



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS BAURU

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM SISTEMA
CONCENTRADOR PARABÓLICO COM SEGUIDOR SOLAR**

GILBERTO BUENO DE OLIVEIRA JUNIOR

BAURU-SP

Novembro-2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS BAURU

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM SISTEMA
CONCENTRADOR PARABÓLICO COM SEGUIDOR SOLAR**

GILBERTO BUENO DE OLIVEIRA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Alcides Padilha

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da
UNESP – Campus de Bauru, como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

BAURU-SP

Novembro-2015

Oliveira Junior, Gilberto Bueno.

Construção e avaliação térmica de um sistema
concentrador parabólico com seguidor solar / Gilberto
Bueno de Oliveira Junior, 2015

111 f. : il.

Orientador: Alcides Padilha

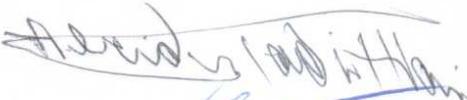
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015

1. Concentrador Solar Parabólico. 2. Fluido
Térmico. 3. Microcontrolador. 4. Seguidor Solar. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II. Título.

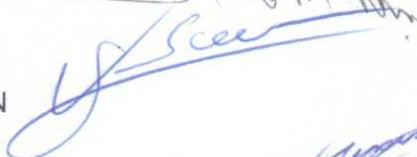
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GILBERTO BUENO DE OLIVEIRA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 18 dias do mês de dezembro do ano de 2015, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação/FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ALCIDES PADILHA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GILBERTO BUENO DE OLIVEIRA JUNIOR, intitulado "CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO COM RASTREADOR". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ALCIDES PADILHA



Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON



Prof. Dr. ISMAEL DE MARCHI NETO



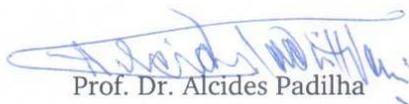
PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
GILBERTO BUENO DE OLIVEIRA JUNIOR

DE: "CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM SISTEMA CONCENTRADOR SOLAR
PARABÓLICO COM RASTREADOR"

PARA: CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO TÉRMICA DE UM SISTEMA CONCENTRADOR
PARABÓLICO COM SEGUIDOR SOLAR

Bauru, 18 de dezembro de 2015


Prof. Dr. Alcides Padilha
Orientador

“Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes”

Isaac Newton

Agradecimentos

Esta é a principal parte do trabalho. O que vem depois é só o resultado das forças que recebi das pessoas aqui mencionadas.

Preciso agradecer, imensamente, ao Nosso Pai, por toda inspiração, força e ajuda que Ele me proporcionou. Muitas vezes me carregando em seus braços, ou enviando mensageiros de luz para meu consolo.

Agradeço à minha inestimável companheira de todos os tempos, Daniela Feijó, que foi minha fortaleza de energia e de amor durante os dias mais difíceis. Enquanto Deus me apoiava lá dos céus, ela me impulsionava diretamente daqui da Terra. Um anjo que tenho a felicidade de dividir esta existência. Dedico este trabalho a você, minha querida Dani.

Agradeço também aos meus pais, Gilberto e Fátima, por apoiar decisões que tive que tomar para chegar onde estou. Todos os esforços que vocês fizeram durante toda essa vida estão presentes neste trabalho de mestrado. Obrigado pai e mãe.

Agradeço também à minha sogra Fátima e ao meu cunhado João Ricardo Bachega Feijó Rosa (um cara fantástico), que me acolheram como filho e irmão, respectivamente, durante estes 14 anos. Aprendi muito com os valores que esta família tem em seus corações. Obrigado, João e Fátima, pelo apoio e consideração inestimáveis nos momentos mais difíceis.

Agradeço a amizade e carinho que nossas alegres amigas Tereza Viola Conegêro e Maria Aparecida Viola nos deram nos últimos tempos, recebendo-nos (Daniela e eu) como filhos em suas vidas. Que Deus ilumine essas jóias raras.

Agradeço às eternas avós (mães) Zilda Luísa Ricordi e Amélia Zanoto Bachega, pelos legados de amor e direção, que seguimos até hoje. Que Deus as ilumine.

Agradeço ao meu orientador (e amigo) Prof. Dr. Alcides Padilha que me conduziu desde a graduação pelos caminhos do conhecimento, apresentando-me ao mundo do laboratório experimental. Sua habilidade para transformar o difícil em fácil, catalisando conhecimento,

vai ficar para sempre em nossas mentes e corações. Obrigado, professor, pelo apoio em todo este trabalho.

Agradeço, também, ao Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon, que me expandiu a mente para “fora da caixa”, apresentando-me o mundo da microeletrônica, que é a base deste trabalho. Poucas vezes neste mundo me deparei com pessoa tão completa, tão sábia, tão humana. Obrigado professor.

Ao amigo Ricardo Cecílio Moreno das Neves, um grande companheiro e irmão dentro e fora do mestrado. Um exemplo de humildade, esforço e superação para minha vida. Obrigado pelas palavras de motivação, de otimismo, e pelo apoio direto neste trabalho. Ele também é seu.

Ao amigo Dr. Luiz Manoel de Paiva Souza, que foi um professor dentro do laboratório, deixando um belo exemplo de perseverança para todos nós. Obrigado pela força e paciência durante os anos em que compartilhamos bancadas.

Ao amigo André Issao Sato, um grande companheiro de laboratório, um profissional completo, sempre acreditando em nossas ideias. Obrigado pela força e pelos projetos que tivemos a felicidade de trabalharmos juntos.

Ao amigo Ricardo Rabelo de Arruda Filho, com quem tive a chance de aprender muito sobre esforço e profissionalismo durante as épocas das disciplinas.

Agradeço também ao Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto por aceitar o convite para participar de nossa banca, contribuindo com a elevação da qualidade deste trabalho.

Obrigado também ao Prof. Dr. Santiago Del Rio Oliveira pela gentileza e tempo dispensados na construção deste trabalho.

E peço desculpas se cometi alguma injustiça ao esquecer de mencionar qualquer companheiro que teve participação nesta jornada.

RESUMO

A busca por formas alternativas de energia tem mobilizado grande parte da comunidade científica, cujos trabalhos são incansáveis em apontar soluções viáveis para o aproveitamento das energias renováveis e limpas. A energia solar se destaca dentre todas pela sua disposição e quantidade. Uma forma já conhecida de sua utilização é através da concentração em sistemas parabólicos, que permitem o direcionamento dos raios do Sol para uma pequena área. A vantagem deste tipo de projeto é a produção de energia térmica a altas temperaturas e pressões. Essa energia concentrada possui grande aplicação, pois permite a conversão eficiente em energia elétrica, produzidas em turbinas a vapor. O objetivo deste trabalho foi construir um dispositivo termo-eletrônico para concentração solar e, com isso, quantificar a energia produzida, bem como sua eficiência. Assim sendo, foi construído um concentrador parabólico e um rastreador solar com movimento tridimensional, que permite o alinhamento do equipamento com a incidência dos raios do Sol. Foi utilizado ainda, para circulação no interior do absorvedor, um sistema de bombeamento de fluido térmico de alto ponto de ebulição e que não sofria deformação a altas temperaturas. O balanço energético no dispositivo permitiu obter as curvas de potência útil e da eficiência do sistema. O experimento foi dividido em duas partes. Na primeira parte, foi obtida a temperatura de estagnação e na outra parte, foi medida a eficiência energética sobre o fluido térmico em circulação. A temperatura de estagnação medida em dezembro foi de 476,5 °C, às 4:25 PM. A segunda parte dos testes mostrou uma eficiência de 33% no primeiro ensaio. No entanto, quando se utilizou uma outra forma de medir a irradiação solar (abordagem teórica), a eficiência aumentou, permanecendo entre 45% a 55%, considerando regime permanente. Além disso, possibilitou a discussão de formas de incrementar a sua eficiência.

Palavras-Chave: Concentrador Solar Parabólico, Rastreador Solar, Microcontrolador, Superfície Absorvedora, Fluido Térmico, Eficiência Térmica.

ABSTRACT

The searching for renewable energy sources has mobilized much of the scientific community, which work is tireless in pointing out feasible solutions to use clean energy. Solar energy is natural choice among others, because its availability and amount. A known way to use this energy is by focusing solar rays through parabolics, which allow rays concentration to a small area. The advantage of this type of project is to produce thermal energy at high temperatures. This energy has a wide application on producing other forms of energy such as electric power in turbines since solar concentrators provide steam at high pressure and temperature. The goal of this study is to build a solar concentration device and measure the energy produced, as well its efficiency in transformation. Thus, was built up a parabolic concentrator and a solar tracker to motion in three dimension, which allows device alignment towards incidence of solar rays. Was utilized a pumping system to flowing thermal fluid at high temperatures through the absorber. The energy balance of this thermal fluid, led to obtain behavior curves of net power and system efficiency. The experimental was divided in two parts. On the first one, was obtained the stagnation temperature and the other one, was measured the efficiency over a circulating thermal fluid. The stagnation temperature measured in december was 476,5°C, at 4:25PM. The second part of tests has shown an efficiency of 33% on first one assay. However when was utilizing another form to measure the solar irradiation (theoretic approach), the efficiency rises between 45% to 55%, regarding steady state conditions. Furthermore, this work allowed discussions to discover ways to increase the energy efficiency.

