



Rodrigo Huber Marques Moreira Mendes

**Validação experimental do desempenho de
um sistema de preaquecimento de motores
diesel de uma usina termoelétrica com o uso
da energia solar**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Alcir Orlando de Faro.

À PUC-Rio e todos os professores relacionados diretamente com meu desenvolvimento acadêmico.

À minha família pelo apoio em todas as esferas necessárias para a conclusão deste curso.

A todos os colegas que me ajudaram nesta grande e longa jornada.

Resumo

Validação experimental do desempenho de um sistema de preaquecimento de motores diesel de uma usina termoeletrica com o uso da energia solar

Este trabalho tem por objetivo a avaliação e validação de desempenho de um sistema já implementado, porém ainda em fase de testes, de preaquecimento dos motores da central termelétrica Gera Maranhão, com energia solar térmica, através de medições, cálculos e monitoramento in loco em tempo real, do sistema implementado. Cinco subsistemas independentes, cada um responsável pelo préaquecimento de um motor Wärtsilä 20V32 de 8,73 MW, somados em uma superfície de captação solar de 1000 metros quadrados, contendo um total de 500 coletores solares instalados. Uma estação meteorológica, com sensores de radiação solar global e temperatura ambiente, foi instalada para medir as condições ambientais na região, e para estudar e analisar o potencial energético líquido disponível medido através de cálculos de eficiência.

.

Palavras-chave

Validação experimental coletores solares térmicos preaquecimento
motores diesel usina termoeletrica

Abstract

Experimental validation of the performance of a pre-heating system for diesel motors engines on a thermoelectric power plant via solar energy

This work has the objective to evaluate and validate the performance of a system that has already been implemented, but in a study stage, of a pre-heating system for diesel motors engines on a thermoelectric power plant named Gera Maranhão through use of solar thermal energy with real time in loco monitoring, measurement and calculations. Five independently and evenly distributed subsystem are responsible to pre-heat one diesel motor engine Wartsila20V32 with 8.73MW, with a total solar incident surface area of 1000 square meters, with 500 solar panels installed. A meteorological station, with global radiation and ambient temperature sensors were installed to measure and collect climate conditions to study and analyze the potential net energy through efficiency calculations.

.

Keywords

Experimental validation thermal solar panel pre heating motors diesel engine thermoelectric plant

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Motivações do Projeto	8
1.2	Dados da Usina	9
1.3	Objetivos do Trabalho	9
2	Principais Componentes do Sistema	10
2.1	Elementos Originais da Planta	10
2.2	Elementos do Sistema de Coletores Solares	11
3	Cálculos Energéticos	19
3.1	Painel Solar	19
3.2	Sistema da Bomba Número 2	20
3.3	Sistema da Bomba Número 3	20
4	Obtenção de Dados	21
5	Análise de dados	22
5.1	Análises do mês de agosto	23
5.2	Análises do mês de novembro	30
6	Potencial de Economia de Combustível	32
7	Conclusão	33
	Referências Bibliográficas	35
8	Apêndice 1 - Incidência Solar Mensal	36
9	Apêndice 2 - Análise Quantitativa	38

Lista de figuras

1.1	A usina e o campo de coletores solares	9
2.1	Motor Wartsila 20V32 (Fonte: High Tec Finland)	10
2.2	Principais componentes de cada um dos 5 sistemas de coletores solares (Fonte: Guillaume Louis Pradère)	11
2.3	Coletores solares instalados	12
2.4	Tabela descritiva dos reservatórios (Fonte: Guillaume Louis Pradère)	13
2.5	Reservatórios de 5000 litros	13
2.6	Tabela descritiva da tubulação (Fonte: Guillaume Louis Pradère)	14
2.7	Foto da tubulação e do isolamento utilizados	14
2.8	Foto da torre meteorológica	15
2.9	Sensores para medição de radiação global e difusa Robô SOLYS2	15
2.10	Sensores para medição	16
2.11	Controlador Microsol	16
2.12	Esquema do sistema de aquecimento solar e identificação dos principais pontos de medição	17
4.1	Painel de aquisição de dados e controladores	21
4.2	Sistema de aquisição de dados e controladores Microsol	21
5.1	Detalhe do sistema de medição instalado em uma das tubulações	22
5.2	Tabela de energia convertida para agosto	23
5.3	Tabela de rendimentos diários para agosto	24
5.4	Comparação de Temperaturas T1 e T2	26
5.5	Comparação entre as Temperaturas de T3 e T4	27
5.6	Gráfico comparativo de T1 e T3	28
5.7	Comparação entre as temperaturas T1 e T4	29
5.8	Tabela de energia convertida para novembro	30
5.9	Tabela de rendimentos diários para novembro	31
7.1	Sujeira depositada sobre os painéis	34
8.1	Planilha de incidência de energia solar para agosto	36
8.2	Planilha de incidência de energia solar para novembro	37
9.1	Tabela de comparação de eficiências para o mês de agosto	38
9.2	Comparativo entre temperaturas principais	39
9.3	Comparativo entre as diferenças das temperaturas principais	40

Lista de tabelas

1

Introdução

Esse trabalho tem como objetivo calcular, avaliar e validar o desempenho de um sistema de preaquecimento de motores diesel de uma central termoelétrica com o uso de energia solar.

O Brasil possui um grande potencial energético no quesito energia solar devido à sua localização geográfica privilegiada.

A usina GERAMAR, localizada no estado do Maranhão possui altos índices de radiação solar incidente. Localizada praticamente na latitude zero, e tendo que a incidência de radiação solar numa superfície horizontal plana varia pouco ao longo do ano em localidades perto da linha do equador, isto implica em um aproveitamento ótimo de energia solar.

O estudo faz parte do projeto da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) número PD-6492-0113/2013, elaborado em parceria entre a Geradora de Energia do Maranhão S/A e a Pontifícia Universidade católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), tendo como coordenador o professor Alcir de Faro Orlando, do Laboratório de Avaliação Metrológica e Energética (LAME) da PUC-Rio (Orlando, 2016).

1.1

Motivações do Projeto

Recentemente foi realizado um estudo de modo a simular numericamente o potencial de se implementar este sistema de captação de energia solar através de uma dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica desenvolvida por Guillaume Louis Pradère.

Os resultados deste estudo foram promissores e com isto houve a necessidade de se fazer uma avaliação experimental do sistema.

1.2

Dados da Usina

A UTE GERA Maranhão foi planejada para funcionar de modo transiente, estando somente 25% do tempo em operação, e desta forma servindo como fonte complementar de energia elétrica quando os níveis dos reservatórios das usinas hidroelétricas estiverem baixos.

A usina somente é ligada quando requisitada pela ONS, que em curto prazo deve atingir carga total e iniciar o fornecimento de energia para a rede. Para tal feito, é necessário que os blocos dos motores da usina estejam pré-aquecidos a uma temperatura média de 70°C, de acordo com o fabricante. Este pré-aquecimento é feito em uma caldeira que queima combustível fóssil.

O sistema aqui estudado foi projetado de modo a reduzir a quantidade de combustível gasto neste preaquecimento dos motores, substituindo assim a demanda de combustível fóssil por energia limpa vinda dos coletores solares.

A UTE Gera maranhão é composta de duas usinas gêmeas, GeraMar I e II, ambas têm a capacidade de gerar 165,87 MW, ambas dispõem de 19 motores da marca Wartsila, e operam com combustível pesado OC-1B.

1.3

Objetivos do Trabalho

Este trabalho consiste em medir o desempenho de um sistema para pré-aquecer, utilizando a energia solar, os motores diesel de uma central termoeletrica, validando assim, com dados experimentais coletados em campo de forma quantitativa e qualitativa, a viabilidade do projeto.

