES DAS TEMPERATURAS

As tabelas das médias de temperaturas e desvio padrão, em relação ao índice de radiação solar, foram realizadas conforme as Tabelas 6 a 10.

Tabela 6 – Médias e desvios padrões para índice de radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

| Índice de radiação solar = $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |               |            |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|------------|
| Vazão (L/h)  | Temperatura 1 (°C) | Temperatura 2 (°C) | Temperatura 3 (°C) | Temperatura 4 (°C) | Temperatura 5 (°C) | Temperatura 6 (°C) | Temperatura 7 (°C) | Temperatura 8 (°C) | Desvio padrão | Média (°C) |
| 3,6  | 73,4               | 64,0               | 86,0               | 63,0               | 66,0               | 53,5               | 53,1               | 56,0               | 10,42         | 64,38      |
| 7,2  | 71,0               | 63,6               | 83,4               | 59,0               | 66,0               | 52,2               | 50,7               | 54,7               | 10,25         | 62,58      |
| 10,8   | 67,0               | 61,8               | 78,7               | 51,0               | 62,3               | 49,7               | 48,2               | 54,5               | 9,73          | 59,15      |
| 14,4   | 61,2               | 56,5               | 67,0               | 45,4               | 57,5               | 48,4               | 45,6               | 51,0               | 7,28          | 54,08      |
| 18,0   | 57,2               | 52,7               | 70,8               | 45,4               | 54,1               | 48,4               | 44,2               | 45,9               | 8,21          | 52,34      |
| 21,6   | 55,5               | 49,2               | 65,0               | 45,4               | 53,4               | 47,5               | 43,2               | 43,1               | 6,96          | 50,29      |
| 25,2   | 53,0               | 48,6               | 52,2               | 45,0               | 51,6               | 46,2               | 41,6               | 40,9               | 4,42          | 47,39      |
| 28,8   | 48,0               | 45,9               | 48,7               | 44,8               | 49,2               | 45,0               | 39,6               | 39,5               | 3,54          | 45,09      |
| 32,4   | 46,4               | 44,6               | 47,0               | 43,7               | 43,0               | 38,8               | 39,0               | 38,8               | 3,18          | 42,66      |
| 36,0   | 42,6               | 36,2               | 43,4               | 40,7               | 43,4               | 38,0               | 37,4               | 37,2               | 2,81          | 39,86      |
| Tambiente ao sol   | 35,9               | 35,2               | 36,7               | 35,0               | 35,4               | 35,0               | 34,8               | 35,1               | 0,59          | 35,39      |

Fonte: o Autor

Tabela 7 – Médias e desvios padrões para índice de radiação solar de  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

| Índice de radiação solar = $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                    |                    |                    |               |            |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura 1 (°C) | Temperatura 2 (°C) | Temperatura 3 (°C) | Desvio padrão | Média (°C) |
| 3,6   | 64,0               | 58,1               | 60,2               | 2,44          | 60,77      |
| 7,2   | 63,6               | 57,2               | 59,4               | 2,65          | 60,07      |
| 10,8  | 61,8               | 55,6               | 57,7               | 2,57          | 58,37      |
| 14,4  | 56,5               | 54,3               | 55,8               | 0,92          | 55,53      |
| 18,0  | 52,7               | 52,2               | 53,0               | 0,33          | 52,63      |
| 21,6  | 48,7               | 49,6               | 50,1               | 0,58          | 49,47      |
| 25,2  | 47,8               | 48,1               | 48,8               | 0,42          | 48,23      |
| 28,8  | 45,9               | 46,3               | 47,6               | 0,73          | 46,60      |
| 32,4  | 44,6               | 43,4               | 44,2               | 0,50          | 44,07      |
| 36,0  | 42,1               | 43,0               | 41,3               | 0,69          | 42,13      |
| Tambiente ao sol  | 34,6               | 32,8               | 33,2               | 0,77          | 33,53      |

Fonte: o Autor



Tabela 8 – Médias e desvios padrões para índices de radiação solar de  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

| Índice de radiação solar = $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                    |                    |                    |               |            |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura 1 (°C) | Temperatura 2 (°C) | Temperatura 3 (°C) | Desvio padrão | Média (°C) |
| 3,6   | 44,2               | 45,1               | 46,0               | 0,73          | 45,10      |
| 7,2   | 43,1               | 44,8               | 44,9               | 0,83          | 44,27      |
| 10,8  | 42,0               | 43,4               | 44,2               | 0,91          | 43,20      |
| 14,4  | 42,0               | 43,0               | 43,6               | 0,66          | 42,87      |
| 18,0  | 42,6               | 41,9               | 42,8               | 0,39          | 42,43      |
| 21,6  | 41,5               | 40,8               | 41,7               | 0,39          | 41,33      |
| 25,2  | 39,6               | 40,2               | 41,0               | 0,57          | 40,27      |
| 28,8  | 39,4               | 39,3               | 40,7               | 0,64          | 39,80      |
| 32,4  | 37,6               | 39,0               | 40,2               | 1,06          | 38,93      |
| 36,0  | 36,8               | 37,8               | 39,1               | 0,94          | 37,90      |
| Tambiente ao sol  | 31,8               | 32,1               | 32,5               | 0,29          | 32,13      |

Fonte: o Autor

Tabela 9 – Médias e desvios padrões para índice de radiação solar de  $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

| Índice de radiação solar = $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                    |                    |                    |                    |               |            |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura 1 (°C) | Temperatura 2 (°C) | Temperatura 3 (°C) | Temperatura 4 (°C) | Desvio padrão | Média (°C) |
| 3,6   | 40,8               | 40,5               | 40,6               | 40,3               | 0,18          | 40,55      |
| 7,2   | 40,5               | 40,2               | 40,0               | 39,7               | 0,29          | 40,10      |
| 10,8  | 40,1               | 38,8               | 39,1               | 39,2               | 0,48          | 39,30      |
| 14,4  | 39,5               | 37,9               | 38,4               | 38,5               | 0,58          | 38,58      |
| 18,0  | 38,3               | 36,8               | 37,9               | 38,0               | 0,57          | 37,75      |
| 21,6  | 37,0               | 35,7               | 36,3               | 36,1               | 0,47          | 36,28      |
| 25,2  | 36,1               | 35,1               | 35,0               | 34,7               | 0,53          | 35,23      |
| 28,8  | 34,2               | 33,5               | 34,6               | 34,6               | 0,45          | 34,23      |
| 32,4  | 33,1               | 32,6               | 32,4               | 32,9               | 0,27          | 32,75      |
| 36,0  | 33,0               | 32,2               | 31,8               | 32,5               | 0,44          | 32,38      |
| Tambiente ao sol  | 30,4               | 30,1               | 30,1               | 30,3               | 0,13          | 30,23      |