Keywords: Parabolic solar concentrator, Solar tracker, Microcontroller, Absorber surface, Thermal Fluid, Thermal Efficiency.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
NOMENCLATURA	XI
ABREVIACÕES	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Potencial da Energia Solar no Mundo.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Problema a Ser Estudado.....	3
1.4 Metodologia.....	4
1.5 Resultados Esperados	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Concentradores Parabólicos	5
2.2 Características de um Concentrador	7
2.2.1 Temperatura de Estagnação.....	7
2.3 Tipos de Concentradores Pontuais	8
2.4 Materiais Refletivos	10
2.5 Rastreador Solar	13
2.6 Rastreadores Passivos.....	13
2.7 Rastreadores Ativos	16
2.8 Estratégias de <i>Tracking</i>	21
2.9 Outras Aplicações do Sistema <i>Tracking</i>	21
2.10 Absorvedor.....	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 Concentrador Solar	24
3.2 Rastreador Solar	25
3.3 Ponte H	25
3.3.1 Modulação por Largura de Pulso.....	29
3.3.2 Desenvolvimento do Módulo de Ponte H.....	31
3.4 Instrumentação.....	33

3.4.1	Sensores de Temperatura	33
3.4.2	Termopar	34
3.4.3	Sensor de Irradiação Solar	35
3.4.4	Balança de Precisão	36
3.5	Absorvedor.....	38
3.6	Sistema de Controle.....	40
3.7	Aquisição de Dados (Software / Físico)	43
3.8	Fluido Térmico	45
3.9	Balanco Energético no Sistema.....	45
3.9.1	Cálculo da Radiação Térmica	46
3.9.2	Cálculo da Área de Abertura e do Absorvedor.....	46
3.9.3	Cálculo da Eficiência Térmica	47
3.10	Cálculo da Taxa de Concentração	47
3.11	Descrição do Ensaio	48
3.12	Vazão Volumétrica do Fluido Térmico.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	Teste de Temperatura de Estagnação	50
4.2	Sistema Concentrador em Operação.....	52
4.3	Principais Resultados	54
4.4	Eficiência Térmica	60
4.5	Eficiência Baseada em Equações Empíricas da Irradiação.....	63
4.6	Incremento da Eficiência	71
5	CONCLUSÕES.....	73
6	TRABALHOS FUTUROS.....	75
7	REFERÊNCIAS.....	77
	ANEXO I.....	80
	ANEXO II.....	86
	ANEXO III.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento da geração de energia elétrica através de fontes renováveis no cenário mais otimista.....	2
Figura 2 – (a) Amostra de alumínio antes e depois da fundição pela concentração da luz solar. (b) Parábola utilizada para produzir a fundição à 824°C.	8
Figura 3 – O refletor Off-set é um segmento de um parabolóide.	9
Figura 4 – Posicionamento do foco em um refletor Off-set.	9
Figura 5 – Sistema de rastreamento solar passivo utilizando elemento bimetálico.	14
Figura 6 – Sistema de posicionamento passivo que utiliza a memória de forma de ligas especiais.	15
Figura 7 – Comparação entre as temperaturas obtidas em um destilador com e sem rastreamento da luz solar.	18
Figura 8 – Sensores para rastreamento em forma de íris.	19
Figura 9 – Rastreamento baseado no processamento de imagens.	20
Figura 10 – Sensor de luminosidade com dois fotoresistores.	20
Figura 11 – (a) Aparato experimental para estudo das perdas térmicas. (b) Resultados experimentais das perdas de calor, por convecção, condução, radiação e a total no absorvedor.	22
Figura 12 – Resultado da simulação numérica para a cavidade de um absorvedor em três diferentes estados. (a) condição de vapor superaquecido, (b) condição de vapor saturado, (c) condição de líquido subresfriado.	23
Figura 13 – Superfície parabólica recebendo espelhamento.	24
Figura 14 – Ilustração da configuração para o comando do motor de corrente contínua.	26
Figura 15 – Ilustração do funcionamento de uma Ponte H.	27
Figura 16 – Inversão do sentido de rotação conforme o sentido da corrente aplicada ao motor.	28
Figura 17 – Modulação por largura de pulso.	30
Figura 18 – Interligação dos componentes da Ponte H, simulados no software Labcenter Proteus.	31

Figura 19 – (a) Circuito impresso. (b) Visualização da placa no software Proteus/Ares.....	32
Figura 20 – Placa eletrônica da Ponte H, finalizada.	32
Figura 21 – Sensor de temperatura DS18B20, fabricado pela Maxim.....	34
Figura 22 – Termopar tipo "K" e o módulo MAX6675.....	35
Figura 23 – Solarímetro (marca TES) utilizado para aquisição da irradiação solar durante o experimento.....	36
Figura 24 – Balança de precisão, marca Ohaus, utilizada para medir as massas das amostras de fluido térmico.....	37
Figura 25 – Trocador de Calor constituído por um tubo de cobre em formato espiral.....	38
Figura 26 – Trocador montado em caixa isolada termicamente.	39
Figura 27 – Sistema Eletrônico de Controle.	41
Figura 28 – Diagrama da hierarquia interna do Sistema de Controle.....	42
Figura 29 – Painel de Controle do Experimento (Datalogger). Desenvolvido em linguagem Java.....	44
Figura 30 – Equipamento no momento do teste da temperatura de estagnação (dezembro/ 2014). Nesta etapa do projeto foi testado o primeiro tipo de absorvedor.	50
Figura 31 – Absorvedor seco realizando o teste de temperatura de estagnação (17/12/2014).....	51
Figura 32 – Resultado do teste para verificação da maior temperatura obtida no anteparo.....	51
Figura 33 – Concentrador em operação no dia 27/07/2015. Ao fundo, o céu sem nuvens durante todo o período.....	53
Figura 34 – Comportamento das temperaturas do óleo térmico de trabalho na entrada e saída do absorvedor, e temperatura ambiente.	54
Figura 35 – Comportamento da irradiação solar no período do experimento (27/07/2015).....	56
Figura 36 – Comportamento da curva da irradiação solar durante 24 horas do dia (Dados da cidade de Nicosia-Chipre).	56
Figura 37 – Pontos experimentais da vazão mássica do óleo térmico dada em gramas por minuto no dia 27/07/2015.	58

Figura 38 – Curva da regressão quadrática para vazão volumétrica em mililitros por minuto do experimento do dia 27/07/2015.....	59
Figura 39 – Comparativo entre a vazão mássica e a temperatura média do fluido térmico ao longo do experimento.	59
Figura 40 – Eficiência térmica do sistema concentrador solar proposto.....	60
Figura 41 – Gráfico que permite a comparação entre a eficiência térmica do sistema e a potência útil extraída da irradiação solar incidente.	62
Figura 42 — Curvas da irradiação solar obtida através de cálculos empíricos propostos por Hottel (1976) e Liu e Jordan (1960).....	64
Figura 43 – Curvas da irradiação solar global obtida pelo IPMET comparada com as curvas da irradiação global e direta normal obtidas através de equacionamentos empíricos.....	65
Figura 44 – Eficiência térmica do sistema concentrador solar proposto, com a utilização da irradiação solar direta normal calculada empiricamente.....	67
Figura 45 – Comparação entre as eficiências calculadas com irradiações obtidas experimentalmente e empiricamente.....	68
Figura 46 – Temperatura média do óleo térmico no absorvedor (foco).	69
Figura 47 – Comparação entre a irradiação solar direta normal empírica (equações) e experimental (solarímetro).....	70
Figura 48 – Gráfico que permite a comparação entre a eficiência térmica dos sistema e a potência útil extraída da radiação solar incidente.....	71
Figura 49 – Absorvedor recebendo a radiação solar concentrada.	72
Figura II. 1 – Gráfico da irradiação global obtido no site do IPMET	86
Figura II. 2 – Resultado da aplicação do algoritmo para obtenção da curva da irradiação solar global.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das principais características dos concentradores de energia solar voltados para geração de energia elétrica.	6
Tabela 2 - Característica Principais do Sensor DS18B20.	34
Tabela 3 – Comparativo entre os preços do cobre e do alumínio.	39
Tabela 4 – Eficiência térmica para cada período do experimento.....	63
Tabela I. 1 - Tabela para correção quanto ao tipo de clima.....	81
Tabela III. 1- Dados do programa Radiasol.....	88

NOMENCLATURA

A_a	área de abertura do coletor.
A_{abs}	área do absorvedor.
a_0^*, a_1^*, k^*	constantes para cálculo da equação da irradiação direta.
a_0, a_1 e k	constantes para cálculo da equação da irradiação direta.
C	taxa de concentração solar.
c_{med}	calor específico médio.
E_{sist}	energia total no volume de controle.
\dot{E}_e	taxa de energia que entra no volume de controle.
\dot{E}_s	taxa de energia que sai do volume de controle.
ε_{abs}	eficiência térmica do absorvedor.
G	irradiação global (W/m^2).
G_{cnb}	a irradiação normal para dias ensolarados.
G_{on}	irradiação solar extraterrena normal à Terra.
G_{SC}	constante solar, igual a $1367 W/m^2$.
g	gramas.
h_e	entalpia de entrada.
h_s	entalpia de saída.
I	radiação solar incidente (W).

I_{cb}	irradiação direta normal horária.
I_{on}	irradiação solar horária extraterrena normal à Terra.
\dot{m}_e	taxa de massa que entra no volume de controle.
\dot{m}_s	taxa de massa que sai do volume de controle.
m	metros.
min	minutos.
n	dia do ano.
\dot{Q}_e	taxa de calor que entra no volume de controle.
\dot{Q}_s	taxa de calor que sai do volume de controle.
\dot{Q}_u	taxa de calor útil.
T_{ent}	temperatura de entrada do fluido.
T_{sai}	temperatura de saída do fluido.
W	Watt.
\dot{W}_e	taxa de trabalho exercido sobre o volume de controle.
\dot{W}_s	taxa de trabalho realizado pelo volume de controle.
α	altitude solar.
δ	declinação solar.
φ	latitude local.
ω	hora-ângulo.
τ_d	transmitância da irradiação difusa.
τ_b	transmitância da irradiação direta normal.
θ	composto pela entalpia (h), pela energia potencial e pela energia cinética.

θ_z ângulo zenital.

°C graus Celsius.

ABREVIATÓES

AST hora solar aparente.

DS horário de verão.

E equação do tempo.

IPMET Instituto de Pesquisas Meteorológicas.

I2C Inter-Integrated Circuit – protocolo de comunicação.

LST hora local.

LL longitude local.

SL longitude padrão.

PWM *Pulse-Width Modulation* – modulação por largura de pulso.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Potencial da Energia Solar no Mundo

Segundo estudo da IEA (International Energy Agency) (2010), haverá aumento significativo da demanda energética no mundo até 2050. Este relatório projetou diversos cenários possíveis entre os anos de 2007 e 2050. Em um cenário mais conservador, previu-se que o consumo de energia primária no mundo crescerá até 84% neste período. Entretanto, esse mesmo cenário prevê que o uso da energia fóssil crescerá em um ritmo muito lento, enquanto que a energia nuclear e as renováveis apresentarão crescimento elevado neste período.

Em um cenário mais positivo (*"Blue Map Scenario"*), ainda segundo a IEA, o crescimento do uso da energia solar, segundo o relatório citado, pode ser observado através da Figura 1. Constata-se que a energia solar, gerada através de painéis fotovoltaicos ou através da concentração da energia, apresenta expressivo crescimento, destacando-se, juntamente com a energia eólica. A participação das energias renováveis, segundo esta previsão chegará a 48% da matriz energética mundial em 2050.

Para se ter uma dimensão da importância da energia solar no cotidiano da humanidade, é necessário saber que o Sol fornece à Terra impressionantes 120.000 TW de potência. Isso significa que uma hora de incidência solar, supre toda a quantidade de energia utilizada no Planeta durante um ano. Nenhuma outra fonte fornece essa quantidade de energia de forma incessante e espontânea (MORTON, 2006).