Tendo em vista que estudos deste tipo e com esta natureza nunca foram feitos anteriormente, este estudo pode ser considerado um dos pioneiros deste assunto aqui no Brasil.



Figura 1.1: A usina e o campo de coletores solares

2

Principais Componentes do Sistema

O sistema instalado na usina contém diversos elementos para captação de energia solar, armazenamento, medição e transferência de energia térmica. Tais elementos serão descritos a seguir.

2.1

Elementos Originais da Planta

São os elementos originais contidos na planta da Usina, não incluem o sistema de coletores solares instalados.

2.1.1

Os Motores

Os motores instalados são motores do fabricante finlandês Wartsila 20V32 com potência nominal de 8,73 MW. Segundo o fabricante, eles podem operar com grande flexibilidade, em “starts and stops” frequentes, o que responde muito bem à aplicação destinada na Usina.

A temperatura de preaquecimento recomendada é de 70°C. A potência mínima requerida para pré-aquecer os motores em 10-15h é de 5 kW/cilindro. Também são necessários em torno 3 kW/cilindro para manter os motores quentes.



Figura 2.1: Motor Wartsila 20V32 (Fonte: High Tec Finland)

2.1.2

Sistema de Pré-aquecimento

Os motores são pré-aquecidos com o auxílio de uma caldeira movida a combustível fóssil, gerando vapor de água. Este vapor troca calor com a água circulante no motor por meio de trocadores de calor de modo a deixar o motor da Usina sempre na temperatura estabelecida pelo fabricante. Quando em operação, os motores Diesel são mantidos a uma temperatura constante através da combustão dos gases em cada cilindro.

2.2

Elementos do Sistema de Coletores Solares

O projeto foi construído com a instalação de cinco subsistemas de coletores solares que são responsáveis por pré-aquecer 5 motores da usina por meio de um sistema de recuperação de calor.

Depois da partida destes primeiros cinco motores, os outros trinta e três motores da usina são então pré-aquecidos por meio da energia térmica recuperada dos primeiros cinco motores e assim a usina toda pode funcionar de modo contínuo.

Os elementos individuais de todo o complexo estão descritos na tabela a seguir:

Componente	Fabricante/Modelo	Característica	Quantidade
Coletor Solar	JELLY FISH / JF 20	$A=2m^2$	100
Reservatório 5000L	DOMEL / BICV 5000	$V=5000L$	3
Reservatório 3000L	DOMEL / BICV 3000	$V=3000L$	1

Figura 2.2: Principais componentes de cada um dos 5 sistemas de coletores solares (Fonte: Guillaume Louis Pradère)

2.2.1

Coletores Solares

Os coletores solares são da marca JellyFish, modelo JF20 com cobertura de vidro, cada painel de dimensão 1mx2m, em um total de 100 painéis em cada um dos cinco subsistemas.

Cada painel segundo testes do INMETRO apresenta eficiência energética de 57,8%.



Figura 2.3: Coletores solares instalados

2.2.2

Reservatórios de Armazenamento

Os reservatórios utilizados para armazenar energia térmica são armazenadores térmicos verticais fabricados pela empresa DOMEL.

Abaixo segue uma tabela descritiva das características dos reservatórios:

Modelo	BCIV 3000 DOMEL	BCIV 5000 DOMEL
Capacidade	3000 L	5000 L
Peso (vazio)	830 kg	1200 kg
H=Altura total	2750 mm	3100 mm
D=Diâmetro externo	1400 mm	1600 mm
Isolamento térmico	Lã de PET ISOSOFT	

Figura 2.4: Tabela descritiva dos reservatórios (Fonte: Guillaume Louis Pradère)



Figura 2.5: Reservatórios de 5000 litros

2.2.3

Tubulação

A tubulação é feita de aço inox de duas polegadas com isolamento térmico de uma polegada de espessura.

Dados da tubulação estão descritos na tabela a seguir:

Tubulações	
L = Comprimento	L = 600 m
D = Diâmetro	$\varnothing = 2''$
Isolamento térmico	Espuma Elastomérica AF ARMAFLEX
Espessura do isolamento	E = 1''

Figura 2.6: Tabela descritiva da tubulação (Fonte: Guillaume Louis Pradère)

A próxima imagem mostra a tubulação e seu isolamento:



Figura 2.7: Foto da tubulação e do isolamento utilizados

2.2.4

Trocador de Calor

É o responsável por trocar energia térmica entre o sistema térmico de captação de energia solar e o circuito de pré-aquecimento dos motores diesel. Cada um dos 5 subsistemas instalados tem um trocador de calor, modelo EMMETI/SPES 526, com 80 placas.

2.2.5

Estação Meteorológica

Dentro da Usina foi instalado uma pequena estação meteorológica com fim de monitorar e coletar dados locais de radiação solar incidente, temperatura ambiente e velocidade do vento.



Figura 2.8: Foto da torre meteorológica



Figura 2.9: Sensores para medição de radiação global e difusa Robô SOLYS2

2.2.6

Componentes de Medição

Ao longo de todo o sistema de captação solar implantado foram montados medidores de temperatura para avaliação da energia térmica convertida, e o monitoramento dos estados das bombas do sistema.



Figura 2.10: Sensores para medição



Figura 2.11: Controlador Microsol

Na página a seguir é mostrado um esquema do sistema com alguns pontos estratégicos que foram escolhidos para serem analisados:

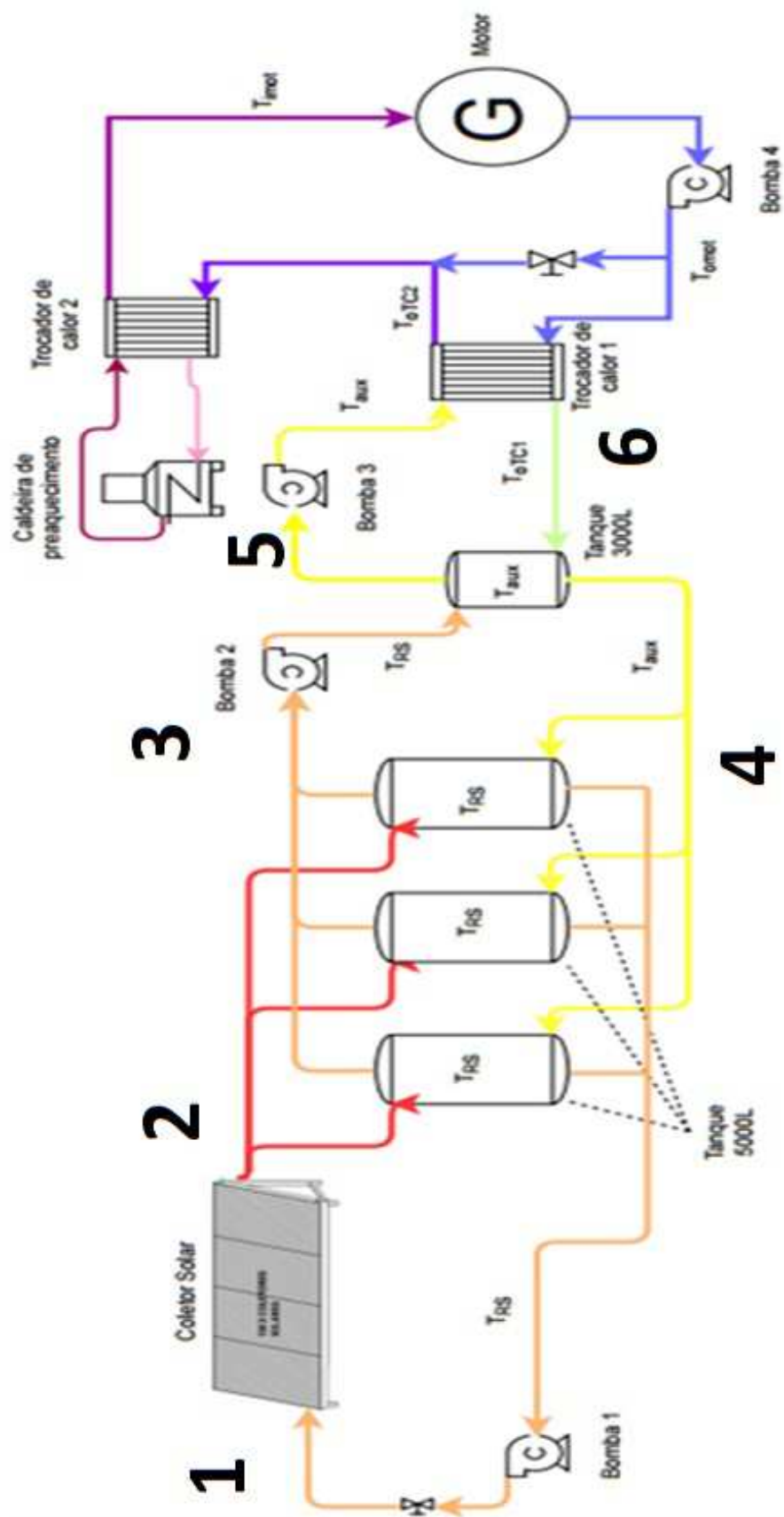


Figura 2.12: Esquema do sistema de aquecimento solar e identificação dos principais pontos de medição

O par de pontos 1 e 2 são respectivamente os pontos de entrada e de saída nos coletores solares, onde são medidas as temperaturas e a vazão de água de circulação.

O ponto 3 é o ponto de saída do tanque de 5000 litros, neste ponto é medida temperatura e vazão de água de circulação.

O ponto 4 é o ponto de saída do tanque auxiliar de 3000 litros, onde é medida a vazão de água de circulação e temperatura.

Os dois pontos mais à direita da figura (pontos 5 e 6), são os pontos de entrada e de saída do trocador de calor, respectivamente.

Para todos os pontos indicados há sensores e atuadores que indicam para cada sistema binário 1-2, 3-4, 5-6, se suas respectivas bombas estão em operação ou se as mesmas estão desligadas, dependendo das condições de operação da usina e dos diferenciais de temperatura programado para as mesmas entrarem em operação.

Em um primeiro momento avaliou-se que as bombas sejam ligadas a partir de um diferencial de temperatura de 5°C , ou seja, quando a temperatura de saída for 5°C maior que a de entrada, para cada sistema respectivo, a bomba entra em operação, desta forma garante-se que o sistema irá sempre funcionar de forma a gerar energia, e não a dissipá-la. Da mesma forma, quando o diferencial de temperatura for menor do que 2°C , as respectivas bombas são desligadas.

Estes valores levam em consideração diferenças reais de temperatura ao longo do sistema, muito embora teoricamente em condições ideais fossem iguais a zero.

3

Cálculos Energéticos

Para calcular o desempenho de qualquer sistema energético é preciso, a partir de condições conhecidas, avaliar a quantidade de energia útil, e assim fazer um balanço de energia entre a entrada e a saída do volume de controle especificado.

3.1

Painel Solar

Um balanço energético na entrada e na saída dos coletores solares pode ser feito de modo a determinar a energia térmica convertida em função da vazão e das temperaturas respectivas de entrada e saída no mesmo.

Desta forma tem-se:

$$Q_{12} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1)$$

Aonde Q_{12} é a energia útil do coletor solar, C_p é o calor específico do fluido que circula no coletor solar, e T_2 e T_1 são as temperaturas de saída e de entrada respectivas, \dot{m} é a vazão mássica do fluido circulante pela bomba 1.

3.2

Sistema da Bomba Número 2

Adotando a numeração especificada dos componentes medidos, é avaliado o sistema da bomba 2 com as medições de temperaturas do ponto 3, do ponto 4, e da vazão do fluido circulante pela bomba 2.

Com estes dados foi feito um cálculo energético, com fim de avaliar a energia térmica transferida do reservatório de 3000 litros.

Desta forma temos:

$$Q_{34} = \dot{m}C_p(T_4 - T_3)$$

Aonde Q_{34} é a energia térmica transferida do reservatório de 3000 litros, C_p é o calor específico do fluido, e T_4 e T_3 são as temperaturas dos pontos especificados, \dot{m} é a vazão mássica do fluido circulante pela bomba 2.

3.3

Sistema da Bomba Número 3

Analogamente à bomba 2, para a bomba 3 é feito o mesmo estudo com bases nas medições efetuadas:

$$Q_{56} = \dot{m}C_p(T_6 - T_5)$$

Aonde Q_{56} é a energia térmica transferida no trocador de calor, C_p é o calor específico do fluido, e T_6 e T_5 são as temperaturas dos pontos especificados, \dot{m} é a vazão mássica do fluido circulante pela bomba 3.

4

Obtenção de Dados

Como o sistema aqui estudado está ainda em fase de testes, não foi possível obter medições para uma amostragem de dias muito extensa. Dois meses diferentes (agosto e novembro) foram estudados.

Para a amostragem escolhida foram usados dados meteorológicos medidos e dados de operação do projeto necessários para a análise energética.

As vazões foram medidas por medidores do tipo turbina.



Figura 4.1: Pannel de aquisição de dados e controladores



Figura 4.2: Sistema de aquisição de dados e controladores Microsol

5

Análise de dados

Primeiramente foram trabalhados os dados do mês de agosto, durante 11 dias dentro do grupo amostral, onde dados de cada um dos 5 módulos foram estudados separadamente, dia a dia, e separadamente para cada sistema de bomba individual. Somando-se assim 165 análises individuais, somente para o mês de agosto, no quesito de medições.

Para o mês de novembro foi feito o mesmo estudo, porém com um grupo amostral de 10 dias no quesito medições do sistema.

Dados meteorológicos foram obtidos durante todos os meses estudados e desta forma pode-se analisar, calcular e comparar os dados de rendimento para cada dia individual do estudo.

Durante todos os dias estudados, o motor da usina estava ligado, fazendo assim com que o sistema de troca de calor para pré-aquecer o motor ficasse inoperante e, desta forma foi observado que pela análise de todos os dados respectivos à bomba 3 do sistema, que é responsável por circular o fluido do reservatório auxiliar para que o trocador de calor efetue o aquecimento do motor, que o sistema não está transmitindo energia para o motor, e a bomba 3 por conseguinte fica sempre desligada, pois a diferença de temperatura é praticamente igual a zero.



Figura 5.1: Detalhe do sistema de medição instalado em uma das tubulações

5.1

Análises do mês de agosto

Os dados apresentados são do módulo que melhor se corresponde com a média de geração de energia.

5.1.1

Energia Térmica Convertida

Através de um balanço energético feito nos coletores solares foram obtidos dados de energia térmica convertida para cada dia estudado do mês de agosto.

Abaixo tem-se um demonstrativo dos balanços diários:

Dia	kWh/dia
17/08/17	220,2
18/08/17	197,9
21/08/17	231,6
22/08/17	186,3
23/08/17	190,4
24/08/17	127,8
25/08/17	141,6
28/08/17	240,1
29/08/17	196,3
30/08/17	176,7
31/08/17	175,6

Figura 5.2: Tabela de energia convertida para agosto

A energia média convertida neste mês foi de 190kWh/dia.