Fonte: o Autor

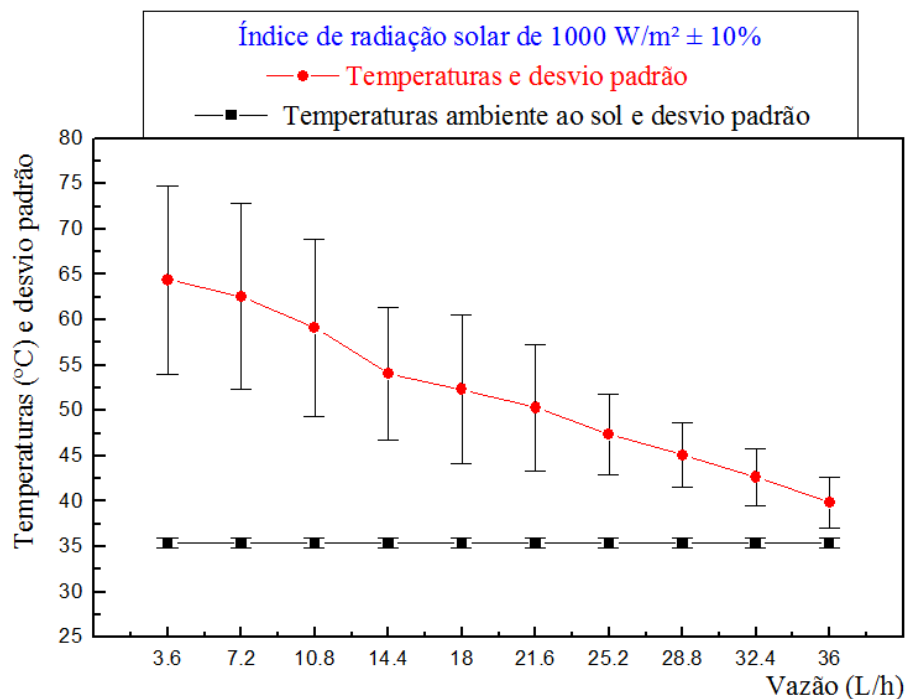
Tabela 10 – Médias e desvios padrões para índice de radiação solar de  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

| Índice de radiação solar = $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                    |                    |                    |               |            |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura 1 (°C) | Temperatura 1 (°C) | Temperatura 1 (°C) | Desvio padrão | Média (°C) |
| 3,6   | 36,2               | 35,9               | 35,5               | 0,29          | 35,87      |
| 7,2   | 34,7               | 35,6               | 33,6               | 0,82          | 34,63      |
| 10,8  | 33,1               | 35,1               | 33                 | 0,97          | 33,73      |
| 14,4  | 32,7               | 34,7               | 32,6               | 0,97          | 33,33      |
| 18  | 32,4               | 34,2               | 32,2               | 0,90          | 32,93      |
| 21,6  | 31,9               | 33,8               | 31,7               | 0,95          | 32,47      |
| 25,2  | 31,7               | 33                 | 31,6               | 0,64          | 32,10      |
| 28,8  | 31,7               | 32,1               | 31,6               | 0,22          | 31,80      |
| 32,4  | 31,7               | 31,9               | 31,5               | 0,16          | 31,70      |
| 36  | 31,5               | 31,7               | 31,3               | 0,16          | 31,50      |
| Tambiente ao sol  | 29,3               | 28,8               | 28,5               | 0,33          | 28,87      |

Fonte: o Autor

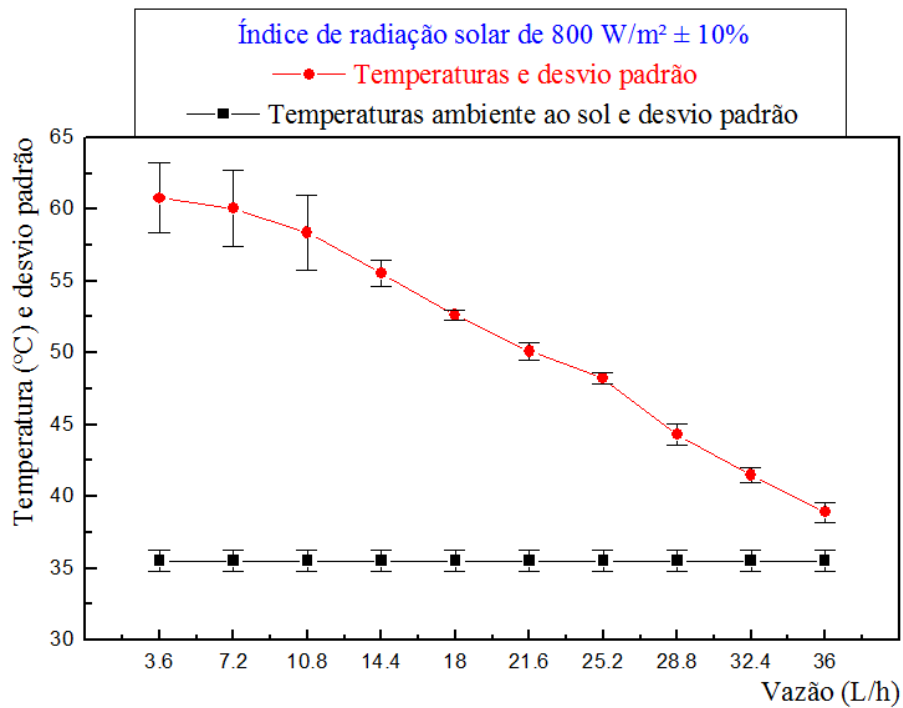
#### 4.2 GRÁFICOS DAS TEMPERATURAS E DESVIOS PADRÕES

Os gráficos das Figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 foram elaborados com o uso do aplicativo Origin, para os valores obtidos nas Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10.

Figura 20 – Desvio padrão de temperatura com índice de radiação solar  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

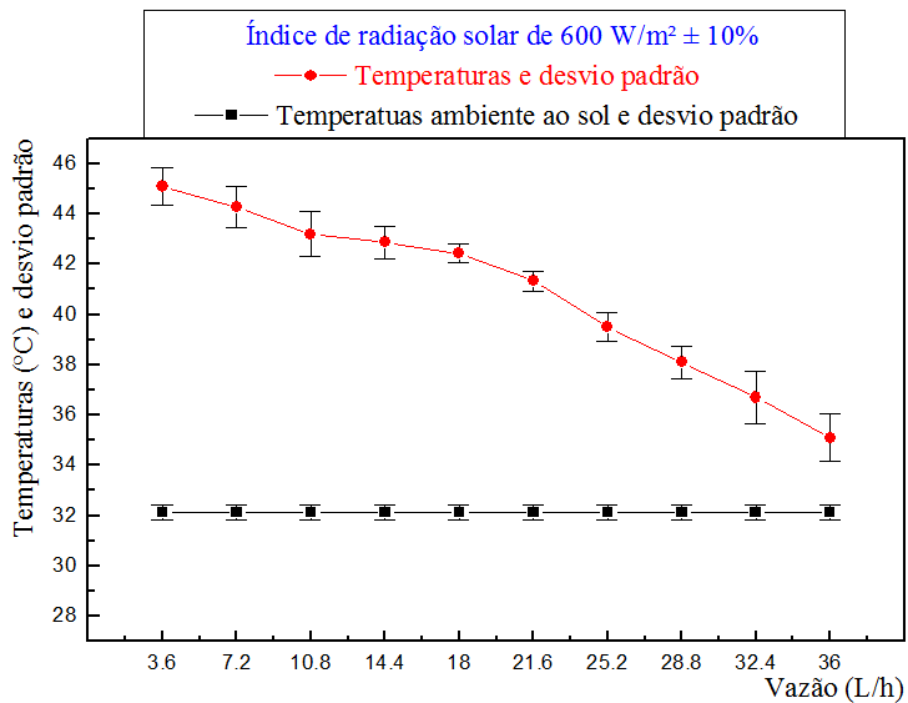
Fonte: o Autor

Figura 21 – Desvio padrão de temperatura com índice de radiação solar  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$