Para a geração de energia elétrica em grande escala, os sistemas de concentração solar apresentam, até o momento, vantagens sobre instalações constituídas por placas fotovoltaicas, por possuírem uma tecnologia mais desenvolvida. Além disso, os sistemas de concentração podem armazenar energia em reservatórios, o que permite a geração contínua de energia, mesmo durante períodos nublados (HOLBERT; HAVERKAMP, 2009). Estados

Unidos e Espanha já utilizam há muito tempo estas tecnologias de concentração para produção de energia elétrica, embora os custos de geração ainda possam diminuir.

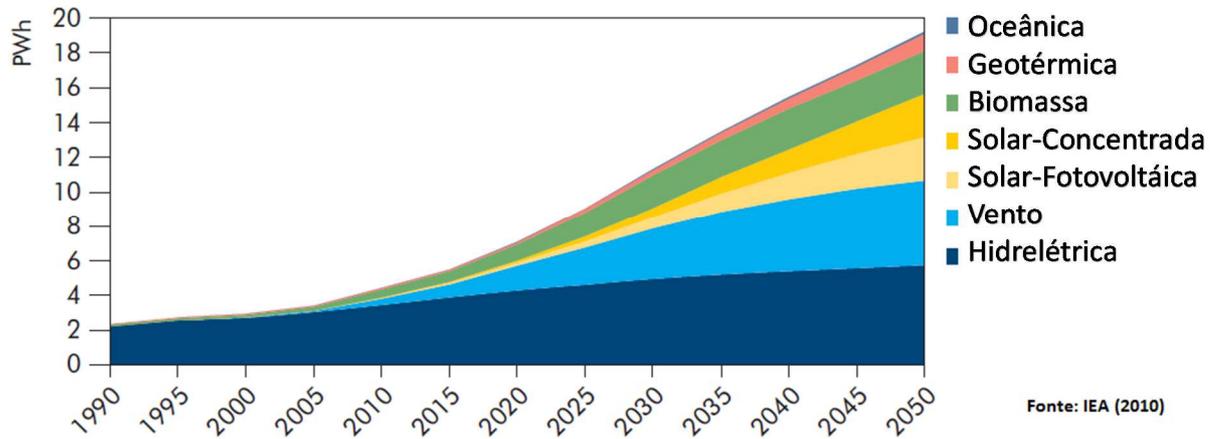


Figura 1 – Crescimento da geração de energia elétrica através de fontes renováveis no cenário mais otimista.

1.2 Objetivos

Este trabalho pretende apresentar o projeto de construção e funcionamento de um sistema concentrador solar para produção de calor a altas temperaturas para utilização em processos térmicos do cotidiano industrial e comercial.

Desta forma, um protótipo termo-eletrônico foi desenvolvido respeitando os princípios de funcionamento de um concentrador. Para tanto, foi necessário construir um sistema de posicionamento em relação ao Sol com movimentação em dois eixos independentes. Tudo isso para que os raios do Sol pudessem ser concentrados em um único ponto (foco) e permitir variações elevadas na temperatura do fluido.

1.3 Problema a Ser Estudado

Sistemas de concentração solar são utilizados em algumas termelétricas ao redor do mundo. Excetuando as usinas concentradoras instaladas nos desertos dos Estados Unidos (Nevada, p.ex.), as demais foram construídas em locais cuja insolação anual é bem menor que a obtida na maioria do território brasileiro. Para exemplificar isso, cita-se a instalação da planta térmica baseada em energia concentrada instalada em Almería, na Espanha. Assim, se funciona em locais pouco favoráveis como na Europa, conseqüentemente, é possível a operação de uma usina de concentração solar aqui no Brasil.

Um país como o Brasil, cuja insolação é notória, precisa estimular o desenvolvimento de empreendimentos para concentração solar, seja para produção de energia elétrica ou térmica. Infelizmente, a cultura de investimento no uso do petróleo é muito mais forte. Além disso, a matriz energética brasileira predominantemente hidrelétrica (e farta no passado), gerou hábitos reprováveis de consumo. O uso de chuveiros elétricos é uma dessas heranças presentes até hoje nos lares brasileiros. Hipótese impensável em países mais desenvolvidos.

Diante disso, fica difícil explicar de que forma o petróleo, que deve ser retirado do fundo do mar (à 7000 metros da superfície), que exige tecnologia de última geração (e portanto, de alto custo como plataformas, sondas e entre outros), que deve ser transportado até o continente, que deve ser refinado (processos complexos e dispendiosos), que precisa ser distribuído por inúmeros atravessadores e cada um deles pagando altos e cumulativos impostos, ou seja, um produto que passa por todos estes procedimentos e impedimentos não pode ser mais atrativo que a energia solar.

A energia solar é gratuita e está disponível em diversas partes do planeta exigindo equipamentos muito mais simples quando comparada à estrutura de extração de petróleo do pré-sal.

Este tipo de questionamento, motivou o desenvolvimento deste trabalho, no sentido de acrescentar mais um pequena contribuição na área da produção da energia solar concentrada, demonstrando a possibilidade de geração de energia térmica a temperaturas elevadas.

Um dos grandes obstáculos na construção e funcionamento dos concentradores está no desenvolvimento de um bom equipamento de rastreamento solar, bem como um algoritmo que traga precisão durante sua operação, independentemente do nível de insolação no momento.

1.4 Metodologia

Com o sistema concentrador construído, foi possível executar os testes para concentração da energia solar. Vários parâmetros foram monitorados nestes ensaios, tais como as temperaturas de entrada e de saída do fluido no absorvedor, a temperatura ambiente, a vazão mássica do fluido térmico que escoar no interior do absorvedor, bem como a irradiação solar durante os testes.

Um outro tipo de ensaio foi conduzido para verificar a temperatura de estagnação do sistema, que é a busca da temperatura máxima obtida no absorvedor quando não há circulação de fluido no seu interior. Esse parâmetro é uma medida que caracteriza e classifica este tipo de equipamento.

1.5 Resultados Esperados

A partir dos dados fornecidos pelos diversos instrumentos de medições, será possível verificar se a construção do conjunto termo-mecânico apresentou funcionamento satisfatório.

O desafio proposto neste trabalho é construir um sistema de posicionamento solar que possa se movimentar com precisão, utilizando dispositivos eletrônicos de mecânicos de baixo custo.

Espera-se obter elevadas temperaturas nos testes de estagnação, e eficiência térmica relativamente alta nos testes com escoamento de fluido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concentradores Parabólicos

Coletores de energia solar são dispositivos trocadores de calor que tem por função transformar a irradiação solar em energia térmica para o uso em processos térmicos e também para geração de energia elétrica. Entretanto para que essa energia possa ser utilizada, a mesma deve ser transferida do sistema concentrador/absorvedor para o local onde realizará sua função, seja de aquecimento, de geração de potência e/ou até de armazenamento (BARLEV; VIDU; STROEVE, 2011).

O transporte dessa energia é realizado pelos fluidos térmicos (conhecido como HTF – Heat Transfer Fluid), cuja característica pode ser selecionada conforme sua aplicação. Pode ser desde água (pressurizada ou não, a depender da temperatura de operação), até substâncias como óleos sintéticos e sais fundidos, que suportam elevadas temperaturas da ordem de 300 a 800°C.

A produção de energia térmica a altas temperaturas a partir da luz solar exige equipamentos de concentração dos raios solar, cujos principais componentes são refletores e absorvedores, os quais são os responsáveis pela energia solar coletada.

São basicamente dois tipos de configurações para os referidos concentradores: os que apresentam foco distribuído linearmente e os que possuem foco em um único ponto.

O concentrador com foco pontual (objeto deste estudo), também conhecido como “parabolic dish”, é o tipo de concentrador que atinge as maiores temperaturas para áreas de reflexões iguais. Uma de suas grandes vantagens é a de não apresentar as perdas conhecidas como “perdas pelo cosseno”, uma vez que este sistema utiliza rastreadores de alinhamento com o Sol durante todo o período diurno. As altas temperaturas atingidas por este sistema resultam em maior eficiência e maior captação de energia ao longo do ano (KAUSHIKA; REDDY, 2000).

Uma forma muito utilizada neste sistema é acoplar um motor Stirling no absorvedor de forma a produzir energia elétrica, diretamente do Sol, com eficiência de conversão energética entre 25 a 30% (UMMADISINGU; SONI, 2011). Muitos protótipos deste equipamento operaram com sucesso por mais de uma década, com potências variando entre 10 kW, 25 kW e a maior entre todas, 100 kW, conhecida como “big dish” instalada na Australian National University (MÜLLER-STEINHAGEN; TRIEB, 2004).

Uma comparação entre concentradores cilíndrico parabólicos, Fresnel linear, torre solar e parabólicos (Solar Dish) mostrou que este último possui muitas vantagens em relação aos seus pares (Tabela 1). A taxa de concentração (C) fornecida por um Solar Dish pode alcançar 3000, enquanto que um Fresnel atinge, no máximo, 100. A capacidade de geração de energia por equipamento (solar dish) é menor entre as demais, e o custo da energia elétrica produzida é alto pois utiliza o Motor Stirling. Porém, sua eficiência chega a 30%, o dobro e o triplo em relação aos sistemas cilíndrico parabólicos e o sistema Fresnel linear, respectivamente (UMMADISINGU; SONI, 2011).

Tabela 1 – Comparação das principais características dos concentradores de energia solar voltados para geração de energia elétrica.

	PTC	Fresnel	Torre Solar	Solar Dish
Capacidade (MW)	10–200	10–200	10–200	0.01–0.4
Concentração	70–80	25–100	300–1000	1000–3000
Eficiência Solar-Elétrica – Anual				
Eficiência	15%	8–10%	20–35% (concepts)	25–30%
Custo: capital				
(Dolar/kW)	3972		4000+	12,578
(Dolar/m ²)	424	234	476	
Custo: O e M				
(Dolar/kWhe)	0.012–0.02	Low	0.034	0.21
Área (m ² / MWh Ano)	6–8	4–6	8–12	8–12

Fonte: (UMMADISINGU; SONI, 2011)

2.2 Características de um Concentrador

2.2.1 Temperatura de Estagnação

Um parâmetro de fácil avaliação e que serve para caracterizar um concentrador de energia solar é a temperatura máxima que um absorvedor pode atingir quando nenhum tipo de fluido térmico está removendo energia útil do sistema. Assim, Kaushika e Reddy (2000), definem a temperatura de estagnação como sendo a temperatura de equilíbrio do absorvedor a uma dada incidência solar constante.

No sistema de concentração baseado em refletores parabólicos (caracterizados pelo direcionamento dos raios incidentes em um foco pontual) a concentração atinge as maiores temperaturas entre todos os demais tipos de concentradores.

Interessante observar que temperaturas da ordem de 600°C podem ser obtidas em parábolas relativamente pequenas, com abertura medindo em torno de 0,60 m. Com a produção de energia térmica gerada a temperaturas elevadas, estes equipamentos podem ser empregados nas mais diversas áreas, incluindo a fundição de metais.

