



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**THIAGO TAKETARO GUILHERME WATANABE**

**COMPARAÇÃO DE ARRANJOS DE COLETORES DE CALHA PARABÓLICA COM  
RELAÇÃO AO INTERVALO DE RASTREAMENTO E AO TUBO ABSORVERDOR**

**FORTALEZA**

**2017**

THIAGO TAKETARO GUILHERME WATANABE

COMPARAÇÃO DE ARRANJOS DE COLETORES DE CALHA PARABÓLICA COM  
RELAÇÃO AO INTERVALO DE RASTREAMENTO E AO TUBO ABSORVERDOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

Coorientadora: Profa. Maria Eugênia Vieira da Silva, *Ph. D.*

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G974c Guilherme Watanabe, Thiago Taketaro.

Comparação de arranjos de coletores de calha parabólica com relação ao intervalo de rastreamento e ao tubo absorvedor / Thiago Taketaro Guilherme Watanabe. – 2017.  
86 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

Coorientação: Prof. Dr. Maria Eugênia Vieira da Silva.

1. Energia solar. 2. Rastreamento solar. 3. Coletores parabólicos. 4. Automatização. 5. Arduino. I. Título.  
CDD 620.1

---

THIAGO TAKETARO GUILHERME WATANABE

COMPARAÇÃO DE ARRANJOS DE COLETORES DE CALHA PARABÓLICA  
COM RELAÇÃO AO INTERVALO DE RASTREAMENTO E AO TUBO  
ABSORVEDOR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 16/10/2017

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Valente Bueno  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Silvia Teles Viana  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, ao meu irmão, e a minha  
esposa.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo e ser o alicerce para minha vida.

Aos meus pais Luis e Ana, meu irmão Thiego pela compreensão e pelo amor que me é dado de maneira incondicional.

A minha esposa Danielle pelo amor, pela amizade, pela compreensão, por ser meu porto seguro e por estarmos juntos vencendo mais uma etapa da minha vida.

Aos meus familiares, pelo apoio.

Ao Professor Paulo Alexandre Costa Rocha pela excelente orientação acadêmica, confiança e pelos ensinamentos que levarei por toda a minha vida.

À Professora Maria Eugênia Vieira da Silva pela ótima co-orientação.

Ao Professor pela participação da banca de qualificação.

Aos meus colegas de mestrado Diego, Kaio e Lucas pelo companheirismo e boa convivência nesses dois anos de mestrado.

Aos bolsistas do laboratório pelo suporte dado nas operações e execução de testes.

Ao Valdi Matos de Almeida Júnior, pelo excelente trabalho e competência diante da secretaria do pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Every morning in Africa, a gazelle wakes up. It knows it must run faster than the fastest lion or it will be killed. Every morning a lion wakes up. It knows it must outrun the slowest gazelle or it will starve to death. It doesn’t matter whether you are a lion or a gazelle: when the sun comes up, you’d better be running.” (Dan Montano)

## RESUMO

O uso de energias renováveis vem crescendo a cada dia como uma alternativa à tecnologia de combustíveis fósseis. Isso se deve principalmente à busca por equipamentos menos poluentes que não prejudiquem o meio ambiente. A energia solar se apresenta como uma boa alternativa, devido a sua grande disponibilidade e potencial energético que pode ser aproveitado de várias maneiras, mas as mais conhecidas são a fotovoltaica e a heliotérmica. A primeira consiste na conversão da energia do Sol diretamente em eletricidade, e a outra utiliza o calor para aquecer fluidos, podendo também gerar energia elétrica. A pesquisa e a utilização de coletores solares parabólicos vêm crescendo nos últimos anos devido à capacidade de aquecer fluidos a altas temperaturas em uma área relativamente pequena. Os coletores solares parabólicos consistem em uma base que suporta uma superfície que reflete os raios do Sol em um tubo absorvedor pelo qual passa um fluido, muitas vezes água. No Laboratório de Energia solar e Gás Natural foram implementados dois coletores solares parabólicos de pequeno porte e foram realizados testes para melhorar os arranjos de modo a aumentar a eficiência térmica dos mesmos. Por fim, foi feita uma automatização para evitar que os coletores sejam girados manualmente, o que dispende tempo e esforço. Com um motor de passo e como controle utilizou-se um sistema de baixo custo com o Arduino e LDRs. Ainda foi feito um dimensionamento de painéis fotovoltaicos a fim de tornar o independente da rede elétrica. Ao final dos testes realizados verificou-se que o melhor arranjo encontrado foi o automatizado com rastreamento a cada 5 minutos, pois a cada 1 minuto o sistema fica ligado sem necessariamente girar porque não deu tempo de haver diferença nos LDRs e com tempo de 15 minutos perde-se porque os raios do Sol se desalinham do foco não atingindo o absorvedor.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Rastreamento Solar. Coletores parabólicos, Automatização, Arduino.



## ABSTRACT

The use of renewable energy is growing every day as an alternative to fossil fuel technology. This is mainly the search for less polluting equipment that do not harm the environment. solar energy is known as a good alternative due to its wide availability and energy potential that can be used in various ways, but the best known are the photovoltaic and solar thermal. The first one is the sun's energy conversion into electricity and the other uses heat to warm fluids that can also generate electricity. The research and the use of parabolic solar collectors have been growing because of the ability to heat fluids to high temperatures in a relatively small area. Parabolic solar collectors consist of a base which supports a surface that reflects the sun's rays on an absorber pipe through which passes water. In the solar Energy and Natural Gas Laboratory two solar collectors of small parabolic were deployed and tests were conducted to improve the arrangements in order to increase the thermal efficiency of the collectors. Finally, an automation has been made to prevent the collectors to be manually rotated, which expends time and effort. With a step motor and a control we used a low-cost system with Arduino and LDRs. It was also made a design of photovoltaic panels in order to make the system hybrid and independent of the electric grid. At the end of the tests performed, it was found that the best was the one with tracking every 5 minutes, because adjusting every 1 minute the system activates without necessarily moving since there was not time to make a difference in the LDRs; and with a tracking time of 15 minutes there was power lost, since the sun rays are dislodged from the focus not hitting the absorber.

**Keywords:** Solar Energy, Solar Tracking, Parabolic Collectors, Automation, Arduino.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Produção de petróleo no mundo.....   | 14 |
| Figura 2: Consumo de petróleo no mundo. ....   | 14 |
| Figura 3: Consumo e Produção de Petróleo no Brasil.....  | 15 |
| Figura 4: Energia Gerada pela utilização de concentradores solares. ....   | 15 |
| Figura 5: Classificação dos coletores solares. ....  | 23 |
| Figura 6: Coletor solar parabólico. ....   | 24 |
| Figura 7: Parâmetros de coletor solar parabólico. ....   | 26 |
| Figura 8: Imagem do Arduino Uno. ....  | 29 |
| Figura 9: Esquema de um LDR. ....  | 29 |
| Figura 10: Imagem de um LDR.....   | 30 |
| Figura 11: Tipos de utilização de LDR para rastreamento do Sol.....  | 30 |
| Figura 12: Esquema unifilar de SFD com atedimento exclusivamente c.c.....  | 32 |
| Figura 13: Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos isolados. ....   | 33 |
| Figura 14: Exemplo de perfis de radiação solar diária com valores equivalentes de HSP. ....  | 34 |
| Figura 15: Curva de Gauss. ....  | 36 |
| Figura 16: Coletor Parabólico. ....  | 38 |
| Figura 17: Vista do coletor completo. ....   | 39 |
| Figura 18: Foto dos coletores parabólicos do LESGN.....  | 39 |
| Figura 19: Dispositivo para ajuste da declinação. ....   | 40 |
| Figura 20: Tubo absorvedor.....  | 41 |
| Figura 21: Película refletora. ....  | 41 |
| Figura 22: Visualização da chapa espelhada, do tubo de vidro e da espuma isolante.....   | 42 |
| Figura 23: Disposição dos LDR's para rastreamento. ....  | 42 |
| Figura 24: Localização dos Coletores Parabólicos.....  | 44 |
| Figura 25: Dados da Hora a Sol Pleno para Cidade de Fortaleza.....   | 44 |
| Figura 26: Sombreamento dos Edifícios no Equinócio em a) 21 de Março e c) 22 de Setembro e Solstício em b) 21 de Junho e d) 22 de Dezembro. .... | 45 |
| Figura 27: Experimento 1 .....   | 50 |
| Figura 28: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 1.....  | 52 |
| Figura 29: Experimento 2. ....   | 53 |
| Figura 30: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 2.....  | 55 |
| Figura 31: Experimento 3. ....   | 56 |
| Figura 32: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 3.....  | 58 |
| Figura 33: Experimento 4.....  | 58 |
| Figura 34: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 4.....  | 60 |
| Figura 35: Experimento 5.....  | 61 |
| Figura 36: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 5.....  | 62 |
| Figura 37: Buchas de vedação. ....   | 63 |
| Figura 38: Experimento 6. ....   | 64 |
| Figura 39: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 6.....  | 65 |
| Figura 40: Experimento 7.....  | 66 |
| Figura 41: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 7.....  | 68 |
| Figura 42: Experimento 10.....   | 68 |
| Figura 43: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 8.....  | 70 |
| Figura 44: Ângulos Solares (a) e Declinação Solar (b).....   | 82 |
| Figura 45: Tipos de conversões da energia Solar. ....  | 84 |
| Figura 46: Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro. ....                                       | 86 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Parâmetros dos concentradores solares parabólicos. .... | 48 |
| Tabela 2: Resumo estatístico. ....                                | 51 |
| Tabela 3: Análise de variância do experimento 1. ....             | 52 |
| Tabela 4: Resumo estatístico do experimento 2. ....               | 54 |
| Tabela 5: ANOVA Experimento 2. ....                               | 55 |
| Tabela 6: Resumo estatístico do experimento 3. ....               | 57 |
| Tabela 7: ANOVA Experimento 3. ....                               | 57 |
| Tabela 8: Resumo estatístico do experimento 4. ....               | 59 |
| Tabela 9: ANOVA Experimento 4. ....                               | 60 |
| Tabela 10: Resumo estatístico do experimento 5. ....              | 61 |
| Tabela 11: ANOVA Experimento 5. ....                              | 62 |
| Tabela 12: Resumo estatístico do experimento 6. ....              | 65 |
| Tabela 13: ANOVA Experimento 6. ....                              | 65 |
| Tabela 14: Resumo estatístico do experimento 7. ....              | 67 |
| Tabela 15: ANOVA Experimento 7. ....                              | 67 |
| Tabela 16: Resumo estatístico do experimento 8. ....              | 69 |
| Tabela 17: ANOVA Experimento 8. ....                              | 70 |
| Tabela 18: Valores de n para os dias do ano. ....                 | 83 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| PTC     | <i>Parabolic Trough Concentrator</i>                                   |
| CSP     | Concentrador Solar Parabólico  |
| PCM     | <i>Phase Change Material</i>   |
| LESGN   | Laboratório de Energia Solar e Gás Natural                             |
| EIA     | <i>U.S. Energy Information Administration</i>                          |
| BP      | <i>British Petroleum</i>   |
| REN21   | <i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>            |
| LDR     | <i>Light Dependent Resistor</i>  |
| PLC     | <i>Programmable Logic Controller</i>                                   |
| PIC     | <i>Programmable Interface Controller</i>                               |
| SFD     | Sistemas fotovoltaicos domiciliares                                    |
| C.C     | Corrente Contínua  |
| C.A     | Corrente Alternada   |
| PWM     | <i>Pulse Width Modulation</i>  |
| Cepel   | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica                                |
| Cresesb | Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito |
| SFV     | Sistema Fotovoltaico   |
| HSP     | Horas a Sol Pleno  |
| LED     | <i>Light Emitting Diode</i>  |

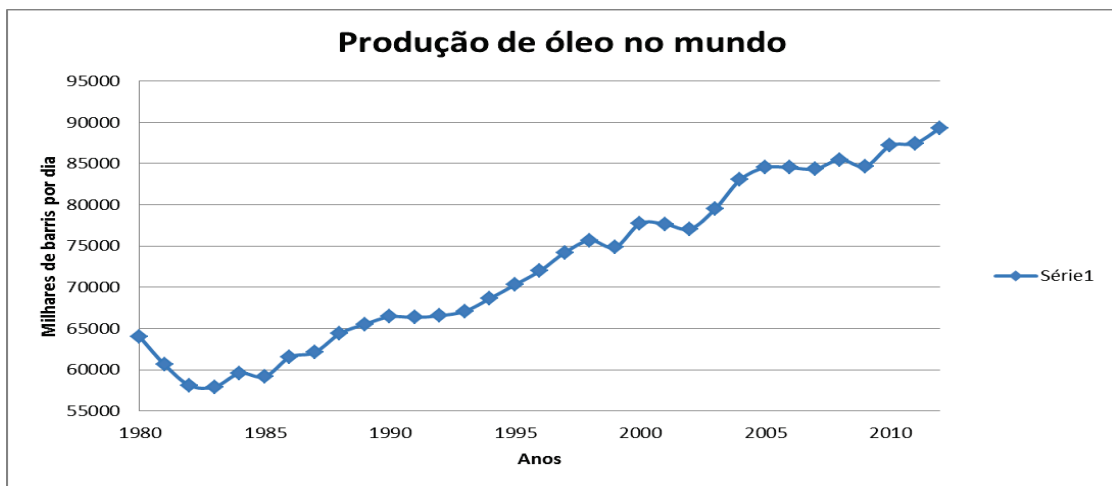
## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>14</b> |
| <b>2</b>     | <b>OBJETIVOS</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Geral</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>2.2</b>   | <b>Específicos</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>3</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                               | <b>18</b> |
| <b>4</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                               | <b>22</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>Energia Solar</b> .....                                       | <b>22</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Coletores Solares</b> .....                                   | <b>22</b> |
| <b>4.2.1</b> | <i>Coletores Solares Parabólicos e Rastreamento</i> .....        | <b>23</b> |
| <b>4.2.2</b> | <i>Parâmetros dos Coletores Parabólicos</i> .....                | <b>25</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>Arduino</b> .....   | <b>28</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>LDR</b> .....   | <b>29</b> |
| <b>4.5</b>   | <b>Painéis Fotovoltaicos</b> .....                               | <b>30</b> |
| <b>4.6</b>   | <b>Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico</b> .....             | <b>31</b> |
| <b>4.6.1</b> | <i>Avaliação do Recurso Solar</i> .....                          | <b>33</b> |
| <b>4.6.2</b> | <i>Localização</i> .....   | <b>34</b> |
| <b>4.6.3</b> | <i>Configuração e Levantamento de Demanda e de Consumo</i> ..... | <b>34</b> |
| <b>4.7</b>   | <b>Conceitos de Estatística Descritiva e Indutiva</b> .....      | <b>35</b> |
| <b>5</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                 | <b>38</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>Dimensionamento Fotovoltaico</b> .....                        | <b>43</b> |
| <b>6.0</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                             | <b>48</b> |
| <b>6.1</b>   | <b>Parâmetros dos Concentradores</b> .....                       | <b>48</b> |
| <b>6.2</b>   | <b>Testes Realizados</b> .....                                   | <b>48</b> |
| <b>6.3</b>   | <b>Programação do Arduino</b> .....                              | <b>71</b> |
| <b>7</b>     | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | <b>75</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>77</b> |
|              | <b>ANEXO A – ENERGIA SOLAR</b> .....                             | <b>81</b> |
|              | <b>ANEXO B – ENERGIA SOLAR</b> .....                             | <b>86</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

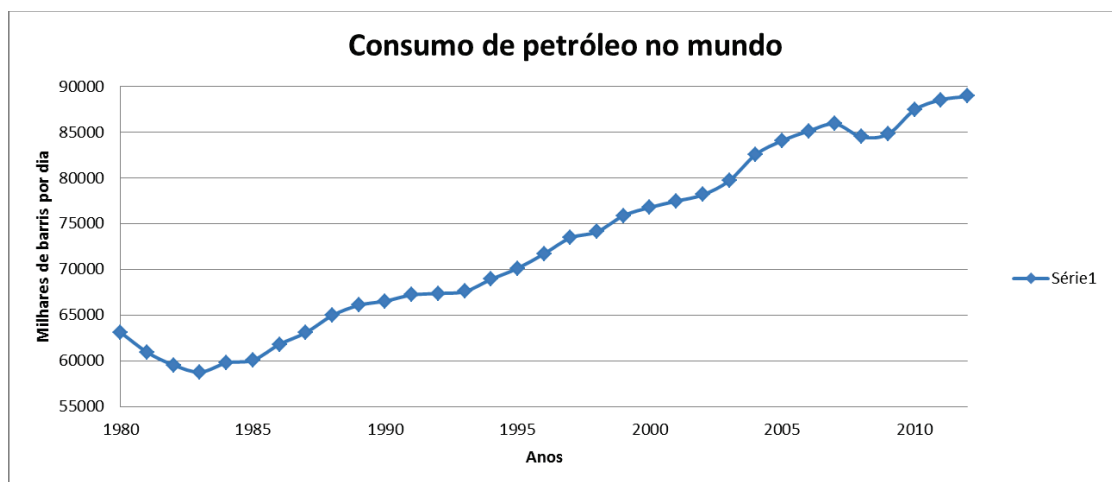
Os combustíveis fósseis persistem como fontes de energia importantes em nossa sociedade, entretanto o uso de energias renováveis vem crescendo cada vez mais. Há que se buscar novas alternativas energéticas, pois, como é possível visualizar nas Figura 1 e Figura 2, há um aumento de produção e consumo de petróleo gerando assim mais poluição e seus efeitos nocivos a natureza. Na Figura 3 percebe-se que o Brasil importa petróleo, já que seu consumo é maior que a produção.

Figura 1: Produção de petróleo no mundo.



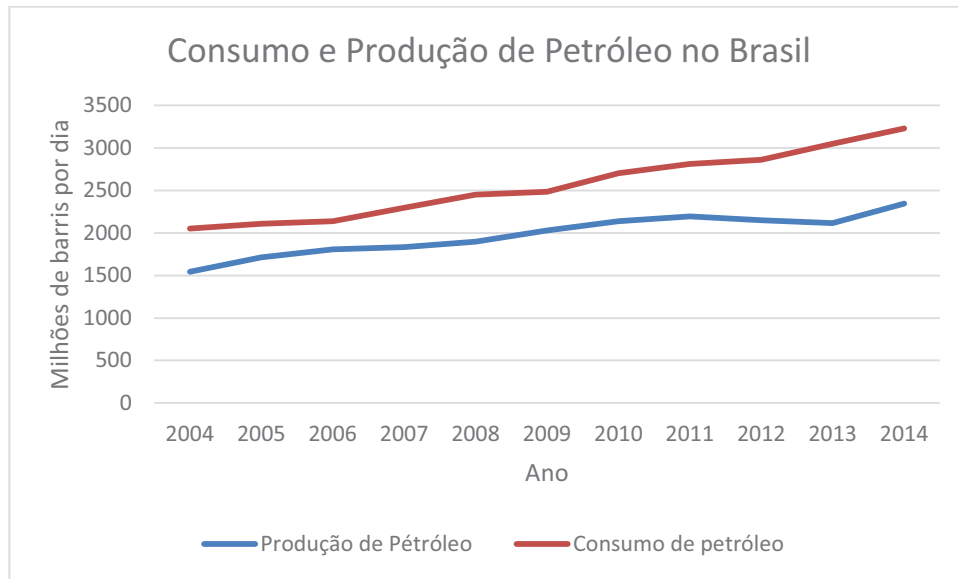
Fonte: U.S. Energy Information Administration – EIA - editado pelo autor, 2012.

Figura 2: Consumo de petróleo no mundo.



Fonte: U.S. Energy Information Administration - EIA - editado pelo autor, 2012.

Figura 3: Consumo e Produção de Petróleo no Brasil.

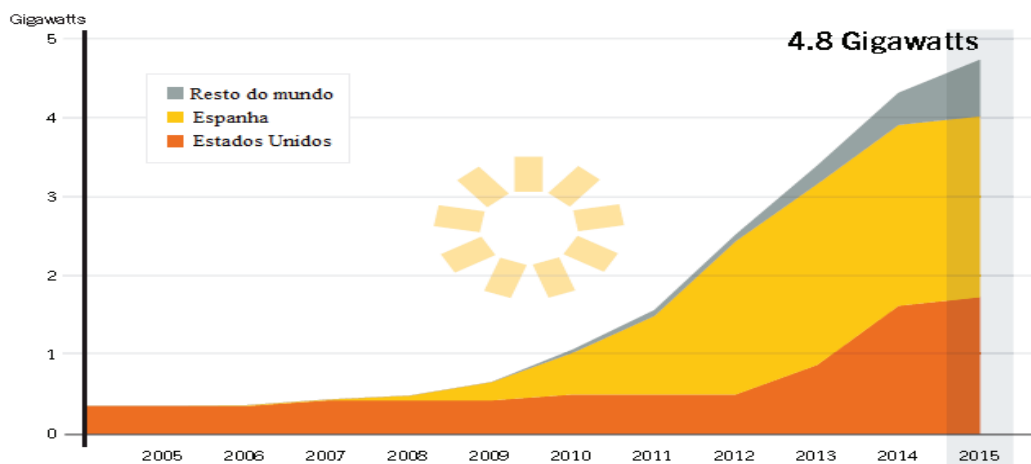


Fonte: British Petroleum – BP - editado pelo autor, 2015.

As fontes de energias renováveis como a eólica e solar vêm se destacando no cenário mundial como das mais utilizadas. Elas estão sendo cada vez mais aprimoradas tecnologicamente para viabilizá-las financeiramente, pois ainda possuem um custo inicial elevado.

A energia solar se divide basicamente em ativa e passiva: a fotovoltaica e a térmica. A energia solar térmica tem ganhado um grande destaque no meio devido ao seu grande potencial de uso (HERBERT *et al.*, 2016). Na Figura 4 está ilustrada a expansão da energia solar através de concentradores solares.

Figura 4: Energia Gerada pela utilização de concentradores solares.



Fonte: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21 - adaptado, 2015.

Apesar de 90% da capacidade instalada de CSP estar concentrada nos Estados Unidos e Espanha, em 2015, havia várias construções de usinas na Austrália, Chile, China, Índia, Israel, México, Arábia Saudita, e África do Sul (REN21, 2015).

Para se tornar uma fonte de conversão de energia térmica interessante, há várias maneiras de melhorar os dispositivos que captam a radiação solar, como coletores com formatos geométricos que conhecidamente concentram a radiação, como os parabólicos ou cônicos.

Outras formas de aumentar a eficiência do sistema é utilizar coberturas seletivas, nanofluidos e/ou rastreadores solares (HERBERT *et al.*, 2016; BEHAR *et al.*, 2015).

Os coletores solares podem ser fixos, ou seja, apontam para apenas uma posição geográfica, o que não garante melhor aproveitamento da radiação quando o Sol estiver fora da linha a qual o coletor está apontando. Podem também ser móveis (rastreadores solares), se mostrando uma opção interessante, uma vez que automatizam o processo de busca da posição de maior radiação. Os rastreadores podem ser de um, de dois eixos ou multi-eixos.

Para automatizar esse processo utilizam-se microcontroladores, que são programados para fazer um determinado trabalho. Na presente dissertação, utilizou-se o *hardware* da plataforma Arduino.

O Arduino nos últimos anos vem se mostrando uma alternativa interessante, pois é possui baixo custo e há um vasto conteúdo na *internet* que pode auxiliar o usuário na programação do projeto

O trabalho visa fazer um aprimoramento do coletor parabólico com rastreador através de implantação de placas fotovoltaicas para alimentação dos motores de passo, bem como caracterizar e aperfeiçoar os arranjos como, por exemplo, a utilização de um tubo de vidro para melhorar a eficiência térmica, visto que há uma lacuna de trabalhos e utilização de CSP no Brasil.



## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em montar dois coletores parabólicos e realizar aperfeiçoamento através de arranjos de modo a aumentar sua eficiência térmica. Essa análise foi baseada em avaliações de temperatura de entrada e saída da água nos tubos absorvedores através de um *datalogger* conjuntamente com a radiação solar do dia do teste e ainda realizar a automatização do sistema utilizando a plataforma Arduino.