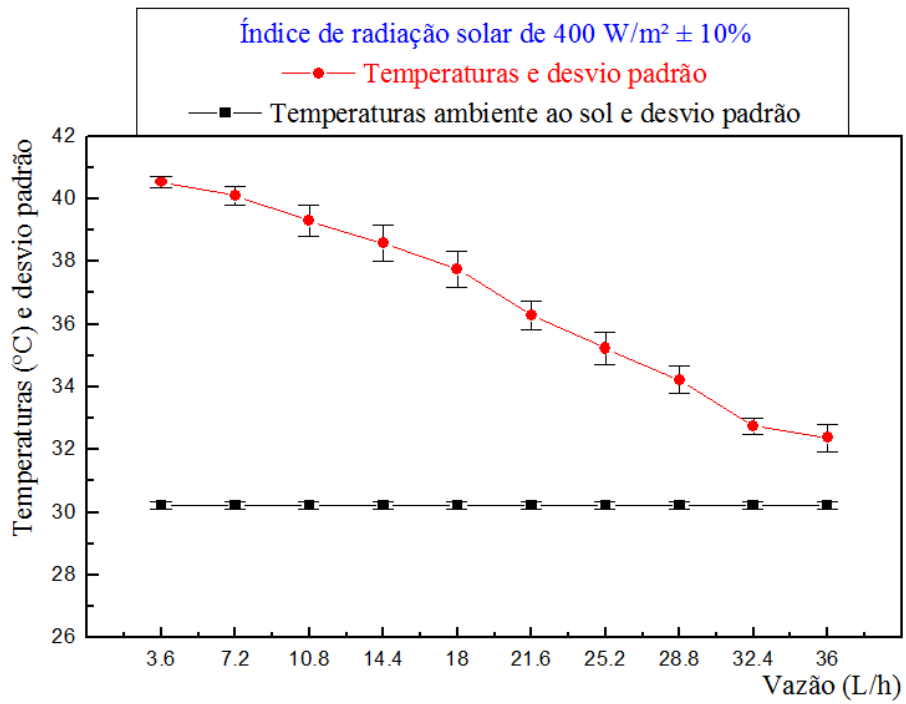
Fonte: o Autor

Figura 22 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$



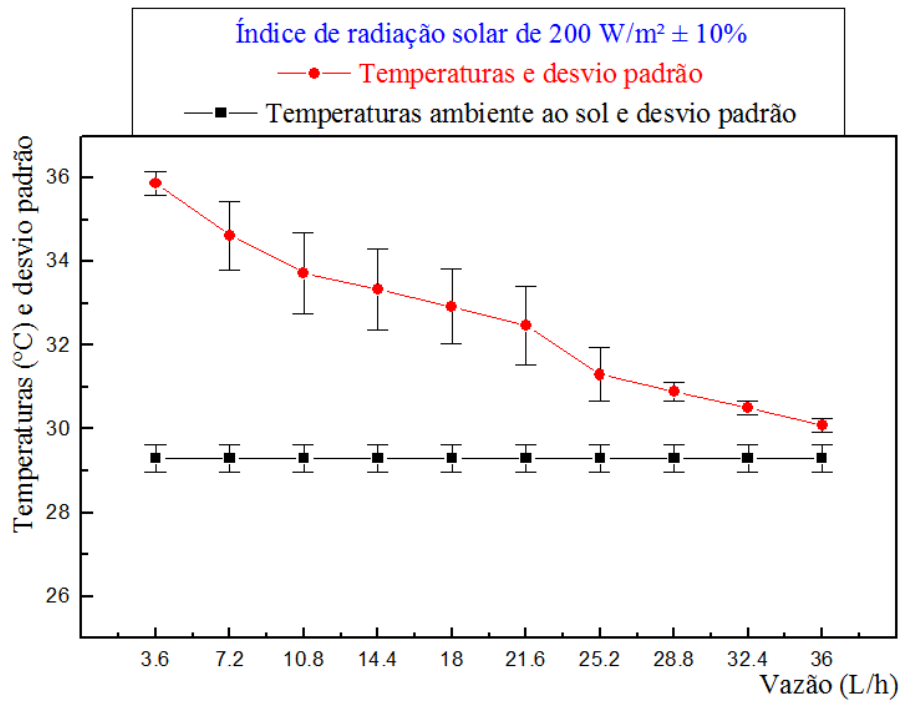
Fonte: o Autor

Figura 23 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar  $400 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$

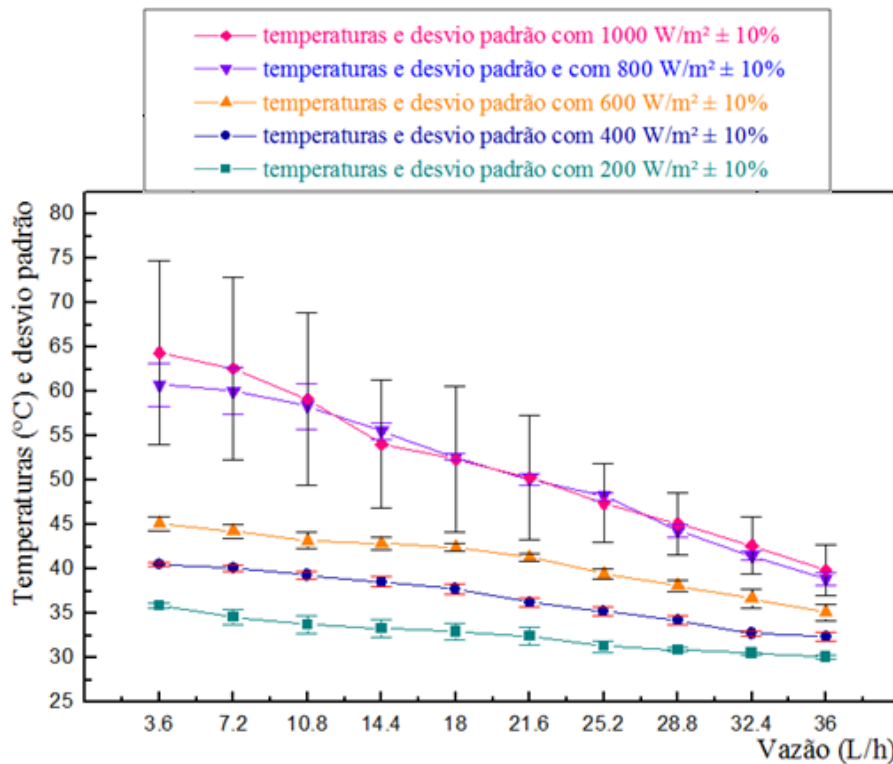


Fonte: o Autor

Figura 24 – Desvio padrão de temperaturas com índice de radiação solar  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$



Fonte: o Autor

Figura 25 - Desvio padrão de temperaturas entre 200 W/m<sup>2</sup> e 1000 W/m<sup>2</sup>

Fonte: o Autor

#### 4.3 TAXA DA QUANTIDADE DE CALOR E RENDIMENTO TÉRMICO

As taxas das quantidades de calor e rendimentos térmicos, do aquecedor solar parabólico redondo, em relação aos índices de radiação solar, foram elaboradas conforme as Tabelas 11 a 15.

