

UNIVERSIDADE TIRADENTES – UNIT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS - PEP

**AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO TÉRMICO DE UM ABSORVEDOR  
UTILIZANDO O CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIXO  
SCHEFFLER COM DIFERENTES SISTEMAS REFLEXIVOS**

Autor: Marcos Elan Alves de Araújo

Orientadores: Prof<sup>o</sup>. D. Sc. Renan Tavares Figueiredo

Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Odélsia Leonor Sánchez de Alsina

ARACAJU, SE - BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

**AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO TÉRMICO DE UM ABSORVEDOR UTILIZANDO  
O CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIXO SCHEFFLER COM DIFERENTES  
SISTEMAS REFLEXIVOS**

Marcos Elan Alves de Araújo

SEMINÁRIO DE DEFESA SUBMETIDO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DA UNIVERSIDADE TIRADENTES COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA DE PROCESSOS

Aprovada por:

---

Renan Tavares Figueiredo, D.Sc.

---

Odélsia Leonor Sánchez de Alsina, D.Sc.

---

Silvia Maria Egues Dariva, D.Sc.

---

Isadora Monteiro Andrade Barreto, D.Sc.

---

Douglas Bressan Riffel, D.Sc.

ARACAJU, SE - BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

---

A658a Araujo, Marcos Elan Alves de  
Avaliação de rendimento térmico de um absorvedor utilizando o concentrador solar de foco fixo Scheffler com diferentes sistemas reflexivos / Marcos Elan Alves de Araujo ; orientação [de] Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Renan Tavares Figueiredo, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Odélsia Leonor Sánchez de Alsina – Aracaju: UNIT, 2018.

69 f.: il; 30 cm  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, 2018  
Inclui bibliografia.

1. Rendimento térmico. 2. Concentração Scheffler. 3. Energia solar. I. Araujo, Marcos Elan Alves de. II. Figueiredo, Renan Tavares. (orient.). III. Alsina, Odélsia Leonor Sánchez de (co-orient.). IV. Universidade Tiradentes. V. Título.

CDU:620.92:523.9

---

SIB- Sistema Integrado de Bibliotecas

Aos meus pais  
Aos meus irmãos e sobrinhos

## *Agradecimentos*

Durante o longo e árduo período, onde grandes acontecimentos e realizações me proporcionam novas descobertas, vários fatos resplandeceram no meu cotidiano.

Diante disso, um dos mais importantes, venho enfatizar as congratulações, dedicando esta dissertação a pessoas e instituições, onde, de uma maneira ou de outra, ajudaram-me a chegar ao cume.

Dentre os demais não poderia deixar de enaltecer: Deus; meus pais, Manoel e Marluce; meus Irmãos, Marly e Júnior, meus sobrinhos, Ellen e Gabriel; e, por fim, os professores orientadores Renan Tavares Figueiredo e Odélsia Leonor Sánchez de Alsina.

Resumo do Seminário apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos da Universidade Tiradentes como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos.

## **AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO TÉRMICO DE UM ABSORVEDOR UTILIZANDO O CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIXO SCHEFFLER COM DIFERENTES SISTEMAS REFLEXIVOS**

Marcos Elan Alves de Araújo

A energia solar, um importante recurso de energia renovável, é de natureza intermitente e sua utilização efetiva depende, em parte, de sistemas de armazenamento de energia eficientes e eficazes. A região Nordeste apresenta uma média anual de radiação solar global de 5,9 kW.h.m<sup>-2</sup>, que é a maior do Brasil, seguida da região Centro-Oeste, Sudeste, Norte e Sul. A cidade de Aracaju possui elevado potencial solar devido sua posição geográfica (latitude = 10° 54' 40" Sul, longitude = 37° 04' 18" Oeste, altitude = 4 metros e área total de 181,8 km<sup>2</sup>), e clima que fornece todas as condições para o desenvolvimento da energia solar. Esta pesquisa realizou a avaliação de rendimento térmico de uma absorvedor, utilizando-se fluido térmico para armazenamento de energia a partir do uso de concentrador de foco fixo Scheffler, e dois sistemas de revestimento da área total refletiva com os materiais espelho de vidro comum e filme reflexivo de poliéster, com refletâncias de 95,5 % e 79,0 %, respectivamente. A utilização dos materiais, fluido térmico no absorvedor e o filme de poliéster no concentrado solar propicia a inovação deste trabalho de pesquisa. Os experimentos foram realizados entre os meses de outubro e novembro de 2017, totalizando doze diárias de aferições. Sendo que nos seis primeiros dias utilizou-se, na área reflexiva do concentrador, o filme reflexivo de poliéster, e nos seis últimos dias, o espelho de vidro. Houveram ocorrências no início do dia, manhãs nubladas e com nuvens densas, e ao longo do dia tornavam-se nuvens espças, mas registrou-se uma temperatura máxima de 149,60 °C do fluído térmico no absorvedor e rendimento térmico médio de 35,64 %.

Palavras-chave: Rendimento térmico, concentrador Scheffler, Energia solar.

Abstract of Dissertation presented to the Process Engineering Graduate Program of Tiradentes University as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THERMAL PERFORMANCE EVALUATION OF AN ABSORBER USING SCHEFFLER  
FIXED FOCUS SOLAR CONCENTRATOR WITH DIFFERENT REFLECTIVE  
SYSTEMS

Marcos Elan Alves de Araújo

Solar energy, an important renewable energy resource, is intermittent in nature and its effective use depends on efficient and effective energy storage system. The Northeast region presents an annual average global solar radiation of 5,9 kW.h.m<sup>-2</sup>, which is the largest in Brazil, followed by Central-West region, Southeast, North and South. The city of Aracaju has a high solar potential due to its geographical position (latitude = 10° 54 '40 "South, longitude = 37° 04' 18" West, altitude of 4 meters and total area of 181,8 km<sup>2</sup>) the conditions for the development of solar energy. This research aims the thermal yield evaluation of an absorber, using thermal fluid for energy storage from the use of a Scheffler fixed focus solar concentrator, using two systems of total reflective area coating with common glass mirror and reflective polyester film, with reflections of 95,5% and 79,0%, respectively. The experiments were carried out between October and November 2017, totaling twelve daily measurements. In the first six days the reflective film of polyester was used on the concentrator reflective area, and in the last six days the glass mirror. The maximum thermal fluid temperature of 149,60°C was obtained using glass mirror on the absorber and average thermal yield of 35,64%.

Keywords: Thermal efficiency, Scheffler concentrator, Solar energy

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.0 OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1 Objetivo Geral .....	17
2.2 Objetivos Específicos .....	17
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
3.1 Matriz Energética .....	19
3.1.1 Matriz Energética no Mundo .....	19
3.1.2 Matriz Energética no Brasil .....	20
3.2 Energia Solar .....	22
3.2.1 Energia Solar no Mundo .....	22
3.2.2 Energia Solar no Brasil .....	24
3.3 Conceitos Básicos da posição entre o Sol e a Terra .....	26
3.4 Concentradores Solares Tipo Scheffler .....	28
3.4.1 Concentradores Solares tipo Scheffler: cozinha solar comunitária .....	28
3.4.2 Concentradores Solares tipo Scheffler: sistema solar de cozimento com vapor .....	30
3.4.3 Concentradores Solares tipo Scheffler: sistema solar de geração de vapor para a esterilização de equipamentos hospitalares e lavanderia .....	32
3.5 Rendimento térmico e óptico com a utilização de concentrador de foco fixo Scheffler .....	33
3.6 Instrumentação para medição de Radiação .....	35
3.6.1 Piranômetro de termopilha .....	35
3.6.2 Pirheliômetro .....	36
3.6.3 Pirgeômetro .....	37
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>38</b>
4.1 Concentrador solar de foco fixo Scheffler .....	40
4.2 Absorvedor térmico .....	42
4.3 Rastreamento automatizado .....	44
4.4 Rendimento Térmico .....	45
4.4.1 Ângulo de declinação .....	46
4.4.2 Área de abertura do Concentradora .....	46
4.4.3 Fator de concentração .....	47

4.4.4 Energia óptica captada no concentrador.....	47
4.4.5 Rendimento óptico.....	48
4.4.6 Taxa de energia óptica que chega até o absorvedor .....	48
4.4.7 Perdas térmicas .....	48
4.4.8 Cálculo do calor útil .....	49
4.4.9 Rendimento térmico .....	50
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....</b>	<b>64</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>66</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz Energética Mundial, Key World Energy statistics 2015 (IEA, 2016).....	19
Figura 2: Os três países com maior emissão per capita de CO <sup>2</sup> (BEN, 2016).....	20
Figura 3: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (BEN, 2016). ....	21
Figura 4: Participação de renováveis na matriz energética (EPA, 2016). ....	21
Figura 5: Incidência de irradiação solar no mundo (EPE, 2016).....	22
Figura 6: Geração Solar por País (EPE, 2016). ....	23
Figura 7: Capacidade Instalada e Fator de Capacidade, no Mundo (EPE, 2016).....	23
Figura 8: Radiação solar direta normal no Brasil (NREL, 2006). ....	24
Figura 9: Mapas com médias anual e sazonais do total diário de irradiação solar global no Brasil (ATLAS, 2016).....	25
Figura 10: A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia. O Sol está posicionado sobre a linha dos Trópicos de Câncer e de Capricórnio nos dias de solstício e posicionado sobre o Equador nos equinócios (Adaptado de: ATLAS,2016).....	27
Figura 11: Ângulos notáveis em solarimetria. Amplitude de valores do ângulo de declinação (Adaptado de: ATLAS, 2016). ....	27
Figura 12: Formulação matemática do concentrador Scheffler (BORNES, 2005). ....	28
Figura 13: Concentradores Solar tipo Scheffler de 7,5m <sup>2</sup> na cozinha do Instituto de Desenvolvimento Barli (Índia) para Mulheres Rurais, que cozinham para 60-80 pessoas diariamente (PAHISSA, 2014). ....	29
Figura 14: Operação esquemática de cozimento usando o Concentrador Solar tipo Scheffler (BORNES, 2005).....	30
Figura 15: 14 módulos de Concentrador solar tipo Scheffler instalados em Taleti-Índia. Demonstração de concentradores em diferentes alturas, receptor e tubo principal onde o vapor é gerado (PAHISSA, 2014). ....	31
Figura 16: Instalação do módulo com 10 concentradores no Hospital Global, em Mount Abu. São observados concentradores em alturas diferentes, os receptores e o tanque principal, onde o vapor é armazenado (PAHISSA, 2014).....	32
Figura 17: Absorvedor com volume de 11 litros e visor solar com diâmetro de 30 cm (PAHISSA, 2014). ....	33
Figura 18: Concentrador foco fixo do tipo Scheffler utilizados nos experimentos em Nagar na Índia , para lavagem a seco de roupas da comunidade (BHASME, 2015).....	34

Figura 19: Representação gráfica e imagem de um piranômetro de termopilha (PEREIRA et al, 2017).....	36
Figura 20: Representação gráfica e imagem de um Pirheliômetro (PEREIRA et al, 2017).....	37
Figura 21: Pirgeômetro - The Eppley laboratory, INC, modelo sNIP – USA (EPLAB, 2017). .....	37
Figura 22: Fluxograma do processo de geração de calor via sistema híbrido solar/gás para aquecimento de forno de casa de farinha (SANTOS, 2015). ....	38
Figura 23: Concentrador de foco fixo Scheffler com a área total reflexiva revestida com EV durante experimento (AUTOR, 2017).....	41
Figura 24: Concentrador solar com refletor em fibra de vidro sem revestimento FRP (AUTOR, 2017).....	41
Figura 25: Área total reflexiva do concentrador de foco fixo Scheffler revestida com FRP (AUTOR, 2017).....	41
Figura 26: Forno absorvedor (AUTOR, 2017).....	42
Figura 27: Instrumentos do absorvedor: (a) manômetro, (b) termômetro, (c) válvula de segurança que está conectada ao sistema para armazenamento da purga (d) e (e) conexões e termopares (AUTOR, 2017).....	43
Figura 28: Corte longitudinal esquemático do absorvedor (AUTOR, 2017). ....	43
Figura 29: Caixa blindada para armazenamento do Arduino Uno utilizado para o rastreamento solar: (a) micro controlador ATmega328; (b) botão tipo push button responsável pela movimentação do concentrador no sentido horário (c) botão tipo push button responsáveis pela movimentação do concentrador no sentido anti-horário (AUTOR, 2017).....	45
Figura 30: Sistema de rastreamento localização na base do concentrador: (a) Caixa blindada com o micro controlador, Arduino UNO; (b) Motor elétrico de corrente contínua; e (c) Interruptor de 1 seção para energizar o sistema (liga/desliga) (AUTOR, 2017).....	45
Figura 31: Radiação solar diária nos dias de experimento entre 09 a 25 de outubro de 2017 (INMET, 2017).....	51
Figura 32: Radiação solar diária nos dias de experimento entre 27 de outubro a 14 de novembro de 2017 (AUTOR, 2017).....	51
Figura 33: Temperatura do fluido no absorvedor com a utilização de FRP entre 09 de outubro a 25 de outubro de 2017 (AUTOR, 2017).....	52
Figura 34: Temperatura do fluido no absorvedor com a utilização de EV entre 27 de outubro a 14 de novembro de 2017 (AUTOR, 2017).....	53
Figura 35: Temperaturas máximas e médias do fluido no absorvedor verso a radiação solar, utilizando FRP no período de 09 a 25 de outubro de 2017 (AUTOR, 2017).....	55

Figura 36: Temperaturas máximas e médias do fluido no absorvedor verso a radiação solar, utilizando EV no período de 27 de outubro a 14 de novembro de 2017 (AUTOR, 2017).....	55
Figura 37: Dados experimentais em 27/02/2018: Radiação solar direta, temperatura do fluido térmico no absorvedor e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar no absorvedor versus hora local (AUTOR, 2018).....	57
Figura 38: Dados experimentais em 06/03/2018: Radiação solar direta, temperatura do fluido térmico no absorvedor e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar no absorvedor versus hora local (AUTOR, 2018).....	58
Figura 39: Dados experimentais em 07/03/2018: Radiação solar direta, temperatura do fluido térmico no absorvedor e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar no absorvedor versus hora local (AUTOR, 2018).....	58
Figura 40: Gráfico adaptado de Bhasme (2015) de radiação solar direta versus temperatura do fluido água usado no absorvedor no período de 11h:00 as 11h40 em maio de 2015 em Nagar na Índia, (AUTOR, 2018). ....	60
Figura 41: Radiação solar direta versus temperatura do fluido térmico usado no absorvedor térmico no período de 11h:00 as 11h40 em 27/02/2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018). ....	60
Figura 42: Radiação solar direta versus temperatura do fluido térmico usado no absorvedor térmico no período de 11h:00 as 11h40 em 06/03/2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018). ....	61
Figura 43: Radiação solar direta versus temperatura do fluido térmico usado no absorvedor térmico no período de 11h:00 as 11h40 em 07/03/2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018). ....	61
Figura 44: Eficiência térmica (%) versus a razão da variação temperatura do fluido térmico e ambiente e radiação ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ), e rendimento óptico do concentrador solar (%), utilizando EV em 07/03/2018 (AUTOR, 2018). ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dias dos experimentos, da primeira etapa, com utilização de sistemas de revestimento reflexivo de dois tipos no concentrador solar: filme reflexivo de poliéster e espelhos de vidro (AUTOR, 2017).....	39
Tabela 2: Dias dos experimentos, da segunda etapa, com utilização de sistemas de revestimento reflexivo no concentrador solar de espelhos de vidro (AUTOR, 2017).....	40
Tabela 3: Resultados do rendimento térmico do absorvedor no período das 10 h às 16 h utilizando concentrador com revestimento de FRP (AUTOR, 2017) .....	54
Tabela 4: Resultados do rendimento térmico do absorvedor no período das 10 h às 16 h utilizando concentrador com revestimento de EV (AUTOR, 2017). .....	54
Tabela 5: Comparativo das características dos protótipos absorvedor térmico e concentrador solar de foco fixo Scheffler (AUTOR, 2018). .....	57
Tabela 6: Dados de temperatura dos fluidos nos absorvedores e de radiações dos experimentos de Bhasme e deste trabalho (AUTOR, 2018) .....	59
Tabela 7: Comparativo dos resultados dos rendimentos ópticos dos concentradores solares e térmico do absorvedores no período de 10h:00 as 14h00 no mês de maio de 2015 em Nagar na Índia (Bhasme, 2015) e no meses de fevereiro e março de 2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018).....	62

# Capítulo 1

## 1. INTRODUÇÃO

No mundo, do seu recurso energético disponível, as fontes primárias não renováveis, a exemplo do petróleo e carvão, são as utilizadas em maior percentual na atualidade. Em especial destacam-se os combustíveis fósseis, que resulta na emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, um dos gases relacionados com o efeito estufa, causador de elevação da temperatura do planeta, de mudanças climáticas e de degradação do meio ambiente (MACKAY, 2015).

Em países mais pobres em desenvolvimento, grande parte da energia para a agricultura, transporte e atividades domésticas vem do esforço braçal e de animais utilizados para transporte de carga. Outras fontes incluem a biomassa na forma de lenha, excrementos de animais de carga. A lenha, de fato é a fonte de energia dominante nas áreas rurais. (GOLDEMBERG, 2011)

No nordeste Brasileiro, em especial no estado de Sergipe, as casas de farinha de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) tradicionais, utilizam-se como principal e única fonte de geração de calor a lenha. E a utilização dessa fonte de energia corrobora para o desmatamento, ou seja, alguns produtores retiram árvores de áreas não permitidas, emite gases poluentes para o meio ambiente e contribui para a ocorrência de doenças ocupacionais (GOLDEMBERG, 2011).

Por esta razão, sustentado em premissas econômicas e ecológicas é pertinente pesquisar e desenvolver fontes de energia alternativas e essencialmente renováveis para substituir o processo da produção de farinha de mandioca, atualmente danoso ao meio ambiente. Portanto, propõe-se neste trabalho o cálculo de rendimento térmico de um absorvedor utilizando fluido térmico e um concentrador solar de foco fixo Scheffler, que são dois equipamentos componentes de um sistema experimental denominado “sistema de aquecimento híbrido solar/gás para forno de casa de farinha”, utilizando a energia solar como principal fonte energética do sistema, em substituição da lenha, que predomina, atualmente nas comunidades, como única fonte de energia de aquecimento do forno, torrefação e produção da farinha de mandioca.

E para exemplificar a enorme potencialidade de desta fonte, em uma hora, é alcançada a superfície terrestre uma radiação solar suficiente para suprir uma significativa necessidade de energia do mundo (MACKAY, 2015).

Além disso, o Brasil, em especial no nordeste brasileiro, é potencialmente propício para a utilização de energia solar com valores de radiação média acima de 3.000 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Além disso, a energia termo solar, em pleno desenvolvimento, apresenta vantagens de baixo custo de construção dos equipamentos, pois, se utiliza de materiais acessíveis e custo de aquisição baixo e fonte de energia gratuita, o sol. E acerca dessa gratuidade torna a energia termo solar um destaque, e pertinente o desenvolvimento de projetos amplos para produção em grande escala (BEN, 2016).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) a produção de casas de farinha no estado de Sergipe, em 2016, envolve aproximadamente noventa mil famílias e uma produção da mandioca de aproximadamente 279 mil toneladas.

A estrutura desta dissertação está dividida em seis capítulos e com as seguintes abordagens:

No capítulo primeiro são referenciadas as considerações iniciais, identificando as problemáticas e delimitação do tema no âmbito socioeconômico e ambiental, acerca das fontes de energia alternativas pertinentes a avaliação do aproveitamento térmico de um absorvedor térmico e um concentrador solar foco fixo aplicado a um sistema de processamento de farinha de mandioca em uma casa de farinha híbrida.