Foi o que propôs Alami (2013) ao estudar o uso da concentração solar em uma parábola para perfuração de alumínio. Utilizando uma parábola com diâmetro de 1,2 m de abertura, conseguiu uma taxa de concentração (C) da ordem de 3000, o que permitiu atingir a temperatura focal máxima de 824°C (Figura 2). Este estudo demonstrou que são necessários somente 4,7 segundos para perfurar uma amostra de alumínio, o que torna esse processo tão eficiente quanto o método convencional por pulso a laser.



Fonte: ALAMI, 2013

Figura 2 – (a) Amostra de alumínio antes e depois da fundição pela concentração da luz solar. (b) Parábola utilizada para produzir a fundição à 824°C.

2.3 Tipos de Concentradores Pontuais

Dentro dos formatos de concentradores parabólicos, pode-se ainda classificá-los em dois tipos: Convencionais e OFFSET.

A parabólica convencional tem seu foco centralizado no plano de abertura e sua projeção sobre a superfície do refletor recai exatamente no centro focal.

Por outro lado, uma parabólica Offset tem como principal característica o foco deslocado do eixo central, pois o refletor é um segmento de um parabolóide assimétrico. Este modelo é muito utilizado em sistemas de comunicações por satélite, pois ao deslocar o ponto focal para uma área externa ao plano de abertura, evita que o absorvedor e sua estrutura de apoio façam sombra sobre o concentrador, o que diminui sua eficiência de captação, tanto de ondas de radiofrequência, como de luz solar, que é o caso deste estudo (WADE; ANTENNAS, [s.d.]).

As Figs. 3 e 4, ilustram o deslocamento do foco posicionado fora da área do feixe de raios incidentes, geralmente abaixo da borda inferior do concentrador. Assim, o foco do

sistema fica inclinado em relação ao plano de abertura da parábola, permitindo a passagem livre da irradiação solar.

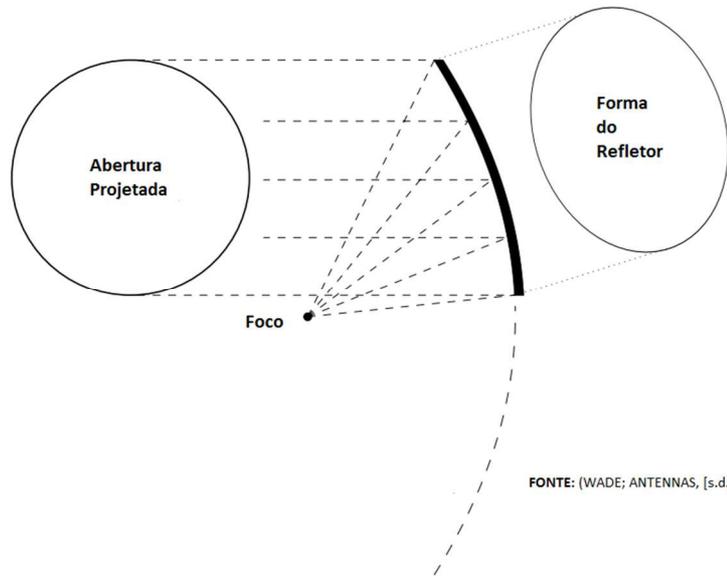


Figura 3 – O refletor Off-set é um segmento de um parabolóide.

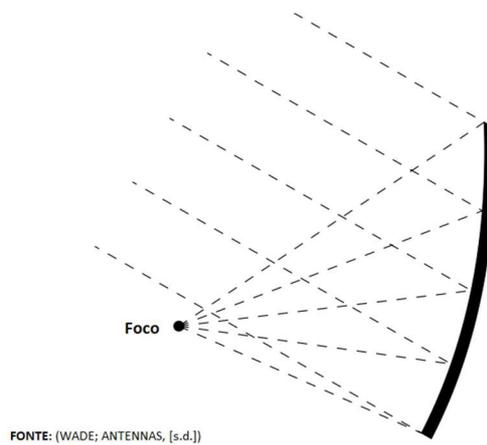


Figura 4 – Posicionamento do foco em um refletor Off-set.

2.4 Materiais Refletivos

A superfície refletora, em sistemas de concentração solar, é peça-chave e determinante na caracterização da eficiência do equipamento, pois a mesma é responsável pelo primeiro “contato do Sol” com o sistema. E a refletividade, parâmetro físico que determina a relação entre a luz incidente e a refletida, é tão importante quanto a durabilidade do material, uma vez que, a vida útil da superfície tem relevante impacto no custo-benefício do sistema (BARLEV; VIDU; STROEVE, 2011).

A fim de avaliar a vida útil de diversos materiais refletores, Kennedy e Terwilliger (2004) avaliaram 4 tipos de materiais, submetendo-os a intenso processo de aceleração das condições ambientais, tais como elevada incidência de raios ultravioletas, simulação de desgaste por água e abrasivos, bem como variações de temperatura. Os resultados obtidos após os testes laboratoriais podem ser resumidos da seguinte forma:

- Vidro espesso: Trata-se do processo convencional de produção de espelhos em que uma camada de prata é depositada na superfície de um vidro (espessura > 1 mm), seguido por uma camada de cobre, cuja função é proteger a prata. Ao final, uma camada de tinta protetora é aplicada na parte traseira com a finalidade de proteção das camadas anteriores, evitando a oxidação dos materiais nobres. Possui refletividade de 93% e grande resistência à intempéries. Porém, a rigidez do material dificulta a produção de peças curvas, necessárias em sistemas parabólicos. No geral, os testes mostraram a grande resistência e durabilidade deste material, porém observou-se que houve degradação precoce da camada refletiva de um determinado fabricante.
- Vidro com espessura reduzida (< 1mm): Sua produção é a mesma do material anterior, porém a espessura do vidro que serve de substrato é menor que seu par. É muito utilizado na atividade de concentração solar (refletividade de 93 a 96%), sendo confiável e leve. Porém sua pequena espessura o torna muito frágil e requer muito cuidado tanto na instalação, como na manutenção. Este material apresentou corrosão em suas bordas após dois anos de testes com aceleração das intempéries.

- Refletor Aluminizado: Baseia-se em avançado processo de polimento da face frontal de uma folha de alumínio, alcançando refletividade de até 90%. Essa superfície conta ainda com a proteção formada pela camada de óxido de alumínio (Alumina), decorrente da oxidação natural do material. Este material destaca-se pelo baixo custo, pouco peso e maleabilidade. Para aumentar a proteção superficial contra intempéries, alguns fabricantes recobriram a parte refletora com uma lâmina de polímero de alta resistência. Embora tenha aumentado a vida útil deste material, essa proteção não resistiu aos testes acelerados, apresentando descolamento desta lâmina protetora.
- Polímeros Espelhados: São lâminas de polímeros que possuem alta refletividade (até 94,5%), apresentando baixo peso para a estrutura e alta flexibilidade. O processo de fabricação é semelhante à produção de espelhos de vidro, porém o material de base é substituído por um polímero de alta resistência (PMMA – Poli Metilmetacrilato). Este acrílico apresentou excelente estabilidade às intempéries ambientais, excelentes propriedades ópticas, proteção adequada à camada de prata e a facilidade para extrusão em espessuras muito finas. Os testes acelerados concluíram pela grande durabilidade deste filme, mantendo as propriedades ópticas mesmo após 10 anos.

A curvatura características dos sistemas parabólicos dificulta e adequação de materiais que possuam alta refletividade e baixa distorção. Ainda assim, existem parábolas de pequeno porte que são oferecidas no mercado. Porém, seu custo muito elevado e suas dimensões reduzidas impedem sua aplicação em sistemas que requeiram maior quantidade de energia. Além disso, existem casos que a superfície refletora de vidro sofreu trincas quando expostas ao intenso frio (PALAVRAS; BAKOS, 2006).

LOVEGROVE et al. (2003), no estudo de um dos primeiros equipamentos parabólicos (Solar Dish), construído na Universidade Nacional da Austrália (em 1994), observaram que o concentrador, que era inicialmente provido com superfície de vidro espelhado, apresentou deterioração com o tempo de uso. Segundo o estudo, isso ocorreu pela reação química entre a espuma de fixação dos espelhos e a tinta de proteção da liga de prata (responsável pelo

fenômeno da reflexão). Isso resultou em corrosão da superfície espelhada e a perda de algumas placas do concentrador. Assim, os autores propuseram um novo tipo de material mais resistente às intempéries. O novo material (GOML – “Glass on Metal Laminate”) consistia na aplicação de uma camada de prata em uma superfície de vidro com espessura muito fina e, por fim, aderida a uma chapa de aço galvanizado em sua parte posterior. Os testes de aceleração realizados com este material apresentaram resultados satisfatórios de durabilidade.

Palavras e Bakos (2006), construíram um concentrador parabólico para adsorção de Zeolite, em que avaliaram três materiais refletivos para a parábola. O vidro curvado e espelhado foi descartado pelas razões citadas. O Alumínio polido, com refletividade entre 0,8 e 0,9, também foi considerado, porém este material precisa ser recoberto com uma camada de proteção contra intempéries (anodização). Ocorre que o alumínio anodizado apresenta deformação superficial causando distorção entre os raios incidentes e os refletidos. Os autores optaram então pelo filme de alta reflexão (produzido em polímero) que apresenta excelente refletividade (0,95) e além de ser material leve, o que beneficia o sistema de movimentação do sistema.

Fernandes-Garcia (2014), estudaram a degradação de materiais submetidos a reflexão em concentradores secundários, cuja função é a de concentrar novamente raios recebidos de um concentrador primário. A comparação realizada pelos autores revelou que tanto o alumínio polido como o vidro espelhado apresentam vantagens e desvantagens que dependerão do projeto. O alumínio teve bom desempenho de ductibilidade durante a exposição a altas temperaturas, porém seu índice de reflexão é menor que o vidro espelhado. Este último, por sua vez, apresentou degradação da proteção prateada do espelho, ocorrendo oxidação do material nas bordas expostas.

2.5 Rastreador Solar

O rastreador solar (Tracker) é o mecanismo eletromecânico responsável por posicionar um objeto (um concentrador, uma placa de captação fotovoltaica, ou mesmo um coletor plano), de forma que a incidência dos raios solares permaneçam perpendiculares à superfície desejada.

A presença de um posicionador automático não é necessário em sistemas coletores planos, mas seu emprego potencializa a captação de energia refletindo em maior rendimento do sistema. Entretanto, alguns parâmetros devem ser observados para que este mecanismo justifique a instalação, tais como custo, energia consumida, manutenção e eficiência do sistema como um todo. Em alguns casos de coletores planos e fotovoltaicos que sejam pequenos, a instalação do rastreador pode ser desvantajoso devido aos parâmetros citados, principalmente em relação aos custos de aquisição e manutenção. (MOUSAZADEH et al., 2009)

No caso de sistemas de concentração solar, seu uso é imprescindível, podendo ser de um ou mais eixos móveis. Concentradores cilíndrico parabólicos utilizam rastreadores com um único eixo móvel, uma vez que, o foco deste sistema é linear. Já os concentradores puramente parabólicos, em que o foco é pontual, o rastreador deve ser necessariamente de dois eixos, permitindo movimentos tridimensionais.