5.1.2

Eficiência Energética

Para calcular a eficiência energética do sistema, foi realizado um comparativo entre a energia convertida em cada dia com os dados obtidos de incidência solar aos seus respectivos dias que foram obtidos através da estação meteorológica instalada na Usina. Esta tabela meteorológica de radiação solar diária total incidente encontra-se no apêndice deste trabalho.

O cálculo realizado está descrito abaixo:

$$Eficiencia = \frac{Energia \text{ Convertida}}{Energia \text{ Solar Incidente}}$$

Dia	Eficiência
17/08/17	0,17
18/08/17	0,18
21/08/17	0,19
22/08/17	0,19
23/08/17	0,17
24/08/17	0,13
25/08/17	0,13
28/08/17	0,18
29/08/17	0,16
30/08/17	0,14
31/08/17	0,15

Figura 5.3: Tabela de rendimentos diários para agosto

A eficiência média do Sistema de coletores solares foi de 16%, inferior ao que normalmente é obtido em sistemas similares.

5.1.3

Comparativo de Temperaturas do Sistema

Foram instalados 6 sensores para medir temperatura em seis pontos como descrito anteriormente. De posse destes 6 pontos e seus respectivos dados foi feito um estudo de comparação de temperaturas críticas que são pertinentes ao projeto, de modo a corroborar e avaliar o funcionamento do sistema.

Da mesma forma que dito anteriormente, foram obtidos dados individuais para cada módulo e para cada dia respectivo a ser estudado, e como tais dados permaneceram aproximadamente iguais, com pequenas variações.

T1 - temperatura de entrada dos coletores solares

T2 - temperatura de saída dos coletores solares

T3 - temperatura de saída dos tanques de 5000l

T4 - temperatura de saída dos tanques de 3000l

Todos gráficos plotados a seguir representam as temperaturas nos pontos principais mencionados anteriormente ao longo de um dia. Com as temperaturas em °C e o tempo representado em hora.

Comparação entre as Temperaturas de Entrada e Saída dos Coletores Solares

A figura 5.4 relaciona as temperaturas dos pontos 1 e 2 no decorrer do tempo. Pode-se ver claramente o caráter transiente do sistema, que como especificado deve ligar e desligar de acordo com o diferencial de temperatura especificado, de modo a aumentar a eficiência dos de conversão de energia.

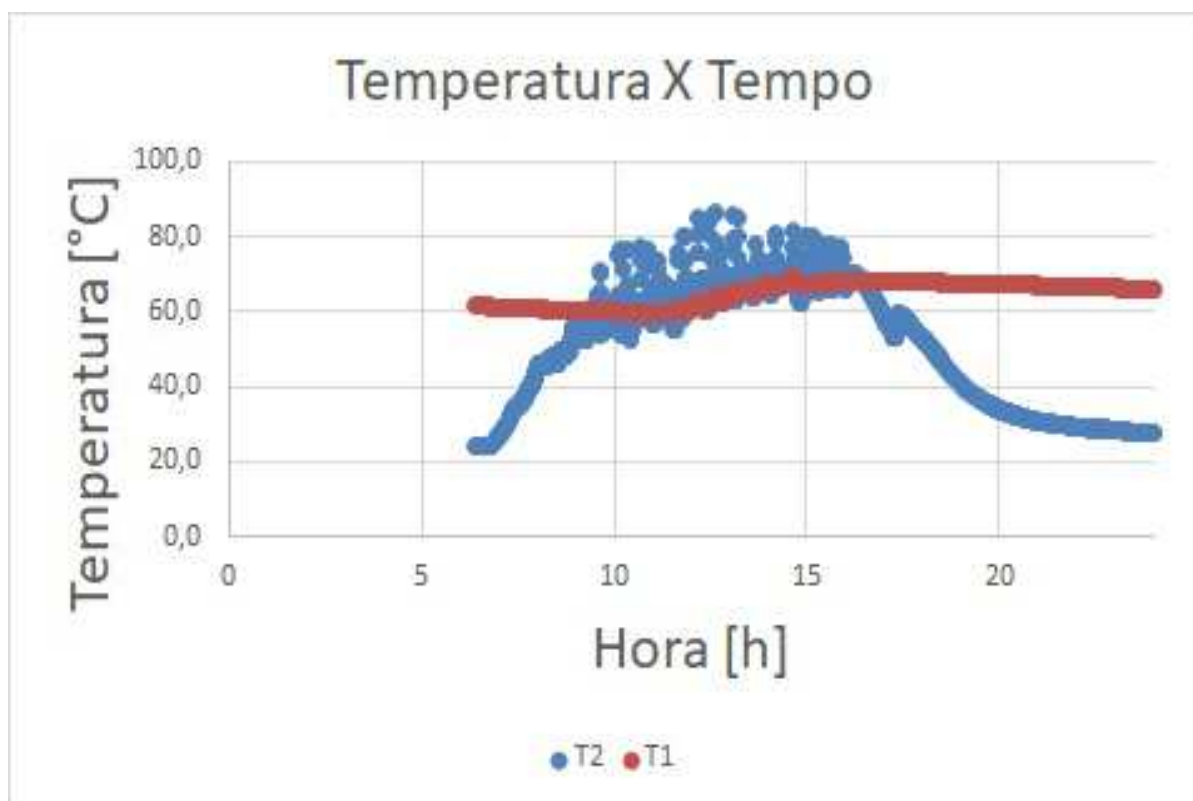


Figura 5.4: Comparação de Temperaturas T1 e T2

Atente-se que para quando a temperatura do ponto 2 é menor do que a do ponto 1, a bomba estaria desligada, o sistema da bomba principal estaria inoperante; quando o sistema se inverte está exemplificada a situação em que as bombas estão ligadas, e o sistema está captando energia.

Comparação entre as Temperaturas de Entrada e de Saída dos Reservatórios de 3000 litros

A figura 5.5 analisa as temperaturas nos pontos 3 e 4, ponto de entrada e saída do tanque auxiliar de 3000 litros, respectivamente.