Nas tabelas estão inseridos os índices de radiação solar, em W/m<sup>2</sup>; a vazão, em L/h; as temperaturas ambientes de entrada e saída da água, em °C, e respectivos desvios padrões.

Também foram obtidos, através de cálculos, os valores da diferença de temperatura  $\Delta t$ , a massa de água, a quantidade de calor em J/s, e o rendimento em %.

Para o cálculo da quantidade de calor, foi utilizada a Equação 2 apresentada na página 40.

$$Q = m \times c \times \Delta t \quad (2)$$

Onde:

$Q$  é a taxa da quantidade de calor recebida pela água em J/s

$m$  é a massa da água em g/s

$c$  é o calor específico da água à temperatura ambiente cujo valor é 1 cal/g °C

$\Delta t$  é a diferença de temperatura entre a saída da água e a temperatura de entrada da água no aquecedor, em graus Celsius.

Exemplo do cálculo da taxa da quantidade de calor para a vazão de 3,6 L/h da Tabela 11:

$$\text{Vazão de 3,6 L/h} = 3600 \text{ ml} / 3600 \text{ segundos} = 3600 \text{ g} / 3600 \text{ segundos}$$

$$c_{\text{água}} = 1 \text{ cal} / \text{g } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 64,38 - 35,39 = 28,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q = 3600 \text{ g} / 3600 \text{ s} \times 1 \text{ cal} / \text{g } ^\circ\text{C} \times 28,99 \text{ } ^\circ\text{C} = 28,99 \text{ cal/s}$$

Multiplica-se 28,99 cal/s por 4,18 para obter em J/s

$$Q = 121,18 \text{ J/s para a vazão de 3,6 L/h}$$

O rendimento térmico foi obtido por cálculo usando a Equação 3, apresentada na página 40.

$$\eta(\%) = [Q / (I \times S)] \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\eta(\%)$  é o rendimento em valores porcentuais

Q é a taxa da quantidade de calor recebida pela água em J/s

I é a irradiação solar cujo valor de 1000 J/s/m<sup>2</sup>

S é a área exposta no foco para receber os raios solares em m<sup>2</sup>

Exemplo do cálculo do rendimento térmico para a vazão de 3,6 L/h da Tabela 11:

$$\text{Com } 1000 \text{ W/m}^2 = 1000 \text{ J/s/m}^2$$

E a soma das áreas das oito pétalas da parábola com 5,040 m<sup>2</sup> contribuiu para concentrar todos os raios solares sobre a panela com área total externa de 0,207 m<sup>2</sup>, o rendimento térmico será.

$$\eta(\%) = [121,178 \text{ J/s} / (5,040 \times 1000 \text{ J/s/m}^2 \times 0,207 \text{ m}^2)] \times 100 = 11,59 \%$$

### 4.3.1 Resultados para o índice de radiação solar de $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$

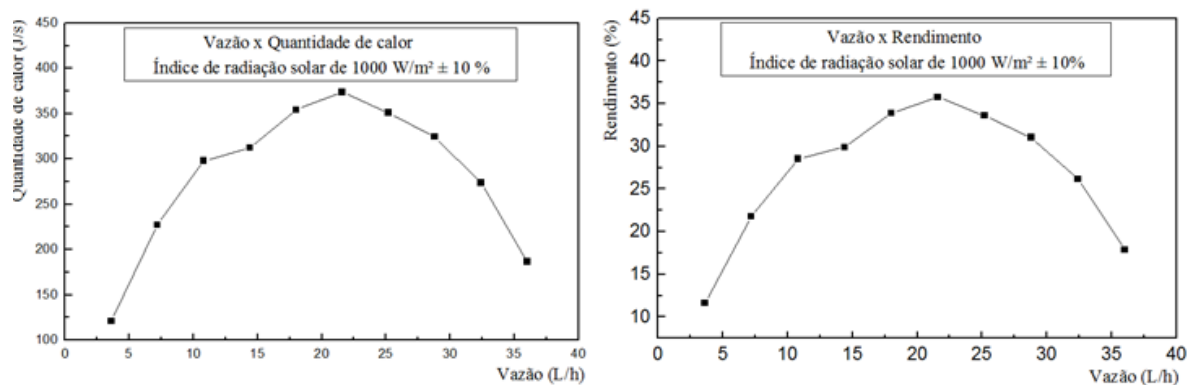
A Tabela 11 e os gráficos da Figura 26 são para o índice de radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ .

Tabela 11 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$

| Índice de radiação solar = $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                                  |        |                        |        |                 |                     |         |                           |
|--|----------------------------------|--------|------------------------|--------|-----------------|---------------------|---------|---------------------------|
| Vazão (L/h)  | Temperatura (°C) Ambiente ao sol | Desvio | Temperatura (°C) média | Desvio | $\Delta t$ (°C) | massa de água (g/s) | Q (J/s) | Rendimento ( $\eta$ ) (%) |
| 3,6  | 35,39                            | 0,59   | 64,38                  | 10,42  | 28,99           | 1,00                | 121,18  | 11,60                     |
| 7,2  | 35,39                            | 0,59   | 62,58                  | 10,25  | 27,19           | 2,00                | 227,31  | 21,75                     |
| 10,8   | 35,39                            | 0,59   | 59,15                  | 9,73   | 23,76           | 3,00                | 297,95  | 28,51                     |
| 14,4   | 35,39                            | 0,59   | 54,08                  | 7,28   | 18,69           | 4,00                | 312,50  | 29,90                     |
| 18,0   | 35,39                            | 0,59   | 52,34                  | 8,21   | 16,95           | 5,00                | 354,26  | 33,90                     |
| 21,6   | 35,39                            | 0,59   | 50,29                  | 6,96   | 14,90           | 6,00                | 373,69  | 35,76                     |
| 25,2   | 35,39                            | 0,59   | 47,39                  | 4,42   | 12,00           | 7,00                | 351,12  | 33,60                     |
| 28,8   | 35,39                            | 0,59   | 45,09                  | 3,54   | 9,70            | 8,00                | 324,37  | 31,04                     |
| 32,4   | 35,39                            | 0,59   | 42,66                  | 3,18   | 7,27            | 9,00                | 273,50  | 26,17                     |
| 36,0   | 35,39                            | 0,59   | 39,86                  | 2,81   | 4,47            | 10,00               | 186,85  | 17,88                     |

Fonte: o Autor

Figura 26 – Gráficos taxa da quantidade de calor e rendimento térmico com  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$



Fonte: o Autor

De acordo com os dados da Tabela 11 e a Figura 26 que apresentaram os gráficos da quantidade de calor e rendimento térmico, verificou-se que:

- as temperaturas, taxas da quantidade de calor e rendimento térmico aumentam entre 3,6 L/h e 21,6 L/h.

- as temperaturas, taxas da quantidade de calor e rendimento térmico decrescem entre 21,6 L/h e 36 L/h.
- a maior diferença de temperatura  $\Delta t$  de 28,99 °C foi para a vazão de 3,6 L/h.
- a menor quantidade de calor absorvida pela água foi de 121,178 J/s para a vazão de 3,6 L/h.
- a maior quantidade de calor absorvida pela água de 373,69 J/s foi para a vazão de 21,6 L/h.
- a maior vazão fornecida pelo sistema foi de 36 L/h, permitindo uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 4,47 °C e absorvendo uma taxa de quantidade de calor de 186,85 J/s.
- o maior rendimento do sistema, de 35,76 %, encontrou-se na vazão de 21,6 L/h, para uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 14,90 °C, recebendo uma quantidade de calor de 373,69 J/s.
- as maiores eficiências dos sistemas encontraram-se entre as vazões de 14,4 L/h e 28,8 L/h.