O mecanismo composto por dois eixos, objeto da aplicação neste estudo, tem movimentos simultâneos em ambos os eixos que permitem posicionar o plano da abertura da parábola perpendicularmente à incidência dos raios do Sol.

2.6 Rastreadores Passivos

Embora muito pouco utilizados na prática, os rastreadores passivos possuem a vantagem de não utilizar energia elétrica para movimentar o sistema. Para isso baseiam-se

em dois fenômenos físicos para deslocar o equipamento. São eles a memória de forma e o efeito da expansão térmica.

Clifford e Eastwood (2004) propuseram um sistema passivo baseado na expansão térmica do alumínio e aço. Trata-se de um elemento bimetálico, semelhante ao utilizado nos disjuntores elétricos comuns. Dois destes elementos foram posicionado no eixo central do equipamento (Figura 5), quando estão na posição de alinhamento com o Sol, ambos são sombreados. Com o movimento da Terra, a sombra se desloca e os raios incidem unicamente sobre o elemento de alumínio, aquecendo e deformando o mesmo. Ocorre que, junto a este metal existe uma massa fixada exatamente no seu centro, de forma que, com a expansão térmica, essa massa se desloca em relação ao eixo, gerando um momento, que move o sistema até encontrar o novo ponto de equilíbrio. Segundo os autores, esta inovação trouxe um aumento de até 23% no rendimento térmico do sistema em relação a um sistema sem rastreador.



Figura 5 – Sistema de rastreamento solar passivo utilizando elemento bimetálico.

Um outro tipo de atuador passivo utiliza ligas que possuem memória de forma conhecido como SMA (Shape Memory Alloy). Este tipo de liga pode ser deformado facilmente em temperaturas abaixo de 70°C. Mas quando aquecidas a temperaturas acima da transformação física, sua memória de forma realiza trabalho mecânico que faz o metal voltar à forma original.

Poulek (1994) desenvolveu e testou um rastreador baseado neste conceito físico. Utilizando a liga de Níquel-Alumínio-Cobre obteve um movimento de até 124° o que é suficiente para cobrir grande parte do movimento solar diário. O experimento possuía dois tubos produzidos com a referida liga, e ambos possuíam cortes longitudinais que permitiam a deformação (Figura 6). Cada um dos tubos se estendiam de uma extremidade à outra do eixo.

Uma lente concentrava os raios em um espelho posicionado no centro entre os dois tubos, enquanto o sistema estivesse alinhado com o Sol. Conforme os raios do Sol se moviam, estes eram direcionados para um dos lados, atingindo e aquecendo a liga. Assim, a parte deste material (que atingiu temperatura acima da transformação) voltava à sua forma original realizando trabalho no eixo do rastreador. Conseqüentemente, restabelecia-se o equilíbrio do sistema com os raios sendo direcionados para o centro do eixo.

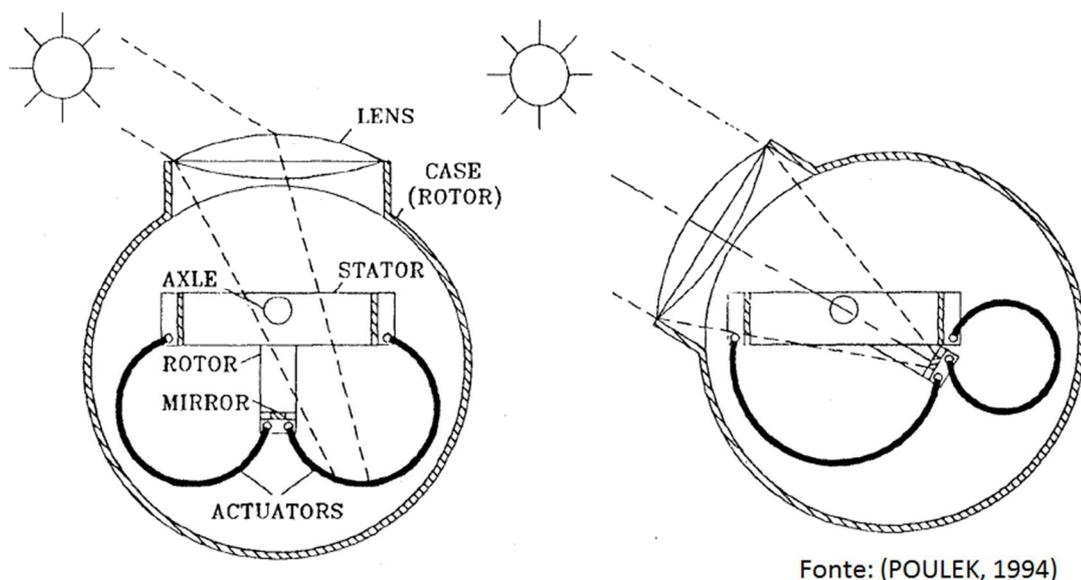


Figura 6 – Sistema de posicionamento passivo que utiliza a memória de forma de ligas especiais.

A desvantagem deste sistema é que a estrutura do atuador tem que ser muito robusta para suportar a movimentação do equipamento em dias de ventos fortes. Assim a estrutura constituída pela liga de memória de forma deve ser suficiente para gerar o torque necessário, porém os elevados custos deste material tornam o projeto caro, inviabilizando sua construção.

Existe ainda um outro sistema de movimentação passiva baseado no deslocamento do gás Freon. Um tubo contendo este gás recebe a energia da luz solar, quando o equipamento

está desalinhado. A expansão térmica do gás move um pistão que permite o alinhamento do equipamento com o Sol. Em outros mecanismos, o gás que evapora passa para uma câmara oposta deslocando a massa e o centro de gravidade do equipamento, alinhando o sistema com o Sol (ROTH; GEORGIEV; BOUDINOV, 2005).

2.7 Rastreadores Ativos

Rastreadores ativos são aqueles que possuem alguma forma de controle eletromecânico que permitem o alinhamento do sistema com o Sol, utilizando atuadores mecânicos, comandados ou não eletronicamente por sensores.

A grande maioria dos atuadores são movidos por um motor elétrico. Mas também existem mecanismos de movimentação essencialmente hidráulicos. Um dos primeiros protótipos de concentradores parabólicos que utilizou este mecanismo foi o “ANU” (Australian National University) que utilizava um sistema hidráulico pressurizado a 12 MPa para movimentar um conjunto de pistões. Esse sistema contava com uma trava nos eixos que fixava o sistema na posição desejada após a movimentação dos pistões, garantindo assim que a estrutura não deslocasse da posição correta (LOVEGROVE et al., 2003).

Segundo Roth, Georgiev e Boudinov (2005) existem dois subtipos de rastreadores ativos, os eletro-ópticos e os microprocessados.

Os rastreadores eletro-ópticos utilizam sensores (foto-resistores) que quando sombreados reagem eletronicamente ativando os atuadores para alcançar o novo alinhamento. Este tipo de configuração apresenta bons resultados, porém não funcionam em dias nublados, já que a luminosidade difusa do ambiente não permite que os foto-resistores diferenciem a direção da luz Solar.

Para isso, sensores fotossensíveis (LDR - Light Dependence Resistor) são instalados no interior de um tubo enegrecido, distribuídos uniformemente em sua base. Este conjunto de sensores é instalado no plano de incidência desejado (plano da abertura da parábola). Assim, quando os raios do Sol incidirem sobre todos os sensores de forma idêntica, tem-se aí o completo alinhamento do sistema de rastreamento com o Sol.

Já os rastreadores microprocessados, são aqueles em que a posição do equipamento em relação ao Sol é definida por equações matemáticas que descrevem o movimento do Sol sobre a Terra. Este sistema pode conter foto-sensores para calibração da posição do rastreador, permitindo a correção da localização em tempo real. Este tipo de posicionador é o mais preciso entre todos, porém sua instalação requer muita precisão no momento da sua instalação.

Muitas empresas já produzem sistemas de rastreamento extremamente precisos como é o caso da Siemens, cujo equipamento chega a uma precisão angular de $0,05^\circ$ (PRINSLOO; DOBSON; SCHREVE, 2014).

Embora os atuais estudos se concentrem-se em produzir um equipamento de grande precisão de posicionamento, existem afirmações contrárias. A fabricante Helmholtz afirma que um equipamento que apresente precisão de até 10° ainda assim possui eficiência de 98,5% daquela atingida por um rastreador de máxima precisão (TRACSTAR, 2007).

Abdallah e Badran (2008), em recente estudo de um destilador solar para água, mostraram que o sistema de rastreamento solar tem significativa influência sobre a eficiência térmica do processo de destilação. Conforme a Figura 7, a comparação entre o sistema fixo e o sistema posicionado por um mecanismo de rastreamento, demonstrou a superioridade do segundo. O experimento móvel apresentou eficiência 40% maior no período da manhã, em relação ao sistema fixo e 22% superior no período da tarde. Considerando ainda que os autores utilizaram um mecanismo que contém somente um eixo, fica evidente que a eficiência deste sistema se elevaria ainda mais se dois eixos fossem utilizados.

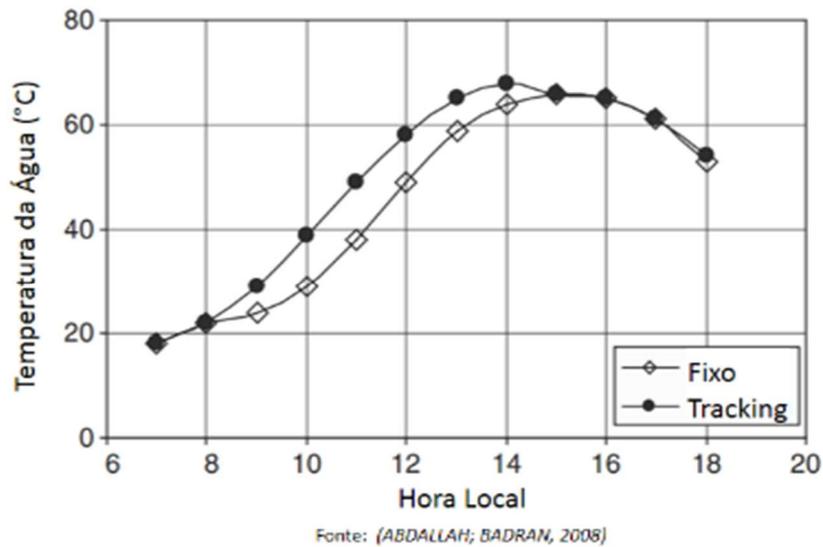


Figura 7 – Comparação entre as temperaturas obtidas em um destilador com e sem rastreamento da luz solar.