No segundo capítulo são apresentados os objetivos geral e específicos.

No terceiro capítulo é abordado uma revisão bibliográfica dos principais assuntos pertinentes ao tema como: matrizes energéticas no mundo e no Brasil; concentradores solares tipo Scheffler de foco fixo utilizados em cozinha solar comunitária, sistema solar com geração de vapor para cozimento de alimentos, esterilização de equipamentos hospitalares e lavanderia; rendimento térmico e óptico com a utilização concentrador de foco fixo Scheffler, sistema de rastreamento solar; e instrumentação para medição de radiação.

No capítulo quarto são descritos os materiais e métodos utilizados nos experimentos para avaliação de rendimento térmico do absorvedor e do concentrador solar de foco fixo Scheffler com diferentes sistemas reflexivos, com o uso de espelhos de vidro e uma proposta de inovação com a construção de nova área reflexiva do concentrador solar, utilizando-se de fibra de vidro revestida com filme de poliéster de alta reflexibilidade.

No quinto capítulo destinado aos resultados e discursões onde são apresentados as análises iniciais e os resultados obtidos nos experimentos.

No capítulo seguinte, o sexto, são abordadas as conclusões com base nos dados alcançados nos experimentos.

E por fim, no sétimo capítulo são descritas as referências bibliográficas estudadas e que nortearam a elaboração deste trabalho.

## 2.0 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar o rendimento térmico de um absorvedor utilizando um concentrador solar de foco fixo Scheffler com sistemas reflexivos de espelhos de vidro e película reflexiva de poliéster.

### 2.2 Objetivos Específicos

O plano de trabalho atenderá aos seguintes objetivos específicos:

(i), Revisão bibliográfica acerca: da matriz energética no mundo e no Brasil, energia solar, conceitos básicos da posição do Sol e a Terra, instrumentação para medição da radiação, concentrador solar de foco fixo Scheffler e rendimento térmico e óptico de absorvedor térmico e concentrador solar, respectivamente;

(ii), Projetar e construir um sistema de rastreamento solar automatizado para uso no concentrador;

(iii), Construir nova base, para a área reflexiva do concentrador solar, em fibra de vidro;

(iv), Revestir a nova base reflexiva do concentrador com filme reflexivo de poliéster;

(v), Monitorar e utilizar dados de temperatura ambiente e de radiação solar obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Estação Aracaju - A409 e radiação solar direta de pirheliômetro instalado no ITP/UNIT;

(vi) instalar e monitorar a radiação direta através de pirheliômetro no local dos experimentos no ITP/UNIT;

(vii), Monitorar as temperaturas envolvidas no processo de aquecimento do fluido térmico no absorvedor térmico;

(viii), Utilizar microcontroladores para automatizar o rastreamento solar do concentrador;

(ix), Realizar experimentos, em primeira etapa, utilizando os sistemas de reflexão do concentrador solar com vidro de espelho e com filme reflexivo de poliéster sem objetivar comparativos, apenas verificar o comportamento dos dois materiais;

(x), Realizar experimentos, numa segunda etapa, com o revestimento reflexivo com melhor desempenho apresentado na primeira etapa, utilizando dados de radiação direta utilizando pirheliômetro;

(xi), Comparar resultados de dados, utilizando o revestimento com melhor desempenho, com artigo científico publicado na literatura;

(xii), Validar os dados de rendimento térmico e óptico;

(xiii), Depositar patente do “sistema de aquecimento híbrido solar/gás para forno de casa de farinha”, que estes equipamentos fazem parte; e

(xiv) Divulgar a tecnologia proposta através de minicursos, participações em congressos e publicações de artigos científicos.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Matriz Energética

Matriz energética é toda energia disponibilizada para ser transformada, distribuída e consumida nos processos produtivos, é uma representação quantitativa da oferta de energia, ou seja, da quantidade de recursos energéticos oferecidos por um país ou por uma região (BEN,2016).

Podem ser compostos de fontes energéticas renováveis e não renováveis. Como principais exemplos podem ser citados como renováveis: solar, eólica, hidroelétrica, biomassa, lixo, marés, geotérmicas e nuclear. E como não renováveis petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e urânio.

#### 3.1.1 Matriz Energética no Mundo

No mundo utiliza-se, em maior percentual, do seu recurso energético, as fontes energéticas primárias não renováveis, em especial, os combustíveis fósseis a exemplo do petróleo, carvão mineral e gás natural.

Segundo dados de 2015 publicados pela Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA) acerca das fontes energéticas mundial, apresentou a matriz energética mundial com os seguintes percentuais: 35,7 % de petróleo e derivados; 25,6 % gás natural; carvão 19,3 %; nuclear 9,9 %; 5,5 % biocombustíveis; 2,3 % hidroelétricas e 1,7 % outras fontes. Representado na Figura 1.

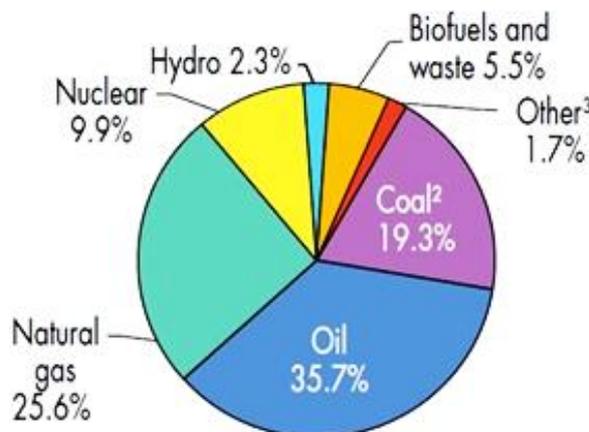


Figura 1: Matriz Energética Mundial, Key World Energy statistics 2015 (IEA, 2016).

Mas, os combustíveis fósseis são grandes emissores de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um dos gases relacionados com o efeito estufa, causador de elevação da temperatura do planeta e de mudanças climáticas. A Figura 2 representa os três países com maiores emissões de CO<sub>2</sub> per capita e o comparativo com a emissão per capita brasileira em 2015.

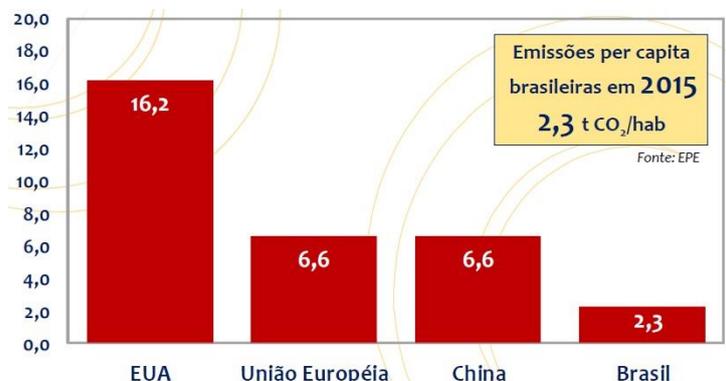


Figura 2: Os três países com maior emissão per capita de CO<sub>2</sub> (BEN, 2016).

O uso de energia numa sociedade é essencialmente distinto entre a elite e os pobres. Pois, a elite tenta imitar os estilos de vida prevaletentes nos países industrializados e tem padrões similares de energia, orientados para o luxo. Antagonicamente os pobres estão mais preocupados em obter energia suficiente para cozinhar e para outras atividades essenciais, ou seja, satisfazer necessidades humanas básicas, incluindo acesso a emprego, alimentação, serviço de saúde, educação, moradia entre outras. (GOLDEMBERG, 2011).

### 3.1.2 Matriz Energética no Brasil

A oferta de energia elétrica tem-se tornado fator indispensável ao bem-estar social e ao crescimento econômico do Brasil. Contudo, é ainda muito deficitário em várias regiões, seja pela falta de acesso ou pela precariedade do atendimento. A grande extensão do território nacional, a distribuição geográfica dos recursos e as peculiaridades regionais são importantes desafios ao planejamento da oferta e gerenciamento da demanda (BEN, 2016).

Em 2015, a oferta interna de energia, total disponibilizada no país, atingiu 299,2 mega toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), registrando uma redução de 2,1 % em relação ao ano de 2014. Parte desta queda foi influenciada pelo comportamento da oferta interna de petróleo e derivados, que retraiu 7,2 % no período, em consequência do superávit nos fluxos de exportação e importação destas fontes energéticas. Contribuiu ainda para a queda da oferta interna bruta o enfraquecimento da atividade econômica em 2015, ano em que o Produto Interno

Bruto ( PIB) nacional contraiu 3,8 %, segundo o último dado divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (BEN, 2016).

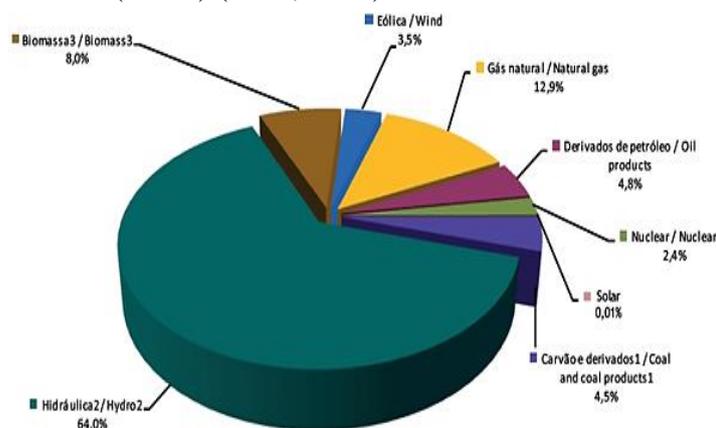


Figura 3: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte (BEN, 2016).

No caso da energia elétrica verificou-se também um recuo na oferta interna de 8,4 TWh, 1,3 % em relação a 2014. Pelo quarto ano consecutivo, devido às condições hidrológicas desfavoráveis, houve redução da energia hidráulica disponibilizada. Em 2015 o decréscimo foi de 3,2 % comparado ao ano anterior. Apesar da menor oferta hídrica, ocorreu um avanço da participação de renováveis na matriz elétrica de 74,6 % para 75,5 %, explicado pela queda da geração térmica a base de derivados de petróleo e ao incremento da geração a base de biomassa e eólica (BEN, 2016).

Dados significativos ocorreram em 2015, acerca da participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira, pois, manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequeno crescimento devido, à queda da oferta interna do petróleo e dos derivados resultando em 7,2 %, conforme indicado na Figura 4 (BEN, 2016).

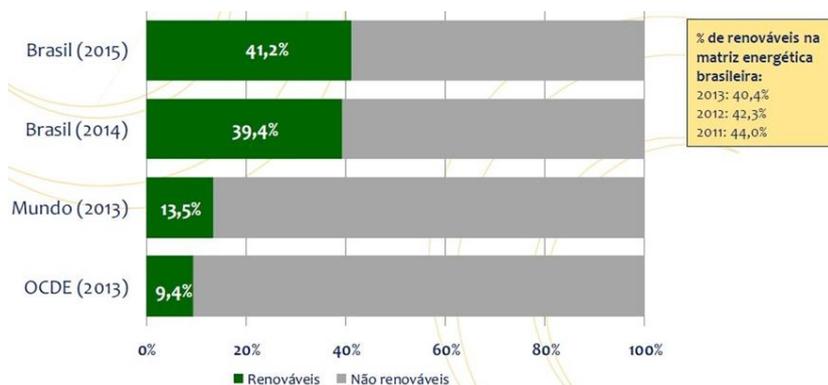


Figura 4: Participação de renováveis na matriz energética (EPA, 2016).

Grande parte da energia para a agricultura, transporte e atividades domésticas nos países mais pobres em desenvolvimento vem do esforço braçal e de animais utilizados para transporte

de carga. Outras fontes incluem a biomassa na forma de lenha e os resíduos de animais de carga. A lenha, de fato é a fonte de energia dominante nas áreas rurais. Ainda a energia é consumida por diferentes classes de renda no Brasil. Para famílias com renda superior a dez salários mínimos, os derivados do petróleo incluindo gás liquefeito de petróleo (GLP) representam 65 % da energia total consumida enquanto que para famílias entre zero e dois salários representam 35 %. Por outro lado, famílias de alta renda, lenha e carvão vegetal representam 8 % enquanto para famílias pobres eles representam 40 % (GOLDEMBERG, 2011).

## 3.2 Energia Solar

### 3.2.1 Energia Solar no Mundo

No contexto mundial, muitos países apresentam potenciais propícios para a utilização de energia solar, e além disso, há no mundo regiões com valores acima de 3.000 kWh/m<sup>2</sup>/ano, como Austrália, norte e sul da África, Oriente Médio, parte da Ásia Central, parte da Índia, sudoeste dos Estados Unidos, além de México, Chile e Peru. A Figura 5 representa a incidência de irradiação solar no mundo (EPE, 2016).

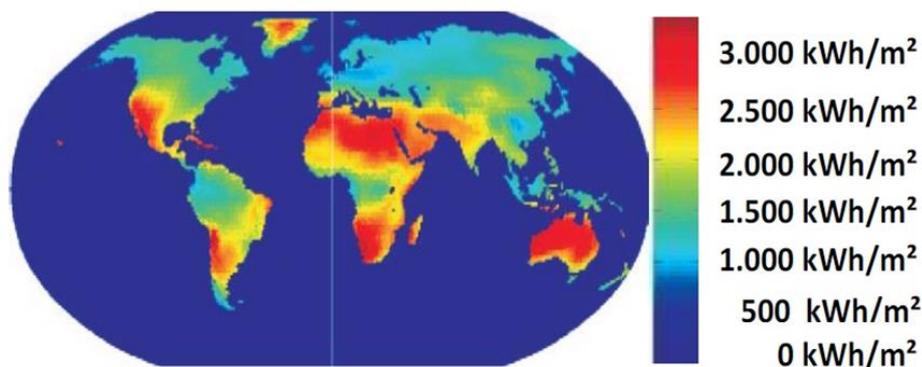


Figura 5: Incidência de irradiação solar no mundo (EPE, 2016).

Em 2015, o mundo contava com uma potência instalada solar de 234 GW, sendo 229 GW de geração fotovoltaica e 5 GW utilizando da tecnologia Concentrating Solar Power (CSP), que consiste em concentrar a luz solar em um receptor. A geração total foi de 253 TWh, resultando num fator de capacidade médio de 13,9 % (EPE, 2016).

A Itália apresentou o maior percentual de geração solar em relação à sua geração total, de 9,3 %, seguida da Grécia com 7,8 %. A Espanha fica com o maior fator de capacidade, de 29,3 %, em razão da presença de mais de 40 % de potência instalada de CSP, boa parte com estoque de calor entre 7 e 8 horas, para gerar nos períodos sem sol. Os cinco primeiros países

em potência instalada respondem por 68 % do total mundial. Em 2015, a China e os Estados Unidos, ocupam a primeira e segunda colocação, respectivamente, onde superaram a Alemanha na geração. Em 2018, o Brasil deverá estar entre os 20 países maiores geradores de energia solar, ao se considerar a operação da potência já contratada, de 2,6 GW. Em termos de área geográfica, os 234 GW de 2015, correspondem a 1.635 km<sup>2</sup> de painéis solares, ou um quadrado de 40,4 km de lado, considerando 143 W/m<sup>2</sup> e eficiência de 15 % de absorção solar (EPE,2016).

O desenvolvimento tecnológico, o aumento do porte das instalações, e a expansão da CSP nos últimos anos, vêm proporcionando aumentos no fator de capacidade médio da geração solar mundial, chegando perto de 14 %, Figuras 6 e 7.

**Geração Solar por País (%)**

nº	País	1990	2000	2010	2013	2014	2015
1	China	0,5	2,0	2,1	10,9	12,1	15,5
2	Estados Unidos	95,9	47,6	9,0	11,2	14,4	15,4
3	Alemanha	0,3	5,5	35,2	21,7	18,9	15,2
4	Japão	0,3	26,0	9,8	7,5	10,2	12,2
5	Itália	1,0	1,7	5,7	15,1	11,7	10,0
6	Espanha	1,5	1,6	21,3	8,9	7,2	5,5
7	Reino Unido	-	0,1	0,1	1,4	2,1	3,0
8	França	-	0,5	1,9	3,3	3,1	2,9
9	Índia	-	0,6	0,8	2,0	2,3	2,6
10	Austrália	-	4,3	2,9	2,7	2,6	2,4
11	Coréia do Sul	-	0,5	2,3	1,1	1,3	1,5
12	Grécia	-	-	0,5	2,6	2,0	1,4
13	Bélgica	-	-	1,7	1,9	1,5	1,2
14	Canadá	-	1,5	0,7	0,9	1,0	1,0
15	Tailândia	-	-	0,1	0,8	1,0	1,0
	Outros	0,5	8,2	5,9	8,1	8,6	9,2
	Mundo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Mundo (TWh)	0,4	1,1	33,3	142,6	190,8	253,0
	%/total *	0,003	0,007	0,16	0,6	0,8	1,0

\* % sobre a geração mundial de energia elétrica

Figura 6: Geração Solar por País (EPE, 2016).

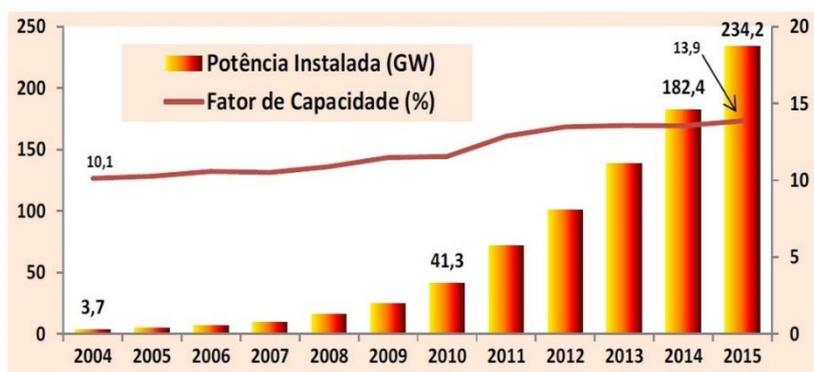


Figura 7: Capacidade Instalada e Fator de Capacidade, no Mundo (EPE, 2016).

A tecnologia CSP consiste em concentrar a luz solar em um receptor, que recolhe e transfere a energia solar para um fluido de transferência de calor, que pode ser usado para fornecer calor para aplicações de uso final, ou para gerar eletricidade em motores térmicos, ou via turbinas a vapor convencionais (EPE, 2016).

As grandes instalações de CSP podem contar com sistemas de armazenamento de calor, para permitir fornecimento de calor ou de eletricidade durante a noite, ou quando o céu estiver

nublado. A tecnologia CSP inclui quatro tipos: Scheffler, calha parabólica, refletor Fresnel, torre solar e disco solar. Enquanto as plantas parabólicas e Fresnel concentram os raios do sol em uma linha focal e atingem temperaturas operacionais entre 300 °C e 550 °C, as plantas torre e disco concentram a luz do sol em um único ponto focal, e atingem temperaturas mais altas. Os espelhos refletores podem ser móveis ou fixos, e em conjunto ou não com os pontos focais (EPE, 2016).

Em um cenário moderado, da Agência Internacional de Energia (IEA), a energia solar poderia responder por cerca de 11 % da oferta mundial de energia elétrica em 2050, algo próximo de 5.000 TWh. A área coberta pelas instalações seria de 8.000 km<sup>2</sup> e 300 W/m.

