



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DHEYMERSON PEREIRA ASSUNÇÃO**

**APERFEIÇOAMENTO E ANÁLISE DE COLETORES SOLARES PARABÓLICOS**  
**COM RASTREAMENTO MANUAL**

**FORTALEZA**

**2019**

DHEYMERSON PEREIRA ASSUNÇÃO

APERFEIÇOAMENTO E ANÁLISE DE COLETORES SOLARES PARABÓLICOS COM  
RASTREAMENTO MANUAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

FORTALEZA

2019

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)

---

- A873a Assunção, Dheymerson Pereira.  
Aperfeiçoamento e análise de coletores solares parabólicos com rastreamento manual / Dheymerson Pereira Assunção. – 2019.  
43 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.
1. Energia solar térmica. 2. Concentrador parabólico. 3. Rastreamento. I. Título.

CDD 620.1

---

DHEYMERSON PEREIRA ASSUNÇÃO

APERFEIÇOAMENTO E ANÁLISE DE COLETORES SOLARES PARABÓLICOS COM  
RASTREAMENTO MANUAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Fabíola Leite Almeida  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Alcimo Assunção e Silvanir Pereira Assunção, a minha esposa Juliana Alencar Assunção e a meus filhos Heitor e Pedro por apoio incondicional e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus pais por sempre me apoiarem e incentivarem para que eu estudasse sempre para alcançar meus objetivos. Em especial meu pai por ter sempre trabalhado arduamente para que nunca nos faltasse nada e conseguir pagar meus estudos, e minha mãe por toda força e perseverança para apoiá-lo.

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, por ter me aceitado como seu aluno e por não ter desistido, apesar das dificuldades, de ser orientador deste trabalho, disponibilizando seu tempo e atenção sempre que possível.

Aos professores que eu tive a honra de ser aluno ao longo da graduação, pois foi através deles que adquiri muito conhecimento. Aos professores participantes desta banca examinadora.

À minha esposa Juliana por ter sido paciente e me incentivado em todos os momentos com carinho e dedicação, todo amor foi essencial nesta trajetória.

Aos meus filhos Heitor e Pedro por terem sido minha maior inspiração para conseguir concluir com êxito esse projeto.

E a todos familiares e amigos que de alguma forma incentivaram e torceram por minha vitória, em especial os que estudaram e fizeram parte diretamente dessa trajetória, o Debaca.

“A natureza usa a energia Solar há milhares de anos, e bem usada, só a raça humana ainda não conseguiu usar em toda sua possibilidade”

**Cello Vieira**

## RESUMO

Uma fonte renovável de energia que se destaca das outras pela sua disposição e quantidade é a Energia Solar, cujo aproveitamento se divide basicamente em dois ramos de energia, Térmica e Fotovoltaica. Dentre as formas de captação de Energia Solar Térmica estão os concentradores parabólicos, que direcionam os raios solares para uma pequena área. Essa tecnologia permite a produção de energia térmica por meio de altas temperaturas e pressões. A Energia Solar Térmica captada nos concentradores pode ser utilizada em chuveiros, piscinas ou aquecedores, contribuindo para economia de Energia Elétrica. Ela também pode ser convertida em Energia Elétrica através de turbinas a vapor. Neste trabalho foi realizado um estudo experimental com dois coletores solares cilindro parabólicos, com 1,10m de comprimento e 0,60m de largura. O objetivo foi analisar, por meio de comparações entre os coletores, a eficiência de cada um utilizando materiais diferentes tanto no concentrador como no absorvedor, levando-se em consideração variáveis como: temperatura de entrada e saída e vazão de água corrente em cada coletor para obter a taxa de energia transferida sob forma de calor. Todo o experimento foi realizado com rastreamento manual, em que se buscava em um intervalo de tempo determinado manter o foco de concentração dos raios solares no tubo absorvedor. Ao final dos experimentos, foi possível determinar quais os materiais dentre os recursos disponíveis com melhor eficiência para os coletores. No caso foi utilizando tubo de cobre como absorvedor com um tubo de vidro concêntrico ao redor e no concentrador parabólico a utilização de uma chapa de aço inox de alto brilho, aumentando assim a eficiência no aproveitamento da energia solar. Foi possível alcançar temperaturas na água em torno de 75°C na saída dos coletores.

**Palavras-chave:** Energia Solar Térmica. Concentrador Parabólico. Rastreamento.

## ABSTRACT

A renewable source of energy that stands out from others for its disposition and quantity is Solar Energy, whose use is divided into two types of technology, Thermal and photovoltaic. Among the ways of capturing Solar Thermal Energy are the parabolic concentrators, which direct the solar rays to a small area. This technology allows the production of thermal energy through high temperatures and pressures. The Solar Thermal Energy captured in the concentrators can be used in showers, swimming pools or heaters, contributing to the saving of Electric Energy. It can also be converted into Electric Power through steam turbines. In this work, an experimental study was carried out with two parabolic trough solar collectors, 1.10m long and 0.60m wide. The objective was to analyze, through comparisons between collectors, the efficiency of each one using different materials in both the concentrator and the absorber, taking into account variables such as inlet and outlet temperature and flow rate of water in each collector for obtain the energy transfer rate in the form of heat. The whole experiment was carried out with manual tracking, in which a determined interval the time was sought to maintain the concentration focus of the solar rays in the absorber tube. At the end of the experiments, it was possible to determine which materials were among the best available resources for the collectors. In the case was using copper tube as absorber with a concentric glass tube around and in the parabolic concentrator the use of a plate of stainless steel of high brightness, increasing in this way the efficiency in the use of solar energy. It was possible to reach temperatures in the water around 75°C at the outlet of the collectors.

**Keywords:** Thermal Solar Energy. Parabolic Concentrator. Tracking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Fluxograma das aplicações práticas da Energia solar .....	15
Figura 2.2	– Concentração da radiação em um concentrador parabólico .....	18
Figura 3.1	– Coletores Solares .....	21
Figura 3.2	– Película refletiva espelhada e chapa de aço inox de alto brilho.....	22
Figura 3.3	– Coletor solar com plástico de proteção .....	24
Figura 4.1	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 03 de março de 2016 .....	26
Figura 4.2	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 04 de março de 2016 .....	26
Figura 4.3	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 03 de março de 2016 .....	27
Figura 4.4	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 04 de março de 2016 .....	27
Figura 4.5	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 13 de abril de 2016 .....	28
Figura 4.6	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 14 de março de 2016 .....	28
Figura 4.7	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 13 de abril de 2016 .....	29
Figura 4.8	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 14 de abril de 2016 .....	29
Figura 4.9	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 16 de maio de 2016 .....	31
Figura 4.10	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 19 de maio de 2016 .....	31
Figura 4.11	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 16 de maio de 2016 .....	32
Figura 4.12	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 19 de maio de 2016 .....	32
Figura 4.13	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 20 de maio de 2016 .....	34
Figura 4.14	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 23 de maio de 2016 .....	34
Figura 4.15	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 20 de maio de 2016 .....	35
Figura 4.16	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 23 de maio de 2016 .....	35
Figura 4.17	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 25 de julho de 2016 .....	36
Figura 4.18	– Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 26 de julho de 2016 .....	37
Figura 4.19	– Gráficos de Energia dos coletores do dia 25 de julho de 2016 .....	37

Figura 4.20	–	Gráficos de Energia dos coletores do dia 26 de julho de 2016 .....	38
Figura 4.21	–	Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 03 de agosto de 2016 .....	39
Figura 4.22	–	Resultado de $\Delta T$ dos coletores do dia 05 de agosto de 2016 .....	39
Figura 4.23	–	Gráficos de Energia dos coletores do dia 03 de agosto de 2016 .....	40
Figura 4.24	–	Gráficos de Energia dos coletores do dia 05 de agosto de 2016 .....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variação máxima de temperatura dos coletores no 1º e 2º teste .....	30
Tabela 4.2 – Energia média dos coletores no 1º e 2º teste .....	30
Tabela 4.3 – Energia média dos coletores no 3º teste .....	33
Tabela 4.4 – Energia média dos coletores no 4º teste .....	35
Tabela 4.5 – Energia média dos coletores no 5º teste .....	38
Tabela 4.6 – Energia média dos coletores no 6º teste .....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	13
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> .....	13
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i> .....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	14
<b>2.1</b>	<b>Energia Solar</b> .....	14
<b>2.2</b>	<b>Energia Solar Térmica</b> .....	16
<i>2.2.1</i>	<i>Sistema de Concentração de Energia Solar</i> .....	16
<i>2.2.2</i>	<i>Concentradores Cilíndricos Parabólicos</i> .....	17
<b>2.3</b>	<b>Energia transferida sob forma de calor</b> .....	19
<i>2.3.1</i>	<i>Dados para a água como fluido de trabalho</i> .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	21
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	21
<b>3.2</b>	<b>Método</b> .....	22
<i>3.2.1</i>	<i>Primeiro Teste</i> .....	23
<i>3.2.2</i>	<i>Segundo Teste</i> .....	23
<i>3.2.3</i>	<i>Terceiro Teste</i> .....	23
<i>3.2.4</i>	<i>Quarto Teste</i> .....	23
<i>3.2.5</i>	<i>Quinto Teste</i> .....	24
<i>3.2.6</i>	<i>Sexto Teste</i> .....	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	25
<b>4.1</b>	<b>1° Teste: Análise da película espelhada com tubos de aço</b> .....	25
<b>4.2</b>	<b>2° Teste: Análise da película espelhada com tubos de cobre</b> .....	28
<b>4.3</b>	<b>3° Teste: Análise das películas espelhadas dos coletores</b> .....	30
<b>4.4</b>	<b>4° Teste: Análise de desempenho de coletor com tubo de vidro</b> .....	33
<b>4.5</b>	<b>5° Teste: Análise dos coletores com tubos de vidro e chapa inox</b> .....	36
<b>4.6</b>	<b>6° Teste: Análise comparativa entre tubo de vidro e plástico</b> .....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	42
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

Energias renováveis são fontes de energias ilimitadas, isto é, encontra-se em constante renovação. Deste modo, podem ser utilizadas para produzir eletricidade de forma sustentável e a não poluir o planeta. Até o final do século XX, a forma mais utilizada pelo homem para produzir energia elétrica era através da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural e através da energia nuclear. Estas duas formas de obter energia elétrica, são consideradas energias não renováveis, pois são recursos limitados e poluentes, apesar de possuírem um rendimento bastante elevado. Inclusive, a energia nuclear até gera resíduos radiativo, altamente perigoso para o nosso bem-estar e para a vida em geral. Assim as energias que o ser humano considera renováveis são as energias que provêm do Sol (energia solar), da água (energia hídrica e das ondas e marés), do vento (energia eólica), do centro da Terra (energia geotérmica) e a biomassa, entre outras. As energias renováveis foram consideradas um bem necessário para a nossa sociedade, e Portugal é dos países da Europa com melhores condições climáticas para o aproveitamento destas.

A crescente demanda de energia em todo o mundo propiciou que grande importância fosse associada à exploração de novas fontes de energia; dentre as fontes não convencionais que foram estudadas, a energia solar agora oferece muitas promessas. A base científica para a utilização da energia solar pelo homem foi adquirida há alguns anos, mas faltava a vontade política para a extensão de sua exploração em larga escala. As aplicações em pequena escala já estão em operação e constantemente ganham novos mercados.

O potencial da energia irradiada pelo Sol seria suficiente para suprir todas as demandas da humanidade. A maneira como efetuar o aproveitamento dessa energia de forma cada vez mais eficiente é o grande desafio. Para superar esse desafio algumas formas de aproveitamento foram desenvolvidas. As principais formas de aproveitamento da energia solar são a térmica e a fotovoltaica.

A energia solar térmica é obtida através de coletores solares, que tem como principal finalidade aquecer um fluido (pode ser a água ou outro fluido que aqueça a água posteriormente), a partir dos raios solares, para utilização em diferentes processos.

Os coletores parabólicos, também chamados de concentradores parabólicos, captam os raios solares concentrando-os no foco da parábola onde se encontra tubos absorvedores de calor. Nos absorvedores o fluido de trabalho é aquecido pela ação da energia irradiada pelo Sol transformando-a energia térmica.

Durante esse projeto foram realizados testes com os dois concentradores parabólicos, simultaneamente, através de ajustes manuais no rastreamento solar, para se determinar os melhores materiais a serem utilizados de forma a melhorar o aproveitamento da energia solar.

## **1.1. Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral deste trabalho foi aperfeiçoamento de coletores parabólicos através da análise de testes comparativos realizados com rastreamento manual. Utilizando dois coletores solares desenvolvidos no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, LESGN, da Universidade Federal do Ceará.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

- Determinação dos materiais usados nos concentradores e absorvedores que alcançaram melhor eficiência, através da análise dos resultados.
- Determinação do menor intervalo de tempo para ajuste manual do rastreamento solar, levando em consideração as limitações físicas.
- Apresentar os resultados onde foram alcançados a maior variação de temperatura, entre a entrada e a saída dos coletores, e a maior taxa de transferência de calor instantânea.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Métodos de armazenamento térmico são utilizados em grandes centrais termossolares pois permitem à planta trabalhar durante a noite e também manter a estabilidade durante transientes causados por passagem de nuvens, por exemplo. Este armazenamento aumenta a confiabilidade de se produzir energia elétrica em centrais solares, uma vez que esta fica menos sensível às variações diárias e anuais das condições atmosféricas e de radiação, sendo fundamental para o funcionamento confiável e constante da planta, (Barlev & Stroeve, 2011). O excedente de calor pode ser armazenado sob a forma de calor sensível, pelo armazenamento em tanques do próprio fluido de trabalho, em sistemas de sais fundidos ou concreto, como também pode ser armazenado como calor latente em materiais com mudança de fase, (Pilkington, 2000).