### 2.2 Específicos

Os objetivos específicos consistem na montagem e na realização de testes:

1. Montagem dos coletores parabólicos;
2. Teste de qual o melhor intervalo de tempo para girar o coletor de modo a deixá-lo perpendicular aos raios do Sol;
3. Averiguação de qual o melhor tubo absorvedor: o de cobre ou o de aço;
4. Substituição da superfície refletora por um adesivo de alta reflexão;
5. Substituição do adesivo de alta reflexão por uma placa refletora de aço;
6. Diminuição das perdas por convecção através de tubos de vidros isolados com espuma térmica;
7. Automatização do sistema de rastreamento;
8. Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para alimentação dos motores.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Kalogirou (2004) fez uma revisão dos principais tipos de coletores solares, como os de placa plana, parabólico, lentes de Fresnel entre outros, trazendo análises ópticas, térmicas e termodinâmicas. Ainda descreveu várias aplicações de uso como processos de aquecimento, dessalinização, refrigeração etc.

Keyhani *et al.* (2009) buscaram descrever métodos de maximização de rastreadores solares e seus tipos. O rastreamento pode melhorar a coleta de energia entre 10 a 100% dependendo do período do ano e das condições geográficas, sendo que o aumento do consumo de energia pela utilização desse sistema chega a ser de 2 a 3%. Também trouxeram maneiras de utilização do LDR para rastreamento e outros sistemas.

Barbosa (2009) desenvolveu um sistema de rastreamento de concentradores parabólicos de baixo custo. Utilizou um microcontrolador e um LDR para realizar o rastreamento e obteve resultados satisfatórios. Para girar o concentrador, ele acoplou uma caixa de engrenagem ao motor de passo para evitar que a parábola deslizesse enquanto o motor permanecia desabilitado.

García *et al.* (2010) trouxeram uma abordagem histórica da utilização de coletores parabólicos e suas aplicações. Eles descreveram que a primeira experiência prática aconteceu em 1870 nos Estados Unidos, quando um engenheiro sueco chamado John Ericsson construiu um coletor de  $3,25 \text{ m}^2$ , o qual produzia vapor para funcionar um motor. O autor faz um apanhado de vários artigos trazendo o estado da arte desse sistema, como os tipos, onde e como estão sendo usados.

Moraes (2012) desenvolveu um rastreador solar para placas fotovoltaicas utilizando Arduino e LDR para melhorar o rendimento, barateando assim seus custos. Os testes em ambiente interno apresentaram bom desempenho, o que não aconteceu quando fez os experimentos em ambiente externo. Isso ocorreu através de erros de construção do protótipo. Apesar do rastreamento realizado não ter sido feito de forma precisa, o autor considerou os resultados satisfatórios quando mediu a voltagem das placas fotovoltaicas.

Rolim *et al.* (2012) descreveram em seu artigo a importância de alguns parâmetros necessários para construção de um coletor parabólico, como a distância focal, ângulo de borda e dimensão angular do Sol. Eles fizeram um gráfico que analisa a eficiência térmica em função do ângulo de borda. Como resultado, o melhor ângulo de borda foi de  $90^\circ$ .

Aguilar *et al.* (2014) relataram a construção de um coletor parabólico com dimensões parecidas com a deste trabalho. Com uma abertura de parábola de 0,5 m e 0,95 m

de comprimento alcançaram uma temperatura de 47,3 °C com uma radiação solar de 783W/m<sup>2</sup> e vazão de 0,2 L/min.

Galdino *et al.* (2014) elaboraram um manual de engenharia de sistemas fotovoltaicos abordando desde o aspecto geral que descreve a utilização da energia solar e os ângulos, passando pela elucidação das células e dos módulos fotovoltaicos, até chegar no projeto, instalação, operação e manutenção do sistema.

Aaron e Rosenblatt (2014) fizeram um sistema de rastreamento primeiramente usando equações angulares e temporais do Sol e depois utilizando o LDR, e para isso usaram como plataforma o Arduino. O sistema consistiu em controlar a entrada de luz em uma casa com baixo custo utilizando servomotores.

Behar *et al.* (2015) abordaram os parâmetros construtivos dos coletores parabólicos e uma modelagem matemática para previsão de desempenho térmico. Os resultados foram obtidos através do uso do *Engineering Equation Solver* (EES) com o outro programa desenvolvido pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). As médias da incerteza das medidas do EES foram de 0,64% contra 1,11% do NREL. Isso deveu-se a melhoras nos procedimentos de considerações do modelo para perda de calor.

Herbert *et al.* (2016) escreveram sobre uma revisão dos coletores solares parabólicos e suas principais aplicações, como aquecimento de fluidos, dessalinização, refrigeração e usinas de energia.

Jiang *et al.* (2016) construíram coletores solares parabólicos de pequeno porte para aquecimento de água em lugares frios. Coletores solares parabólicos possuem a capacidade de aumentar a temperatura mais facilmente do que os coletores solares planos. Em suas análises constataram que a eficiência térmica aumenta com o aumento da temperatura do sistema, chegando a 67%, já em dias muito frios a eficiência térmica chegou a 26%. Realizaram também testes com ventos de 1,7 m/s e 5,0 m/s e verificaram que os coletores parabólicos são muito sensíveis a perda de energia por convecção, pois a eficiência térmica caiu de 67% para 56% nesse caso. Realizaram-se testes com tubos evacuados revestidos e sem serem revestidos. Nesse teste ambos apresentaram eficiências semelhantes em condições normais, mas em dias muito frios, no vidro não revestido, a temperatura do fluido caiu mais rápido do que os tubos revestidos.

Khan *et al.* (2015) fizeram uma revisão abordando as melhoras de desempenho dos coletores solares. Eles citam os coletores de placa plana, sistemas híbridos fotovoltaicos/térmicos, coletores de tubos evacuados e coletores parabólicos. Também abordaram os sistemas de rastreamento de um e dois eixos. Por fim relataram como é possível

melhorar o desempenho dos coletores através de modificações geométricas, superfícies de revestimento seletivo e o uso de nanofluidos.

Chakraborty *et al.* (2015) fizeram um rastreador solar microcontrolado usando resistor que varia com a luminosidade (LDR) e um motor de passo. Para isso colocaram cinco LDRs em um semi-cilindro distanciados 30° cada. No entanto os testes foram realizados em laboratórios, concluindo que, para medidas práticas, precisariam de mais LDRs para uma maior precisão. Quando não há nenhum LDR sensibilizado o motor gira de modo a deixar o coletor com a face para baixo para evitar de que pegue poeira e partículas, aumentando assim a longevidade do coletor fotovoltaico.

Skouri *et al.* (2016) realizaram testes de rastreamento solar em coletores solares parabólicos tipo prato. No primeiro experimento utilizaram um microcontrolador PIC 16F876 com LDR, o que apresentou muita instabilidade nos dias nublados. No segundo, utilizou os ângulos solares para realizar o rastreamento. Para isso os equipamentos usados foi um módulo de controle comercial. No terceiro coletor utilizou também os ângulos solares, mas o sistema de controle aplicado foi um *Programmable Logic Controller* (PLC) juntamente com uma caixa de redução para dar mais precisão no passo do motor. O melhor resultado dos experimentos foi o terceiro, uma vez que apresentou grande precisão, estabilidade e baixo custo em relação aos demais.

Vieira *et al.* (2016) realizaram uma análise comparativa entre painéis solares fotovoltaicos estáticos e com sistema de rastreamento usando LDR. Ao final, concluíram que o sistema de rastreamento aumentou em 11% a eficiência dos coletores. Afirmaram que esse valor foi baixo porque no lugar onde foram realizados os testes, próximo à Linha do Equador, o Sol não varia muito de posição e, portanto, o painel recebe uma grande radiação solar média o ano todo.

Stephens *et al.* (2016) criaram um coletor de dados de baixo custo usando a plataforma Arduino e sensores de temperatura, de intensidade luminosa, de proximidade, de concentração de CO<sub>2</sub> e um coletor de dados de voltagem, comparando com um produto comercial. O resultado foi que a plataforma Arduino apresentou resultados semelhantes em relação ao produto comercial, e além disso apresentou um menor custo.

Marfil *et al.* (2016) desenvolveram um coletor de dados de baixo custo e um controlador de vazão de água para controle de temperatura em ambientes internos. O projeto consiste em aumentar ou diminuir a vazão de água que passa entre dois vidros em uma janela e para isso utilizou-se a plataforma Arduino e sensores. Os testes apresentaram bons resultados se comparados com os produtos comerciais utilizados.

Visto que essa é uma tecnologia que está começando a ser mais utilizada e existe pouca literatura a respeito, o presente trabalho se mostra como uma oportunidade de aprofundar os estudos de CSP de pequeno porte híbrido, com alimentação de tensão através de coletores fotovoltaicos, através de uma análise de parâmetros construtivos.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A depleção dos poços de petróleo devido ao esgotamento de reservas e os danos ao meio ambiente pela utilização de combustíveis fósseis têm justificado a pesquisa de alternativas energéticas.

A geração de energia através dos combustíveis fósseis ocasiona graves degradações ambientais, como poluição do ar, chuva ácida, aquecimento global, etc. (KHAN *et al.*, 2015; JIANG *et al.*, 2016).

A conversão de fenômenos naturais como vento, ondas do mar, quedas d'água em energia limpa têm um grande potencial de crescimento devido ao avanço da tecnologia, mas ainda assim é cara, e o acesso a elas ainda é um pouco restrito (KALOGIROU, 2004). Contudo, nos últimos anos a energia solar e a energia eólica vêm sendo mais amplamente utilizadas e difundidas com objetivo dos países diminuírem a emissão de poluentes ao meio ambiente.

A energia solar tem se apresentado como uma boa alternativa, atualmente, pois é abundante, disponível e tem grande potencial comercial (KHAN *et al.*, 2015). Além das células fotovoltaicas estarem mais acessíveis, a energia heliotérmica também vem sendo usada como forma de obter energia, ou mesmo utilizando o calor para aquecer água ou óleo em sistemas como fogões e dessalinizadores.

Encontrar fontes de energia limpa eficientes será um dos grandes desafios da sociedade neste século. As fontes de energias renováveis como a energia solar podem suprir toda a demanda da humanidade. Realizando as conversões de energia, o Sol poderia fornecer 20TW, o que é aproximadamente o dobro do consumo mundial de energia com combustíveis fósseis (KEYHANI *et al.*, 2008; HERBERT *et al.*, 2016).

### 4.1 Energia Solar

Duffie e Beckman (2013) escreveram um detalhado livro sobre energia solar e dentre todas as referências lidas foi o mais utilizado para compor o Anexo A.

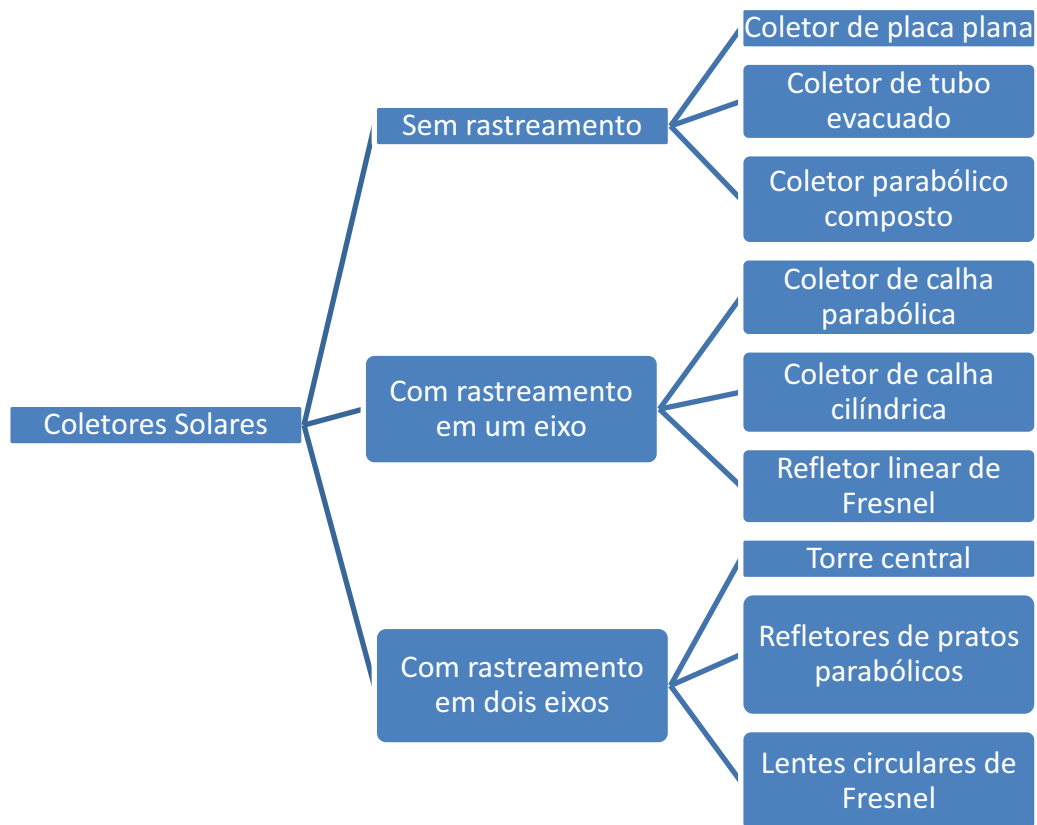
### 4.2 Coletores Solares

Herbert *et al.* (2016) fizeram uma revisão concisa e clara sobre PTC (*parabolic trough collector*) e sua utilização, por isso foi utilizado nesta seção.

Os coletores solares são dispositivos que absorvem a energia do Sol e então armazenam ou aquecem algum fluido, que pode ser água, ar, óleo ou algum Solvente orgânico, para determinados propósitos. (HERBERT *et al.*, 2016).

Não há um consenso em relação à divisão de tipos de coletores, devido à grande variedade existente, contudo, Khan *et al.* (2015) apresentaram uma divisão coerente com as tecnologias atuais, que pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Classificação dos coletores solares.



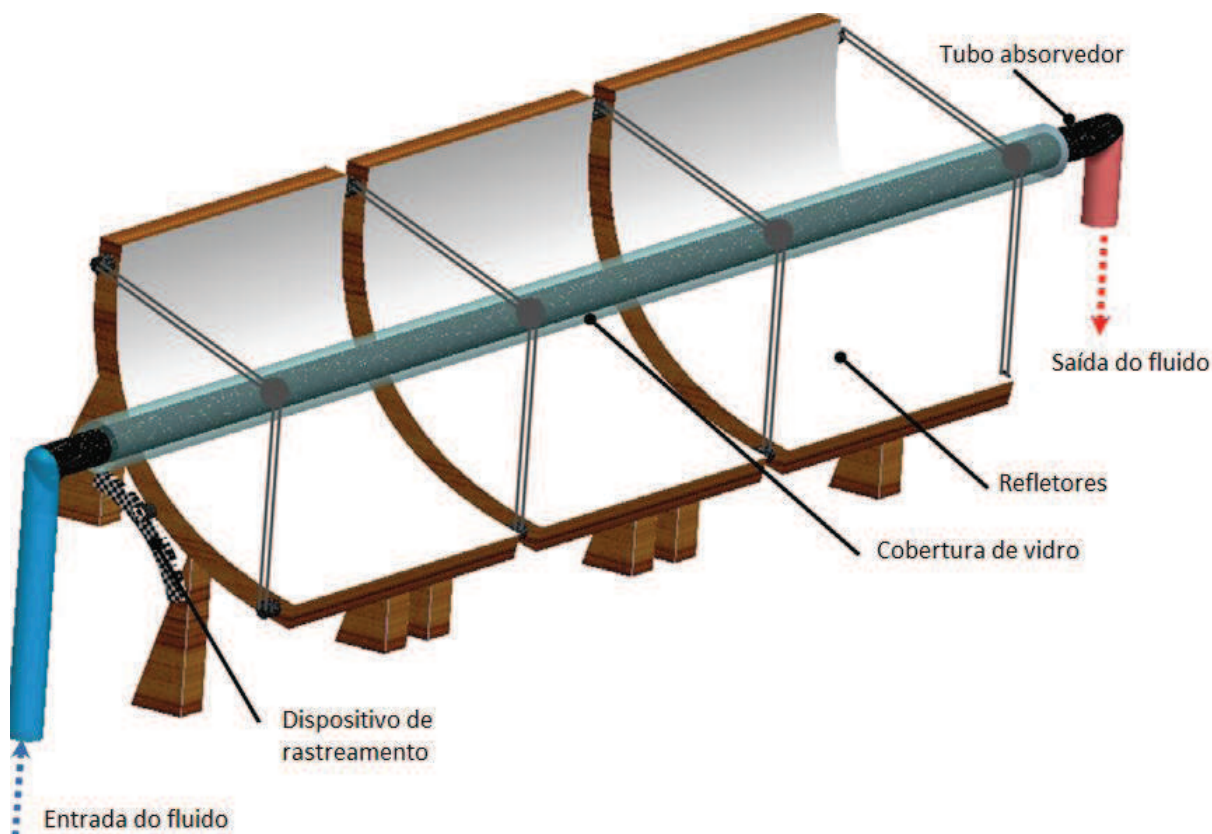
Fonte: KHAN *et al.*, 2015 adaptado.

#### 4.2.1 Coletores Solares Parabólicos e Rastreamento

Dentre todas as tecnologias de concentração solar existentes atualmente, uma promissora se refere aos coletores solares parabólicos (HERBERT *et al.*, 2016; BEHAR *et al.*, 2015). Os coletores solares parabólicos têm por característica apresentarem uma superfície parabólica refletora cuja linha focal concentra os raios de Sol em um tubo, como é possível ver na Figura 6. Esses tubos transparentes possuem uma proteção para evitar perda de calor por convecção. Geralmente esses equipamentos são utilizados para geração de vapor na

produção de energia elétrica. Possuem uma tecnologia confiável e robusta, que, no entanto, precisa ser barateada (KHAN *et al.*, 2015).

Figura 6: Coletor solar parabólico.



Fonte: KHAN *et al.* adaptado, 2015.

Os coletores parabólicos têm sido usados em várias áreas devido a sua capacidade de focar a luz solar com a ajuda de rastreadores. Eles podem alcançar altas temperaturas facilmente, e com alguns arranjos é possível diminuir a perda de calor, como a utilização de tubos evacuados (JIANG *et al.*, 2016).

As aplicações dos coletores parabólicos podem ser divididas em dois grupos. A primeira são as usinas de concentradores solares, onde as temperaturas podem alcançar de 300°C até 400°C. Elas são usadas conectadas a um ciclo de vapor direta ou indiretamente para geração de energia. O outro grupo consiste em coletores menores com alcance de temperatura de 100 a 250°C. As aplicações estão mais diretamente ligadas à parte da indústria em processos de aquecimento de espaços e de piscinas, por exemplo. Além disso, pode-se utilizá-los em refrigeração e dessalinização (GARCÍA *et al.*, 2010; AGUILAR *et al.*, 2014; HERBERT *et al.*, 2016).



Aguilar *et al.* (2014) destaca que alguns países têm usado esse tipo de tecnologia para produzir energia como, por exemplo, os Estados Unidos, na Califórnia com 354 MW e em Nevada com 64 MW. A Espanha possui uma plataforma de pesquisa em que é possível estudar em condições reais os processos de obtenção de escoamento de duas fases (líquido-vapor). Outros países como Índia, China e Emirados Árabes, também possuem usinas solares para geração de energia elétrica (HERBERT *et al.*, 2016). A localização de uma usina solar está diretamente dependente da disponibilidade solar durante o ano, mas esse não é o único princípio que rege a escolha do local. Pode-se citar o México, que possui uma alta incidência Solar, no entanto entraves como custo para construir, manter e operar foram os motivos pelos quais o impediu que essa tecnologia fosse aproveitada no país. No entanto, o principal motivo que estanca a utilização dessa geração de energia é a falta de incentivo e políticas públicas dos governos de alguns países.

#### 4.2.2 Parâmetros dos Coletores Parabólicos

Há alguns parâmetros na construção de um coletor parabólico que são importantes, como a taxa de concentração geométrica, ângulo aceitação e o ângulo de borda. Dentre os três, o mais importante é o primeiro, e representa a fração da abertura do coletor e da área do receptor. Aplicando a segunda lei da termodinâmica para a troca de calor entre o Sol e o receptor, a taxa de concentração máxima possível é da ordem de 212, relação descrita na Equação 4 (BEHAR *et al.*, 2015).

$$C_c = \frac{1}{\sin \theta_s} = 212 \quad (4)$$

Onde  $\theta_s$  é o ângulo subtendido pelo Sol.

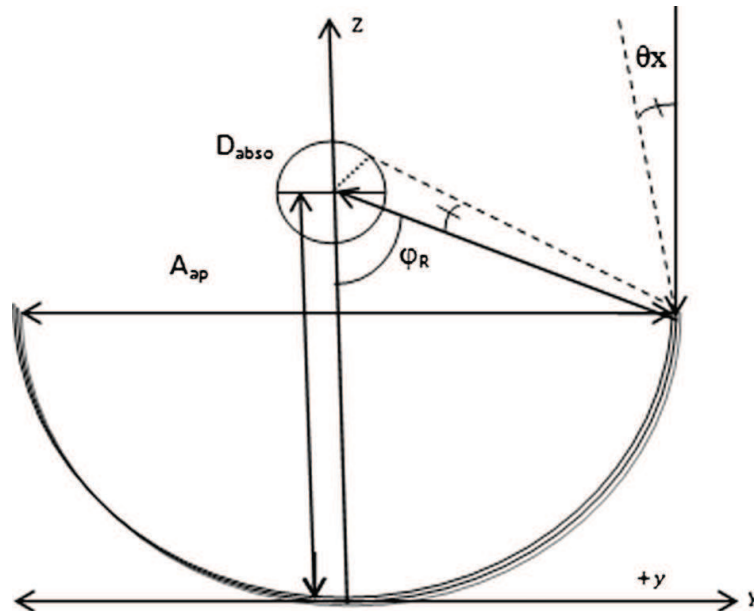
Para calcular a taxa de concentração, usa-se a Equação 5:

$$C = \frac{A_{ap}}{\pi D_{abs}} \quad (5)$$

Onde  $A_{ap}$  é o comprimento de abertura do coletor e  $D_{abs}$  é o diâmetro do absorvedor (AGUILAR *et al.*, 2014).

Observando a Figura 7, pode-se verificar alguns ângulos para o cálculo desses parâmetros.

Figura 7: Parâmetros de coletor solar parabólico.



Fonte: Behar et al., 2015.

O segundo parâmetro é o ângulo de aceitação, que é o alcance angular o qual todos os raios solares diretos que são refletidos pelo coletor alcançam o tubo absorvedor sem mover qualquer parte do coletor. A metade do ângulo de aceitação é função do diâmetro externo do absorvedor ( $D_{abso}$ ), a posição ( $y$ ) e a distância focal ( $f_{PTC}$ ). Estudos teóricos indicam que o ângulo mínimo de aceitação é de  $0,53^\circ$ . Esse ângulo, para os coletores disponíveis no mercado, está entre  $1^\circ$  e  $2^\circ$ .

Esse valor corresponde à média do ângulo sólido que corresponde a esfera do Sol vista da terra, portanto quando um coletor é projetado com valores menores que o mínimo, significa que uma parte da irradiação solar não atingirá o absorvedor.

$$\sin \theta_x = \frac{D_{abso}}{2 f_{PTC} \left( 1 + \left( \frac{y}{2f_{PTC}} \right)^2 \right)} \quad (6)$$

O ângulo de borda deve estar em torno de 70° a 110° e está relacionado ao comprimento do arco, à distância focal e ao comprimento de abertura do coletor (Equação 7) (GOSWAMI e KREITH, 2008; BEHAR *et al.*, 2015).

$$\tan \frac{\varphi_R}{2} = \frac{A_{ap}}{4f} \quad (7)$$

Cujo  $A_{ap}$  é a abertura do coletor.