### 3.2.2 Energia Solar no Brasil

O potencial brasileiro para energia solar é enorme. A Região Nordeste apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com a maior média e a menor variabilidade anual entre todas as regiões geográficas. Os valores máximos de irradiação solar no país são observados na região central da Bahia com valores acima de 6,5 kWh.m<sup>2</sup>/dia, incluindo, parcialmente, o noroeste de Minas Gerais. Há, durante todo o ano, condições climáticas que conferem um regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar para essa região semiárida. A irradiação média anual brasileira varia entre 1.200,0 e 2.400,0 kWh/m<sup>2</sup>/ano, bem acima da média da Europa (EPE, 2016). A Figura 8 representa a radiação direta no Brasil e a Figura 9 da média anual e sazonais do total diário.

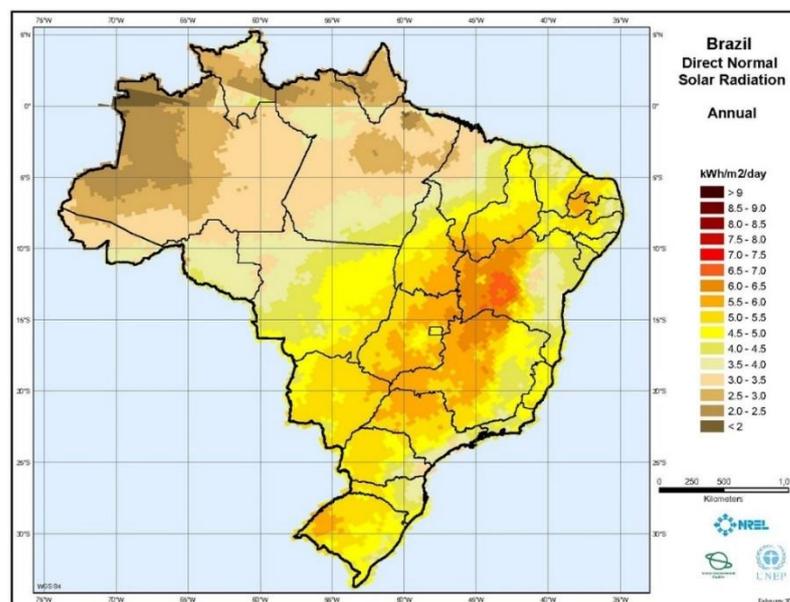


Figura 8: Radiação solar direta normal no Brasil (NREL, 2006).

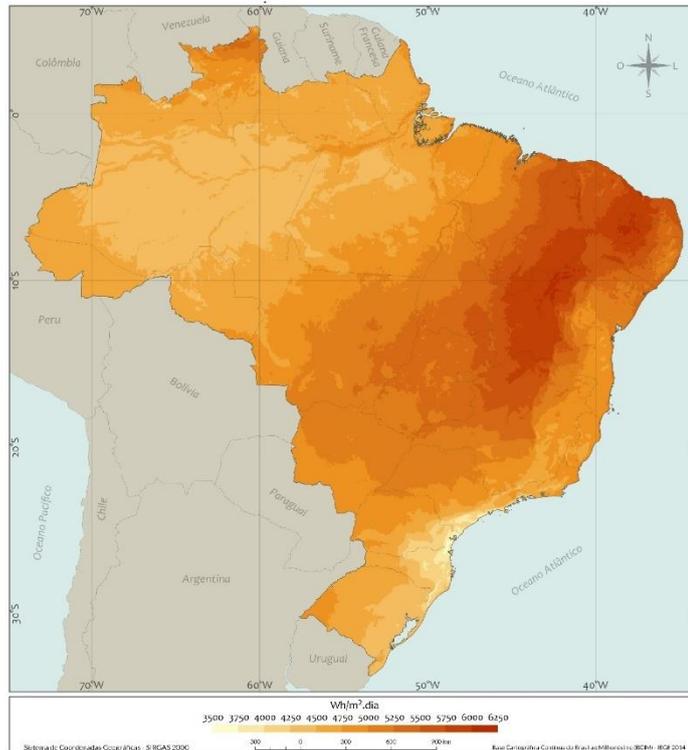


Figura 9: Mapas com médias anual e sazonais do total diário de irradiação solar global no Brasil (ATLAS, 2016).

### *Tipos de Aproveitamentos*

Os processos mais usuais de aproveitamento da luz solar para geração de eletricidade e de calor, são: o aproveitamento fotovoltaico (FV), que converte a luz do sol em energia elétrica; o aproveitamento da luz solar por concentração (CSP - Concentrating Solar Power), que produz calor para uso direto ou geração de energia elétrica e; o aproveitamento por meio de coletores, que realizam o aquecimento direto da água, fluido térmicos e ou de ambientes a partir da luz do sol.

No caso da conversão fotovoltaica da luz solar, pode ser aplicada em pequenos sistemas autônomos, em geral geração distribuída - GD, e em grandes centrais, que empregam energia solar, de modo centralizado. O aproveitamento por concentração (CSP) é mais apropriado para absorvedores solares e ou grandes centrais.

### *Principais Incentivos no Brasil*

No Brasil, atualmente, está em vigor políticas de incentivo a geração de energia elétrica por fontes renováveis. O Ministério de Minas e Energia lançou, em 15/12/2015, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), com o objetivo de

aprofundar as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores (residencial, comercial, indústria e agropecuária), com base em fontes renováveis, em especial, a solar. (EPE, 2016)

Além disso, podem ser citados as Isenções de como IPI e ICMS para as operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica, válido até 31/12/2021, e o apoio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) regido pela Lei 13.203, de 8/12/2015, que autorizada a financiar, com taxas diferenciadas, os projetos de geração distribuída em hospitais e escolas públicas. (EPE, 2016)

### *Expansão da Energia Solar no Brasil*

O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2024, estima que a capacidade instalada de geração solar chegue a 8.300 MW em 2024, sendo 7.000 MW de geração centralizada e 1.300 MW de geração distribuída. A proporção da geração solar chegará a 1% do total. Em razão do forte crescimento das instalações distribuídas, o atual ciclo do PDE 2025 amplia as metas para esta modalidade, podendo passar de 5.000 MW ao final do período do estudo. Os estudos do Plano Nacional de Energia – PNE 2050, em elaboração pela Empresa de Pesquisa Energética, estimam que 18% dos domicílios de 2050 contarão com geração fotovoltaica (13% do consumo residencial). No aquecimento de água, a previsão é que 20% dos domicílios detenham coletores (EPE, 2016).

### **3.3 Conceitos Básicos da posição entre o Sol e a Terra**

O armazenamento de energia térmica é talvez tão antigo quanto a própria civilização. Várias técnicas de armazenamento de energia térmica foram desenvolvidas nas últimas quatro a cinco décadas (REGIN, 2018).

Mas, a energia solar pode se caracterizar como fontes intermitentes de energia devido à variabilidade temporal elevada associada às condições meteorológicas (MACKAY, 2015). Pois, a duração do dia e a quantidade de energia solar incidente em um ponto qualquer da superfície terrestre apresenta variabilidade temporal característica de dois ciclos: o ciclo anual e o ciclo diário. O ciclo anual ocorre como consequência da inclinação em 23,45° do eixo axial da Terra com relação ao plano orbital do planeta em torno do Sol (CASINIÈRE, 2008; PEREIRA, 2017).

A duração do dia varia ao longo do ano para diferentes latitudes, e está intrinsecamente relacionada com as estações do ano. As estações são determinadas pelos solstícios - quando o sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador - e os equinócios - quando o Sol, em sua órbita aparente, cruza o Equador terrestre. Equinócio é denominação dos dois dias do ano em que a duração do dia é igual à duração da noite em ambos os hemisférios: 21 de março e 22 de setembro (CASINIÈRE, 2008; PEREIRA, 2017). Conforme demonstrado na figura 10.



Figura 10: A geometria Sol-Terra determina as estações do ano e a duração do dia. O Sol está posicionado sobre a linha dos Trópicos de Câncer e de Capricórnio nos dias de solstício e posicionado sobre o Equador nos equinócios (Adaptado de: ATLAS,2016).

Assim, o conhecimento de dois ângulos notáveis em solarimetria são determinantes para o rastreamento solar e o cálculo da área de abertura do concentrador solar de foco fixo Scheffler ( $A_a$ ): o ângulo horário solar ( $\omega$ ), que corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ , onde a cada hora corresponde a  $15^\circ$  de variação do ângulo horário solar, que por convenção, pela manhã é positivo, a tarde é negativo e ao meio dia tem o valor zero; e a declinação solar ( $\delta$ ), que corresponde ao ângulo formado pela inclinação do plano equatorial da Terra e a linha de direção

Sol e Terra, e apresenta variação entre  $-23^\circ 27'$  e  $+23^\circ 27'$  ao longo do período de um ano (CASINIÈRE, 2008; MACKAY, 2015). Demonstrado na Figura 11.

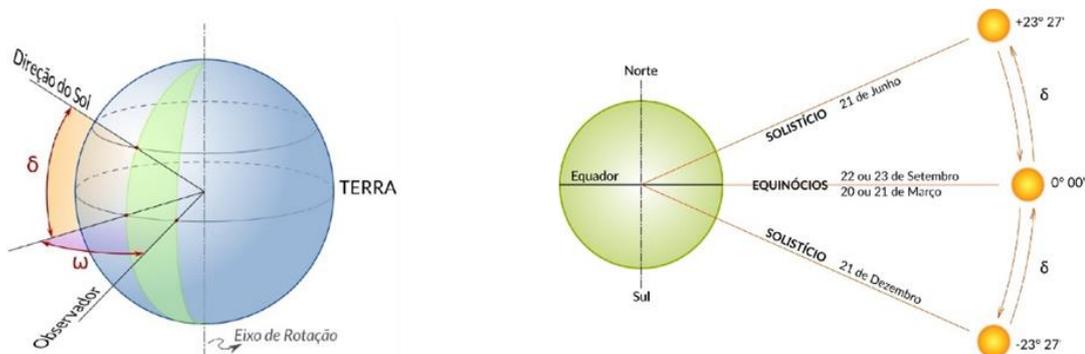


Figura 11: Ângulos notáveis em solarimetria. Amplitude de valores do ângulo de declinação (Adaptado de: ATLAS, 2016).

### 3.4 Concentradores Solares Tipo Scheffler

O Scheffler é um dos sistemas mais eficazes, que concentram a luz solar. Wolfgang Scheffler, o inventor deste sistema de concentração de luz solar, é um físico alemão que, através da associação *Solare Brücke*, ensina como construir este tipo de concentrador. Trata-se de um refletor parabólico excêntrico flexível feito de material refletor, o qual gira em torno de um eixo paralelo ao eixo da Terra e em sincronia com o sol. O refletor é uma secção lateral de um parabolóide maior de corte inclinada, o que dá a característica e único refletor elíptico Scheffler, como mostrado na Figura 12. A luz solar que se reflete faz sobre uma secção do parabolóide e projetados sobre um localizado a uma distância a partir do ponto refletor. Esta tecnologia impede que o objeto que está projetada calor concentrado de sombra na superfície, como acontece com os concentradores solares que utilizam toda a área da parábola. Portanto, se considera a seção do tipo parabolóide utilizado no concentrador de ponto fixo tipo Scheffler está fora do parabolóide e a seção extraída só deve ser girado 180 graus sobre seu eixo para atingir seu objetivo (BORNES, 2005).

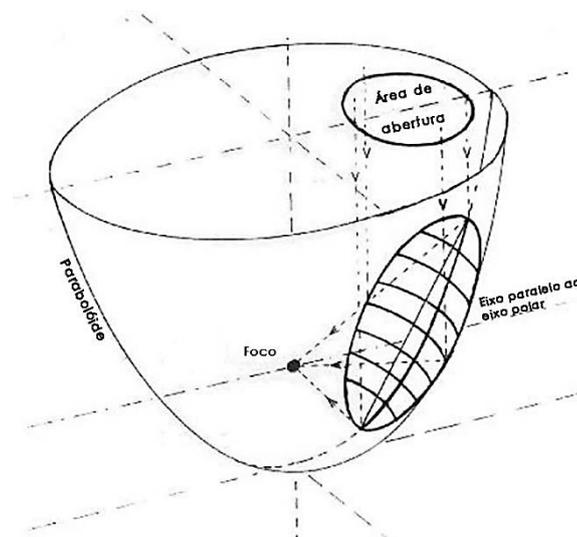


Figura 12: Formulação matemática do concentrador Scheffler (BORNES, 2005).

#### 3.4.1 Concentradores Solares tipo Scheffler: cozinha solar comunitária

O primeiro Concentrador solar tipo Scheffler para uma cozinha comunitária foi construído pelo Wolfgang Scheffler em 1986, em uma missão católica no norte do Quênia e ainda está em uso. Desde então, a tecnologia tem sofrido desenvolvimento contínuo e múltiplas aplicações, e para que o número de concentradores solares construídos e instalados aumentam de ano para ano (PAHISSA, 2014).

O objetivo que levou ao desenvolvimento dos concentradores solar de Scheffler, na Índia, era fazer o cozimento de alimentos de forma mais econômica possível e sem agressões ao meio ambiente. A ideia foi a construção de um Concentrador parabólico tipo Scheffler, na área externa da edificação, objetivando a captura da energia solar e concentrá-la em um determinado ponto ou foco fixo, bem como girar de forma sincronizada com o Sol. Ao mesmo tempo, pretendeu-se que esta ferramenta poderia ser feita em quaisquer materiais acessíveis em qualquer oficina rural de soldagem local no país. O material utilizado na estrutura foi de aço, perfis e tubulações, que poderiam ser adquiridos em qualquer lugar a um preço relativamente acessível. E para a superfície de reflexiva foi usado espelhos de vidro. Este tipo de fogão destinou-se a atender a grandes volumes de refeições produzidas em instituições nas comunidades. Após 19 anos de desenvolvimento de tecnologia, atualmente Scheffler refletor parabólico está sendo aplicada a instalações em todo o mundo que necessitam de energia térmica e quer usar energia solar, se salas amplas de refeições, secagem, sistemas de esterilização, calor ou vapor solar para lavanderia (PAHISSA, 2014). Representado na Figura 13.



Figura 13: Concentradores Solar tipo Scheffler de 7,5m<sup>2</sup> na cozinha do Instituto de Desenvolvimento Barli (Índia) para Mulheres Rurais, que cozinham para 60-80 pessoas diariamente (PAHISSA, 2014).

As vantagens com a utilização do uso de fogões solares com concentradores parabólicos tipo Scheffler são múltiplas como por exemplo: o uso de materiais de baixo custo, simples ferramentas e processos de trabalho, permitindo a execução de projetos de produção locais com pouco investimento de capital e benefícios a longo prazo. Além disso, um único concentrador tipo Scheffler permite o cozimento de alimentos para 40 pessoas. Possibilita também que a

cozção dos alimentos ocorra internamente na cozinha da edificação, pois, a luz solar concentrada a um absorvedor, no interior do edifício, abaixo da panela, e devido às altas temperaturas no ponto focal, a potência de aquecimento é mais elevada do que outros fogões solares. Possibilitando a cozção de refeições mais complexas e que necessitam de maiores temperaturas a exemplo de frituras, ao contrário de fogões solares de acumulação (PAHISSA, 2014).

O refletor parabólico Scheffler também dispõe um seguimento solar mecanizado realizada pela rotação do concentrador ao longo do caminho do sol, de modo que o cozinheiro só deve ajustar a posição do refletor pela manhã e deixá-lo ir automaticamente girando até o fim do dia. A Figura 14 representa operação esquemática de cozimento usando o Concentrador Solar.

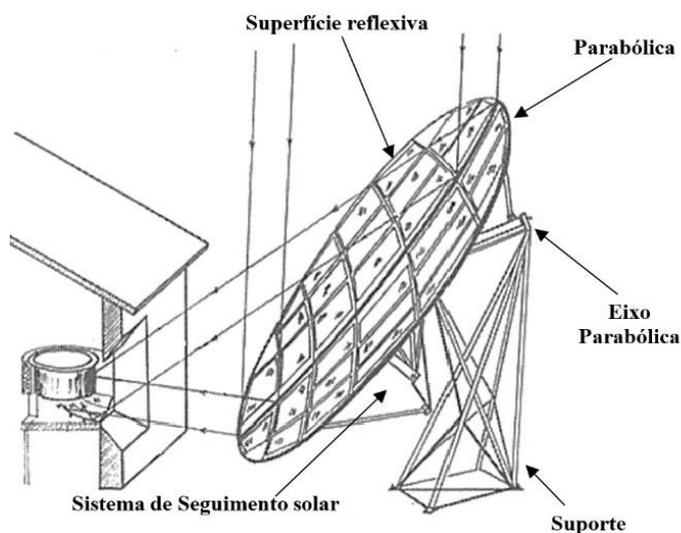


Figura 14: Operação esquemática de cozimento usando o Concentrador Solar tipo Scheffler (BORNES, 2005).

Dependendo da aplicação e dos requisitos de energia, o tamanho do concentrador Scheffler pode ser variado objetivando uma maior potência a exemplo das seguintes dimensões: 2,7 m<sup>2</sup>, 7,5 m<sup>2</sup>, e 9,6 m<sup>2</sup> 12,6 m<sup>2</sup>. Este último com um comprimento focal mais longo, para evitar problemas de sombra com as construções adjacentes (PAHISSA, 2014).

### 3.4.2 Concentradores Solares tipo Scheffler: sistema solar de cozimento com vapor

No Taleti Complexo Shantivan em Abu Road (Rajasthan, Índia) encontra-se a segunda maior cozinha solar do mundo, com sistema de cozção a vapor solar, e em funcionamento desde 1999. Possui 84 Concentradores Parabólicos tipo Scheffler divididos em 6 módulos com 14 concentradores cada. O vapor é gerado diretamente no tubo principal com diâmetro de 12

polegadas localizados acima dos absorvedores que são um total de 42. Cada absorvedor tem um volume de 11 litros, e metade desse volume é preenchido de água desmineralizada (PAHISSA, 2014). Identificadas na Figura 15.

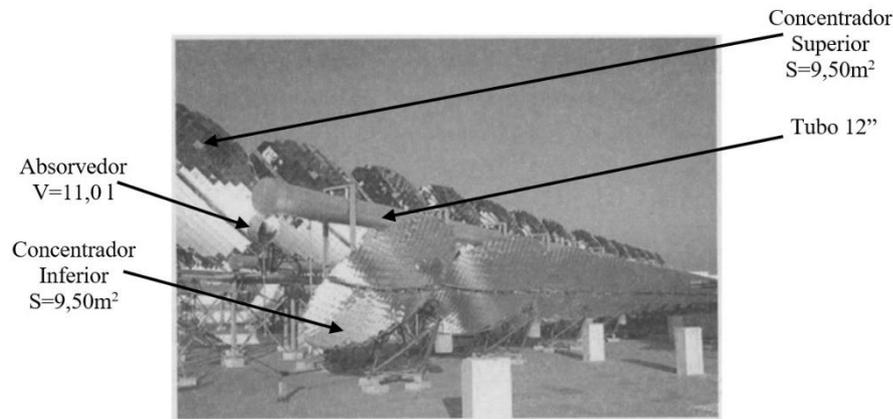


Figura 15: 14 módulos de Concentrador solar tipo Scheffler instalados em Taleti-Índia. Demonstração de concentradores em diferentes alturas, receptor e tubo principal onde o vapor é gerado (PAHISSA, 2014).