### 2.1. Energia Solar

Energia solar é a energia proveniente da luz e do calor do Sol que é aproveitada e utilizada por meio de diferentes tecnologias, principalmente como o aquecimento solar, energia solar fotovoltaica, energia heliotérmica e arquitetura solar. A energia solar é considerada uma fonte de energia renovável e sustentável.

Há apenas duzentos anos, o homem derivava seus recursos energéticos quase exclusivamente do Sol. Naquela época, a madeira era de uso geral para aquecimento, e os animais eram usados para o transporte. Ambas estas espécies de energia são proporcionadas – direta ou indiretamente – pela fotossíntese (processo pelo qual as plantas podem utilizar parte da energia do Sol para converter o dióxido de carbono e água em substâncias combustíveis e alimento). Outras formas de energia derivada do Sol eram a do vento e a da água, suas aplicações mais conhecidas eram moinhos de vento e rodas d'água, (Bertozzi, 2004)

Até o século XVIII, o consumo de combustíveis fósseis era insignificante apesar de todos os combustíveis fósseis serem conhecidos desde a antiguidade. O petróleo era usado para iluminação, e o asfalto era empregado como material de construção, (Bertozzi, 2004)

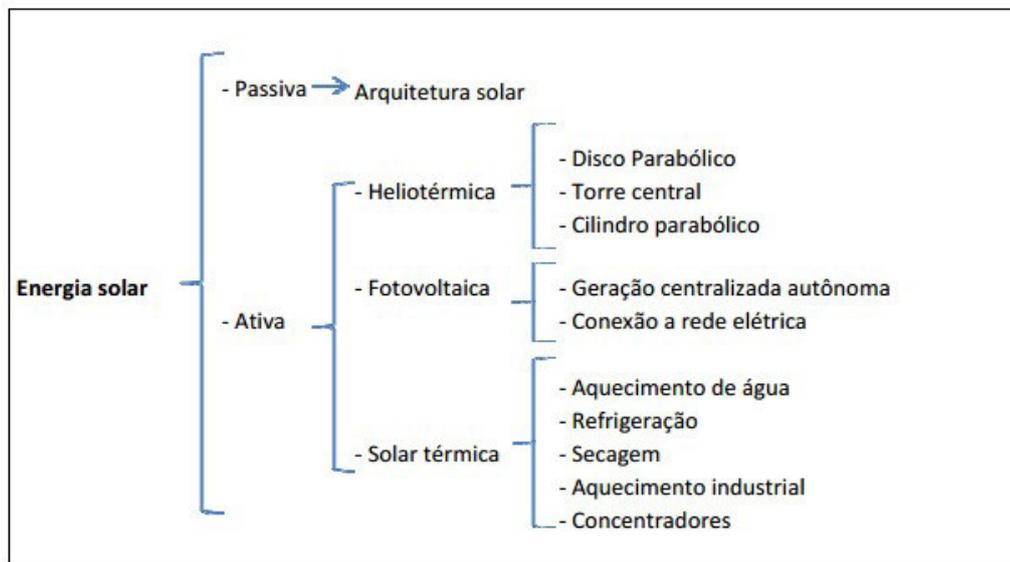
Atualmente com o aumento da demanda de energia, muitas empresas, universidades e líderes políticos estão a discutir e propor soluções e novas estratégias para lidar com esse problema de forma econômica, racional e menos prejudicial ao meio ambiente, (Bertozzi, 2004).

A energia solar tem sido uma alternativa bastante procurada por vários países, pelo fato de ser uma energia renovável abundante e inesgotável no horizonte da vida humana, além de ser considerada uma energia limpa. A energia proveniente da luz e do calor do Sol é utilizada por meio de diferentes tecnologias em constante evolução, como o aquecimento solar, a energia solar fotovoltaica, a energia heliotérmica, a arquitetura solar e a fotossíntese artificial. Dependendo da forma como capturam, convertem e distribuem a energia solar, essas tecnologias podem ser caracterizadas como ativas ou passivas.

Entre as técnicas solares ativas estão o uso de coletores solares térmicos, de painéis fotovoltaicos e de aquecedores solares. Já entre as técnicas solares passivas temos a orientação de um edifício para o Sol, a seleção de materiais com massa térmica favorável e o projeto de espaços que façam o ar circular naturalmente. Inúmeros estudos estão sendo realizados para se utilizar a energia solar, que se subdivide em duas grandes áreas: Solar fotovoltaica e Solar térmica.

A figura 2.1 mostra um fluxograma com as aplicações práticas da Energia Solar e suas subdivisões.

Figura 2.1 – Fluxograma das aplicações práticas da Energia solar



Fonte: PEREIRA et al., modificado (2004).

Nos sistemas fotovoltaicos a radiação solar é convertida em energia elétrica por intermédio dos chamados semicondutores, que são configurados em elementos denominados células fotovoltaicas. Os semicondutores feitos de silício são os mais usados na construção das células. Uma vez que cada célula produz uma corrente contínua de intensidade relativamente fraca, recorre-se a uma associação de várias células para obter um conjunto,

conhecido como módulo fotovoltaico. O agrupamento de módulos, colocados numa mesma estrutura de suporte, forma um painel.

Quando incide luz solar com energia suficiente sobre estas estruturas, produz-se uma corrente de elétrons, obtendo-se assim energia elétrica utilizável. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é chamado de “efeito fotovoltaico”.

## **2.2. Energia Solar Térmica**

A energia solar térmica é obtida através de coletores solares, que tem como principal finalidade aquecer um fluido (pode ser a água ou outro fluido que aqueça a água posteriormente), a partir dos raios solares, para utilização em diferentes processos. A água aquecida é armazenada e destinada ao uso residencial, industrial, calefação de espaços, dentre outras possibilidades. O Brasil tem grande potencial para a produção desse tipo de energia devido sua localização geográfica. A energia solar térmica é classificada como a mais econômica e rentável das energias renováveis.

Os coletores solares podem ser de dois tipos: coletor solar plano e coletor de concentração de energia. O primeiro funciona absorvendo os raios solares numa placa absorvedora que transfere o calor obtido para o sistema de tubos, onde o fluido térmico circula. Com o fluido aquecido, caso não seja a água, o mesmo passa por um trocador de calor para aquecer a água do sistema, que será armazenada em um reservatório de água quente para ser distribuída para o sistema de acordo com a necessidade e a rede de distribuição.

### ***2.2.1 Sistema de Concentração de Energia Solar***

A energia solar concentrada (CSP) são sistemas que usam lentes ou espelhos para concentrar a vasta área do sol para uma área reduzida. A energia elétrica é produzida quando a luz do sol concentrada é convertida em calor que faz trabalhar um motor de calor (normalmente uma turbina a vapor) ligado a um gerador elétrico. CSP não deve ser confundido com painéis fotovoltaicos em que a energia solar é diretamente transformada em energia elétrica sem recorrer ao uso de turbinas a vapor.

A primeira aplicação prática do uso da energia solar térmica remonta à antiguidade clássica (800 a.C. a 500 d.C.), quando espelhos queimados ou côncavos eram usados para focar os raios solares. O uso passivo da energia solar era aplicado no Egito, Mesopotâmia e nas primeiras civilizações Sul Africanas como se pode comprovar pela arquitetura de edifícios antigos. Por exemplo, as portas eram colocadas de forma a estarem longe de lados solarengos no pico do sol ao meio dia. Em climas frios as portas e janelas eram orientadas de forma perfeita no lado da casa protegido do vento, mas tanto quanto no alinhamento do sol do meio dia, (Kalagirou, 2013).

A utilização da energia solar em grande escala de data mais antiga é creditada, embora não comprovado, a Arquimedes (282 a 212 a.C.), que teria destruído navios inimigos da frota romana na Baía de Syracuse (hoje pertencente à Itália), durante o episódio conhecido como Cerco de Syracuse (214 a 212 a.C.), concentrando os raios solares em um foco para aquecê-los até pegarem fogo. O aparelho usado por Arquimedes, algumas vezes chamado de “raio de calor de Arquimedes” ou “raio solar de Arquimedes”, foi descrito como um vidro composto com 24 espelhos que convergiam para um único foco, porém alguns historiadores acreditam que Arquimedes teria utilizado vários escudos bem polidos de bronze ou cobre atuando, dessa forma, como espelhos. (Kalagirou, 2013).

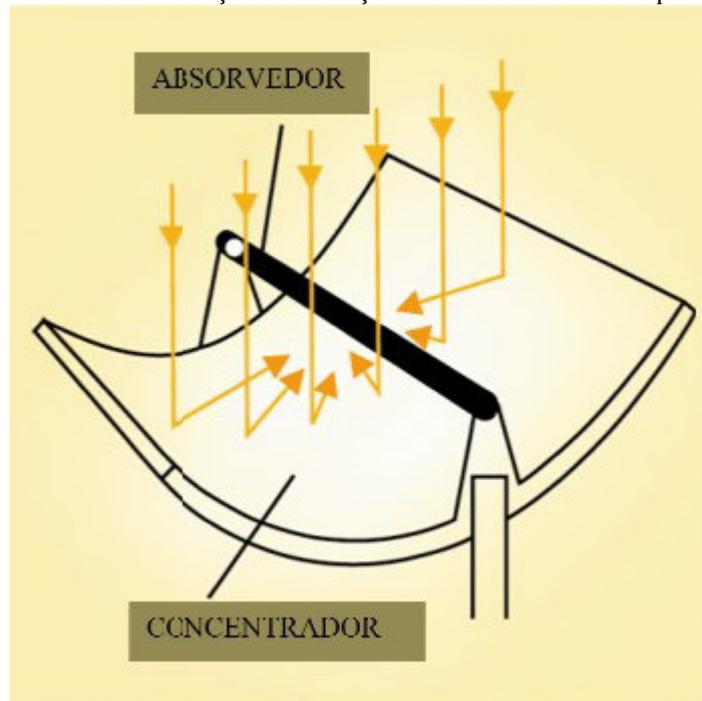
### ***2.2.2 Concentradores Cilíndricos Parabólicos***

Os coletores cilíndricos parabólicos são revestidos por um material refletor em formato parabólico. Ao longo da linha de foco do refletor parabólico é colocado um tubo metálico preto, coberto por um tubo de vidro para evitar perdas de calor, denominado receptor (Kalagirou, 2009). Concentradores solares são utilizados quando há a necessidade de alcançar elevadas temperaturas.

O princípio desses coletores solares é redirecionar a radiação dos raios solares para o foco, no caso um tubo absorvedor. Esse processo diminui perda de radiação e por isso é possível alcançar temperaturas mais elevadas do que nos coletores sem concentração.

A figura 2.2 ilustra o funcionamento a recepção da radiação pela superfície refletora e pelo tubo absorvedor.

Figura 2.2 – Concentração da radiação em um concentrador parabólico



Fonte: Solarpaces (2011).

No foco do receptor encontra-se um tubo, onde circula o fluido a aquecer, o absorvedor. Para se atingir elevadas temperaturas de aquecimento, é normalmente utilizado como fluido de trabalho um óleo térmico.

Apesar deste tipo de coletores ter a vantagem de apresentar temperaturas de serviço bastante elevadas, uma desvantagem conhecida é o fato de não funcionar com radiação difusa. Existem dois tipos de principais de radiação solar, a radiação direta que vem diretamente do sol tendo por isso direção definida e a radiação difusa, que é aquela que de uma maneira geral não apresenta direção. Assim, em dias em que o céu não esteja limpo (dias onde a fração de radiação solar direta é menor face à radiação total) o rendimento do equipamento é drasticamente comprometido.

Como as temperaturas de serviço destes coletores são muito elevadas existem aplicações para estes coletores que os coletores convencionais não têm. Dessa forma de uma maneira geral, estes coletores têm como aplicações:

- Aquecimento de água para altas temperaturas (80 até 100 ° C), substituindo as caldeiras convencionais ou aquecedores. Deste modo contribui-se para uma diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e redução das emissões de efeito estufa.

- Produção de vapor para a indústria. Na indústria é muito comum a utilização de vapor de água a baixa temperatura (em torno de 120 a 150 °C) para a produção.
- Produção de energia elétrica através do uso de um ciclo de Rankine onde a caldeira é substituída pelo coletor. Como a temperatura de evaporação é menor que num ciclo de Rankine convencional (cerca de 250/300 °C, quando a convencional anda em torno dos 600 °C) não é usual usar-se vapor de água, mas sim outro tipo de fluídos.

### 2.3. Energia transferida sob forma de calor

Sempre que dois corpos a diferente temperatura se encontram em contato, o corpo que se encontra a uma temperatura mais elevada transfere energia para o corpo que se encontra a uma temperatura mais baixa. A esta transferência de energia dá-se o nome de Calor.

Há três fatores que devemos ter em conta para determinar a quantidade de energia transferida sob a forma de calor para um determinado sistema:

- A variação de temperatura sofrida pelo sistema;
- A quantidade de matéria (massa) do sistema;
- O tipo de material que constitui o sistema (capacidade térmica mássica).

Essa quantidade de energia transferida também conhecida como Calor sensível, é a quantidade de calor que é retirado ou fornecido a um corpo e é capaz apenas de gerar variação de temperatura (não havendo mudança de fases). A determinação da quantidade de calor sensível é feita pela equação fundamental da calorimetria, equação 1:

$$Q = m.c.\Delta T \quad (1)$$

Onde  $m$  é a massa do corpo em questão,  $c$  é o calor específico e  $\Delta T$  é a variação de temperatura após o contato. Quando a transferência de energia se dá em um sistema que trabalha com um fluxo de uma substância, se faz necessário determinar qual a vazão mássica dessa substância e a variação de temperatura entre a entrada e a saída da substância. Dessa forma a equação de energia transferida (equação 2) para o fluido do sistema fica:

$$\dot{Q} = \dot{m}.c.\Delta T \quad (2)$$

Onde  $\dot{Q}$  é energia transferida em forma de calor por unidade de tempo e  $\dot{m}$  é a vazão mássica do fluido. Essa vazão mássica pode ser determinada pela divisão da densidade do fluido pela vazão volumétrica.

