

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**GABRIEL DE CARVALHO BASSO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR DE  
CALHA PARABÓLICA (PTC) COM TUBO EVACUADO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA**

**2021**

**GABRIEL DE CARVALHO BASSO**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR DE  
CALHA PARABÓLICA (PTC) COM TUBO EVACUADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto  
Co-orientador: Prof. Dr. Ing. Rodrigo Corrêa da Silva

**LONDRINA**

**2021**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria  
Nome da Coordenação  
Nome do Curso



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA (PTC) COM TUBO EVACUADO**

por

**GABRIEL DE CARVALHO BASSO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 23 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em engenharia mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

(Ismael de Marchi Neto)  
Prof.(a) Orientador(a)

---

(Rafael Sene de Lima)  
Membro titular

---

(Ricardo de Vasconcelos Salvo)  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos professores do Thermal Systems Laboratory (TSL) por terem me recebido e transmitido tanto conhecimento científico e experiências pessoais e profissionais, Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto, Prof. Dr. Ing. Rodrigo Corrêa da Silva, Prof. Dr. Rafael Sene de Lima e Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo.

Em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto por tanta dedicação, apoio e incentivo que teve comigo ao longo da orientação. Até mesmo fora do seu horário de trabalho esteve presente, me auxiliando nos momentos de grande dificuldade que passei.

Aos meus companheiros de laboratório.

Aos meus companheiros de aula.

Aos meus professores pelo conhecimento científico e experiências compartilhadas ao longo da graduação.

À todas as pessoas que direta, ou indiretamente, me ajudaram nesta fase tão importante da minha vida pessoal, profissional e acadêmica.

Aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado.

## RESUMO

BASSO, Gabriel de Carvalho. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA (PTC) COM TUBO EVACUADO**. 2021. 86. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Visando a substituição parcial dos combustíveis fósseis para geração de energia por fontes de energia renováveis, a energia solar se mostra uma opção viável devido a sua grande abrangência em aplicações residenciais, comerciais e industriais. Com base no uso sustentável de energia, foi projetado e construído um concentrador solar de calha parabólica (PTC) para aproveitamento da energia solar no aquecimento de água. A presente proposta consiste na modificação do tubo absorvedor, criando um envoltório de vidro evacuado, de modo a reduzir as perdas de calor e aumentar a eficiência térmica do concentrador. A eficiência térmica do concentrador, após a inserção do tubo evacuado, foi comparada com os resultados previamente obtidos para o tubo absorvedor não evacuado, nas condições de tubo Sem Pintura e tubo Com Pintura (NETZEL, 2019). A redução nas perdas de calor para o ambiente com a utilização do vácuo elevou a eficiência térmica do concentrador para 52,18%. A eficiência do concentrador para a configuração Sem Pintura foi de 28,99% e para a configuração Com Pintura de 36,69%, resultando em um aumento de 79,99% e 42,22%, respectivamente. A eficiência térmica apresentou uma relação diretamente proporcional com a radiação solar incidente, enquanto a eficiência se relaciona de forma inversamente proporcional com os níveis de temperatura e o horário de operação.

**Palavras-chave:** Energia solar. Concentrador solar. Calha parabólica. PTC. Tubo evacuado.

## ABSTRACT

BASSO, Gabriel de Carvalho. **EXPERIMENTAL STUDY OF A PARABOLIC TROUGH COLLECTOR WITH EVACUATED PIPE**. 2021. 86. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2021.

Aiming at the partial or integral replacement of fossil fuels for power generation by renewable energy sources, solar energy proves to be a viable option due to its wide scope in residential, commercial and industrial applications. Based on the sustainable use of energy, a parabolic trough collector (PTC) was designed and built to use solar energy in water heating. The present proposal is the modification of the absorber tube, creating an evacuated glass envelope, in order to reduce heat losses and increase the thermal efficiency of the concentrator. The thermal efficiency of the concentrator after insertion of the evacuated tube will be compared with the results previously obtained for the non-evacuated absorber tube, in the conditions of tube with and without selective painting (NETZEL, 2019). The reduction in heat losses to the environment with the use of vacuum raised the thermal efficiency of the concentrator to 52,18%. The concentrator efficiency for the Unpainted configuration was 28.99% and for the Painted configuration was 36.69%, resulting in an increase of 79,99% and 42,22%, respectively. Thermal efficiency was directly proportional to incident solar radiation, while efficiency was inversely related to temperature levels and operating hours.

**Keywords:** Solar energy. Solar concentrators. Parabolic trough collector. PTC. Evacuated pipe.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição percentual da radiação solar incidente. ....	16
Figura 2 – Tipos de coletor solar. ....	17
Figura 3 – Esquema de um tubo evacuado. ....	18
Figura 4 – Concentrador de disco parabólico. ....	20
Figura 5 – Esquema de torre solar utilizando sais fundidos como fluido térmico. ....	21
Figura 6 – Refletor linear de Fresnel. ....	23
Figura 7 – Concentrador solar de calha parabólica. ....	24
Figura 8 – Desenho esquemático de um concentrador solar de calha parabólica. ...	25
Figura 9 – Faixas de temperatura, aplicações e tecnologias de coletores. ....	28
Figura 10 – Visão geral do sistema integrado PTC proposto para uma fábrica de sorvetes. ....	29
Figura 11 – Conceito de geração de vapor com energia solar concentrada. ....	30
Figura 12 – Esquema de usina termossolar de concentradores de calha parabólica. ....	31
Figura 13 – Desempenho e parâmetros técnicos para tecnologias heliotérmicas. ....	32
Figura 14 – Armazenamento térmico em planta CSP. ....	34
Figura 15 – Combinação de armazenamento e backup em uma planta CSP. ....	34
Figura 16 – Esquema de funcionamento de uma planta híbrida. ....	35
Figura 17 – Receptor do PTC. ....	36
Figura 18 – Desenho CAD em vista isométrica das buchas de vedação. ....	40
Figura 19 – Buchas de vedação com os o-rings internos e externos. ....	41
Figura 20 – Bucha de vedação com o-rings e válvula de serviço. ....	42
Figura 21 – Montagem do tubo evacuado com bomba de vácuo acoplada à válvula de serviço. ....	43
Figura 22 – Concentrador solar parabólico com tubo evacuado. ....	44
Figura 23 – Problemas de montagem do tubo evacuado. ....	45
Figura 24 – Sensores responsáveis pelo rastreamento solar. ....	46
Figura 25 – Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados e instrumentação. ....	47
Figura 26 - Esquema do processo de conversão da radiação solar em energia térmica. ....	48
Figura 27 - Representação da área de abertura do concentrador. ....	49
Figura 28 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (18/07/2020). ....	55
Figura 29 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (01/08/2020). ....	56
Figura 30 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (06/09/2020). ....	56
Figura 31 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (26/09/2020). ....	57

Figura 32 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (11/10/2020).....	58
Figura 33 – Boxplot da radiação solar incidente durante o Experimento 3. ....	61
Figura 34 – Boxplot da temperatura ambiente durante o Experimento 3. ....	62
Figura 35 – Boxplot da temperatura de entrada do fluido de trabalho durante o Experimento 3. ....	63
Figura 36 – Boxplot da temperatura de saída do fluido de trabalho durante o Experimento 3. ....	63
Figura 37 – Eficiência térmica em função da radiação incidente do Experimento 3..	64
Figura 38 – Perdas de energia em função da radiação incidente do Experimento 3.	65
Figura 39 – Eficiência térmica em função da temperatura de entrada do fluido de trabalho do Experimento 3. ....	66
Figura 40 – Eficiência térmica em função da temperatura de saída do fluido de trabalho do Experimento 3. ....	66
Figura 41 – Perdas de energia em função da temperatura superficial na saída do tubo absorvedor do Experimento 3. ....	67
Figura 42 – Eficiência térmica em função da temperatura ambiente do Experimento 3. ....	68
Figura 43 – Perdas de energia ao longo do Experimento 3. ....	69
Figura 44 – Eficiência térmica em função do período de operação do Experimento 3. ....	69
Figura 45 – Temperatura ambiente média durante os experimentos.....	71
Figura 46 – Radiação solar média no concentrador solar durante os experimentos.	72
Figura 47 – Temperatura de entrada média do fluido de trabalho durante os experimentos.....	73
Figura 48 – Temperatura de saída média do fluido de trabalho durante os experimentos.....	73
Figura 49 – Calor absorvido médio durante os experimentos. ....	74
Figura 50 – Eficiência térmica média durante os experimentos. ....	75



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de concentradores solar. ....	19
Tabela 2 – Lista de materiais. ....	39
Tabela 3 – Dados médios referentes ao Experimento 3. ....	59
Tabela 4 – Dados médios para análise global referentes ao Experimento 3. ....	60
Tabela 5 – Dados médios juntamente de suas incertezas referentes aos Experimentos 1, 2 e 3. ....	76
Tabela 6 –Diferenças relativas referentes aos Experimentos 1, 2 e 3. ....	76

## NOMENCLATURA

$A_a$	Área de abertura
$c_p$	Calor específico a pressão constante da água
$c_v$	Calor específico a volume constante da água
$D_r$	Diâmetro do tubo de cobre
$G$	Radiação solar incidente
$L$	Comprimento do concentrador solar
$m$	Massa de água no reservatório
$\dot{m}$	Vazão mássica de água
$Pot$	Potência elétrica da bomba
$Q_{abs}$	Calor absorvido
$Q_{armazenada}$	Energia armazenada ao longo do experimento
$Q_{disponível}$	Energia disponível ao longo do experimento
$Q_{in}$	Calor incidente
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$T_{in}$	Temperatura da água na entrada do tubo concentrador
$T_{out}$	Temperatura da água na saída do tubo concentrador
$w$	Largura da parábola

## LETRAS GREGAS

$\beta_0$	Parâmetro a ser estimado para o coeficiente linear
$\beta_0$	Parâmetro a ser estimado para o coeficiente angular
$\Delta T_{caixa}$	Varição de temperatura da água no reservatório
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\eta_G$	Eficiência térmica global
$\eta_I$	Eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
<b>2 REFERÊNCIAL TEÓRICO</b>	<b>16</b>
2.1 ENERGIA TERMOSSOLAR	16
2.2 COLETOR SOLAR	17
2.3 CONCENTRADOR SOLAR	18
2.3.1 Tecnologias de Foco Pontual	19
2.3.1.1 Disco parabólico	20
2.3.1.2 Torre solar	21
2.3.2 Tecnologias de Foco Linear	22
2.3.2.1 Refletor linear de Fresnel	22
2.4 CONCENTRADOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA	23
2.4.1 Refletor	25
2.4.2 Receptor	25
2.4.3 Sistema de Rastreamento	26
2.5 ENERGIA TERMOSSOLAR EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	27
2.5.1 Geração de Vapor	30
2.6 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E ARMAZENAMENTO TÉRMICO	31
2.6.1 Armazenamento Térmico	33
2.7 DESENVOLVIMENTO DE CONCENTRADORES SOLARES DE CALHA PARABÓLICA (PTC) COM TUBO EVACUADO	35
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>39</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	39
3.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUBO EVACUADO	40
3.2.1 Montagem	41
3.2.2 Problemas de Montagem	44
3.3 SISTEMA DE CONTROLE E COLETA DE DADOS	45
3.3.1 Sistema de Controle Eletrônico	45
3.3.2 Sistema Hidráulico	46
3.3.3 Sistema de Aquisição de Dados e Instrumentação	47
3.4 ANÁLISE TÉRMICA	47
3.4.1 Eficiência Térmica	48
3.4.2 Eficiência Térmica Global	50
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA E ANÁLISE DE INCERTEZA	51
3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>54</b>
4.1 EXPERIMENTO 3: TUBO ABSORVEDOR COM PINTURA SELETIVA E ENCAPSULAMENTO DE VIDRO EVACUADO	54

4.1.1 Análise Térmica .....	54
4.1.2 Análise de Eficiência Térmica Global.....	59
4.1.3 Análise Estatística e Análise de Incerteza .....	60
4.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONFIGURAÇÕES DE TUBO ABSORVEDOR..	70
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade em suprir a crescente demanda energética da sociedade, aliada a minimização dos impactos ambientais, faz com que seja produzida cada vez mais energia de forma sustentável. Apesar dos combustíveis fósseis apresentarem melhor custo-benefício, quando comparadas às fontes de energia renováveis, possuem elevado impacto ambiental. Os gases provenientes da queima destes combustíveis, além de poluírem o ar, são responsáveis pela chuva ácida e contribuem para o aumento do efeito estufa e, conseqüentemente, do aquecimento global. Dessa forma, surge a necessidade de adotar novas fontes de energia limpas e renováveis para compor a matriz energética.

A matriz energética mundial é composta de 86,3% por fontes de energia não renováveis (combustíveis fósseis e urânio), e 13,7% por fontes de energias renováveis. Condições privilegiadas para geração de energia hídrica, eólica, solar e de biomassa da cana são responsáveis pela maior participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira que, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2019, totaliza 45,3% (EPE, 2019).

Dentre as fontes de energia disponíveis a energia solar é a que possui maior potencial de geração, com irradiação incidente na Terra equivalente a 21 bilhões de toneladas de carvão por hora (LLP, 2009). Considerando a demanda energética e os níveis de temperatura, o número de aplicações da energia solar apresenta-se muito abrangente. O uso mais comum da energia solar é para o aquecimento de água, substituindo os métodos tradicionais que utilizam resistências elétricas ou gás. Outra aplicação usual para o uso da energia solar é na geração de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores e concentradores solares. A tecnologia de coletores solares de tubo evacuado é a mais utilizada no mundo para aquecimento de água residencial ou comercial, porém o investimento inicial é elevado quando comparado com outros sistemas, como o chuveiro elétrico, dificultando assim o uso em larga escala no Brasil.

Concentradores solares são utilizados em aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, tais como: secagem de alimentos, dessalinização da água, refrigeração por absorção, processos industriais que demandam vapor e geração de energia elétrica. Atualmente, a tecnologia de concentradores parabólicos

é mais difundida em usinas para geração termoelétrica de eletricidade, concentrando os raios solares num único ponto e permitindo temperaturas de trabalho maiores. Dessa forma, apresentam melhor eficiência de conversão do ciclo termodinâmico para geração de potência.

## 1.1 OBJETIVOS

A presente proposta consiste na modificação do atual projeto do concentrador solar cilindro parabólico, pertencente ao Laboratório de Sistemas Térmicos da UTFPR Londrina, de modo a aumentar a sua eficiência térmica, reduzindo as perdas de calor utilizando um tubo evacuado. O trabalho tem como principal objetivo avaliar e comparar o desempenho térmico do concentrador solar e do sistema de armazenamento de energia térmica com aqueles obtidos por Netzel (2019) em seu trabalho de conclusão de curso. Dentre os objetivos específicos destacam-se os seguintes itens:

- Projeto, construção e montagem do tubo evacuado;
- Readequação da instrumentação utilizada;
- Análise térmica do reservatório e concentrador solar;
- Análise estatística dos experimentos realizados;
- Análise das incertezas de medição.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Na busca por fontes de energia limpas e sustentáveis para compor uma matriz energética diversificada, substituindo as tradicionais fontes de energia que provocam maiores danos ao meio ambiente e à saúde humana, a energia solar se mostra uma boa opção devido ao elevado potencial de geração com menores impactos ambientais. Além disso, uma outra grande vantagem da utilização da energia solar é o fato de o custo ser previsível, não sendo afetado por variações no câmbio, como é o caso dos combustíveis fósseis, que são constantemente alterados devido a variação do dólar.

Observando a extensão territorial e a localização geográfica, o Brasil é um país privilegiado para a utilização de energia solar, com radiação solar média de 5,6 kWh/m<sup>2</sup> (ANEEL, 2005). Embora se mostre capaz de suprir as necessidades energéticas, o desafio está no aproveitamento dessa fonte de maneira economicamente competitiva. Por não possuir muitas pesquisas e investimentos na área, a energia solar tem participação menor que 1% na matriz energética brasileira.

Países líderes em capacidade instalada são os que possuem políticas de incentivo à tecnologia, apresentando grande aproveitamento da energia solar mesmo com níveis de radiação solar inferiores aos do Brasil, como é o caso da China, cuja produção corresponde a cerca de 26% da produção global, com radiação solar média incidente de 2,8 kWh/m<sup>2</sup> (EPE, 2019).

Dentre os principais dispositivos para o aproveitamento da energia solar estão os concentradores solares, utilizados para captar a radiação solar incidente a uma determinada superfície e concentrá-la numa região muito menor, promovendo o aumento de temperatura desta região. A utilização de concentrador cilíndrico parabólico para aquecimento de água apresenta um bom rendimento, visto que são utilizados em usinas termossolares para geração de energia elétrica a partir da geração de vapor de água.

Tecnologias e pesquisas sobre concentração solar com tubo evacuado em língua portuguesa são escassas, fazendo com que este trabalho sirva como forma de disseminar a informação. Além disso, os conhecimentos obtidos ao longo da graduação poderão ser aplicados, em especial, os que se referem à área térmica.

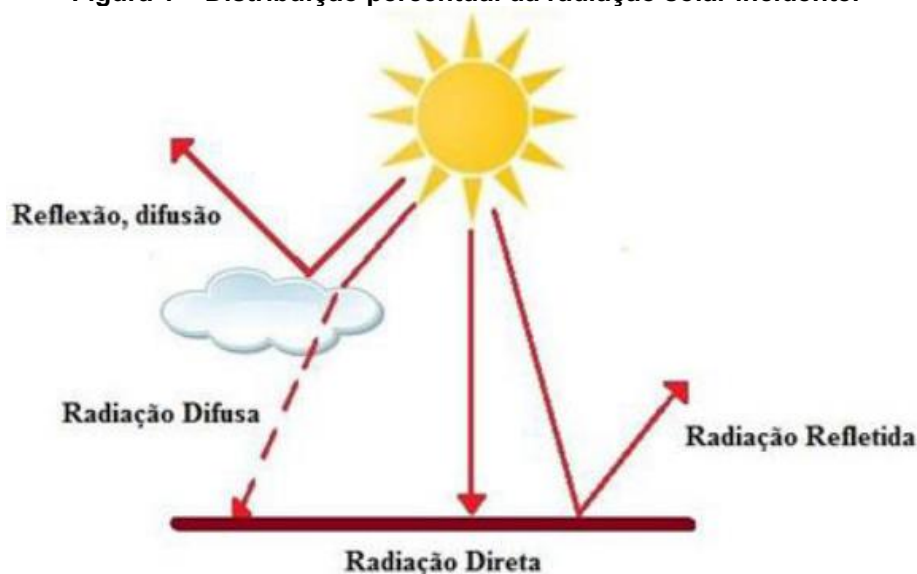
## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados estudos científicos de dispositivos utilizados para o aproveitamento térmico da energia solar em processos industriais e na geração de energia elétrica. Resultados de pesquisas envolvendo concentradores com tubo evacuado, são mostrados ao final, com destaque aos concentradores de calha parabólica.

### 2.1 ENERGIA TERMOSSOLAR

A radiação solar no caminho até a superfície terrestre sofre uma atenuação ao passar pela atmosfera, resultado dos processos físicos de absorção e reflexão. Cerca de 30% da radiação incidente é refletida de volta para o espaço. Da radiação que chega à superfície da Terra, apenas 25% penetra diretamente sem sofrer nenhum tipo de interferência, denominada radiação direta, sendo de fundamental importância nos casos de concentração de energia solar. Já a radiação difusa é aquela que chega à superfície sem trajetória definida, devido a processos de interação com a atmosfera/superfícies, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição percentual da radiação solar incidente.



Fonte: Dias; Pereira; Coelho (2015).



O estudo da captação e transformação da energia solar em energia útil, bem como o armazenamento e sua utilização, têm se tornado um tópico de pesquisa e desenvolvimento cada vez mais relevante para vários pesquisadores.

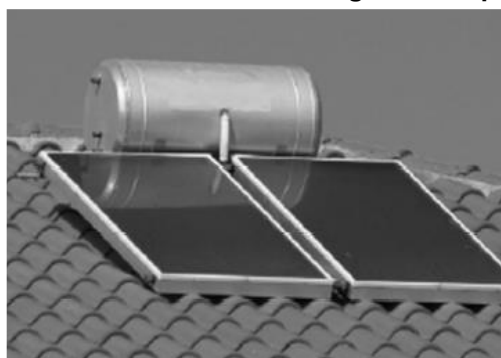
Os métodos de conversão térmica da energia solar se fundamentam na absorção da energia radiante por uma superfície negra (superfície absorvedora), onde a energia radiante de diversos comprimentos de onda se transforma em calor e é transferida ao elemento que irá receber a energia útil.

## 2.2 COLETOR SOLAR

A radiação solar pode ser absorvida e convertida em energia térmica com o uso de coletores solares, principalmente para aquecimento de água a temperaturas relativamente baixas, inferiores a 100°C. O calor absorvido é transferido para a água que circula através de suas tubulações, sendo armazenado em um reservatório para uso posterior.

O tipo de coletor solar a ser utilizado depende do tipo de aplicação e da temperatura de operação que a aplicação necessita. Basicamente são dois os tipos mais utilizados, o coletor de placa plana (*Flat Plate Collectors - FPC*, Figura 2a) e o coletor de tubo evacuado (*Evacuated Tube Collector - ETC*, Figura 2b). Os coletores solares de tubo evacuado apresentam melhor eficiência térmica e atingem temperaturas maiores em relação aos coletores de placa plana, em contrapartida, apresentam também o maior custo.

Figura 2 – Tipos de coletor solar.



a) FPC.

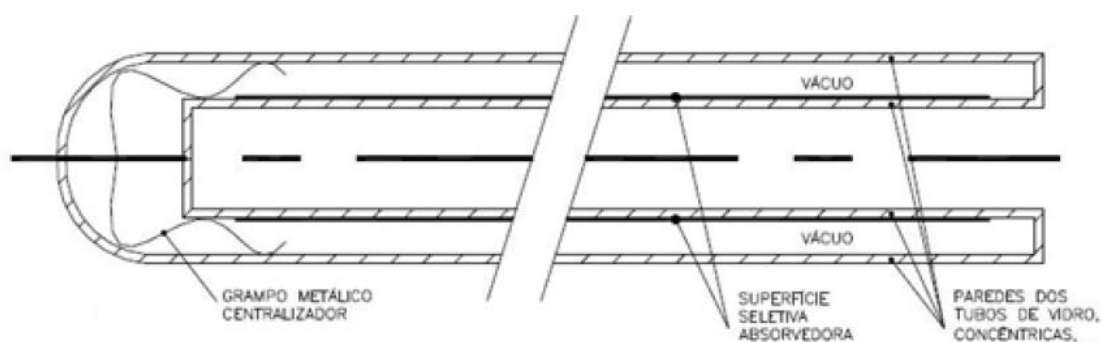


b) ETC.

Fonte: Kalogirou (2009).

Os tubos evacuados, esquematizados na Figura 3, são constituídos de dois tubos de vidro concêntricos com uma extremidade fechada e outra aberta, por onde passa o fluido de trabalho. Para maior absorção de calor é utilizada pintura seletiva e para reduzir as perdas de calor é aplicado vácuo na região entre os tubos.

**Figura 3 – Esquema de um tubo evacuado.**



**Fonte: Rosa (2012).**

## 2.3 CONCENTRADOR SOLAR

Devido à baixa eficiência de captação dos coletores solares planos, foram desenvolvidos os coletores do tipo concentradores, dispositivos utilizados para concentrarem o máximo de radiação possível nos receptores de energia solar. Os concentradores são utilizados na conversão em larga escala de energia térmica, captando a radiação solar incidente sobre uma grande área e concentrando-a sobre uma pequena área, reduzindo a área de troca de calor, reduzindo as perdas de energia e aumentando o fluxo de radiação.

Um parâmetro relevante quando se utiliza coletores do tipo concentradores é a razão de concentração, definida como sendo a razão entre a área da superfície refletora e a área do receptor, considerada uma das características geométricas mais importantes dos concentradores.

A restrição ao uso desse equipamento está na necessidade de radiação direta. A radiação difusa da atmosfera e de outros objetos não é concentrada, sendo sua participação desprezível para determinação da energia que chega aos receptores (KEMPFER, 2011).