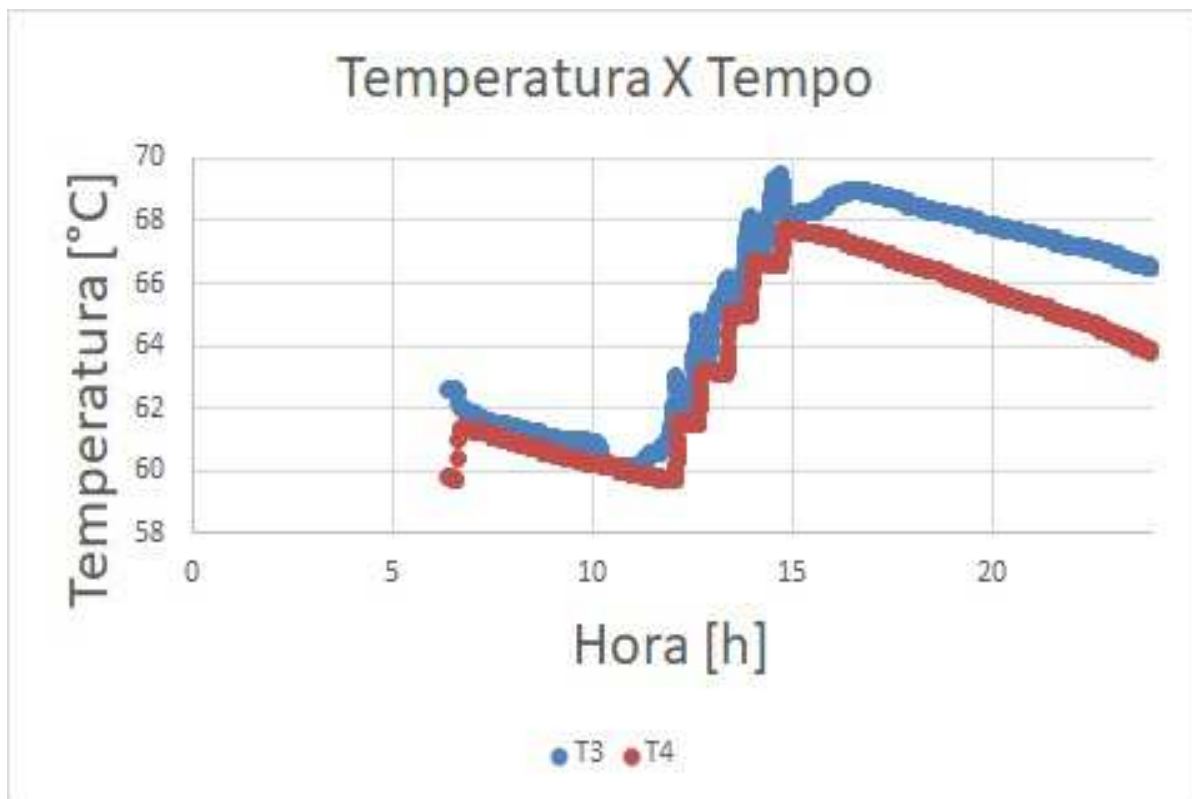


Figura 5.5: Comparação entre as Temperaturas de T3 e T4

Observa-se que a temperatura de saída é ligeiramente menor, cerca de 1°C, que a temperatura de entrada, indicando que a transferência de calor para o motor é pequena.

Caso o motor diesel da usina estivesse desligado e o sistema de captação solar e fornecimento de energia para pré-aquecer os motores estivesse operante esta diferença de temperaturas seria muito maior devido à transferência de calor originada pelo trocador de calor instalado junto ao subsistema da bomba 3 e do reservatório de 3 mil litros estar trocando calor com o sistema de aquecimento do motor diesel.

Comparação entre a Temperatura do Reservatório de 5000 litros e a Temperatura de Entrada no Reservatório de 3000 litros

As temperaturas 1 e 3 neste gráfico são as temperaturas do tanque principal (5 mil litros), e suas respectivas temperaturas de saída para a bomba 2 (que abastece o tanque auxiliar de 3 mil litros).

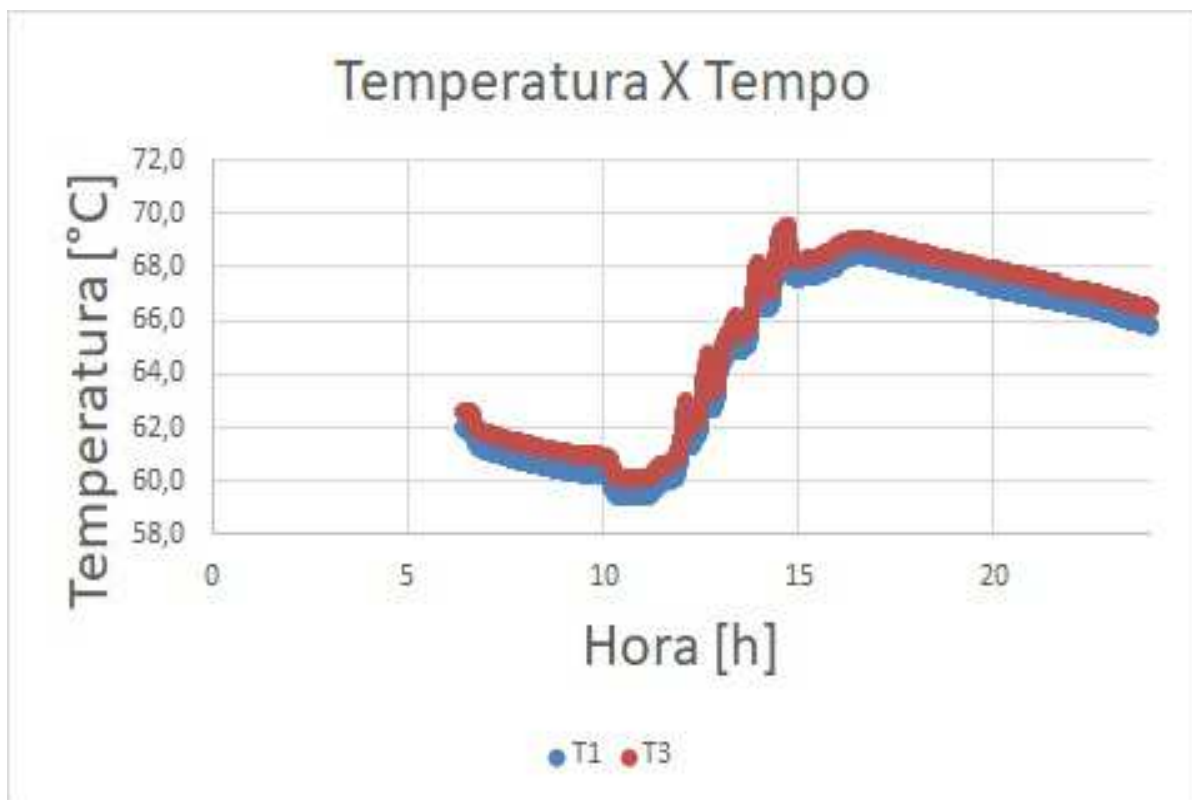


Figura 5.6: Gráfico comparativo de T1 e T3

A figura 5.6 permite ver que as temperaturas são praticamente iguais, mostrando que as diferenças são devidas à posição do sensor de medição de temperatura no reservatório de 5000 litros, onde a temperatura é estratificada. Em condições ideais elas seriam iguais.

Comparação das Temperaturas dos Reservatórios de 5000 litros e 3000 litros

T1 e T4 representam as temperaturas dos reservatórios de 5 e de 3 mil litros, respectivamente, e como o sistema de troca de calor do sistema de captação solar com os motores geradores da Usina estão desligados os dois reservatórios tendem a ficar com a mesma temperatura.