### ***2.3.1 Dados para a água como fluido de trabalho***

O calor específico é quantidade de calor que deve ser fornecido para que 1 g (uma grama) de substância tenha a sua temperatura elevada em 1 °C. Cada substância possui um determinado valor de calor específico, que é geralmente expresso em cal/g.°C (caloria por grama e grau Celsius). Quanto maior for o calor específico maior será a quantidade de calor fornecida ou retirada para obter variações de temperatura.

No caso da água, o calor específico é 1 cal/g.°C. O que implica em dizer que para variar em 1 °C a quantidade de 1 g de água é necessária 1 cal de calor.

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de energia e, portanto, de calor é o Joule (símbolo J). Nesse caso tem-se que o calor específico da água pode ser considerado como sendo 4186 J/kg. K ou 4,186 J/g.°C.

Já a densidade da água é conhecida como 997 kg/m<sup>3</sup> ou 0,997 g/ml. Em termos didáticos alguns autores consideram que para cada 1 ml de água tem-se uma massa de 1 g.

### 3. METODOLOGIA

Este projeto apresenta a comparação entre dois coletores com rastreamento manual no intuito de obter um modelo ótimo. Para isso foram utilizados dois concentradores parabólicos já existentes no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN). Os concentradores são mostrados na figura 3.1.

Figura 3.1 – Coletores Solares



Fonte: Próprio Autor

#### 3.1. Materiais

Nos testes, alguns materiais utilizados foram comuns a todos os arranjos, já outros foram específicos de cada teste. Dessa forma têm-se os seguintes materiais comuns:

- a) Dois Concentradores Parabólicos em aço galvanizado;
- b) Datalogger;
- c) Proveta graduada;
- d) Quatro termopares tipo K;
- e) Cronômetro.

De acordo com a evolução dos testes, outros materiais específicos foram usados, tanto nos absorvedores quanto nos concentradores:

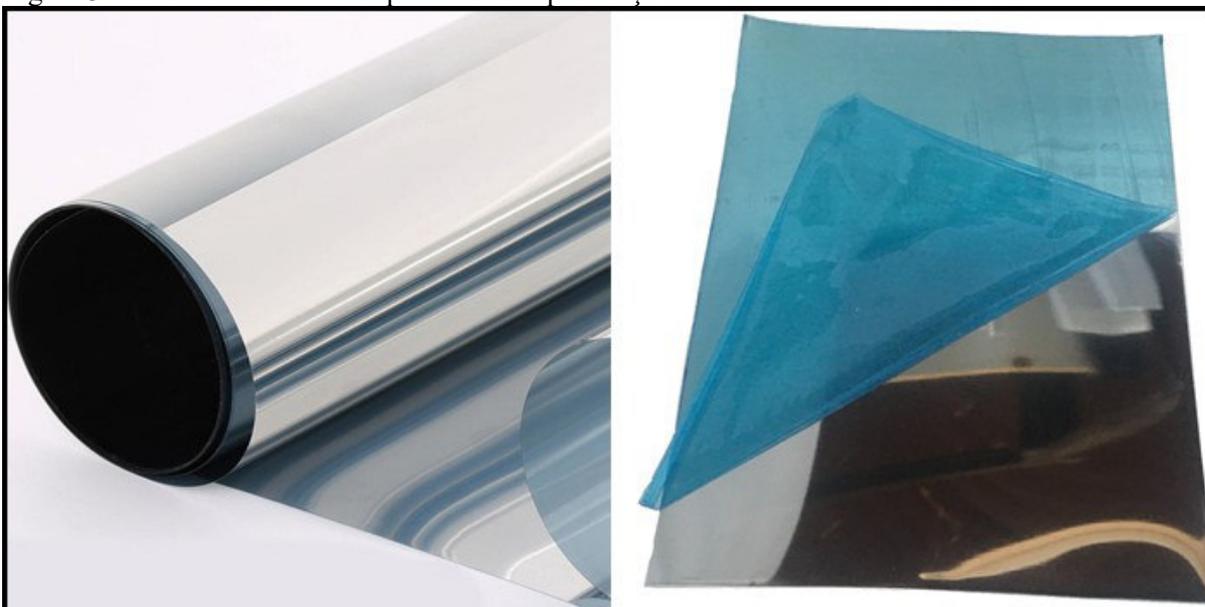
## a) Absorvedores:

- Tubos de aço com 1cm de diâmetro e 1mm de espessura;
- Tubos de cobre com 1cm de diâmetro e 1mm de espessura;
- Tubos de vidro com 3 cm de diâmetro e 1mm de espessura.

## b) Concentradores:

- Película refletiva espelhada prata g5;
- Chapa de aço inox 430 de alto brilho;
- Plástico de proteção transparente.

Figura 3.2 – Película refletiva espelhada e chapa de aço inox de alto brilho.



Fonte: Site Mercado Livre

### 3.2 Método

Foram desenvolvidos 2 coletores solares de concentração parabólica. Vários testes foram realizados ao longo do ano de 2016, entre os meses de março e agosto, no intuito de se determinar quais materiais mais adequados para os coletores com o rastreamento manual. Cada teste foi realizado durante dois dias, medindo-se as temperaturas de entrada e saída de água em cada coletor. As temperaturas foram medidas através de 4 termopares tipo k e armazenadas em um aparelho “Datalogger”.

### ***3.2.1 Primeiro Teste***

O primeiro teste foi feito em março durante os dias 03 e 04 de março de 2016. Ele ocorreu da seguinte forma: Coletor 1 com uma película refletiva, figura 3.2(a), e o coletor 2 sem essa película (o reflexo seria apenas do próprio material do concentrador – aço galvanizado). Ambos os coletores estavam utilizando como absorvedores tubos de aço revestidos com tinta preta para altas temperaturas. Buscou-se manter as vazões de saída dos coletores em valores próximos, para não existir uma interferência significativa na temperatura alcançada.

### ***3.2.2 Segundo Teste***

O segundo teste foi realizado durante dois dias, nos dias 13 e 14 de abril de 2016. O Coletor 1 ficou com tubo de cobre no absorvedor e sem película espelhada no concentrador. Já o Coletor 2 estava com tubo de cobre no absorvedor e com a película espelhada no concentrador.

### ***3.2.3 Terceiro Teste***

O terceiro teste foi realizado durante dois dias, nos dias 16 e 19 de maio de 2016. Os dois coletores estavam com tubo de cobre no absorvedor e película espelhada no concentrador. Porém neste caso, a película do coletor 2 era a mesma já existente dos testes anteriores (cerca de dois meses e meio), enquanto a película refletiva do coletor 1 era nova.

### ***3.2.4 Quarto Teste***

O quarto teste foi realizado durante dois dias, nos dias 20 e 23 de maio de 2016. O Coletor 1 ficou com tubo de cobre no absorvedor e tubo de vidro no entorno do tubo de cobre, para isolar contra a ação do vento, e película espelhada no concentrador. Já o Coletor 2 estava com tubo de cobre no absorvedor e película espelhada no concentrador.

### ***3.2.5 Quinto Teste***

O quinto teste foi realizado durante dois dias, nos dias 25 e 26 de julho de 2016. O Coletor 1 ficou com tubo de cobre no absorvedor e tubo de vidro no entorno do tubo de cobre, para isolar contra a ação do vento; e chapa inox de alto brilho no concentrador. Já o Coletor 2 estava com tubo de cobre e de vidro no absorvedor e película espelhada no concentrador.

### ***3.2.6 Sexto Teste***

O sexto teste foi realizado durante três dias, nos dias 03 e 05 de agosto de 2016. O Coletor 1 estava com tubo de cobre no absorvedor e tubo de vidro no entorno do tubo de cobre e chapa de aço inox de alto brilho no concentrador. Já o Coletor 2 estava com tubo de cobre no absorvedor, chapa de aço inox no concentrador e um plástico de proteção na parte superior do concentrador, conforme mostrado na figura 3.3, que teria a mesma função do tubo de vidro de isolar as perdas de calor do absorvedor para o ambiente.

Figura 3.3 – Coletor solar com plástico de proteção



Fonte: Próprio Autor

## 4 RESULTADOS

O projeto realizado consistiu em dois concentradores solares parabólicos feito de aço galvanizado, que deveriam transferir calor proveniente dos raios solares, concentrando-os nos absorvedores que são tubos centralizados no foco da parábola. Durante a realização de cada teste, os concentradores foram ajustados para manterem sempre o foco nos tubos absorvedores. A transferência de calor dos absorvedores para o fluido circulante, no caso água potável, obtendo assim água quente na saída dos coletores.

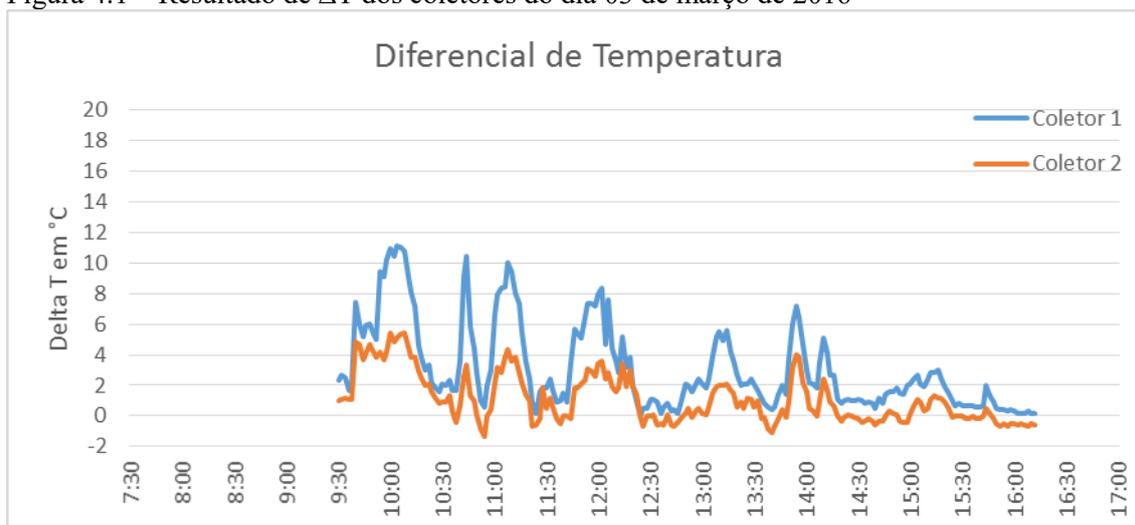
O desempenho dos concentradores foi medido por meio da análise de variação de temperatura em cada concentrador e pela média de calor transferido em cada coletor. Para isso, foram utilizados dois termopares em cada coletor, um na entrada e outro na saída do tubo usado como absorvedor de calor e calculado energia média pela equação 2.

Para cada teste realizado os dados de temperatura foram captados a cada dois minutos e armazenados em cartão de memória. A vazão de água era ajustada no começo dos testes e verificada a cada ajuste de rastreamento manual para controle e evitar variações grandes de vazão, se necessário novo ajuste era realizado. Pequenas variações na vazão de água eram esperadas, devido o fornecimento vindo da rede. Portanto, para efeito de análise, será considerada a vazão média para cada coletor.

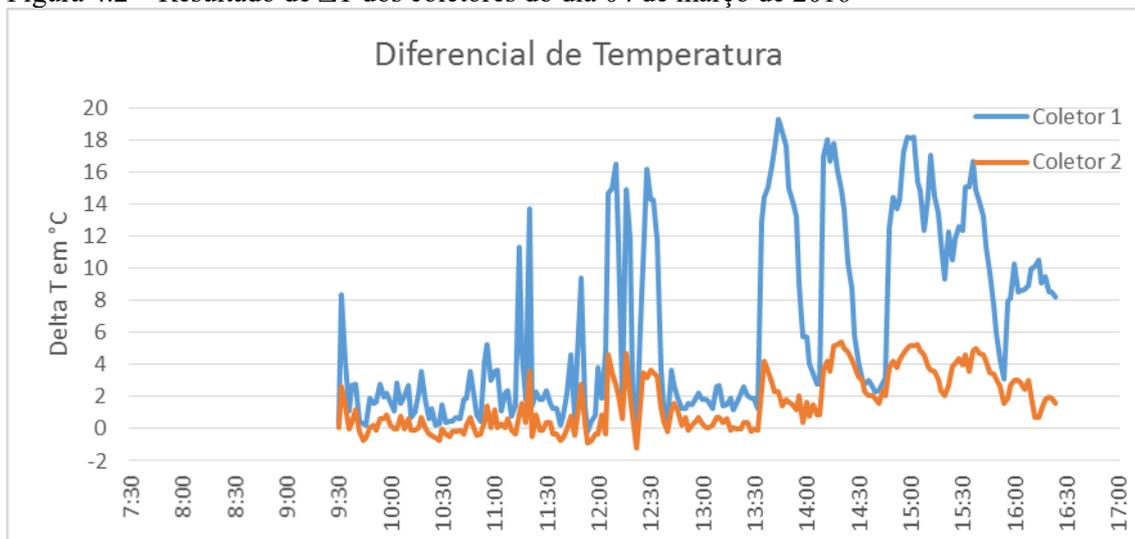
### 4.1 1º Teste: Análise da película espelhada com tubos de aço

Primeiro teste, realizado nos dias 03 e 04 de março de 2016, foram utilizados tubos de aço como absorvedores de calor; além disso, no coletor 1 foi colocada uma película espelhada para verificar se haveria ganho de eficiência em relação ao coletor 2; que estava sem película concentrando os raios solares para absorvedor apenas com o próprio material.