O calor absorvido nos receptores é transferido ao fluido de trabalho que circula em seu interior, dessa forma a energia solar é convertida em energia térmica, na forma de calor sensível ou latente de fluido.

Com relação às tecnologias mais promissoras para a absorção da energia solar, os concentradores podem ser classificados quanto ao tipo de foco, pontual ou linear. Uma outra forma de classificar os concentradores é em função do sistema de posicionamento, o qual pode ser estacionário ou não estacionário. Os principais concentradores utilizados, bem como a classificação de cada um quanto ao tipo de foco e sistema de posicionamento, são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Tipos de concentradores solar.**

TIPO DE FOCO POSICIONAMENTO	FOCO LINEAR	FOCO PONTUAL
FIXO	Refletor Linear de Fresnel	Torre Solar
MÓVEL	Calha Parabólica	Disco Parabólico

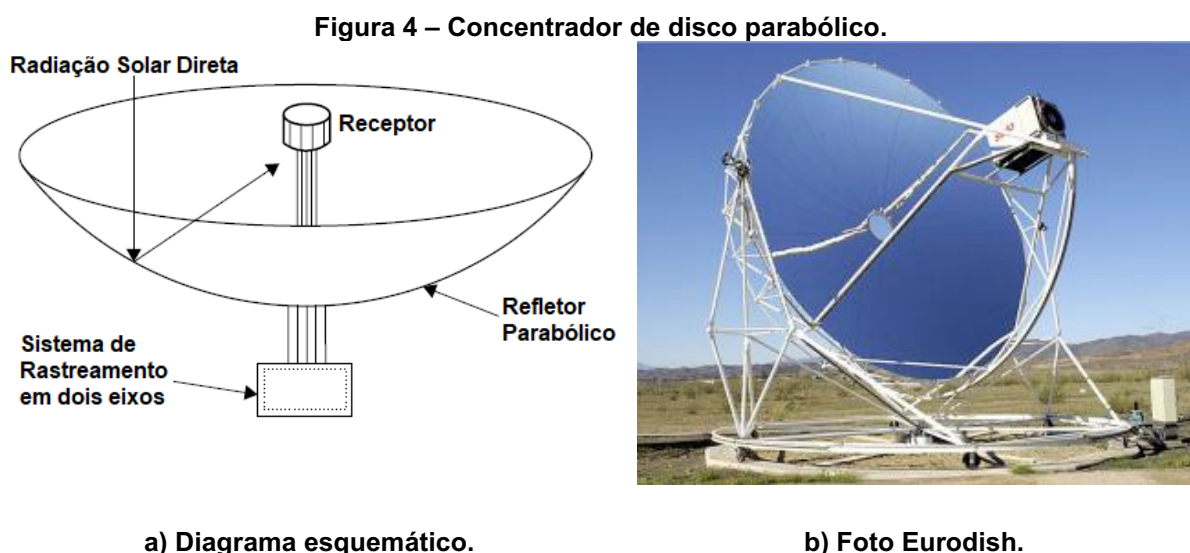
Fonte: Adaptado de IEA (2010).

### 2.3.1 Tecnologias de Foco Pontual

Mesmo possuindo maior custo, é a tecnologia que mais ganha mercado atualmente. Os concentradores com tecnologia de foco pontual rastreiam o sol ao longo de dois eixos, concentrando os raios solares sobre um único ponto, aumentando a densidade de fluxo radiante e minimizando as perdas de energia, permitindo temperaturas de trabalho mais altas (> 400°C). Como consequência, possui uma melhor eficiência de conversão do ciclo termodinâmico para geração de potência.

### 2.3.1.1 Disco parabólico

O concentrador de disco parabólico (*Parabolic Dish*), mostrado esquematicamente na Figura 4a, é um concentrador de foco pontual de dois eixos, concentrando a radiação solar em um receptor localizado no ponto focal da parábola. O calor absorvido pelo fluido de trabalho pode ser transportado através de uma tubulação para um sistema central ou ser transformado diretamente em eletricidade, visto que a maioria dos discos parabólicos possuem um motor Stirling independente no ponto focal (IEA, 2010). A Figura 4b mostra um dos concentradores do campo solar Eurodish na Alemanha.



Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009).

Possuem as maiores razões de concentração (600 a 2000), sendo o concentrador mais eficiente, podendo o fluido de trabalho atingir temperaturas superiores a  $1500^{\circ}\text{C}$  e produzir 150 kW de potência térmica ou 50 kW de potência elétrica (KALOGIROU, 2009).

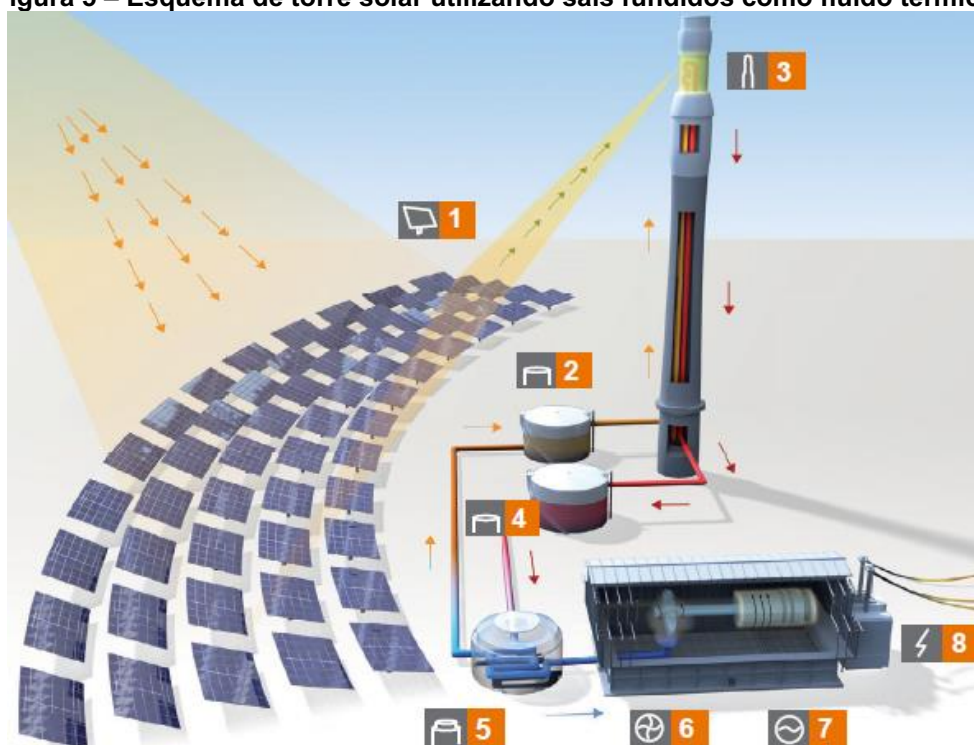
Características como tamanho compacto, ausência da necessidade de água de resfriamento, baixa compatibilidade com armazenamento térmico e baixa possibilidade em operar de forma híbrida, posicionam os concentradores de disco parabólico em concorrência direta com módulos fotovoltaicos e outras tecnologias de energia solar concentrada (IEA, 2010).

### 2.3.1.2 Torre solar

O campo de refletores heliostato, ou torre solar (*Solar Tower*), consiste em centenas ou milhares de pequenos refletores capazes de rastrear o sol, que são utilizados para concentrar a radiação solar em um receptor central colocado sobre uma torre fixa. Cada heliostato é composto por quatro espelhos instalados no mesmo pilar, com área refletora total de 50 a 150 m<sup>2</sup> (KALOGIROU, 2009).

O poder de concentração da torre possibilita atingir temperaturas muito altas, aumentando assim a eficiência na qual o calor é convertido em eletricidade e reduzindo o custo com armazenamento térmico. Algumas plantas comerciais em operação utilizam sais fundidos como fluido de transferência de calor e meio de armazenamento, enquanto outras trabalham com geração direta de vapor (IEA, 2010). A Figura 5 ilustra o funcionamento de uma planta de geração de energia elétrica a partir da energia solar concentrada por torre solar.

**Figura 5 – Esquema de torre solar utilizando sais fundidos como fluido térmico.**



Fonte: (GIZ, 2017).

### 2.3.2 Tecnologias de Foco Linear

Os concentradores com tecnologia de foco linear, através de um sistema de concentração por espelhos, reorientam a radiação solar direta, aumentando a densidade de fluxo radiante no receptor linear situado na linha focal do sistema. O fluido de trabalho que circula dentro desse receptor linear é aquecido, convertendo a energia solar em energia térmica.

As tecnologias de foco linear mais comuns são a de calha parabólica e os refletores lineares de Fresnel. Por se tratar do assunto principal do trabalho, a tecnologia de calha parabólica (Seção 2.4) e desenvolvimento de concentradores de calha parabólica com tubo evacuado (Seção 2.7) serão abordados de maneira mais completa em seções próprias.

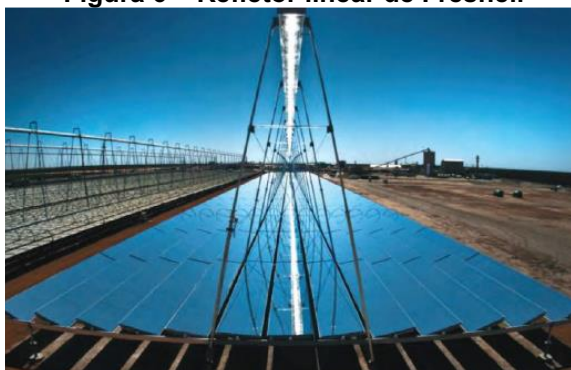
#### 2.3.2.1 Refletor linear de Fresnel

O refletor linear de Fresnel (*Linear Fresnel Reflector LFR*, Figura 6a) utiliza espelhos planos ou levemente curvos para aproximar o formato parabólico do concentrador de calha parabólica, concentrando a radiação solar em um receptor linear fixo localizado sobre os espelhos.

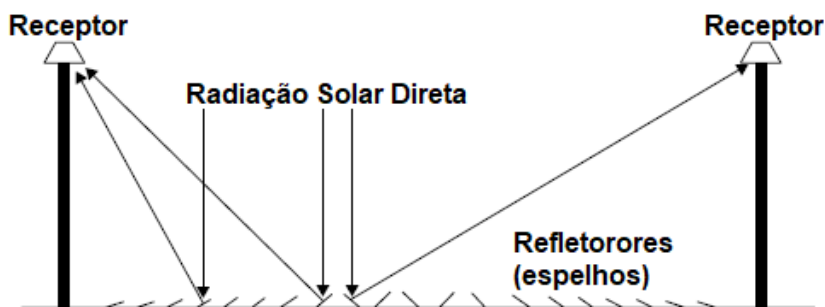
Uma vantagem sobre os concentradores de calha parabólica é o design simples dos espelhos, que requerem menores investimentos. Além disso, o arranjo físico resulta em cargas de vento substancialmente mais baixas (MITEI, 2015). As instalações de Fresnel são, no entanto, menos eficientes do que as calhas parabólicas na conversão de energia solar em elétrica (IEA, 2010).

Um projeto mais recente, conhecido como refletor linear de Fresnel compacto (*Compact Linear Fresnel Reflector - CLFR*, Figura 6b), utiliza dois receptores paralelos para cada fileira de espelhos e, portanto, precisa de menos espaço do que calhas parabólicas para obter mesmo resultado (IEA, 2010).

Figura 6 – Refletor linear de Fresnel.



a) LFR.



b) CLFR

Fonte: MITEI (2015) e Kalogirou (2009).

## 2.4 CONCENTRADOR SOLAR DE CALHA PARABÓLICA

Os concentradores solares de calha parabólica (*Parabolic Trough Collector - PTC*), ou concentradores cilíndrico parabólicos, recebem esse nome devido à sua superfície refletora possuir formato cilíndrico parabólico, concentrando a radiação solar sobre um receptor localizado na linha focal da parábola. A Figura 7 mostra o concentrador PTC que é utilizado nas plantas solares Valle 1 e Valle 2 localizada em San José del Valle (Cádiz, Espanha).



**Figura 7 – Concentrador solar de calha parabólica.**



**Fonte: Torresol Energy ([s.d.]).**

O fluido de trabalho é aquecido enquanto flui através dos tubos receptores, que chegam a ter uma área superficial 25 vezes menor que a área de captação da radiação solar (MARANHÃO, 2016).

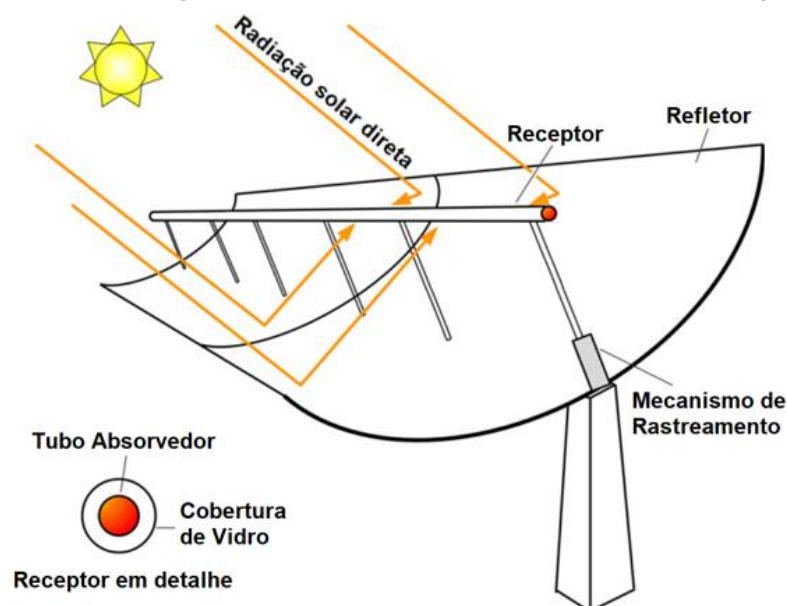
Pode efetivamente atingir temperaturas entre 50 e 400°C, utilizando um tipo específico de fluido de trabalho para cada faixa de temperatura desejada. Para temperaturas moderadas (< 200°C) pode-se utilizar água desmineralizada ou Etileno Glicol como fluido de trabalho. Os óleos sintéticos são utilizados nas aplicações onde busca-se a obtenção de temperaturas mais altas (200°C < T < 450°C) (FILHO, 2008).

Embora seja a tecnologia mais madura dentre as tecnologias de concentração solar, a utilização de calhas parabólicas tem desvantagens significativas. A principal desvantagem é o elevado investimento requerido, isso se deve à grande extensão de superfície refletora e receptores necessária para aumentar a temperatura do fluido de trabalho. Além disso, esses sistemas sofrem de problemas com tensão mecânica e vazamento nas juntas móveis, embora esses possam ser resolvidos com experiência operacional (MITEI, 2015).



A Figura 8 apresenta os componentes essenciais de um concentrador de calha parabólica.

Figura 8 – Desenho esquemático de um concentrador solar de calha parabólica.



Fonte: Cabrera et al. (2013).

#### 2.4.1 Refletor

O funcionamento do refletor tem natureza puramente ótica. Todo raio de luz que incidir paralelamente ao eixo principal de um espelho côncavo, reflete-se passando pelo foco.

A superfície refletora consiste em fileiras paralelas de espelhos côncavos, podendo o arranjo de espelhos ter mais de 100 metros de comprimento, com a superfície curva de 5 a 6 metros de diâmetro (IEA, 2010).

#### 2.4.2 Receptor

O receptor é o componente responsável por absorver a energia solar concentrada pelo refletor e transferi-la ao fluido de trabalho como energia interna.

Também chamados de tubos absorvedores, os receptores devem ser fabricados utilizando materiais que possuem alta absorvidade e baixa emissividade,

ou seja, materiais que possibilitem uma absorção maior de energia com menos perdas por radiação.

Em geral, o receptor é um tubo metálico de alta condutividade térmica com superfície revestida por um material de alta absorvância a irradiação solar e baixa emitância para irradiação térmica, para que se possa obter um aproveitamento máximo da radiação que atinge o tubo (KALOGIROU, 2009).

Para minimizar as perdas por convecção para o ambiente, o tubo absorvedor pode ser envolto por um tubo de vidro onde realiza-se vácuo na região anular. O vácuo é um ótimo isolante térmico, permitindo apenas a transferência de calor por radiação.

A superfície do vidro permite que parte dos raios solares incidentes, atinjam a superfície externa do tubo metálico. A radiação que não é absorvida pelo tubo metálico é refletida com comprimento de onda diferente da qual a radiação incidiu, atingindo a superfície interna do tubo de vidro, que passa a não ser mais transmitida devido ao novo comprimento de onda, sendo refletido novamente para o tubo metálico. O processo é conhecido como “Efeito Serra” e se repete até que haja a absorção total da energia solar incidente pelo tubo metálico (AVALLONE, 2017).

Para garantir vedação e posicionamento, existe uma união metal-vidro. A concentração da radiação solar nesse componente causa uma degradação precoce, fazendo com que se perda o vácuo ou com que o tubo de vidro se quebre. Este é o tipo de falha mais comum, gerando despesas adicionais com peças de reposição, além de comprometer a performance dos absorvedores trabalhando sem vácuo.

#### 2.4.3 Sistema de Rastreamento

Semelhante à outras tecnologias solares, a tecnologia de calha parabólica tem a necessidade de focalizar a luz solar sobre uma pequena área, o que exige um mecanismo de posicionamento, permitindo o rastreamento do sol afim de obter maior eficiência, atingindo temperaturas mais constantes durante o período de insolação. Como alternativa ao sistema de rastreamento, os espelhos podem ser ajustados sazonalmente, evitando o custo com rastreamento, porém, resulta em menor eficiência. (MITEI, 2015)

Este sistema de rastreamento deve ser capaz de rastrear o sol até mesmo durante dias nublados intermitentes, e retornar à posição original ao final do dia ou

durante a noite. Além disso, em casos de superaquecimento, rajadas de vento e falhas no mecanismo de escoamento de fluido, o sistema também deve atuar como mecanismo de proteção, desviando o concentrador do foco (KALOGIROU, 2009).

O movimento é obtido mediante o giro em torno de um eixo paralelo à sua linha focal, rastreando o sol de Norte a Sul ou Leste a Oeste. A escolha do sentido vai depender dos parâmetros de funcionamento. Na configuração Norte-Sul o concentrador realiza um rastreamento quase completo no verão, tendo sua efetividade reduzida no inverno devido ao sombreamento mútuo. Na configuração Leste-Oeste os problemas com sombreamento são reduzidos, porém o movimento do coletor se torna mais complexo (SALVADORETTI, 1983).

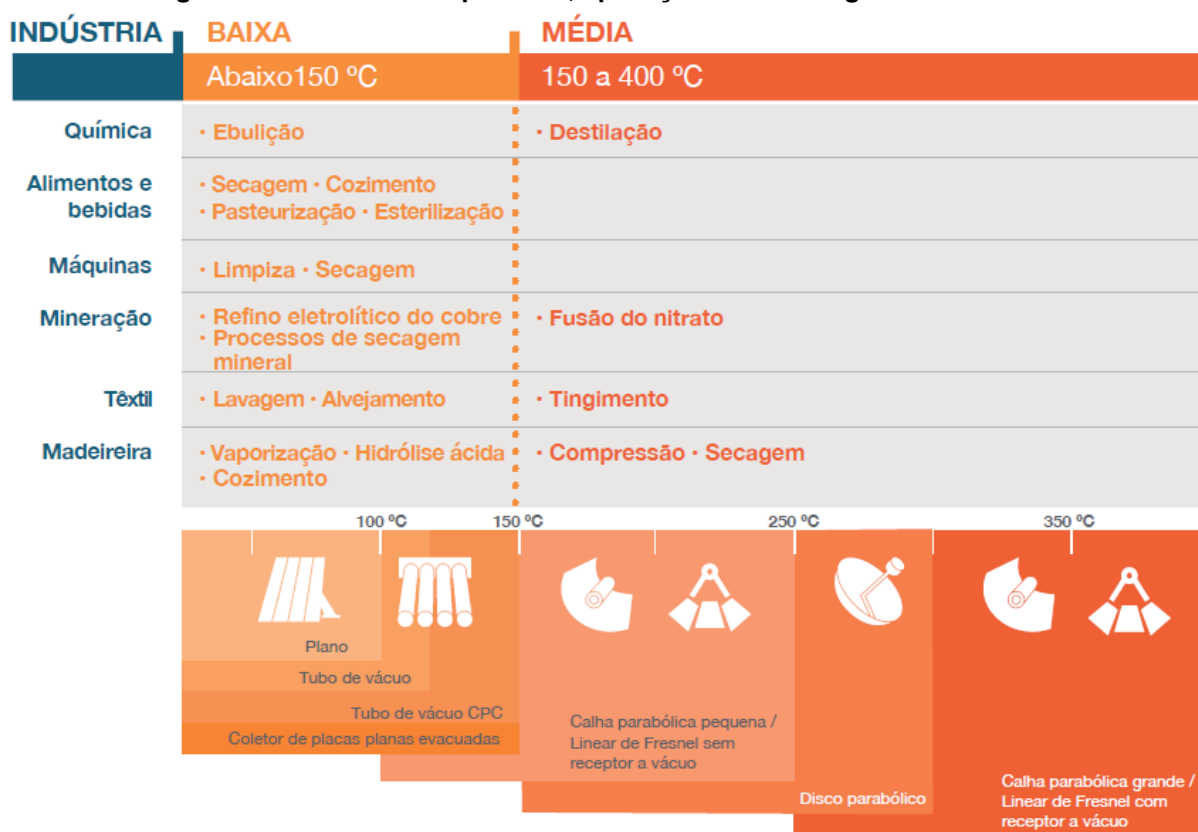
## 2.5 ENERGIA TERMOSSOLAR EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Ainda que seja pouco explorado, devido à resistência ao uso já consolidado das fontes de energia convencionais, o uso da energia solar tem enorme potencial em aplicação em processos industriais.

O tipo de coletor termossolar a ser utilizado depende do nível de temperatura exigido. Essas temperaturas podem ser classificadas em três tipos: baixa temperatura ( $< 150^{\circ}\text{C}$ ), média temperatura (entre  $150$  e  $400^{\circ}\text{C}$ ) e alta temperatura ( $> 400^{\circ}\text{C}$ ). Alguns dos processos, bem como a faixa de temperaturas necessárias para cada um, são mostrados na Figura 9.

Em temperaturas mais baixas, uma série de aplicações podem ser feitas, tais como secagem, controle térmico de ambientes e processos que utilizam água aquecida. Para esses processos podem ser utilizados os coletores solares não concentradores de placa plana e evacuados. À medida que temperaturas mais altas são necessárias, os coletores solares empregados passam a ser do tipo concentradores.

Figura 9 – Faixas de temperatura, aplicações e tecnologias de coletores.