Cada absorvedor recebe dois focos distintos sendo um na região superior e outra na região inferior, e operação seguinte princípio termossifão, ou seja, através das correntes de convecção naturais dos fluidos, em que suas partes quentes tendem a subir, pois, tornam-se menos densas. De modo que nenhuma bomba de circulação é necessária. Todo o sistema é perfeitamente isolado para evitar a perda de calor. A estrutura dos concentradores é de aço e perfeitamente alinhados na orientação Leste e Oeste. O mecanismo de seguimento solar funciona através de um automatizado com sistemas de controle de seis temporizadores eletrônicos alimentados a energia fotovoltaica. Cada um concentrador parabólico tem uma superfície de  $9,5 \text{ m}^2$  e espelhos em vidro com uma reflexão de 94 %. Cada concentrador gera um máximo de  $4.000 \text{ kW}$  quando radiação solar é  $1.050 \text{ W/m}^2$ , e são alcançadas em foco temperaturas de  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  e em consequência a geração máxima de vapor de água é de  $3.800 \text{ kg}$  por dia, indicando uma eficiência do sistema de 45,0 %. Durante o primeiro ano de operação, com uma área de aproximadamente  $800 \text{ m}^2$  de concentradores, são produzidas até 38.500 refeições por dia com vapor produzido pela energia solar alimentando aproximadamente 10.000 pessoas diariamente (PAHISSA, 2014).

Em outubro de 2002, foi inaugurada a cozinha solar em Tirumala Tirupathi Devasthanam (TTD), (Andhra Pradesh, Índia), que é atualmente a maior do mundo com uma capacidade para preparar refeições para 15.000 pessoas por dia destinadas para a instituição Ashram alimentos. Possui um sistema composto por 106 concentradores do tipo Scheffler que

converte a água em vapor de baixa pressão, que é encaminhado para a cozinha, onde é usado diretamente para cocção dos alimentos.

O sistema foi concebido para gerar vapor 4.000 kg/dia a 180 °C e 10 Kg.cm<sup>2</sup>. Os 106 concentradores têm área reflexiva de 9,2 m<sup>2</sup> cada, estão dispostas em módulos, cada um deles ligado ao tubo central de vapor a cozinha da instituição. Todos os materiais são nacionais e espelhos são de vidro acrílico com uma refletividade 75,0 %. Desde então, o sistema está funcionando satisfatoriamente e a estimativa da instituição é esperado uma economia de 118.750 litros de diesel por ano. Além disso, proporcionando uma redução de 1.200 kg de CO<sub>2</sub> por dia. (PAHISSA, 2014)

### *3.4.3 Concentradores Solares tipo Scheffler: sistema solar de geração de vapor para a esterilização de equipamentos hospitalares e lavanderia*

Com a parceria no ano de 2002 entre a Universidade Espiritual Mundial Brahma Kumaris e o Hospital J. Wattumal Memorial Hospital Global e Centro de Pesquisa localizado no Rajhastan (India), e construído em 1991, foi inicializado um projeto para integrar energias renováveis, energia solar, principalmente na operacionalização do Hospital. Possui 70 leitos, e oferta as comunidades locais medicamentos gratuitos e tratamento médico a 90.000 pessoas anualmente.

O sistema consiste em dois módulos de dez concentradores tipo Scheffler. Cada concentrador tem uma superfície reflexiva 12,6 m<sup>2</sup> e absorvedor de 11 litros de volume, que geram vapor de baixa pressão e localizado a 30 metros da geração de vapor. Cada módulo possui dez concentradores individualmente ligados numa estrutura de eixo polar, que permite o movimento de articulação seguindo o caminho solar diário, ver Figura 16 e 17.



Figura 16: Instalação do módulo com 10 concentradores no Hospital Global, em Mount Abu. São observados concentradores em alturas diferentes, os receptores e o tanque principal, onde o vapor é armazenado (PAHISSA, 2014).

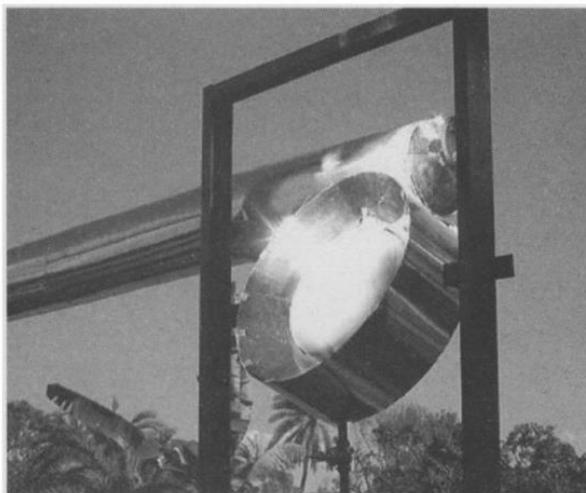


Figura 17: Absorvedor com volume de 11 litros e visor solar com diâmetro de 30 cm (PAHISSA, 2014).

A movimentação é automatizada, utilizando um temporizador eletrônico alimentado por energia solar fotovoltaica, ele é ativado para conduzir o movimento de engrenagens e eixos que os unem aos concentradores.

O vapor gerado é armazenado a baixa pressão nos tanques, e quando necessário, é utilizado no hospital em diversos sistemas como: na lavanderia, em processos de esterilização de instrumentos médicos e esporadicamente para cocção a vapor na cozinha do hospital (PAHISSA, 2014).

### **3.5 Rendimento térmico e óptico com a utilização de concentrador de foco fixo Scheffler**

A literatura apresenta inúmeros trabalhos do uso de concentrador tipo Scheffler com absorvedores que, apenas se utilizam de água para a produção de vapores e uso em diversas áreas, pois, não foi encontrado na pesquisa experimentos publicados, utilizando-se de fluidos térmicos.

Em publicação recente o pesquisador Swati Bhasme (2015) apresentou resultados de experimento realizados em Nagar na Índia, para calcular os rendimentos térmico de um absorvedor e óptico de um concentrador solar tipo Scheffler. O concentrador Scheffler utilizado no experimento possuía uma área de abertura de  $16,0 \text{ m}^2$  revestida com espelho de vidro de 2,0 mm de espessura e diâmetro de 300,0 mm do receptor do foco no absorvedor, que possui volume de armazenamento de 65 litros de água. O objetivo foi o aquecimento de água, em temperatura inicial ambiente, armazenada no absorvedor, para a geração de vapor de água, Figura 18 (BHASME, 2015).



Figura 18: Concentrador foco fixo do tipo Scheffler utilizados nos experimentos em Nagar na Índia , para lavagem a seco de roupas da comunidade (BHASME, 2015).

Os experimentos foram realizados em maio de 2015 e os parâmetros medidos foram: temperatura ambiente, temperatura da água, radiação solar e velocidade do vento. Para aferir a temperatura da água foi usado termopares de tipo K com range de 100 °C a 1.250 °C; a velocidade do vento foi medida por um anemômetro digital com bateria e range de 0,3 a 30 m/s; e um piranômetro foi usado para medir a radiação. As leituras foram realizadas em diferentes horários entre as 10h às 14h, sendo em intervalos de 5 minutos, totalizando mais de 200 observações registradas.

As eficiências térmicas foram de 65,0 %, 67,0 %, 68,0 % e 69,3 % para as radiações solares médias de 816,7 W/m<sup>2</sup>, 828,4 W/m<sup>2</sup>, 842,3 W/m<sup>2</sup> e 852,4 W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Durante os experimentos entre as 10h às 14h, foram obtidos seguintes dados de temperaturas máximas da água: 150,45 °C e 38,90 °C para temperatura ambiente. Já o rendimento térmico máximo do absorvedor de 69,50 % e rendimento óptico de 72,5 %.

Os dados suscitaram o autor concluir, que a eficiência térmica é definida como a proporção da energia térmica, absorvida pelo fluido de transferência de calor, para a radiação normal direta na área de abertura do absorvedor. Os valores de rendimento foram muito próximos, demonstrado que, isoladamente, a radiação solar afeta muito pouco os valores do fator de eficiência óptica, pois, os principais fatores que influenciam esses valores são a refletância do revestimento reflexivo utilizado no concentrado, a capacidade de absorção do absorvedor, o sincronismo perfeito do mecanismo de rastreamento solar e o ângulo de declínio solar.

### 3.6 Instrumentação para medição de Radiação

Conhecer os níveis de radiação solar que atingem a superfície da Terra é uma ação inicial, imprescindível, que constituem uma base de dados muito importante para estudos de climatologia da radiação solar e para a avaliação técnica e econômica de projetos de aproveitamento do recurso energético solar (PEREIRA et al, 2016).

No Brasil é possível o acesso aos dados de radiação através das Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instaladas em todas as capitais e em algumas outras cidades do país. Estas estações automáticas são compostas de uma unidade de memória central ("data logger"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, dentre outras), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora (INMET, 2017).

Dentre os equipamentos para a medição da radiação direta e global, pode-se destacar: piranômetro, pirheliômetro, pirgeômetro e demais sensores para medir pressão atmosférica, umidade e temperatura, além do rastreador solar.

#### 3.6.1 Piranômetro de termopilha

O piranômetro é um equipamento que mede a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar (PEREIRA et al, 2017).

Existem vários modelos de piranômetros e estão divididos por classe quanto a precisão: a primeira classe apresenta 2% de precisão e a segunda classe 5% de precisão. A Figura 19 ilustra o instrumento, composto pelo sensor (1), dois domos de vidro com baixo teor de ferro para fim de isolamento térmico do sensor (2 e 3), um envoltório de proteção (4) e um corpo metálico (5). O instrumento também conta com cabos de conexão elétrica para o sinal gerado pela termopilha (6), com uma base regulável (7), uma fixa (8), um nível de bolha para posicioná-lo na horizontal (9) e um sistema de remoção de umidade substituído periodicamente (10).

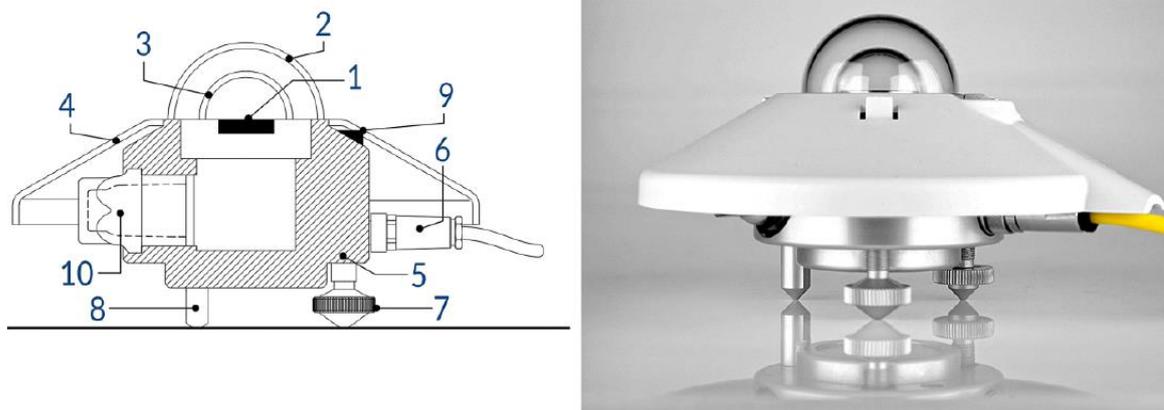


Figura 19: Representação gráfica e imagem de um piranômetro de termopilha (PEREIRA et al, 2017).

### 3.6.2 Pirheliômetro

O pirheliômetro é um equipamento que mede a radiação direta, e caracteriza-se por possuir uma abertura estreita de maneira a focar somente o disco solar e a área ao lado definida como circunsolar. Além disso segue o movimento do sol e é permanentemente ajustado para focar a melhor região do sensor de captação, ou seja, são autocalibráveis e uma precisão de segunda classe com 5 % quanto perfeitamente instalados e utilizado para as medições (CRESESB, 2002). O colimador tem um ângulo sólido de abertura de  $5^\circ$  por padrão internacional. O pirheliômetro deve ser conectado a um sistema rastreador solar para estar sempre direcionado para o Sol. O instrumento utilizado no experimento, além dos dados do INMET, é do fabricante Eppley laboratory, INC, modelo sNIP – USA. Quanto a especificação técnica apresenta uma curva de resposta plana para os comprimentos de onda entre 250 a 3000  $\mu\text{m}$ , campo de visão  $5^\circ$ , Saída 0 - 10 mV, Sensibilidade de  $8,99 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , Impedância aproximada de  $200 \Omega$  e 95% de tempo de resposta, ou seja, 5 segundos. Na sua borda frontal, possui um pequeno orifício, que projeta a luz solar sobre um ponto marcado na borda inferior do mesmo, permitindo que o operador verifique diariamente o correto alinhamento do equipamento. A Figura 20 mostra a representação gráfica e a imagem de um Pirheliômetro.

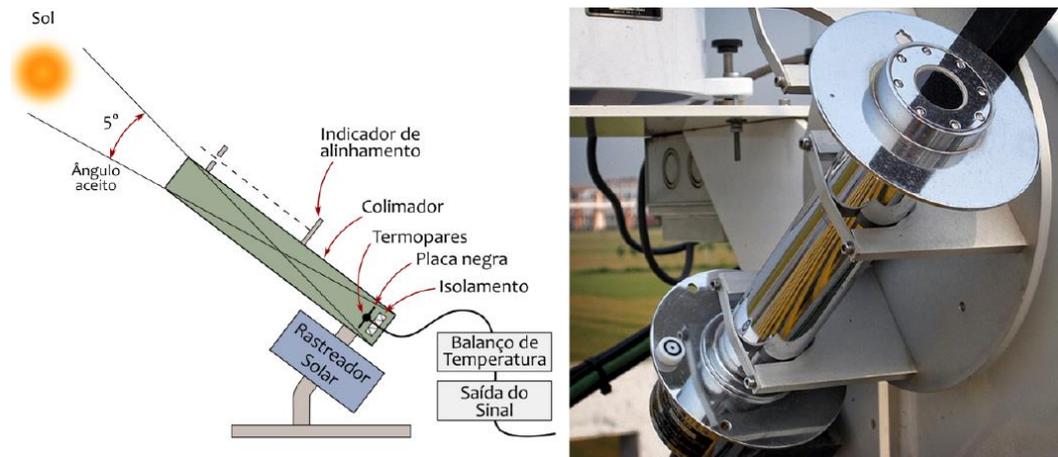


Figura 20: Representação gráfica e imagem de um Pirheliômetro (PEREIRA et al, 2017).

### 3.6.3 Pirgeômetro

O pirgeômetro é um equipamento que mede a parcela da radiação solar que possui radiação infravermelha numa faixa de 4,2 a 45  $\mu\text{m}$ . Este instrumento igualmente ao piranômetro caracteriza-se pelo uso de uma termopilha, e de cor preta no acoplado a base de metal do instrumento e a outra junção em contato com a atmosfera (CRESESB, 2002). A Figura 21 apresenta o equipamento Pirgeômetro.

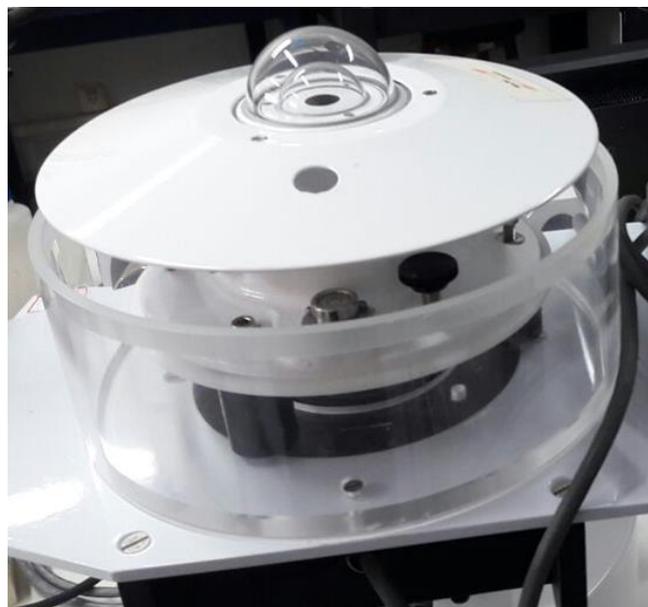


Figura 21: Pirgeômetro - The Eppley laboratory, INC, modelo sNIP – USA (EPLAB, 2017).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados nos experimentos para avaliação de rendimento térmico de um absorvedor e de um concentrador solar de foco fixo Scheffler com diferentes sistemas reflexivos.

O absorvedor térmico e o concentrador solar revestido com espelho de vidro foram projetados e construídos, respectivamente, pelos autores SANTOS (2015) e DIB (2009), no Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP) da Universidade Tiradentes (UNIT) na cidade de Aracaju no estado de Sergipe – Brasil, e fazem parte de um sistema experimental denominada “sistema de aquecimento híbrido solar/gás para forno de casa de farinha” composta pelos seguintes equipamentos: (a) Concentrador solar do tipo Scheffler de foco fixo; (b) Absorvedor da energia térmica solar - utilizando-se de fluido térmico e bomba; (c) Tubulações em cobre isoladas termicamente; (d) Forno de torrefação híbrido - aquecido pelo fluido térmico; (e) Placas solares fotovoltaica de 250W cada, total de duas unidades - utilizando-se de duas baterias de 110 Ah, dois controladores de carga de 10A e inversor de voltagem DC/AC; e (f) Sistema de monitoramento de temperatura. A Figura 22 mostra o fluxograma apresentado pelo autor Santos, 2015.

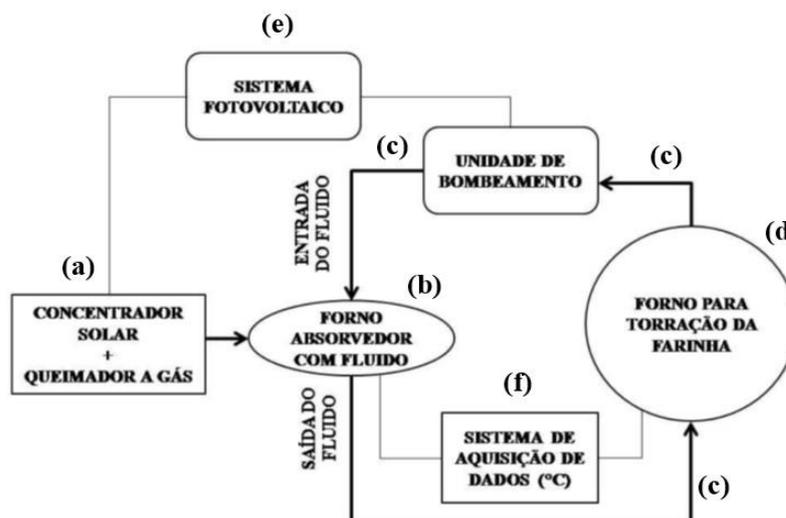


Figura 22: Fluxograma do processo de geração de calor via sistema híbrido solar/gás para aquecimento de forno de casa de farinha (SANTOS, 2015).

Numa primeira etapa de experimentos foram calculados o rendimento térmico do absorvedor para aquecimento de fluido térmico utilizando-se de um concentrador solar de foco fixo Scheffler com dois tipos de revestimento na área total reflexiva: espelho de vidro (EV) e

filme reflexivo de poliéster (FRP) com refletância, respectivamente de 95,50 % e 79,00 %. Sendo que o revestimento de FRP foi uma das inovações deste trabalho. Os experimentos foram realizados na área externa do ITP/UNIT no período de 09 de outubro a 14 de novembro do ano em curso das 7h às 17h, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Dias dos experimentos, da primeira etapa, com utilização de sistemas de revestimento reflexivo de dois tipos no concentrador solar: filme reflexivo de poliéster e espelhos de vidro (AUTOR, 2017).