No primeiro dia, as vazões médias dos coletores foram 42 ml/min e 39 ml/min, respectivamente, começando às 09:30h e terminando às 16:20h. Já no segundo dia as vazões médias foram 35 ml/min e 46 ml/min, respectivamente, começando às 09:30h e terminando às 16:30h. Os gráficos mostrados nas figuras 4.1 e 4.2 trazem a comparação entre os dois coletores, demonstrando o comportamento de cada um.

Figura 4.1 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 03 de março de 2016

Fonte: Próprio Autor

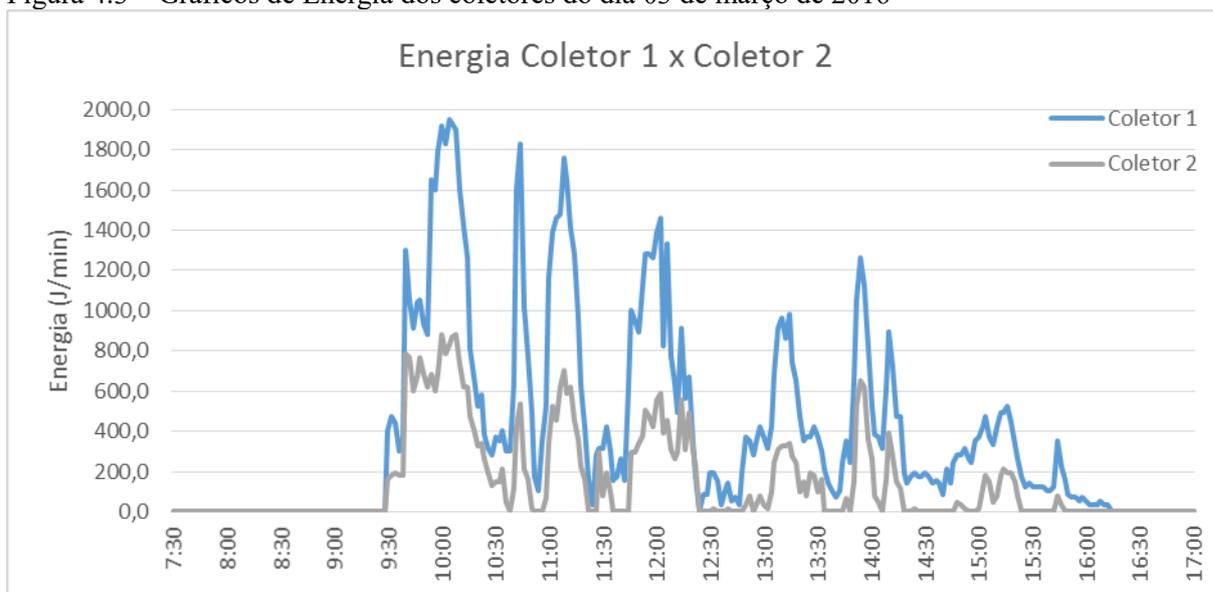
Figura 4.2 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 04 de março de 2016

Fonte: Próprio Autor

No segundo dia, uma maior dispersão de valores de  $\Delta T$  é evidenciada nos gráficos. Isso decorre de uma dificuldade no controle da vazão do coletor 1 que, por vezes, foi necessário um novo ajuste devido à queda acentuada da vazão de água neste coletor.

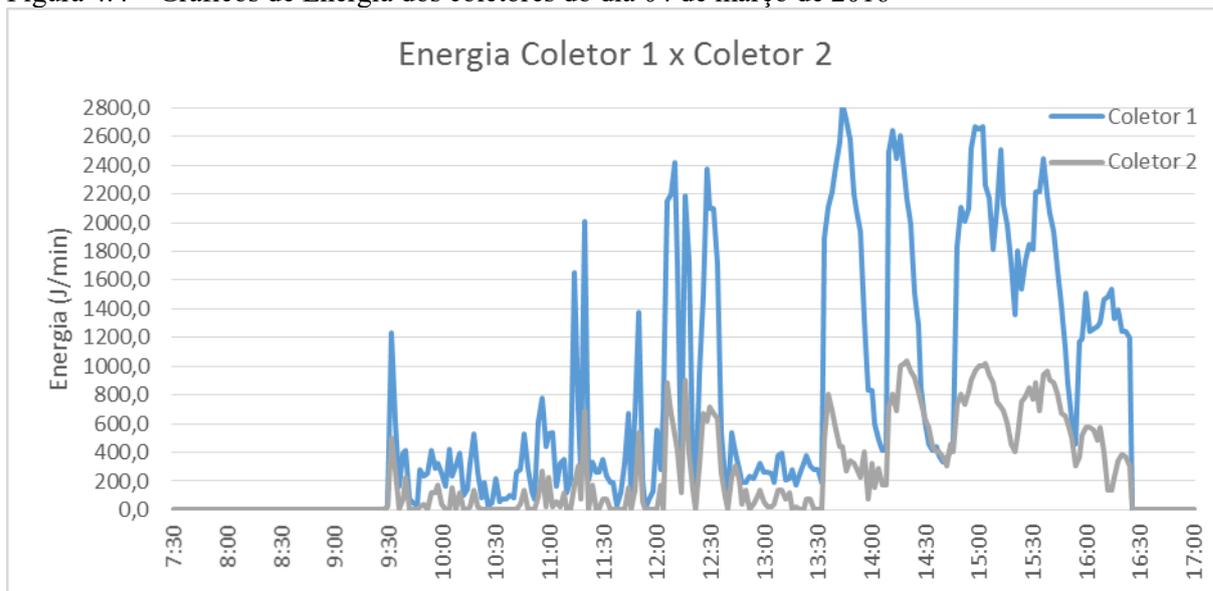
Para ter mais parâmetros para concluir o desempenho dos coletores em cada teste, resolveu-se analisar a energia obtida, por meio da equação de energia  $Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$ , com unidade de energia em Joule por minuto (J/min); em que  $\dot{m}$  é a vazão mássica em gramas por minuto (g/min),  $c_p$  é o calor específico da água equivalente à 4,1686 J/ (g.°C) e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura de entrada e saída do coletor em graus Celsius (°C). Nas figuras 4.3 e 4.4 estão apresentados os gráficos comparativos de Energia do Coletor 1 x Energia Coletor 2 nos dois dias do teste.

Figura 4.3 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 03 de março de 2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.4 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 04 de março de 2016



Fonte: Próprio Autor

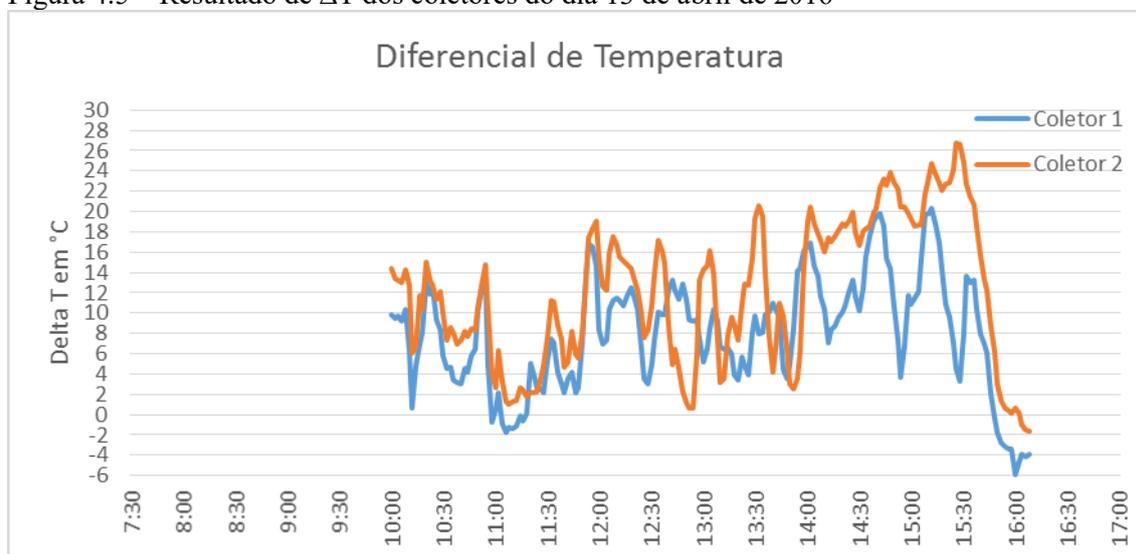
Por fim, foi constatado que o coletor 1 apresentou melhor desempenho em relação ao coletor 2 neste teste, portanto a utilização da película espelhada no concentrador é um ganho para o projeto.

#### 4.2 2º Teste: Análise da película espelhada com tubos de cobre

Segundo teste, realizado nos dias 13 e 14 de abril, foram utilizados tubos de cobre como absorvedores de calor; neste teste, diferente do teste 1, houve uma troca e o coletor 1 ficou sem película espelhada e o coletor 2 com a película espelhada.

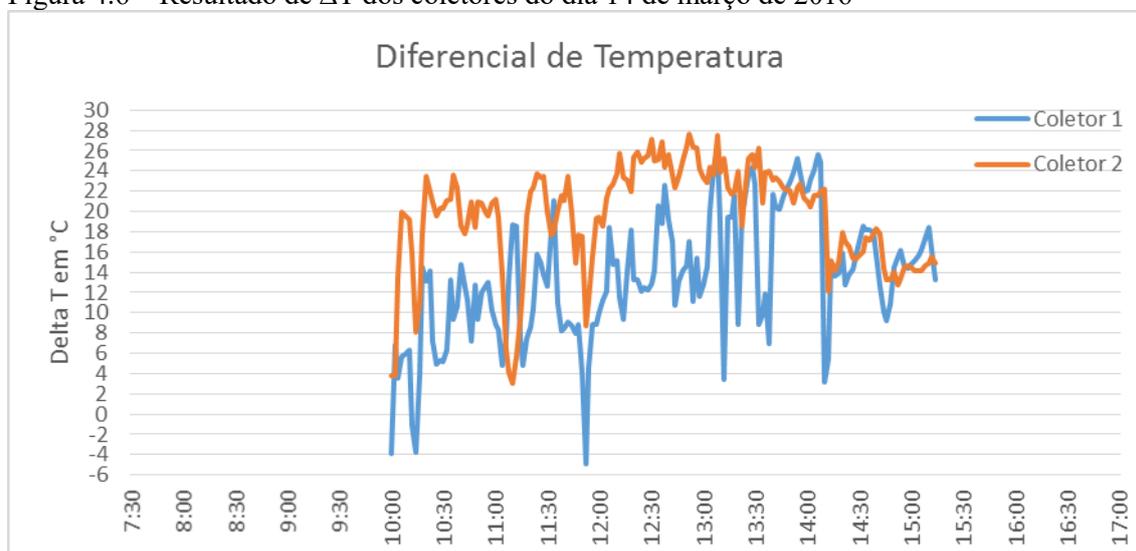
No dia 13 de abril, as vazões médias dos coletores foram 35 ml/min e 32 ml/min, respectivamente, começando às 09:50h e terminando às 16:15h. Já no segundo dia as vazões médias foram iguais entre si, em torno de 32 ml/min, começando às 10:00h e terminando às 15:20h. Os gráficos mostrados nas figuras 4.5 e 4.6 trazem a comparação entre os dois coletores, demonstrando o comportamento de cada um em termos de variação de temperatura.

Figura 4.5 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 13 de abril de 2016



Fonte: Próprio Autor

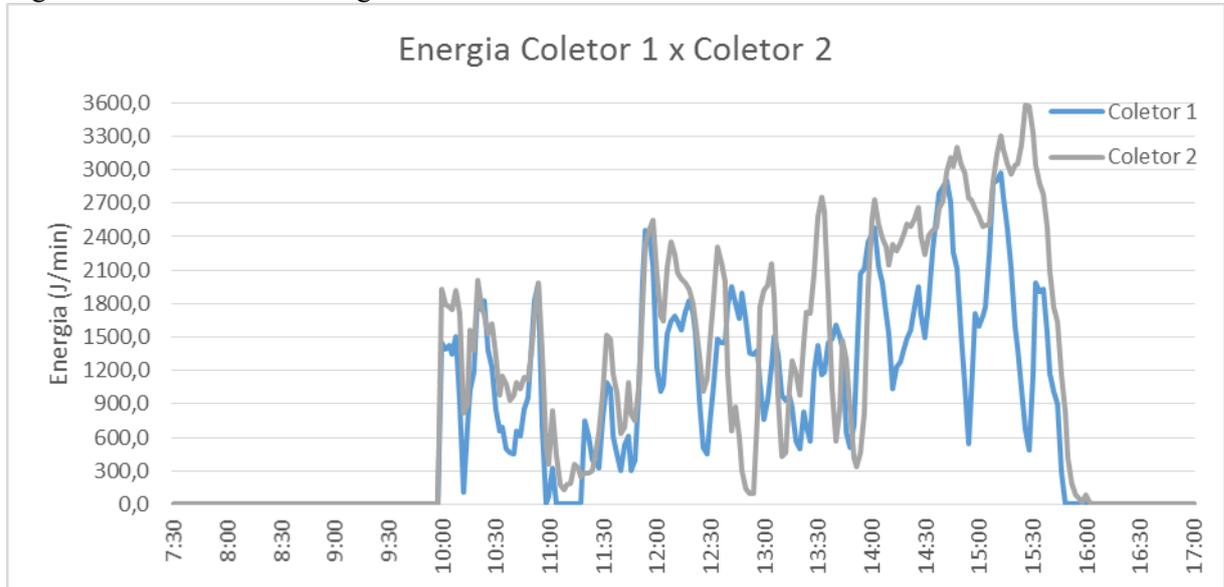
Figura 4.6 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 14 de março de 2016