Em um estudo comparativo entre sistemas de concentração da energia solar aplicado a placas fotovoltaicas, Sangani e Solanki (2007) demonstraram a superioridade da geração de energia elétrica nos sistemas rastreadores de um e dois eixos, em relação ao sistema fixo. O objetivo do autor foi diminuir o custo da energia produzida. Com o uso de posicionadores o custo da energia caiu de U\$ 7,22 para U\$ 5,88, resultando em uma redução de 24%.

Embora os mecanismos de movimentação sejam muito semelhantes em todos os projetos (atuadores nos dois eixos), o mesmo não acontece com o sistema de sensoriamento da luz solar. A construção de sistemas eletrônicos para rastreamento solar não é única, existindo inúmeras formas de construção para o conjunto de sensores, e cada configuração exige seu próprio algoritmo.

Numayhid, Mrad E Abu-Said (2001) propuseram uma configuração singular que une tanto sensores de luminosidade (LDR) como sensores de temperatura. A ideia era projetar um sensor que se assemelhasse a uma íris de olho humano (Figura 8). Para isso os autores dispuseram 9 sensores de luminosidade em forma circular. No centro destes sensores, posicionou-se um termopar. Assim, a incidência dos raios do sol igualmente sobre todos esses sensores indicaria que o tubo está apontado para o sol. O termopar no centro é utilizado para fazer as correções necessárias do posicionamento, para obtenção do alinhamento completo.

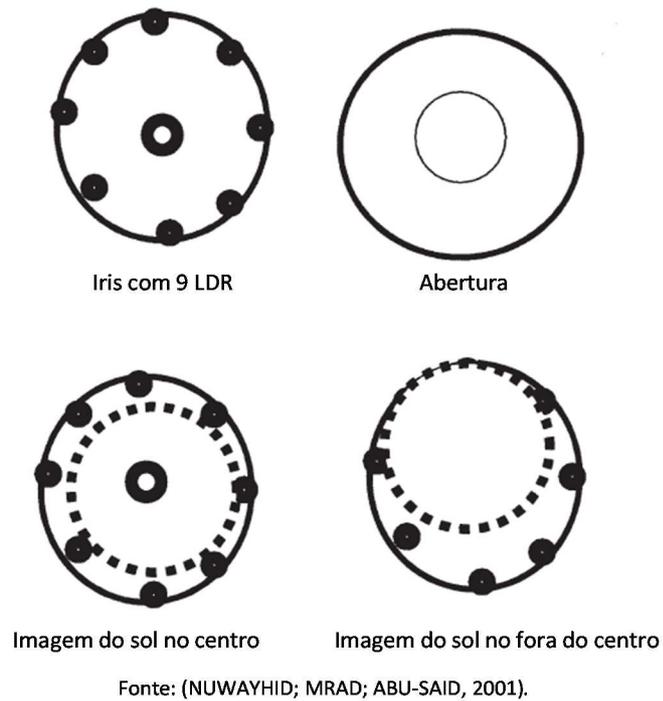
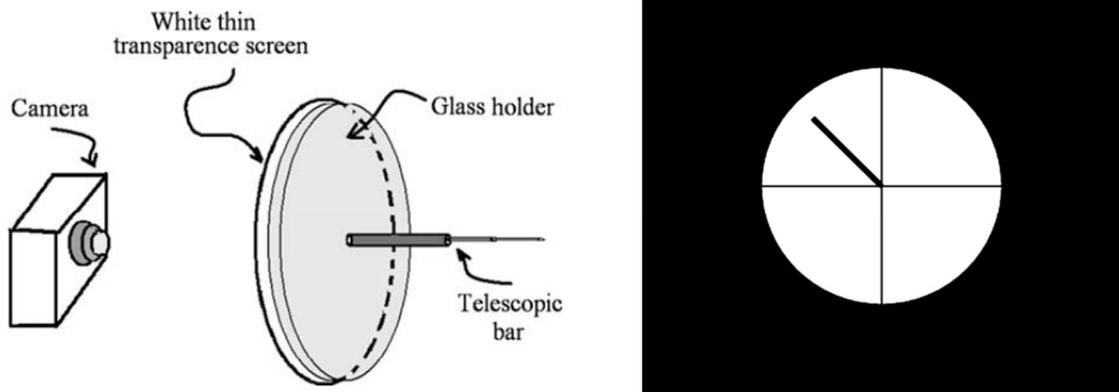


Figura 8 – Sensores para rastreamento em forma de íris.

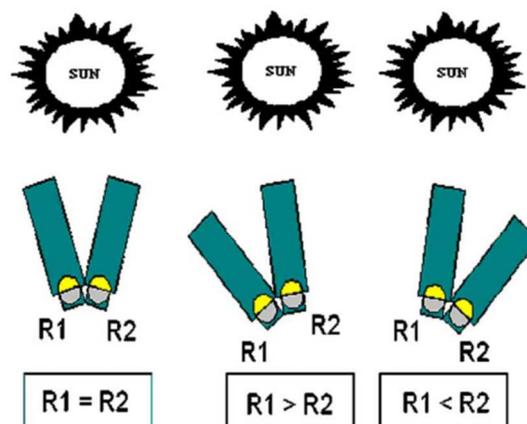
Existem ainda outras formas de rastreamento que não utilizam sensores de luminosidade. Arbab, Jazi e Rezagholizadeh (2009), desenvolveram um protótipo em que o rastreamento foi realizado por imagem da sombra de um anteparo desalinhado com o Sol. Uma câmera, posicionada logo atrás de uma tela transparente, registra a imagem dos quadrantes durante todo o período de rastreamento. Quando o sistema se desalinha com o Sol, a sombra do bastão, colocado concentricamente a um tubo, é projetada na tela. Com isso a imagem é enviada para um software de processamento de imagem que, após cálculos, envia comandos para os atuadores buscar um novo alinhamento (Figura 9).



Fonte: (ARBAB; JAZI; REZAGHOLIZADEH, 2009)

Figura 9 – Rastreamento baseado no processamento de imagens.

Um outro tipo de construção, considerado um dos mais simples, consiste no uso de somente dois sensores de luminosidade (LDR), sendo cada um posicionado no interior de um tubo longo e com paredes enegrecidas (Figura 10). Estes tubos posicionados com uma leve inclinação entre ambos, de forma que, quando o sistema estiver alinhado com o Sol, ambos os sensores receberiam a mesma quantidade de luz. Do contrário, quando em o Sol não está alinhado, um dos sensores acusará maior intensidade de luz em relação ao outro, resultando em um posicionamento do sistema eletrônico (PALAVRAS; BAKOS, 2006).



Fonte: (PALAVRAS; BAKOS, 2006)

Figura 10 – Sensor de luminosidade com dois fotoresistores.

2.8 Estratégias de *Tracking*

Um método diferenciado para rastreamento solar foi proposto por YAO et al. (2014) que otimizaram o movimento dos eixos motores. Neste estudo, o eixo denominado primário, posicionado na direção Leste-Oeste, tem sua posição alterada somente uma vez por dia. Já o eixo secundário, que é perpendicular ao primeiro, move-se durante todo o período de rastreamento. O objetivo dos autores foi desenvolver um posicionador que atendesse tanto aos equipamentos fotovoltaicos (demanda menor precisão) quanto aos sistemas concentradores (demanda máxima precisão). Utilizando esse método onde só um dos motores é acionado durante todo o dia, descobriram que o sistema torna-se mais eficiente, que aquele onde ambos os eixos se movimentam por todo o dia. O balanço de energia (que inclui a energia para movimentação dos motores) resultou em um aumento na eficiência de 23,6% para 31,8%.

2.9 Outras Aplicações do Sistema *Tracking*

Sistemas de concentração parabólico também são aplicados em fornos solar ou fogões solar. Segundo Yettou (2014), o uso da energia solar no preparo de alimentos é uma das mais promissoras vertentes de estudo e pesquisa.

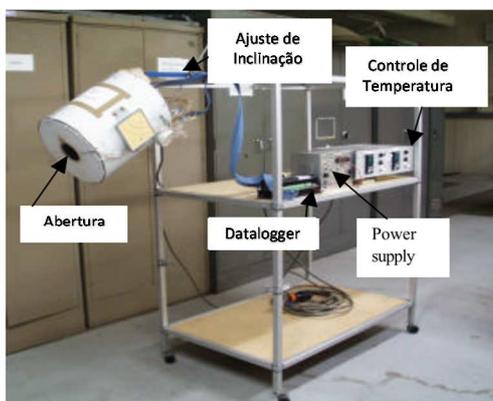
A diferença deste dispositivo é que no foco da parábola, onde se encontra o absorvedor dos sistemas convencionais, posiciona-se um tipo de panela em balanço, de forma que, a energia é concentrada no fundo desta. Badran (2010) desenvolveu um protótipo de fogão solar em que conseguiu ebulição de 7 kg de água (inicialmente a 20°C) em uma hora. Nos primeiros protótipos destes fogões, não havia um rastreador solar, pois este posicionamento era feito manualmente. Mas isso tem mudado, e muitos protótipos já estão equipados com um rastreador, melhorando tanto o manuseio como a eficiência do mecanismo.

Por sua vez, destiladores de água que utilizam a energia solar são dispositivos que demandam grandes áreas de captação para evaporar uma pequena porção de água. E a chave para se obter um aumento de produtividade (eficiência térmica) está na associação deste equipamento com um rastreador solar, permitindo a máxima incidência normal dos raios provenientes do Sol (SIVAKUMAR; GANAPATHY SUNDARAM, 2013).

2.10 Absorvedor

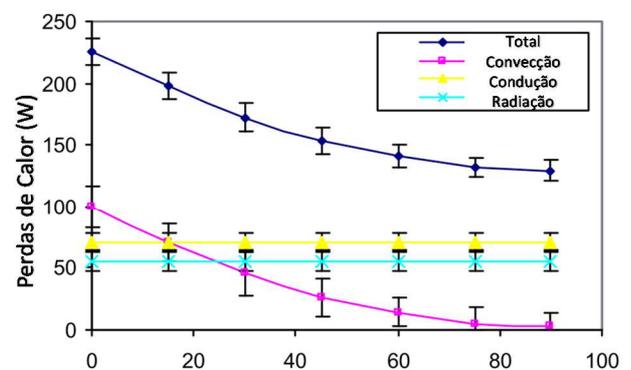
Em sistemas para concentração da energia solar, as perdas térmicas devidas à convecção, condução e radiação causam significativas reduções de rendimento da conversão da energia captada, consequentemente reduzindo o custo benefício do sistema.