Para uma maior eficiência de utilização dos coletores solares, é preciso que haja rastreamento dos raios do Sol. A radiação solar varia instantaneamente e a posição do sol varia no decorrer dos dias e dos meses do ano. O rastreamento pode ser dividido em três categorias: um, dois e três eixos (KHAN *et al.*, 2015; KEYHANI *et al.*, 2008; SKOURI *et al.*, 2016).

Em regiões com muitas nuvens, o ganho anual de sistemas com rastreadores podem chegar a 20%. Em geral, em áreas com boas condições o ganho chega entre 30 a 40% (KEYHANI *et al.*, 2008).

Os coletores de um eixo são orientados para o Norte-Sul, à medida que o rastreamento durante o dia é feito do Leste-Oeste. Já a outra categoria possui dois eixos que se movem simultaneamente perpendiculares um em relação ao outro. A vantagem desses em relação aos outros é a capacidade de se mover tanto na vertical como na horizontal, aumentando a varredura da radiação solar (KHAN *et al.*, 2015).

Há dois tipos de alinhamento para a máxima coleta da radiação Solar: a passiva ou mecânica e a ativa ou óptica ou elétrica. O alinhamento mecânico é feito através de um inclinômetro, e o método do bloco padrão e o método do transdutor de deslocamento linear. Entretanto não é indicado para larga escala, uma vez que esse alinhamento deverá ser feito em um coletor de cada vez. Já o alinhamento óptico utiliza fotogrametria, método do laser, entre outros. É um método mais caro, contudo mais preciso (KHAN *et al.*, 2015; KEYHANI *et al.*, 2008).

Keyhani (2008) dividiu os sistemas de rastreamento em passivo e ativo. O primeiro é baseado em expansões térmicas de materiais como *freon* ou ligas metálicas. Normalmente esse tipo de rastreador é composto por duplas de atuadores que funcionam um contra o outro para tentar balancear o sistema buscando uma igualdade na luminosidade. Os

sistemas passivos são menos complexos que os ativos e mais baratos, contudo em baixas temperaturas param de funcionar e não são amplamente aceitos entre os consumidores.

A maioria dos rastreadores são eletro-ópticos, que consistem em sensores que enviam um sinal para um microcontrolador que ativa um motor para um lado ou para o outro, dependendo da posição do Sol. Esses sensores podem ser foto-resistores ou células fotovoltaicas (KEYHANI *et al.*, 2008).

Os rastreadores de um eixo são os mais usualmente empregados para uso de coletores solares parabólicos, por causa de seu baixo custo em relação ao de dois eixos, pois o último possui uma maior complexidade de projeto, aumentando o número de conexões de tubos, perda térmica e um maior custo de manutenção (BEHAR *et al.*, 2015).

As unidades de controle local podem ser classificadas em dois grupos:

- O primeiro é baseado em sensores fotossensíveis, tais como banda de sombra (colocados nos concentradores) e rastreadores de linha de escoamento (colocados no absorvedor)

- O segundo é baseado em algoritmos astronômicos, que calculam o ângulo de elevação solar e o azimute para rotacionar o concentrador através de dispositivos eletrônicos (BEHAR *et al.*, 2015).

### 4.3 Arduino

Arduino é uma ferramenta com a qual é possível realizar vários experimentos. Envolve utilização de componentes eletrônicos como motores, *LEDs*, sensores e outros. É uma plataforma de prototipagem aberta. Por esses motivos, o Arduino se mostra como uma opção, hoje, muito difundida desde usuários caseiros até em experimentos científicos de várias áreas como Física, Química e Engenharias. Possui também uma grande comunidade na *internet* onde é possível tirar dúvidas com outros usuários (STEPHENS *et al.*, 2016; MARFIL *et al.*, 2015);

O Arduino Uno é uma placa que possui um microcontrolador do modelo ATmega328P e tem quatorze saídas/entradas digitais, das quais seis podem ser utilizadas como saídas PWM, 6 entradas analógicas, cristal de quartzo de 16MHz, conexão USB e uma entrada para fonte externa. A tensão de entrada pode ser de 7 a 12V. Na Figura 8 é possível visualizar a placa Arduino utilizada nos experimentos.

Figura 8: Imagem do Arduino Uno.



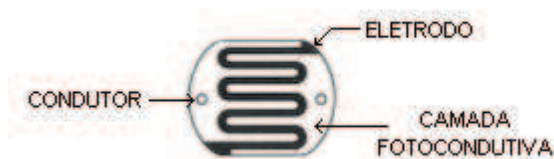
Fonte: Próprio autor.

#### 4.4 LDR

*Light Dependent Resistors* ou LDRs são resistências elétricas que variam em função da intensidade luminosa que incide sobre uma superfície fotossensível. Na Figura 9 é possível verificar como é um LDR, e a variação da resistência pode chegar a  $100\text{ M}\Omega$  no escuro e  $100\ \Omega$  quando está sendo iluminado diretamente (BARBOSA, 2009; MORAES, 2012; LIMA FILHO, 2014).

Um LDR é feito de materiais semicondutores que geralmente são sulfeto de cádmio (CdS) ou seleneto de cádmio (CdSe), por esses compostos terem ótimas respostas para variações de luz. Seu funcionamento consiste em excitar as moléculas que constituem o LDR através de um fóton de luz. Se esse fóton tiver energia suficiente para deslocar um elétron, ele passará para uma banda de valência deixando uma lacuna, diminuindo assim a condutividade do dispositivo. Logo, uma maior luminosidade acarretará em uma menor resistência que gerará uma menor tensão, então o Arduino utiliza essa informação para decidir se deve ou não movimentar o coletor (BARBOSA, 2009).

Figura 9: Esquema de um LDR.



Fonte: Dally et al. Adaptado, 1993.

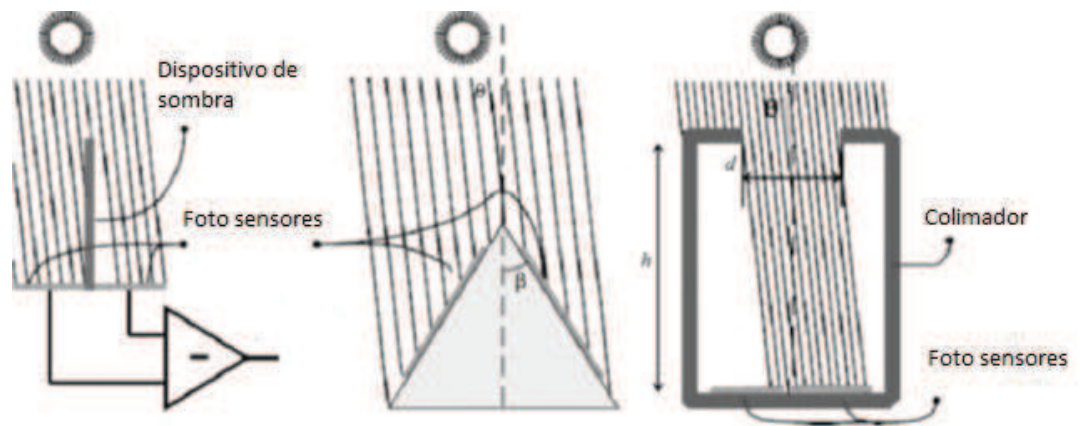
A vantagem de usar esse dispositivo é o baixo custo aliado à facilidade de ser encontrado em qualquer loja de eletrônica, além de ter um sinal de tensão da ordem de magnitude do microcontrolador. Há vários arranjos para sensibilizar o LDR, como é possível visualizar na Figura 10. Na Figura 11 há as disposições que são geralmente utilizadas em sistemas de rastreamento que utilizam o LDR.

Figura 10: Imagem de um LDR.



Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Tipos de utilização de LDR para rastreamento do Sol.



Fonte: KEYHANI et al. adaptado, 2009.

#### 4.5 Painéis Fotovoltaicos

Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico do selênio em 1839. As primeiras células fotovoltaicas desenvolvidas tinham uma eficiência de 11% e um custo muito caro de \$1000/W. Com esse valor, sua primeira utilização foi em projetos aeroespaciais, pois a energia do Sol seria a única disponível no espaço. Com o avançar das pesquisas, outros materiais

foram descobertos com essa propriedade de transformar energia do Sol em eletricidade. Podem-se citar alguns materiais mais utilizados, como silício e compostos de arseneto de Gálio (GaAs), sulfureto de Cádmio (CdS), sulfureto de Cobre (Cu<sub>2</sub>S) (KALOGIROU, 2004).

Ha três motivos principais para o silício amorfo ser o mais usado para placas fotovoltaicas. Primeiro o silício é abundante e pode ser extraído de maneira segura; ele também absorve mais eficientemente a luz do Sol, por exemplo; uma camada de 1µm é necessária, contra uma camada de 100µm que os cristalinos para absorver a mesma energia, reduzindo assim a quantidade de materiais utilizados. Finalmente, os filmes finos de silício amorfo podem ser depositados diretamente em materiais de apoio como vidro, placas de aço ou em lâmina de plástico (KALOGIROU, 2004).

Há basicamente dois tipos de utilização em energia solar fotovoltaica, o sistema isolado e o conectado à rede elétrica, que podem ser conectados a outras fontes de energia, sendo chamados de híbridos. O sistema isolado é independente da rede elétrica, geralmente é usado em áreas onde o acesso à energia é difícil. A energia produzida é normalmente armazenada em baterias, podendo ser usada posteriormente à noite ou em dias nublados (PINHO *et al.*, 2014).

Já no outro sistema a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica. Durante o dia, a energia gerada pode ser usada imediatamente ou pode ser vendida para a concessionária local. De noite, a energia utilizada é proveniente da concessionária. Por isso, utiliza-se um inversor que satisfaça às exigências de qualidade e segurança, para que não haja nenhuma perturbação que degrade o sistema elétrico que se interliga ao gerador fotovoltaico (PINHO *et al.*, 2014).

Há ainda uma divisão nos sistemas isolados, quem podem ser individuais ou em mini-redes. No primeiro, a geração é exclusiva para atendimento de uma única unidade consumidora, enquanto que no outro a geração é partilhada entre um pequeno grupo de unidades que estão geograficamente perto umas das outras (PINHO *et al.*, 2014).

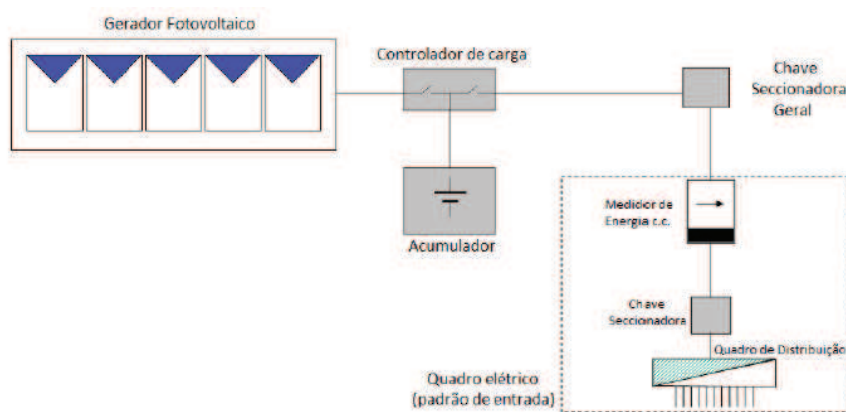
#### **4.6 Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico**

Pinho *et al.* (2014) escreveu um manual de projetos fotovoltaicos atualizado entre as bibliografias listadas, como o manual da Cepel - Cresesb (2004); Curso de Projeto de Sistemas solares Fotovoltaicos e Geração Distribuída da Essencial Cursos e Intercâmbios (2016), portanto foi referência para fundamentar os demais tópicos de dimensionamento.

Sistemas fotovoltaicos domiciliares (SFD) consistem no atendimento mediante energia solar de domicílios individuais. Os elementos que caracterizam um SFD são a própria carga e o gerador fotovoltaico. Em geral, é um sistema simples e basicamente deve possuir um acumulador e um controlador de carga para que prolongue a vida útil da bateria, evitando cargas e descargas excessivas (PINHO *et al.*, 2014).

Há três configurações básicas de SFDs: atendimento exclusivamente c.c., atendimento misto c.c/c.a e exclusivamente c.a. O primeiro é bastante difundido em países da África e da América do Sul para sistemas de pequena potência, abaixo de 100 Wp, e obviamente traz limitações em relação à utilização de equipamentos eletrodomésticos convencionais. Na Figura 12 é possível observar um esquema unifilar de SFD exclusivamente c.c (PINHO *et al.*, 2014).

Figura 12: Esquema unifilar de SFD com atendimento exclusivamente c.c.



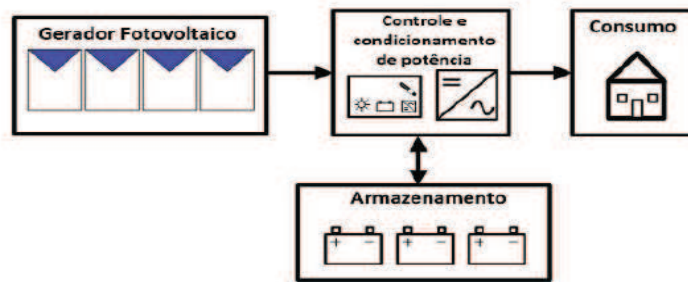
Fonte: PINHO *et al.*, 2014.

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico (SFV) envolve orientação dos módulos, disponibilidade de área, estética, disponibilidade de recurso Solar, demanda a ser atendida e diversos outros fatores. Em outras palavras, um SFV é o ajuste entre a energia recebida do Sol pelos módulos e a necessidade de suprir a demanda de energia elétrica (PINHO *et al.*, 2014).

Na Figura 13 é possível verificar que um SFV é basicamente constituído de um sistema de geração, equipamentos de controle e condicionamento de potência, nos casos dos sistemas isolados armazenamento de energia (PINHO *et al.*, 2014).



Figura 13: Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos isolados.



Fonte: PINHO *et al.*, 2014.

Seguem as etapas para um projeto de um SFV:

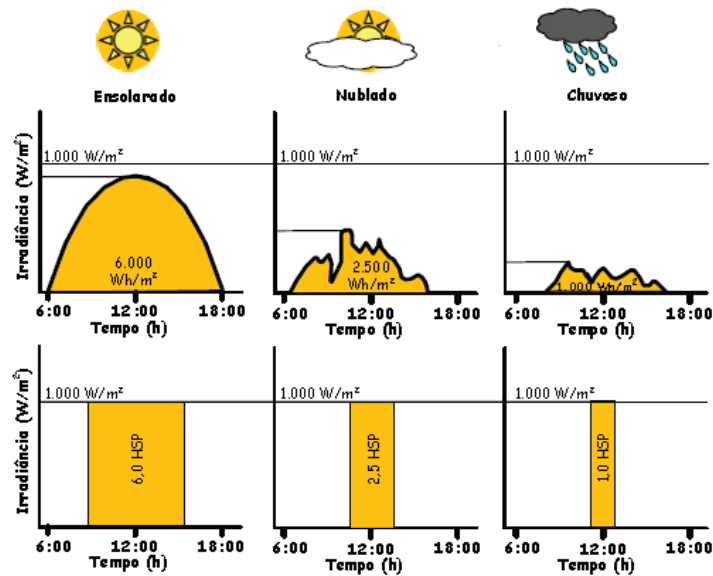
1. Levantamento adequado do recurso solar disponível no local da aplicação;
2. Definição da localização e configuração do sistema;
3. Levantamento adequado de demanda e consumo de energia elétrica;
4. Dimensionamento do gerador fotovoltaico;
5. Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência;
6. Dimensionamento do sistema de armazenamento.

#### 4.6.1 Avaliação do Recurso Solar

Nessa parte buscou-se quantificar a radiação solar global incidente sobre o painel fotovoltaico. A forma mais comum de apresentação de dados de radiação é através de valores médios mensais para a energia acumulada ao longo de um dia. As características de um gerador fotovoltaico estão diretamente ligadas a irradiância e a temperatura nos módulos, sendo que a primeira influência muito mais significativamente (PINHO *et al.*, 2014).

O número de horas a Sol pleno (HSP) é a grandeza que reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante igual a  $1 \text{ kW/m}^2$ . Na Figura 14 é possível observar como é calculada a HSP. A irradiação incidente nas placas solares é convertida em valores médios diários em  $\text{kWh/m}^2$ , fazendo assim um gráfico. A área abaixo da curva é o valor do HSP (PINHO *et al.*, 2014).

Figura 14: Exemplo de perfis de radiação solar diária com valores equivalentes de HSP.



Fonte: Pinho et al., 2014.

#### 4.6.2 Localização

A escolha da localização do painel fotovoltaico é determinante para seu desempenho, pois a presença de elementos arquitetônicos, elementos de sombreamento e superfícies reflexivas podem afetar a eficiência das placas solares. Outra importante análise a ser feita é a capacidade de troca de calor com o ambiente, porque uma placa quente acima das especificações do fabricante diminui a corrente do sistema (PINHO *et al.*, 2014).

Alguns programas são utilizados para fazer esse tipo de análise, como o *sketch up*, que analisa a presença de sombra na área em estudo no decorrer do ano e das horas do dia.

#### 4.6.3 Configuração e Levantamento de Demanda e de Consumo

A configuração basicamente irá depender das características de carga e da disponibilidade de recursos energéticos, se o sistema é isolado, c.a ou c.c, com ou sem armazenamento (PINHO *et al.*, 2014). A forma mais usada para determinar a demanda de uma unidade consumidora é somar as energias que cada equipamento consome. É geralmente feito em uma planilha com a lista de equipamentos, as potências, o tempo diário de funcionamento, e os dias de utilização por semana, a fim de se obter os dados diários de energia consumida em Wh/dia. A utilização de equipamentos c.c dispensa a utilização de inversor (PINHO *et al.*, 2014).

Em um sistema fotovoltaico isolado deve-se contar com um armazenamento de energia elétrica para atender o consumo nas horas em que há pouca ou nenhuma geração. Além disso, o armazenamento serve para equilibrar o fluxo de energia ao longo do tempo, desacoplando os picos de potência da geração e da demanda.

Tornar um sistema híbrido com células fotovoltaicas possibilita dar uma maior autonomia aos equipamentos, já que não dependerão da concessionária para funcionar em dias de pouco Sol.

#### **4.7 Conceitos de Estatística Descritiva e Indutiva**

A estatística pode ser definida como a ciência responsável pela coleta, organização, descrição, análise e interpretação de dados experimentais. Pode ser usada para descrever dados (estatística descritiva) através de distribuição, frequência, média ou para comparar grupos e fazer generalizações a partir de resultados obtidos, chamada de estatística indutiva ou analítica (DORIA, 2003).

Alguns conceitos básicos de estatística descritiva como média, variância, desvio padrão são dados importantes para o entendimento das amostras coletadas. Contudo, para esse trabalho a curtose e a assimetria serão melhor descritas a seguir.

As medidas de assimetria indicam qual o comportamento de uma distribuição de frequências em relação a uma linha vertical que passa pelo seu ponto mais elevado. No caso de uma distribuição simétrica, essa linha passa pelo centro apresentando duas caudas simétricas. Já as distribuições assimétricas podem apresentar uma cauda mais longa para direita (positiva) ou para esquerda (negativa) (MINITAB, 2016).

A curtose indica como o pico e as caudas de uma população diferem da distribuição normal. Uma curtose positiva indica que a distribuição possui pico mais pontudo e caudas com elevação mais acentuada do que uma distribuição normal, já uma curtose negativa indica pico e caudas mais arredondadas (MINITAB, 2016).

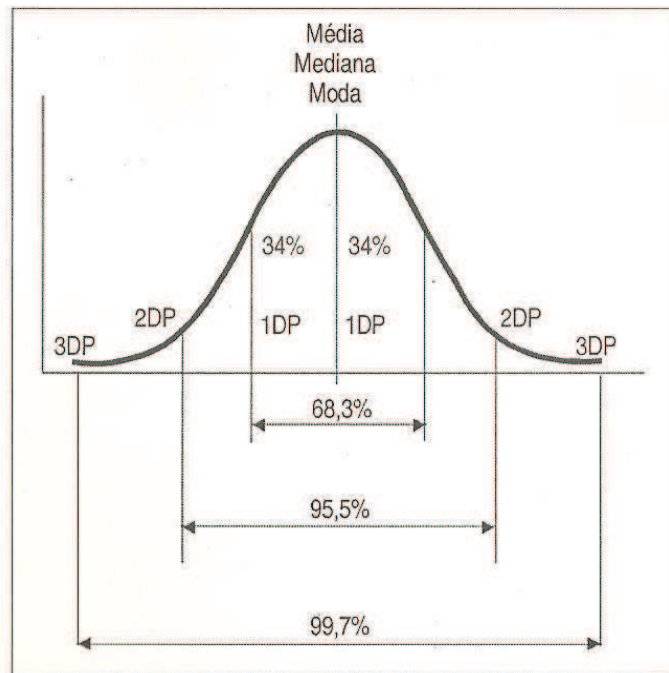
##### **4.7.1 Distribuição normal**

Também conhecida como distribuição de Gauss ou gaussiana é o modelo mais amplamente utilizado para a distribuição de uma variável aleatória. Segundo o teorema do limite central toda vez que um experimento aleatório for replicado, a variável aleatória que for

igual ao resultado médio (ou total) das réplicas tenderá a ter uma distribuição normal, à medida que o número de réplicas se torne grande.

A curva de Gauss é simétrica, unimodal, tem forma de sino e pode assumir diversas formas mais ou menos achatadas (curtose) em função da dispersão dos dados ao redor do ponto central, no qual coincidem a média aritmética, a moda e a mediana, como é possível observar na Figura 15. A descrição da curva normal pode ser feita por meio de dois parâmetros: a média e o desvio padrão. Quando a distribuição de dados é normal (simétrica), a média representa bem a população e o contrário, ou seja, assimétrica, a mediana é mais representativa (DORIA, 2003).

Figura 15: Curva de Gauss.



Fonte: Doria (2003).

#### 4.7.2 Teste de Normalidade

Os testes de normalidade são usados para determinar se um conjunto de dados pode ser modelado por uma distribuição normal ou não. Os testes de simetria e curtose podem ser empregados para validar o uso de análise de variância ou qualquer teste que suponha população normal (DORIA, 2003; FONSECA, 2012).

### 4.7.3 Análise de variância

O objetivo de realizar um teste de hipótese é saber se duas amostras são diferentes entre si ou pertencem a uma mesma população. Para isso, primeiramente estabelece-se uma hipótese inicial que seja verdadeira, e outra experimental, sendo que uma é o oposto a outra. A primeira proposição está quase sempre baseada em um conhecimento prévio do que se deseja analisar. Esse tipo de procedimento é amplamente utilizado em estatística em tomada de decisão (DORIA, 2003; MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

A análise de variância, ou ANOVA, indicará a probabilidade de que a hipótese nula é verdadeira, ou seja, a probabilidade de que nenhuma diferença entre as médias existe entre os grupos estudados, caso contrário haverá diferença entre eles (DORIA, 2003).