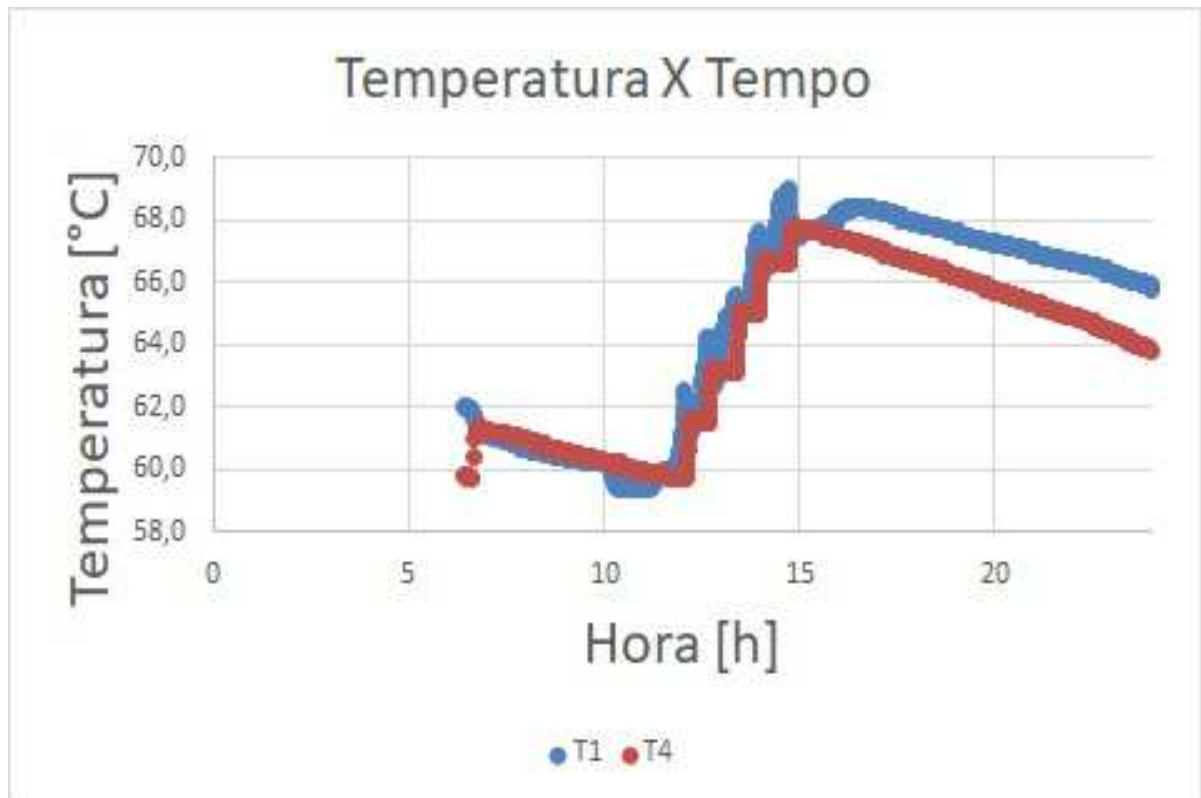


Figura 5.7: Comparação entre as temperaturas T1 e T4

5.2

Análises do mês de novembro

Devido ao fato de que a energia térmica convertida encontrada anteriormente foi bem menor do que a obtida usualmente em sistemas similares, foi analisada a influência da sujeira da superfície do vidro dos coletores sobre a eficiência de conversão em energia térmica, através da lavagem da superfície externa do vidro. Testes foram realizados durante 10 dias do mês de novembro de 2017.

5.2.1

Energia Térmica Convertida

A figura 5.8 mostra que a energia térmica convertida é menor do que a energia térmica convertida no mês de agosto, para uma incidência de radiação solar inferior a cerca de 10%

Dia	kWh/dia
8/11/2017	82,0
9/11/2017	187,0
10/11/2017	188,1
13/11/2017	182,0
14/11/2017	165,1
15/11/2017	118,8
16/11/2017	112,4
21/11/2017	140,4
22/11/2017	104,1
23/11/2017	169,7

Figura 5.8: Tabela de energia convertida para novembro

A média da energia térmica convertido dentre os dias estudados foi 144,96kWh/dia

5.2.2

Eficiência Energética

A eficiência energética foi calculada levando em consideração os dados obtidos através da estação meteorológica, sendo utilizado o valor total de energia solar incidente para assim efetuar o cálculo da razão entre a energia absorvida pelo sistema e a energia irradiada pelo sol.

$$Eficiencia = \frac{Energia \text{ Convertida}}{Energia \text{ Solar Incidente}}$$

Dia	Eficiência
8/11/2017	0,11
9/11/2017	0,17
10/11/2017	0,17
13/11/2017	0,13
14/11/2017	0,14
15/11/2017	0,12
16/11/2017	0,12
21/11/2017	0,14
22/11/2017	0,13
23/11/2017	0,18

Figura 5.9: Tabela de rendimentos diários para novembro

A figura 5.9 mostra os dados obtidos para as eficiências diárias do mês de novembro. A média das eficiências diárias foi 14%.

Como as eficiências energeticas, antes e depois da lavagem da superfície externa do vidro dos coletores solares são aproximadamente iguais, conclui-se que a influência da lavagem é muito pequena.

Uma análise visual dos coletores mostrou que sua superfície interna estava suja, provavelmente ocasionada por vedação ineficiente. Assim, propõe-se um novo teste para verificação esta hipótese, após limpeza da superfície interna do vidro.

6

Potencial de Economia de Combustível

A análise do o potencial de economia de combustível consiste em contabilizar o uso de combustível economizado pelo uso dos painéis solares. Em um dia a média de energia térmica convertida para cada um dos módulos é de:

$$190kWh/dia$$

Logo em um mês temos:

$$5890kWh/mes$$

Convertendo de kWh/mês para kJ/mês temos:

$$5890 \times 3600 = 21204000kJ/mes$$

O Poder Calorífico Inferior do óleo combustível utilizado é:

$$PCI = 40124kJ/kg$$

Da equação de energia térmica aplicada ao combustível temos:

$$M_{oleo} \times PCI \times \eta = Energia$$

O rendimento η pode ser considerado de 90%

Assim:

$$M_{oleo} = \frac{21204000}{40124 \times 0,9} = 587kg/mes$$

Logo o potencial de economia de combustível de cada módulo é de:

$$587kg/mes$$

Como são 5 módulos, o potencial de economia de combustível do sistema integral é de:

$$5 \times 587kg/mes = 2935kg/mes$$

Logo temos que o potencial de economia de combustível mensal, que foi extrapolado com base nos dados avaliados é de 2935kg/mês.

7

Conclusão

Um sistema de aquecimento de água com energia solar foi projetado e instalado na Termelétrica GERAMAR, em Miranda do Norte, Maranhão, com a finalidade de economizar o consumo de óleo combustível usado numa caldeira a vapor para fornecimento de calor destinado ao pré-aquecimento de motores Diesel da mesma. Quando a usina termelétrica não está em operação, cinco destes motores, dotados de uma caldeira de recuperação de calor, tem a energia térmica necessária para o seu pré-aquecimento complementada pela energia solar e, portanto, reduzindo o consumo de óleo combustível utilizado na caldeira.

A finalidade deste trabalho era avaliar o sistema de fornecimento de calor projetado. Entretanto, como a usina termelétrica estava em operação, resolveu-se avaliar inicialmente a eficiência de conversão de energia solar em energia térmica, como primeiro passo para otimizar as condições de operação do sistema, consistindo em tempo de operação das bombas de circulação da água e da sua temperatura. Desta forma pode-se avaliar a viabilidade econômica do sistema e a real economia de combustível.

Foi medida a energia convertida em energia térmica para os 5 módulos do sistema, cada um com 200 metros quadrados de superfície de coletores solares térmicos, com o intuito de se avaliar o potencial de utilização da energia solar para pré-aquecer os motores Diesel da usina termelétrica. Para 11 dias do mês de agosto de 2017, a energia média gerada por cada modulo solar foi, em média, 190 kWh/dia, com eficiência média de conversão de 16% .

Para um estudo mais conclusivo seria necessária uma amostra maior de dias, com dados de mais alguns meses, ou se possível até um ano inteiro de dados para poder fazer um estudo mais extensivo. As temperaturas de entrada e saída dos coletores solares foram medidas com sensores através de um sistema de aquisição de dados que também aciona o desligamento da bomba de circulação de água quando a intensidade de radiação solar é pequena.

Como o valor da eficiência encontrada está abaixo do que normalmente seria encontrado em tais sistemas, resolveu-se investigar a influência da sujeira depositada em forma de terra, poeira e sedimentos, em cima dos painéis coletores, sobre a eficiência de conversão. Os vidros dos painéis solares foram lavados externamente e a seguir testados durante 10 dias do mês de novembro de 2017, resultando numa energia média convertida de 145 kWh/dia, com eficiência de 14%. Neste caso, a intensidade de radiação solar incidente foi cerca de 10% menor.