<b>Experimentos realizados, utilizando sistemas de revestimentos</b>		
<b>(Primeira etapa)</b>		
	<b>Filme reflexivo de poliéster</b>	<b>Espelhos de vidro</b>
	<b>(FRP)</b>	<b>(EV)</b>
<b>Data</b>	09/10/2017	27/10/2017
	13/10/2017	31/10/2017
	16/10/2017	07/11/2017
	17/10/2017	09/11/2017
	23/10/2017	10/11/2017
	25/10/2017	14/11/2017

O fluido térmico utilizado no absorvedor, num total aproximado de 37 litros, foi o THERMINOL<sup>®</sup> XP resistente a temperaturas superiores a 300 °C sem se degradar. É um fluido transmissor de calor que possui aspecto oleoso, não tóxico, de coloração límpida para incolor e inodoro; possui ponto de autoignição em 346 °C, ponto de ebulição a 358 °C e densidade de 0,853 g.cm<sup>-3</sup> a 25 °C e capacidade calorífica de 1,85 kJ/(kg.K) a 27 °C (THERMINOL, 2017).

Os dados solares e atmosféricos diários dos experimentos, foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) oriundos da estação da cidade de Aracaju - A409 instalada na latitude 10,95°. Estes dados são parâmetros não reguláveis que depende das condições meteorológicas, e são fornecidos a cada hora pela estação, são eles radiação solar (W/m<sup>2</sup>), temperatura ambiente (°C), umidade (%), pressão atmosférica (hPa) e velocidade do vento (m/s). Os dados obtidos do absorvedor foram as temperaturas (°C) do fluido, da esfera de aço e do visor. Todas verificadas a cada hora durante o experimento.

Na segunda etapa de experimentos, foram realizadas três outras aferições experimentais utilizando o sistema reflexivo, que obteve o melhor desempenho de rendimentos térmico e óptico, além de atingir a maior temperatura do fluido no absorvedor térmico na primeira etapa de experimentos. Foram realizados na área externa do ITP/UNIT no período de 27 de fevereiro a 07 de março de 2018 das 10h às 14h, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Dias dos experimentos, da segunda etapa, com utilização de sistemas de revestimento reflexivo no concentrador solar de espelhos de vidro (AUTOR, 2017).

<b>Experimentos realizados, utilizando sistema de revestimento de espelhos de vidro (EV)</b>	
<b>(Segunda etapa)</b>	
<b>Data</b>	27/02/2018
	06/03/2018
	07/03/2018

Os dados aferidos nesta segunda etapa objetivaram a comparação com os resultados de publicação recente na literatura, descrita na revisão bibliográfica deste trabalho, acerca do artigo científico do pesquisador Swati Bhasme (2015), realizados em Nagar na Índia, para calcular os rendimentos térmico de um absorvedor e óptico de um concentrador solar tipo Scheffler utilizando o sistema reflexivo EV. Os protótipos utilizados pelo autor do artigo apresentam as seguintes características: (a) Concentrador solar de foco fixo Scheffler de área total refletora de 16,00 m<sup>2</sup>, revestida por espelhos de vidro comum com espessura de 2,00 mm, comprimento focal de 4,30 m, diâmetro do foco gerado pelo concentrador 8,00 cm; e (b) absorvedor térmico com capacidade de 65,00 litros e o fluido utilizado é a água. O experimento foi realizado no mês de maio do ano de 2015, com leituras em intervalos de 5 minutos no período horário das 10h às 14h.

Os dados de radiação solar direta (W/m<sup>2</sup>) para este experimento foram obtidos de um pirheliômetro, fabricante EPPLEY modelo sNIP, made in U.S.A., instalado no local do experimento no ITP/UNIT.

#### **4.1 Concentrador solar de foco fixo Scheffler**

O protótipo utilizado neste trabalho foi apresenta as seguintes características: área total refletora de 2,70 m<sup>2</sup>, revestida por espelhos de vidro comum com espessura de 3,00 mm com aproximadamente 340 peças de espelhos com dimensões de 8,00 cm x 10,00 cm cada, e refletância de 95,5 % comprimento focal de 2,70 m, diâmetro do foco gerado pelo concentrador de 15,00 cm, conforme mostra a Figura 23.



Figura 23: Concentrador de foco fixo Scheffler com a área total reflexiva revestida com EV durante experimento (AUTOR, 2017).

Outro material reflexivo utilizado foi o FRP, pois, é uma inovação deste trabalho propor um revestimento alternativo, que oferece benefícios econômico quanto ao custo instalado, a flexibilidade de forma, a trabalhabilidade, o menor peso, e resistência as intemperes (DIGRAZIA et al, 2010). Para a aplicação do revestimento foi construída uma base em fibra de vidro com espessura de 3,00 mm, conservando a forma e a área total do concentrador, e revestida com FRP do fabricante SOLARGARD, modelo Silver 20 prata, com refletância de 79,0 % e proteção a luz ultra violeta (UV) de 99,00 % (SOLARGARD, 2017), Figuras 24 e 25.



Figura 24: Concentrador solar com refletor em fibra de vidro sem revestimento FRP (AUTOR, 2017).



Figura 25: Área total reflexiva do concentrador de foco fixo Scheffler revestida com FRP (AUTOR, 2017).

## 4.2 Absorvedor térmico

O absorvedor para aquecimento de fluido térmico foi projetado para receber o foco gerado pelo concentrador solar de 150 mm, e apresenta um visor equipado com vidro de boro silicato com diâmetro de 130 mm. Dessa medida, 10 mm é usada na fixação da janela de vidro, estando um diâmetro útil de 120 mm para entrada do foco (SANTOS, 2015). Apresentado na Figura 26.



Figura 26: Forno absorvedor (AUTOR, 2017).

Alguns instrumentos compõe o absorvedor para a aquisição de dados, para a avaliação de rendimento térmico. A Figura 27 mostra a localização dos instrumentos no absorvedor, descritos a seguir: (a) manômetro, (b) termômetro, (c) válvula de segurança que está conectada ao sistema para armazenamento da purga (d) e (e) conexões e termopares. Cada termopar está a uma profundidade determinada, um na saída do fluido (parte superior); um na entrada do fluido (parte inferior); e um na esfera de aço (no meio) (SANTOS, 2015).

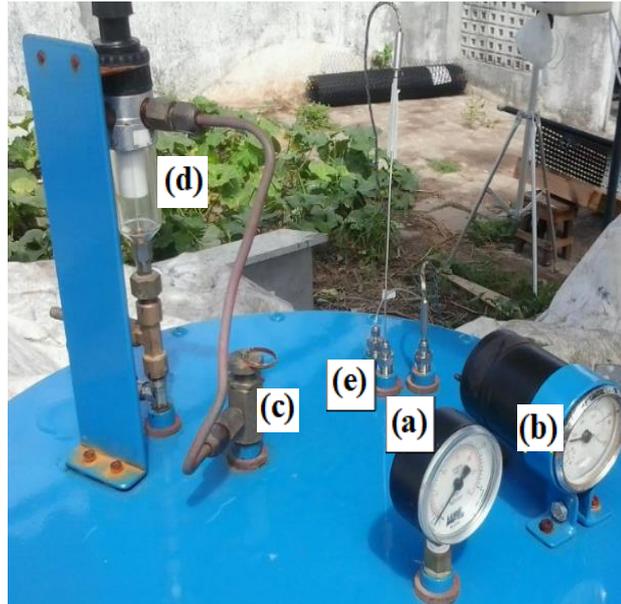


Figura 27: Instrumentos do absorvedor: (a) manômetro, (b) termômetro, (c) válvula de segurança que está conectada ao sistema para armazenamento da purga (d) e (e) conexões e termopares (AUTOR, 2017).

A Figura 28 ilustra um corte longitudinal esquemático do absorvedor identificando os seguintes elementos: (a) esfera responsável por receber o foco gerado pelo concentrador solar; (b) detalhe da entrada do foco com janela de vidro de boro silicato resistente a altas temperaturas; (c) cilindro interno, onde está contido o fluido térmico; (d) cilindro externo, que tem a função de fixar o material isolante, a lã de vidro, pois, o cilindro externo não tem contato com o fluido térmico; (e) compartimento da lã de vidro para isolar termicamente o cilindro interno; (f) aquecimento auxiliar com gás; (g) entrada para abastecimento do cilindro interno com fluido; (h) saída do fluido térmico aquecido; (i) entrada do fluido térmico frio; e (j) base do forno na altura correta para receber o foco do concentrador solar (SANTOS, 2015).

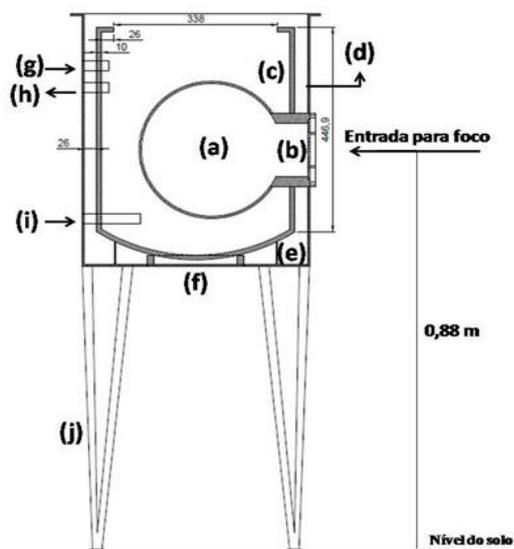


Figura 28: Corte longitudinal esquemático do absorvedor (AUTOR, 2017).

### 4.3 Rastreamento automatizado

O rastreamento automático da localização do sol pelo concentrador é de fundamental importância para manter o foco fixo em um ponto, e melhorar a eficiência do concentrador solar. O concentrador solar deve estar sempre posicionado para o sol com o foco direcionado para o absorvedor (BHASME, 2015).

Considerando o que o ângulo horário solar corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido à rotação da Terra e varia entre  $-180^\circ$  e  $+180^\circ$ , onde a cada hora corresponde a  $15^\circ$ /hora, é imprescindível o ajuste permanente do sistema de rastreamento para que o foco permaneça fixo no visor do absorvedor. Assim, o sistema de rastreamento solar do concentrador é eletromecânico utilizando-se de um motor elétrico com tensão de 12 volts e 8 amper de corrente contínua, utilizado em para brisas de veículos, instalado na base do concentrador e conectado ao eixo de rotação (SANTOS, 2015). Para o acionamento automático, o motor foi ligado a um micro controlador de plataforma Arduino, considerada placas controladoras de baixo custo que são constituídas por uma placa controladora e um ambiente de desenvolvimento, respectivamente, o hardware e software (MCROBERTS, 2011).

A versão utilizada foi Arduino UNO. É composto por um micro controlador ATmega328, com 14 pinos digitais (entrada e saída), cristal oscilador de 16 MHz, conexão USB, pinos de alimentação botão reset. Para a proteção a exposição às intempéries, utilizou-se de uma caixa blindada para comportar todo o sistema, equipada com dois botões tipo *push button* responsáveis pela movimentação do concentrador no sentido horário ou anti-horário, quando pressionados manualmente (MCROBERTS, 2011), conforme mostrados nas Figura 29 e 30. No automático receberá continuamente comandos eletrônicos do algoritmo no software da plataforma para a movimentação da superfície refletora em intervalos pré-determinados de tempo, fazendo com que o foco gerado permaneça fixo no forno absorvedor promovendo um aquecimento contínuo.

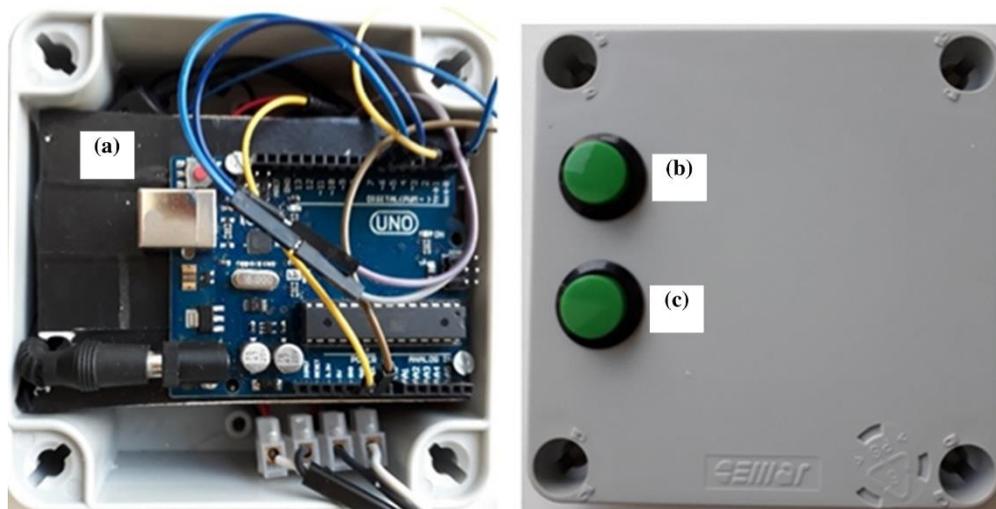


Figura 29: Caixa blindada para armazenamento do Arduino Uno utilizado para o rastreamento solar: (a) micro controlador ATmega328; (b) botão tipo push button responsável pela movimentação do concentrador no sentido horário (c) botão tipo push button responsáveis pela movimentação do concentrador no sentido anti-horário (AUTOR, 2017).

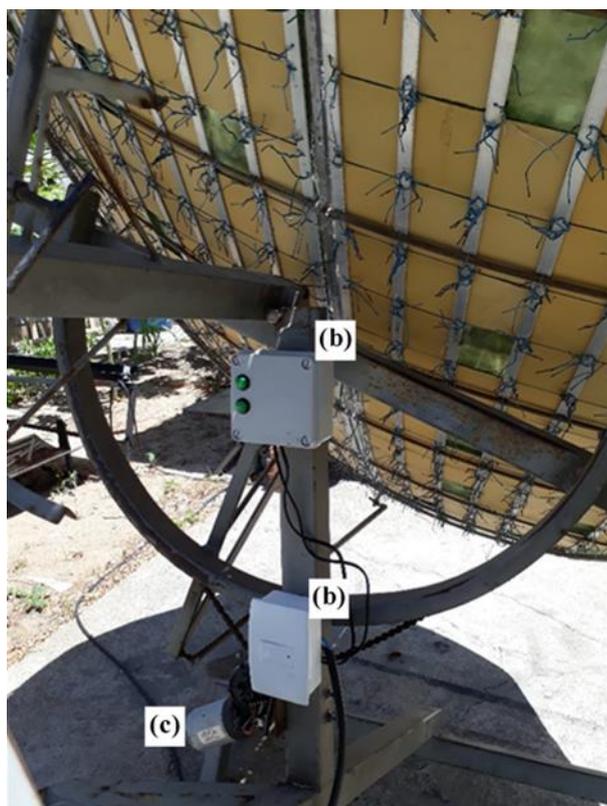


Figura 30: Sistema de rastreamento localização na base do concentrador: (a) Caixa blindada com o micro controlador, Arduino UNO; (b) Motor elétrico de corrente contínua; e (c) Interruptor de 1 seção para energizar o sistema (liga/desliga) (AUTOR, 2017).

#### 4.4 Rendimento Térmico

Para a transformação da radiação solar em calor útil dentro do absorvedor térmico foram utilizadas algumas equações matemáticas, e o conhecimento de constantes e parâmetros, característicos dos materiais constituintes do sistema. Absorbância aço 50,20, emissividade aço 0,79, coeficiente de convecção do ar 15,0 ( $\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ ), constante de Stefan-Boltzmann  $5,6704 \times 10^{-8}$  ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ), para obter elementos determinantes ao cálculo do rendimento térmico do absorvedor (INCROPERA, 2008).

##### 4.4.1 Ângulo de declinação

Para conhecer o comportamento da radiação sobre a superfície do concentrador é necessário conhecer o ângulo de declinação solar ( $\delta$ ). Para o cálculo é necessário identificar o número do dia do ano ( $J$ ) da realização do experimento, onde é definido o valor 1 para a data de 1º de janeiro e o valor 365 para 31 de dezembro (ou 366 se o ano for bissexto), e o calcular o ângulo diário ( $J'$ ), obtido através da Equação (1) (CASINIÈR et al, 2008).

$$J' = \frac{360^\circ \cdot J}{365,25} \quad (1)$$

Conhecendo o ângulo do dia  $J'$  aplica-se uma relação empírica que nos permite calcular a declinação do dia  $\delta$ , de  $J'$ , através da Equação (2) (CASINIÈR et al, 2008).

$$\text{Sen } \delta = 0,3978 \cdot \text{sen} [(J' - 80,2^\circ + 1,92^\circ) \cdot \text{sen} (J' - 2,80^\circ)] \quad (2)$$

##### 4.4.2 Área de abertura do Concentradora

A área de abertura do concentrador solar ( $A_a$ ) é imprescindível na determinação da quantidade de radiação solar, que incidirá na superfície refletora e será refletida. Esta área poderá ser calculada através da Equação (3) (PATIL, 2011).

$$A_a = A_s \cdot \cos \left( 43,23^\circ + \frac{\delta}{2} \right) \quad (3)$$

Onde:

$A_a$  : Área de abertura do concentrador (m<sup>2</sup>);

$A_s$  : Área da superfície refletora (m<sup>2</sup>); e

$\delta$  : Declinação solar (°).

#### 4.4.3 Fator de concentração

Para a obtenção do fator de concentração se faz necessário, inicialmente, calcular a área do foco gerado pelo concentrador ( $A_f$ ), como mostra a Equação (4) (PATIL, 211).

$$A_f = \pi \frac{D^2}{4} \quad (4)$$

Onde:

$A_f$ : área do foco gerado pelo concentrador (m<sup>2</sup>); e

D : Diâmetro do foco gerado pelo concentrador (m).

O fator de concentração ( $F_c$ ), será a razão área de abertura e a área do foco gerado pelo concentrador como demonstrado na Equação 5 (BHASME, 205).

$$F_c = \frac{A_a}{A_f} \quad (5)$$

Onde:

$F_c$ : Fator de concentração (adimensional);

$A_a$ : Área de abertura do concentrador (m<sup>2</sup>); e

$A_f$ : Área do foco gerado pelo concentrador (m<sup>2</sup>).

#### 4.4.4 Energia óptica captada no concentrador

É fundamental o cálculo da energia óptica ( $E_o$ ) para quantificar a radiação solar que chega e é refletida pelo concentrador. Essa energia é obtida através da Equação (6) (INCROPERA, 2008).

$$E_o = G_{bave} \cdot A_a \quad (6)$$

Onde:

$E_o$ : Energia óptica que chega ao concentrador (J);

$G_{bave}$ : Radiação solar ( $W.m^{-2}$ ); e

$A_a$ : Área de abertura do concentrador ( $m^2$ ).

#### 4.4.5 Rendimento óptico

É importante para compreender as perdas que existem durante todo o processo, e o rendimento óptico ( $\eta_{opt}$ ), permitirá calcular a quantidade de radiação refletida pelo concentrador. Este cálculo é possível pela Equação (7) (PATIL, 2011).

$$\eta_{opt} = f \cdot r \cdot a \quad (7)$$

Onde:

$\eta_{opt}$ : Rendimento óptico;

$f$ : Fração da energia refletida pelo concentrador incidente no absorvedor;

$r$ : Refletância do material refletivo; e

$a$ : Absorvância do material do forno absorvedor.