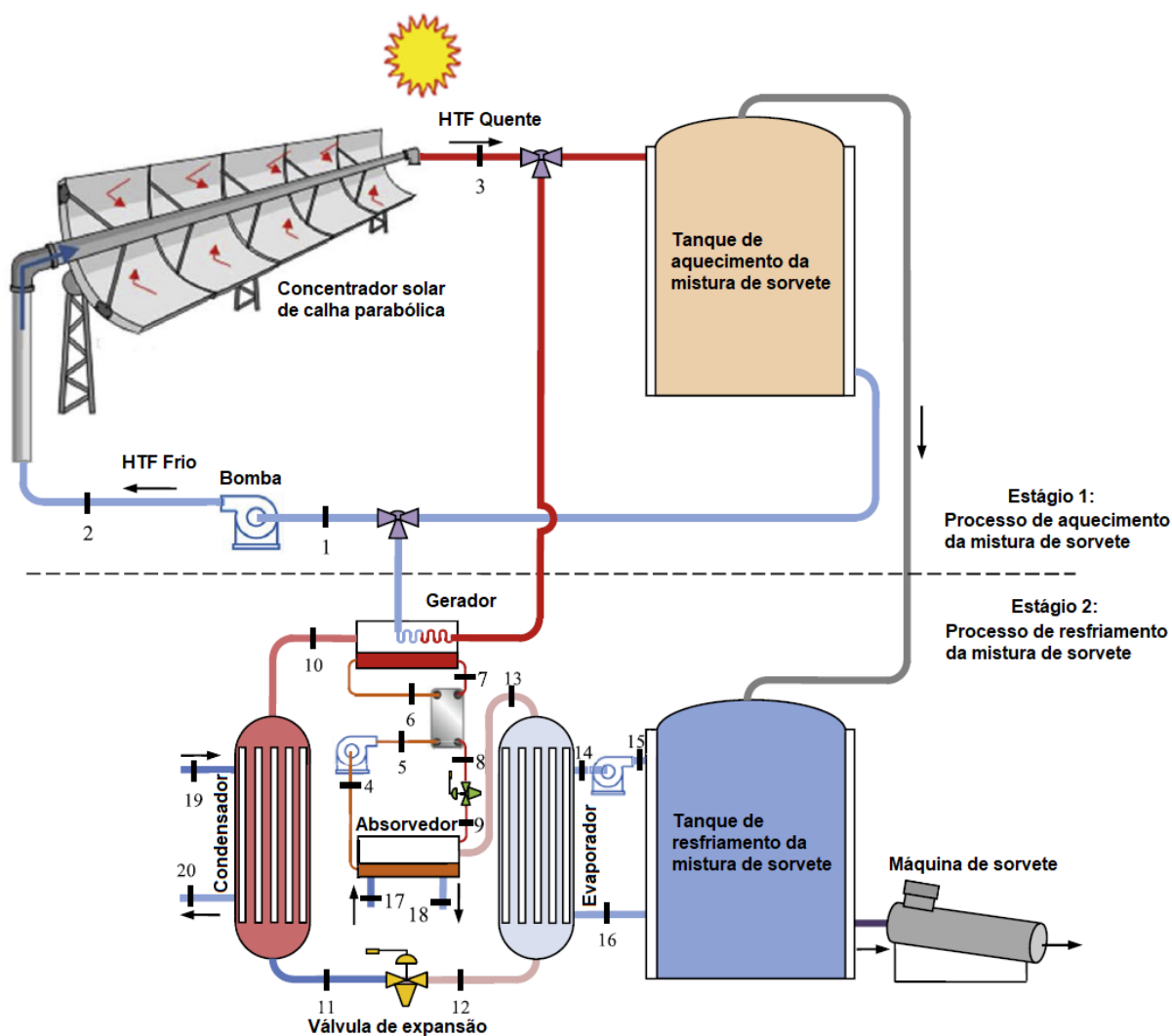


Fonte: Solar Payback (2018).

Refrigeração com uso de coletores é uma tecnologia bastante promissora, com destaque ao sistema de refrigeração por absorção que, dependendo da configuração de trabalho necessitam fontes de calor abaixo de 100°C para sistemas simples e entre 120 e 270°C para sistemas de duplo e triplo efeito (PEREIRA et al., 2017). Essas temperaturas podem ser facilmente obtidas com o uso de coletores solar de tubos evacuados ou concentradores de pequeno porte.

Um exemplo de uso industrial de concentradores de calha parabólica pode ser visto na Figura 10. Além do calor ser utilizado no processo de aquecimento da mistura do sorvete, também é utilizado como fonte de alta temperatura no sistema de refrigeração por absorção, utilizado na separação do vapor (fluido refrigerante) da solução (absorvente).

Figura 10 – Visão geral do sistema integrado PTC proposto para uma fábrica de sorvetes.



Fonte: Kizilkan; Kabul; Dincer (2016).

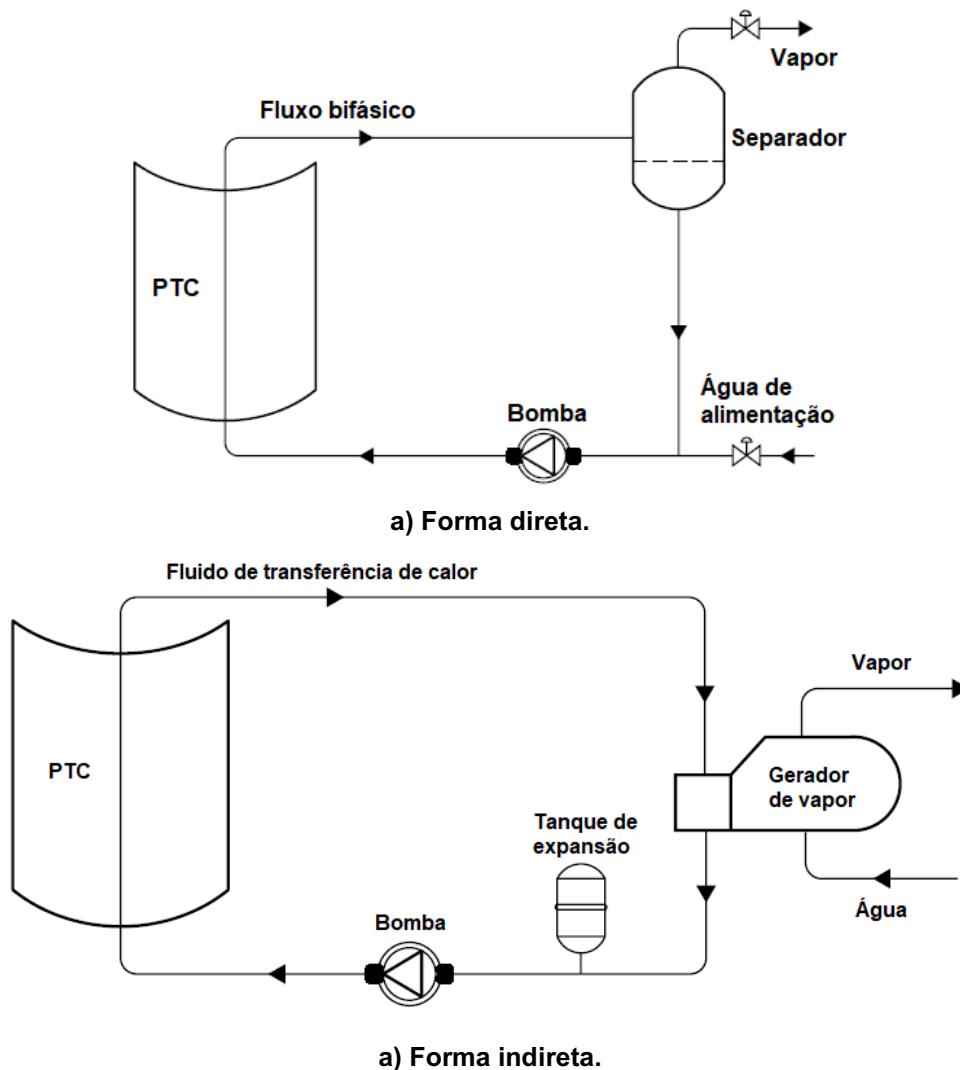
A cocção de alimentos e a dessalinização de água também são aplicações interessantes da energia solar, principalmente em regiões áridas e remotas. De acordo com o programa de análise de sistemas de tecnologias energéticas da agência internacional de energia (IEA-ETSAP) e da agência internacional de energias renováveis (IRENA), mais de 80 coletores de pratos parabólicos são usados para cozinhar em comunidades na Índia, representando cerca de 40 MW térmicos (IEA-ETSAP; IRENA, 2015).

### 2.5.1 Geração de Vapor

Os concentradores solares podem gerar vapor comprimido com temperaturas de até 400°C e pressões de 100 bar. A maioria dos sistemas solares térmicos para aquecimento de processos industriais são plantas piloto de pequena escala. (IEA-ETSAP; IRENA, 2015)

Em uma planta solar o vapor pode vir a ser produzido de forma direta ou indireta. Na forma direta, Figura 11a, na saída dos receptores há um fluxo bifásico de água líquida e vapor, o qual é separado e enviado aos processos industriais. Já na forma indireta, Figura 11b, o fluido de trabalho é aquecido a baixas pressões e encaminhado à trocadores de calor para a geração de vapor.

Figura 11 – Conceito de geração de vapor com energia solar concentrada.



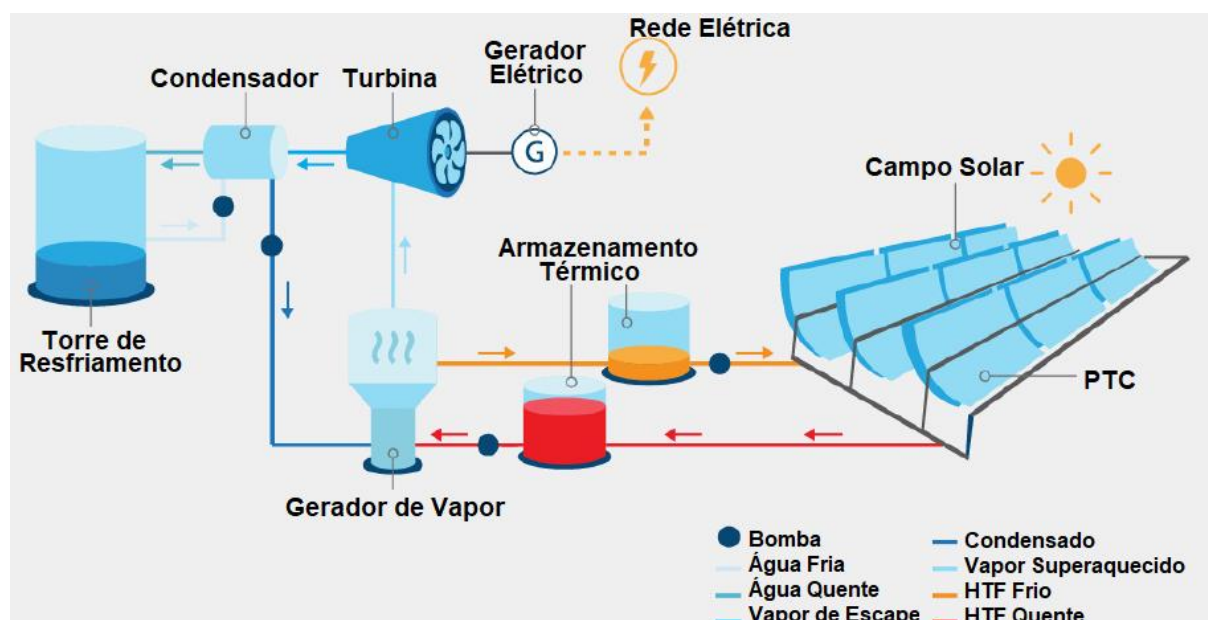
Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009).

## 2.6 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E ARMAZENAMENTO TÉRMICO

A energia solar térmica concentrada (*Concentrated Solar Power – CSP*) é o termo usado na geração de energia elétrica a partir de concentradores solares. A Figura 12 esquematiza uma planta CSP.

O calor absorvido pelo fluido de trabalho ao passar pelos concentradores é transportado a trocadores de calor, onde a água é pré-aquecida, evaporada e superaquecida. O vapor superaquecido opera uma turbina a vapor acoplada a um gerador, gerando eletricidade em um ciclo Rankine convencional. Depois de resfriada e condensada, a água retorna aos trocadores de calor.


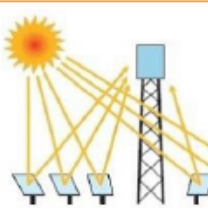

Figura 12 – Esquema de usina termossolar de concentradores de calha parabólica.



Fonte: CSP BRASIL ([s.d.]).

A Figura 13 fornece uma visão geral de algumas das características de desempenho das tecnologias CSP.

**Figura 13 – Desempenho e parâmetros técnicos para tecnologias heliotérmicas.**

Parâmetro técnico	Cilindro parabólico	Torre solar	Refletor linear Fresnel
			
Capacidade típica (MW)	10-300	10-200	10-200
Foco <sup>2</sup>	Linear	Pontual	Linear
Tipo de receptor	Móvel	Fixo	Fixo
Requerimento de área (ha/MW)	2	2	2
Temperatura de operação (°C)	350-550	250-565	390
Eficiência da planta (%)	14-20	23-35	18
Eficiência anual solar para eletricidade (%)	11-16	7-20	13
Fator de capacidade anual (%)	25-28 (sem AT) 29-49 (com AT)	55 (10h AT)	22-24
Hibridização	Sim, direta	Sim	Sim, direta (caldeira a vapor)
Concentração	70-80	1000	60-70
Estabilidade do Grid	Média a alta (AT ou hibridização)	Alta (grande capacidade de AT)	Média (queima de backup possível)
Ciclo	Rankine sp./Brayton Combinado	Rankine sp.	Rankine st.
Declividade máxima do campo solar	<1-2	<2-4	<4
Consumo de água (m <sup>3</sup> /MWh)	3 (resfriamento úmido) 0,3 (resfriamento a seco)	2 a 3 (resfriamento úmido) 0,25 (resfriamento a seco)	3 (resfriamento úmido) 0,2 (resfriamento a seco)
Aptidão para o resfriamento seco	Baixa a boa	Boa	Baixa
Armazenamento com sais fundidos	Disponível comercialmente	Disponível comercialmente	Possível, mas ainda não foi provado

**Fonte: GIZ (2017).**

Como em outras usinas de geração térmica, é requerido água para processos de resfriamento e condensação. As necessidades de água para calhas parabólicas e refletores Fresnel são semelhantes à de um reator nuclear, cerca de 3.000 L/MWh. Usinas de carvão utilizam cerca de 2.000 L/MWh e usinas de gás natural de ciclo combinado apenas 800 L/MWh. As usinas de torre solar precisam de menos água por MWh do que as outras, dependendo da eficiência da tecnologia. Os discos parabólicos são resfriados pelo ar circundante e não precisam de água para resfriamento. (IEA, 2010)

Para pequenos sistemas autônomos de produção de energia, os sistemas de disco parabólico são mais adequados que os de calha parabólica, pois alcançam maiores eficiências devido aos níveis mais altos de concentração (KALOGIROU, 2009).



A Usina Termossolar de Laguna/SC será uma das primeiras do Brasil a utilizar exclusivamente a energia térmica solar para geração de eletricidade. Com um investimento estimado de R\$ 16,5 milhões, utilizará de concentradores do tipo cilindro parabólicos, que serão responsáveis por entregar 0,25 MW de capacidade instalada.

### 2.6.1 Armazenamento Térmico

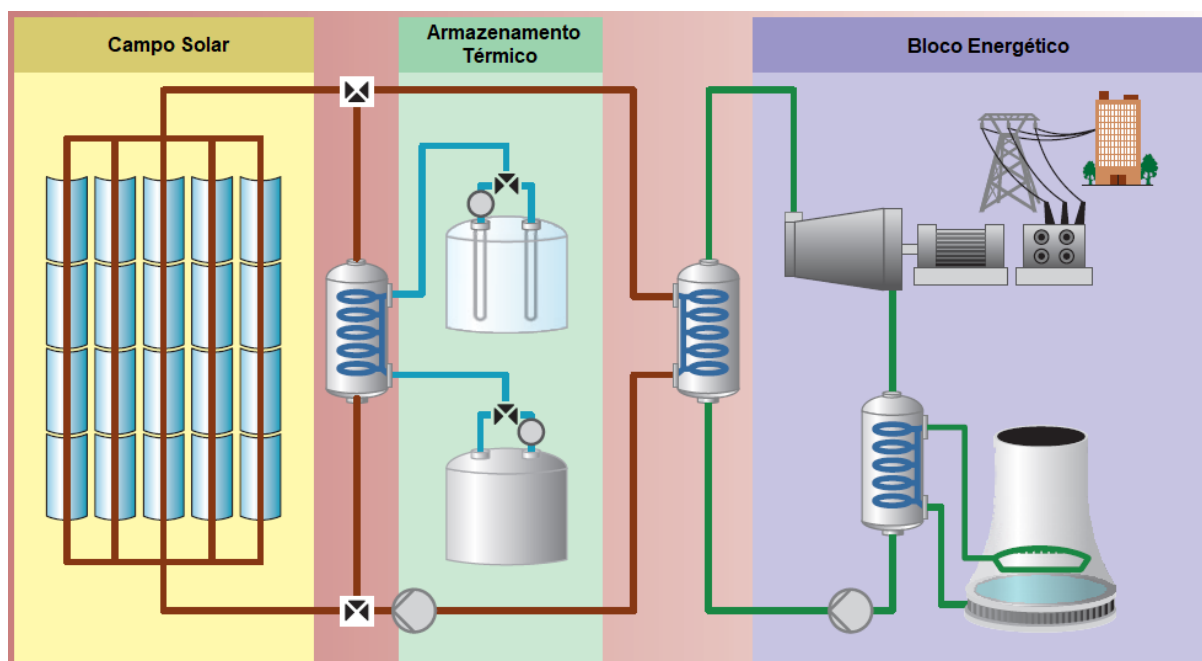
A energia solar é um recurso energético dependente do tempo, assim como as necessidades energéticas, todavia, disponibilidade e demanda ocorrem em tempos diferentes. Para não ficar limitada apenas ao período de irradiação solar, as usinas CSP precisam trabalhar com armazenamento térmico, backup e hibridização, fornecendo uma parcela maior de eletricidade limpa e minimizando as emissões de CO<sub>2</sub>.

Todas as usinas termossolares apresentam capacidade de armazenar energia térmica por curtos períodos de tempo, explorando a inercia térmica do fluido de trabalho, principalmente em sistemas de calhas parabólicas (MITEI, 2015). Essa forma de armazenamento permite suavizar as flutuações na produção de energia elétrica associadas a distúrbios de curto prazo, como a passagem de nuvens.

Para armazenamento de longo prazo estão sendo desenvolvidas tecnologias que permitam manter a planta em funcionamento mesmo após o pôr do sol. A eficiência de utilização do armazenamento térmico em plantas CSP pode ser bastante alta, da ordem de 95% ou mais (MITEI, 2015). Geralmente, a energia solar pode ser armazenada em líquidos, sólidos ou materiais de mudança de fase.

O conceito de armazenamento térmico é simples, o excesso de calor coletado no campo solar pelos concentradores é desviado para um material de armazenamento, geralmente sais fundidos. Quando há picos na utilização de energia elétrica ou quando é necessária a produção de eletricidade após o pôr do sol, o calor presente no fluido de armazenamento é inserido de volta no ciclo do vapor e a planta continua a produzir eletricidade (IEA, 2010). A Figura 14 ilustra como o armazenamento térmico participa de uma planta CSP.

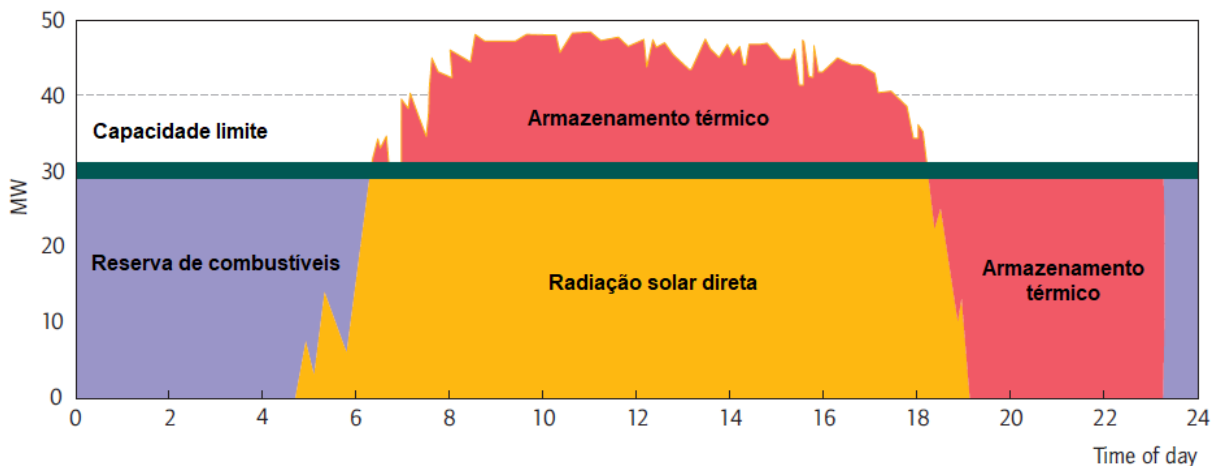
Figura 14 – Armazenamento térmico em planta CSP.



Fonte: IEA (2010).

Fornecer 100% da capacidade apenas com armazenamento térmico exigiria um elevado investimento, dessa forma, a maioria das plantas CSP, com ou sem armazenamento térmico, são equipadas com sistemas de backup movidos a combustíveis, que ajudam a regular a produção e garantir capacidade, especialmente em horários de pico, como é mostrado na Figura 15. Por exemplo, todas as usinas de CSP na Espanha apresentam 12 a 15% de sua geração anual de eletricidade provenientes da queima de gás natural. (IEA, 2010)

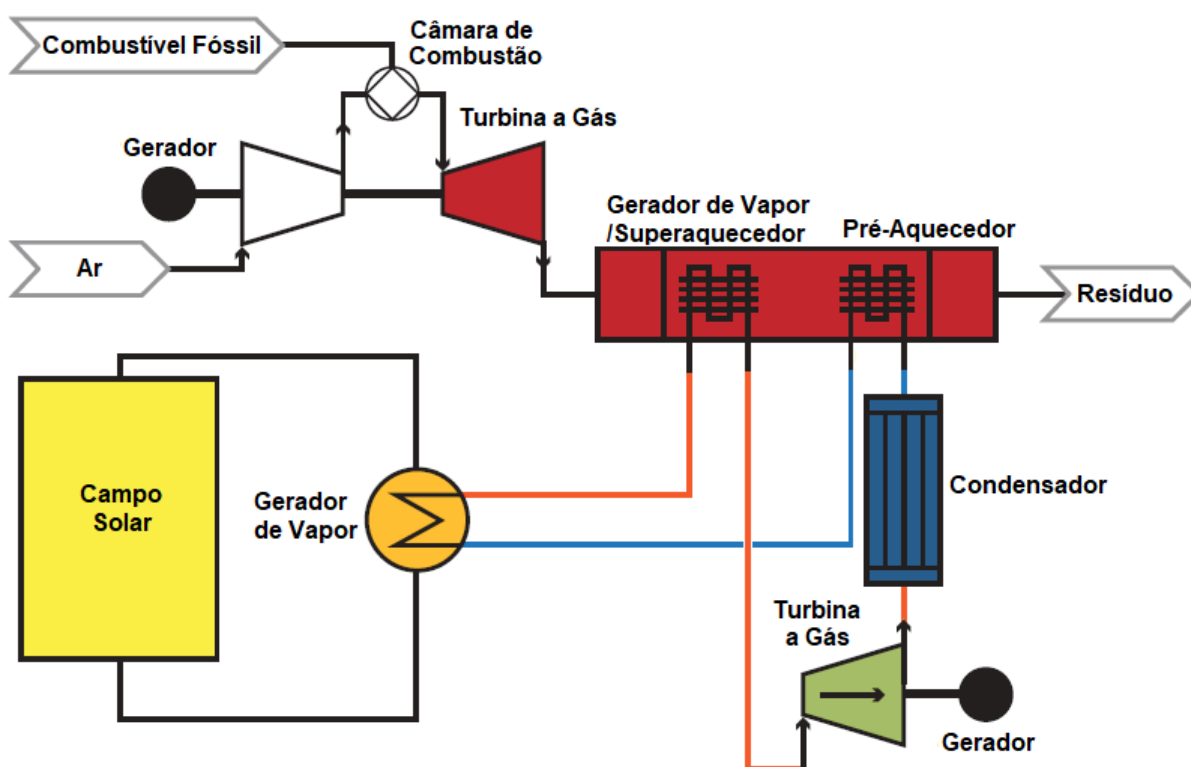
Figura 15 – Combinação de armazenamento e backup em uma planta CSP.



Fonte: IEA (2010).

As tecnologias CSP também podem ser usadas em sistemas híbridos. Os custos incrementais para essa abordagem são relativamente baixos, visto que com o ciclo de vapor e a turbina já em funcionamento em uma usina termoeletrica, os investimentos adicionais se dariam apenas por parte de componentes específicos do CSP. A Figura 16 ilustra como combustível fóssil e energia solar concentrada podem operar em conjunto em uma planta híbrida.

Figura 16 –Esquema de funcionamento de uma planta híbrida.