#### 4.3.2 Resultados para o índice de radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup> ± 10%

A tabela 12 e os gráficos da Figura 27 são para o índice de radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup> ± 10 %.

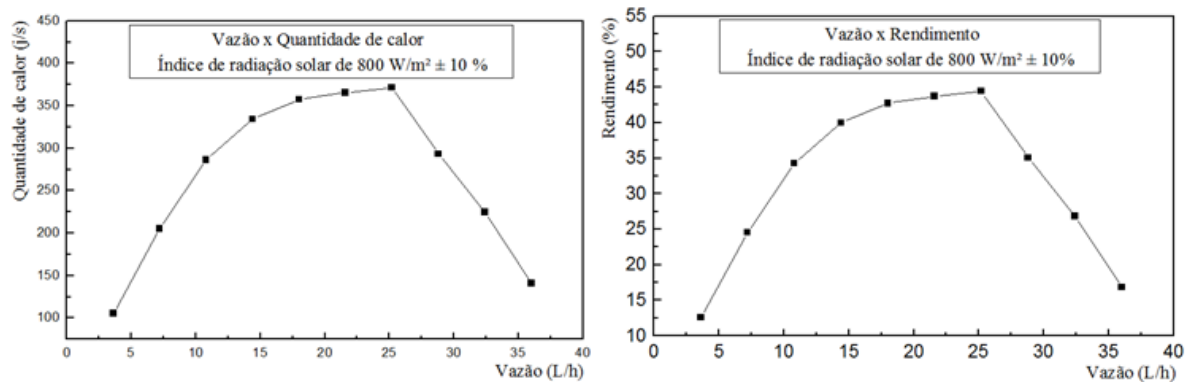
Tabela 12 – Taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para 800 W/m<sup>2</sup> ± 10 %

| Vazão (L/h) | Índice de radiação solar = 800 W/m <sup>2</sup> ± 10% |        |                        |        |                 | massa de água (g/s) | Q (J/s) | Rendimento ( $\eta$ ) (%) |
|-------------|---|--------|------------------------|--------|-----------------|---------------------|---------|---------------------------|
|             | Temperatura (°C) Ambiente ao sol                      | Desvio | Temperatura (°C) média | Desvio | $\Delta t$ (°C) |                     |         |                           |
| 3,6         | 35,53   | 0,77   | 60,77                  | 2,44   | 25,24           | 1,00                | 105,50  | 12,62                     |
| 7,2         | 35,53   | 0,77   | 60,07                  | 2,66   | 24,54           | 2,00                | 205,15  | 24,54                     |
| 10,8        | 35,53   | 0,77   | 58,37                  | 2,57   | 22,84           | 3,00                | 286,41  | 34,26                     |
| 14,4        | 35,53   | 0,77   | 55,53                  | 0,92   | 20,00           | 4,00                | 334,40  | 40,00                     |
| 18,0        | 35,53   | 0,77   | 52,63                  | 0,33   | 17,10           | 5,00                | 357,39  | 42,75                     |
| 21,6        | 35,53   | 0,77   | 50,10                  | 0,58   | 14,57           | 6,00                | 365,42  | 43,71                     |
| 25,2        | 35,53   | 0,77   | 48,23                  | 0,42   | 12,70           | 7,00                | 371,60  | 44,45                     |
| 28,8        | 35,53   | 0,77   | 44,30                  | 0,73   | 8,77            | 8,00                | 293,27  | 35,08                     |
| 32,4        | 35,53   | 0,77   | 41,50                  | 0,50   | 5,97            | 9,00                | 224,59  | 26,86                     |
| 36,0        | 35,53   | 0,77   | 38,90                  | 0,69   | 3,37            | 10,00               | 140,87  | 16,85                     |

Fonte: o Autor



Figura 27 – Gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $800 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$



Fonte: o Autor

De acordo com os dados da Tabela 12 e a Figura 27 que apresentaram os gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico, verificou-se que:

- as temperaturas aumentaram entre 3,6 L/h e 25,2 L/h.
- as temperaturas decresceram entre 25,2 L/h e 36 L/h.
- a maior diferença de temperatura  $\Delta t$  de 25,24 °C foi para a vazão de 3,6 L/h.
- a menor quantidade de calor absorvida pela água foi de 105,503 J/s para a vazão de 3,6 L/h.
- a maior quantidade de calor absorvida pela água de 371,602 J/s foi para a vazão de 25,2 L/h.
- a maior vazão fornecida pelo sistema foi de 36 L/h, permitindo uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 3,37 °C e absorvendo uma taxa de quantidade de calor de 140,866 J/s.
- o maior rendimento do sistema de 44,45 %, encontrou-se na vazão de 25,2 L/h, para uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 12,70 °C, recebendo uma quantidade de calor de 371,602 J/s.
- as maiores eficiências dos sistemas encontraram-se entre as vazões de 14,4 L/h e 25,2 L/h.

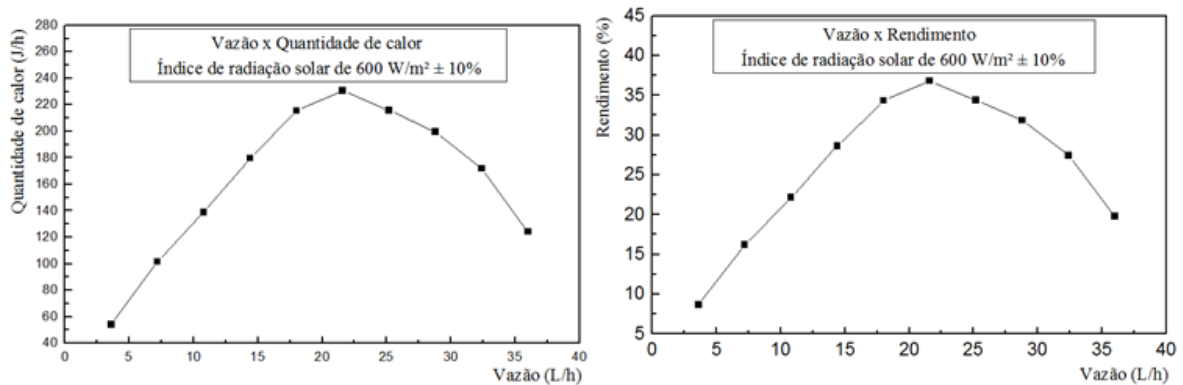
#### 4.3.3 Resultados para o índice de radiação solar de $600 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$

A Tabela 13 e os gráficos da Figura 28 são para o índice de radiação solar de  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ .

Tabela 13 – Cálculos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ 

| Índice de radiação solar = $600 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                                  |        |                        |        |                 |                     |         |                           |
|---|----------------------------------|--------|------------------------|--------|-----------------|---------------------|---------|---------------------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura (°C) Ambiente ao sol | Desvio | Temperatura (°C) média | Desvio | $\Delta t$ (°C) | massa de água (g/s) | Q (J/s) | Rendimento ( $\eta$ ) (%) |
| 3,6   | 32,13                            | 0,29   | 45,10                  | 0,73   | 12,97           | 1,00                | 54,21   | 8,65                      |
| 7,2   | 32,13                            | 0,29   | 44,27                  | 0,83   | 12,14           | 2,00                | 101,49  | 16,19                     |
| 10,8  | 32,13                            | 0,29   | 43,20                  | 0,91   | 11,07           | 3,00                | 138,82  | 22,14                     |
| 14,4  | 32,13                            | 0,29   | 42,87                  | 0,66   | 10,74           | 4,00                | 179,57  | 28,64                     |
| 18,0  | 32,13                            | 0,29   | 42,43                  | 0,39   | 10,30           | 5,00                | 215,27  | 34,33                     |
| 21,6  | 32,13                            | 0,29   | 41,33                  | 0,39   | 9,20            | 6,00                | 230,74  | 36,80                     |
| 25,2  | 32,13                            | 0,29   | 39,50                  | 0,57   | 7,37            | 7,00                | 215,65  | 34,39                     |
| 28,8  | 32,13                            | 0,29   | 38,10                  | 0,64   | 5,97            | 8,00                | 199,64  | 31,84                     |
| 32,4  | 32,13                            | 0,29   | 36,70                  | 1,06   | 4,57            | 9,00                | 171,92  | 27,42                     |
| 36,0  | 32,13                            | 0,29   | 35,10                  | 0,94   | 2,97            | 10,00               | 124,15  | 19,80                     |

Fonte: o Autor

Figura 28 – Gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $600 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ 

Fonte: o Autor

De acordo com os dados da Tabela 13 e a Figura 28 dos gráficos da quantidade de calor e rendimento térmico verificou-se:

- as temperaturas aumentaram entre 3,6 L/h e 21,6 L/h.
- as temperaturas decresceram entre 21,6 L/h e 36 L/h
- a maior eficiência do sistema encontrou-se entre 18 L/h e 28,8 L/h.
- a maior diferença de temperatura  $\Delta t$  de  $12,97 \text{ }^\circ\text{C}$  foi para a vazão de 3,6 L/h.
- a menor quantidade de calor absorvida pela água foi de 54,21 J/s para a vazão de 3,6 L/h.

- a maior quantidade de calor absorvida pela água de 230,74 J/s foi para a vazão de 21,6 L/h.
- a maior vazão fornecida pelo sistema foi de 36 L/h, permitindo uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 2,97 °C e absorvendo uma taxa de quantidade de calor de 124,15 J/s.
- o maior rendimento do sistema, de 36,80 %, encontra-se na vazão de 21,6 L/h, para uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 9,2 °C, recebendo uma taxa de quantidade de calor de 230,74 J/s.

#### 4.3.4 Resultados para o índice de radiação solar de 400 W/m<sup>2</sup> ± 10%

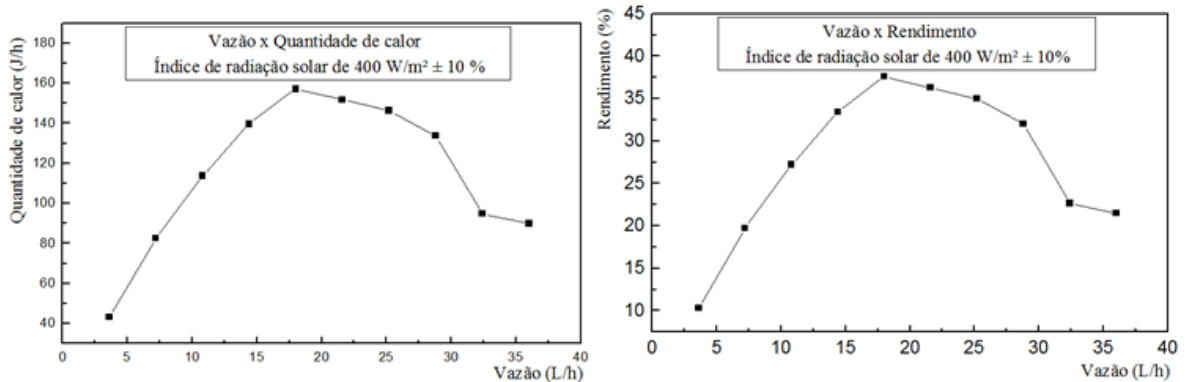
A Tabela 14 e os gráficos da Figura 29 são para o índice de radiação solar de 400 W/m<sup>2</sup> ± 10%.

Tabela 14 – Cálculos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para 400 W/m<sup>2</sup> ± 10 %

| Índice de radiação solar = 400 W/m <sup>2</sup> ± 10% |                                  |        |                        |        |         |                     |         |                    |
|---|----------------------------------|--------|------------------------|--------|---------|---------------------|---------|--------------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura (°C) Ambiente ao sol | Desvio | Temperatura (°C) média | Desvio | Δt (°C) | massa de água (g/s) | Q (J/s) | Rendimento (η) (%) |
| 3,6   | 30,23                            | 0,13   | 40,55                  | 0,18   | 10,32   | 1,00                | 43,14   | 10,32              |
| 7,2   | 30,23                            | 0,13   | 40,10                  | 0,29   | 9,87    | 2,00                | 82,51   | 19,74              |
| 10,8  | 30,23                            | 0,13   | 39,30                  | 0,48   | 9,07    | 3,00                | 113,74  | 27,21              |
| 14,4  | 30,23                            | 0,13   | 38,58                  | 0,58   | 8,35    | 4,00                | 139,61  | 33,40              |
| 18,0  | 30,23                            | 0,13   | 37,75                  | 0,57   | 7,52    | 5,00                | 157,17  | 37,60              |
| 21,6  | 30,23                            | 0,13   | 36,28                  | 0,47   | 6,05    | 6,00                | 151,73  | 36,30              |
| 25,2  | 30,23                            | 0,13   | 35,23                  | 0,53   | 5,00    | 7,00                | 146,30  | 35,00              |
| 28,8  | 30,23                            | 0,13   | 34,23                  | 0,45   | 4,00    | 8,00                | 133,76  | 32,00              |
| 32,4  | 30,23                            | 0,13   | 32,75                  | 0,27   | 2,52    | 9,00                | 94,80   | 22,68              |
| 36,0  | 30,23                            | 0,13   | 32,38                  | 0,44   | 2,15    | 10,00               | 89,87   | 21,50              |

Fonte: o Autor

Figura 29 – Gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $400 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$



Fonte: o Autor

De acordo com os dados da Tabela 15 e a Figura 30 dos gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico verificou-se que:

- as temperaturas aumentaram entre 3,6 L/h e 21,6 L/h.
- as temperaturas decresceram entre 21,6 L/h e 36 L/h.
- a maior diferença de temperatura  $\Delta t$  de  $10,32 \text{ }^\circ\text{C}$  foi para a vazão de 3,6 L/h.
- a menor quantidade de calor absorvida pela água foi de  $43,14 \text{ J/s}$  para a vazão de 3,6 L/h.
- a maior quantidade de calor absorvida pela água de  $157,17 \text{ J/s}$  foi para a vazão de 18,0 L/h.
- a maior vazão fornecida pelo sistema foi de 36 L/h, permitindo uma variação de temperatura em relação ao ambiente de  $2,15 \text{ }^\circ\text{C}$  e absorvendo uma taxa de quantidade de calor de  $89,87 \text{ J/s}$ .
- o maior rendimento do sistema, de  $37,60 \%$ , encontrou-se na vazão de 18,0 L/h, para uma variação de temperatura em relação ao ambiente de  $7,52 \text{ }^\circ\text{C}$ , recebendo uma taxa da quantidade de calor de  $157,17 \text{ J/s}$ .
- as maiores eficiências dos sistemas encontraram-se entre 14,4 L/h e 28,8 L/h.