Para quantificar a energia perdida por um absorvedor, Lovegrove et al. (2003) construíram um aparato experimental para estudar todas as perdas de calor em um determinado modelo de absorvedor (Figura 11 - a). Os resultados obtidos pelos pesquisadores foram baseados em uma temperatura de operação da ordem de 450°C, cuja Figura 11 – b ilustra o comportamento das perdas de calor por convecção, condução, radiação e total, em relação à inclinação do absorvedor.



(a)

Fonte: Lovegrove et al. (2003)



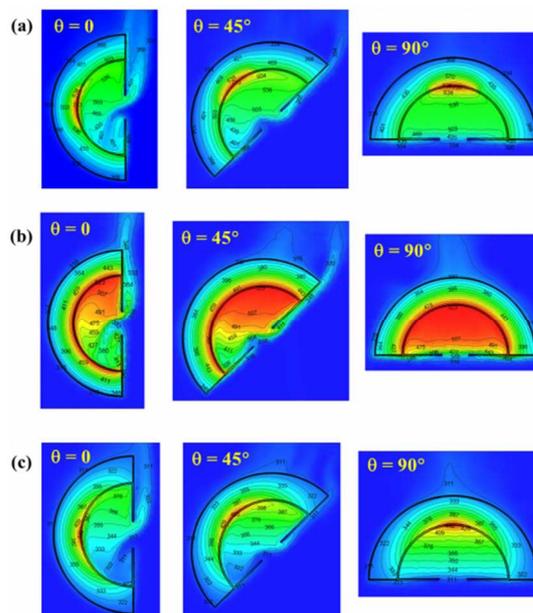
(b)

Figura 11 – (a) Aparato experimental para estudo das perdas térmicas. (b) Resultados experimentais das perdas de calor, por convecção, condução, radiação e a total no absorvedor.

Embora as perdas por condução e radiação sejam constantes, as perdas de calor por convecção são fortemente influenciadas pela inclinação em que se encontra o absorvedor. Além disso a forma do absorvedor influencia diretamente na dinâmica da convecção, por isso os dispositivos de absorção possuem cavidades internas que visam bloquear os movimento convectivos do ar aquecido.

A proteção térmica do absorvedor é essencial para aumentar a eficiência do sistema de concentração. Em estudo sobre a geração direta de energia elétrica através de pastilhas termoelétricas (TEG), Muthu, Shanmugam e Veerappan, (2014), isolaram o absorvedor com acrílico, e observaram que a eficiência global do sistema aumentou 10,75% em relação ao ensaio sem a proteção térmica.

Vikram e Reddy (2015), através de simulação numérica, estudaram as perdas térmicas decorrentes da convecção em um tipo característico de absorvedor modificado, concluindo-se que ao variar sua inclinação entre 0 e 90°, constataram uma diminuição da convecção do ar no interior da cavidade do referido absorvedor (Figura 12).



Fonte: Vikram e Reddy (2015)

Figura 12 – Resultado da simulação numérica para a cavidade de um absorvedor em três diferentes estados. (a) condição de vapor superaquecido, (b) condição de vapor saturado, (c) condição de líquido subresfriado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Concentrador Solar

Para este trabalho construiu-se um concentrador paraboloide do tipo offset, uma vez que, seu ponto focal está deslocado da área de incidência dos raios do sol. Por tratar-se de um experimento de bancada, isto é, de proporções reduzidas, optou-se por utilizar um concentrador parabólico (antena KU) já existente no mercado cujas características são:

- diâmetro de abertura: 0,60 m
- material: aço estampado

Para produzir uma superfície refletora nesta parábola, foram utilizadas lâminas de espelhos de vidro, cada uma possuindo 1 cm² de área (Figura 13), com espessura de 4 mm. Este material espelhado conta com uma proteção adicional de um polímero, cuja função é proteger a camada de prata e cobre, o que permite aumentar sua vida útil de exposição às intempéries.

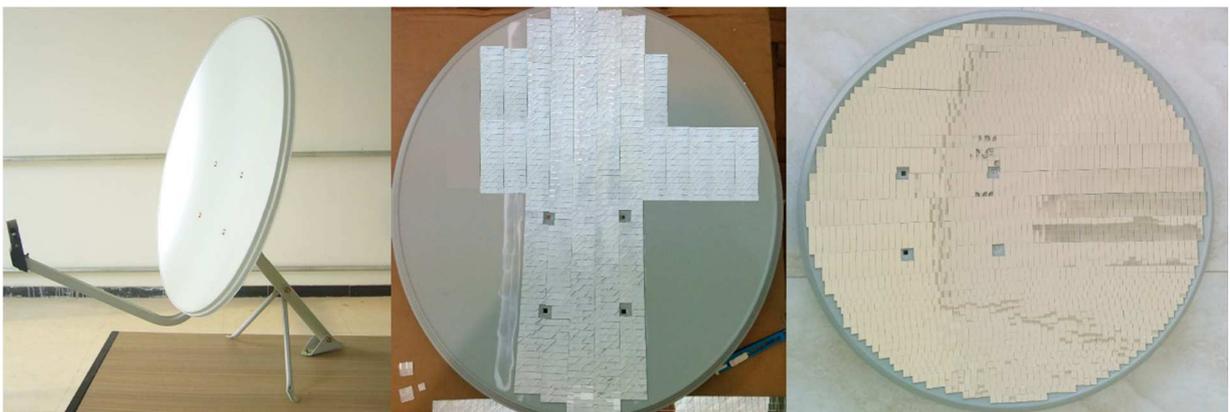


Figura 13 – Superfície parabólica recebendo espelhamento.

A superfície da parábola foi recoberta com micro espelhos utilizando um adesivo líquido à base de polímero, a fim de garantir a fixação mesmo em condições climáticas agressivas.

3.2 Rastreador Solar

O protótipo construído para este trabalho é do tipo elevação-azimute, uma referência quanto ao tipo de movimento que o equipamento realiza para rastrear a posição do Sol. Assim foram desenvolvidos mecanismos de movimentação tanto para o eixo central, que é responsável pela movimentação do ângulo de azimute, como para o eixo superior da parábola, que controla o ângulo de elevação. No caso deste último movimento, o mecanismo mais viável, e que garante precisão no posicionamento, é o atuador linear constituído por um conjunto motor/redutor cujo eixo é acoplado a um fuso. Esses mecanismos para movimentos foram construídos objetivando dois fatores essenciais em projetos: precisão e custos.

3.3 Ponte H

A solução encontrada, após diversas tentativas e adaptações, foi utilizar um motor de corrente contínua acoplado a um pequeno redutor. Entretanto esse conjunto, por si só, não é capaz de garantir precisão necessária à movimentação.

Para controlar esses dois motores que utilizam corrente contínua foi necessário desenvolver duas placa de controle conhecidas como “Ponte H”. Sua função é semelhante a um módulo que permite ao microcontrolador principal comandar a velocidade e a direção do movimento do eixo do motor (Figura 14).

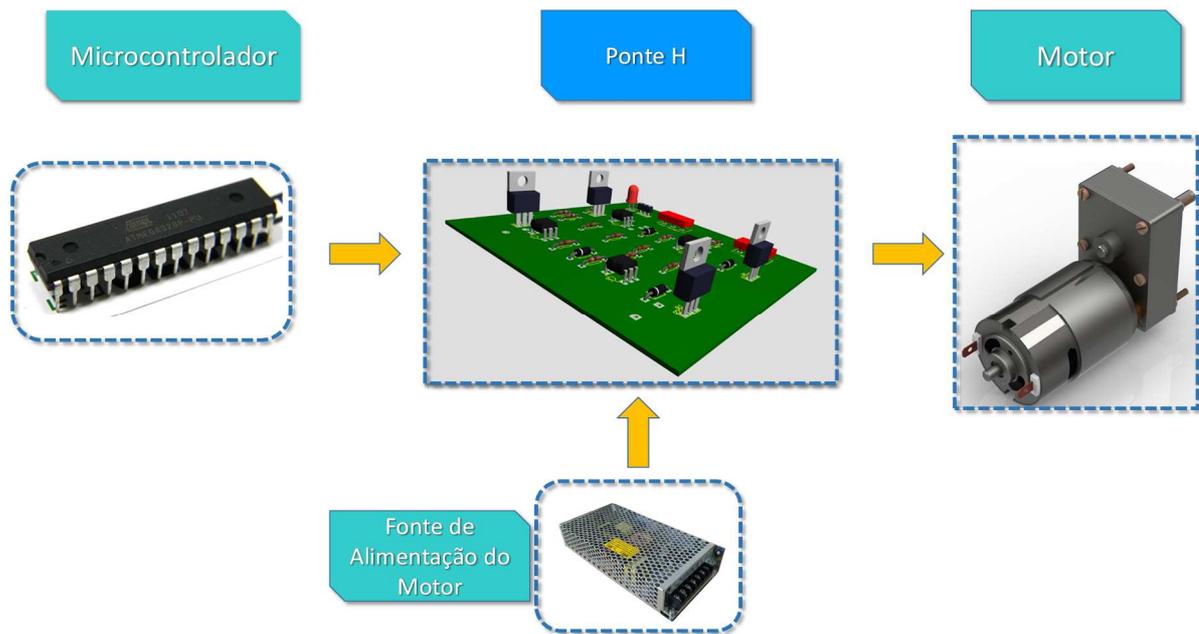


Figura 14 – Ilustração da configuração para o comando do motor de corrente contínua.

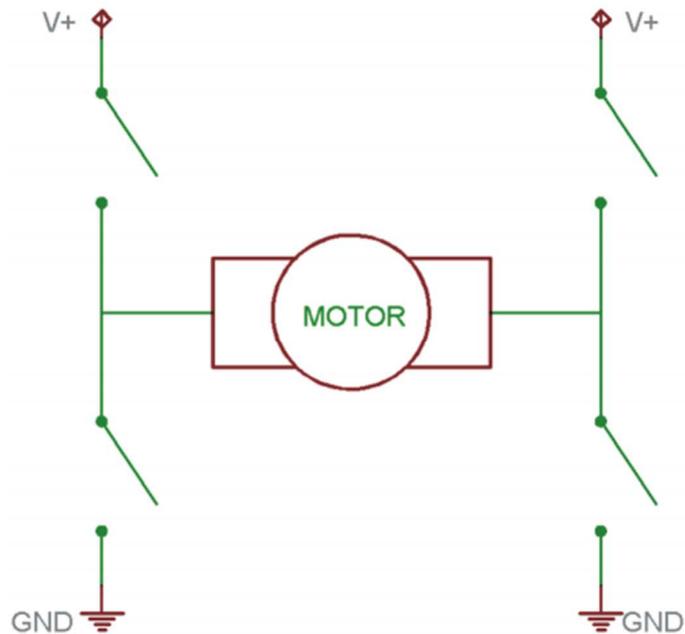
O microcontrolador, responsável pelo controle lógico da movimentação do motor, utiliza baixas tensões e correntes, 5 V e 100 mA, respectivamente, sendo portanto, incapaz de chavear elevadas tensões, tão pouco, as altas correntes, como a deste projeto. Assim, umas das principais funções da Ponte H é o chaveamento de cargas com elevadas correntes, transmitindo alta potência aos motores.