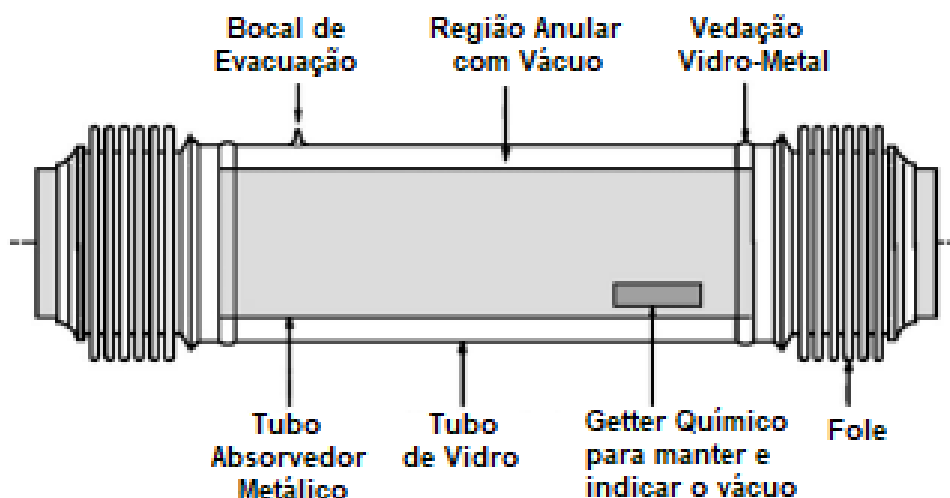
Fonte: MITEI (2015).

## 2.7 DESENVOLVIMENTO DE CONCENTRADORES SOLARES DE CALHA PARABÓLICA (PTC) COM TUBO EVACUADO

Como já discutido anteriormente, em concentradores de foco linear, geralmente o receptor é composto por um tubo metálico envolto por um tubo de vidro, sendo que o espaço anular formado é evacuado. O vácuo tem o intuito de suprimir a convecção entre os dois tubos, reduzindo perdas térmicas ao ambiente.

Os componentes de um receptor de concentradores de calha parabólica (*Parabolic Trough Receiver*) são ilustrados na Figura 17.

Figura 17 – Receptor do PTC.



Fonte: Adaptado de Yaghoubi; Ahmadi; Bandehee (2013).

Com a intenção de avaliar o comportamento de um tubo evacuado aquecido por energia solar concentrada, em 2006, dois pesquisadores chineses, Li; Wang (2006), desenvolveram um modelo experimental de concentrador de calha parabólica para medir a eficiência térmica e temperaturas de trabalho que poderiam ser obtidas utilizando água e  $N_2$  como fluido de trabalho. O estudo mostrou que a eficiência térmica do coletor é inversamente proporcional à temperatura que se deseja obter. Quando água flui pelo tubo evacuado em temperaturas abaixo de  $100^\circ C$  foram obtidas eficiências térmicas superiores a 70%, entretanto, a eficiência para aquecimento do dióxido de nitrogênio é inferior a 40% quando a temperatura do gás atinge  $320-460^\circ C$ .

Liu et al. (2010), com o intuito de fomentar o desenvolvimento de usinas termossolares na China, analisaram o comportamento de um concentrador solar de calha parabólica com tubo evacuado e óleo sintético como fluido de trabalho. O concentrador apresentou perdas térmicas de  $200 W/m$ , representando cerca de 10% da energia solar total incidente e, mesmo apresentando tais perdas de energia, a eficiência térmica experimental do concentrador se manteve elevada, variando entre 40 e 60%.

Utilizando de metodologia similar à utilizada neste trabalho, Kempfer (2011) desenvolveu seu próprio tubo evacuado. Em escala reduzida, projetou e desenvolveu três concentradores de calha parabólica interligados. Apesar de os ensaios terem sido realizados com o tubo não evacuado, ou seja, somente com o envoltório de vidro, foi obtida eficiência média de 47%, válida para a faixa de temperatura entre  $30$  e  $40^\circ C$  em que o ensaio foi realizado.

Em 2013, pesquisadores iranianos, (Yaghoubi; Ahmadi; Bandehee (2013), analisaram as perdas de calor dos concentradores de calha parabólica da usina CSP da cidade de Shiraz (Irã). Foi feita uma análise térmica experimental e numérica dos receptores de tubo evacuado em três configurações diferentes: tubo evacuado, tubo com perda do vácuo e tubo com revestimento de vidro quebrado. Os resultados numéricos mostraram que houve uma redução de 3 a 5% na eficiência térmica do coletor quando há somente a proteção de vidro não evacuado e redução de 12 a 16% quando não há proteção de vidro. Os resultados experimentais mostraram que a temperatura superficial externa do tubo evacuado foi de 47°C, com aumento de 10°C para a situação que se encontra não evacuado. Já para o tubo sem revestimento de vidro, a temperatura média aumenta consideravelmente para 181°C, obtida através de registros feitos com câmera infravermelho.

A fabricação de concentradores de calha parabólica PTC de baixo custo para aplicações em processos industriais variando de 70 a 250°C é fundamental para a propagação dessa tecnologia solar. Assim, em 2014, foi apresentado um protótipo PTC com tubo evacuado, com taxa de concentração de 9,25, construído em fibra de vidro e poliestireno extrudado. Os testes foram realizados usando água desmineralizada para temperaturas de até 85°C, atingindo cerca de 65% de eficiência térmica no coletor (COCCIA; DI NICOLA; SOTTE, 2014).

Em 2014 na Índia, um novo sistema de coletor de tubo evacuado acoplado a um PTC foi desenvolvido e estudado experimentalmente para situações que requerem geração de água quente na presença de baixa irradiância solar. Essa combinação de tecnologias aumentou em 30% a eficiência térmica do processo, que apresentou eficiência média de 85%, permitindo produzir água quente instantânea a temperaturas entre 40 e 68°C. Para isso foi utilizado o óleo sintético Therminol D-12, cujas propriedades térmicas e de fluxo permaneceram estáveis mesmo após 100 ciclos de operação (SELVAKUMAR; SOMASUNDARAM; THANGAVEL, 2014).

Os coletores solares tem sido comumente usados em sistemas de dessalinização. Pensando nisso, Jafari Mosleh et al. (2015) criaram uma combinação de tubo de calor (*heat pipe*), tubo evacuado e concentrador PTC para purificação de água. Quando óleo é usado como meio de transferência de calor, preenchendo o espaço entre o tubo de calor e o coletor de tubo evacuado, a produção de água pura e a eficiência são, respectivamente, de 0,933 kg/m<sup>2</sup>h e 65,2%.

Atualmente, o uso de nanofluidos para aprimoramento dos fluidos de transferência de calor nas tecnologias termossolares é foco de interesse de vários pesquisadores. As nanopartículas afetam diretamente as características físico-químicas do fluido base no qual estão suspensas. Os sólidos utilizados nas suspensões possuem elevada condutividade térmica, conferindo aos nanofluidos capacidade de troca de calor significativamente superior a fluidos convencionais. Sob condições apropriadas de operação, a elevada capacidade de transferência de calor dos nanofluidos leva à uma redução de introdução de materiais puros e gastos energéticos e, conseqüentemente, reduzindo o tamanho do trocador de calor, o que leva à diminuição de custos e aumento da eficiência do sistema (KHAIRUL et al., 2013).

Barmate et al. (2016) montou uma bancada experimental para investigar o desempenho térmico de um coletor solar de tubo evacuado acoplado a um concentrador de calha parabólica, operando com dois diferentes fluidos de trabalho: água e nanofluido de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A taxa de absorção de calor foi maior quando utilizado  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como fluido de trabalho, com aumento de 19 a 21% na eficiência instantânea do coletor.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o projeto e as etapas de construção do tubo evacuado, assim como as modificações necessárias no concentrador para sua operação.

O concentrador solar será avaliado para as seguintes configurações:

- Tubo concentrador solar de cobre sem pintura seletiva, sem encapsulamento de vidro (NETZEL, 2019);
- Tubo concentrador solar de cobre com pintura seletiva, sem encapsulamento de vidro (NETZEL, 2019);
- Tubo concentrador solar de cobre com pintura seletiva, com encapsulamento de vidro evacuado.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados durante a construção e montagem do tubo evacuado estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2 – Lista de materiais.**

Materiais	Quantidade
Tubo borossilicato (50 x 45 mm)	1300 mm
Tubo de cobre (28 x 26,4 mm)	2000 mm
Tarugo de Alumínio (60 mm)	100 mm
O'rings	4
Vacuômetro analógico	1
Bomba de vácuo	1
Conexões	-

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO TUBO EVACUADO

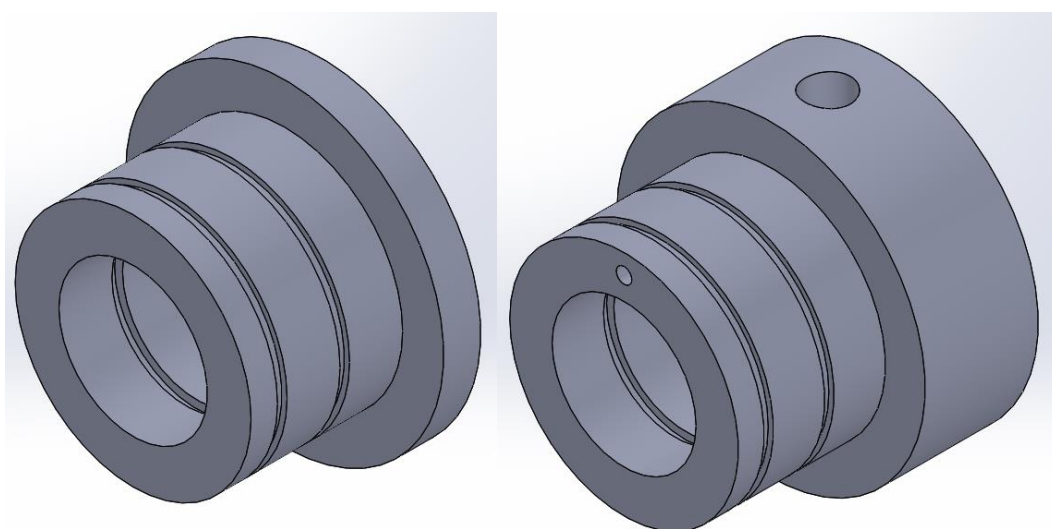
Para o envoltório do tubo evacuado foi selecionado o vidro de borossilicato Duran®, devido suas propriedades óticas e mecânicas. O acrílico se enquadra como outra opção viável, porém, com o decorrer do tempo sua superfície apresentaria desgaste, reduzindo assim sua transmissividade.

Já para o tubo absorvedor utilizou-se o cobre devido a sua elevada condutividade térmica. Pintura seletiva foi utilizada para melhorar a absorção do receptor, ou seja, aumento da razão entre o fluxo da radiação absorvida e radiação incidente.

As buchas de vedação (Figura 18), foram usinadas pelo técnico dos laboratórios do curso de Engenharia Mecânica da UTFPR-LD. Para realizar o vácuo na região anular, em uma das buchas, foram realizados dois furos concorrentes, ligando a parte interna do tubo evacuado com a válvula de serviço.

A priori, foi utilizado um plástico que se pensava ser Nylon 6.6 (Technyl) para a elaboração das buchas de vedação, porém, a temperatura de trabalho foi superior àquela suportada pelo material, acarretando problemas de montagem, os quais serão mostrados na Seção 3.2.2 (Problemas de Montagem). Visando superar estes problemas, as buchas de vedação foram usinadas em Alumínio.

**Figura 18 – Desenho CAD em vista isométrica das buchas de vedação.**



**Fonte: Autoria própria.**



Em cada uma das extremidades do tubo evacuado foram utilizados dois o-rings para promover a vedação entre a superfície interna do tubo de vidro e a superfície externa da bucha e, mais dois o-rings para realizar a mesma função entre a superfície interna da bucha e a superfície externa do tubo de cobre.

A especificação dos o-rings, bem como as dimensões dos alojamentos a serem realizados nas buchas de vedação foram feitas através do Manual de O'Ring 5700 BR da fabricante (PARKER SEALS, 1997). Os o-rings selecionados são fabricados de EPDM (etileno propileno).

### 3.2.1 Montagem

A montagem do tubo evacuado iniciou-se pelo encaixe dos o-rings nos alojamentos internos e externos das buchas de vedação, como ilustrado na Figura 19.

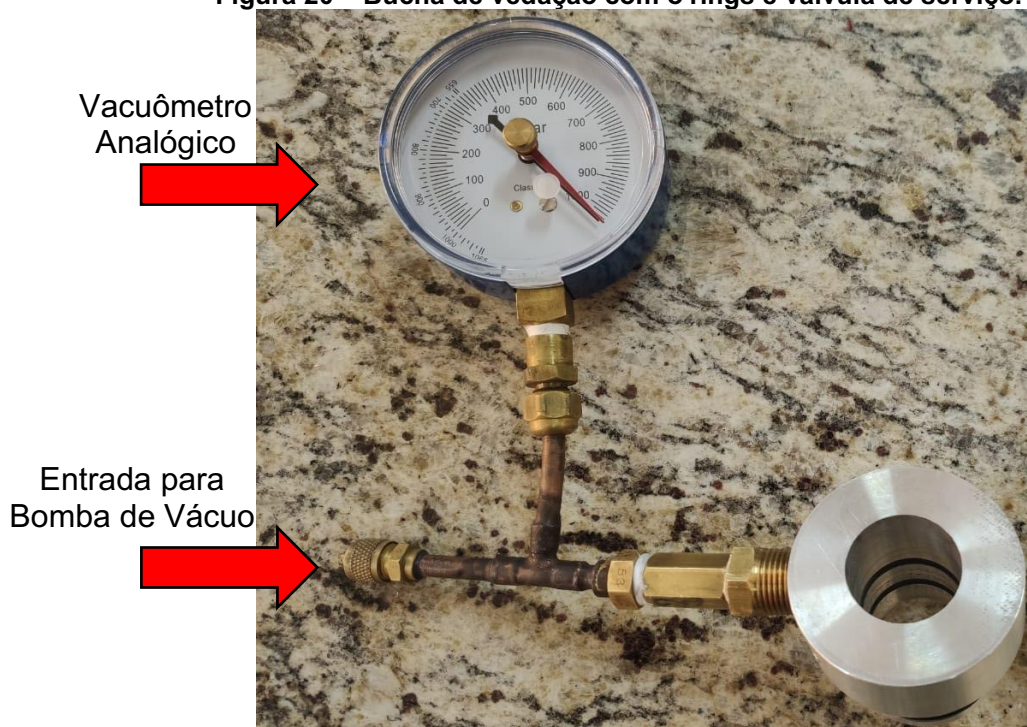
**Figura 19 – Buchas de vedação com os o-rings internos e externos.**



**Fonte: Autoria própria.**

Em uma das buchas foi fixada a válvula de serviço, onde são acoplados o vacuômetro e a bomba de vácuo, Figura 20. Para garantir melhor vedação, foi utilizado selante de poliuretano (PU) no contato entre a bucha e a válvula de serviço.

**Figura 20 – Bucha de vedação com o'rings e válvula de serviço.**



**Fonte: Autoria própria.**

Posteriormente, a bucha com a válvula de serviço foi posicionada no tubo de cobre. Então, com uma das extremidades posicionada, foi acoplado o tubo de vidro sobre os o'rings externos à bucha, Figura 21, e em seguida foi colocada a segunda bucha na outra extremidade.

Antes que o conjunto fosse instalado no concentrador solar, realizou-se um teste de estanqueidade, Figura 21. Foi acoplada a bomba de vácuo (Suryha de 5CFM com 1/3 Hp) na válvula de serviço, ligou-se e foi mantida em funcionamento até que a pressão interna se estabilizasse. A pressão indicada no manômetro, 75 mbar, é menor que a pressão suportada pelo tubo de vidro (7,3 atm), garantindo que este não irá trincar ou implodir, danificando o tubo de borossilicato.

**Figura 21 – Montagem do tubo evacuado com bomba de vácuo acoplada à válvula de serviço.**



**Fonte: Autoria própria.**

Após uma semana em teste, não houve mudanças significativas na posição do ponteiro do vacuômetro, indicando que o sistema não apresenta infiltrações e está pronto para ser instalado.

Para a instalação do tubo evacuado, foram encaixadas e soldadas conexões de bronze nas extremidades do tubo de cobre, as quais são rosqueadas nas conexões de CPVC presentes na estrutura do concentrador solar, facilitando a instalação e garantindo posicionamento e que não haverá vazamentos de água. A Figura 22 apresenta o tubo evacuado instalado no concentrador solar parabólico.



**Figura 22 – Concentrador solar parabólico com tubo evacuado.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.2 Problemas de Montagem

Durante a montagem do tubo evacuado, ocorreram três situações que resultaram na quebra do tubo de vidro borossilicato.

Devido ao tubo de vidro estar ovalado, na hora de acoplar a bucha de vedação o tubo vidro trincou, resultando no primeiro problema de montagem. O tubo de vidro de borossilicato foi levado à um especialista para que fosse cortado, reduzindo seu comprimento e, conseqüentemente, a área de troca de calor.

O segundo problema de montagem ocorreu quando o tubo evacuado já estava posicionado no concentrador. Ao tocar com a mão a superfície do vidro, este teve uma contração brusca, trincando novamente. Este problema ocorreu pois o fluido de trabalho ainda não estava circulando no interior do receptor, deixando sua temperatura muito elevada. Novamente o tubo de vidro teve que ser cortado, diminuindo ainda mais a área de troca de calor.

O último problema de montagem também ocorreu devido ao fluido de trabalho não estar circulando no interior do receptor enquanto o concentrador não estava em funcionamento. Durante o movimento do sol ao longo do dia, em um determinado momento o receptor ficou no foco do concentrador, elevando muito a sua temperatura. A bucha de vedação, que se pensava ser de Nylon 6.6 (Technyl), não suportou o aquecimento, fundindo-se e quebrando o vidro, como mostrado na Figura 23.

**Figura 23 – Problemas de montagem do tubo evacuado.**



**Fonte: Autoria própria.**

A substituição das antigas buchas de nylon por buchas de alumínio e o fluido de trabalho sendo bombeado ininterruptamente pelo interior do receptor, resolveram os problemas relacionados à quebra do tubo de vidro.

### 3.3 SISTEMA DE CONTROLE E COLETA DE DADOS

Devido ao projeto se tratar de uma modificação somente no tubo absorvedor de um concentrador solar parabólico que já se encontra em operação, os sistemas de controle de posicionamento e hidráulico, assim como o sistema de aquisição de dados não sofreram modificações, mantendo as mesmas configurações propostas por Netzel (2019).

#### 3.3.1 Sistema de Controle Eletrônico

O sistema de controle eletrônico é responsável pelo rastreamento solar. Basicamente composto por uma placa Arduino e dois Resistores Dependentes de Luz (LDR) que são posicionados entre uma placa vertical, conforme observado na Figura 24, cuja resistência varia de acordo com a luminosidade e luz incidente.

**Figura 24 – Sensores responsáveis pelo rastreamento solar.**



**a) Conjunto completo.**



**b) LDR.**

**Fonte: Retirado de Netzel (2019).**

À medida que o sol se movimenta um dos LDR fica sombreado e o sistema controlado por Arduino se encarrega de acionar o motor de passo, retomando o foco para o tubo absorvedor. O circuito elétrico do sistema é apresentado por Netzel (2019) em seu trabalho de conclusão de curso.

### 3.3.2 Sistema Hidráulico

Água foi escolhida como fluido de trabalho. Para seu bombeamento foi utilizada uma bomba centrífuga com potência de 100 W da marca Texius, modelo TBHX-BR. Para sua canalização foi utilizada mangueira entre o reservatório térmico e a entrada do tubo concentrador e tubos CPVC entre a saída do tubo concentrador e o reservatório térmico.

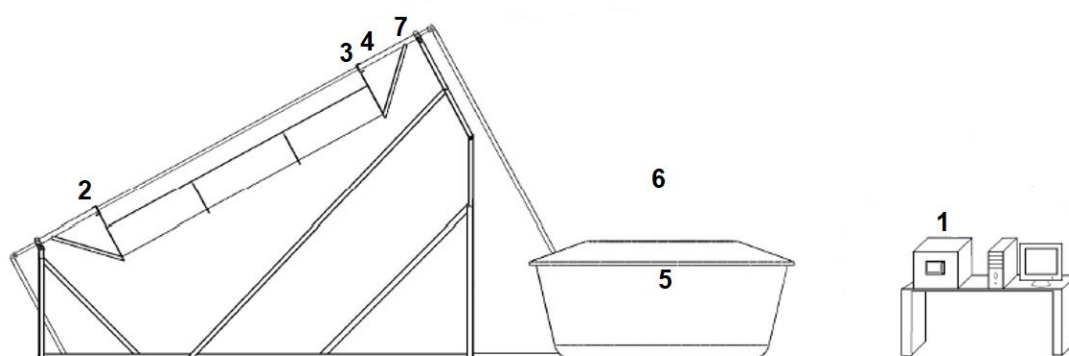
Para mensurar a vazão mássica do sistema, foi posicionado um recipiente na saída do tubo absorvedor durante um intervalo de tempo suficiente para que a massa de água fosse próxima ao limite da balança de precisão, repetindo o processo por pelo menos 3 vezes, a fim de minimizar os erros de medição. Aferindo a massa de água armazenada com uma balança de precisão e dividindo pelo tempo marcado por um cronômetro, pode-se determinar a vazão mássica. Para o controle da vazão foi instalado um registro tipo gaveta na entrada do tubo concentrador.

### 3.3.3 Sistema de Aquisição de Dados e Instrumentação

O concentrador solar junto ao sistema de aquisição de dados está esquematizado na Figura 25. No ponto 1 está localizado o sistema de aquisição de dados Agilent 34972A, responsável pela aquisição dos dados de temperatura e de radiação incidente, realizada num intervalo de 10 segundos. O piranômetro (ponto 7) é responsável por medir o fluxo de radiação solar que incide perpendicularmente à superfície do concentrador.

Os dados de temperatura são fornecidos por cinco termopares do tipo T (Cobre-Constantan) com isolamento de PVC. Com a finalidade de monitorar a variação de temperatura do fluido de trabalho, foi utilizado um termopar na entrada (ponto 2) e outro na saída do tubo concentrador (ponto 3). Os outros três termopares são responsáveis por monitorar a temperatura superficial externa do tubo de cobre (ponto 4), a temperatura no interior do reservatório térmico (ponto 5) e a temperatura ambiente (ponto 6). A obtenção da temperatura em cada um destes pontos é fundamental para a determinação do calor absorvido e das perdas de energia térmica do sistema.

Figura 25 – Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados e instrumentação.



Fonte: Autoria própria.

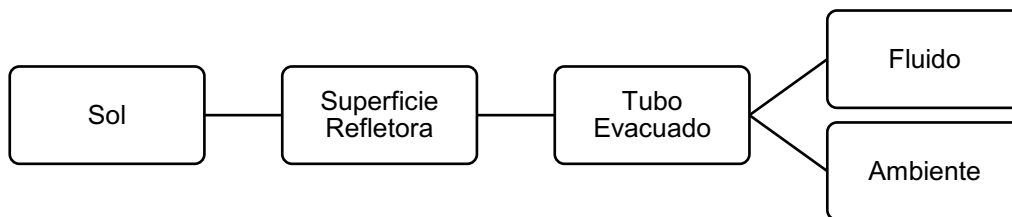
### 3.4 ANÁLISE TÉRMICA

A análise térmica do sistema leva em conta o princípio da conservação da massa e da energia. As propriedades térmicas dos materiais foram baseadas no livro Incropera et al. (2008).

Em um concentrador solar cilíndrico parabólico, o processo de conversão da energia solar em energia térmica ocorre em duas etapas, esquematizados na Figura 26. A radiação solar é captada através de uma superfície refletora, sendo concentrada no receptor localizado na linha focal da parábola. Parte da radiação solar é absorvida pelo tubo absorvedor e transferida ao fluido de trabalho por condução; já a outra parte dessa radiação solar é transferida para o ambiente por convecção e radiação.

Com o intuito de reduzir as perdas de calor para o ambiente, é colocado um tubo de vidro concêntrico ao tubo de cobre, onde é realizado vácuo. Nesse caso as perdas de calor por condução e convecção são desprezíveis, ocorrendo apenas por radiação.