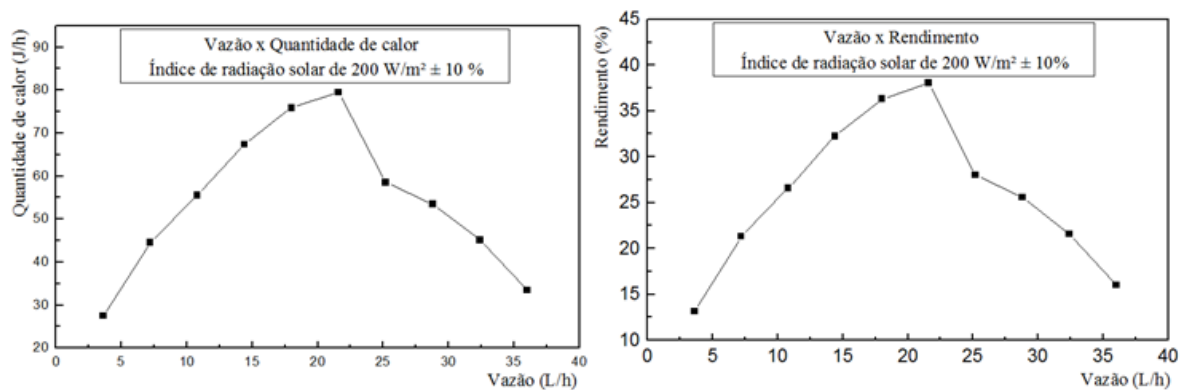
#### 4.3.5 Resultados para o índice de radiação solar de $200 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$

A Tabela 15 e os gráficos da Figura 30 são para o índice de radiação solar de  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ .

Tabela 15 – Cálculos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

| Índice de radiação solar = $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ |                                  |        |                        |        |                 |                     |         |                           |
|---|----------------------------------|--------|------------------------|--------|-----------------|---------------------|---------|---------------------------|
| Vazão (L/h)   | Temperatura (°C) Ambiente ao sol | Desvio | Temperatura (°C) média | Desvio | $\Delta t$ (°C) | massa de água (g/s) | Q (J/s) | Rendimento ( $\eta$ ) (%) |
| 3,6   | 29,30                            | 0,33   | 35,87                  | 0,29   | 6,57            | 1,00                | 27,46   | 13,14                     |
| 7,2   | 29,30                            | 0,33   | 34,63                  | 0,82   | 5,33            | 2,00                | 44,56   | 21,32                     |
| 10,8  | 29,30                            | 0,33   | 33,73                  | 0,97   | 4,43            | 3,00                | 55,55   | 26,58                     |
| 14,4  | 29,30                            | 0,33   | 33,33                  | 0,97   | 4,03            | 4,00                | 67,38   | 32,24                     |
| 18,0  | 29,30                            | 0,33   | 32,93                  | 0,90   | 3,63            | 5,00                | 75,87   | 36,30                     |
| 21,6  | 29,30                            | 0,33   | 32,47                  | 0,95   | 3,17            | 6,00                | 79,50   | 38,04                     |
| 25,2  | 29,30                            | 0,33   | 31,30                  | 0,64   | 2,00            | 7,00                | 58,52   | 28,00                     |
| 28,8  | 29,30                            | 0,33   | 30,90                  | 0,22   | 1,60            | 8,00                | 53,50   | 25,60                     |
| 32,4  | 29,30                            | 0,33   | 30,50                  | 0,16   | 1,20            | 9,00                | 45,14   | 21,60                     |
| 36,0  | 29,30                            | 0,33   | 30,10                  | 0,16   | 0,80            | 10,00               | 33,44   | 16,00                     |

Fonte: o Autor

Figura 30 – Gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico para  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 

Fonte: o Autor

De acordo com os dados da Tabela 15 e a Figura 30 dos gráficos da taxa da quantidade de calor e rendimento térmico verificou-se que:

- as temperaturas aumentaram entre 3,6 L/h e 21,6 L/h.
- as temperaturas decresceram entre 21,6 L/h e 36 L/h
- a maior eficiência do sistema encontrou-se entre 14,4 L/h e 21,6 L/h.
- a maior diferença de temperatura  $\Delta t$  de  $6,57 \text{ }^\circ\text{C}$  foi para a vazão de 3,6 L/h.
- a menor taxa da quantidade de calor absorvida pela água foi de  $27,46 \text{ J/s}$  para a vazão de 3,6 L/h.

- a maior taxa da quantidade de calor absorvida pela água de 79,50 J/s foi para a vazão de 21,6 L/h.
- a maior vazão fornecida pelo sistema foi de 36 L/h, permitindo uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 0,8 °C e absorvendo uma taxa da quantidade de calor de 33,44 J/s.
- o maior rendimento do sistema, de 38,04 %, encontrou-se na vazão de 21,6 L/h, para uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 3,17 °C, recebendo uma quantidade de calor de 79,50 J/s.
- as maiores eficiências dos sistemas encontraram-se entre 14,4 L/h e 21,6 L/h.

#### 4.3.6 Considerações gerais sobre os resultados

Após análises das Tabelas de 11 a 15 e dos gráficos das Figuras 26 a 30, verificou-se que o maior rendimento térmico foi de 44,45 % e ocorreu para o índice de radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup> com vazão de 25,2 L/h, com uma variação de temperatura em relação ao ambiente de 17,10 °C, absorvendo uma taxa da quantidade de calor de 357,39 J/s.

Verificou-se, também, que os melhores rendimentos ocorreram entre 18 L/h e 25,2 L/h, considerando-se os índices de radiação solar compreendidos entre 200 W/m<sup>2</sup> e 1000 W/m<sup>2</sup>.

Ao consultar os equipamentos com o selo PROCEL do INMETRO (2016) verificou-se que os rendimentos térmicos para os aquecedores solares planos e à vácuo foram entre 50 % e 60 %, com a utilização do processo de aquecimento por termosifão.

#### 4.4 PREÇOS DOS EQUIPAMENTOS

A Tabela 16 apresenta os preços atuais do aquecedor solar parabólico redondo utilizado neste trabalho e o preço de um aquecedor solar convencional.

Tabela 16 – Preços dos equipamentos

| Equipamento                           | Preço (R\$) |
|---------------------------------------|-------------|
| Concentrador solar parabólico redondo | 800,00      |
| Aquecedor solar convencional          | 2060,00     |

Fonte: o Autor

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Através das análises realizadas, concluiu-se que este modelo de aquecedor solar parabólico redondo foi adequado para a obtenção de água quente em sistema de fluxo contínuo. Verificou-se que o aquecedor possibilitou a elevação da temperatura de água para fins residenciais e comerciais. Utilizou-se um equipamento localizado no foco do aquecedor parabólico redondo constituído de uma panela pintada de preto fosco possuindo internamente uma serpentina de cobre com tubo de 8 metros de comprimento e 0,018 metros de diâmetro. Este dispositivo foi capaz de receber os raios solares concentrados permitindo o aquecimento da água que passava através da tubulação.