Fonte: Próprio Autor

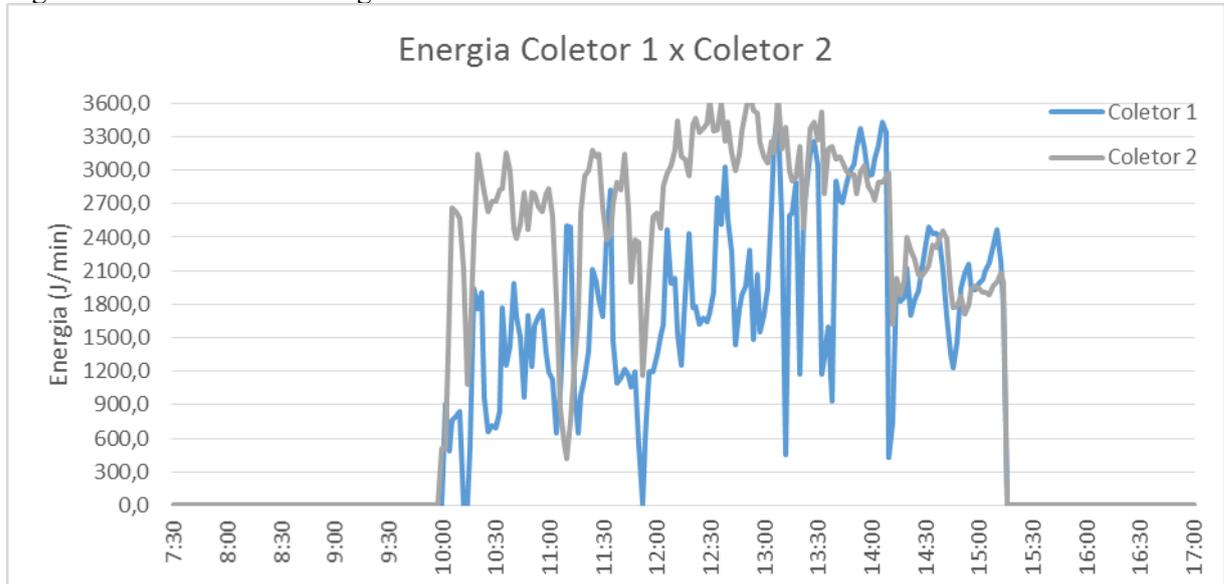
Nas figuras 4.7 e 4.8 estão apresentados os gráficos comparativos de Energia do Coletor 1 x Energia Coletor 2 nos dois dias do teste.

Figura 4.7 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 13 de abril de 2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.8 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 14 de abril de 2016



Fonte: Próprio Autor

Nos dois dias as condições para os testes estavam adequadas, céu com poucas nuvens, além do ajuste de vazão que permitiu manter as médias de vazão de água bem próximas. Com esses resultados foi evidenciado que os tubos de cobre têm melhor eficiência em relação aos tubos de aço.

Na tabela 4.1 é possível observar os valores máximos de  $\Delta T$  para cada coletor comparando os dias em que foram usados os tubos de aço com os tubos de cobre:

Tabela 4.1: Variação máxima de temperatura dos coletores no 1º e 2º teste

VARIAÇÃO MÁXIMA DE $\Delta T$ (°C)				
	03/03	04/03	13/04	14/04
COLETOR 1	11,1	19,3	20,3	26,1
COLETOR 2	5,4	5,4	26,7	27,7

Fonte: Próprio autor

Na tabela 4.2 foram são apresentados a comparação da Energia média dos coletores em cada dia dos dois primeiros testes:

Tabela 4.2: Energia média dos coletores no 1º e 2º teste

ENERGIA MÉDIA (J/min)				
	03/03	04/03	13/04	14/04
COLETOR 1	548,5	948,5	1209,2	1817,0
COLETOR 2	200,8	321,1	1611,5	2609,8

Fonte: Próprio autor

As variações maiores de temperatura no segundo teste demonstram que os tubos de cobre são melhores como absorvedores de calor do que os tubos de aço. Comparando em termos de energia também é possível chegar a esta conclusão. Portanto, a partir desse teste, somente foi usado tubo de cobre como absorvedor. Além disso, nos dois testes, foi possível perceber a melhora no concentrador com a utilização da película refletiva espelhada.

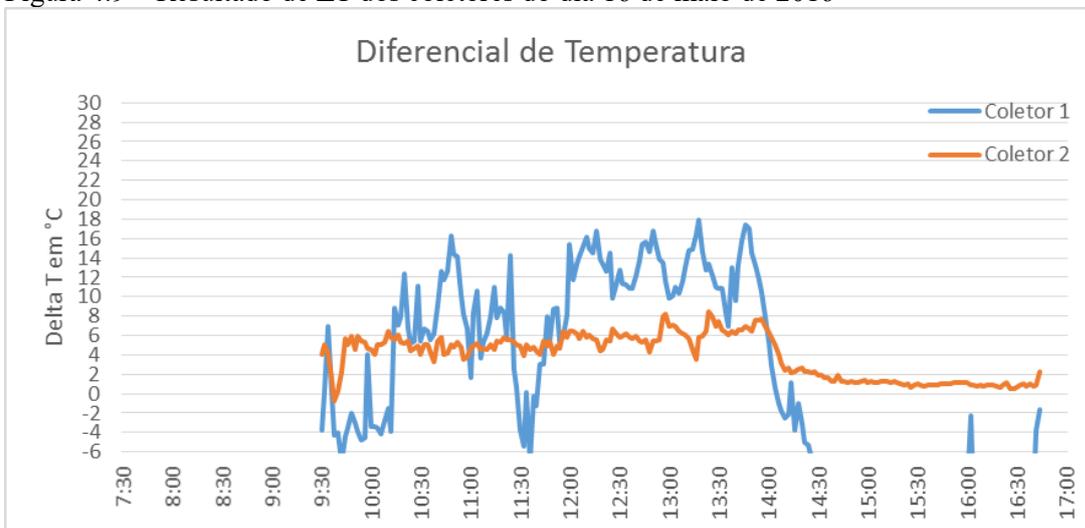
### 4.3 3º Teste: Análise das películas espelhadas dos coletores

Uma vez que com a película espelhada o ganho de desempenho foi evidente, decidiu-se colocar essa película também no coletor 1. Porém foi observado que a película já existente no coletor 2 estava desgastada com algumas manchas escuras e sem brilho, bem diferente da nova. Dessa forma foi realizado um teste para verificar como essa película desgastada prejudicaria o ganho de temperatura do coletor 2.

O teste foi realizado nos dias 16 e 19 de maio. No primeiro dia começou às 09:30h e terminou às 16:45h, com vazão média igual nos dois coletores (60 ml/min). A partir das 14:30h, o tempo bastante nublado atrapalhou o teste, além disso foi observado, posteriormente, que o termopar de entrada do coletor apresentou falha indicando valores bem acima do normal (isso ficou evidenciado no gráfico da figura 4.9). Devido a esse problema com o termopar, foi necessário substituí-lo. No segundo dia, o teste ocorreu das 09:40h às 15:00h com os coletores apresentando vazões médias de 50 ml/min.

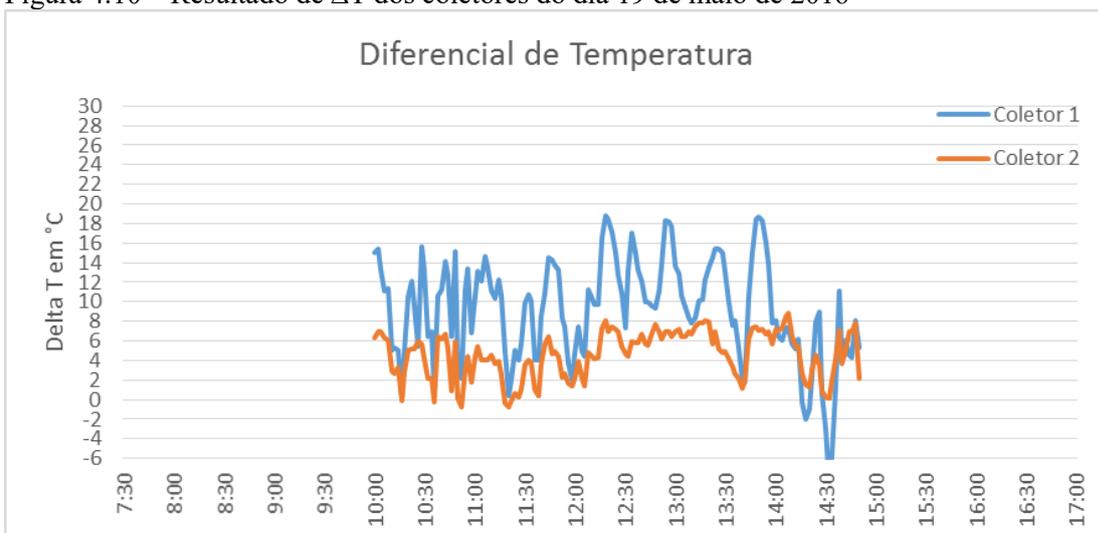
Os gráficos das figuras 4.9 e 4.10 mostram os resultados desse teste.

Figura 4.9 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 16 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

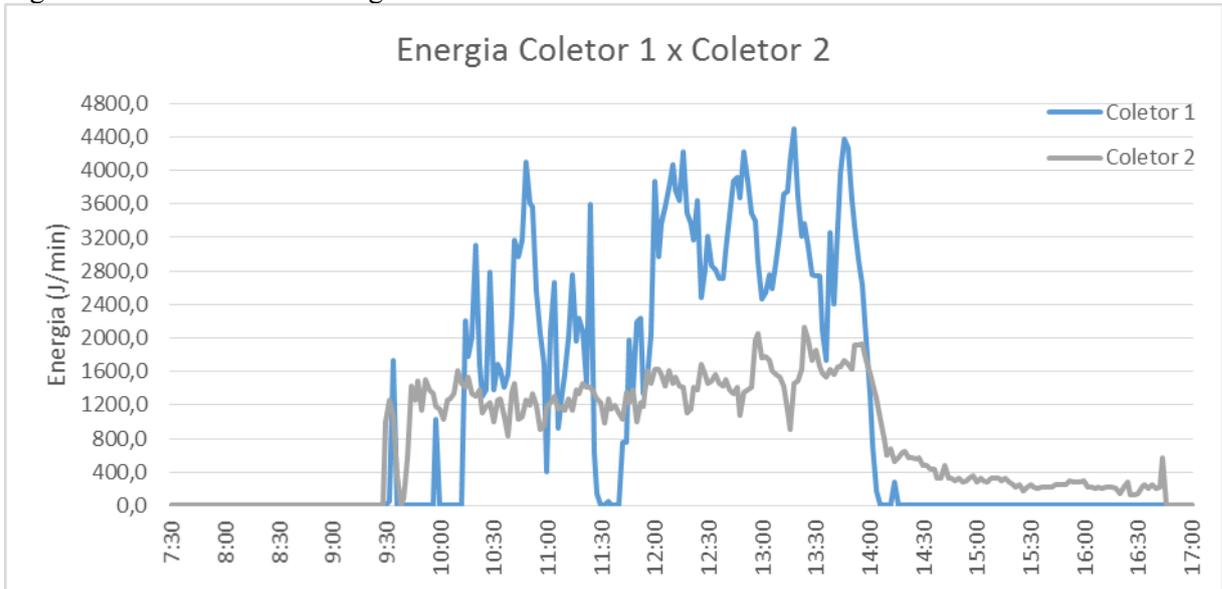
Figura 4.10 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 19 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

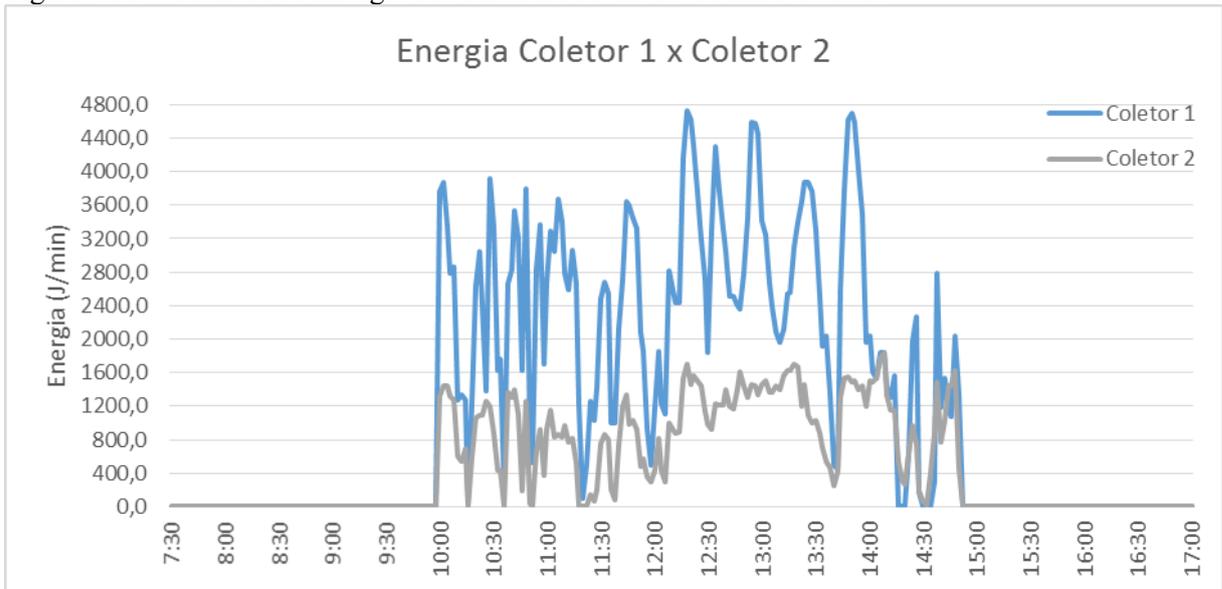
Nas figuras 4.11 e 4.12 estão apresentados os gráficos comparativos de Energia do Coletor 1 x Energia Coletor 2 nos dois dias do teste.