**Figura 26 - Esquema do processo de conversão da radiação solar em energia térmica.**



**Fonte: Adaptado de Filho (2008).**

### 3.4.1 Eficiência Térmica

Considerando um volume de controle contendo o tubo evacuado e a superfície refletora, a energia térmica que está sendo fornecida ao sistema pode ser determinada pela Equação (1).

$$Q_{in} = GA_a \quad (1)$$

Sendo  $G$  o fluxo da radiação solar que incide perpendicularmente à superfície do concentrador ( $W/m^2$ ) e  $A_a$  a área de abertura do concentrador solar ( $m^2$ ).

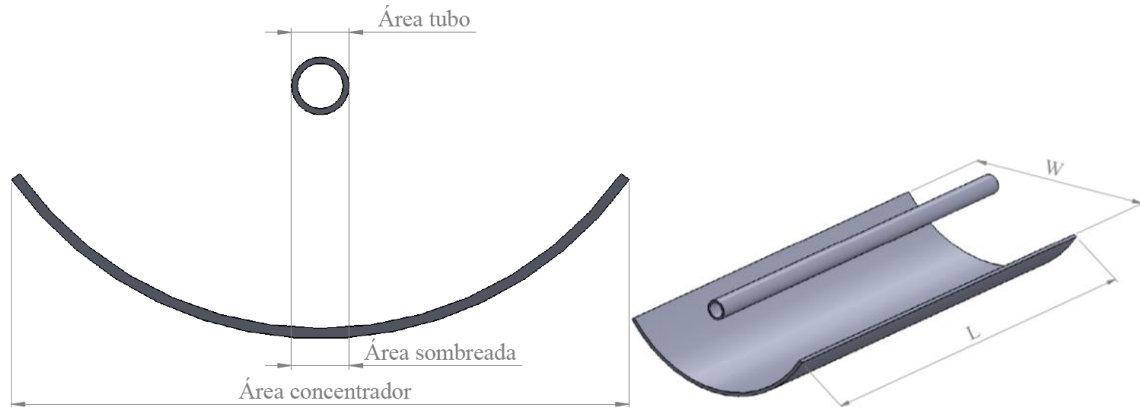
A área de abertura é composta pela área de incidência direta da radiação solar e pela área onde a radiação solar é refletida, representada na Equação (2).



$$A_a = (A_{concentrador} - A_{sombreada}) + A_{tubo} = (wL - D_r L) + D_r L = wL \quad (2)$$

Sendo  $w$  a largura do concentrador (m),  $L$  o comprimento do concentrador (m) e  $D_r$  o diâmetro externo do tubo de cobre (m), mostrados na Figura 27.

**Figura 27 - Representação da área de abertura do concentrador.**



**Fonte: Autoria própria.**

Em muitos processos que envolvem líquido, pode-se admitir que o calor específico seja constante, ou seja, calor específico a pressão constante igual ao calor específico a volume constante (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013). Ao passar pelo tubo absorvedor a água troca calor com o tubo, saindo com uma temperatura diferente da qual estava quando entrou. Aproximando a água como um líquido incompressível, a energia absorvida durante a passagem pela região do concentrador, Equação (3), é função da vazão, calor específico e da diferença de temperatura da água entre a entrada e a saída.

$$Q_{abs} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

Sendo  $\dot{m}$  a vazão mássica de água (kg/s),  $c_p$  o calor específico a pressão constante da água (kJ/kg K) e  $T_{out}$  e  $T_{in}$  as temperaturas de saída e entrada (K), respectivamente.

A eficiência térmica, ou eficiência de Primeira Lei da Termodinâmica, do concentrador solar pode ser calculada por meio da Equação (4).

$$\eta_I = \frac{Q_{abs}}{Q_{in}} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{GA_a} \quad (4)$$

### 3.4.2 Eficiência Térmica Global

Agora, considerando o volume de controle englobando o concentrador solar, tubulações, conexões, registro e reservatório de água, é possível determinar a quantidade de energia armazenada no reservatório térmico e compará-la com a de energia disponível ao longo do experimento, determinando a eficiência global do conjunto.

A energia armazenada na forma de calor dentro do reservatório é determinada utilizando-se a Equação (5).

$$Q_{armazenada} = m c_v \Delta T_{caixa} \quad (5)$$

Sendo  $m$  a massa de água no reservatório (kg),  $c_v$  o calor específico a volume constante da água (kJ/kg K) e  $\Delta T_{caixa}$  a variação de temperatura da água no reservatório entre o início e final da análise (K).

A temperatura do reservatório utilizada nos cálculos é obtida realizando-se a média entre a temperatura na região superior e a temperatura da região inferior do reservatório

A quantidade de energia disponível que atravessa as fronteiras do sistema de controle durante o teste experimental pode ser contabilizada utilizando-se a Equação (6), onde é feita a soma do calor incidente no concentrador e a potência elétrica fornecida pela bomba.

$$Q_{disponível} = (Q_{in} + Pot) \Delta t \quad (6)$$

Sendo  $Q_{in}$  a taxa de energia radiante disponível ao sistema de controle (kW),  $Pot$  a potência da bomba em (kW) e  $\Delta t$  o intervalo de tempo entre o início e término da análise (s).

Uma eficiência global pode ser então calculada, Equação (7), fazendo-se a razão entre a energia armazenada e a energia disponível.

$$\eta_G = \frac{Q_{armazenada}}{Q_{disponível}} = \frac{m \, cv \, \Delta T_{caixa}}{(Q_{in} + Pot)\Delta t} \quad (7)$$

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA E ANÁLISE DE INCERTEZA

Tanto a análise estatística como a análise de incerteza seguirão os mesmo procedimentos realizados por Netzel (2019).

A análise estatística será baseada em um modelo de regressão linear de primeira ordem, Equação (8), sendo possível observar a correlação existente entre as variáveis controláveis e incontrolláveis sob o desempenho do concentrador. Os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  serão estimados utilizando o método dos mínimos quadrados.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (8)$$

As variáveis analisadas serão radiação solar incidente, temperatura ambiente e a temperatura de entrada do fluido de trabalho no tubo absorvedor.

Será realizada uma nova análise estatística para avaliar a influência destes parâmetros na configuração concentrador de cobre com pintura seletiva e encapsulamento de vidro evacuado. Esses dados serão comparados com as análises feitas por Netzel (2019) nas configurações sem encapsulamento de vidro evacuado e sem pintura seletiva.

A análise de incerteza dos conjuntos de dados coletados durante os experimentos será realizada utilizando-se o software EES (Engineering Equation Solver), utilizando os dados médios, calculados a cada intervalo de 15 minutos.

### 3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos tem duração de 5 horas, com início às 11:00 e término às 16:00. Se durante o experimento houver a passagem de muitas nuvens, o teste poderá ser interrompido, seguindo os passos para retomar o concentrador para a posição de segurança. Abaixo estão os passos a serem seguidos para a realização de cada experimento. A programação utilizada na placa Arduino está descrita no APÊNDICE A.

- Soltar os cabos de aço que prendem o concentrador;
- Verificar se a bomba está em funcionamento;
- Ligar na tomada a extensão com o Agilent e o Notebook;
- Ligar o cooler do termopar de temperatura ambiente;
- Ligar o notebook e iniciar o programa do Arduino “*motor\_de\_passo\_velocidade\_maxima*”. Configurar na direção “*LOW*” para posicionar o concentrador na posição de limpeza;
- Limpar os espelhos e o tubo de vidro com um pano úmido;
- Realizar vácuo. Acoplar a bomba de vácuo na válvula de serviço; retirar a tampa da saída de ar e abrir levemente a purga de óleo; ligar a bomba de vácuo por pelo menos 5 minutos; desacoplar a bomba de vácuo pressionando a válvula de serviço para manter vedação; desligar a bomba de vácuo.
- Aproximar o concentrador da posição de trabalho (tubo no foco da radiação) utilizando o programa do Arduino “*motor\_de\_passo\_velocidade\_maxima*”, alternando entre as direções “*HIGH*” e “*LOW*”.
- Com o tubo evacuado no foco do concentrador, iniciar o programa do Arduino “*Acionamento*” e carregar, observando o comportamento do sistema de rastreamento;
- Iniciar o programa de aquisição de dados “*Agilent BenchLink Data Logger 3*”.

- Ao final do experimento, retornar o concentrador à posição de segurança utilizando o programa do Arduino “*motor\_de\_passo\_velocidade\_maxima*” na direção “*LOW*”;
- Desligar o Agilent e o Notebook;
- Desligar o cooler do termopar de temperatura ambiente;
- Prender o concentrador nos cabos de aço.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o concentrador solar de calha parabólica com tubo evacuado (Experimento 3). Os resultados serão comparados com outras duas configurações realizadas por Netzel (2019), tubo não evacuado sem pintura seletiva (Experimento 1) e com pintura seletiva (Experimento 2). Também será apresentada uma análise de eficiência térmica englobando o concentrador e seus periféricos (reservatório, tubulações, bomba, conexões e registro).

### 4.1 EXPERIMENTO 3: TUBO ABSORVEDOR COM PINTURA SELETIVA E ENCAPSULAMENTO DE VIDRO EVACUADO

Os experimentos foram realizados em dia não consecutivos de forma a sempre iniciar os experimentos aleatoriamente, sem interferência do acúmulo de energia no reservatório em relação ao experimento do dia anterior.

Os experimentos foram realizados entre os meses julho e outubro de 2020, nos dias 18/07, 01/08, 06/09, 26/09 e 11/10.

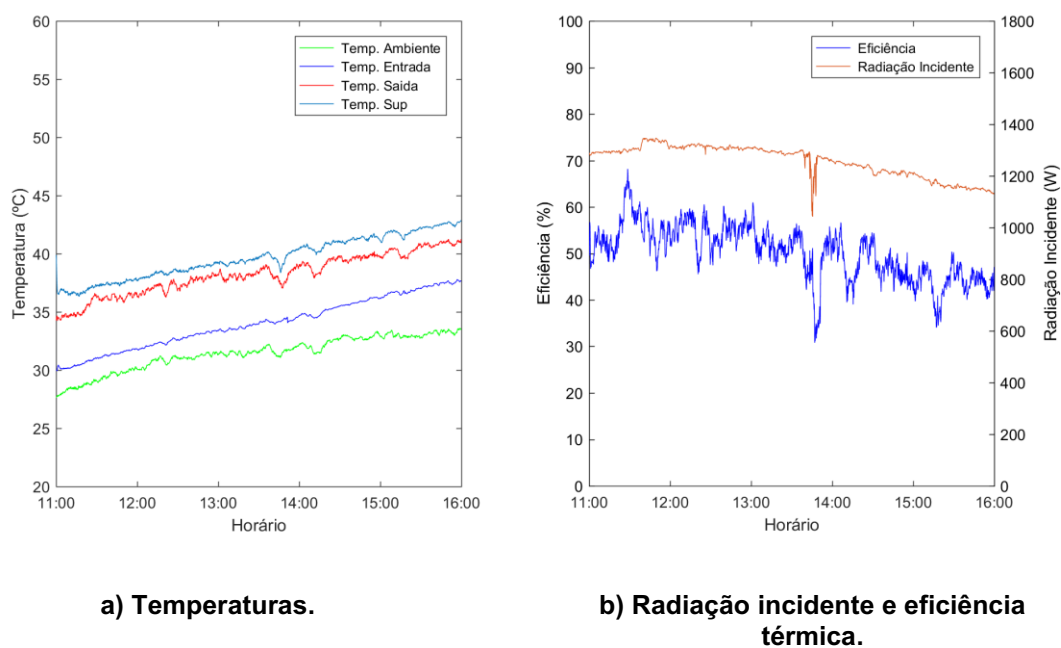
O experimento teve início às 11h, período que começa o processo de transferência de calor entre o coletor e o fluido de trabalho, com interrupção às 16h quando o sistema de rastreamento deixa de funcionar e retorna o concentrador à posição de segurança.

#### 4.1.1 Análise Térmica

As Figuras 28 a 32 apresentam os perfis transientes de eficiência de Primeira Lei do tubo absorvedor e radiação solar incidente pela área de abertura do concentrador solar. Também são apresentados os valores da temperatura do fluido de trabalho (entrada e saída), temperatura superficial externa na saída do tubo absorvedor e a temperatura ambiente.

Com base no comportamento da radiação solar incidente nas Figuras 28 a 32 verifica-se que os experimentos ocorreram em dia com pouca incidência de nuvens, com taxas próximas a 1300 W. Os instantes em que houveram incidência de nuvens são facilmente identificados nos gráficos, regiões com quedas bruscas na taxa de radiação incidente.

**Figura 28 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (18/07/2020).**



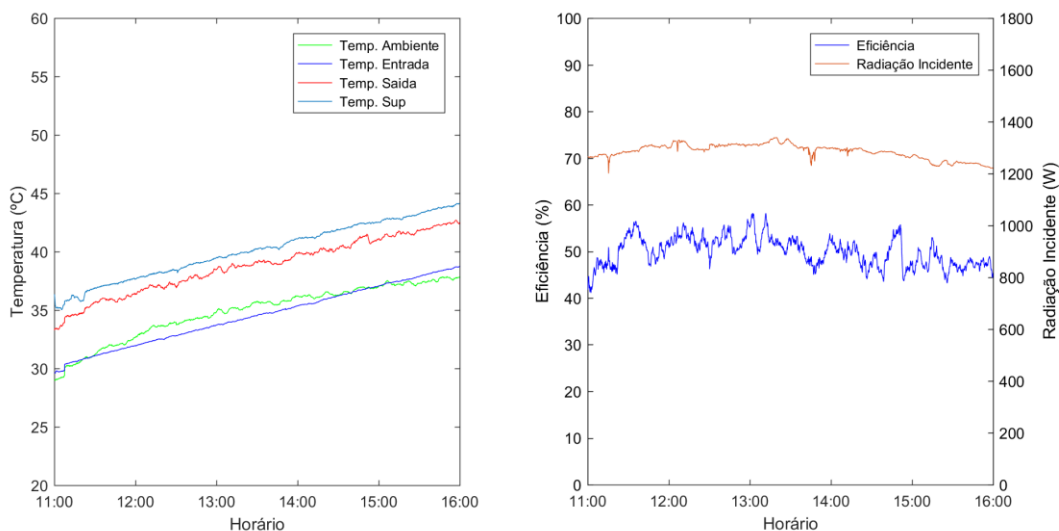
**a) Temperaturas.**

**b) Radiação incidente e eficiência térmica.**

**Fonte: Autoria própria.**

Analisando a Figura 28, observa-se que o fluido de trabalho teve um aumento de 7,0 °C em sua temperatura ao longo do experimento, com variação média de temperatura entre a entrada e a saída do tubo absorvedor de 4,22 °C. Com isso, absorveu uma média de 663,1 W de todo os 1258,3 W disponíveis da radiação incidente, resultando em uma eficiência média de primeira lei de 52,50%. Foi o único dia em que a temperatura ambiente esteve abaixo de todas as outras temperaturas observadas durante o experimento.

**Figura 29 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (01/08/2020).**

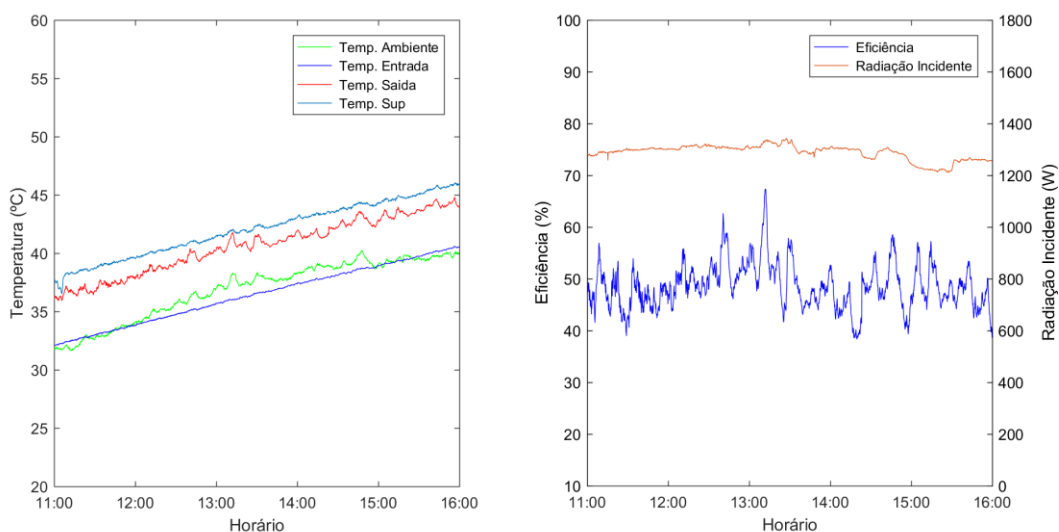


**a) Temperaturas.**

**b) Radiação incidente e eficiência térmica.**

Fonte: Autoria própria.

**Figura 30 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (06/09/2020).**



**a) Temperaturas.**

**b) Radiação incidente e eficiência térmica.**

Fonte: Autoria própria.

Foi observado nas Figuras 29 e 30 um comportamento similar para os dois dias, realizados em dias de céu limpo com intervalo de um mês entre os experimentos. Radiação média incidente de 1285,8 W para o dia 01/08 e de 1288,4 W para o dia

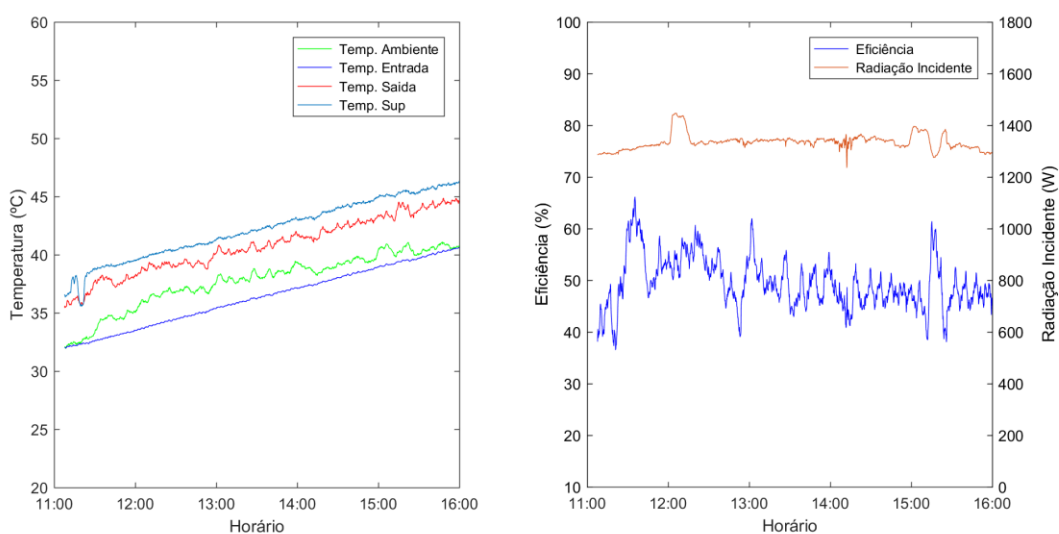


06/09, com calor absorvido médio de 672,2 W e 655,8 W, resultando em eficiência média de 52,24% e 50,88%, respectivamente.

Apesar do dia 01/08 ter apresentado uma radiação média incidente menor que a do dia 06/09, a temperatura ambiente no dia 01/08 esteve acima da temperatura de entrada do fluido de trabalho durante um maior período de tempo, contribuindo para uma diminuição nas perdas de energia para o ambiente e, conseqüentemente, uma maior eficiência térmica.

A diferença média de temperatura do fluido de trabalho entre a entrada e a saída para o dia 01/08 foi de 4,28 °C, com aumento de 9,2 °C na temperatura do fluido de trabalho. Já para o dia 06/09, o fluido de trabalho teve um aumento de 7,8 °C durante o experimento, com variação média de temperatura entre a entrada e saída do tubo absorvedor de 4,19 °C.

**Figura 31 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (26/09/2020).**



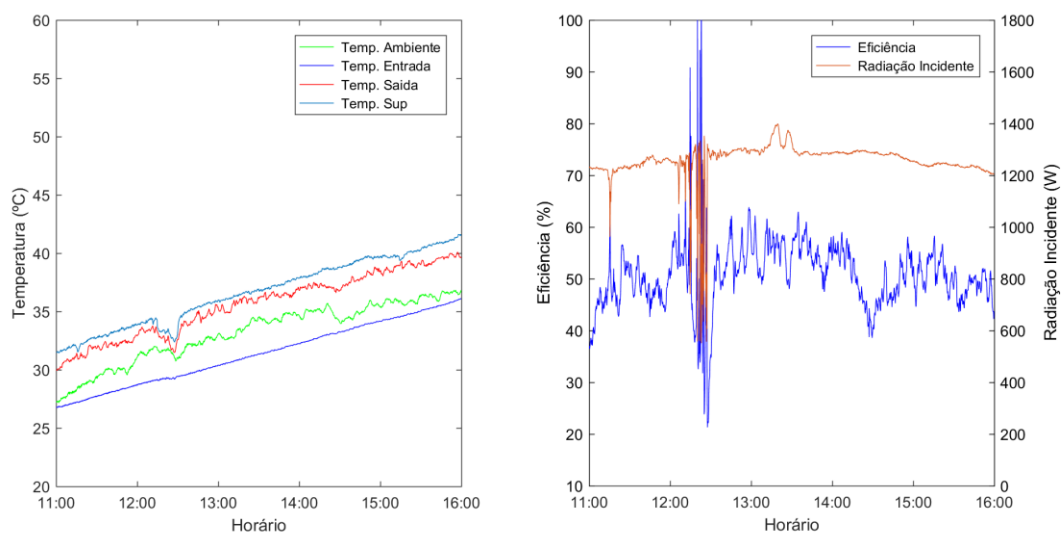
**a) Temperaturas.**

**b) Radiação incidente e eficiência térmica.**

**Fonte: Autoria própria.**

Durante os dias 26/09 e 11/10, Figuras 31 e 32, a temperatura ambiente esteve acima da temperatura de entrada do fluido de trabalho durante todo experimento. Apesar disso, o dia 26/09 foi o que apresentou maiores perdas de energia devido às elevadas taxas de radiação solar incidente, cerca de 5% maior que nos outros dias de experimento. A radiação incidente média foi de 1334,9 W, resultando em eficiência média de 51,74%.

**Figura 32 – Comportamento térmico do concentrador solar de calha parabólica (11/10/2020).**



**a) Temperaturas.**

**b) Radiação incidente e eficiência térmica.**

**Fonte: Autoria própria.**

Através da Figura 32 observa-se que foi o dia de maior nebulosidade, porém, foi o dia de maior eficiência térmica de Primeira Lei, 53,72%. Radiação incidente média foi de 1257,6 W, sendo um total de 674,9 W absorvidos na forma de calor sensível ao fluido de trabalho, que teve um aumento de 9,7 °C em sua temperatura ao longo do experimento e variação média de 4,28 °C ao passar pelo tubo absorvedor.

Ao longo dos 5 dias de experimento, a temperatura do fluido de trabalho se comportou de maneira crescente, com desaceleração do aumento à medida que o sol se põe e, conseqüentemente, a radiação solar incidente decresce.

Os resultados experimentais obtidos e mencionados na presente seção estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Dados médios referentes ao Experimento 3.**

Dia	Radiação incidente (W)	Calor absorvido (W)	Tout - Tamb (°C)	DT (°C)	Eficiência de 1ª Lei (%)
18/07/2020	1258,3	663,1	6,78	4,22	52,50
01/08/2020	1285,8	672,2	3,97	4,28	52,24
06/09/2020	1288,4	655,8	3,63	4,19	50,88
26/09/2020	1334,9	690,7	2,89	4,29	51,74
11/10/2020	1257,6	674,9	2,44	4,28	53,72

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2 Análise de Eficiência Térmica Global

Analisando todos os componentes (concentrador solar, tubulações, conexões, registro e reservatório de água) e, com base na metodologia apresentada na Seção 3.4.2, foi elaborada a Tabela 4 contendo os resultados experimentais obtidos durante os cinco dias de experimentos.