Figura 7.1: Sujeira depositada sobre os painéis

Uma análise posterior dos vidros de cobertura mostrou haver um depósito de sujeira em sua superfície interna, provavelmente por infiltrações devido a uma vedação deficiente. Resolveu-se lavar a superfície interna e testar o sistema em outra ocasião.

Com estes dados preliminares, o uso de energia solar para pré-aquecer os motores da usina através deste sistema implementado tem o potencial de economizar 2935kg de Óleo Combustível por mês.

Referências Bibliográficas

- [1] Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van, W. G. J., Van, W. G. J. (1998). Fundamentals of thermodynamics. New York: Wiley.
- [2] Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. (2008). Introduction to fluid mechanics (7th ed.). Hoboken, N.J.: Wiley
- [3] DUFFIE, J. A; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, 4ed. Hoboken: Wiley, 2013. 910p.
- [4] HIGH TEC FINLAND. Foto Motor Wartsila 20V32.
- [5] ORLANDO, A. F. Desenvolvimento de Sistema Híbrido solar-vapor água para preaquecimento de motores e combustível de usinas termelétricas. Relatório 4 Ver 2. Rio de Janeiro: LAME - PUC-Rio, 2016.
- [6] WARTSILA. Foto Gera Maranhão.
- [7] Guillaume Louis Pradère, Simulação de desempenho de um sistema de pré-aquecimento de motores diesel de uma usina termoeletrica via energia solar, PUC-Rio, 2017.
- [8] INMETRO, Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água - coletores solares, 2016. Catálogo técnico.

8

Apêndice 1 - Incidência Solar Mensal

Abaixo estão as tabelas de radiação solar incidente nos períodos estudados, estes dados foram obtidos pela estação meteorológica instalada.

	DATA	PA_AVG	TA_AVG	UR_AVG	ENERGIA RA	
			°C		kWh/m².dia	
	01/08/2017	1005,9	26,92	72,49	5,328	
	02/08/2017	1007,0	27,19	78,07	4,848	
	03/08/2017	1006,9	28,31	72,31	6,434	
	04/08/2017	1006,5	28,02	75,65	6,276	
	05/08/2017	1005,9	27,36	77,54	5,459	
	06/08/2017	1006,1	26,63	82,97	4,841	
	07/08/2017	1006,0	27,30	75,43	6,133	
	08/08/2017	1005,8	27,63	72,99	5,854	
	09/08/2017	1006,0	27,86	71,47	6,390	
	10/08/2017	1005,3	27,59	76,06	5,894	
	11/08/2017	1004,8	27,53	76,44	6,325	
	12/08/2017	1004,9	27,81	72,96	6,220	
	13/08/2017	1005,4	27,88	72,22	6,231	
	14/08/2017	1004,2	27,94	73,54	5,447	
	15/08/2017	1003,4	27,99	74,98	5,956	
	16/08/2017	1004,7	27,97	72,68	5,824	
	17/08/2017	1004,0	28,19	70,48	6,382	
	18/08/2017	1003,7	27,01	78,50	5,600	
	19/08/2017	1003,1	28,12	76,13	5,778	
	20/08/2017	1004,7	28,04	73,97	5,350	
	21/08/2017	1005,8	28,01	75,12	6,209	
	22/08/2017	1005,1	27,55	78,36	4,988	
	23/08/2017	1004,4	27,90	68,35	5,722	
	24/08/2017	1004,8	27,81	71,52	4,967	
	25/08/2017	1004,7	27,97	69,97	5,646	
	26/08/2017	1004,6	28,64	69,70	6,257	
	27/08/2017	1004,3	28,72	71,66	5,598	
	28/08/2017	1004,2	28,59	69,78	6,684	
	29/08/2017	1004,8	28,39	71,27	6,198	
	30/08/2017	1005,0	28,61	70,51	6,255	
	31/08/2017	1005,4	28,37	72,01	5,856	
	Média	1005,1	27,87	73,71	5,837	

Figura 8.1: Planilha de incidência de energia solar para agosto

	DATA	PA_AVG	TA_AVG	UR_AVG	ENERGIA_RA	
			°C		kWh/m².dia	
	01/11/2017	1003,3	28,69	73,55	5,218	
	02/11/2017	1003,2	28,53	73,30	6,103	
	03/11/2017	1002,3	29,23	67,60	5,455	
	04/11/2017	1002,4	29,25	66,29	5,791	
	05/11/2017	1002,3	29,44	65,98	6,958	
	06/11/2017	1002,2	28,80	69,99	6,313	
	07/11/2017	1001,4	28,27	70,05	5,029	
	08/11/2017	1002,2	28,02	72,83	3,787	
	09/11/2017	1001,5	28,47	68,95	5,562	
	10/11/2017	1000,3	28,73	68,04	5,465	
	11/11/2017	1000,4	28,54	68,26	6,266	
	12/11/2017	1001,3	28,43	70,19	5,832	
	13/11/2017	1001,3	29,04	66,85	6,814	
	14/11/2017	1001,2	28,68	68,39	5,825	
	15/11/2017	1001,8	28,98	65,93	4,943	
	16/11/2017	1003,0	28,52	68,80	4,870	
	17/11/2017	1002,0	28,56	68,49	5,536	
	18/11/2017	1000,8	28,36	69,45	4,948	
	19/11/2017	1001,7	28,07	70,62	4,924	
	20/11/2017	1001,8	27,96	71,08	4,834	
	21/11/2017	1001,4	28,82	69,34	5,068	
	22/11/2017	1002,2	28,02	72,96	3,979	
	23/11/2017	1002,9	27,86	73,69	4,660	
	24/11/2017	1003,6	28,45	69,71	4,127	
	25/11/2017	1003,7	28,51	69,15	4,213	
	26/11/2017	1003,4	28,30	71,03	5,306	
	27/11/2017	1003,4	28,70	70,85	5,535	
	28/11/2017	1002,9	29,24	68,22	5,849	
	29/11/2017	1002,1	28,71	70,04	4,747	
	30/11/2017	1001,1	27,42	77,88	4,793	
	Média	1002,1	28,55	69,92	5,292	

Figura 8.2: Planilha de incidência de energia solar para novembro

9

Apêndice 2 - Análise Quantitativa

Obteve-se para esta análise o dia e módulo que apresentou maior eficiência dentre todos os dias apresentados.

	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4	Módulo 5
dia 17	0,21	0,17	0,15	0,11	0,20
dia 18	0,21	0,18	0,15	0,11	0,21
dia 21	0,21	0,19	0,16	0,16	0,21
dia 22	0,20	0,19	0,17	0,14	0,22
dia 23	0,19	0,17	0,15	0,12	0,20
dia 24	0,15	0,13	0,11	0,07	0,15
dia 25	0,12	0,13	0,12	0,10	0,12
dia 28	0,21	0,18	0,16	0,13	0,21
dia 29	0,20	0,16	0,15	0,10	0,21
dia 30	0,18	0,14	0,13	0,08	0,21
dia 31	0,17	0,15	0,13	0,10	0,22

Figura 9.1: Tabela de comparação de eficiências para o mês de agosto

O dia de maior eficiência foi o dia 31 de agosto de 2017, no módulo 5, que apresentou uma eficiência de 21,8%.

A análise gráfica das figuras 9.2 e 9.3 demonstram com clareza o funcionamento do sistema e os respectivos valores de temperaturas e de diferença de temperaturas para este dia e módulo em questão.