Figura 4.11 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 16 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.12 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 19 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

Para efeito de melhor análise dos desempenhos dos coletores pode-se comparar as médias de energia transferida para cada coletor. Como no dia 16 de maio houve falha no termopar do coletor 1 a partir das 14:30h, a média dos coletores foi considerada até às 14:50h. A tabela 4.3 traz esses resultados:

Tabela 4.3: Energia média dos coletores no 3º teste

ENERGIA MÉDIA (J/min)	16/05	19/05
COLETOR 1	2150,7	2357,1
COLETOR 2	1359,8	970,3

Fonte: Próprio autor

Pelos gráficos apresentados e com base nos dados da tabela 4.3 é perceptível que o coletor 1 tem desempenho superior ao coletor 2. Dessa forma fica evidente que o uso da película espelhada é um ganho, porém com pouco tempo de exposição às intempéries da natureza a eficiência dessa película reduz bastante.

#### 4.4 4º Teste: Análise de desempenho de coletor com tubo de vidro

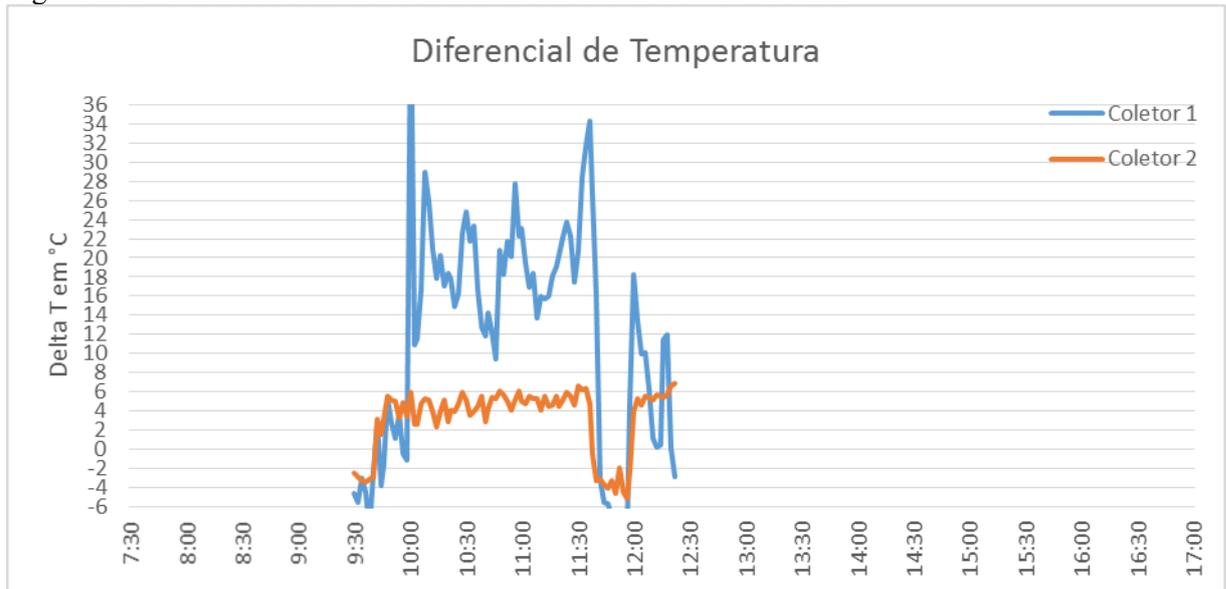
Neste teste foi utilizado um tubo de vidro transparente, com 3 cm de diâmetros, envolvendo o absorvedor do coletor 1. Neste caso a tentativa era de reduzir a perda de eficiência do tubo de cobre por convecção, ocasionada pela ação do vento.

A configuração dos dois coletores era igual à do 3º teste, com exceção da utilização do tubo de vidro no coletor 1.

O teste ocorreu nos dias 20 e 23 de maio, porém nos dois dias o teste foi bem mais curto. No primeiro dia, as vazões médias dos coletores foram 54 ml/min e 50 ml/min, respectivamente, começando às 09:30h e terminando às 12:20h. Já no segundo dia as vazões médias dos coletores foram 32 ml/min e 44 ml/min, respectivamente, começando às 10:00h e terminando às 12:30h.

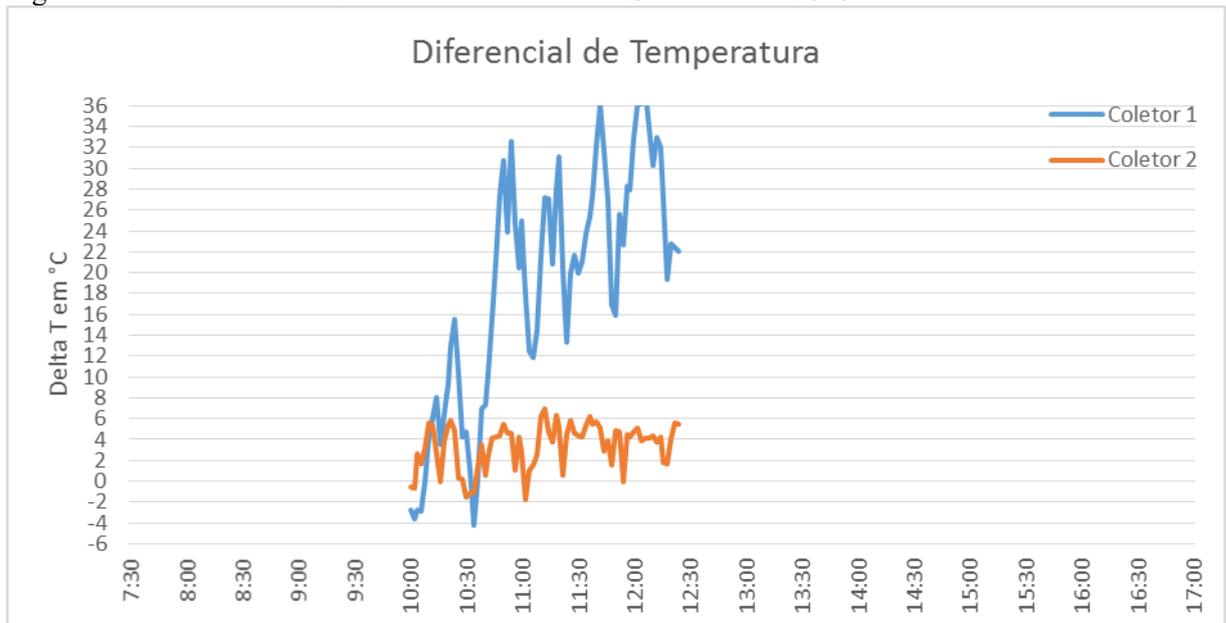
Os gráficos mostrados nas figuras 4.13 e 4.14 trazem a comparação entre os dois coletores, demonstrando o desempenho de cada um.

Figura 4.13 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 20 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

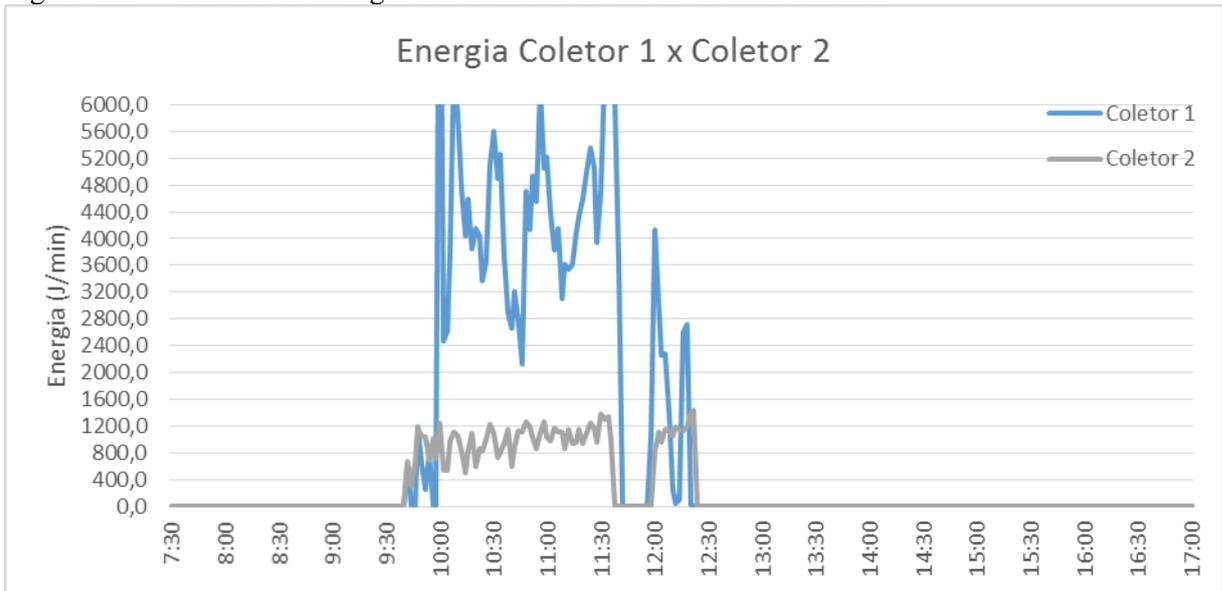
Figura 4.14 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 23 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

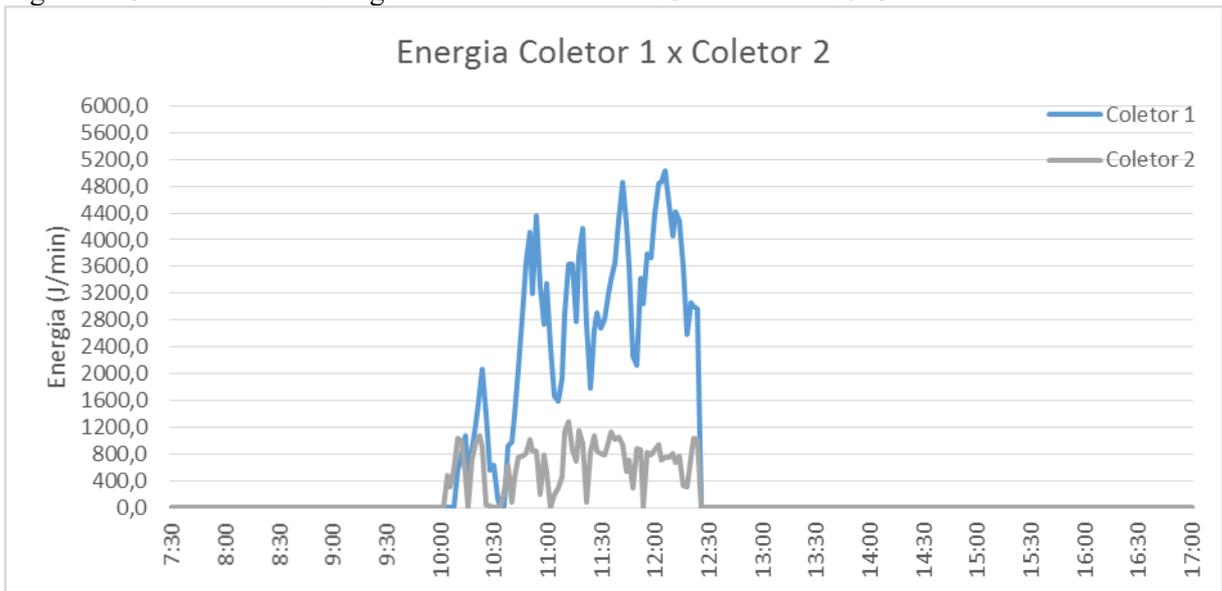
Nas figuras 4.15 e 4.16 estão apresentados os gráficos comparativos de Energia do Coletor 1 x Energia Coletor 2 nos dois dias do teste.