#### 4.4.6 Taxa de energia óptica que chega até o absorvedor

Essa taxa estima a quantidade de energia concentrada chega ao absorvedor. A taxa de energia óptica ( $E_{opt}$ ) pode ser calculada pela Equação (8) (PATIL, 2011).

$$E_{opt} = \eta_{opt} \cdot E_o \quad (8)$$

Onde:

$E_{opt}$ : Taxa de energia óptica que chega até o absorvedor ( $W.h^{-1}$ );

$\eta_{opt}$ : Rendimento óptico;

$E_o$ : Energia óptica que chega ao concentrador (J);

#### 4.4.7 Perdas térmicas

O cálculo das perdas térmicas é essencial para detectar perdas de calor no absorvedor e estimar quanto isso afeta no desempenho. As perdas térmicas por convecção ( $QL_{conv}$ ) poderão ser calculadas pela Equação (9) (PATIL, 2011).

$$QL_{conv} = hc \cdot A_f \cdot (T_r - T_a) \quad (9)$$

Onde:

$QL_{conv}$ : Perdas térmicas por convecção (W);

$hc$ : Coeficiente de convecção do ar ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ );

$A_f$ : Área do foco gerado pelo concentrador ( $\text{m}^2$ );

$T_r$ : Temperatura do fluido térmico no absorvedor (K); e

$T_a$ : Temperatura ambiente (K).

O valor de convecção para o ar adotado foi de  $15,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  (INCROPERA, 2008), enquanto os valores de temperatura do fluido foram os registrados durante o experimento com os termopares, e a temperatura ambiente serão obtidos pela estação meteorológica do INMET na cidade de Aracaju.

Quanto as perdas térmicas por radiação ( $QL_{rad}$ ) serão calculadas através da Equação (10).

$$QL_{rad} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (10)$$

Onde:

$QL_{rad}$ : Perdas térmicas por radiação (W);

$A$ : Área da superfície ( $\text{m}^2$ );

$\varepsilon$ : Emissividade do material do absorvedor;

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6704(40)\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ); e

$T$ : Temperatura absoluta (K).

#### 4.4.8 Cálculo do calor útil

Após calculadas as perdas térmicas torna-se possível estimar a quantidade de calor útil ( $Q_u$ ) no absorvedor, utilizando-se da Equação (11).

$$Q_u = E_{opt} - (QL_{conv} + QL_{rad}) \quad (11)$$

Onde:

$Q_u$ : Quantidade de calor útil (W);

$E_{opt}$ : Taxa de energia óptica que chega até o absorvedor ( $W \cdot h^{-1}$ );

$QL_{conv}$ : Perdas térmicas por convecção (W);

$QL_{rad}$ : Perdas térmicas por radiação (W).

#### 4.4.9 Rendimento térmico

Por fim, é possível o cálculo para o rendimento térmico do absorvedor ( $\eta_{col}$ ), obtendo assim o valor da porcentagem de calor gerado determinado pela Equação (12) (INCROPERA, 2008).

$$\eta_{col} = \frac{Q_u}{G_{bave} \cdot A_a} \quad (12)$$

Onde:

$\eta_{col}$ : Rendimento térmico do absorvedor;

$Q_u$ : Quantidade de calor útil (W);

$G_{bave}$ : Radiação solar ( $W \cdot m^{-2}$ ); e

$A_a$ : Área de abertura do concentrador ( $m^2$ ).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os experimentos foram realizados no mês de outubro do ano de 2017, totalizando oito diárias de aferições, sendo que os seis primeiros dias foi utilizado na área reflexiva do concentrador, o revestimento de FRP, e nos seis últimos dias utilizou o EV. É possível perceber através das Figuras 31 e 32 de radiação verso hora local, utilizando FRP e EV, respectivamente.

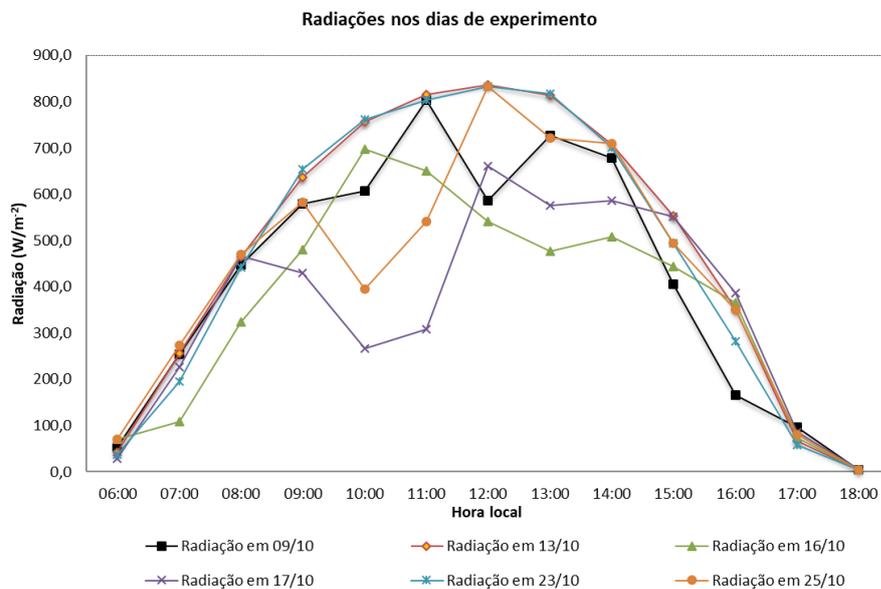


Figura 31: Radiação solar diária nos dias de experimento entre 09 a 25 de outubro de 2017 (INMET, 2017).

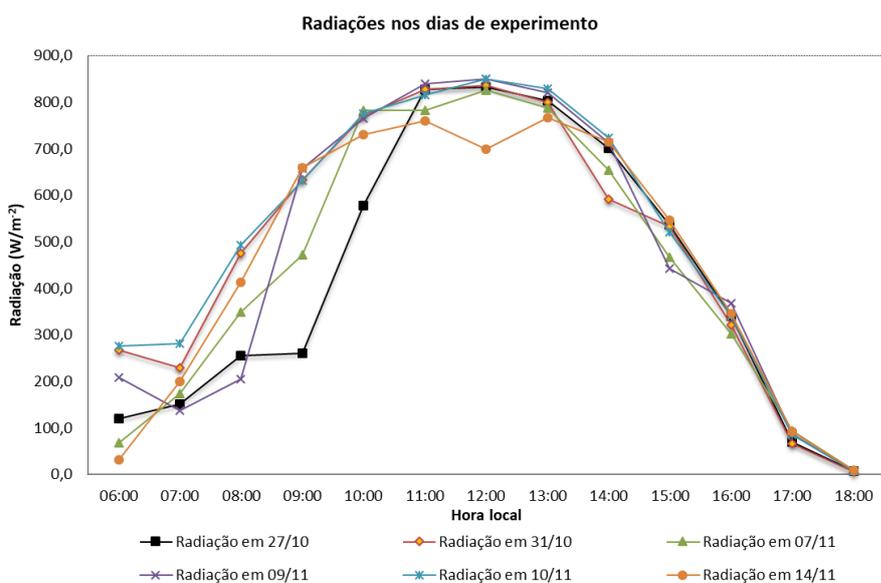


Figura 32: Radiação solar diária nos dias de experimento entre 27 de outubro a 14 de novembro de 2017 (AUTOR, 2017).

Na figura 31 observa-se, que entre as 10 h e 16 h concentraram-se as maiores radiações tendo seu máximo em 13 de outubro às 12 h com 835,8 W/m<sup>2</sup>. As menores leituras deste período ocorreram sempre às 16 h com a mínimas em 9 de outubro de 165,3 W/m<sup>2</sup>.

Na figura 32, já nos últimos seis dias de igual período horário ocorreu a máxima radiações em 9 de novembro às 12 h com 850,6 W/m<sup>2</sup>. O menor registro ocorreu em 7 de novembro de com radiação de 302,2 W/m<sup>2</sup>.

O fluido térmico foi aquecido, alcançando temperaturas médias, acima de 100,0 °C. O comportamento da temperatura do fluido e radiação solar ao longo do dia dos experimentos, percebe-se a ocorrência das maiores temperaturas no período das 10 h às 16 h conforme verificado nas Figuras 33 e 34, que representa a temperatura do fluido hora a hora em cada dia de experimento utilizando FRP e EV, respectivamente.

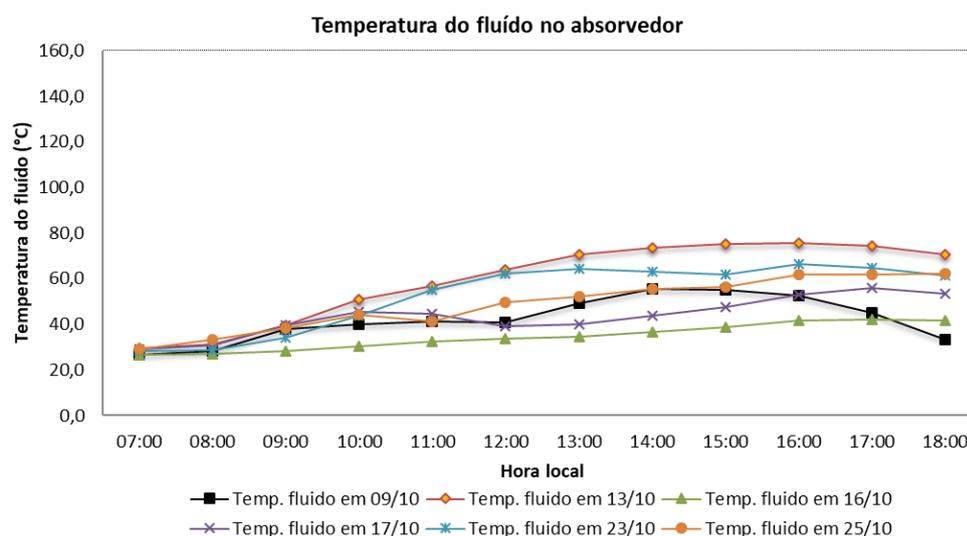


Figura 33: Temperatura do fluido no absorvedor com a utilização de FRP entre 09 de outubro a 25 de outubro de 2017 (AUTOR, 2017).

Utilizando o revestimento de FRP, as leituras iniciais às 7 h, demonstraram as menores temperaturas do fluido térmico. A menor foi verificada no dia 09/10/2017 com 26,4 °C, numa condição de temperatura ambiente de 26,9 °C e de radiação solar de 255,0 W.

No dia 13/10/2017 ocorreu a temperatura máxima do fluido térmico de 78,00 °C às 14 h 45 hora local. Em seguida observou a diminuição contínua da temperatura. A radiação solar apresentou as seguintes leituras das 13 h às 16 h: as 13 h (813,9 W/m<sup>2</sup>); as 14 h (706,9 W/m<sup>2</sup>); as 15 h (553,6 W/m<sup>2</sup>); e as 16 h (352,2 W/m<sup>2</sup>). As 16 h o fluido apresentou uma temperatura de 75,50 °C. Uma variação diminuta da temperatura de 3,21 % e da radiação de 49,82 % em duas horas consecutivas.

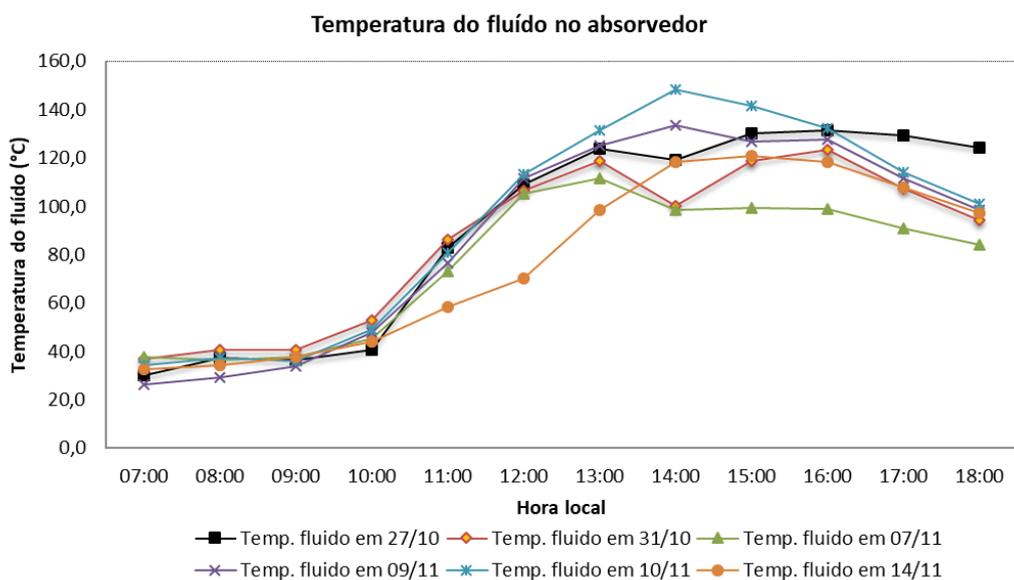


Figura 34: Temperatura do fluido no absorvedor com a utilização de EV entre 27 de outubro a 14 de novembro de 2017 (AUTOR, 2017).

Utilizando o revestimento de reflexivo EV, as leituras iniciais às 7 h, demonstraram as menores temperaturas do fluido térmico. A menor foi verificada no dia 09/11/2017 com 26,3 °C, numa condição de temperatura ambiente de 25,6 °C e de radiação solar de 136,4 W.

No dia 10/11/2017 ocorreu a temperatura máxima do fluido térmico de 149,60 °C às 14 h 14 hora local. Em seguida observou a diminuição contínua da temperatura. A radiação solar apresentou as seguintes leituras das 13 h às 16 h: as 13 h (828,9 W/m<sup>2</sup>); as 14 h (723,6 W/m<sup>2</sup>); as 15 h (520,3 W/m<sup>2</sup>); e as 16 h (339,7 W/m<sup>2</sup>). As 16 h o fluido apresentou uma temperatura de 132,4 °C. Uma variação diminuta da temperatura de 11,50 % e da radiação de 46,95 % em duas horas consecutivas.

Para o cálculo final de rendimento térmico utilizamos o período horário das 10 h às 16 h, que ocorreram as maiores radiações solares e temperatura do fluido térmico. As Tabelas 3 e 4 apresentam as temperaturas máximas, as médias alcançadas pelo fluido térmico, o rendimento térmico do absorvedor e o rendimento óptico do concentrador no período, utilizando FRP e EV, respectivamente.

Tabela 3: Resultados do rendimento térmico do absorvedor no período das 10 h às 16 h utilizando concentrador com revestimento de FRP (AUTOR, 2017)

<b>Resultados do Rendimento térmico do absorvedor</b>							
<b>(Uso de FRP no concentrador solar)</b>							
<b>Período horário do dia : 10 h as 16 h.</b>							
<b>Data do experimento</b>	<b>Radiação solar média no dia (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura média ambiente (°C)</b>	<b>Hora da temperatura máxima do fluido (h:min)</b>	<b>Temperatura máxima do fluido (°C)</b>	<b>Temperatura média do fluido (°C)</b>	<b>Rendimento térmico do absorvedor (η<sub>col</sub>) (%)</b>	<b>Rendimento óptico (η<sub>opt</sub>) (%)</b>
09/10/2017	567,35	27,41	16:45	60,70	47,85	29,83	21,18
13/10/2017	690,71	28,43	14:45	78,00	67,46	29,80	11,87
16/10/2017	525,79	27,69	16:50	57,60	41,92	29,85	26,00
17/10/2017	476,34	26,29	16:20	57,20	43,39	29,85	28,67
23/10/2017	670,32	28,14	16:20	67,90	60,67	29,84	24,35
25/10/2017	577,54	27,77	16:07	63,60	50,82	29,82	14,66
<b>Média</b>	<b>584,67</b>	<b>27,62</b>	<b>-</b>	<b>64,17</b>	<b>52,02</b>	<b>29,83</b>	<b>21,12</b>

Para o uso do FRP foram alcançadas médias de rendimento térmico do absorvedor de 29,83 % e de rendimento óptico de 21,12 %. A temperatura máxima do fluido térmico de 78,00 °C ocorreu as 14h45 do dia 13/10/2017, e com rendimento médio térmico de 29,80 % e óptico de 11,87 %.

Tabela 4: Resultados do rendimento térmico do absorvedor no período das 10 h às 16 h utilizando concentrador com revestimento de EV (AUTOR, 2017).

<b>Resultados do Rendimento térmico do absorvedor</b>							
<b>(Uso de EV no concentrador solar)</b>							
<b>Período horário do dia : 10h as 16h.</b>							
<b>Data do experimento</b>	<b>Radiação solar média no dia (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura média ambiente (°C)</b>	<b>Hora da temperatura máxima do fluido (h:min)</b>	<b>Temperatura máxima do fluido (°C)</b>	<b>Temperatura média do fluido (°C)</b>	<b>Rendimento térmico do absorvedor (η<sub>col</sub>) (%)</b>	<b>Rendimento óptico (η<sub>opt</sub>) (%)</b>
27/10/2017	660,04	28,43	15:49	132,60	105,30	34,42	44,33
31/10/2017	668,53	28,74	15:37	123,80	100,96	35,77	48,28
07/11/2017	657,22	28,83	12:38	113,90	90,31	35,91	87,66
09/11/2017	685,99	28,66	14:18	138,00	106,99	35,89	51,71
10/11/2017	693,06	28,80	14:14	149,60	113,83	35,84	24,55
14/11/2017	651,63	28,89	15:05	122,20	89,80	35,91	87,48
<b>Médias</b>	<b>669,41</b>	<b>28,72</b>	<b>-</b>	<b>130,02</b>	<b>101,20</b>	<b>34,96</b>	<b>57,34</b>

Utilizando EV foram alcançadas médias de rendimento térmico do absorvedor de 34,96 % e de rendimento óptico de 57,34 %. A temperatura máxima do fluido térmico de 149,60°C

ocorreu as 14 h 14 do dia 10/11/2017, e com rendimento médio térmico de 35.84 % e óptico de 24,55 %.

Nas Figuras 35 e 36 observa-se a relação da radiação e as temperaturas máximas alcançadas pelo fluido térmico no absorvedor ao longo do experimento.

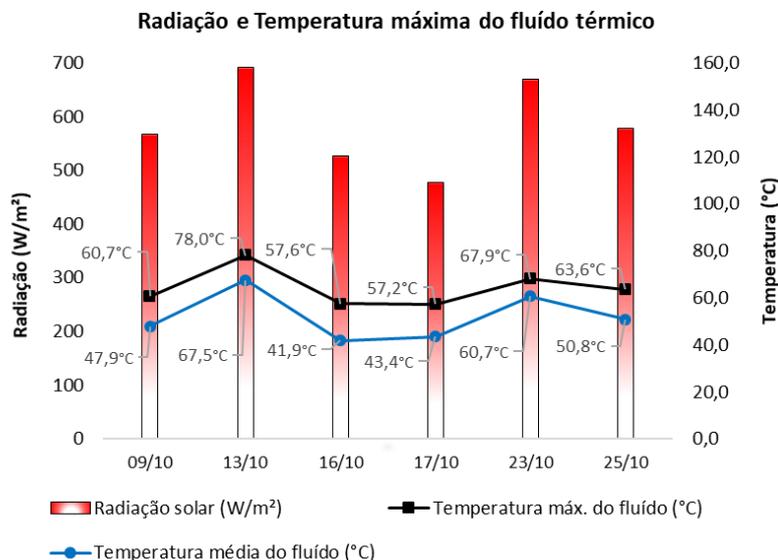


Figura 35: Temperaturas máximas e médias do fluido no absorvedor verso a radiação solar, utilizando FRP no período de 09 a 25 de outubro de 2017 (AUTOR, 2017).