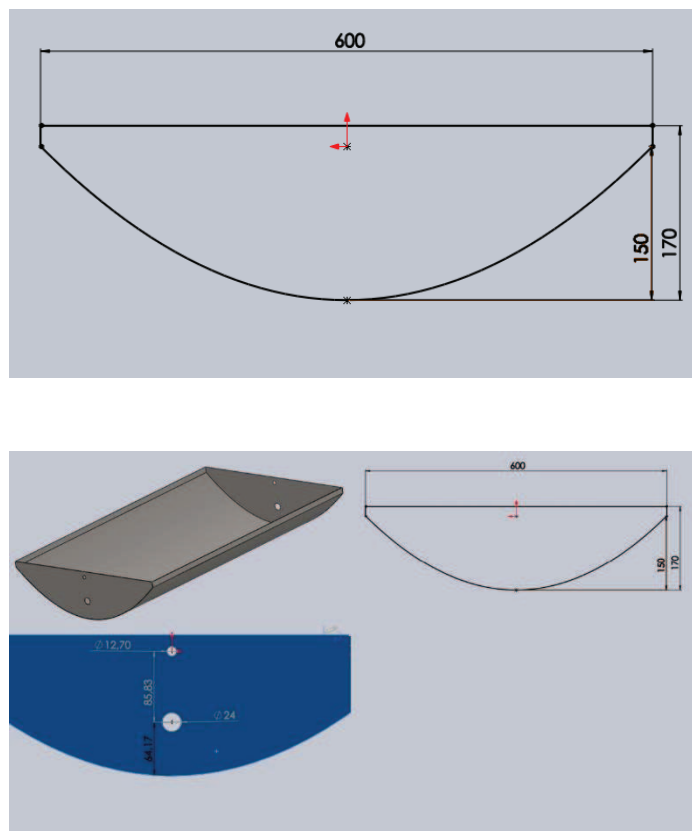
## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos testes deste trabalho, procurou-se aprimorar os arranjos de dois coletores solares parabólicos. Os coletores são feitos com uma chapa de aço 1020 com as dimensões 1mm x 689 mm x 1000 mm, de modo que seja dobrada seguindo a parábola da Equação 8 (LESGN, 2015).

$$y = \frac{x^2}{0,6} \quad (8)$$

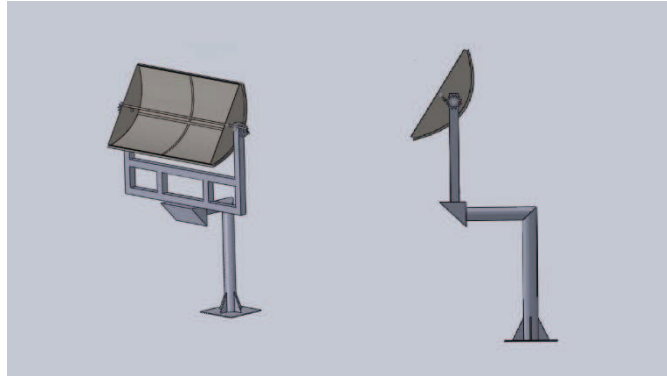
Dois perfis foram soldados com a mesma curva na parte posterior e na parte anterior e foram furados no foco com o intuito de receber o tubo absorvedor, como é possível constatar na Figura 16. Já a vista completa do desenho é possível observar na Figura 17, e uma foto dos coletores já montados no LESGN na Figura 18.

Figura 16: Coletor Parabólico.



Fonte: LESGN, 2015

Figura 17: Vista do coletor completo.



Fonte: LESGN, 2015.

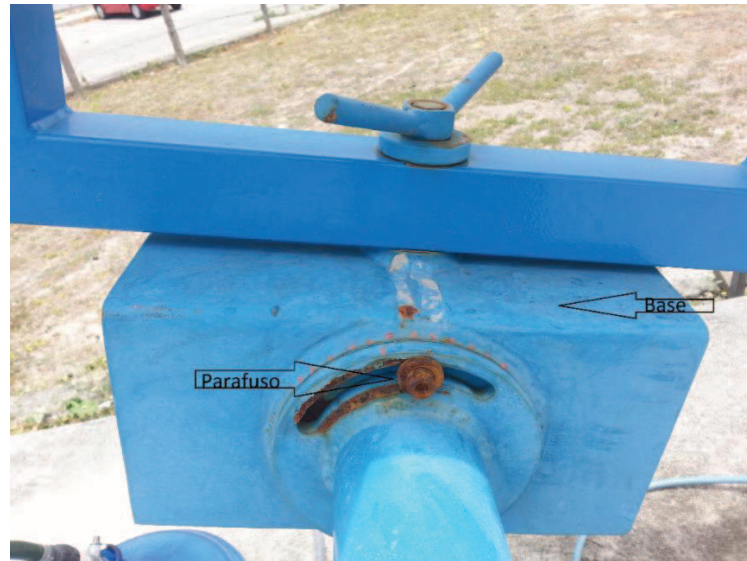
Figura 18: Foto dos coletores parabólicos do LESGN.



Fonte: Próprio Autor.

É possível ajustar a declinação solar através do dispositivo mostrado na Figura 19, onde é possível girar o coletor a fim de deixá-lo com o ângulo desejado. A declinação foi calculada a cada mês e foi utilizado um aplicativo chamado de *Goniometer pro* versão demonstrativa para averiguar a inclinação dos coletores. O ajuste é feito afrouxando o parafuso sextavado, então o aparelho é colocado em cima da base do coletor e o aplicativo mostra qual a angulação no momento e, por fim, caso precise de alguma modificação, gira-se o coletor até o aplicativo mostrar a angulação correta e aperta-se o parafuso novamente.

Figura 19: Dispositivo para ajuste da declinação.



Fonte: Próprio autor.

Com o uso de dois coletores parabólicos idênticos foi possível realizar testes fazendo comparações das melhorias, por exemplo, quando um estava com uma película refletora e o outro sem. Assim sendo, foi possível ganhar tempo realizando experimentos e facilitando as análises.

No primeiro conjunto de testes precisava-se saber qual o melhor intervalo de tempo que seria necessário para mover os coletores e isso foi feito a cada hora, trinta e quinze minutos.

Foram utilizados dois tipos de tubos absorvedores de diâmetro de 12,7 mm, um de cobre e o outro de aço. Esses tubos foram revestidos com tinta *spray* Vonder preta fosca de alta temperatura, de modo a aumentar a eficiência de absorção do calor, como é possível ver na Figura 20.



Figura 20: Tubo absorvedor



Fonte: Próprio autor.

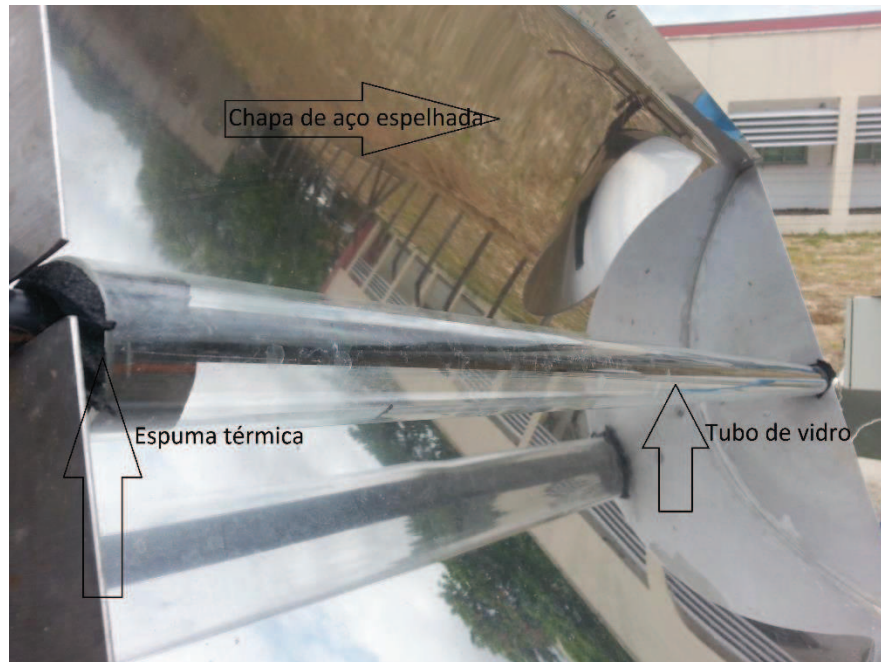
Depois de realizados esses testes, foi colocada uma película refletora, pois percebeu-se que os refletores possuíam baixa reflexão, como é possível verificar na Figura 21. Além disso, outra parte do aperfeiçoamento dos coletores consistiu em colocar uma placa espelhada de aço nos refletores, como é possível observar na Figura 14. Para evitar a perda por convecção, colocaram-se tubos de vidros nos absorvedores vedados com espuma isolante térmica, como também mostra a Figura 22.

Figura 21: Película refletora.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22: Visualização da chapa espelhada, do tubo de vidro e da espuma isolante.



Fonte: Próprio autor.

Todos esses testes foram realizados com rastreamento manual. Foi implementado um sistema de rastreamento solar com uma placa Arduino e dois LDR's com um anteparo para fazer sombra, como é mostrado em destaque na Figura 23.

Figura 23: Disposição dos LDR's para rastreamento.



Fonte: Próprio autor.

No programa do rastreamento é feita uma diferença dos valores dos LDR's e o resultado deve ser menor que certo valor, pois caso contrário o motor é acionado e o coletor gira até encontrar o valor estipulado.

Optou-se por um motor de passo com caixa de redução NEMA 23 - 200 kgf.cm / 3Ada marca Linux e um driver de modelo AKDMP16-4,2A da marca Neoyama para girar o coletor.

A vazão de água que passava pelo absorvedor era entre de 60 a 64 mL/min, medida com uma proveta de 100 mL, já a temperatura é medida na entrada e na saída através de termopares tipo K da marca ômega ligados ao *datalogger* de modelo RDXL12SD do mesmo fabricante.

## 5.1 Dimensionamento Fotovoltaico

O dimensionamento fotovoltaico foi feito como descrito no tópico 4.6. É importante a realização desse procedimento, pois isso proporcionará uma independência da rede elétrica do local e devido a falhas de geração de energia, alguns experimentos tiveram que ser refeitos porque a falta de energia desligava os equipamentos.

Foi optado pelo sistema de atendimento exclusivo c/c, porque ele será usado unicamente para alimentar os arduinos, os motores e os *drivers* que usam corrente contínua.

O levantamento do recurso solar e a área a ser instalado o sistema fotovoltaico. Os coletores estão localizados no bloco 718 na Universidade Federal do Ceará no Campus do Pici, portanto esse será o local escolhido como é possível verificar na Figura 24.

Apesar do laboratório possuir equipamentos de medição de radiação, também foram angariados dados de domínio público e de fácil acesso na *internet*, pois nem todo local possui esse tipo de sistema. Desse modo foi possível realizar uma análise mais geral que pode ser aplicada em qualquer local bastando mudar o endereço.

No sitio eletrônico do CRESESB é possível encontrar o valor médio da HSP para cidade de Fortaleza como é possível visualizar em destaque no quadrado vermelho da Figura 25. E no Anexo B mostra um mapa com a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.

Figura 24: Localização dos Coletores Parabólicos.



Fonte: Imagem Google. 2017

Figura 25: Dados da Hora a Sol Pleno para Cidade de Fortaleza.

**Coordenada Geográfica**

Latitude: 3.71839 Sul Longitude: 38.5434 Oeste

Norte:

graus decimais (00.00°)

graus, minutos e segundos (00°00'00")

Buscar Limpar

Os valores válidos de latitude devem estar na faixa de 12° Norte e 40° Sul e de longitude na faixa de 30° Oeste e 80° Oeste. Em caso de dúvida entre em contato conosco.

**Localidades próximas**

Latitude: 3,71839° S  
Longitude: 38,5434° O

| #                                   | Estação     | Município   | UF | País | Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia] |               |                |       |      |      |      |      |      |      |      |      | Média | Delta |      |      |      |      |
|-------------------------------------|-------------|-------------|----|------|---|---------------|----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
|                                     |             |             |    |      | Latitude [°]  | Longitude [°] | Distância [km] | Jan   | Fev  | Mar  | Abr  | Mai  | Jun  | Jul  | Ago  | Set  |       |       | Out  | Nov  | Dez  |      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Fortaleza   | Fortaleza   | CE | BRA  | 3,7° S  | 38,543055° O  |                | 2,0   | 5,33 | 5,14 | 4,67 | 4,53 | 5,03 | 5,00 | 5,69 | 6,19 | 6,25  | 6,47  | 6,36 | 6,0  | 5,56 | 1,94 |
| <input type="checkbox"/>            | Aracati     | Aracati     | CE | BRA  | 4,5° S  | 37,769722° O  |                | 122,3 | 5,64 | 5,44 | 5,50 | 4,92 | 5,39 | 5,14 | 5,75 | 6,36 | 6,33  | 6,69  | 6,61 | 6,08 | 5,82 | 1,77 |
| <input type="checkbox"/>            | Morada Nova | Morada Nova | CE | BRA  | 5,1° S  | 38,3725° O    |                | 155,0 | 5,47 | 5,36 | 5,39 | 5,28 | 5,28 | 5,00 | 5,33 | 6,06 | 6,14  | 6,39  | 6,39 | 5,92 | 5,67 | 1,39 |

Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades próximas

3,71839° S; 38,5434° O

Fonte: CRESESB adaptado.2017

Há outros sítios internacionais que fornecem também a HSP como <https://maps.nrel.gov/swera/> e <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>.

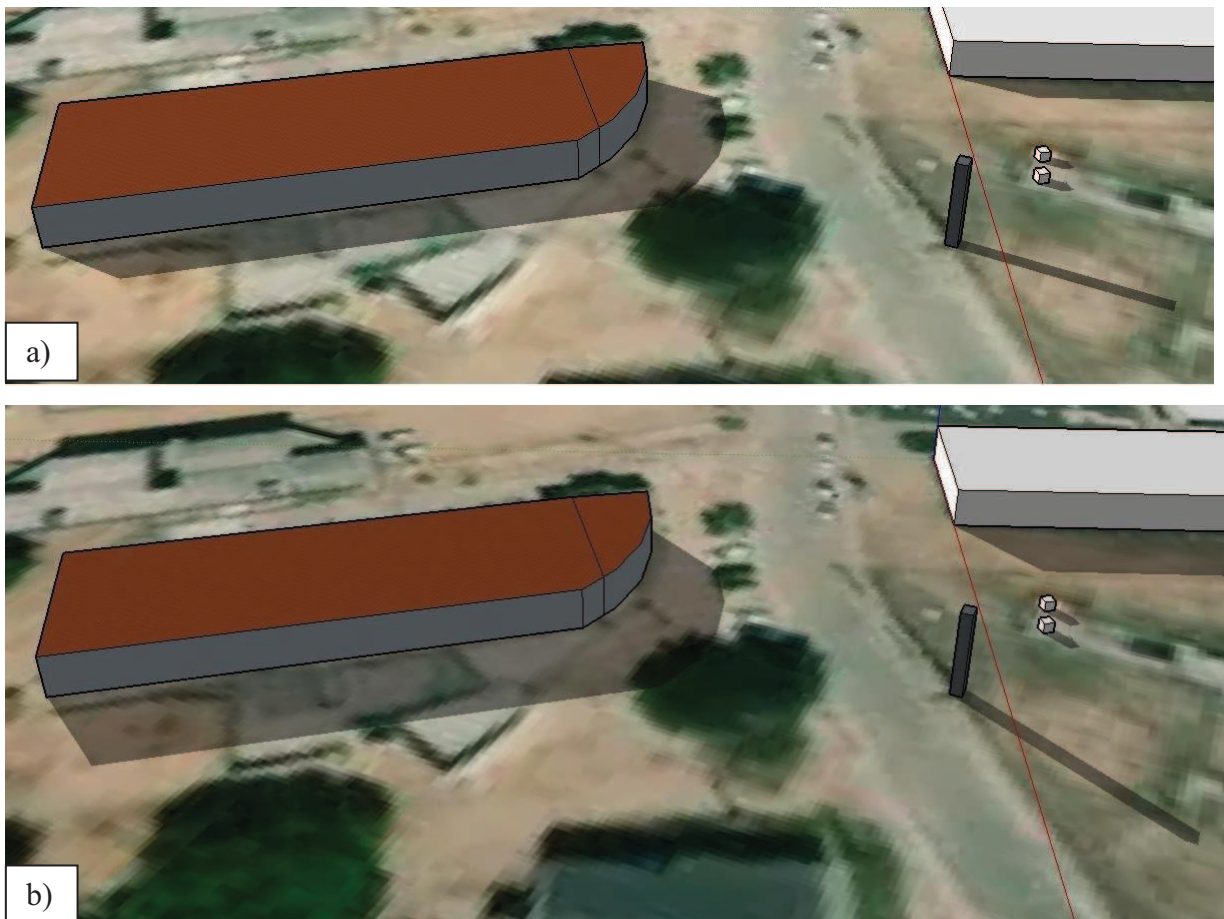
Na Figura 24 é possível ver uma área descampada onde é possível colocar os painéis fotovoltaicos, contudo é preciso realizar uma análise das sombras devido a construções ao redor do laboratório.

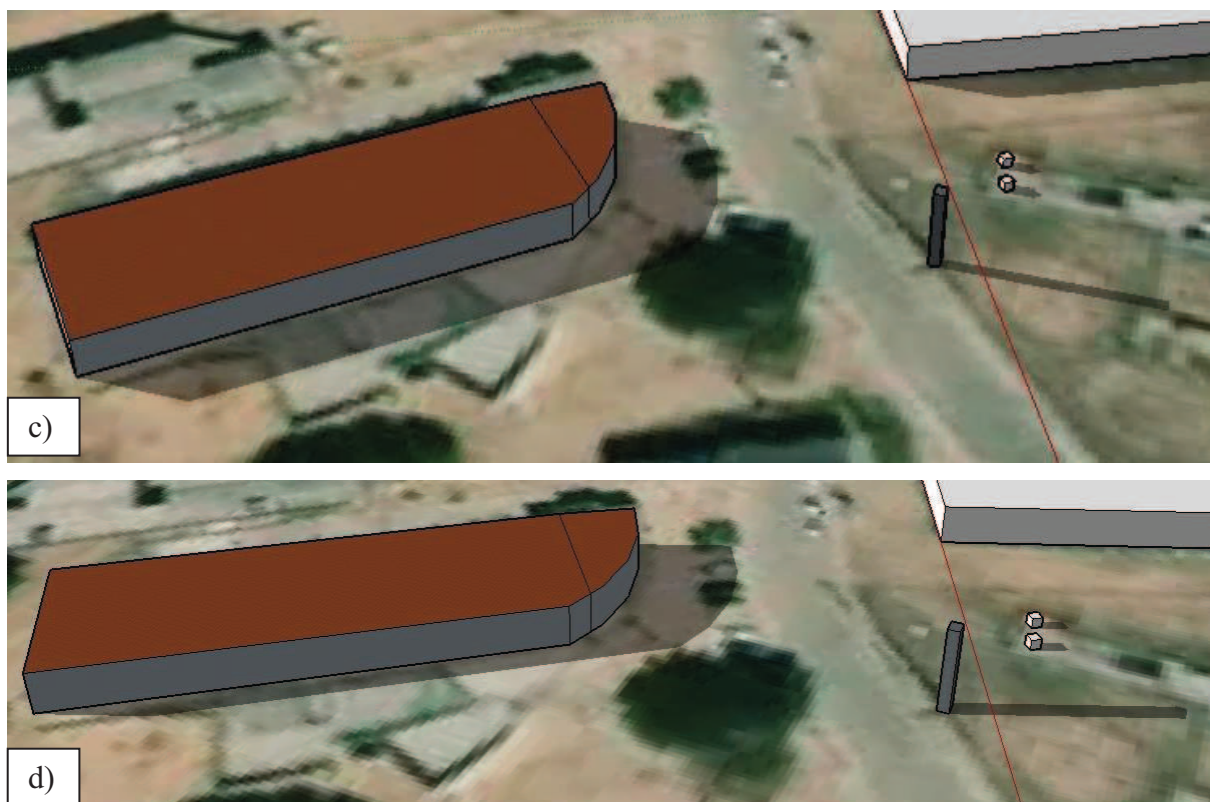
Para isso foi utilizado um programa de computador chamado *SketchUp* 2017 com o *Skelion* ambos como licença de demonstração. Esse programa possibilita a criação e apresentação de projetos de construções e é bastante utilizado na construção civil e na arquitetura.

O *Skelion* foi uma ferramenta criada para o programa *SketchUp* com o intuito de realizar projetos de dimensionamento fotovoltaico. Lá é possível inserir um mapa do site do Google em duas dimensões depois, basta medir a altura das edificações ao redor e realizar as modificações necessárias das construções de modo que se tornem em três dimensões.

Em uma das abas das ferramentas fez-se a variação do sol no decorrer dos dias e dos anos, sendo apenas necessários os solstícios e os equinócios, pois são os pontos máximos de onde a sombra pode alcançar, e no caso em particular no horário de 16 horas, pois verifica-se que os coletores parabólicos não são afetados por sombras. Portanto, na Figura 26, pode-se visualizar que há bastante área para colocar os coletores fotovoltaicos sem que eles sejam interceptados por sombras das edificações.

Figura 26: Sombreamento dos Edifícios no Equinócio em a) 21 de Março e c) 22 de Setembro e Solstício em b) 21 de Junho e d) 22 de Dezembro.





*Fonte: Próprio autor.*

Para a demanda de consumo, foi considerado que o sistema fotovoltaico deveria alimentar duas placas Arduino dois motores de passo e dois drivers para acionamento dos motores.

As especificações do Arduino são de 40 mA por porta, no caso, são utilizadas duas portas analógicas para os LDRs e duas portas PWM para o acionamento dos drivers dos motores. O Arduino é ligado a uma fonte externa de 12V – 1A. Portanto realizando os cálculos temos que a potência utilizada para os dois Arduinos é de 3,84 W.

Já para alimentação dos motores e dos *drivers*, cuja alimentação é de 25 V, foi utilizada uma fonte externa regulável. Quando o sistema é acionado a amperagem na tela do aparelho marca 0,35 amperes resultando em uma potência de 35 W. Então, o sistema todo tem um gasto de 38,84 W.

Para análise de implantação dos componentes fotovoltaicos utilizou-se um programa chamado PVsyst na versão 6.6.4 habilitado para demonstração. Nesse programa é possível inserir dados meteorológicos da região e do sistema e a ser implantado e tem-se como resultado um relatório completo de como será configuração do arranjo das placas, baterias e controlador de carga.

A escolha foi pelo sistema isolado da rede. Após essa parte, seleciona-se a potência a ser instalada que no caso foi arredondada para 40W com o funcionamento de 7 horas por dia.

Depois disso escolhe-se qual a marca ou potência da placa fotovoltaica, para isso foi escolhida uma placa da Kyocera de 40Wp – 15V e um controlador de carga da marca Steca 12V – 24V com máxima carga de 5A e descarga de 6A. Na escolha dos acumuladores de carga foi escolhida a bateria de 12V – 99Ah que é compatível com as presentes no mercado brasileiro.

O relatório mostrou como resultado a utilização de duas placas fotovoltaicas ligadas ao controlador de carga já mencionado e com 2 baterias em série.

## 6.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão os resultados preliminares dos experimentos realizados com os coletores solares parabólicos.

### 6.1 Parâmetros dos Concentradores

Como visto no Capítulo 4, os concentradores solares possuem alguns parâmetros que balizam quão o coletor irá funcionar de forma eficiente. A Tabela 1 mostra o resultado dos parâmetros calculados

*Tabela 1: Parâmetros dos concentradores solares parabólicos.*

| Descrição               | Dimensões |
|-------------------------|-----------|
| Comprimento de abertura | 600 mm    |
| Comprimento da parábola | 1000 mm   |
| Distância focal         | 150 mm    |
| Raio da parábola        | 300 mm    |
| Diâmetro do absorvedor  | 12,7 mm   |
| Taxa de concentração    | 15        |
| Ângulo de aceitação     | 1,21°     |
| Ângulo de borda         | 82,87°    |

*Fonte: Próprio autor.*

Como é possível observar na Tabela 1, os três últimos parâmetros estão dentro das condições de funcionamento de um coletor parabólico. A taxa de concentração significa que se concentram 15 sóis no absorvedor. O ângulo de aceitação mínimo é de 0,53° e o ângulo de borda deve estar entre 70° e 110° (AGUILAR *et al.*, 2014).