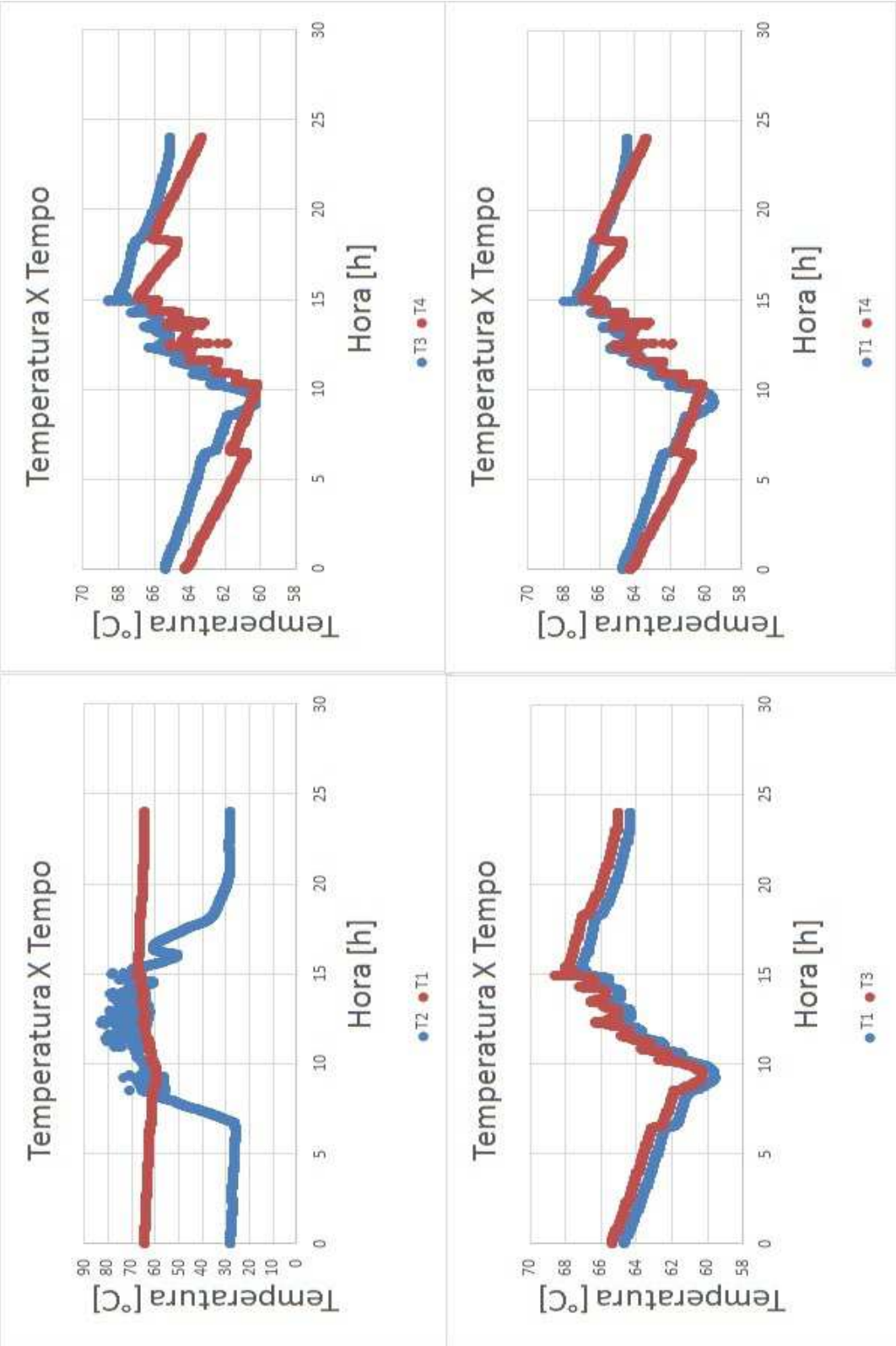


Figura 9.2: Comparativo entre temperaturas principais

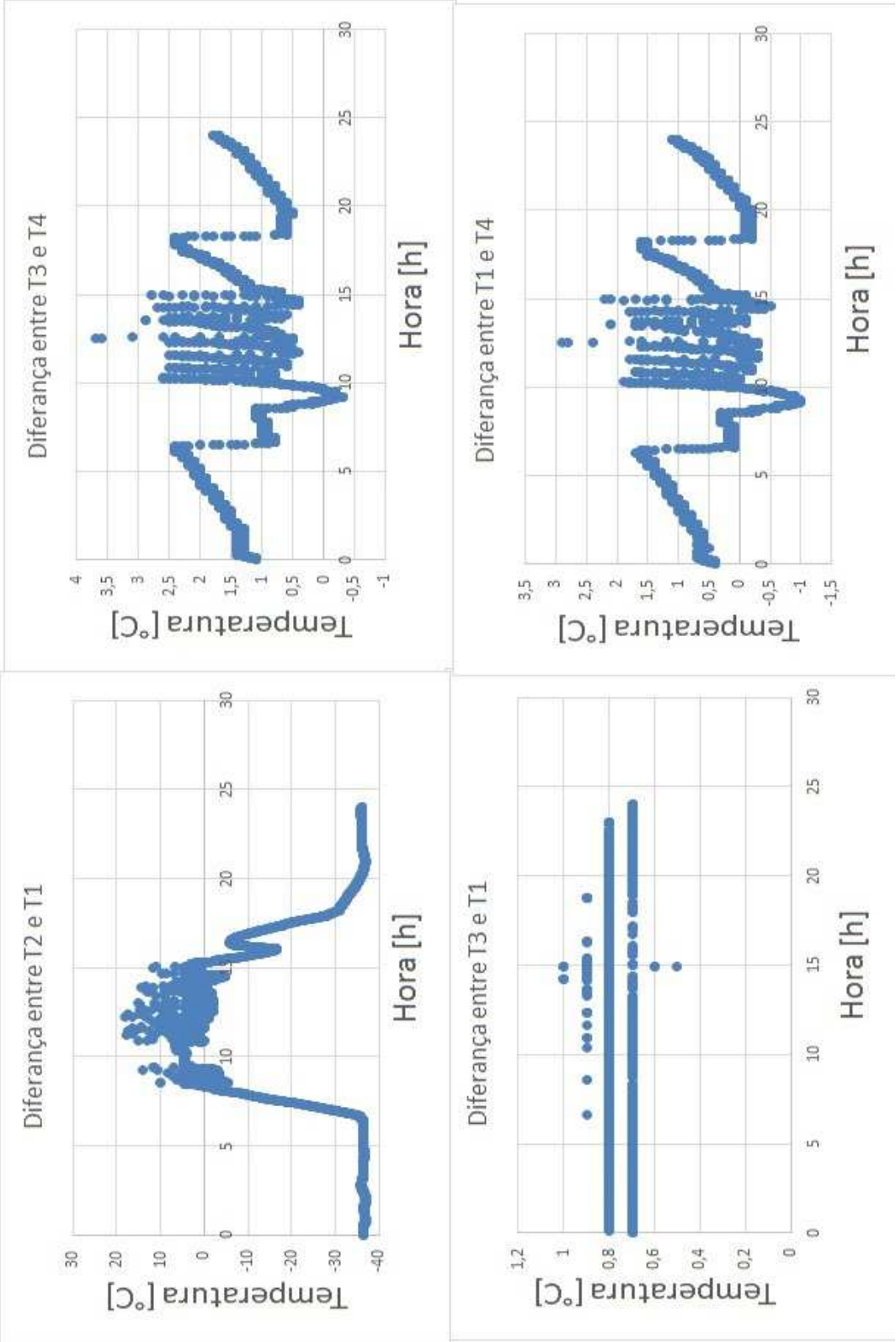


Figura 9.3: Comparativo entre as diferenças das temperaturas principais