Figura 4.15 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 20 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.16 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 23 de maio de 2016



Fonte: Próprio Autor

Os dados com a média da Energia transferida nos dois coletores são apresentados na tabela 4.4:

Tabela 4.4: Energia média dos coletores no 4º teste

ENERGIA MÉDIA (J/min)	20/05	23/05
COLETOR 1	2932,6	2545,4
COLETOR 2	810,9	642,7

Fonte: Próprio autor

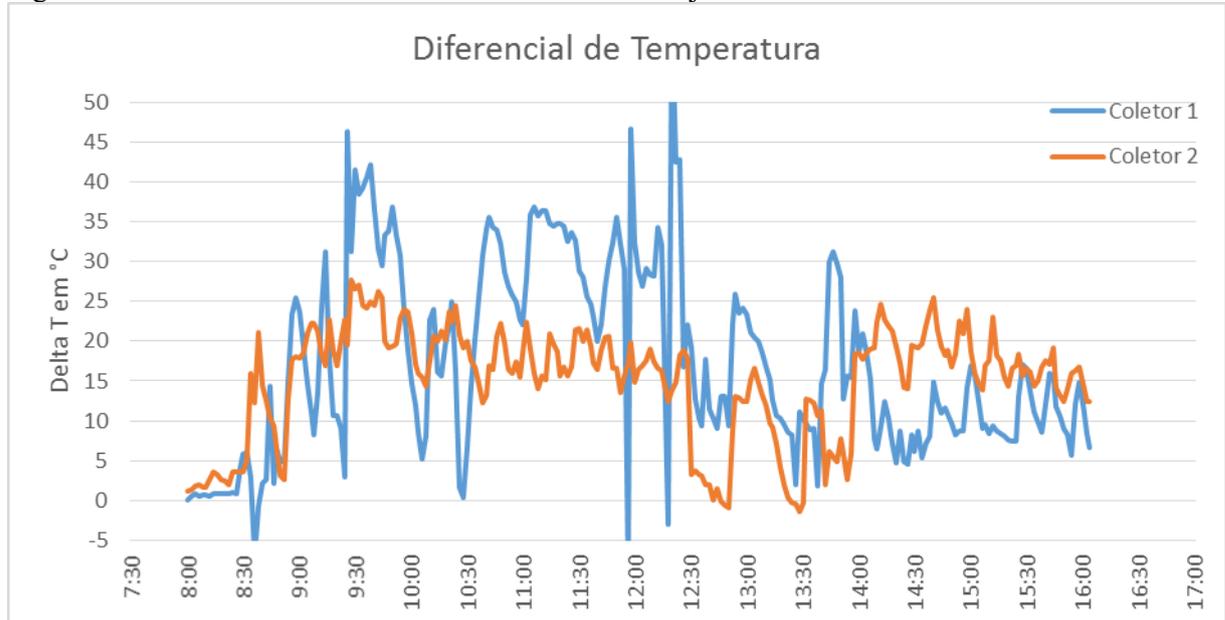
Já era de conhecimento, através do teste anterior, que coletor 1 (com película nova) tinha maior desempenho em relação ao coletor 2. Porém o ganho nesse teste com o acréscimo do tubo de vidro no coletor 1 foi perceptível ao se comparar as médias de Energia nesse teste com as médias do teste anterior. Portanto o tubo de vidro é uma melhoria adotada no projeto.

#### 4.5 5º Teste: Análise dos coletores com tubos de vidro e chapa inox

Esse teste foi realizado nos dias 25 e 26 de julho. O coletor 1 estava com tubo de vidro e foi colocado uma chapa inox de alto brilho para melhorar a reflexão dos raios solares para o tubo absorvedor. Já no coletor 2 foi usado tubo de vidro e uma película espelhada nova.

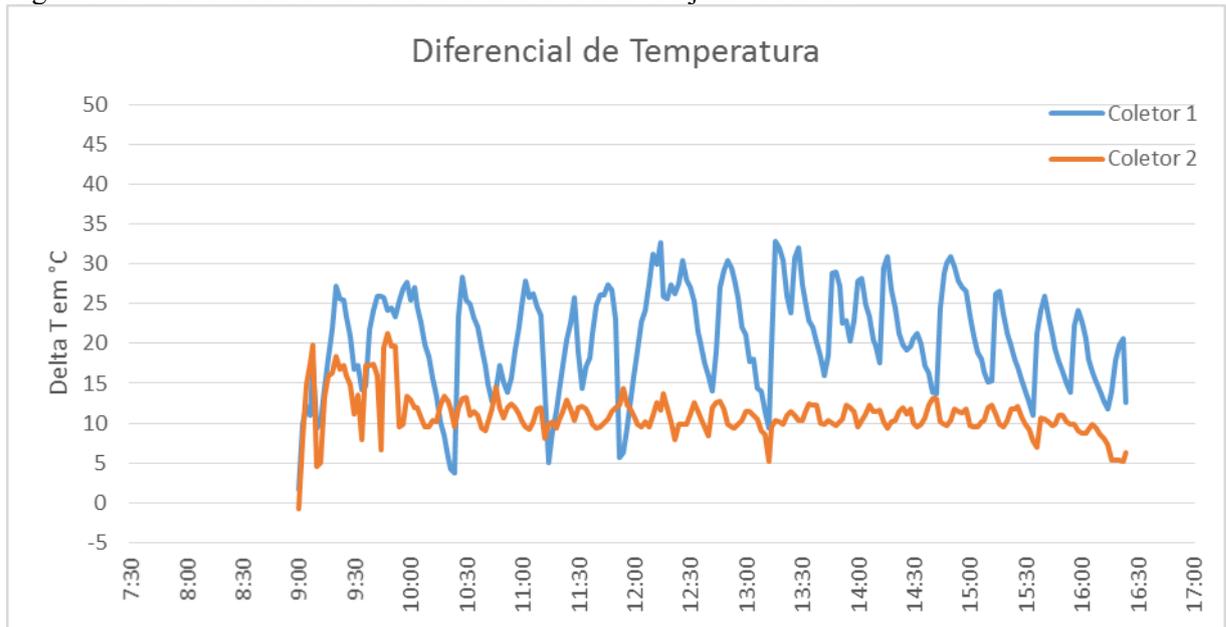
No dia 25 de julho, as vazões médias dos coletores foram 50 ml/min e 44 ml/min, respectivamente, começando às 08:00h e terminando às 16:20h. No dia seguinte as vazões médias foram 45 ml/min e 55 ml/min, respectivamente, começando às 09:00h e terminando às 16:40h. Os gráficos mostrados nas figuras 4.17 e 4.18 trazem a comparação entre os dois coletores, demonstrando o desempenho de cada um com relação a variação de temperatura.

Figura 4.17 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 25 de julho de 2016



Fonte: Próprio Autor

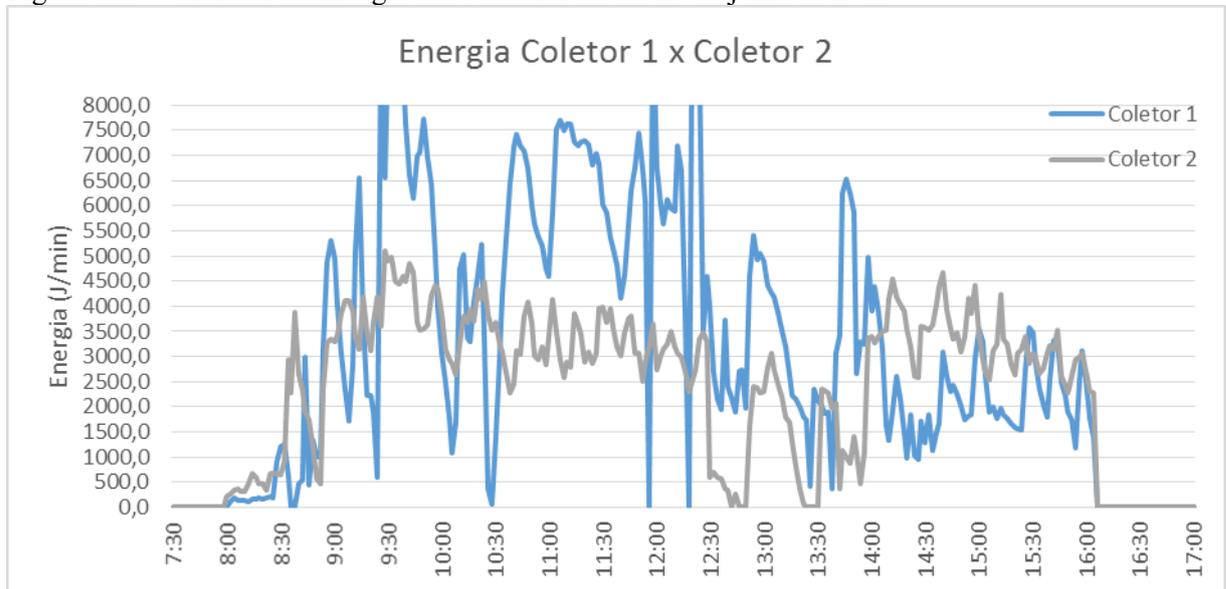
Figura 4.18 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 26 de julho de 2016



Fonte: Próprio Autor

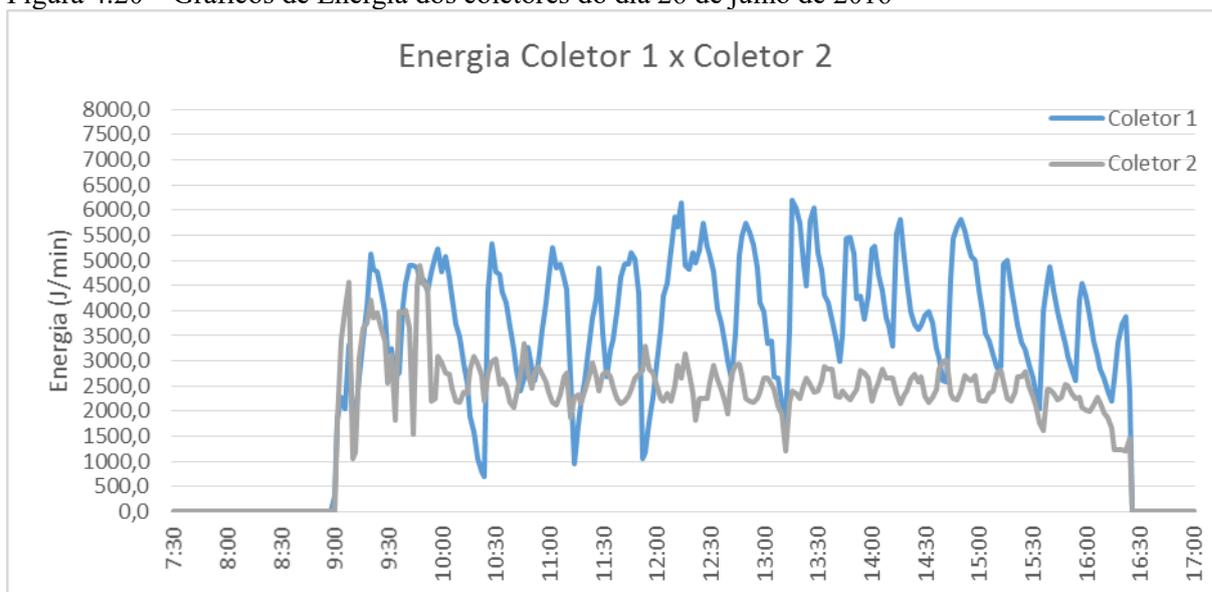
Nas figuras 4.19 e 4.20 estão apresentados os gráficos comparativos de Energia do Coletor 1 x Energia Coletor 2 nos dois dias do teste.

Figura 4.19 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 25 de julho de 2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.20 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 26 de julho de 2016



Fonte: Próprio Autor

No gráfico das figuras 4.17 e 4.19 é possível uma grande instabilidade nos resultados do coletor. Isso é decorrente da grande variação de vazão do coletor que, por vezes, foi preciso ajustar novamente. Mesmo com esse problema é claramente perceptível que o coletor 1 obteve melhor desempenho nos dois dias. Os dados com as médias de Energia transferida em cada coletor por cada dia do teste estão na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Energia média dos coletores no 5º teste

ENERGIA MÉDIA (J/min)	25/07	26/07
COLETOR 1	3649,9	3890,6
COLETOR 2	2750,7	2537,7

Fonte: Próprio autor

Dessa forma tem-se que a chapa inox trouxe grande melhoria de eficiência em relação à película espelhada. Além disso não apresenta problema de desgaste excessivo e perda de rendimento com o tempo, como já havia sido constatado nas películas espelhadas.

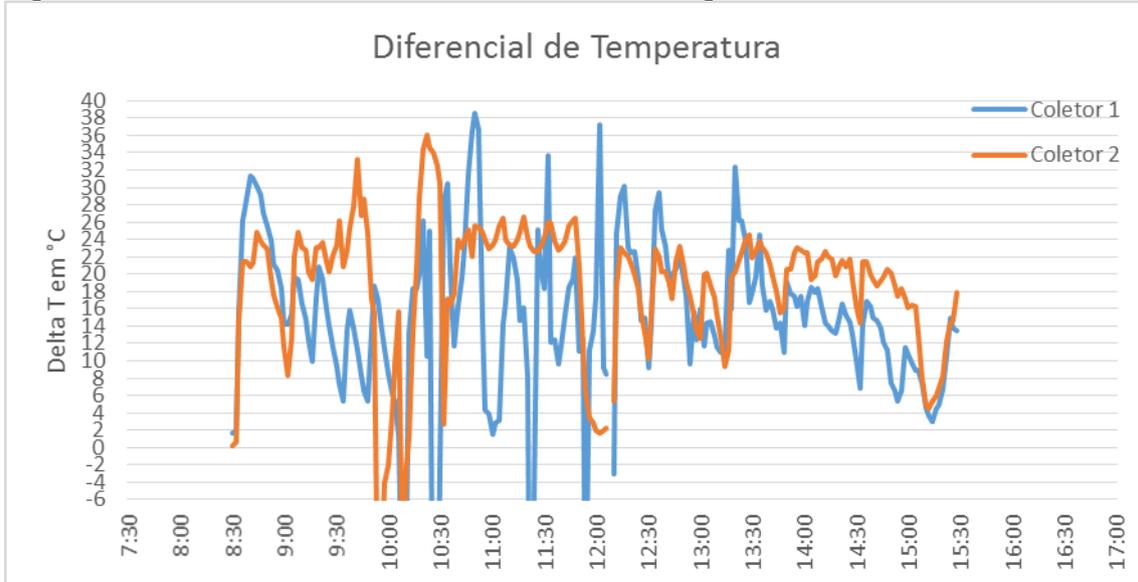
#### 4.6 6º Teste: Análise comparativa entre tubo de vidro e plástico

Para este teste, realizado nos dias 03 e 05 de agosto, chapa inox de alto brilho foi instalada também no concentrador do coletor 2. Foi utilizado o tubo de vidro ao redor do tubo absorvedor do coletor 1 e um plástico na parte superior do concentrador parabólico do coletor 2. A ideia foi para testar se com o plástico haveria algum ganho em relação ao tubo de vidro.