Durante o experimento, a energia absorvida pela água ao passar pelo tubo absorvedor foi sendo transferida à água contida no reservatório, causando um aumento de temperatura. A energia armazenada pôde ser então determinada experimentalmente conhecendo essa variação de temperatura e o volume de água aquecido (348 litros). A energia armazenada média foi de 12,77 MJ, com máxima de 13,52 MJ para o último dia de experimento.

A energia disponível foi obtida a partir da soma da energia incidente sobre a área de abertura do concentrador com a potência da bomba multiplicada pelo tempo de funcionamento (potência de 100 W durante 5 horas de experimento). A radiação incidente média para os cinco dias de experimentos foi de 1285,0 W, resultando em energia disponível média de 24,93 MJ.

**Tabela 4 – Dados médios para análise global referentes ao Experimento 3.**

Dia	$\Delta T$ (°C)	Energia Armazenada (MJ)	Energia Disponível (MJ)	Eficiência Global (%)
18/07/2020	8,22	11,97	24,45	48,95
01/08/2020	9,27	13,50	24,94	54,12
06/09/2020	8,34	12,15	24,99	48,61
26/09/2020	8,72	12,70	25,83	49,16
11/10/2020	9,29	13,52	24,44	55,34

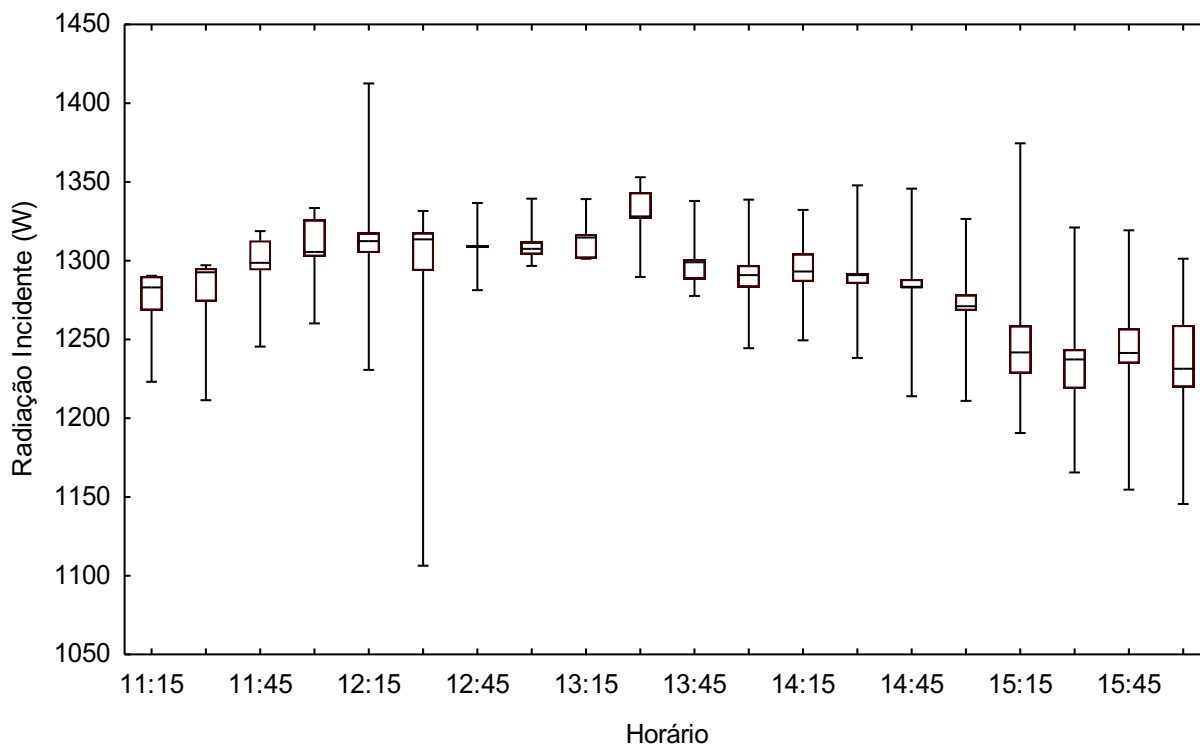
Fonte: Autoria própria.

Comparando as eficiências térmicas do tubo absorvedor (Tabela 3) com as eficiências térmicas globais do concentrador (Tabela 4), verifica-se que o dia 11/10 apresentou maior eficiência para ambos os casos. Entretanto, o dia 18/07, que obteve a segunda maior eficiência térmica do tubo absorvedor, apresentou eficiência global abaixo da média. Isso pode ser explicado pela elevada diferença de temperatura entre o fluido de trabalho e a temperatura ambiente, propiciando perdas de energia de todo o sistema para o ambiente.

#### 4.1.3 Análise Estatística e Análise de Incerteza

Os dados experimentais foram reduzidos a dados médios, calculados a cada 15 minutos, com o objetivo de reduzir a variabilidade do conjunto de dados e avaliar a repetibilidade do experimento.

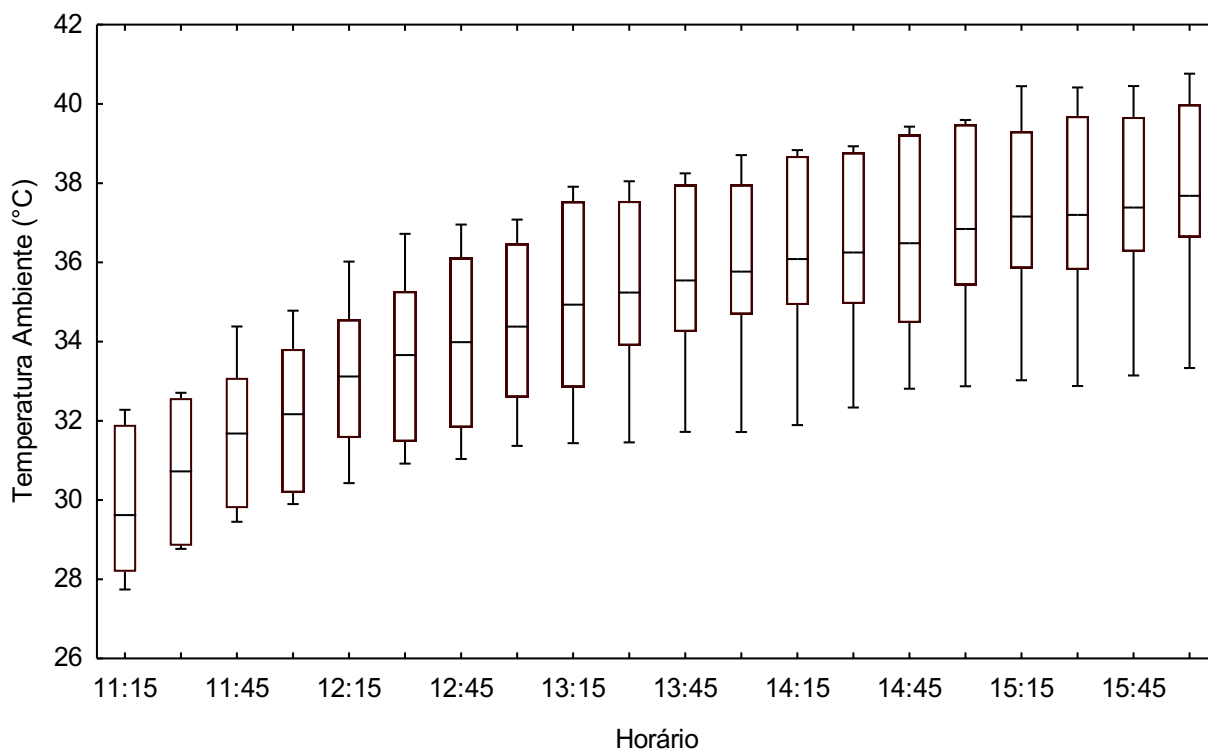
As condições ambientais durante os cinco dias de experimento, radiação solar incidente e temperatura ambiente, estão representadas nas Figuras 33 e 34, através do diagrama de blocos (Boxplot).

**Figura 33 – Boxplot da radiação solar incidente durante o Experimento 3.**

**Fonte: Autoria própria.**

O Boxplot da radiação incidente sobre a área de abertura do concentrador, Figura 33, apresentou baixa variabilidade do conjunto de dados, com diferença relativa média de 1,3% entre os dados do primeiro e terceiro quartil. Porém, observa-se que em todos os instantes os valores de máximo e/ou mínimo estiveram bem distantes da mediana, com máximo atingindo valor até 10% acima da mediana e mínimo até 15% abaixo da mediana. Isso ocorreu devido à nebulosidade apresentada nesses instantes em algum dos cinco dias de experimento.

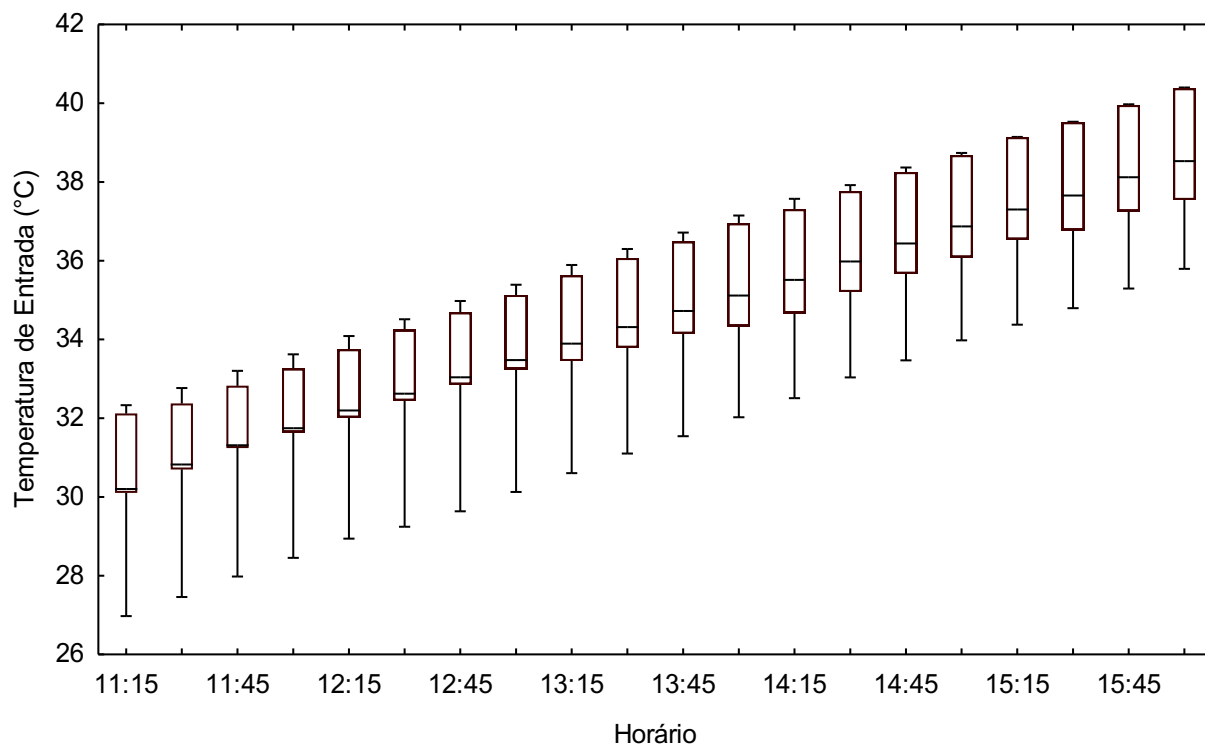
**Figura 34 – Boxplot da temperatura ambiente durante o Experimento 3.**



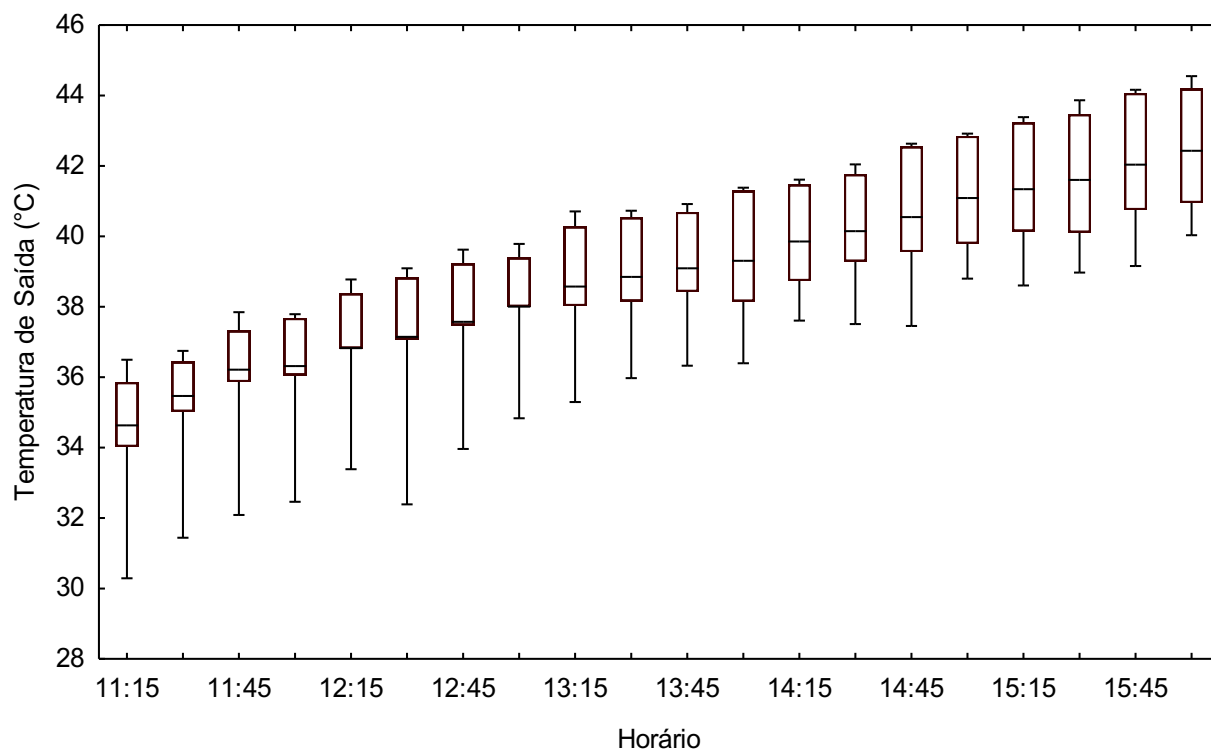
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser visto na Figura 34, a temperatura ambiente apresentou uma alta variabilidade durante os cinco dias de experimentos, com diferença relativa média de 10,2% entre os dados do primeiro e terceiro quartil. Os níveis de temperatura encontram-se inferiores à mediana, ou seja, o conjunto de dados apresentou uma assimetria inferior. Essa assimetria inferior ocorreu devido aos dados do primeiro e quinto dia de experimento, onde os níveis de temperatura ambiente foram inferiores quando comparados aos outros dias, principalmente a partir da segunda metade do experimento, onde a temperatura ambiente tende a se estabilizar.

Os gráficos Boxplot das condições experimentais, temperatura de entrada e de saída do fluido de trabalho no tubo absorvedor, estão apresentados nas Figuras 35 e 36.

**Figura 35 – Boxplot da temperatura de entrada do fluido de trabalho durante o Experimento 3.**

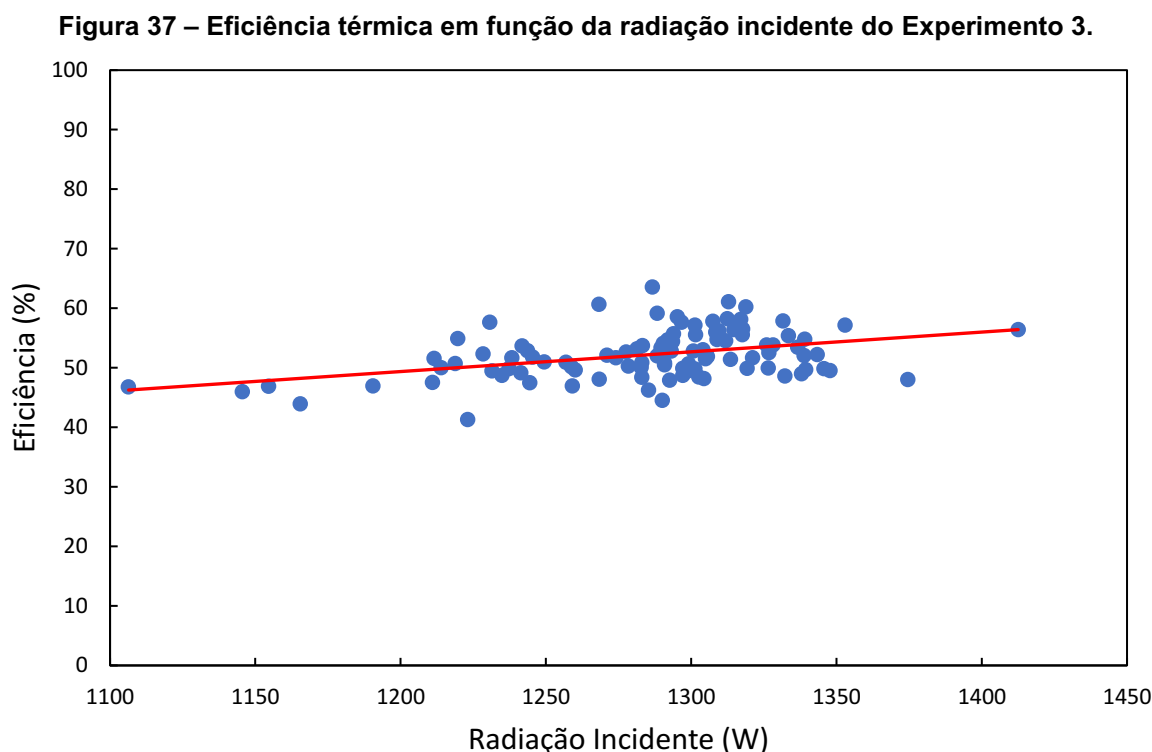
Fonte: Autoria própria.

**Figura 36 – Boxplot da temperatura de saída do fluido de trabalho durante o Experimento 3.**

Fonte: Autoria própria.

Os conjuntos de dados de temperatura de entrada e de saída do fluido de trabalho também apresentaram uma menor variabilidade quando comparados ao conjunto de dados da temperatura ambiente (Figura 35 e 36), com diferença relativa média próximas a 6% entre os dados do primeiro e terceiro quartil. Entretanto, nos três casos foram observados simetria inferior, com níveis de temperatura abaixo da mediana. Os níveis de temperatura de entrada e saída para o primeiro e quinto dia de experimento também foram inferiores quando comparados aos outros dias de experimento, resultando em valores mínimos distantes da mediana.

Uma análise de regressão (Seção 3.5) foi utilizada para avaliar a influência das variáveis controláveis e incontroláveis sob o desempenho do concentrador. Para isso, assim como na análise descritiva, foram utilizados os dados médios, calculados a cada intervalo de 15 minutos. A Figura 37 apresenta a regressão linear referente à eficiência térmica de Primeira Lei do concentrador associada à radiação solar incidente.



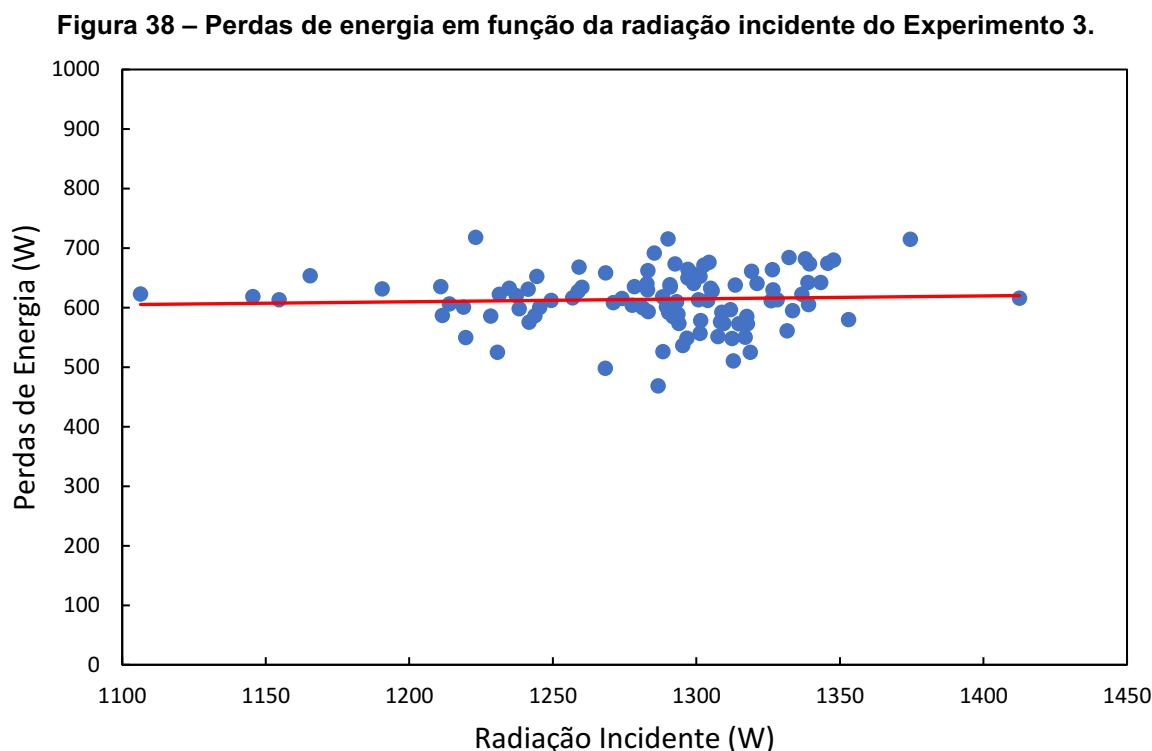
**Fonte: Autoria própria.**

A partir da Figura 37 observa-se uma relação crescente entre a eficiência e a radiação incidente, com coeficiente angular  $\beta_1$  igual a 0,0332. A tendência observada



está limitada a um pequeno intervalo, com eficiência variando entre 50 e 55% para intervalo de radiação solar incidente compreendido entre 1200 e 1350 W.

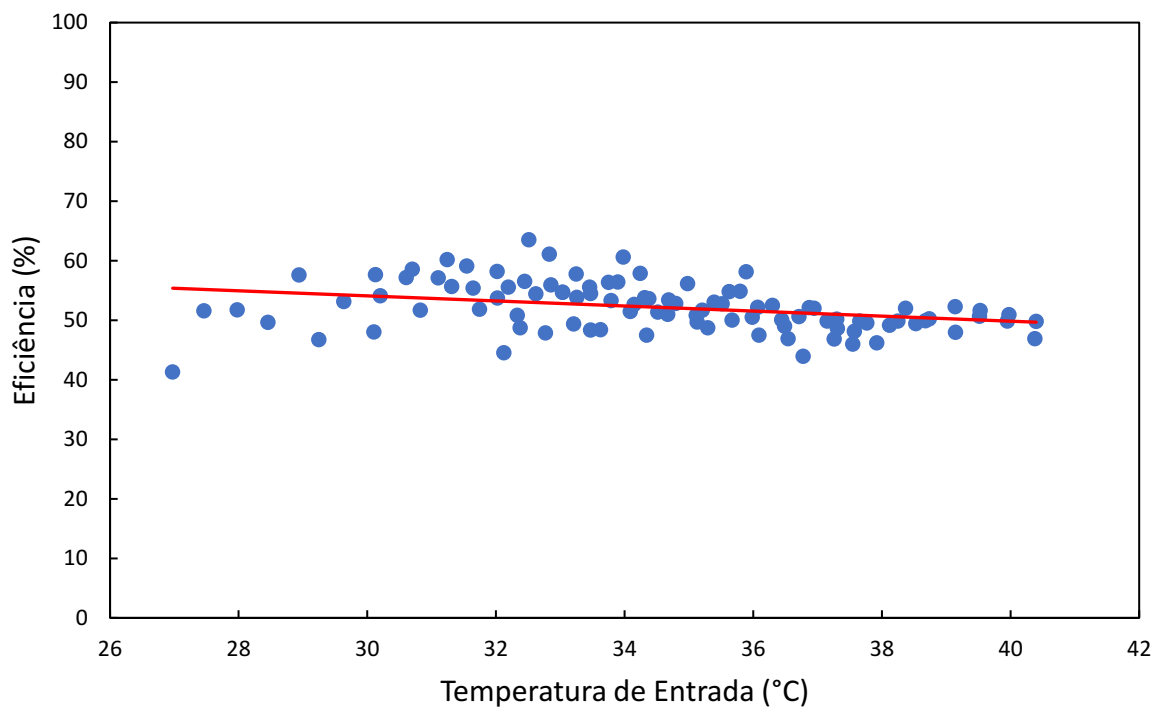
O modelo de regressão linear observado na Figura 38 resultou em coeficiente angular  $\beta_1$  igual a 0,0491. Assim como a eficiência, as perdas de energia também apresentam uma relação crescente com a radiação incidente, que manteve taxas muito próximas a 600 W.