Com o uso do FRP, as duas maiores médias de radiação solar e temperatura, ocorreram nos dias 13 e 23 de outubro, respectivamente  $690,71 \text{ W/m}^2$ ,  $670,32 \text{ W/m}^2$ ,  $67,46 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $60,67 \text{ }^\circ\text{C}$ . As temperaturas máximas foram  $78,00 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $67,90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nestes dias o céu apresentou-se nublado por toda a duração das leituras dos dados, e os rendimentos térmicos médios diários foram próximos com valores, respectivamente, de 29,80 % e 29,84 %.

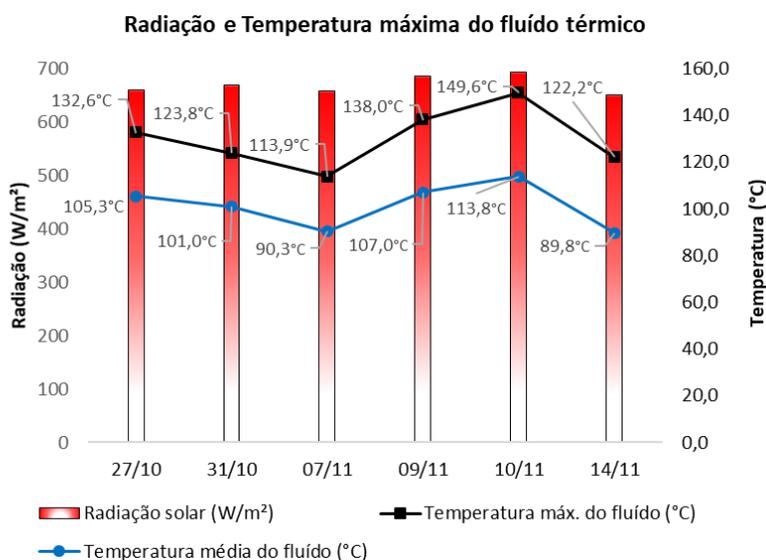


Figura 36: Temperaturas máximas e médias do fluido no absorvedor verso a radiação solar, utilizando EV no período de 27 de outubro a 14 de novembro de 2017 (AUTOR, 2017).

Usando o EV, as duas maiores médias de radiação solar e temperatura, ocorreram nos dias 09 e 10 de novembro, respectivamente, 685,99 W/m<sup>2</sup>, 693,06 W/m<sup>2</sup>, 106,99 °C e 113,83 °C. As temperaturas máximas foram 138,00 °C e 149,60 °C. Nestes dias o céu apresentou-se intermitente em nublado com nuvens densas e em nublado com nuvens espeças por toda a duração das leituras dos dados.

Os rendimentos térmicos médios diários, no absorvedor, foram próximos, não apenas nesses dois dias, com valores, respectivamente, de 35,89% e 35,84 %, mas em todo os dias usando o sistema reflexivo de EV, demonstrou bom desempenho quanto ao isolamento térmico do absorvedor e boa capacidade térmica do fluido.

Como, os experimentos utilizando-se dos sistemas reflexivos FRP e EV, não objetivou a comparação efetiva destes dois sistemas, mas verificar o comportamento do concentrador e do absorvedor através do rendimento térmico apresentado em cada experimento, isoladamente. Portanto, foi possível verificar a ocorrência dos melhores resultados, com a utilização do sistema reflexivo EV, que foi aferido as máximas e médias de temperatura do fluido e do rendimento térmico.

Contudo, o sistema reflexivo EV foi utilizado para os experimentos da segunda etapa de análise, e objetivou a comparação com os dados publicados, acerca do artigo do pesquisador Swati Bhasme (2015), em Nagar na Índia, que comparou os rendimentos térmico de um absorvedor e óptico de um concentrador solar tipo Scheffler, que também utilizou o sistema reflexivo EV no concentrador solar Scheffler.

Os experimentos da segunda etapa foram realizados nos dias 27/02/2018, 06 e 07/03/2018, com leituras em intervalos de 5 minutos no período horário das 10h às 14h, totalizando 150 aferições. Quanto a obtenção da radiação solar direta (W/m<sup>2</sup>) foi utilizado um pirheliômetro instalado no local do experimento ITP/UNIT.

A Tabela 5 apresenta um comparativo das características do absorvedor térmico e do concentrador solar de foco fixo Scheffler avaliados neste trabalho e os equipamentos utilizados por Bhasme (2015).

Tabela 5: Comparativo das características dos protótipos absorvedor térmico e concentrador solar de foco fixo Scheffler (AUTOR, 2018).

Características dos Equipamentos	Swati Bhasme		Autor	
	(2015)		(2018)	
	Absorvedor	Concentrador	Absorvedor	Concentrador
Área reflexiva do concentrador solar	-	16,00 m <sup>2</sup>	-	2,70 m <sup>2</sup>
Material reflexivo	-	EV	-	EV
Espessura do material reflexivo	-	2,00 mm	-	3,00 mm
Comprimento focal	-	4,30 m	-	2,70 m
Diâmetro do foco gerado pelo concentrador	-	8,00 cm	-	15,00 cm
Capacidade do absorvedor térmico	65,0 litros	-	37,0 litros	-
Fluido utilizado no absorvedor	Água	-	Térmico	-

O Concentrador solar utilizado por Bhasme (2015) tem uma área reflexiva de aproximadamente seis vezes maior do concentrador utilizado neste trabalho, e aproximadamente a metade do diâmetro do foco gerado. Já o absorvedor térmico temos uma distinção na capacidade de armazenamento do fluido utilizado, que para o protótipo utilizado por Bhasme e o utilizado neste trabalho são, respectivamente, de 65,0 litros (utilizando água) e 37,0 litros (utilizando-se de fluido térmico THERMINOL® XP) correspondendo um pouco do dobro do volume do outro.

As Figura 37, 38 e 39 representam todos os dados aferidos no experimento acerca da radiação solar direta (W/m<sup>2</sup>), da temperatura do fluido térmico no absorvedor (°C) e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar Scheffler no absorvedor (°C) com relação a hora local das aferições a cada 5 minutos no ITP.

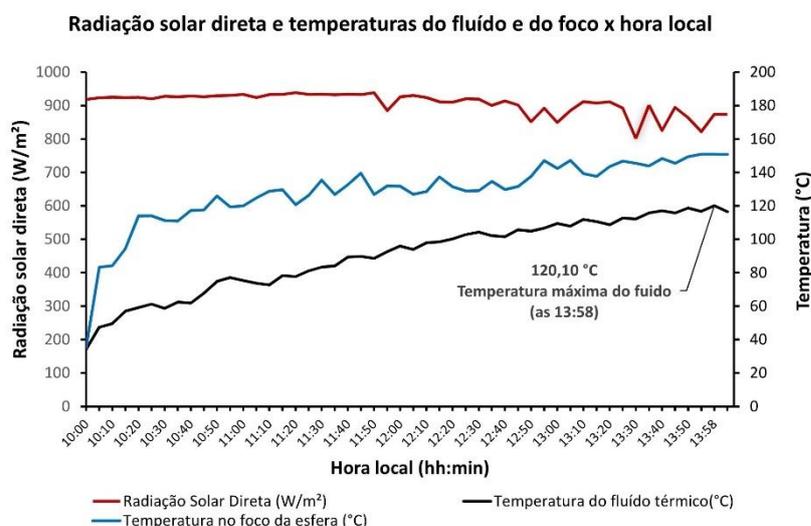


Figura 37: Dados experimentais em 27/02/2018: Radiação solar direta, temperatura do fluido térmico no absorvedor e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar no absorvedor versus hora local (AUTOR, 2018).

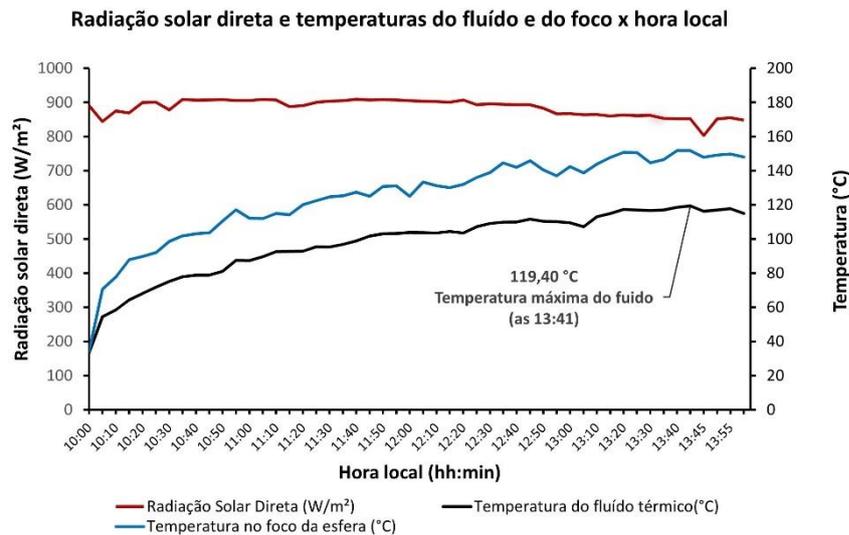


Figura 38: Dados experimentais em 06/03/2018: Radiação solar direta, temperatura do fluido térmico no absorvedor e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar no absorvedor versus hora local (AUTOR, 2018).

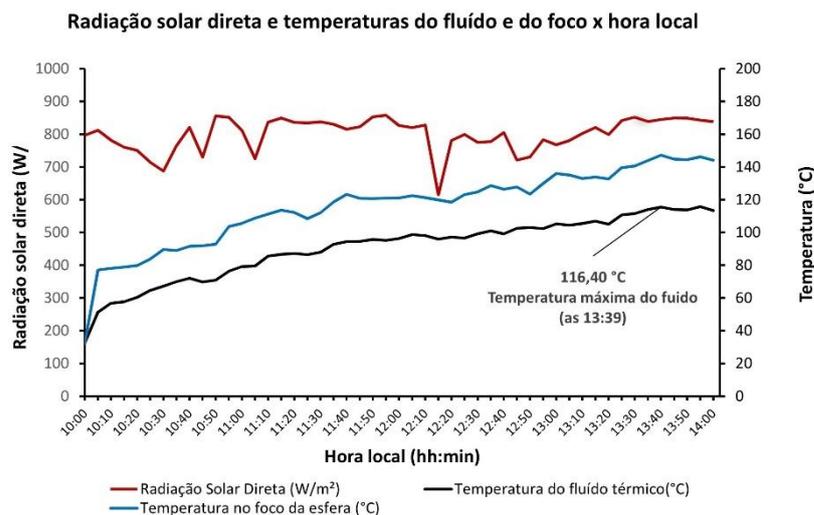


Figura 39: Dados experimentais em 07/03/2018: Radiação solar direta, temperatura do fluido térmico no absorvedor e da temperatura do foco gerado pelo concentrador solar no absorvedor versus hora local (AUTOR, 2018).

Assim, podemos observar nos gráficos representados nas figuras de 37, 38 e 39, acerca dos dias 27/02, 06/03 e 07/03/2018, que as temperaturas no foco do absorvedor e do fluido térmico evoluíram quase que paralelamente após o início das aferições alcançando as maiores temperaturas do fluido após a hora local de 13h40, respectivamente, de: 120,10 °C as 13h58; 119,40 °C as 13h41 e 116,40 °C as 13h39.

As maiores radiações ocorreram nas aferições do dia 27/02/2018, sendo caracterizado com a ocorrência de céu claro das 10h00 as 11h55, e em seguida houveram ocorrências de nuvens espaciais. Foram registradas a mínima e máxima radiação, respectivamente, 801,15 W/m<sup>2</sup> as 13h30 e 942,71 W/m<sup>2</sup> as 13h32. A média da radiação de 907,34 W/m<sup>2</sup> foi a mais alta de

todos os experimentos, da segunda etapa. Quanto as temperaturas máximas do fluido térmico e do foco gerado pelo concentrador no absorvedor foram respectivamente de 120,10 °C as 13h58 e 150,90 °C as 13h55. A temperatura média ambiente durante o experimento foi de 30,18 °C.

Já no artigo do autor Bhasme (2015), expõe, além dos resultados globais do experimento, uma tabela com horários locais das 11h00 as 11h40, consideradas as maiores radiações durante seu experimento, e as respectivas temperaturas da água no absorvedor a cada instante. Coincidentemente, as máximas radiações foram também obtidas neste mesmo período nos experimentos realizados nos ITP/UNIT, para efeito comparativo. A Tabela 6 apresenta os dados das temperaturas dos fluidos, e respectivas radiações para a comparação do comportamento dos protótipos usados em ambos experimentos.

Tabela 6: Dados de temperatura dos fluidos nos absorvedores e de radiações dos experimentos de Bhasme e deste trabalho (AUTOR, 2018)

<b>Dados de temperatura dos fluidos nos absorvedores e de radiações nos dois experimentos</b>								
<b>Hora Local (hh:mm)</b>	<b>Swati Bhasme (2015)</b>				<b>Autor (2018)</b>			
	<b>05/2015</b>		<b>27/02/2018</b>		<b>06/06/2018</b>		<b>07/03/2018</b>	
	<b>Temperatura da água (°C)</b>	<b>Radiação solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura do fluido térmico (°C)</b>	<b>Radiação Solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura do fluido térmico (°C)</b>	<b>Radiação solar (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura do fluido térmico (°C)</b>	<b>Radiação solar (W/m<sup>2</sup>)</b>
11:00	50,3	756,38	75,40	933,55	87,40	905,37	79,20	811,34
11:05	63,4	756,20	73,70	923,90	89,70	908,77	79,50	725,45
11:10	76,4	782,30	72,70	932,87	92,60	907,07	85,60	836,46
11:15	79,4	791,40	78,20	933,55	92,70	888,06	86,70	849,70
11:20	86,5	802,70	77,70	938,64	92,90	890,43	87,20	836,12
11:25	93,5	816,70	81,10	933,55	95,40	900,28	86,40	834,76
11:30	102,5	828,40	83,40	933,89	95,30	904,01	87,90	837,48
11:35	110,2	842,30	84,10	932,19	96,80	905,03	92,70	830,01
11:40	116,4	852,40	89,40	934,23	98,80	909,11	94,50	815,07
<b>Varição de Temperatura do fluido</b>	66,10	-	14,00	-	11,40	-	15,30	-
<b>Temperatura média do fluido</b>	86,51	-	79,52	-	93,51	-	86,63	-
<b>Radiação solar média</b>	-	803,20	-	932,93	-	902,01	-	819,60

Na Tabela 6 foi possível verificar, numa leitura comparativa entre os dados obtidos por Bhasme e os dados aferidos no dia 07/03/2018 no ITP, a média de radiação solar e a média de temperatura dos fluidos foram muito próximas com valores de: 803,20 W/m<sup>2</sup> e 86,50 °C; e 819,60 W/m<sup>2</sup> e 86,60 °C, respectivamente. Já nos dias 27/02/2018 e 06/03/2018 foram obtidas as maiores médias de radiação solar e temperatura do fluido térmico no absorvedor, respectivamente de 932,93 W/m<sup>2</sup> e 93,51 °C.

Bhasme, no seu trabalho, apresentou um gráfico da radiação solar direta ( $\text{W/m}^2$ ) e temperatura do fluido no absorvedor ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus a hora local (hh:mm). Então, para melhor comparação dos dados, foi reproduzido o gráfico com os dados obtidos por Bhasme nos seus experimentos, Figura 40.

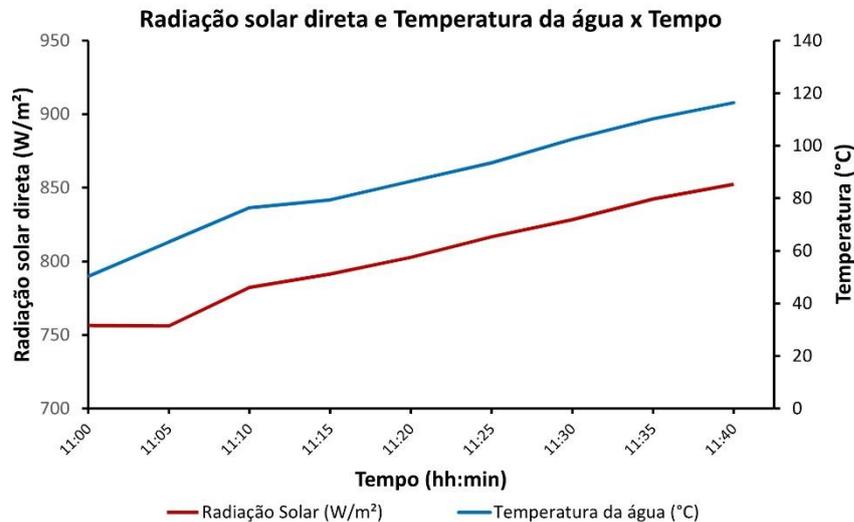


Figura 40: Gráfico adaptado de Bhasme (2015) de radiação solar direta versus temperatura do fluido água usado no absorvedor no período de 11h:00 as 11h40 em maio de 2015 em Nagar na Índia, (AUTOR, 2018).

O gráfico da figura 40 apresenta a radiação direta ( $\text{W/m}^2$ ) e a temperatura do fluido ( $^{\circ}\text{C}$ ) (água) no absorvedor, em ascensão, quase paralelas, demonstrando a proporcionalidade na transformação da energia fornecida pelo concentrador solar ao fluido no absorvedor térmico.

Já quanto aos dados aferidos nos outros três experimentos realizados no ITP, foram plotados gráficos para cada dia, com o mesmo range, possibilitando a comparação do comportamento dos protótipos, concentrador solar Scheffler e absorvedor térmico. Figuras 41, 42 e 43.

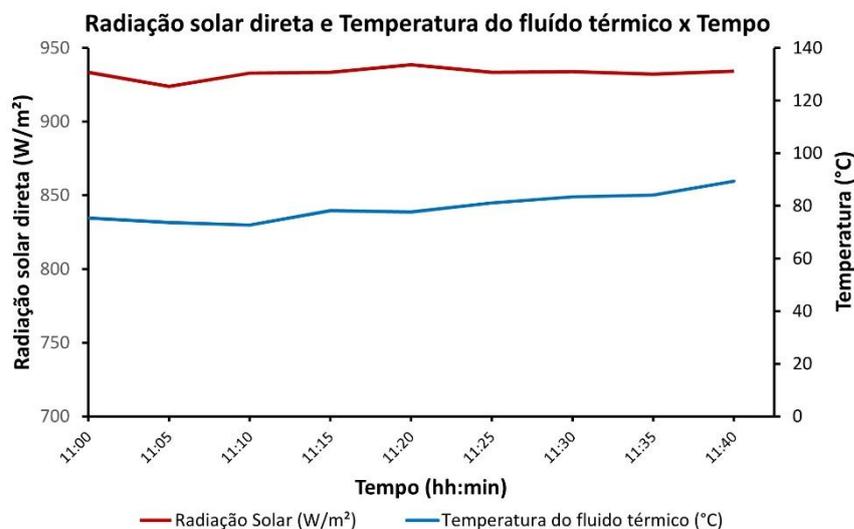


Figura 41: Radiação solar direta versus temperatura do fluido térmico usado no absorvedor térmico no período de 11h:00 as 11h40 em 27/02/2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018).