Para os índices de radiação solar entre  $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$  e  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10 \%$ , com vento menor que 2 m/s, temperaturas ambiente ao sol entre  $29 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $36 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , condições com nuvens e sem nuvens, verificou-se uma diminuição da temperatura com o aumento da vazão, mesmo com a temperatura ambiente ao sol mantendo-se constante.

Nessas condições os experimentos foram repetidos 20 vezes. Observou-se que foram atingidas temperaturas superiores a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  para uma vazão de 3,6 L/h, onde para 5 horas por dia de radiação solar correspondem a obtenção de 18 litros diários de água aquecida. Verificou-se uma elevação de  $49,3 \text{ }^\circ\text{C}$  na maior temperatura obtida e aumento de  $18,3 \text{ }^\circ\text{C}$  na menor temperatura.

Constatou-se que as elevações das temperaturas acima de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  são possíveis com vazões entre 3,6 L/h e 21,6 L/h.

Nos experimentos, com poucas nuvens, observou-se que o rendimento térmico máximo atingido foi de 12,2 % para uma vazão de 25,2 L/h onde para 5 horas por dia de radiação solar corresponde à obtenção de 126 litros diários, elevando a temperatura em  $9,33 \text{ }^\circ\text{C}$  considerando os valores médios de temperaturas.

Nos experimentos com muitas nuvens e baixo índice de radiação solar, de  $200 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ , observou-se um rendimento térmico de 10,46 % para a vazão de 21,6 L/h onde para 5 horas por dia de radiação solar corresponde a obtenção de 108 litros diários, elevando a temperatura em  $3,17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Foi verificado também com o tempo totalmente nublado e índice de radiação de  $120 \text{ W/m}^2$  e temperatura ambiente de  $28 \pm 2^\circ \text{C}$  que não houve aumento na temperatura de saída de água do aquecedor.

Concluiu-se que este modelo de aquecedor solar parabólico redondo apresentou um rendimento adequado de operação entre 18 L/h e 25,2 L/h.

Este aquecedor também pode ser utilizado como um sistema de pré-aquecimento de fluídos.

Para futuros experimentos, medições e análises do equipamento em questão, instalar insulfilme espelhado na superfície refletora do aquecedor parabólico, com o objetivo de uma melhor reflexão permitindo o aumento da temperatura de saída da água. No foco instalar um invólucro, com vidro transparente, para um tubo de cobre de comprimento maior, com diâmetro menor, em formato de serpentina, para receber a intensidade de radiação solar.

Sugere-se também realizar os experimentos com um sistema de acumulação, como o termossifão, e comparar com os estudos já existentes.



## REFERÊNCIAS

ABRAVA. **Perspectivas do mercado de Aquecimento Solar Brasileiro e o Desenvolvimento Tecnológico**. DASOL. São Paulo. 2012

\_\_\_\_\_. **Aquecimento de Água na Matriz Energética Brasileira**. DASOL. São Paulo. 2014.

\_\_\_\_\_. **Expectativa de crescimento de Aquecedores Solares no Brasil**. DASOL. São Paulo. 2015.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Solar**. 2005. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\\_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em 18 de novembro de 2015.

ARVIZU *et al.* **Direct Solar Energy**. USA. 2011.

ATOMRA. **Energia renovável**. [s.d.]. Disponível em <http://www.atomra.com.br/energia-renovavel-para-empresas/engenharia-em-energia-renovavel/>. Acesso em 08 de dezembro de 2015.

BIANCHINI, H. M. **Avaliação Comparativa de Sistemas de Energia Solar Térmica**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.

CRESESB. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Manual. Rio de Janeiro. 2014.

CURINGA, A. M.; LIMA, L. B. M.; SOUZA, L. F. **Projeto de Concentrador Solar para Dessalinização**. In: IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN. Currais Novos, 2013.

DORNELLES, K. A.; CARAM, R. M.; SICHIERI, E. P. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. In: XII ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12. **Anais ...** Brasília. 2013.

FINOCCHIO, M. A. F. **Revisão de ótica**. Aula. Universidade Tecnológica do Paraná. Campus Cornélio Procópio. Cornélio Procópio. [s.d.].

GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células** fotovoltaicas. Monografia. Universidade Federal de Lavras. 2006.

INMETRO. **Selo Procel aquecedores solares**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares.pdf>> acesso em 30 de maio de 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Summary. 2012.

ISMANHOTO, W. A. **Análise comparativa da viabilidade econômica da utilização de coletores solares para aquecimento de água**. Dissertação. Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP. Botucatu. 2004.

KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: manual sobre tecnologias, projeto e instalação**. USA: Elsevier, 2009.

MATTOS, S. R. **Análise do Rendimento Térmico do Aquecedor Solar Parabólico Cilíndrico**. Dissertação. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP. Guaratinguetá. 2011.

MEDEIROS, M. **Simulação e avaliação de um sistema de aquecimento solar de água utilizando balanço energético**. Dissertação. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 2012.

MILLER, A., LUMBY, B. **Utility Scale Solar Power Plants: A Guide For Developers and Investors**. International Finance Corporation, 2012. Disponível em: <<http://www1.ifc.org/wps/wcm/connect/04b38b804a178f13b377ffdd29332b51/SOLAR%2BGUIDE%2BBOOK.pdf?MOD=AJPERES>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2015.

NOVO, M. M. M.; BITENCOURT, C. S.; TIBA, P. R. T.; SILVA, D. G. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade**. Artigo. Universidade Federal de São Carlos. 2014.

OLIVEIRA, T. U. M. **Análise da viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar de água para uma empresa do setor hoteleiro**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2011.

PALZ, Wolfgang. O sol, energia de amanhã: meios e perspectivas. In \_\_\_\_\_: **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1995.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RUTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE. São José dos Campos. 2006.

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. C. Energia Solar Térmica. In: \_\_\_\_\_ **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003. p. 239-280.

PRADO, R. T. A. *et al.* **Levantamento do estado da arte: Energia Solar**. Projeto Finep 2386/04. São Paulo. 2007

PHILIBERT, C.; FRANKL, P.; DOBROTKOVA, Z. **Technology roadmap: Concentrating Solar Power**. International Energy Agency (IEA). 2010.

PORTAL ENERGIA. **Energia Solar Térmica**. Manual. Lisboa. 2004

RAGHEB, M. **Solar Thermal Power and Energy Storage Historical Perspective**. University of Illinois at Urbana-champaign. USA. 2011.

RIGOTI, V. L. A. **Análise experimental dos Processos de Transferência de calor aplicados à concentração solar**. Dissertação. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2008.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Radiação Solar Balanço de Energia**. Esalq/Usp. Lorena. 2009.

VASCONCELLOS, L. E. M.; LIMBERGER, M. A. C. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil**. Rio de Janeiro: Eletrobrás Procel, 2012.

VIDAL, G. F. S.; GAVA, G. H. **Concentrador Solar Parabólico aplicado ao aquecimento de óleos: Um projeto experimental de otimização ao tubo focal**. Artigo. In.: XIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Uberlândia. 2007.