**Fonte: Autoria própria.**

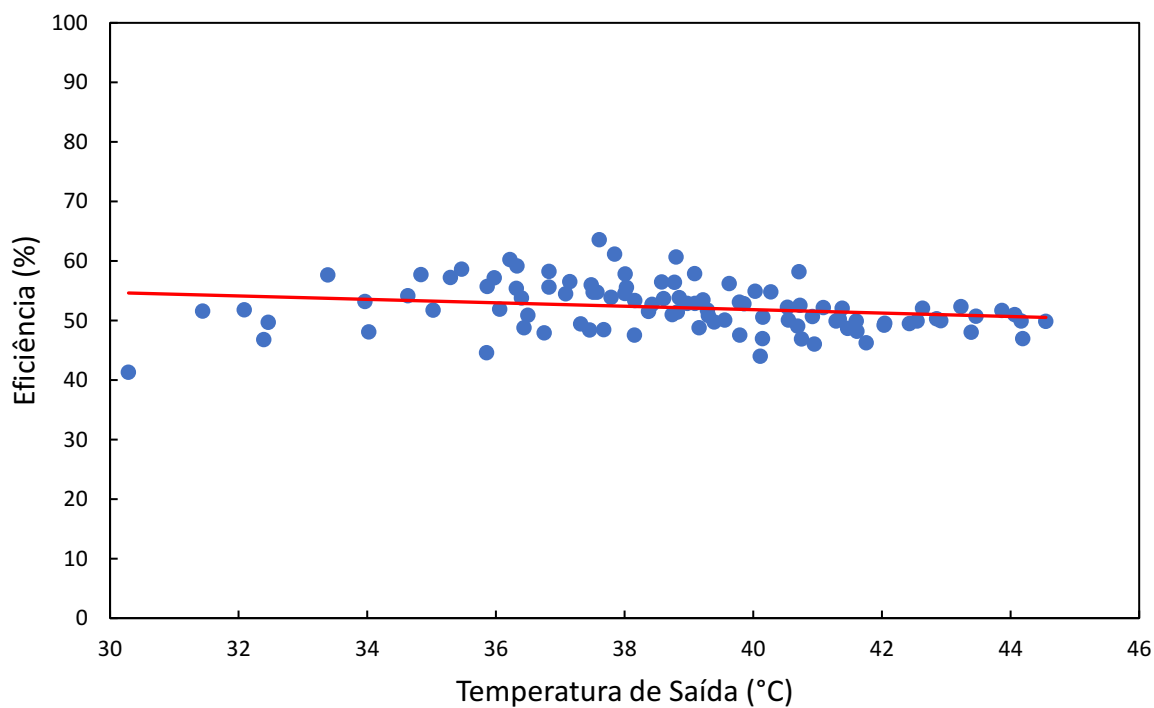
As Figuras 39 e 40 apresentam a regressão linear referente à eficiência em função das temperaturas de entrada e saída do fluido de trabalho no tubo absorvedor.

**Figura 39 – Eficiência térmica em função da temperatura de entrada do fluido de trabalho do Experimento 3.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 40 – Eficiência térmica em função da temperatura de saída do fluido de trabalho do Experimento 3.**



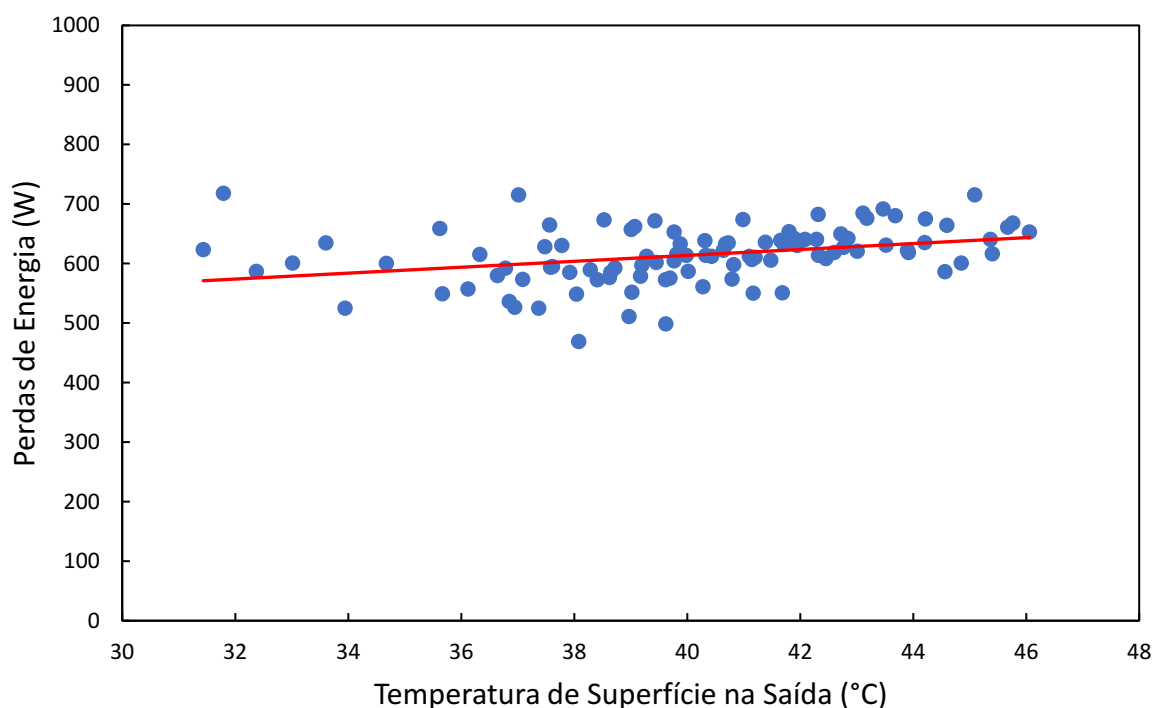
Fonte: Autoria própria.

Assim como já observado por Netzel (2019), o comportamento da eficiência do concentrador com a temperatura de entrada e com a temperatura de saída do fluido de trabalho são similares, sendo inversamente proporcional para ambos os casos.

Quanto maiores as taxas de radiação solar incidente, maiores serão as temperaturas do fluido de trabalho e, conseqüentemente, maiores serão as perdas de energia. Além do isolamento térmico utilizando o vácuo não ser totalmente perfeito, permitindo a troca de calor com o ambiente por convecção, o tubo absorvedor está a todo momento transferindo energia ao ambiente, pois a temperatura superficial do tubo absorvedor permaneceu durante todo o experimento acima da temperatura ambiente, como pôde ser visto nas Figuras 28 a 32.

O comportamento crescente das perdas de energia com o aumento da temperatura superficial do tubo absorvedor pode ser observado na Figura 41.

**Figura 41 – Perdas de energia em função da temperatura superficial na saída do tubo absorvedor do Experimento 3.**

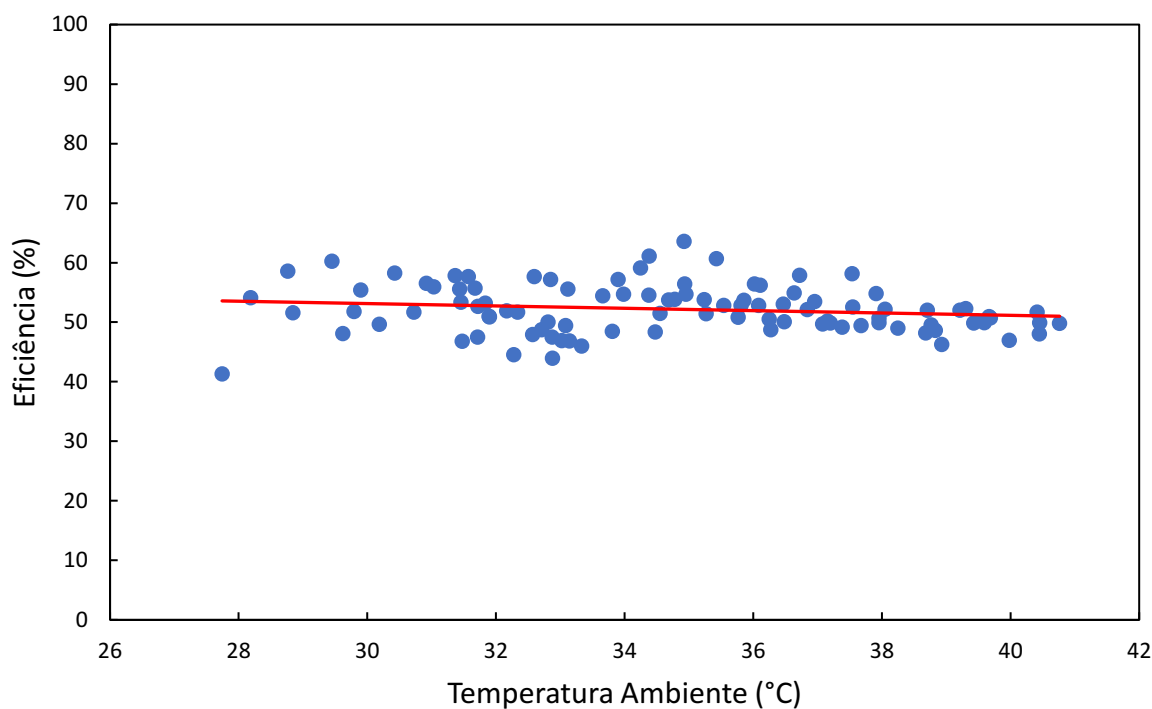


**Fonte: Autoria própria.**

A temperatura ambiente apresenta uma alta influência sobre a temperatura de entrada do fluido de trabalho, como pôde ser visto nas Figuras 28 a 32 e, da mesma forma que a eficiência está inversamente proporcional à temperatura de entrada, a

eficiência também assume uma relação inversamente proporcional à temperatura ambiente, Figura 42.

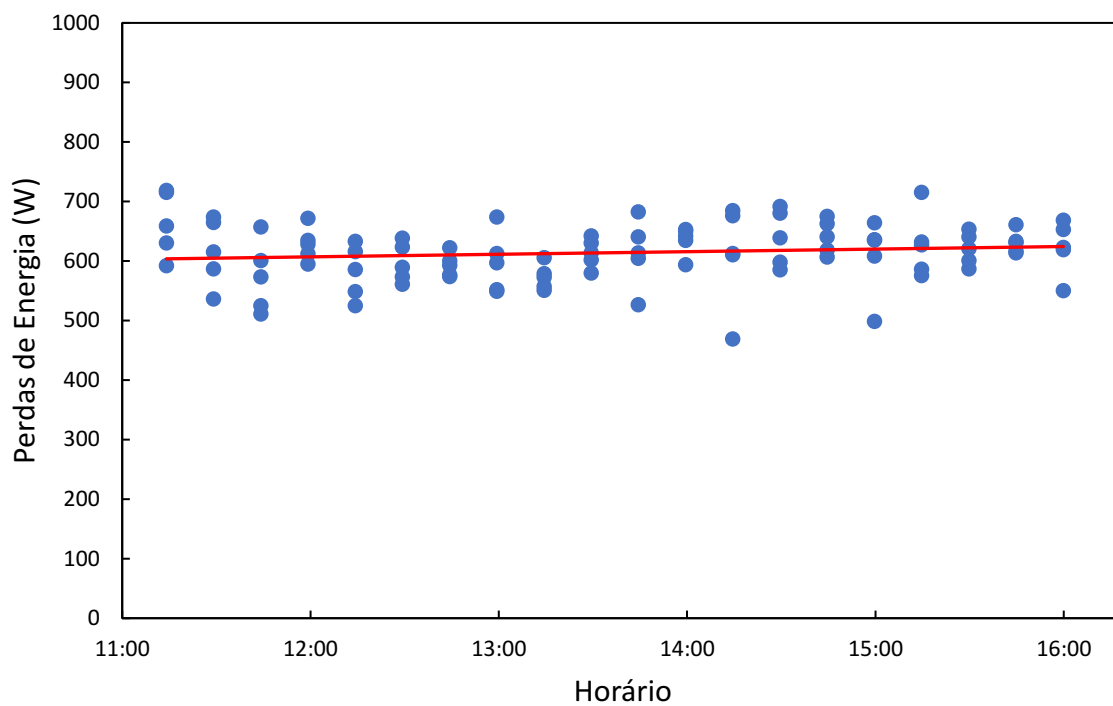
**Figura 42 – Eficiência térmica em função da temperatura ambiente do Experimento 3.**



**Fonte: Autoria própria.**

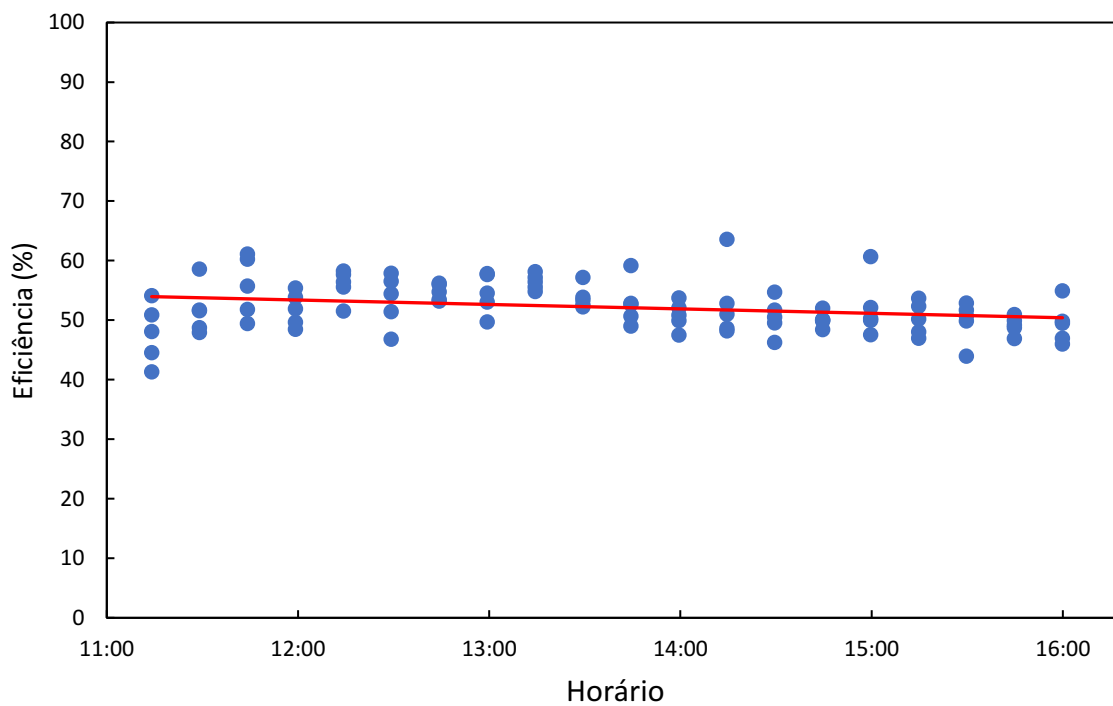
Diferentemente do que foi observado por Netzel (2019) nos Experimentos 1 e 2, as perdas de energia e a eficiência do concentrador solar no Experimento 3 não variaram consideravelmente ao longo do dia. A Figura 43 apresenta a regressão linear referente às perdas de energia ao longo do experimento, enquanto na Figura 44 é apresentada a regressão linear referente à eficiência ao longo do experimento. As variáveis, perdas de energia e eficiência, possuem comportamento inversamente proporcional, pois se o concentrador está perdendo energia, então o fluido de trabalho não está conseguindo absorver essa energia, diminuindo assim a eficiência.

Figura 43 – Perdas de energia ao longo do Experimento 3.



Fonte: Autoria própria.

Figura 44 – Eficiência térmica em função do período de operação do Experimento 3.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONFIGURAÇÕES DE TUBO ABSORVEDOR

Os resultados experimentais do Experimento 3 (Tubo Evacuado) são comparados com as outras duas configurações realizadas por Netzel (2019) em seu trabalho de conclusão de curso, Experimento 1 (Sem Pintura) e Experimento 2 (Com Pintura). Uma análise foi feita de modo a avaliar o efeito da utilização do vácuo para diminuir as perdas de calor no tubo concentrador.

Os Experimentos 1 e 2 ocorreram no mês de agosto com diferença de 1 ano entre eles. O Experimento 1 ocorreu no final do mês de agosto de 2018 (dias 27, 28, 29, 30 e 31) enquanto o Experimento 2 foi realizado no meio do mês de agosto de 2019 (dias 12, 13, 14, 15, 16).

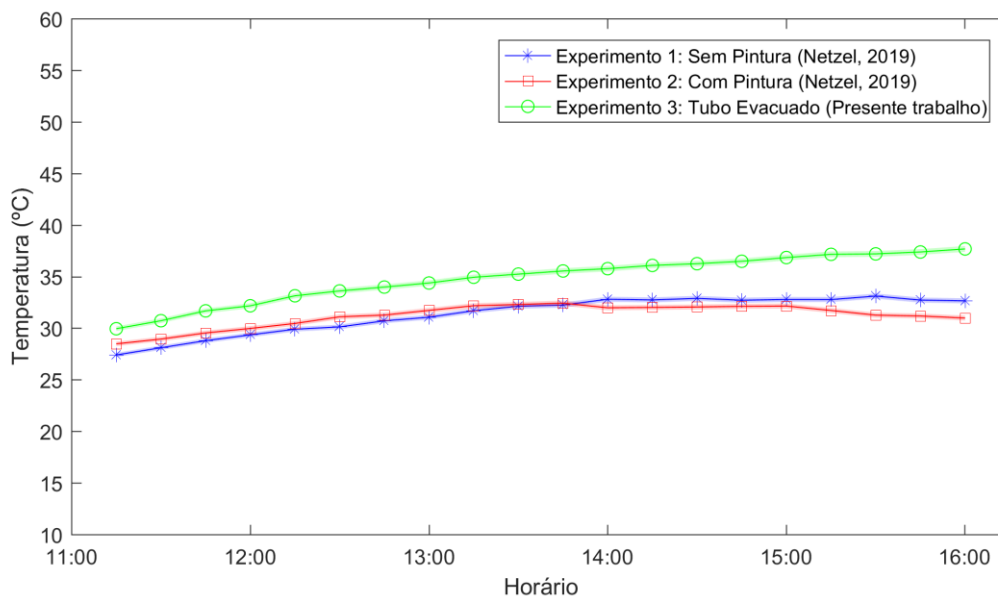
Por motivos de comparação, os resultados de radiação incidente e calor absorvido serão apresentados em  $W/m^2$ , pois a área de abertura do concentrador reduziu. Essa diminuição da área é resultado dos problemas de montagem citados na Seção 3.2.2, onde o envoltório de vidro teve diminuição em seu comprimento. A área de abertura durante os Experimentos 1 e 2 era de  $2,0265 m^2$  e no Experimento 3 passou a ser de  $1,32 m^2$ . A parte superior do tubo sem o envoltório de vidro foi revestida com fita refletiva para que a radiação solar fosse refletida nessa região, como pôde ser visto na Figura 22. Já para a parte inferior, foi feita uma compensação no calor absorvido total, descontando o ganho de energia pela parcela do tubo Sem Pintura e Com Pintura (utilizando as eficiências térmicas médias obtidas por Netzel (2019), 28,99% e 36,69%, respectivamente).

A vazão mássica utilizada no Experimento 3 ( $0,0425 kg/s$ ) foi ajustada até que estivesse bem próxima da vazão mássica que foi utilizada nos Experimentos 1 e 2 ( $0,04232 kg/s$ ), a fim de facilitar a interpretação dos resultados.

A análise é baseada em valores médios, calculados a cada 15min, de modo a reduzir a variabilidade do conjunto de dados.

As variáveis incontroláveis, temperatura ambiente e radiação incidente, estão representadas nas Figuras 45 e 46, respectivamente. Estas são as variáveis representativas das condições ambientais do dia do experimento.

**Figura 45 – Temperatura ambiente média durante os experimentos.**

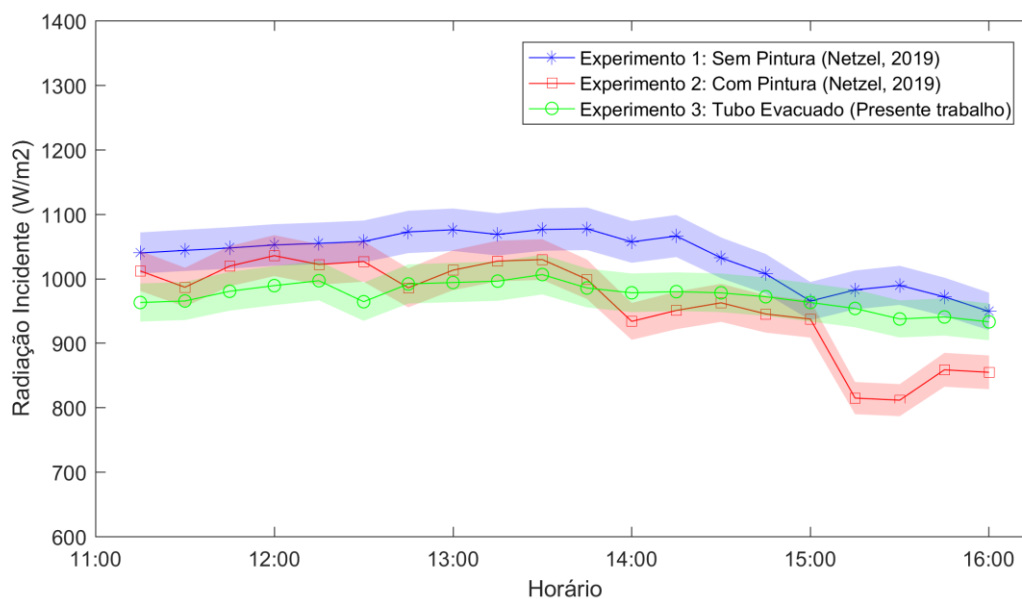


**Fonte: Autoria própria.**

Analisando a Figura 45 observa-se que a temperatura ambiente durante os quinze dias de experimento, apresentaram comportamento similar, porém, os níveis de temperatura durante os Experimentos 1 e 2 foram menores devido a estes terem sido realizados exclusivamente durante o inverno. Com temperatura ambiente média de 31,33 °C para o Experimento 1, 31,19 °C para o Experimento 2 e 34,81 °C para o Experimento 3.

A maior diferença relativa ocorreu ao final dos experimentos, onde as configurações Sem Pintura e Com Pintura sofreram maior queda na temperatura ambiente devido à nebulosidade presente no final dos dois primeiros experimentos, observada na Figura 46. Além disso, o Experimento 3 foi realizado predominantemente durante a primavera, estação a qual o dia tem maior duração quando comparado com o inverno (Experimentos 1 e 2).