### 6.2 Testes Realizados

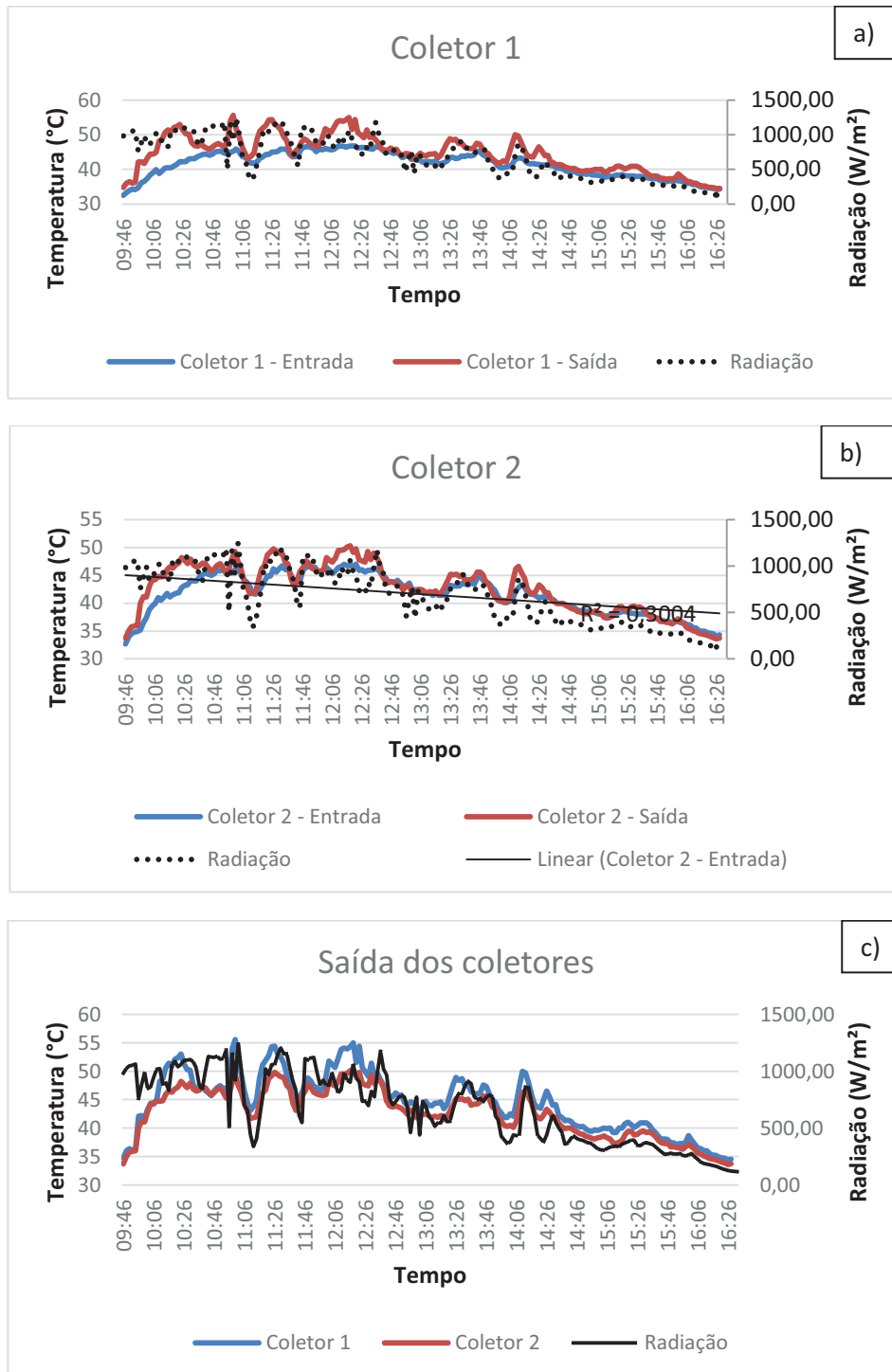
No LESGN há dois coletores parabólicos, sendo assim foi possível realizar testes fazendo comparações das melhorias, por exemplo, quando um estava com uma película



refletora e o outro sem. Desta forma, foi possível ganhar tempo realizando experimentos e facilitando as análises.

No primeiro teste, o coletor 1 estava com um tubo absorvedor de cobre e o 2 com um de aço. Os ajustes dos coletores foram realizados a cada 15 minutos manualmente, como é possível verificar na Figura 27.

Figura 27: Experimento 1



Fonte: Próprio autor.

É possível a partir dos gráficos da Figura 27 ter uma noção do comportamento no experimento realizado. No entanto, fica difícil a visualização comparativa entre os dois coletores para saber qual situação é melhor. Para isso buscou-se outro método chamado de análise de variância, com o qual é possível identificar se um conjunto de amostras são

diferentes entre si. Supõe-se que o coletor 1 nessas condições apresente um melhor desempenho que o 2.

Para fazer essas análises, calculou-se o ganho de energia da água através da Equação 9.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (9)$$

Para os cálculos da energia utilizou-se a densidade do fluido de  $1000 \frac{Kg}{m^3}$ , a vazão de  $\dot{m} = 62 \frac{mL}{min}$  e o  $c_p = 4,182 \frac{kJ}{kg.K}$ . Os valores de temperatura da água são adquiridos através de medições de termopares na entrada e na saída do absorvedor. E então foram criadas duas populações de amostras de energia do coletor 1 e do 2.

Para verificar se é possível fazer uma análise de variância das amostras é necessário que elas estejam normalizadas, daí faz-se um teste de normalidade e observam-se as medidas da assimetria e da curtose. Esses valores devem estar entre 3 e -3 para as amostras serem consideradas uma distribuição normal, como é possível verificar na Tabela 2 (FONSECA, 2012).

Tabela 2: Resumo estatístico.

| Coluna1              |         | Coluna2              |         |
|----------------------|---------|----------------------|---------|
| Média                | 13,49   | Média                | 5,32    |
| Erro padrão          | 0,85    | Erro padrão          | 0,45    |
| Mediana              | 9,08    | Mediana              | 2,60    |
| Modo                 | 9,08    | Modo                 | 0,00    |
| Desvio padrão        | 12,10   | Desvio padrão        | 6,39    |
| Variância da amostra | 146,44  | Variância da amostra | 40,81   |
| Curtose              | 0,55    | Curtose              | 0,23    |
| Assimetria           | 1,21    | Assimetria           | 1,14    |
| Intervalo            | 48,01   | Intervalo            | 23,36   |
| Mínimo               | 0,00    | Mínimo               | 0,00    |
| Máximo               | 48,01   | Máximo               | 23,36   |
| Soma                 | 2725,52 | Soma                 | 1074,46 |
| Contagem             | 202,00  | Contagem             | 202,00  |

Fonte: Próprio autor.

No caso desse experimento os valores da curtose e da assimetria das amostras estão dentro das faixas para serem consideradas uma distribuição normal e, portanto, pode-se realizar uma análise de variância mostrada na Tabela 3.

A hipótese nula é que não há diferença entre as energias dos coletores 1 e 2. Como o “F crítico” é menor que o “F”, rejeita-se a hipótese nula. Então, pode se afirmar que as amostras são diferentes entre si e que o coletor 1 nessas condições é melhor que o 2 com um intervalo de confiança de 95%.

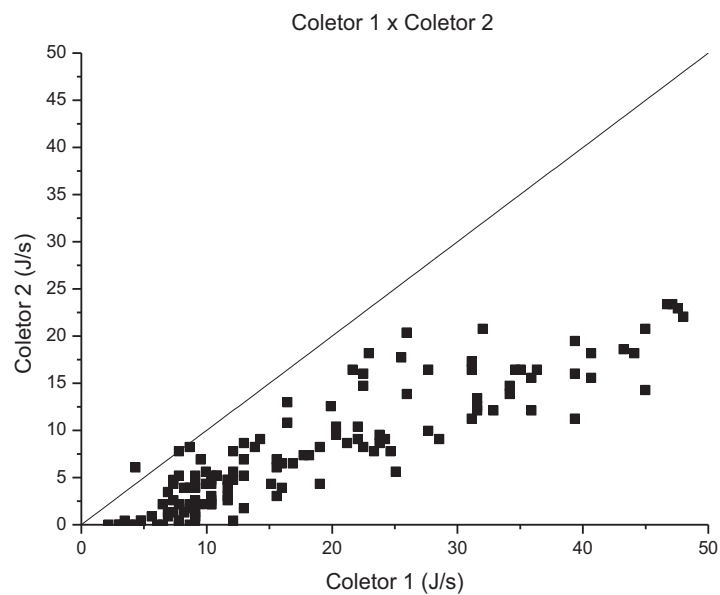
Tabela 3: Análise de variância do experimento 1.

| Fonte da variação | SQ       | gl     | MQ      | F     | valor-P  | F crítico |
|-------------------|----------|--------|---------|-------|----------|-----------|
| Entre grupos      | 6747,49  | 1,00   | 6747,49 | 72,07 | 4,06E-16 | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 37638,20 | 402,00 | 93,63   |       |          |           |
| Total             | 44385,69 | 403,00 |         |       |          |           |

Fonte: Próprio autor.

Além disso, outro gráfico corrobora essa análise (Figura 28), na qual há os pares de energia do coletor 1 e coletor 2 para cada momento no experimento. A reta traçada é  $x=y$  e serve como base de verificação, pois pontos em cima dela indicam que a energia absorvida pelo coletor 1 é igual à do coletor 2. Os pontos abaixo dessa reta indicam que o coletor 1 é melhor que o coletor 2 e acima o contrário. Então, nota-se que praticamente em todo o experimento o coletor 1 teve um melhor comportamento que o 2.

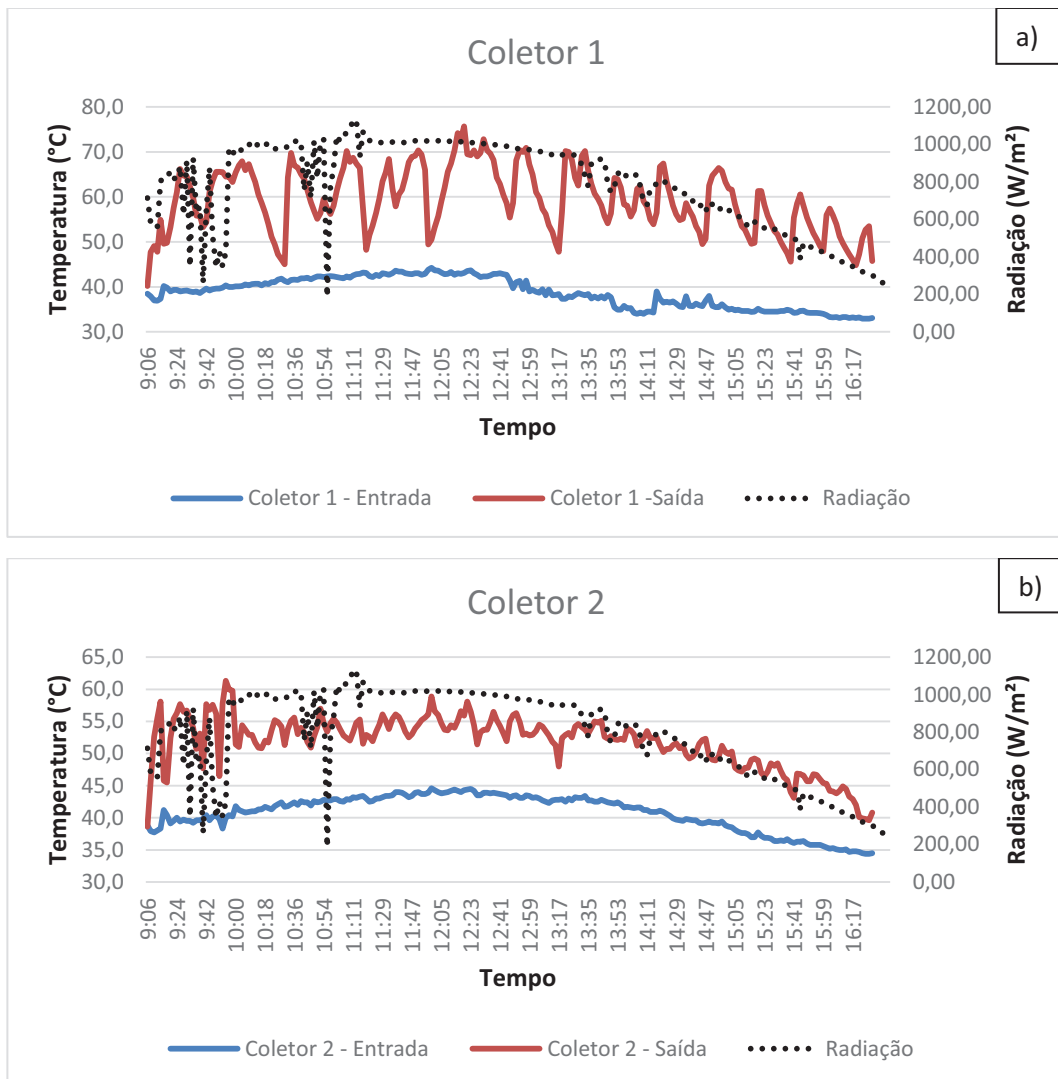
Figura 28: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 1.

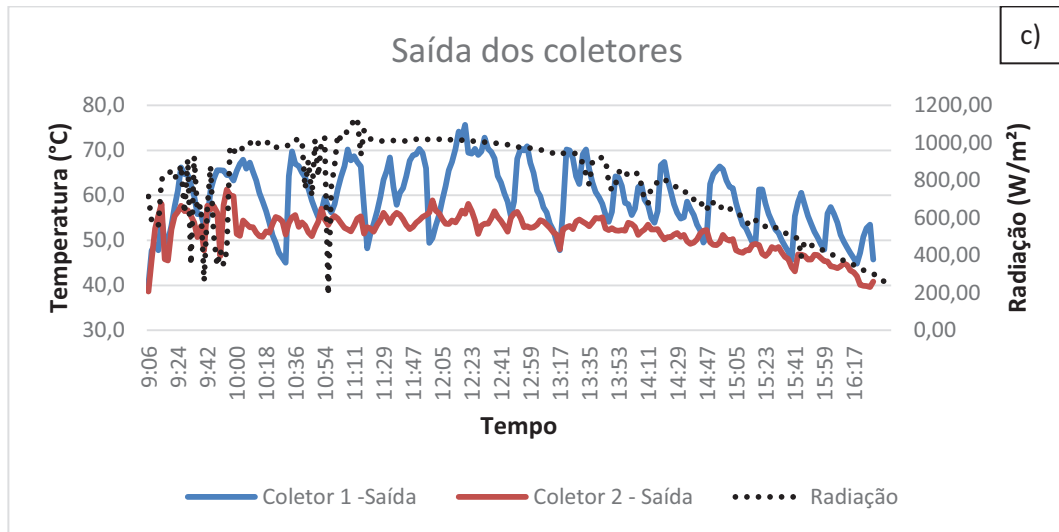


Fonte: Próprio autor.

No experimento 2, um tubo de vidro foi utilizado para evitar perdas por convecção dos tubos absorvedores e ambos coletores foram girados manualmente a cada 15 minutos. Os tubos de vidros foram vedados com espuma térmica de modo que o ar de dentro não saia. Nas Figura 29 já é possível perceber que o coletor 1 apresenta eficiência térmica bem superior ao coletor 2 observando as temperaturas de saída.

Figura 29: Experimento 2.





Fonte: Próprio autor.

Seguindo a metodologia do trabalho, segue na Tabela 4 e Tabela 5 um resumo estatístico e de análise de variância, respectivamente. Assim como no primeiro experimento a curtose e a assimetria estão dentro dos valores os quais dão validade para uma análise de variância.

#### ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ        | F      | valor-P | F crítica |
|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|-----------|
| Entre grupos      | 193468,74 | 1,00   | 193468,74 | 431,02 | 0,00    | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 199292,79 | 444,00 | 448,86    |        |         |           |
| Total             | 392761,54 | 445,00 |           |        |         |           |

Fonte: Próprio autor.

Figura 30 é possível visualizar que o coletor 1 foi melhor na maior parte do tempo do experimento realizado, pois grande parte dos pontos estão abaixo da reta de referência.

Tabela 4: Resumo estatístico do experimento 2.

| Coluna1              |        | Coluna2              |        |
|----------------------|--------|----------------------|--------|
| Média                | 89,69  | Média                | 47,88  |
| Erro padrão          | 1,82   | Erro padrão          | 0,75   |
| Mediana              | 91,70  | Mediana              | 45,85  |
| Modo                 | 100,78 | Modo                 | 41,53  |
| Desvio padrão        | 27,13  | Desvio padrão        | 11,18  |
| Variância da amostra | 736,03 | Variância da amostra | 124,88 |
| Curtose              | -0,40  | Curtose              | 3,03   |
| Assimetria           | -0,37  | Assimetria           | 1,05   |
| Intervalo            | 126,31 | Intervalo            | 72,24  |
| Mínimo               | 16,00  | Mínimo               | 19,90  |

|          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|
| Máximo   | 142,31   | Máximo   | 92,13    |
| Soma     | 19911,73 | Soma     | 10630,00 |
| Contagem | 222,00   | Contagem | 222,00   |

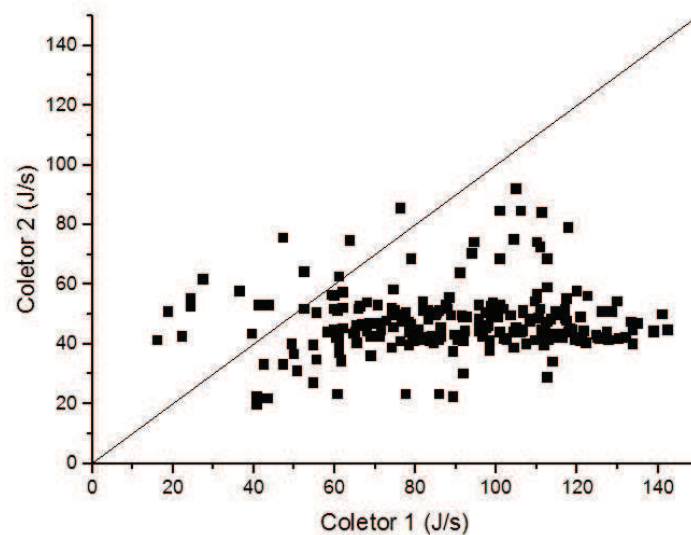
Fonte: Próprio autor.

Tabela 5: ANOVA Experimento 2.

| ANOVA             |           |        |           |        |         |           |
|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ        | F      | valor-P | F crítico |
| Entre grupos      | 193468,74 | 1,00   | 193468,74 | 431,02 | 0,00    | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 199292,79 | 444,00 | 448,86    |        |         |           |
| Total             | 392761,54 | 445,00 |           |        |         |           |

Fonte: Próprio autor.

Figura 30: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 2.

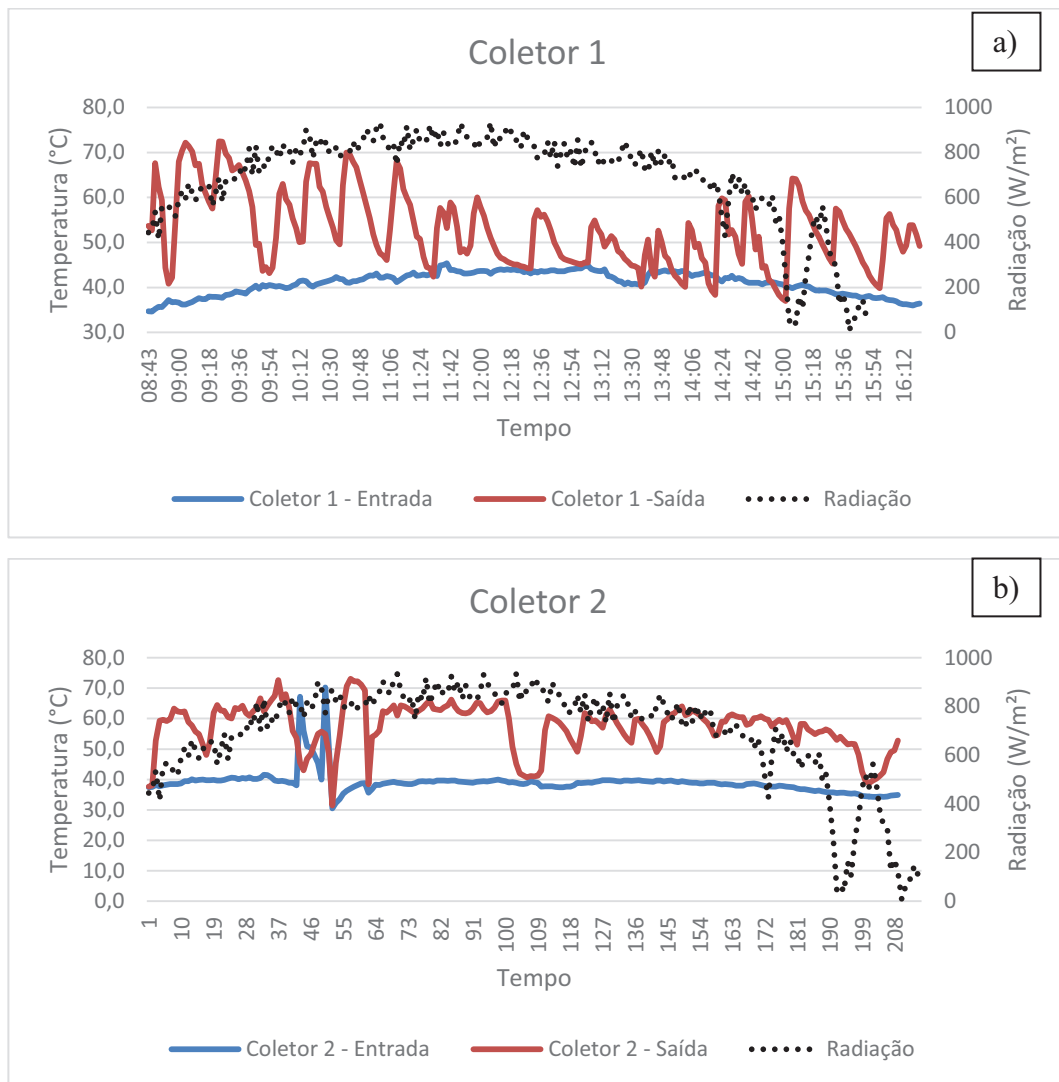


Fonte: Próprio autor.

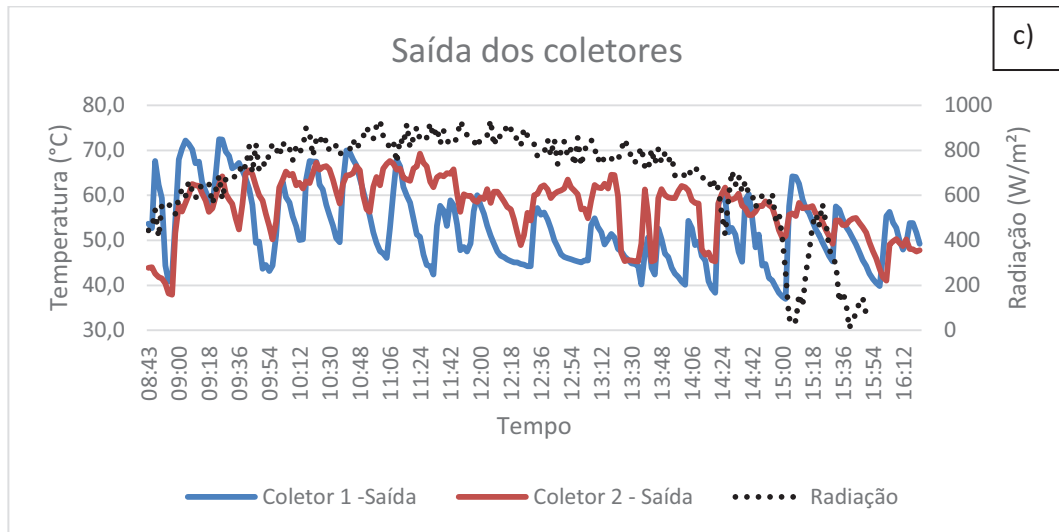
No terceiro experimento, foi colocado ao redor coletor 2 uma capa plástica para saber se apresentaria alguma melhoria em relação ao tubo de vidro para evitar a perda de energia por convecção. Na Figura 31.c) é possível observar que os coletores atingiram temperaturas parecidas, então supostamente tiveram a eficiência energética similares. Recorrendo mais uma vez à análise estatística nas Tabela 6 e Tabela 7, verificou-se que os dados possuem uma diferença significativa entre si. Então conclui-se que o coletor 1 foi melhor que o 2. Contudo, pela Figura 32, verificou-se que a maioria dos pontos indicam que o coletor 2 foi melhor que o 1, apesar deles estarem bem próximo da linha central e, portanto,

pode-se afirmar que apresentaram um desempenho energético parecido. Possivelmente a capa plástica acumulou mais ar quente que o tubo de vidro, e quando dava o tempo de girar o coletor, o coletor 2 ainda apresentava uma temperatura elevada como é possível observar nas medições de entrada nas Figura 31.a) e Figura 31.b). Por dificuldades operacionais a capa plástica não foi mais utilizada sendo substituída por tubo de vidro.