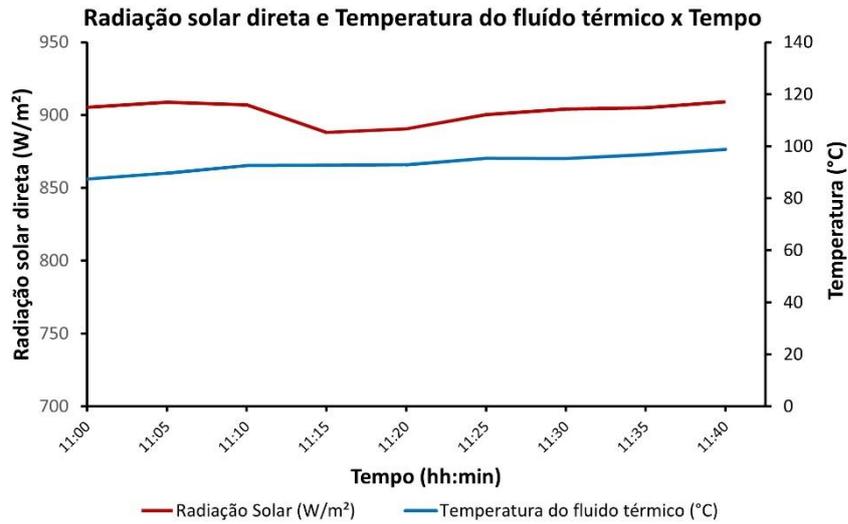


Figura 42: Radiação solar direta versus temperatura do fluido térmico usado no absorvedor térmico no período de 11h:00 as 11h40 em 06/03/2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018).

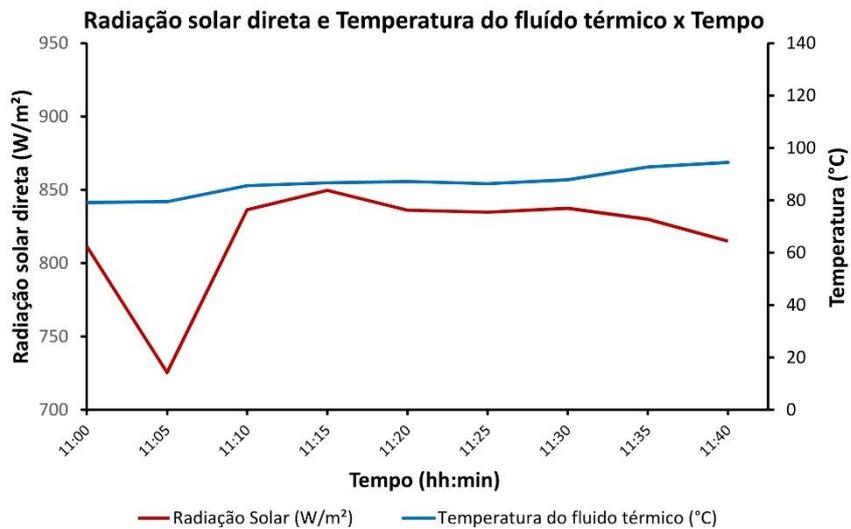


Figura 43: Radiação solar direta versus temperatura do fluido térmico usado no absorvedor térmico no período de 11h:00 as 11h40 em 07/03/2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018).

Analisando e comparando os dados do período parcial, representados nas figuras 40, 41, 42 e 43, percebe-se uma relação diretamente proporcional entre a radiação, a quantidade de energia emitida pelos concentradores solares e a temperatura dos fluidos nos protótipos dos absorvedores. Durante o experimento de Bhasme a radiação as 11h foi aferida em  $756,38 W/m^2$  e teve um aumento progressivo atingindo  $852,40 W/m^2$  as 11h40 resultando numa variação de temperatura da água no absorvedor de  $66,10 ^{\circ}C$ . Comparando com os dados obtidos nos experimentos do dia 07/03/2018 a temperatura média dos fluidos e de radiação solar média foram quase iguais apresentando-se respectivamente,  $86,51 ^{\circ}C$  e  $86,63 ^{\circ}C$  para a temperatura e

803,20 W/m<sup>2</sup> e 819,60 W/m<sup>2</sup> para a radiação. Entretanto, as 11h05 ocorreu a menor radiação com 725,45 W/m<sup>2</sup>, e logo após os 5 minutos, ou seja, as 11h10 a radiação voltou ao patamar acima do 800 W/m<sup>2</sup> até o fim do período da hora local de 11h40. E mesmo com a queda de radiação naquele instante, a temperatura do fluido térmico continuou ascendente.

A Tabela 7 consolida os dados aferidos, na totalidade do período do experimento, das 10h00 as 14h00 promovendo um comparativo de todos os dados e em especial os rendimentos óptico dos concentradores solares e térmico dos absorvedores.

Tabela 7: Comparativo dos resultados dos rendimentos ópticos dos concentradores solares e térmico do absorvedores no período de 10h:00 as 14h00 no mês de maio de 2015 em Nagar na Índia (Bhasme, 2015) e no meses de fevereiro e março de 2018 em Aracaju no Brasil, (AUTOR, 2018).

<b>Comparativo dos resultados do rendimento térmico do absorvedor com a literatura</b>						
<b>Pesquisa realizada (autor/data)</b>	<b>Radiação solar média durante o experimento (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	<b>Temperatura máxima no ponto focal (°C)</b>	<b>Temperatura máxima do fluido (°C)</b>	<b>Rendimento térmico médio do absorvedor (η<sub>col</sub>) (%)</b>	<b>Rendimento óptico médio do concentrador (η<sub>opt</sub>) (%)</b>
Bhasme (05/2015)	834,95	38,90	180,00	150,45	69,50	72,50
Autor 27/02/2018	916,74	30,20	150,90	120,10	35,92	84,01
Autor 06/03/2018	884,66	30,10	151,80	119,40	35,92	88,83
Autor 07/03/2018)	800,54	30,15	147,20	116,40	35,91	92,43

As aferições dos dados do experimento de Bhasme das 10h às 14h, foram obtidas temperaturas máximas da água de 150,45 °C e 38,90 °C para temperatura ambiente. E os rendimentos térmico máximo do absorvedor de 69,50 % e óptico máximo do concentrador de 72,50 %.

Já no ITP/UNIT foram obtidas temperaturas máximas do fluido térmico de 120,10 °C e 30,20 °C para temperatura ambiente no dia 27/02/2018. E os rendimentos térmico máximo do absorvedor de 35,92 % e óptico máximo do concentrador de 84,01 %. O rendimento óptico do concentrador solar do ITP apresentou rendimentos mais elevados na ordem de 13,79 % menor, a que conseguido como o concentrador solar do trabalho de Bhasme. Entretanto, o melhor rendimento óptico do concentrador solar Scheffler ocorreu em 07/03/2018 com 92,43 %.

Considerando a eficiência térmica definida como a proporção da energia térmica, absorvida pelo fluido de transferência de calor, para a radiação normal direta na área de abertura

do absorvedor, os valores de rendimento térmico do protótipo do absorvedor do ITP foi significativamente mais baixo do obtido por Bhasme, com aproximadamente 48,32 % menor. Quanto ao comparativo da máxima temperatura dos fluidos nos absorvedores o de Bhasme alcançou 150,45 °C e o absorvedor do ITP 120,10 °C em 27/02/2018, ou seja, 20,17 % menor.

Na Figura 44 representa a eficiência térmica (%) e a razão da variação temperatura do fluido térmico e ambiente e radiação direta (°C.W<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>) no experimento do dia 07/03/2018.

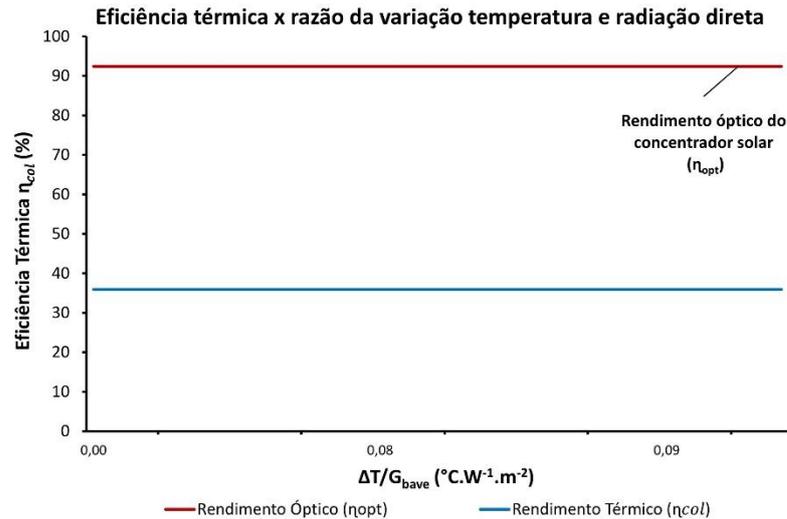


Figura 44: Eficiência térmica (%) versus a razão da variação temperatura do fluido térmico e ambiente e radiação (°C.W<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>), e rendimento óptico do concentrador solar (%), utilizando EV em 07/03/2018 (AUTOR, 2018).

O gráfico na figura 44, apresenta, dentre todos os experimentos realizados neste trabalho, os máximos rendimentos óptico do concentrador solar Scheffler e do absorvedor térmico, ocorridos em 07/03/2018, com valores respectivos de 92,43% e 39,91. E apresentam-se praticamente duas retas paralelas. No comportamento do absorvedor térmico, é importante destacar, que mesmo em dias com radiação solar onde foi alcançada média acima dos 900 W/m<sup>2</sup>, em todos os experimentos com sistema reflexivo EV de refletância de 95,5 %, o rendimento térmico do absorvedor não ultrapassou os 35,2 %. Além disso, foi observado, que o foco gerado pelo concentrador solar (localizado a 2,70m do seu eixo) e com diâmetro de 15,0 cm, ficou projetado no visor do absorvedor, que possui uma abertura útil, para a passagem do foco até a esfera de aço, de 12,0 cm. Demonstrando grandes perdas térmicas resultando a um rendimento térmico máximo de estagnação aproximadamente de 35,0 % no absorvedor térmico.

Contudo, o absorvedor térmico do ITP necessita de uma melhor avaliação quanto ao layout construtivo e aos materiais utilizados, para melhorar a transferência de calor do foco gerado pelo concentrador solar para o fluido térmico.

### 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho de pesquisa, resultado de uma revisão bibliográfica ampla e experimentos realizados em duas etapas, nos oportunizou o conhecimento de informações imprescindíveis para a avaliação do aproveitamento térmico e óptico de um sistema que se utiliza de um absorvedor com fluido térmico e um concentrador solar de foco fixo Scheffler, com o uso distinto, de dois sistemas reflexivos EV e FRP. Além disso, traz como inovação, o uso associado do fluido térmico e o sistema reflexivo FRP.

Os experimentos realizados na primeira etapa, resultaram no cálculo dos rendimentos térmicos do absorvedor com a utilização dos dois tipos de sistema de revestimento reflexivo com o FRP e o EV, no concentrador de foco fixo Scheffler. O sistema reflexivo EV, com refletância de 95,5 %, alcançou os melhores resultados com o máximo de temperatura do fluido térmico, de 149,60 °C as 14h14 do dia 10/11/2017, e um rendimento térmico médio do absorvedor de 34,96 %.

Então, na segunda etapa de experimentos desta vez comparando com a literatura, os protótipos do ITP/UNIT, utilizando o sistema EV, das 10h às 14h, atingiu temperatura máxima do fluido térmico de 120,10 °C a uma temperatura ambiente de 30,20 °C, rendimento térmico máximo do absorvedor de 35,92 % e rendimento óptico máximo do concentrador de 92,43 %.

Já os protótipos do Bhasme, obtiveram temperaturas máximas da água: 150,45 °C e temperatura ambiente de 38,90 °C, rendimento térmico máximo do absorvedor de 69,50 % e rendimento óptico máximo do concentrador de 72,50 %.

Com os resultados é possível verificar que a temperatura do fluido aumenta progressivamente à medida que a radiação solar refletida no foco do absorvedor é constante, e resfria lentamente reafirmando a eficiência térmica do fluido e do isolamento térmico do absorvedor quanto as perdas por radiação e convecção. Já o rendimento térmico do absorvedor depende da temperatura de operação do concentrador, da radiação, do ângulo de declínio, das perdas por radiação e por convecção, entretanto, o absorvedor térmico mesmo em dias com radiação solar alcançando média acima dos 900 W/m<sup>2</sup>, não ultrapassou um rendimento aproximado de 35,0 %. Durante todos os experimentos foi observado, que o foco gerado pelo concentrador solar (localizado a 2,70m do seu eixo), ficou projetado no visor do absorvedor, que possui uma abertura útil, para a passagem do foco até a esfera de aço, de 12,0 cm. Assim,

o foco chega parcialmente a esfera, condicionando o absorvedor a um rendimento térmico de estagnação e lentidão na transferência de calor por radiação, através do aço da esfera, para o fluido térmico.

Em vista disso, como perspectivas futuras de pesquisa, propõe-se: (i), projetar e construir um novo absorvedor térmico possibilitando, que o foco gerado pelo concentrador alcance no absorvedor material de transferência de calor em contato com o fluido; (ii), testar novos materiais, para a transferência de calor por radiação, na construção do absorvedor ; (iii) utilizar diferentes fluidos térmicos com características ecológicas e baixo custo, e; (iv), realizar novos experimentos utilizando filmes de poliéster de alta performance com refletância igual ou superior aos de espelhos de vidro.

### 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ª ed. – Brasília: Aneel, 2008.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). Coal Industry Advisory Board: CIAB. Disponível em: <[www.iea-coal.org.uk](http://www.iea-coal.org.uk)>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). Banco de Informações de Geração: BIG. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/15.htm](http://www.aneel.gov.br/15.htm)>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). IASC 2015: índice ANEEL de satisfação do consumidor: resultados gerais. Brasília, 2015. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/RELATORIO%20BRASIL\\_IASC%202015.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/RELATORIO%20BRASIL_IASC%202015.pdf)>. Acessado em: 03 janeiro de 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE). Relacionamento cliente x concessionária: direitos e deveres. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 2000, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABRADEE, 2000.
- ATLAS do Mercado Brasileiro. São Paulo: Gazeta Mercantil, n. 5, 2002.
- ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2006.
- ALAMI, A. H. Investigation in utilizing paraboloid concentrators for thermal perforation of metals, *Renewable Energy* 56 (2013).
- AL-SOUD, Mohammed S. et al. A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system. *Applied Energy*, v. 87, n. 2, p. 463-470, 2010.
- AMARA, S.; BAGHDADLI, T.; KNAPP, S.; NORDELL, B.; Legionella disinfection by solar concentrator system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 70, p. 786-792, 2017.
- ARDUINO. Arduino (Online). 2015. Disponível em <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 março 2017

- BEN, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- BORNES, Wladimir Gutiérrez. Implementación de equipo concentrador solar parabólico tipo scheffler. Universidade Técnica Federico Santa Maria. Chile, 2005.
- BHASME, S., THOSAR, A. G. ThosarPerformance Analysis of Scheffler Reflector used for Solar Dry CleaningInternational. Journal of Engineering Innovation & Research. Volume 4, Issue 4, ISSN: 2277 – 5668, 2015.
- BSRN, Baseline Solar Radiation Network – Quality Assurance of Database World Meteorological Organization. Disponível: <<http://www.bsrn.awi.de/>> Acessado em: 22 janeiro de 2017.
- CASINIÈRE, A. C.; Revilla, V. E. C. La radiación solar em el sistema tierra-atmósfera. Valladoild: Universidad de Valladolid, Secretariado de publicaciones e Intercambio Editorial, 2008. III Serie.
- DIB, E. A. Projeto e construção de um concentrador solar de foco fixo utilizado para o aquecimento de um forno. Aracaju: UNIT, 2009. 166 p.
- DIGRAZIA, M., JORGENSEN, G. Reflechtech mirror film: Designflexibility and durability in reflecting solar application. SOLAR Conference Proceedings. 2010.
- FUNK, A. P.; Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. Solar Energy, 68(1), p. 1 – 7, 2000;
- EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA); GREENPEACE. Wind force 12: a blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020. London: EWEA, 2004. Disponível em: <<http://www.ewea.org>>. Acesso em: 22 março 2017.
- IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola LSPA. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>>. Acessado em: 02 maio de 2017.
- IBGE. Banco de Dados infográficos: dados gerais do município, 2017. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=280030>>. Acessado em 15 de novembro de 2017.
- INCROPERA, F. P. DeWitt; Bergman; Lavine. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Base de informações municipais. Rio de Janeiro, 2010.
- IEA, International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2016. Towards Sustainable Urban Energy Systems: Paris, 2016. Disponível: <[http://www.iea.org/bookshop/719-Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2016](http://www.iea.org/bookshop/719-Energy_Technology_Perspectives_2016)> Acessado em: 22 novembro de 2016.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Estação Aracaju - A409. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acessado em: 15 de novembro de 2017.
- KUMAR S; KANDPAL, T C; MULLICK, S C; Experimental test procedure for determination of the optical efficiency factor of a paraboloid concentrator solar cooker. Renewable Energy, 7(2), p. 145 – 151, 1996.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O., Energia e Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3ª Edição revisada e ampliada. Editora EDUSP, 2011.
- MACKAY, M. E. Solar Energy An Introduction Oxford University Press; Oxford, 1 edition, p. 336, 2015.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; YAMASHITA, C.; PEREIRA, S. V.; NETO, S. L. M. Base da dados Climato-ambientais aplicados ao setor energético – Projeto Sonda. ANAIS XII SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia/GO, 2005.
- MCROBERTS, M. Arduino básico / Michael McRoberts; [tradução Rafael Zanolli]. São Paulo: Novatec Editora, 2011.
- MULLICK, S C; KANDPAL, T C; KUMAR S; Thermal test procedure for a paraboloid concentrator solar cooker. Solar Energy, 46(3), p. 139 – 144, 1991.
- MUNIR, A. A, HENSEL, O. ,SCHEFFLER, W. Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. Solar Energy, v. 84, p. 1490–1502, 2010.
- OLIVEIRA, I. R.; THOMAZ JR, J. C.; NOGUEIRA, J. L. M.; MELO, J. M. Princípios da Instalação de uma Estação Solarimétrica – SONDA Uma Visão Teórica e Preliminar – Parte I. IV Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia, Pelotas, 2011.

- PAHISSA, M. Instalaciones de energía solar en países en vías de desarrollo: reflectores Scheffler en la India. *Ecología Política. Journal Article* N° 27. Editora ICARIA, 2014. P 149-158.
- PATIL, R. J., AWARI, G. K., SINGH, M. P. Experimental Analysis of Scheffler reflector water heater. *Thermal science*, v. 15, n° 3, p. 599-604, 2011.
- PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2ª ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
- REGIN, A.F. et al. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, p. 2438–2458, 2008.
- SILVA, F. R. da; CARVALHO, M. J. M. de. Implantação da Estação Solarimétrica de Natal-RN. II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E III CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 2008.
- SANTOS, P.H.C. Construção de um sistema de aquecimento híbrido solar/gás para forno de casa de farinha / Dissertação de Mestrado – Aracaju: UNIT, 2015.
- SOLARGARD. Disponível em <<http://www.solargard.com/product/silver/>>. Acessado em 14 de novembro de 2017.
- THERMINOL. Disponível em <<https://www.therminol.com/products/Therminol-XP>>. Acessado em 14 de novembro de 2017.
- TIBA, C. *et al.* Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p.
- VENTURA, A. F. *et al.*, O Brasil no Contexto Energético Mundial. volume 6. NAIPPE/USP. Nova Série Editora, 2009.