**Figura 46 – Radiação solar média no concentrador solar durante os experimentos.**



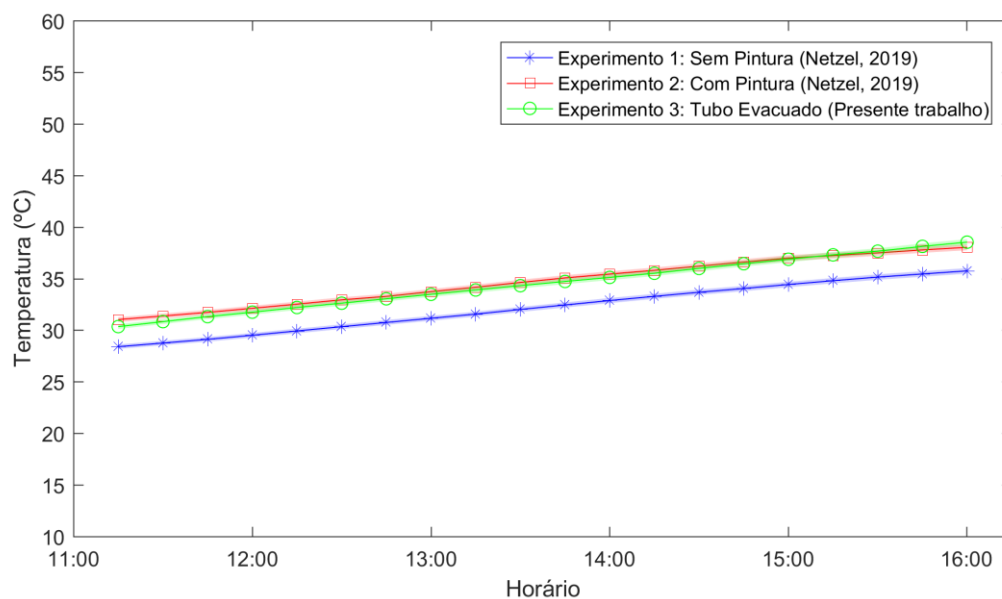
**Fonte: Autoria própria.**

Da mesma forma que a temperatura ambiente, o comportamento da radiação solar durante os Experimentos 1 e 2 são similares, com maior decaimento ao final do dia quando comparado com o Experimento 3.

As temperaturas médias do fluido de trabalho na entrada e saída do tubo concentrador podem ser vistas nas Figuras 47 e 48, respectivamente. As menores temperaturas foram observadas durante o Experimento 1, já para os Experimentos 2 e 3 as temperaturas foram bem similares, com diferença relativa de 0,58% para a temperatura de entrada e de 0,03% para a temperatura de saída. Isso confirma o efeito do vácuo na redução de perdas de calor para o ambiente, que foi capaz de manter temperaturas próximas (em alguns momentos até maiores) para a configuração Tubo Evacuado, mesmo apresentando área de troca de calor 34,86% menor que a configuração Com Pintura.

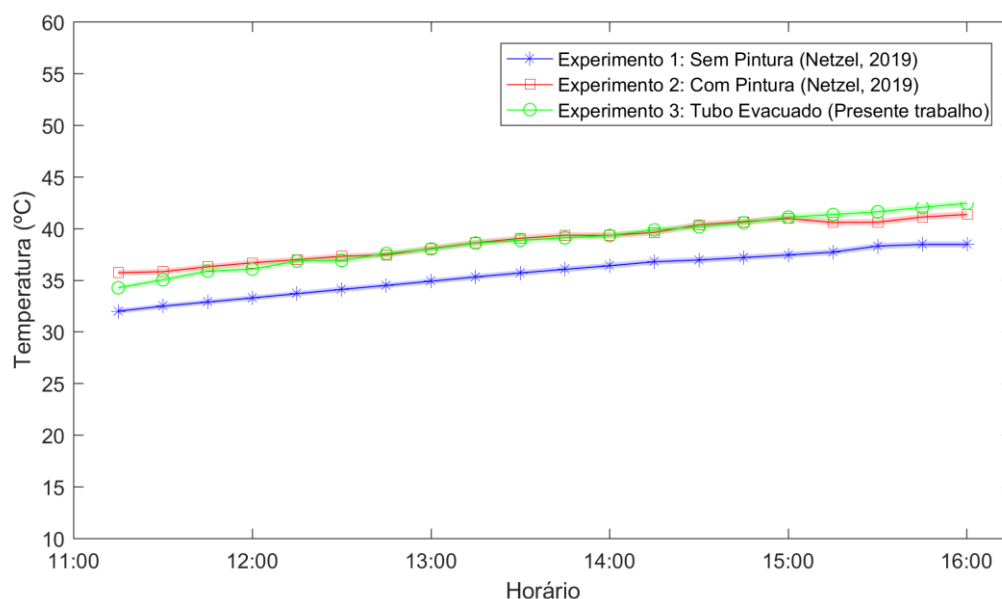


**Figura 47 – Temperatura de entrada média do fluido de trabalho durante os experimentos.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Figura 48 – Temperatura de saída média do fluido de trabalho durante os experimentos.**



**Fonte: Autoria própria.**

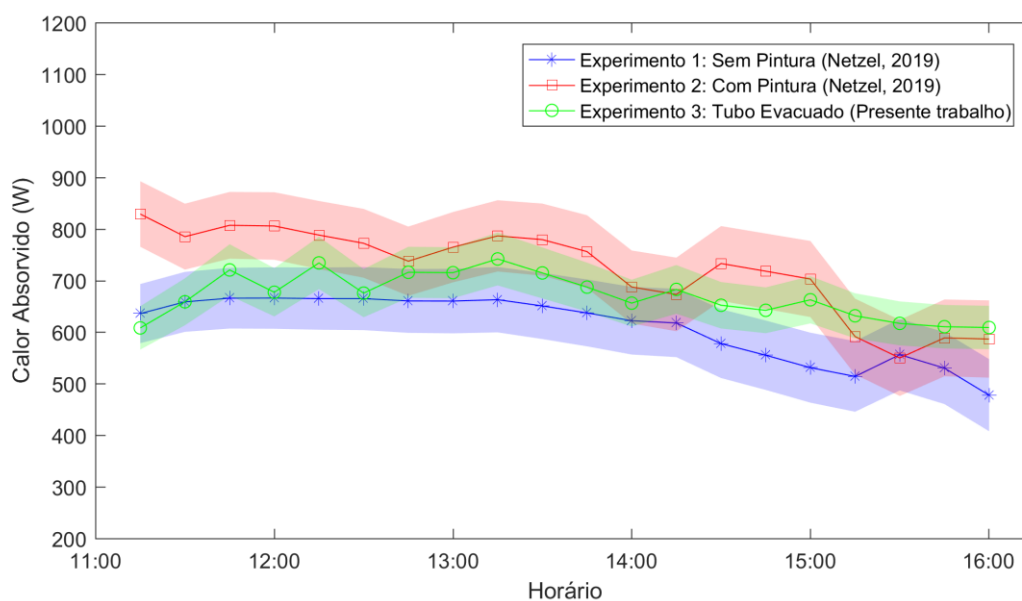
Quando comparado o calor absorvido entre as três configurações, Figura 49, verifica-se que a configuração Sem Pintura absorveu uma média de 610,57 W, seguido da configuração Tubo Evacuado com 670,75 W e pôr fim a configuração Com Pintura com 722,21 W. Entretanto, deve-se considerar que houve uma redução de 34,86% da área de troca de calor para o Tubo Evacuado e mesmo assim a configuração Com Pintura foi apenas 7,13% superior na capacidade de absorver

energia. Isso ocorreu devido à diminuição das perdas de calor para o ambiente utilizando-se do vácuo como isolante térmico.

Apesar dos níveis de radiação solar incidente serem mais elevados durante o Experimento 1 (Sem Pintura), conforme visto na Figura 46, a taxa de calor absorvido nessa configuração ficou 18,28% abaixo da configuração Com Pintura e 9,86% abaixo da configuração do Tubo Evacuado. Isso ocorreu devido à baixa absorptância do tubo de cobre sem pintura seletiva, quando comparado com as configurações com pintura.

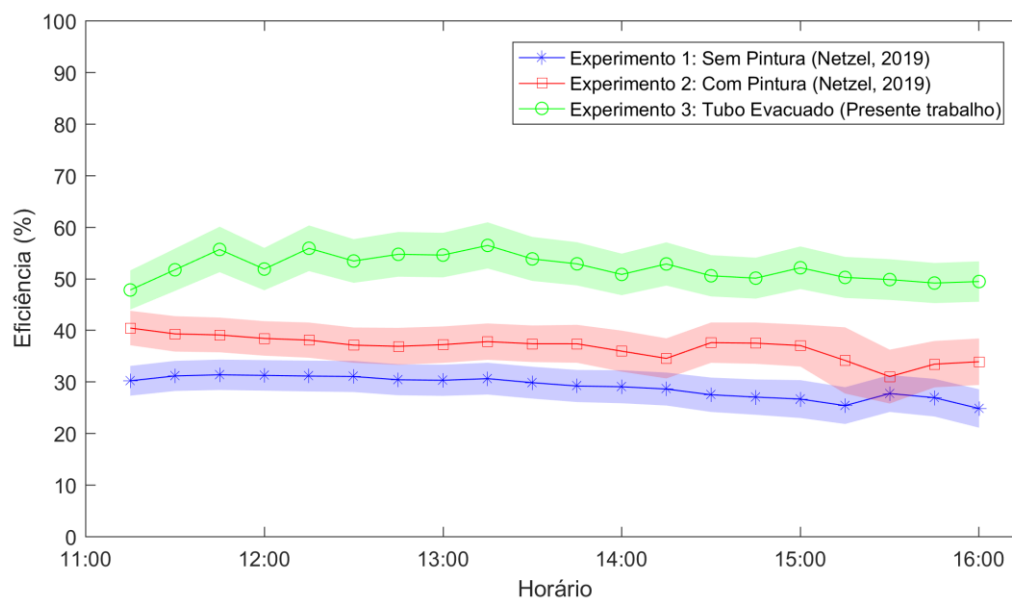
Nas configurações Com Pintura e Tubo Evacuado o tubo absorvedor possui a mesma capacidade em absorver a radiação solar, porém, a diferença está na redução da taxa de transferência de calor ao ambiente devido ao isolamento térmico que o vácuo proporciona.

**Figura 49 – Calor absorvido médio durante os experimentos.**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 50 apresenta a eficiência média do concentrador solar para as três configurações analisadas. De forma similar ao que foi observado no gráfico calor absorvido médio, Figura 49, têm-se um aumento expressivo entre os níveis de eficiência térmica média na configuração de Tubo Evacuado. Um aumento de quase 80% em relação a configuração Sem Pintura e de mais de 40% em relação a configuração Com Pintura.

**Figura 50 – Eficiência térmica média durante os experimentos.**

**Fonte: Autoria própria.**

Mesmo levando em conta as incertezas de medição, a Figura 50 evidencia o resultado positivo da utilização do vácuo na região anular do tubo concentrador para diminuição das perdas térmicas para o ambiente, elevando a eficiência do sistema de 36,69% na configuração não evacuado para 52,18%.

O melhor comportamento dos resultados do Tubo Evacuado, sobre as outras duas configurações, ocorre principalmente no final do dia, quando aumenta a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura superficial externa do tubo, momento no qual as perdas de calor por convecção são acentuadas.

A Tabela 5 apresenta os dados médios obtidos durante os 5 dias para cada um dos três experimentos (Sem Pintura, Com Pintura e Tubo Evacuado), enquanto as diferenças percentuais entre os parâmetros avaliados são apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 5 – Dados médios juntamente de suas incertezas referentes aos Experimentos 1, 2 e 3.**

Parâmetros	Experimento 1 (Sem Pintura)	Experimento 2 (Com Pintura)	Experimento 3 (Tubo Evacuado)
Temperatura Ambiente (°C)	31,33±0,23	31,19±0,23	34,81±0,26
Temperatura de Entrada (°C)	32,16±0,24	34,70±0,26	34,50±0,26
Temperatura de Saída (°C)	35,61±0,26	38,78±0,29	38,77±0,29
Radiação Solar Incidente (W/m <sup>2</sup> )	1034,26±31,64	961,19±29,41	973,31±29,78
Calor Absorvido (W)	610,57±64,11	722,21±69,61	670,75±67,28
Eficiência (%)	28,99±3,21	36,69±3,92	52,18±4,13

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 6 –Diferenças relativas referentes aos Experimentos 1, 2 e 3.**

Parâmetros	Diferença relativa 2 e 1 (%)	Diferença relativa 3 e 1 (%)	Diferença relativa 3 e 2 (%)
Temperatura Ambiente	-0,45	11,11	11,61
Temperatura de Entrada	7,90	7,28	-0,58
Temperatura de Saída	8,90	8,87	-0,03
Radiação Solar Incidente	-7,06	-5,89	1,26
Calor Absorvido	18,28	9,86	-7,13
Eficiência	26,56	79,99	42,22

Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho avaliou-se o desempenho térmico do tubo absorvedor de um concentrador solar de calha parabólica, por meio de uma análise experimental, utilizando um envoltório de vidro evacuado para reduzir perdas térmicas (Experimento 3). Após a análise, os resultados foram comparados com aqueles obtidos por Netzel (2019) em outras duas configurações não evacuadas, ou seja, tubo absorvedor sem pintura seletiva (Experimento 1) e tubo absorvedor com pintura seletiva (Experimento 2).

Para a realização da análise, foram monitoradas durante os experimentos os níveis de temperatura do fluido de trabalho, temperatura ambiente, radiação solar incidente, calor absorvido e eficiência térmica de Primeira Lei.

Como Netzel (2019) já havia observado, houve um aumento de mais de 25% na eficiência do concentrador solar somente devido ao efeito da pintura seletiva quando comparadas as configurações Sem Pintura e Com Pintura.

Quando utilizado o envoltório de vidro e aplicado o vácuo no tubo absorvedor Com Pintura, o efeito da diminuição das perdas de calor aumentou em valores acima de 40% a eficiência térmica média do concentrador solar. A análise térmica realizada evidenciou o que já era esperado, um resultado positivo na utilização do vácuo na região anular do tubo concentrador para diminuição das perdas térmicas para o ambiente, elevando a eficiência do sistema de 36,69% na configuração Com Pintura para 52,18% na configuração Tubo Evacuado.

Avaliando as três configurações por meio de uma análise estatística, determinou-se os níveis de temperatura do fluido de trabalho apresentaram uma relação inversamente proporcional à eficiência do concentrador. Porém, na configuração Tubo Evacuado essa relação foi menos significativa do que nas configurações sem isolamento térmico, onde maiores níveis de temperatura provocaram uma maior queda na eficiência, devido às elevadas perdas de energia térmica para o ambiente.

O desempenho térmico do concentrador solar na configuração Tubo Evacuado foi similar para os cinco dias de experimento, atingindo valores próximos a 52% de eficiência térmica estando o fluido de trabalho a baixas e altas temperaturas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se:

- Repetir os experimentos para uma nova configuração: Tubo concentrador solar de cobre com pintura seletiva, com encapsulamento de vidro não evacuado;
- Substituir o tubo evacuado fabricado por um industrial;
- Utilizar mais passes com o tubo de cobre dentro do tubo de vidro evacuado, aumentando o tempo de exposição à radiação solar concentrada;
- Substituir a água que circula pelo concentrador por um outro fluido de transferência de calor (óleo térmico), fechando o ciclo e trocando calor com a água armazenada dentro do reservatório térmico;
- Fazer análise de viabilidade econômica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. 2005. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005\\_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b](http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b)>. Acesso em: 15 jan. 2020.

AVALLONE, Elson. **Estudo de um Coletor Solar, Tipo Tubo Evacuado Modificado, Utilizando um Concentrador Cilíndrico Parabólico (CPC)**. 2017. 203f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.

BARMATE, V. A.; MESHAM, V. A.; DAROKAR, H. V. Performance Analysis of Evacuated Tube Heat Pipe Solar Water Heating System using Nanofluid coupled with parabolic Trough Concentrator. v. 4, n. 10, p. 393–400, 2016.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, Richard Edwin. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo, SP: Blucher, 2013. 728p. (Série Van Wylen) ISBN 9788521207924.

CABRERA, F. J. et al. Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 103–118, 2013.

COCCIA, G.; DI NICOLA, G.; SOTTE, M. Design, manufacture, and test of a prototype for a parabolic trough collector for industrial process heat. **Renewable Energy**, v. 74, p. 727–736, 2014.

CSP BRASIL. **Usina termossolar de Laguna/SC**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.cspbrasil.com>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ. **Guia de licenciamento ambiental de heliotérmicas**: Subsídios para Avaliação de impacto ambiental. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <<http://pnla.mma.gov.br/publicacoesdiversas>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

DIAS, A. M.; PEREIRA, H. V.; COELHO, R. Utilização De Energia Solar Térmica Através De Concentrador Solar Parabólico. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (Org.). **Balço Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

FILHO, J. R. DE S. **Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilíndrico parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar**. 2008. 91 F. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

IEA-ETSAP; IRENA. **Solar Heat for Industrial Processes**: Technology Brief. 2015. Disponível em: <[https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_ETSAP\\_Tech\\_Brief\\_E21\\_Solar\\_Heat\\_Industrial\\_2015.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf)>. Acesso em 16 jan. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Technology Roadmap**: Concentrating Solar Power. 2010. Disponível em: <[http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/csp\\_roadmap.pdf](http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/csp_roadmap.pdf)>. Acesso em: 15 jan. 2020.

INCROPERA, Frank P. et. al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros técnicos e científicos Editora Ltda, 2008. 1 v. 978-85-216-1584-2.

JAFARI MOSLEH, H. et al. A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic through collector. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 141–150, 2015.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar Energy Engineering**: Processes and Systems. 2. ed. San Diego: Elsevier, 2009.

KEMPFER, T. **Projeto e Construção de um Concentrador Solar**. 2011. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KHAIRUL, M. A. et al. Heat transfer and thermodynamic analysis of a helically coiled heat exchanger using different types of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2013.



KIZILKAN, O.; KABUL, A.; DINCER, I. Development and performance assessment of a parabolic trough solar collector-based integrated system for an ice-cream factory. **Energy**, v. 100, p. 167–176, 2016.

LI, M.; WANG, L. L. Investigation of evacuated tube heated by solar trough concentrating system. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 20, p. 3591–3601, 2006.

LIU, Q. et al. Experimental investigation on a parabolic trough solar collector for thermal power generation. **Science China Technological Sciences**, v. 53, n. 1, p. 52–56, 2010.

LLP, P. (2009). **Solar Potential Delivering on Earth's**. The climate group, Price Water House Cooper. Disponível em: <<https://www.pwc.com/gx/en/sustainability/assets/earths-solarpotential.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MARANHÃO, D. C. **Projeto e Construção de um Concentrador Solar Tipo Fresnel Linear**. 2016. 111 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY ENERGY INITIATIVE – MITEI. **The Future of Solar Energy**. 2015. Disponível em: < <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

NETZEL, R. A. **Estudo Experimental de um Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico**. 2019. 137 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

PARKER SEALS. **Manual de O'Ring**. 1997. Disponível em: < [https://www.parker.com/literature/Brazil/seals/catalogo\\_5700\\_br.PDF](https://www.parker.com/literature/Brazil/seals/catalogo_5700_br.PDF)>. Acesso em 03 mar. 2020.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. Ed. São José dos Campos: Swera, 2017.

ROSA, F. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila).

SALVADORETTI, J. L. **Modelo Matemático para Análise do Desempenho Térmico de Coletores Solares Cilindrico-Parabólicos**. 1983. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

SELVAKUMAR, P.; SOMASUNDARAM, P.; THANGAVEL, P. Performance study on evacuated tube solar collector using therminol D-12 as heat transfer fluid coupled with parabolic trough. **Modern Language Quarterly**, v. 85, p. 505–510, 2014.

SOLAR PAYBACK. **Energia Termossolar Para a Indústria: Brasil**. 2018. Disponível em: [https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user\\_upload/national\\_process\\_heat\\_bra\\_sp\\_b.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/national_process_heat_bra_sp_b.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2020.

TORRESOL ENERGY. **Valle 1 y Valle 2**. [s.d.]. Disponível em: <https://torresolenergy.com/valle-1-valle-2/>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

YAGHOUBI, M.; AHMADI, F.; BANDEHEE, M. Analysis of Heat Losses of Absorber Tubes of Parabolic through Collector of Shiraz (Iran) Solar Power Plant. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 1, n. 1, p. 33–37, 2013.

## APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

### “motor\_de\_passo\_velocidade\_maxima”

```
// defines pins numbers
const int stepPin = 5;
const int dirPin = 3;
const int enPin = 8;
void setup() {

    // Sets the two pins as Outputs
    pinMode(stepPin,OUTPUT);
    pinMode(dirPin,OUTPUT);

    pinMode(enPin,OUTPUT);
    digitalWrite(enPin,LOW);

}
void loop() {
    // HIGH antihorario
    // LOW Horario
    digitalWrite(dirPin,HIGH); // Enables the motor to move in a particular direction
    // Makes 200 pulses for making one full cycle rotation
    for(int x = 0; x < 800; x++) {
        digitalWrite(stepPin,HIGH);
        delayMicroseconds(25);
        digitalWrite(stepPin,LOW);
        delayMicroseconds(25);
    }
}
```

### “Acionamento”

```
#include <Wire.h>
#include <DS1307.h>

// motor de passo
const int stepPin = 5;
const int dirPin = 3;
const int enPin = 8;

// LDR
int value=0;
int LDR1 = 0;
int LDR2 = 0;
int T=0;
int I=0;

//Modulo RTC DS1307 ligado as portas A4 e A5 do Arduino
DS1307 rtc(A4, A5);
Time t;
int hora = 0;
int minuto = 0;
```

```

void setup() {
  // motor de passo
  pinMode(stepPin,OUTPUT);
  pinMode(dirPin,OUTPUT);
  pinMode(enPin,OUTPUT);
  digitalWrite(enPin,LOW);

  // Relogio
  //Aciona o relógio
  rtc.halt(false);
  //Definições do pino SQW/Out
  rtc.setSQWRate(SQW_RATE_1);
  rtc.enableSQW(true);

  // determinado o caso onde nos encontramos

  // LEITURA LDR
  Serial.begin(9600);
  LDR1=analogRead(A0);
  LDR2=analogRead(A1);

  value=(LDR2-LDR1);

  //Mostra os valores na serial

  Serial.print(" | LDR1 "); Serial.print(LDR1);
  Serial.print(" | LDR2 = "); Serial.print(LDR2);
  Serial.print(" | diferença "); Serial.print(value);
  Serial.print(" | Hora ");
  t = rtc.getTime();
  hora = t.hour;
  minuto = t.min;
  Serial.print(hora);
  Serial.print(" : ");
  Serial.println(minuto);

}

void loop() {
  // controle da direção perante a luminosidade

  while (value >= 5 && hora < 17 && hora >= 0){
    T++;
    if (T > 7000){
      digitalWrite(dirPin,HIGH);
      for(int x = 0; x < 800; x++) {
        digitalWrite(stepPin,HIGH);
        delayMicroseconds(50);
      }
    }
  }
}

```

```

        digitalWrite(stepPin,LOW);
        delayMicroseconds(50);
    }
}

l++;
if (l == 100){
    LDR1=analogRead(A0);
    LDR2=analogRead(A1);
    value=(LDR2-LDR1);
    t = rtc.getTime();
    hora = t.hour;
    minuto = t.min;
    l=0;
}
}

T=0;

// correção no sentido oposto perante a luminosidade devido algum evento inesperado

while (value <= 0 && hora >= 11 ){
    T++;
    if (T > 10000 ){
        digitalWrite(dirPin,LOW);
        for(int x = 0; x < 800; x++) {
            digitalWrite(stepPin,HIGH);
            delayMicroseconds(50);
            digitalWrite(stepPin,LOW);
            delayMicroseconds(50);
        }
    }

    l++;
    if (l == 100){
        LDR1=analogRead(A0);
        LDR2=analogRead(A1);
        value=(LDR2-LDR1);
        t = rtc.getTime();
        hora = t.hour;
        minuto = t.min;
        l=0;
    }
}

T=0;

// Renovando as leituras

LDR1=analogRead(A0);
LDR2=analogRead(A1);

```

```
value=(LDR2-LDR1);

Serial.print(" | LDR1 "); Serial.print(LDR1);
Serial.print(" | LDR2 = "); Serial.print(LDR2);
Serial.print(" | diferenca "); Serial.print(value);
Serial.print(" | Hora ");
t = rtc.getTime();
hora = t.hour;
minuto = t.min;
Serial.print(hora);
Serial.print(" : ");
Serial.println(minuto);

delay(2000);
```