Figura 31: Experimento 3.







Fonte: Próprio autor.

Tabela 6: Resumo estatístico do experimento 3.

| Coluna1              |          | Coluna2              |          |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| Média                | 66,69    | Média                | 80,95    |
| Erro padrão          | 2,41     | Erro padrão          | 2,24     |
| Mediana              | 64,45    | Mediana              | 90,40    |
| Modo                 | 0,00     | Modo                 | 99,49    |
| Desvio padrão        | 34,86    | Desvio padrão        | 32,38    |
| Variância da amostra | 1215,06  | Variância da amostra | 1048,48  |
| Curtose              | 0,17     | Curtose              | 0,68     |
| Assimetria           | 0,32     | Assimetria           | -0,90    |
| Intervalo            | 166,53   | Intervalo            | 156,15   |
| Mínimo               | 0,00     | Mínimo               | 0,00     |
| Máximo               | 166,53   | Máximo               | 156,15   |
| Soma                 | 13939,03 | Soma                 | 16918,89 |
| Contagem             | 209,00   | Contagem             | 209,00   |

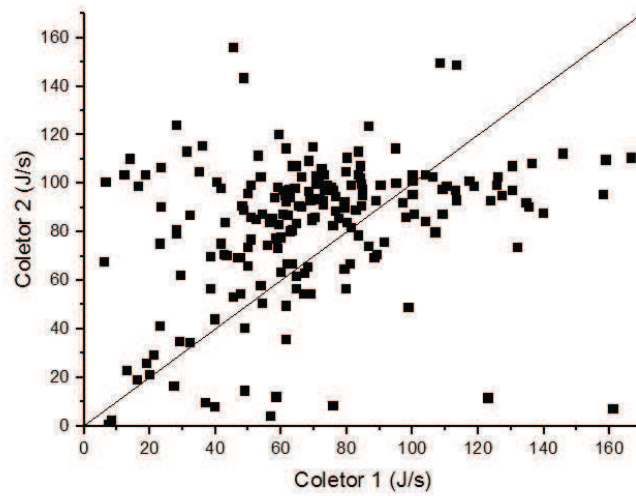
Fonte: Próprio autor.

Tabela 7: ANOVA Experimento 3.

| ANOVA             |           |        |          |       |         |           |
|-------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ       | F     | valor-P | F crítico |
| Entre grupos      | 21242,98  | 1,00   | 21242,98 | 18,77 | 0,00    | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 470815,86 | 416,00 | 1131,77  |       |         |           |
| Total             | 21242,98  | 1,00   | 21242,98 | 18,77 | 0,00    | 3,86      |

Fonte: Próprio autor.

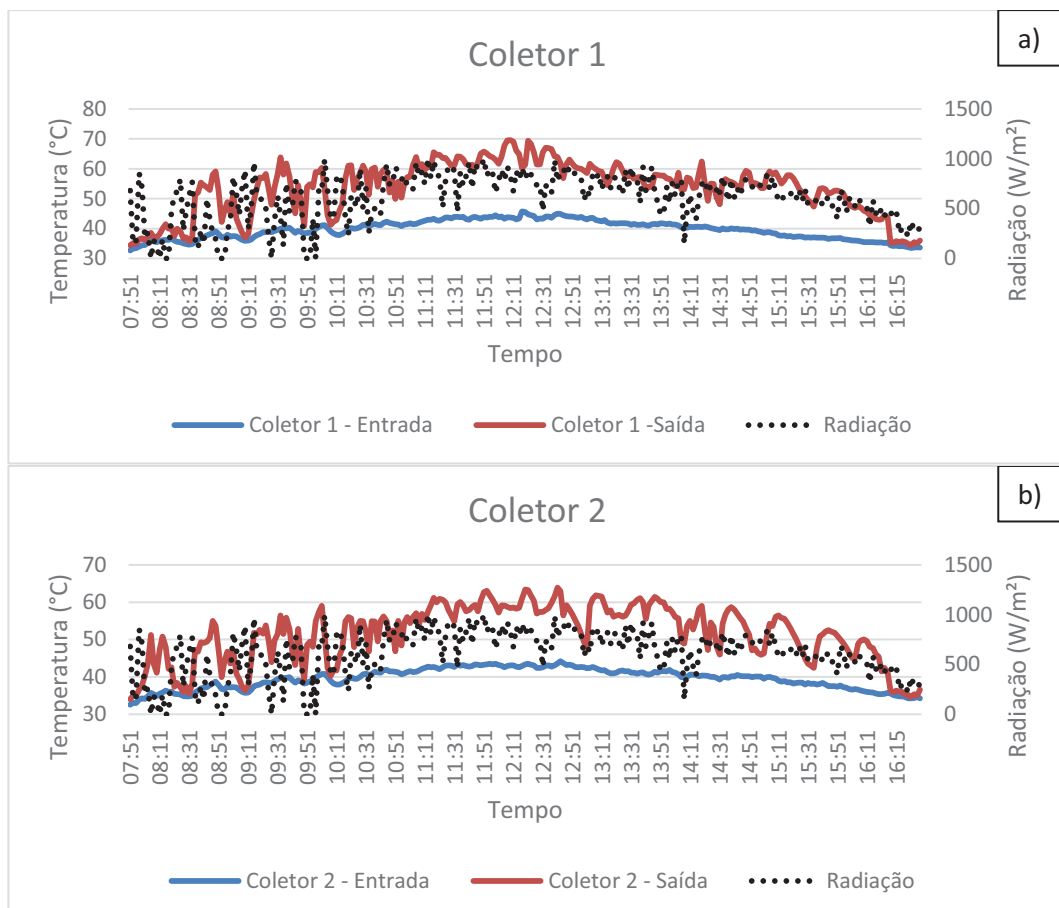
Figura 32: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 3.

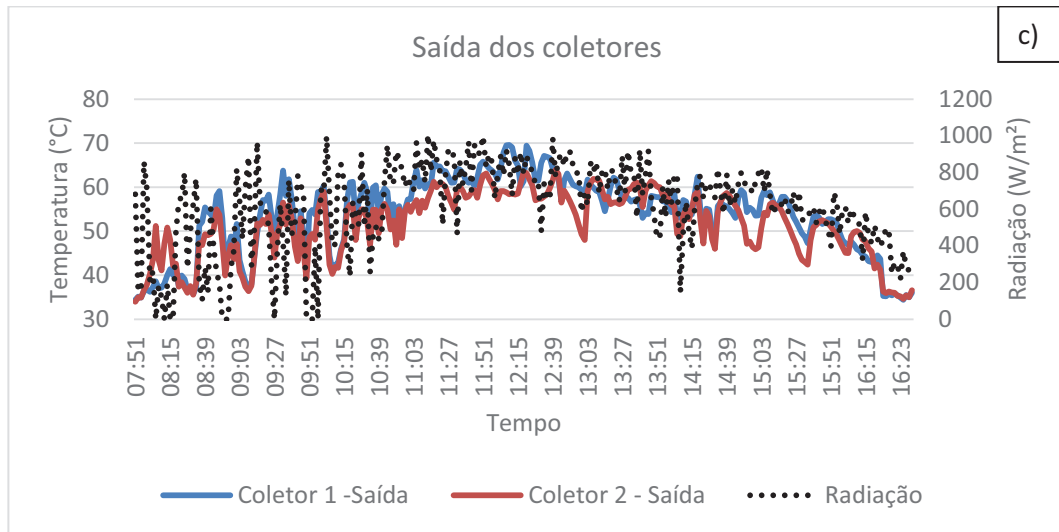


Fonte: Próprio autor.

No experimento 4, buscou-se saber se havia alguma diferença significativa entre os coletores nas mesmas condições, ou seja, os dois estavam com tubos de vidros e foram girados a cada 15 minutos.

Figura 33: Experimento 4.





Fonte: Próprio autor.

Na Figura 33.c), a superposição ou proximidade dos gráficos das saídas das temperaturas indicam uma similaridade no comportamento energético dos coletores. Percebe-se, no entanto, observando as Tabela 8 e Tabela 9, verificou-se que uma diferença do espaço amostral, apesar dos coletores estarem nas mesmas condições. Isso ocorreu porque há algumas diferenças construtivas de um para o outro, ou seja, os dois não são perfeitamente idênticos e isso se traduz em uma diferença energética. Apesar disso as médias das energias são diferentes entre si por 15%.

Tabela 8: Resumo estatístico do experimento 4.

| Coletor 1            |          | Coletor 2            |          |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| Média                | 60,71    | Média                | 51,84    |
| Erro padrão          | 1,66     | Erro padrão          | 1,41     |
| Mediana              | 67,91    | Mediana              | 58,83    |
| Modo                 | 68,78    | Modo                 | 64,88    |
| Desvio padrão        | 27,20    | Desvio padrão        | 23,20    |
| Variância da amostra | 740,02   | Variância da amostra | 538,37   |
| Curtose              | -0,39    | Curtose              | -0,61    |
| Assimetria           | -0,70    | Assimetria           | -0,63    |
| Intervalo            | 108,14   | Intervalo            | 86,51    |
| Mínimo               | 3,89     | Mínimo               | 1,30     |
| Máximo               | 112,03   | Máximo               | 87,81    |
| Soma                 | 16331,48 | Soma                 | 13945,09 |
| Contagem             | 269,00   | Contagem             | 269,00   |

Fonte: Próprio autor.

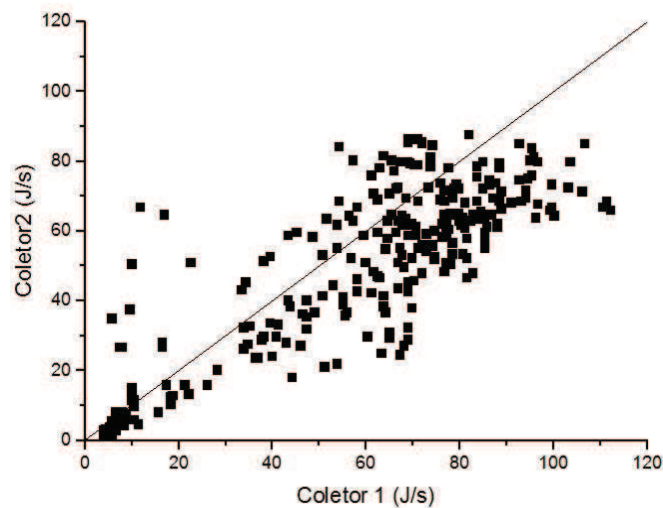
Tabela 9: ANOVA Experimento 4.

| ANOVA             |           |        |          |       |         |           |
|-------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ       | F     | valor-P | F crítico |
| Entre grupos      | 10585,30  | 1,00   | 10585,30 | 16,56 | 0,00    | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 342608,88 | 536,00 | 639,20   |       |         |           |
| Total             | 353194,18 | 537,00 |          |       |         |           |

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 34, é possível observar que os pontos estão próximos da reta de referência, mas indica que o coletor 1 apresenta um melhor desempenho energético mesmo em condições iguais de arranjo.

Figura 34: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 4.



Fonte: Próprio autor.

O coletor 1, a partir do experimento 5, foi automatizado e gira a cada 15 minutos assim como o coletor 2, mas nesse caso manualmente. Assim como no experimento 4, na Figura 35.c) é possível observar um desempenho parecido na temperatura de saída para os dois coletores, apesar da análise estatísticas das Tabela 10 e Tabela 11 indicarem uma diferença nas amostras. Na Figura 36 é possível visualizar que os pontos estão mais em torno da reta aonde o desempenho dos dois coletores são parecidos. Contudo, há um problema operacional em girar o coletor manualmente, pois é necessário haver uma pessoa disponível para fazê-lo, além de haver o desgaste de quem está operando devido a condições insalubres de alta insolação.

Figura 35: Experimento 5.

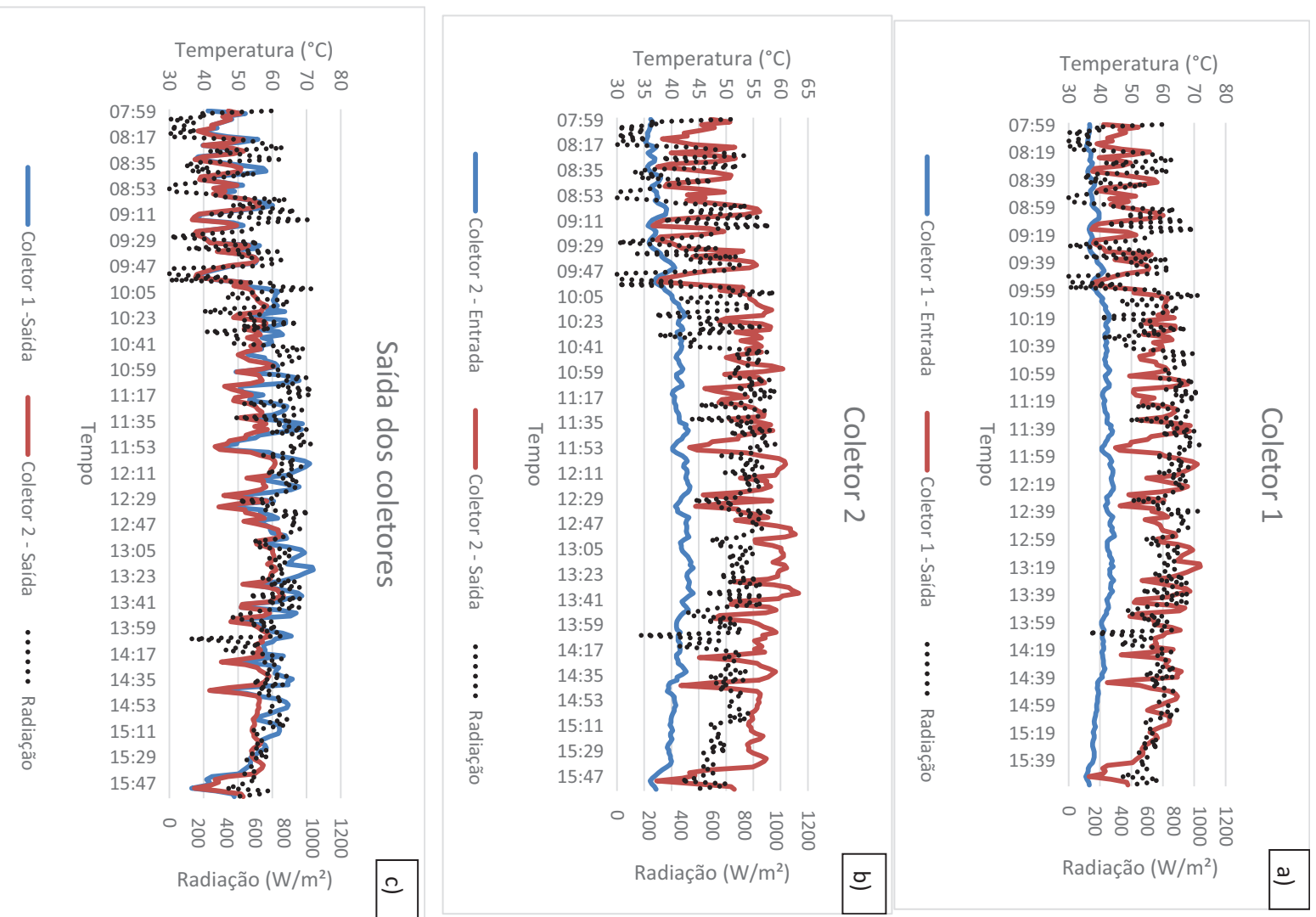


Tabela 10: Resumo estatístico do experimento 5.

Coletor 1

Coletor 2

|                      |          |                      |          |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| Média                | 66,03    | Média                | 53,12    |
| Erro padrão          | 1,90     | Erro padrão          | 1,29     |
| Mediana              | 69,64    | Mediana              | 61,64    |
| Modo                 | 88,24    | Modo                 | 64,88    |
| Desvio padrão        | 29,39    | Desvio padrão        | 20,06    |
| Variância da amostra | 863,82   | Variância da amostra | 402,49   |
| Curtose              | -0,72    | Curtose              | -0,25    |
| Assimetria           | -0,36    | Assimetria           | -0,83    |
| Intervalo            | 119,38   | Intervalo            | 82,62    |
| Mínimo               | 2,60     | Mínimo               | 3,03     |
| Máximo               | 121,98   | Máximo               | 85,65    |
| Soma                 | 15848,32 | Soma                 | 12749,08 |
| Contagem             | 240,00   | Contagem             | 240,00   |

Fonte: Próprio autor.

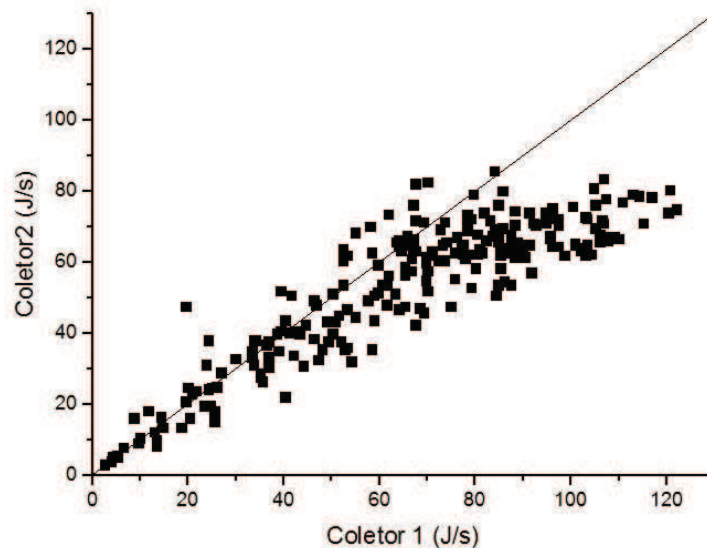
Tabela 11: ANOVA Experimento 5.

#### ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ       | F     | valor-P | F crítico |
|-------------------|-----------|--------|----------|-------|---------|-----------|
| Entre grupos      | 20011,08  | 1,00   | 20011,08 | 31,61 | 0,00    | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 302647,62 | 478,00 | 633,15   |       |         |           |
| Total             | 353194,18 | 537,00 |          |       |         |           |

Fonte: Próprio autor.

Figura 36: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 5



Fonte: Próprio autor.

O intuito dos testes a seguir é analisar qual tempo de automatização seria o ideal. Portanto, baseado no experimento 5, ambos coletores passaram a ser automatizados no experimento 6, sendo que o Coletor 1 foi programado para girar a cada 1 minutos enquanto que o 2 permaneceu sendo girado a cada 5 minutos. Nesse experimento também foram

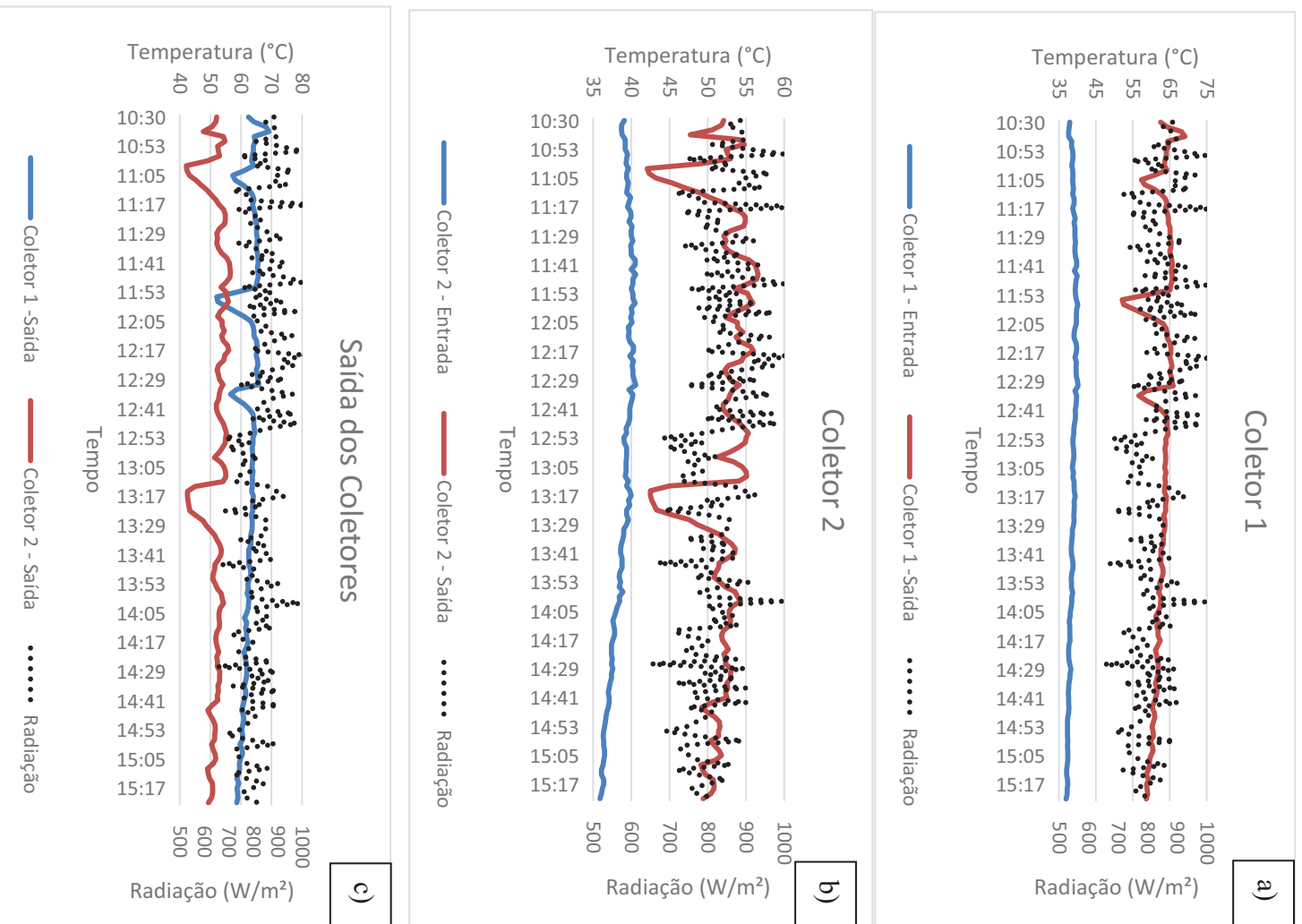
instaladas buchas para vedar os tubos, pois as esponjas térmicas tinham que ser trocadas a cada 5 experimentos. Isso ocorria porque as altas temperaturas e o próprio peso do tudo danificavam as esponjas perdendo a eficácia de vedação aumentando a perda por convecção. Na Figura 37 é possível visualizar como ficou acoplado o tubo nas buchas nos coletores. Graças a isso foi possível ter repetitividade nos experimentos e também se evitou perda de tempo em troca das espumas velhas pelas novas e também a possibilidade de quebrar o vidro durante o manuseio.

*Figura 37: Buchas de vedação.*



*Fonte: Próprio autor.*

Figura 38: Experimento 6.



Fonte: Próprio autor.