No primeiro dia, as vazões médias dos coletores foram 55 ml/min e 45 ml/min, respectivamente, começando às 08:30h e terminando às 15:40h. Já no segundo dia a vazão de

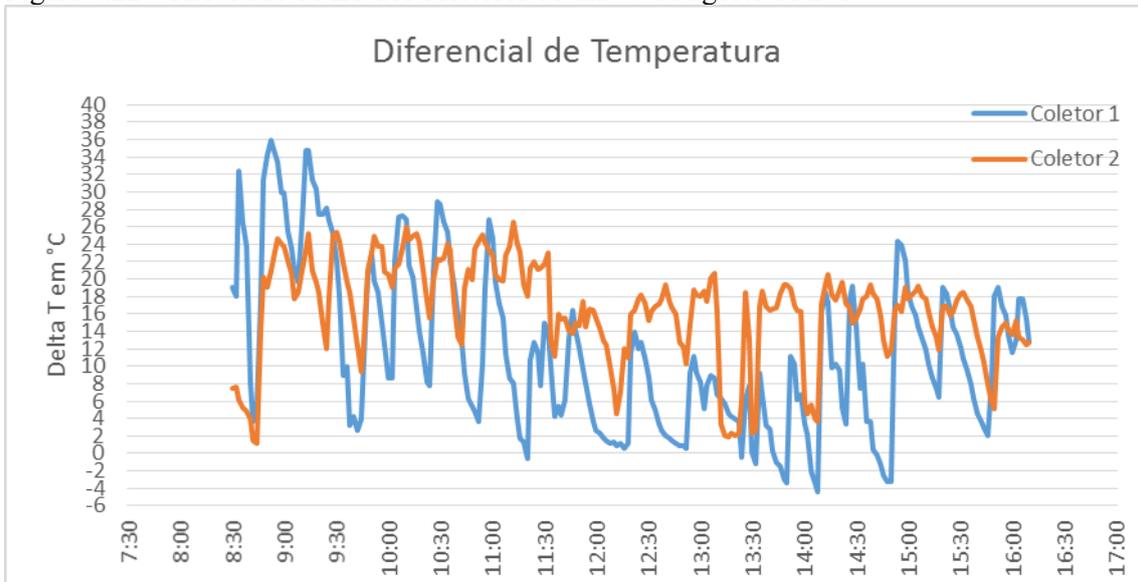
água no coletor 1 variou bastante dificultando o ajuste e mantendo uma média de 66 ml/min, no coletor 2 a vazão ficou bem estável em média de 50 ml/min. Nesse dia o teste começou às 08:30h e terminou às 16:20h. Os gráficos mostrados nas figuras 4.21 e 4.22 trazem a comparação entre os dois coletores, demonstrando o desempenho de cada um em relação ao ganho de temperatura.

Figura 4.21 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 03 de agosto de 2016



Fonte: Próprio Autor

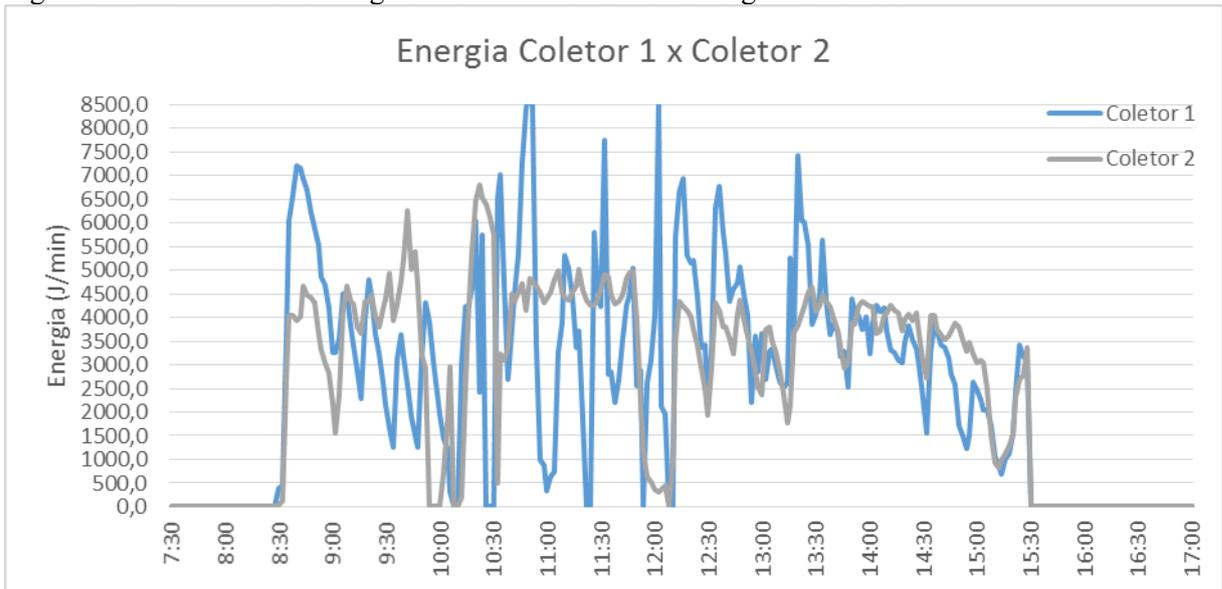
Figura 4.22 – Resultado de  $\Delta T$  dos coletores do dia 05 de agosto de 2016



Fonte: Próprio Autor

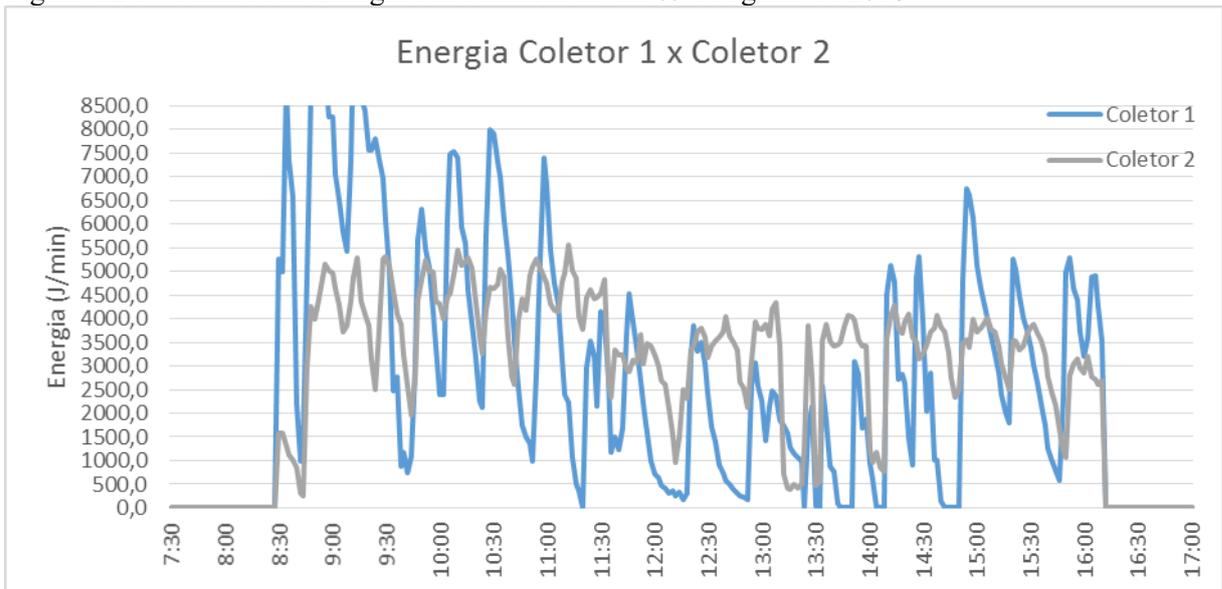
Nas figuras 4.23 e 4.24 estão apresentados os gráficos comparativos de Energia do Coletor 1 x Energia Coletor 2 nos dois dias do teste.

Figura 4.23 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 03 de agosto de 2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.24 – Gráficos de Energia dos coletores do dia 05 de agosto de 2016



Fonte: Próprio Autor

Na tabela 4.6 estão os valores médios de Energia transferida para cada coletor nos dois dias do teste.

Tabela 4.6: Energia média dos coletores no 6º teste

ENERGIA MÉDIA (J/min)	03/08	05/08
COLETOR 1	3533,6	3292,6
COLETOR 2	3509,2	3436,4

Fonte: Próprio autor

Analisando os gráficos das figuras 4.23 e 4.24 percebe-se que o arranjo do coletor 1 alcança valores de Energia bem maiores do que o do coletor 2. Poderia se considerar então que o coletor 1, com o tubo de vidro, é mais eficiente do que o coletor 2, com plástico de proteção; porém quando é analisada a energia média transferida em cada coletor, tem-se nos dois dias médias bem semelhantes em ambos. Dessa forma pode-se concluir que tanto o tubo de vidro envolvendo o tubo absorvedor quanto o plástico de proteção contribuem da mesma forma; E, portanto, a variação maior ocorrida no coletor 1 é devido somente a variação de vazão de água neste coletor.

## 5 CONCLUSÃO

Pela análise dos resultados foi possível fazer o aperfeiçoamento dos coletores com rastreamento manual até se obter o melhor modelo: usando tubos de cobre como absorvedores, tubos de vidro envolvendo os absorvedores, chapa inox de alto brilho nos concentradores e um intervalo de 15 minutos para cada ajuste no rastreamento manual.

Por ter eficiência semelhante ao tubo de vidro, pode-se também utilizar um plástico de proteção transparente na parte superior do concentrador parabólico, porém o tubo se apresenta como melhor opção por ter mais durabilidade e por se manter mais fixo à estrutura do coletor. Por outro lado, o plástico leva vantagem por ser mais fácil de retirar da estrutura, caso necessite.

Com a redução do intervalo de tempo no ajuste do rastreamento é possível alcançar melhores resultados. Porém pelos testes realizados com ajuste nos coletores a cada 15 minutos, ficou evidente que essa redução é inviável em decorrência do desgaste físico ocasionado pela exposição prolongada aos raios solares durante todo o teste. Nesse sentido pode ser pensado um sistema automatizado de rastreamento para se reduzir o intervalo de tempo de cada ajuste e assim obter melhor eficiência.

A maior variação de temperatura, desconsiderando valores onde claramente é perceptível falha de medição do instrumento, foi no dia 03 de agosto de 2016, às 10h50min, onde no coletor 1 a água entrou com temperatura de 40°C e saiu com 78,5°C, sendo o  $\Delta T$  igual a 38,5°C. Neste dia o coletor 1 tinha a seguinte configuração: tubo de cobre envolto por tubo de vidro no absorvedor, e com chapa de aço inox no concentrador parabólico.

Se for considerado resultado a partir da maior taxa instantânea de Energia transferida, foi alcançada a maior taxa no dia 05 de agosto de 2016, às 8h52min, onde se atingiu 9.947,8 J/min com o coletor 1 (tubo de cobre envolto por tubo de vidro no absorvedor, e com chapa de aço inox no concentrador parabólico). Neste caso também desconsiderando os pontos onde visivelmente houve falha de medição do instrumento.

Também é importante salientar que para cada dia com chuva ou muito nublado o ganho de temperatura praticamente inexistente ou em alguns momentos apresenta até mesmo perda de temperatura. O que torna o sistema inviável para dias como estes. Por fim, conclui-se que os coletores solares se apresentam de forma bem eficiente para dias ensolarados, sendo uma opção viável para sistemas simples de aquecimento de água.

## REFERÊNCIAS

KALOGIROU, Soteris A; **Solar Energy Engineering: processes and systems**. 1ª Edição. Academic Press, Elsevier, 2013.

BARLEV, D.; STROEVE, P. Innovation in concentrated solar power. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011.

PILKINGTON.; Solar International GmbH. Survey of Thermal Storage for Parabolic-Trough Power Plants, 2000.

BERTOZZI, Alexandre D.; ARTIGO: Conservação de Energia – Energia solar como forma alternativa de energia, 2004.

FILHO, J. Dissertação: Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilindro parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar. Natal, 2008.

QUEIROZ, Marília B. Monografia: Desenvolvimento e aperfeiçoamento de rastreamento automático para coletor solar parabólico e comparação com coletor solar parabólico de rastreamento manual. Fortaleza, 2017.

ARQUIMEDES. Wikipédia, 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Arquimedes>>. Acesso em 03 dez. 2016.

DIFERENTES TECNOLOGIAS DA ENERGIA SOLAR TÉRMICA. Voltimum Artigos. Disponível em <<http://www.voltimum.pt/artigos/diferentes-tecnologias-da-energia-solar-termica>>. Acesso em 15 fev. 2017.

COLETOR SOLAR PARABÓLICO. Sci Elo Proceedings. 2004. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100011&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000100011&script=sci_arttext)>. Acesso em 17 fev. 2017.

BEZERRA, A. M. Aplicações térmicas da energia solar. Editora Universitária UFPB, 4ª edição. João Pessoa, PB. 2001.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Solar Princípios e aplicações. CEPTEL – Sistema Eletrobrás, 2006. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em 10 abr. 2019.

SOLAR THERMAL COLLECTOR. Wikipédia. 2019. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_thermal\\_collector](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector)>. Acesso em 28 abr. 2019.

SOLARPACES. 2019. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/>>. Acesso em 23 de mai. 2019.