Tabela 12: Resumo estatístico do experimento 6.

| Coletor 1            |          | Coletor 2            |         |
|----------------------|----------|----------------------|---------|
| Média                | 93,28    | Média                | 33,54   |
| Erro padrão          | 1,79     | Erro padrão          | 1,30    |
| Mediana              | 102,08   | Mediana              | 36,98   |
| Modo                 | 108,57   | Modo                 | 44,55   |
| Desvio padrão        | 22,77    | Desvio padrão        | 16,54   |
| Variância da amostra | 518,68   | Variância da amostra | 273,43  |
| Curtose              | 2,75     | Curtose              | -1,38   |
| Assimetria           | -1,67    | Assimetria           | -0,16   |
| Intervalo            | 114,19   | Intervalo            | 54,07   |
| Mínimo               | 7,79     | Mínimo               | 6,92    |
| Máximo               | 121,98   | Máximo               | 60,99   |
| Soma                 | 15111,68 | Soma                 | 5432,87 |
| Contagem             | 162,00   | Contagem             | 162,00  |

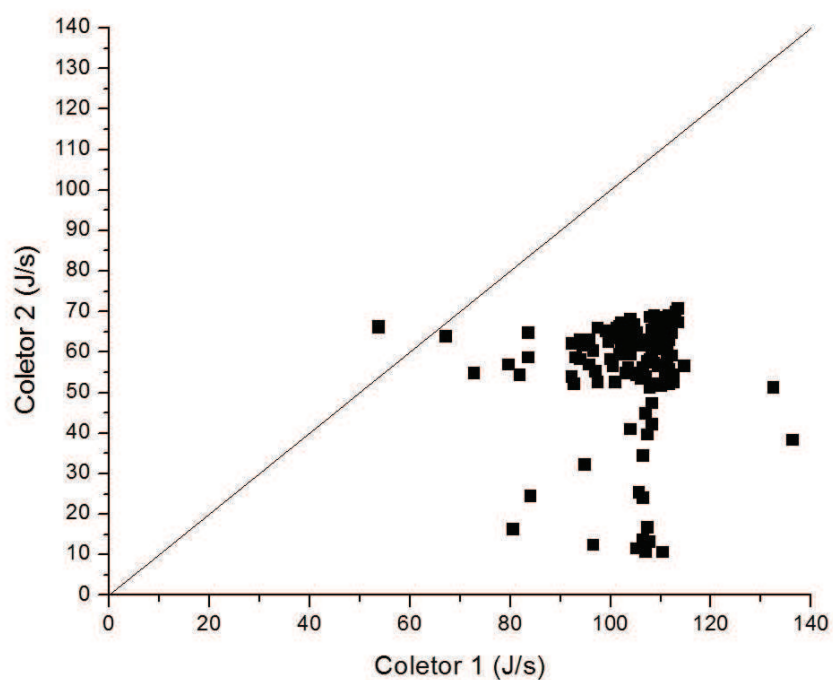
Fonte: Próprio autor.

Tabela 13: ANOVA Experimento 6.

| ANOVA             |           |        |           |        |         |           |
|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ        | F      | valor-P | F crítico |
| Entre grupos      | 289181,50 | 1,00   | 289181,50 | 854,89 | 0,00    | 3,87      |
| Dentro dos grupos | 95391,06  | 282,00 | 338,27    |        |         |           |
| Total             | 384572,56 | 283,00 |           |        |         |           |

Fonte: Próprio autor.

Figura 39: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 6.



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se então que o coletor 1 é melhor que o coletor 2 tanto pela Figura 38.c) como também pela Figura 39 cujo praticamente todos os pontos estão abaixo da linha de igual desempenho dos coletores.

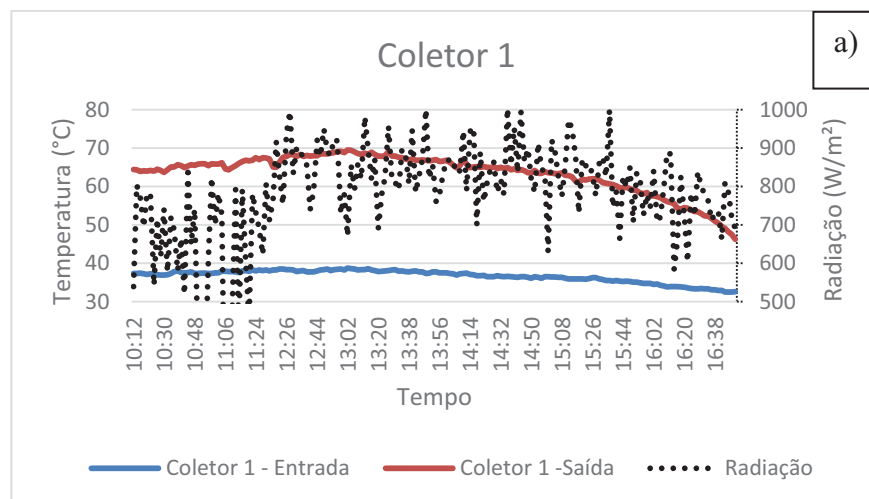
No experimento 7, o tempo de giro do coletor 1 foi mantido em 1 minuto e o 2 o foi aumentado para 15 minutos. No dia desse teste houve bastante intermitência de nuvens, como é possível averiguar na Figura 40 no gráfico da radiação, contudo a irradiação ainda assim continuou com valores elevados.

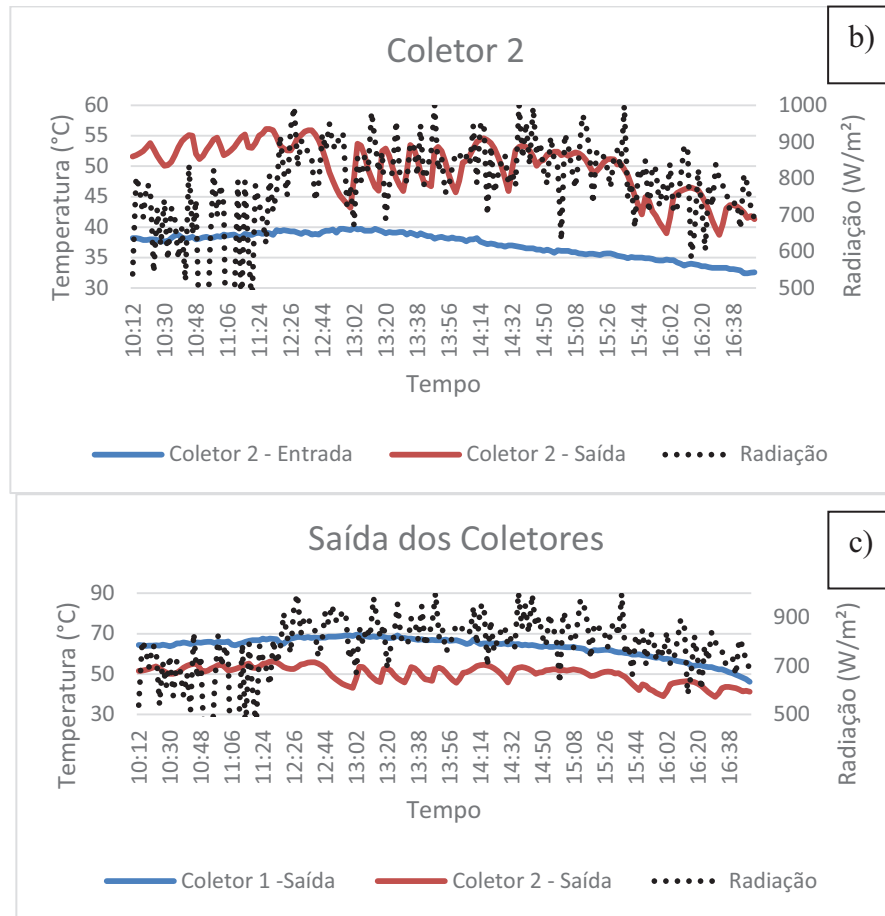
Na Figura 40.a), percebe-se que o coletor 1 apresentou praticamente o mesmo comportamento apesar das condições de radiação indicando que as buchas foram uma solução importante para padronização de testes.

Na Figura 40. b) e c) é possível verificar as perdas de temperaturas ocasionadas pelo aumento de tempo no giro do coletor 2 diminuindo assim a eficiência térmica do sistema.

A Figura 41 possui um comportamento parecido com o da Figura 40. Alguns pontos apareceram mais dispersos pelo gráfico o que foi ocasionado pela oscilação da radiação durante o dia.

Figura 40: Experimento 7.





Fonte: Próprio autor.

Tabela 14: Resumo estatístico do experimento 7.

| Coletor 1            |          | Coletor 2            |          |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| Média                | 54,75    | Média                | 41,91    |
| Erro padrão          | 1,63     | Erro padrão          | 1,50     |
| Mediana              | 60,12    | Mediana              | 41,53    |
| Modo                 | 62,29    | Modo                 | 13,41    |
| Desvio padrão        | 25,19    | Desvio padrão        | 23,19    |
| Variância da amostra | 634,61   | Variância da amostra | 537,67   |
| Curtose              | -1,31    | Curtose              | -1,59    |
| Assimetria           | -0,24    | Assimetria           | 0,08     |
| Intervalo            | 87,81    | Intervalo            | 70,07    |
| Mínimo               | 9,08     | Mínimo               | 10,81    |
| Máximo               | 96,89    | Máximo               | 80,89    |
| Soma                 | 13140,54 | Soma                 | 10059,46 |
| Contagem             | 240,00   | Contagem             | 240,00   |

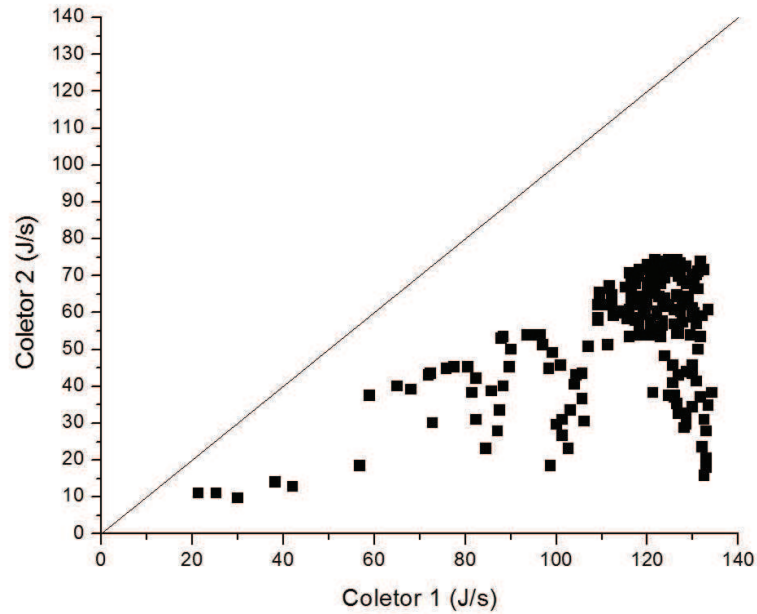
Fonte: Próprio autor.

Tabela 15: ANOVA Experimento 7.

| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ        | F      | valor-P | F crítico |
|-------------------|-----------|--------|-----------|--------|---------|-----------|
| Entre grupos      | 289181,50 | 1,00   | 289181,50 | 854,89 | 0,00    | 3,87      |
| Dentro dos grupos | 95391,06  | 282,00 | 338,27    |        |         |           |
| Total             | 384572,56 | 283,00 |           |        |         |           |

Fonte: Próprio autor.

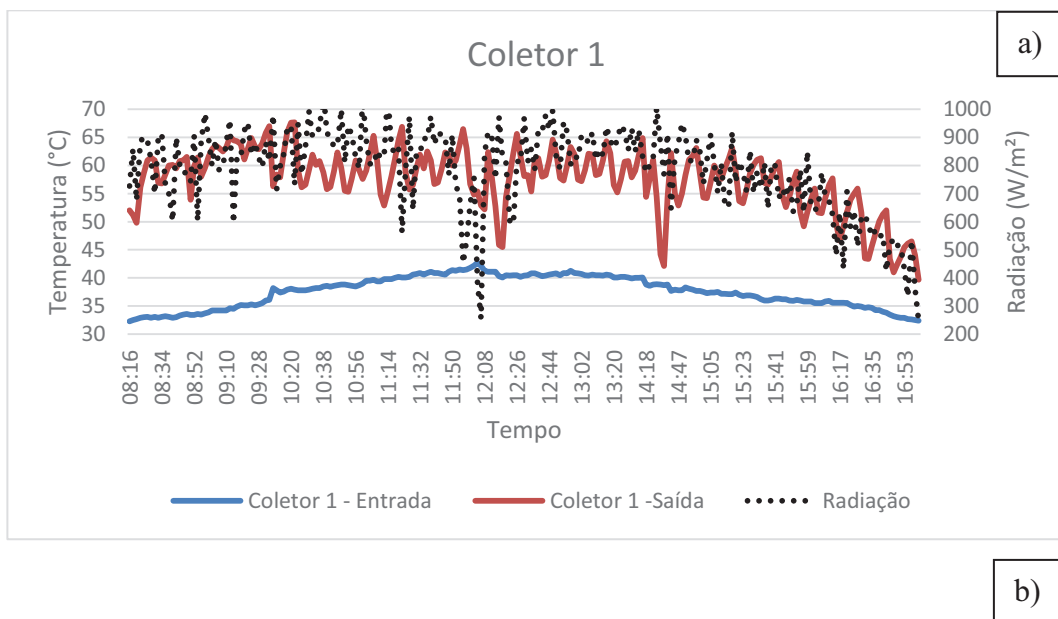
Figura 41: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 7.

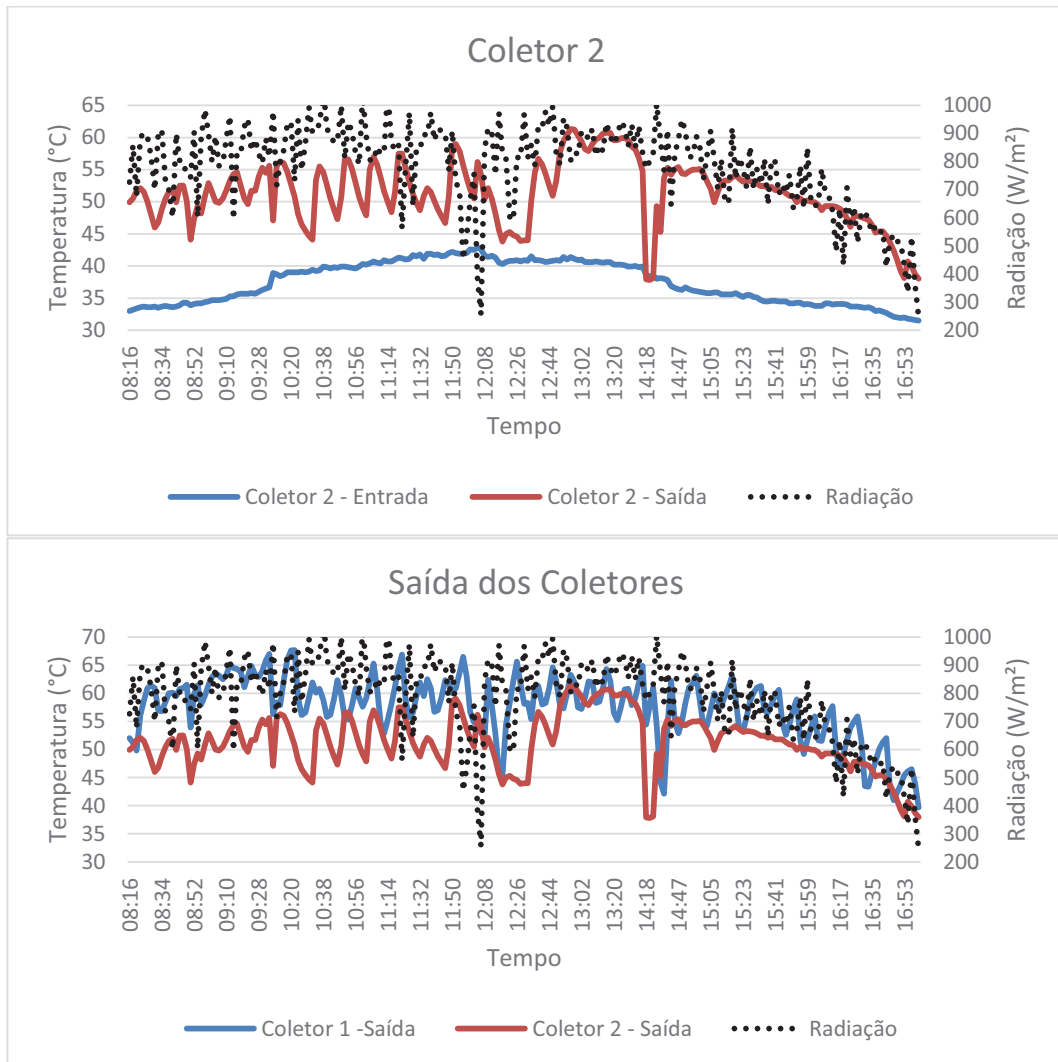


Fonte: Próprio autor.

No último experimento, o tempo de giro do coletor 1 foi aumentado para 5 minutos enquanto que o coletor 2 permaneceu com o mesmo tempo de 15 minutos.

Figura 42: Experimento 10.





Fonte: Próprio autor.

Tabela 16: Resumo estatístico do experimento 8.

| Coletor 1            |          | Coletor 2            |          |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| Média                | 86,62    | Média                | 60,27    |
| Erro padrão          | 1,57     | Erro padrão          | 1,35     |
| Mediana              | 88,24    | Mediana              | 66,18    |
| Modo                 | 88,67    | Modo                 | 74,83    |
| Desvio padrão        | 23,37    | Desvio padrão        | 20,10    |
| Variância da amostra | 545,92   | Variância da amostra | 403,89   |
| Curtose              | 0,16     | Curtose              | 0,06     |
| Assimetria           | -0,32    | Assimetria           | -0,91    |
| Intervalo            | 118,95   | Intervalo            | 86,94    |
| Mínimo               | 14,71    | Mínimo               | 0,00     |
| Máximo               | 133,66   | Máximo               | 86,94    |
| Soma                 | 19142,65 | Soma                 | 13320,05 |
| Contagem             | 221,00   | Contagem             | 221,00   |

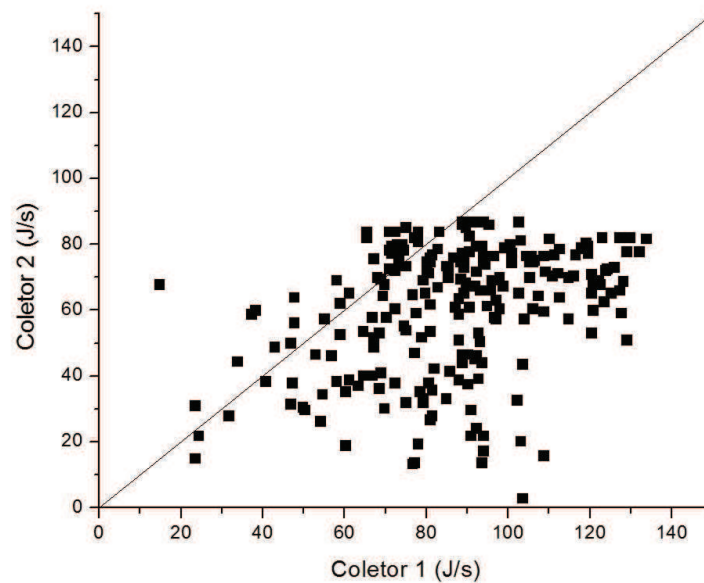
Fonte: Próprio autor.

Tabela 17: ANOVA Experimento 8.

| ANOVA             |           |        |          |        |         |           |
|-------------------|-----------|--------|----------|--------|---------|-----------|
| Fonte da variação | SQ        | gl     | MQ       | F      | valor-P | F crítico |
| Entre grupos      | 76702,89  | 1,00   | 76702,89 | 161,51 | 0,00    | 3,86      |
| Dentro dos grupos | 208959,85 | 440,00 | 474,91   |        |         |           |
| Total             | 285662,73 | 441,00 |          |        |         |           |

Fonte: Próprio autor.

Figura 43: Comparativo de absorção de energia dos dois coletores – experimento 8.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 42.a), é possível verificar as oscilações de temperatura ocasionadas pela mudança do tempo de giro no coletor 1. Isso fez com que a distância de temperatura na saída dos coletores no gráfico diminuísse indicando que o coletor 1 apresentou menores temperaturas no decorrer do teste, pois o gráfico do coletor 2 permaneceu praticamente com as mesmas características das do experimento 7.

E isso pode ser observado Figura 43 com uma maior dispersão da energia dos coletores indicando que o 1 apresentou menores temperaturas em relação ao experimento anterior.

Portanto, aparentemente o tempo de giro de 1 minuto é o melhor em todos os casos. Contudo percebe-se experimentalmente que esse intervalo não é o suficiente para ocasionar uma diferença de valores para o giro do coletor, ou seja, o Arduino e o driver são ativados para verificação gerando gasto de energia sem necessidade. Já com o intervalo de 5 minutos o coletor sempre gira para ajustar o foco. Além disso, comparando as Figura 39 e

Figura 41 é possível verificar pouca variação entre uma e outra indicando que não há tanta perda energética fazendo com que o intervalo de 5 minutos seja o mais interessante para o demais testes.

### 6.3 Programação do Arduino.

A programação do Arduino foi feita na plataforma de mesmo nome com a versão 1.8.4 que pode ser baixada gratuitamente no seu sitio eletrônico. A programa consiste em realizar o rastreamento solar através da comparação dos valores dos LDRs que ao serem sensibilizados acionam o motor para girar para esquerda ou para direita dependendo da posição do Sol.

Na inicialização do programa os pinos 8 e 9 são colocados em modo de saída. Eles são os pinos ligados ao driver e o são responsáveis pela direção e pelo giro do motor, respectivamente.

Depois foi feita a delimitação do tempo de varredura dos LDRs que no caso consistiram em 1, 5 e 15 minutos. Em uma primeira programação foi feita a observação de que são necessários 8500 passos no motor para ele girar 360°. É possível configurar o driver para 400 passos/rev através de uma combinação de chaves seletores.

Então foi estipulado que o motor deveria girar no máximo até 15° dentro do intervalo de verificação dos valores dos LDRs e para isso o motor deve dar 354 passos.

```
//Programa para Rastreamento solar dos Coletores Parabólicos

int valor1,valor2,vmap1,vmap2,contador;

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  pinMode(8,OUTPUT);//pino de direção

  pinMode(9,OUTPUT);//pino do passo

  digitalWrite(8,HIGH);
```

```

    digitalWrite(9,LOW);
}

void loop()
{
    // delay(2000);

    //delay(900000); //delay de 15 minutos

    //delay(300000); //delay de 5 minutos

    //delay(60000); //delay de 1 minutos

    if(contador<=353)

        {//Fator de correção 15/60 = 0,25 → 0,25.354 = 88 passos

            //2125 pulsos = 90°; 4250 pulsos = 180°; 8500 pulsos = 360°. Para a configuração
de 400 passos no driver.

                // com as reduções o motor precisa dar 354 passos a cada ciclo de tempo. Depois
vai para a verificação.

            digitalWrite(9,HIGH);

            delayMicroseconds(400);

            digitalWrite(9,LOW);

            digitalWrite(8,HIGH);

            delayMicroseconds(400);

            contador++;

        }

        contador=0;

        valor1 = analogRead(0);

        valor2 = analogRead(1);

        vmap1 = map(valor1 , 0 ,1000, 255, 0 );

        vmap2 = map(valor2 , 0 ,1000, 255, 0 );

```



```
Serial.print(valor1);

Serial.print("||");

Serial.print(valor2);

Serial.print("\t");

Serial.print(vmap1);

Serial.print("||");

Serial.println(vmap2);

delay(500);

    while((vmap1-vmap2)>8)
    {
        digitalWrite(8,HIGH);

        digitalWrite(9,HIGH);

        delayMicroseconds(400);

        digitalWrite(9,LOW);

        delayMicroseconds(400);

        valor1 = analogRead(0);

        valor2 = analogRead(1);

        vmap1 = map(valor1 , 0 ,1000, 255, 0 );

        vmap2 = map(valor2 , 0 ,1000, 255, 0 );

    }

    while((vmap2-vmap1)>8)
    {

        digitalWrite(8,LOW);

        digitalWrite(9,HIGH);

        delayMicroseconds(400);
```

```
digitalWrite(9,LOW);  
  
delayMicroseconds(400);  
  
valor1 = analogRead(0);  
valor2 = analogRead(1);  
vmap1 = map(valor1 , 0 ,1000, 255, 0 );  
vmap2 = map(valor2 , 0 ,1000, 255, 0 );  
}  
}
```

## 7 CONCLUSÃO

Foi realizado nesse trabalho a montagem e o estudo relacionado a melhorias de coletores de calhas parabólicas. Verificou-se que os parâmetros dos concentradores estavam condizentes com os presentes no mercado e possui uma taxa de concentração de 15 Sóis.

Depois realizaram-se os testes em que foi feita a comparação de um tubo absorvedor de cobre e outro de aço, sendo os coletores girados a cada 15 minutos manualmente. O que apresentou o melhor desempenho foi o de cobre.

Uma das maneiras de melhorar o desempenho dos coletores foi a utilização de um tubo de vidro vedado com espuma térmica para proteger os absorvedores do vento e assim evitar perdas por convecção.

A automação apresenta vantagens, por conta de operacionalização do modo manual em ter uma pessoa disponível para girar os coletores, e também o desgaste do indivíduo em que está realizando o giro devido ao alto índice de insolação.

Nos experimentos seguintes, os dois coletores foram automatizados e buscou-se qual o melhor tempo para girá-los, sendo esse estipulado em 1, 5 e 15 minutos. Nesses testes também foram instaladas buchas de *nylon*, pois a esponja térmica se deformava por conta das altas temperaturas. Isso fazia com que houvesse perdas por convecção. Com a introdução das buchas de *nylon* foi possível obter uma melhor repetitividade nos experimentos e evitar de ocasionar quebras no tubo de vidro ou danificar alguma parte do coletor para repor as esponjas desgastadas.

O melhor resultado foi o giro a cada 5 minutos. Quando configurado a cada um minuto, o sistema realiza a rotina de verificação sem haver necessidade ocasionando desperdício de energia e o giro a cada 15 minutos o Sol se movia e os raios solares não atingiam mais o absorvedor perdendo uma quantidade significativa de energia.

O sistema é isolado da rede com atendimento exclusivo c.c., pois servirá para alimentar as duas placas Arduino, os dois motores-de-passo e os *drivers* para acionamento dos motores. Nos programas *SketchUp* 2017 com a ferramenta *Skelion* foi possível verificar que há muito espaço disponível no LESGN para colocar a placa fotovoltaica sem que ela seja atingida por sombras durante o ano todo.

O sistema consiste em uma placa fotovoltaica da Kyocera de 40Wp – 15V, juntamente com um controlador de carga da marca Steca 12V – 24V com máxima carga de

5A e descarga de 6A. Na escolha das baterias de carga foram escolhidas duas baterias externas de 12V – 99Ah.

## REFERÊNCIAS

- AGUILAR, J. O., VALENCIA, J. M., ÁVILA, J. R., JARAMILLO, O. A.. Design, Construction and Evaluation of Parabolic Trough Collector as Demonstrative Prototype. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 57, p.989-998, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.082>.
- ANNUAL ENERGY OUTLOOK. Washington, Estados Unidos, jun. 2012. Disponível em: <[http://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2012\).pdf](http://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2012).pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2016.
- BARBOSA, E. S.. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreamento de concentradores cilíndrico-parabólicos**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2009.
- BEHAR, O., KHELLAF, A., MOHAMMEDI, K.. A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES). **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 106, p.268-281, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.045>.
- BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. Londres, jun. 2015. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2016.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO - Cresesb Disponível em: [http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=301](http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=301). Acesso em: 15 jun. 2015.
- CHAKRABORY, S., MUKHERJEE, N., BISWAS, R., SAHA, T., MOHINTA, A., MODI, N. K., SAMAJDAR, P. D.. Microcontroller based Solar Tracker system using LDRs and Stepper Motor. **International Journal Of Computer Applications**, Kolkata, v. 8887, n. 0975, p.38-41, jul. 2015. Disponível em: <<http://research.ijcaonline.org/micro2015/number1/micro1741.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2016
- CLAROS-MARFIL, L. J.; PADIAL, J. F.; LAURET, B.. A new and inexpensive open source data acquisition and controller for Solar research: Application to a water-flow glazing. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 92, p.450-461, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.037>.
- DALLY, J W., RILLEY, W. F., McCONNEL, K. G., **Instrumentation for engineering measurements**, 2. ed. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- DORIA FILHO, Ulysses. **Introdução à Bioestatística Para Simples Mortais**. 14. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003. 160 p.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A.. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Wisconsin-madison: Wiley, 2013. 928 p.
- GARCÍA. F. A., ZARZA, E., VALENZUELA, L., PÉREZ, M.. Parabolic-trough Solar

collectors and their applications. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 7, p.1695-1721, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>.

GOOGLE. Google Earth. Version 9.1.39.2. 2017. Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 718 - LESGN. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/@-3.7453909,-38.5781986,259m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 15 de ago de 2017.

FONSECA, M. R.. **Influência do ângulo de pitch no desempenho de um aerogerador de pequeno porte projetado com perfil aerodinâmico**. s809.2012. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

GOSWAMI, D Yogi; KREITH, Frank. **Energy conversion**. Eua: Crc Press, Taylor & Francis Group, 2008. (Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.)).

HERBERT, G.m. Joselin; JEBASINGH, V.k.. A review of Solar parabolic trough collector. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 54, p.1085-1091, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.043>.

JAGOO, Z.. **Tracking Solar Concentrators: A Low Budget Solution**. Mauritius: Springer, 2013. 108 p.

JIANG, Y., ZOU, B., DONG, J., YAO, Y.. An experimental investigation on a small-sized parabolic trough Solar collector for water heating in cold areas. **Applied Energy**, [s.l.], v. 163, p.396-407, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.186>.

KALOGIROU, S. A.. Solar thermal collectors and applications. **Progress In Energy And Combustion Science**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.231-295, jan. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.

KEYHANI, A., MOUSAZADEH, H., JAVADI, A., MOBLI, H., ABRINIA, K., SHARIF, A.. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing Solar systems output. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 13, n. 8, p.1800-1818, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>.

KHAN, M.; KHAN, S.; PATHAK, M.. Performance enhancement of Solar collectors—A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 49, p.192-210, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>.

LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR E GÁS NATURAL – LESGN. **Relatório de Montagem do Coletor Solar Parabólico**. 2014. 19 f. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LIMA FILHO, M. C.. **Sistema de Rastreamento Solar Com Dois Eixos para Painéis Fotovoltaicos, Coletores Cônicos, Cilíndricos e Parabólicos**. 2014. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2014

MARGOLIS, M.. Arduino Cookbook. 2. ed. Sebastopol: O'reilly, 2011. 724 p.

MCROBERTS, Michael; 2012. **Arduino Básico**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2012. 456 p.

BANZI, M.. Arduino. Disponível em: <<https://www.Arduino.cc/>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

MINITAB. Minitab Inc, 2016. USA. Disponível em: <http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/summary-statistics/how-skewness-and-kurtosis-affect-your-distribution/>. Acessado em 11 jan. 2017.

MONTES, I. E. P. *et al.* Design and Construction of a Parabolic Trough Solar Collector for Process Heat Production. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 57, p.2149-2158, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.181>

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade** . 4. ed. Rio de Janeiro, 2009.

MORAES, E. P. de. **Seguidor solar de um único eixo inclinado**. 2012. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Computação, Engenharia de Computação, Centro Universitário de Brasília, Brasília. Disponível em: <[http://www.repositorio.uniceub.br/bitstream/235/3636/3/Monografia\\_EULER\\_MORAES\\_-2-2012.pdf](http://www.repositorio.uniceub.br/bitstream/235/3636/3/Monografia_EULER_MORAES_-2-2012.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual para Engenharia para Sistemas Fotovoltáicos**. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014. 530 p. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2016.

PRINSLOO, G.; DOBSON, R.. **SOLAR TRACKING: Sun Position Sun Tracking Sun Following**. South Africa:., 2015. 542 p. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Gerro\\_Prinsloo](https://www.researchgate.net/profile/Gerro_Prinsloo)>. Acesso em: 30 maio 2016.

RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT. Paris, jul. 2016. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

ROLIM, M. M. *et al.* **Otimização De Parâmetros Construtivos De Coletores Parabólicos Lineares**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2012, São Paulo. Congresso. São Paulo: Abens, 2012. p. 1 - 8. Disponível em: <[https://araripeSolarsustentavel.files.wordpress.com/2012/07/art261\\_revisado.pdf](https://araripeSolarsustentavel.files.wordpress.com/2012/07/art261_revisado.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2016.

ROSENBLATT, A.; AARON, N.. **Solar Tracking System**. Swarthmore:., 2014. 36 p. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi4vee\\_5bXPAhWHW5AKHeiGDewQFggyMAE&url=http://triceratops.brynmawr.edu/dspace/bitstream/handle/10066/14260/Aaron\\_Rosenblatt\\_thesis\\_2014.pdf?sequence=1&usq=AFQjCNFOzDRcG4FYbkFT9UN-PuNYf0F3qA&sig2=311qsjDhmzRrDVuZl-5t7Q&bvm=bv.134495766,d.Y2I](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi4vee_5bXPAhWHW5AKHeiGDewQFggyMAE&url=http://triceratops.brynmawr.edu/dspace/bitstream/handle/10066/14260/Aaron_Rosenblatt_thesis_2014.pdf?sequence=1&usq=AFQjCNFOzDRcG4FYbkFT9UN-PuNYf0F3qA&sig2=311qsjDhmzRrDVuZl-5t7Q&bvm=bv.134495766,d.Y2I)>. Acesso em: 02 set. 2016.

SKOURI, S., ALI, A. B. H., BOUADILA, S., SALAH, M. B., NASRALLAH, S. B.. Design and construction of sun tracking systems for Solar parabolic concentrator displacement. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 60, p.1419-1429, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.006>.

STEPHENS, B., ALI, A. S., ZANZINGER, Z. DEBOSE, D.. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. **Building And Environment**, [s.l.], v. 100, p.114-126, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>.

VIEIRA, R.G., GUERRA, F. K. O. M. V., VALE, M. R. B. G., ARAÚJO, M. M.. Comparative performance analysis between static Solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 64, p.672-681, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.089>.



## ANEXO A – ENERGIA SOLAR

O Sol possui um diâmetro de  $1,39 \times 10^9$  m e é constituído de gás hidrogênio e hélio. A temperatura em algumas regiões do Sol pode chegar a  $40 \times 10^6$  K. As contínuas fusões nucleares entre o hidrogênio e o hélio são as responsáveis pela liberação de energia do Sol (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

No geral, quase todas as formas de energia do mundo são advindas da energia Solar, até mesmo o petróleo, pois há milhões de anos, através de processos fotossintéticos, complexas reações químicas originaram as plantas e as bactérias que, com o passar dos anos, submetidos a grandes pressões e temperaturas, se transformaram em petróleo. Os ventos são originados devido à diferença de temperatura em várias regiões da terra (KALOGIROU, 2004).

A constante solar ( $G_{sc}$ ) é uma importante variável no estudo de energia solar. Ela é a energia do Sol por unidade de tempo recebida por unidade de área em uma superfície perpendicular fora da atmosfera terrestre. Seu valor é de  $1367 \text{ W/m}^2$  (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A distância entre o Sol e a Terra varia no decorrer do ano. Equacionamentos ajudam a adequar esses valores com o passar dos meses. A Equação 1.a é mais simples desenvolvida por Spencer (1971) e a Equação 1.b mais complexa, porém mais exata, tendo sido desenvolvida por Iqbal (1983) (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

$$G_{on} \begin{cases} = G_{sc} \left( 1 + 0,33 \cdot \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right) & (1. a) \\ = G_{sc} \left( 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos(B) + 0,001280 \cdot \sin(B) + \right. \\ \quad \left. 0,000719 \cdot \cos 2B + 0,000077 \cdot \sin 2B \right) & (1. b) \end{cases}$$

Nestas,  $G_{on}$  é a radiação extraterrestre incidente em um plano normal no dia  $n$  do ano.  $B$  é dado por:

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (2)$$

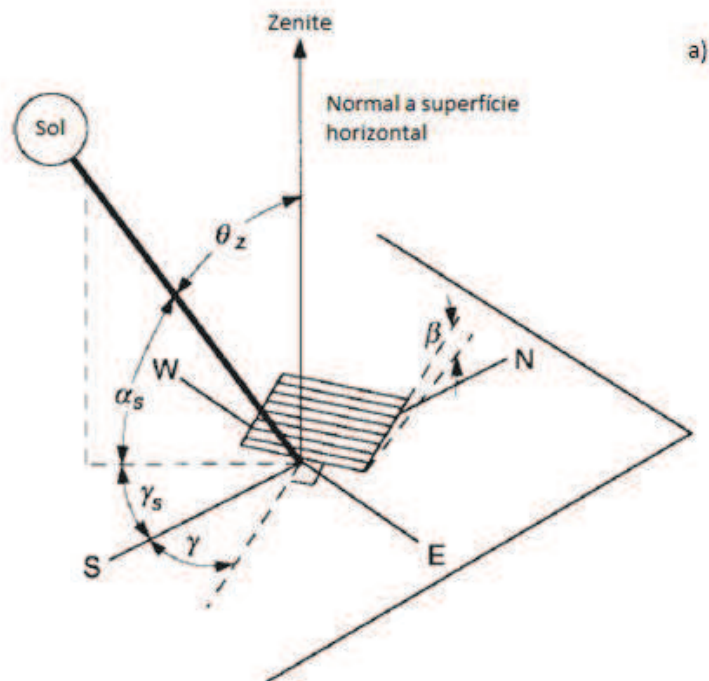
Algumas definições de ângulos são importantes para entender o posicionamento dos raios de Sol que chegam à superfície da Terra e podem ser visualizadas na Figura 44.

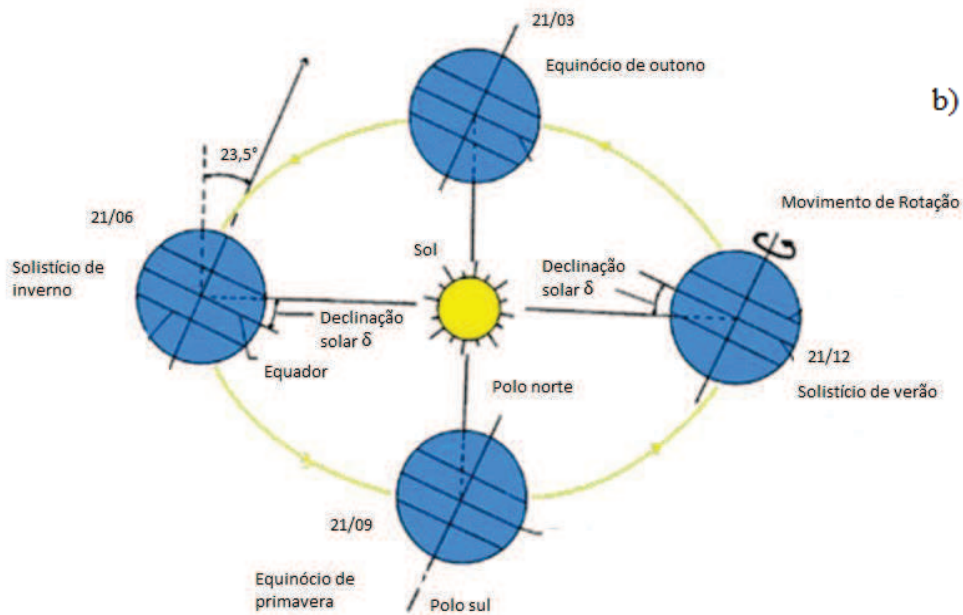
( $\varphi$ ) Latitude: é a localização norte-sul do equador, sendo que o norte é a referência positiva;  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ .

( $\delta$ ) Declinação: é a posição angular em meio dia em relação à linha do Equador, tendo como referência o norte positivo;  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ .

( $\beta$ ) Inclinação: é o ângulo entre o plano da superfície em que o raio de Sol incide com a horizontal;  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

Figura 44: Ângulos Solares (a) e Declinação Solar (b).





Fontes: DUFFIE e BECKMAN adaptado, 2013; Cresesb adaptado. 2008;

A declinação é calculada seguindo a Equação (3):

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3)$$

Onde n pode ser encontrado mais facilmente na Tabela 18:

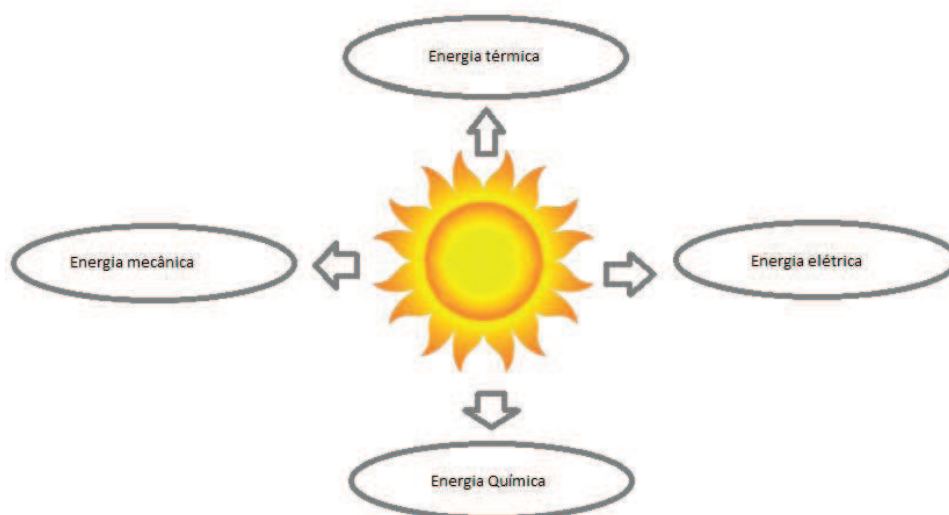
Tabela 18: Valores de n para os dias do ano.

| Mês       | n para i-ésimo dia do mês |
|-----------|---------------------------|
| Janeiro   | i                         |
| Fevereiro | i+31                      |
| Março     | i+59                      |
| Abril     | i+90                      |
| Maio      | i+120                     |
| Junho     | i+151                     |
| Julho     | i+181                     |
| Agosto    | i+212                     |
| Setembro  | i+243                     |
| Outubro   | i+273                     |
| Novembro  | i+304                     |
| Dezembro  | i+334                     |

Fonte: DUFFIE e BECKMAN adaptado, 2013;

A energia do Sol pode ser convertida em outros tipos de energia, como é possível visualizar na Figura 45.

Figura 45: Tipos de conversões da energia Solar.



Fonte: KHAN et al. adaptado, 2015.

A energia solar tem se apresentado como uma boa alternativa atualmente, pois além das células fotovoltaicas estarem mais acessíveis, os sistemas heliotérmicos também vêm sendo usados como forma de se obter energia utilizando equipamentos como fogões e dessalinizadores solares.

A energia solar para aquecer ar é usada para processos de secagem em indústrias têxteis, alimentos marinhos e agricultura. Também é usada para aquecimento de espaços de prédios. Há três tipos de sistemas de aquecimento de ar, chamados de ativo, passivo e híbrido, com ou sem sistema de armazenamento. Os sistemas de armazenamento podem ser ainda divididos em dois, chamados de leito rochoso e mudança de fase de materiais (PCM) (HERBERT et al., 2016).

O sistema PCM armazena energia pela mudança de fase de materiais de sólido para líquido. Essa energia acumulada é então usada durante a noite ou em dias nublados. Geralmente são usados hidratos de sal, parafinas, não-parafinas e ácidos graxos (HERBERT et al., 2016).

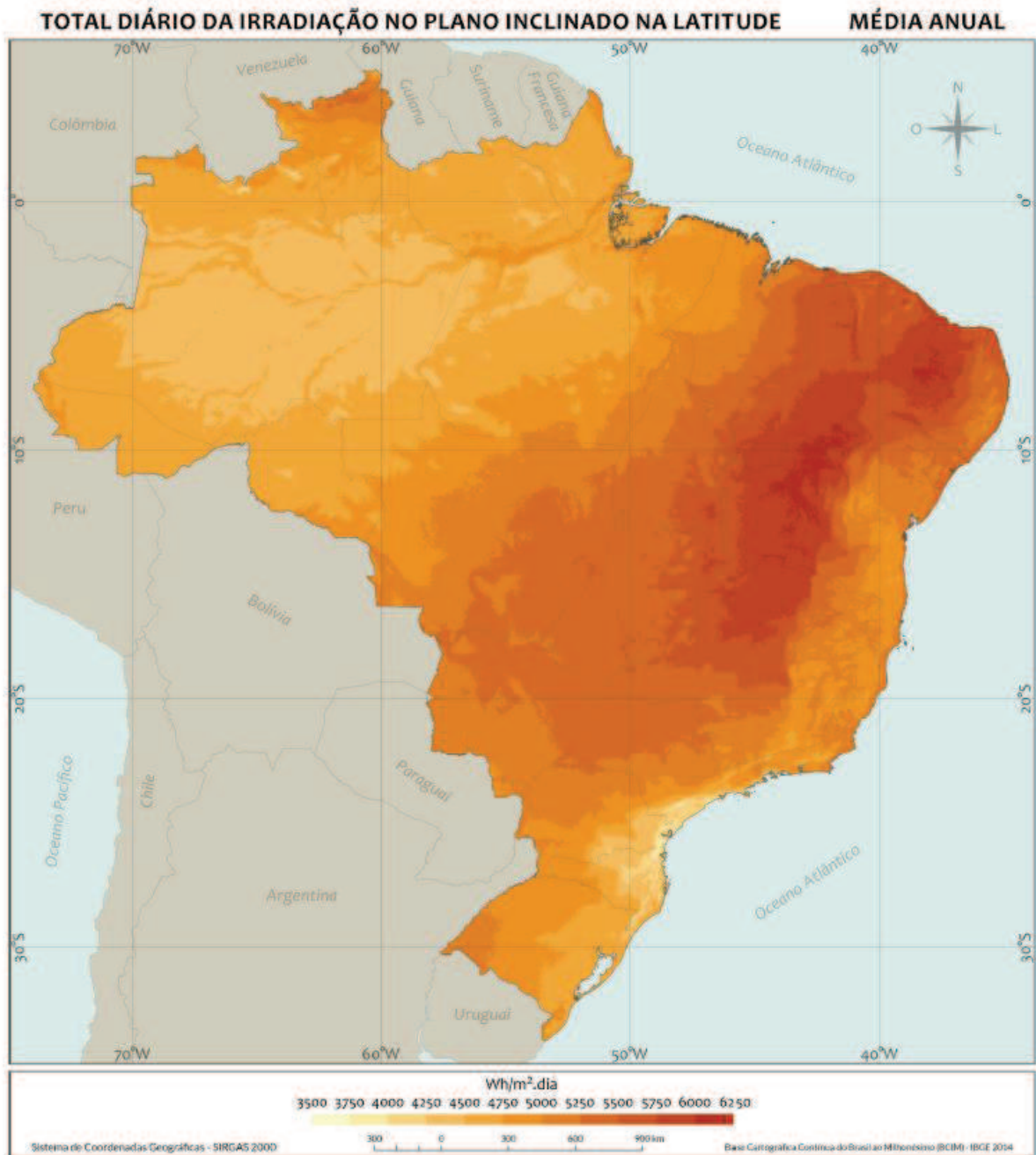
Há a possibilidade de usar energia solar através de um sistema híbrido para geração de energia através de um ciclo Rankine em conjunto com um dessalinizador de água.

Esse tipo de sistema, em relação à dessalinização, teria um custo-benefício melhor do que sistemas que utilizam eletricidade (HERBERT *et al.*, 2016).

Para fins industriais, a energia solar pode apresentar uma grande economia de energia elétrica, pois pode substituir processos que usualmente utilizam energia elétrica, como secagem, esterilização, fogões, limpeza, pasteurização etc. (HERBERT *et al.*, 2016).

## ANEXO B – ENERGIA SOLAR

Figura 46: Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2017.