A variação da velocidade de um motor, que trabalha com corrente contínua, é controlada pela intensidade da corrente fornecida ao mesmo. Do mesmo modo, para inverter o sentido de rotação deste motor, deve-se também inverter o sentido da corrente fornecida ao circuito.

Para isso é necessário um mecanismo que amplie a intensidade da corrente e, ao mesmo tempo, tenha capacidade de inversão do seu sentido. Tudo isso é possível através a aplicação dos conceitos da Ponte H (ALCIATORE; HISTAND, 2014).

Uma Ponte H é construída com quatro chaves que permitem direcionar o caminho que a corrente deve percorrer através motor. Essas chaves podem ser mecânicas, em que são utilizados relês, ou eletrônicas, cujos principais componentes são transistores. O nome dado

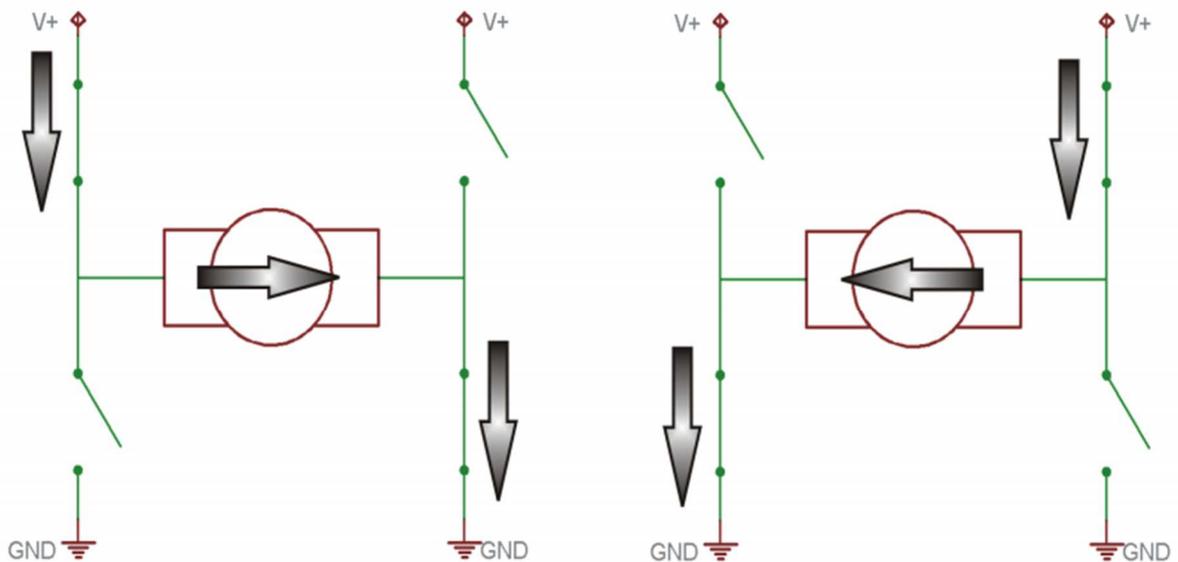
a esta configuração deve-se ao posicionamento das chaves no formato da letra “H”, sendo que cada uma situa-se em um quadrante, cujo centro tem o motor (Figura 15).



Fonte: (PATSKO, 2006)

Figura 15 – Ilustração do funcionamento de uma Ponte H.

Assim, para que o motor funcione girando em uma determinada direção é necessário acionar um par de chaves diagonalmente opostas, permitindo que a corrente saia do polo positivo em direção ao negativo. Da mesma forma, para inverter o sentido de rotação basta desligar estas chaves e ligar o outro par de chaves diagonais. Neste caso o motor será inversamente polarizado, rotacionando no sentido inverso (Figura 16).



Fonte: (PATSKO, 2006)

Figura 16 – Inversão do sentido de rotação conforme o sentido da corrente aplicada ao motor.

A Ponte H apresenta uma característica de grande importância para os movimentos de precisão que é a frenagem do motor, conhecida como frenagem dinâmica. Quando o motor é polarizado para girar em uma dada direção, este adquire um momento circular fazendo com que o rotor continue seu movimento mesmo após cessar a corrente elétrica. E isso prejudica o controle, uma vez que é impossível saber em que posição o motor parou.

Para resolver isso, a Ponte H conta com uma configuração que permite a parada do motor de forma imediata, mantendo-se fixa em determinado ângulo. Isso é possível através da frenagem dinâmica, em que as chaves superiores são fechadas, produzindo um “curto circuito” em um único polo. Como o motor é um componente indutivo, quando os terminais da sua bobina estão ligados em uma mesma tensão, cria-se um campo magnético que impede a movimentação do rotor, pois o campo de forças gerado pelo movimento deste último é contrário ao campo magnético do indutor, freando o motor imediatamente naquela posição (PATSKO, 2006).

Assim, o módulo de Ponte H permite que o motor seja movimentado, transmitindo elevada potência e permitindo a inversão de sentido com precisão de parada em uma determinada posição. Entretanto, para que o motor se mova com alguma precisão, a parte

lógica, executada pelo microprocessador é essencial, surgindo a necessidade do uso do conceito de PWM (Pulse-Width Modulation), ou modulação de largura de pulso, que é mostrado no tópico a seguir.

3.3.1 Modulação por Largura de Pulso

Controlar a velocidade de um motor através de um microcontrolador é uma das mais eficientes alternativas, uma vez que a precisão é uma característica de circuitos lógicos. Para variar a velocidade do motor utiliza-se a modulação por largura de pulso que consiste na variação do tempo em que o sinal lógico alto (5 V) permanece nesta situação.

Para entender como é seu funcionamento, deve-se saber que em todo circuito digital só existem dois tipos de entradas/saídas, conhecidas como:

- Nível lógico alto, representado pelo bit número 1, em que a saída estará em 5 V.
- Nível lógico baixo, representado pelo bit 0, com saída em 0 V.

A variação entre os dois níveis de sinais em um determinado ciclo, forma uma onda quadrada, como pode-se observar na Figura 17.

A média dos sinais digitais durante um período de pulsação gera uma tensão média na saída que pode ser qualquer fração da tensão máxima de 5 V. Assim, na Figura 17, o primeiro ciclo de pulsação apresenta sinal alto em 25% do seu tempo, o que gera uma tensão média de 1,25 V. Já no último ciclo desta mesma figura, o sinal lógico alto permanece assim em 75% do ciclo, gerando uma tensão média de 3,75 V. O procedimento de gerar uma média dos sinais digitais em um determinado período, resulta em um sistema de conversão de sinais digitais para sinais analógicos, daí o porquê da saída ter um valor qualquer entre 0 e 5 V.

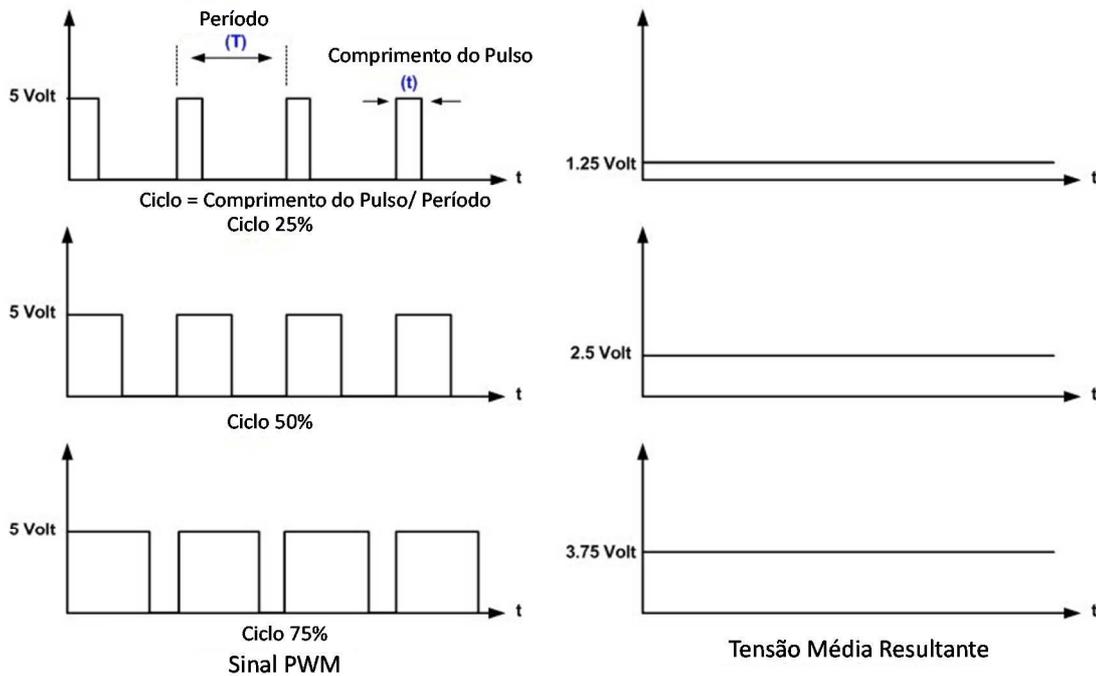


Diagrama PWM

Fonte: RONALD WILLEM, [s.d.]

Figura 17 – Modulação por largura de pulso.

Em sistemas simplesmente analógicos, em que a variação da velocidade é realizada por espécies de potenciômetros, o motor quando acionado em baixas velocidades não possui o torque original, ocasionando uma perda de potência.

A grande vantagem do circuito PWM, para o controle da velocidade de motores de corrente contínua, é que o seu torque não é afetado pela variação da velocidade mesmo que a velocidade seja muito baixa.

O sinal digital PWM gerado pelo microprocessador é enviado ao módulo de Ponte H, onde os transistores chavearão as cargas maiores (12V e 8A) com a frequência de pulsos recebidos. O resultado é uma variação da tensão entregue ao motor, o que permitirá a variação da sua velocidade a qualquer instante.

O microcontrolador, pode ainda emitir seqüências de pulsos fazendo com que o motor de corrente contínua se comporte como se fosse um motor de passo, o que constitui um dos principais objetivos do desenvolvimento deste equipamento.

através de um algoritmo que encontra a melhor configuração das trilhas de interligação (Figura 19a). Com as trilhas já finalizadas, o software possibilita ainda a exibição virtual do circuito em terceira dimensão, para que o projetista possa conferir a disposição de todos os elementos a serem instalados (Figura 19b).

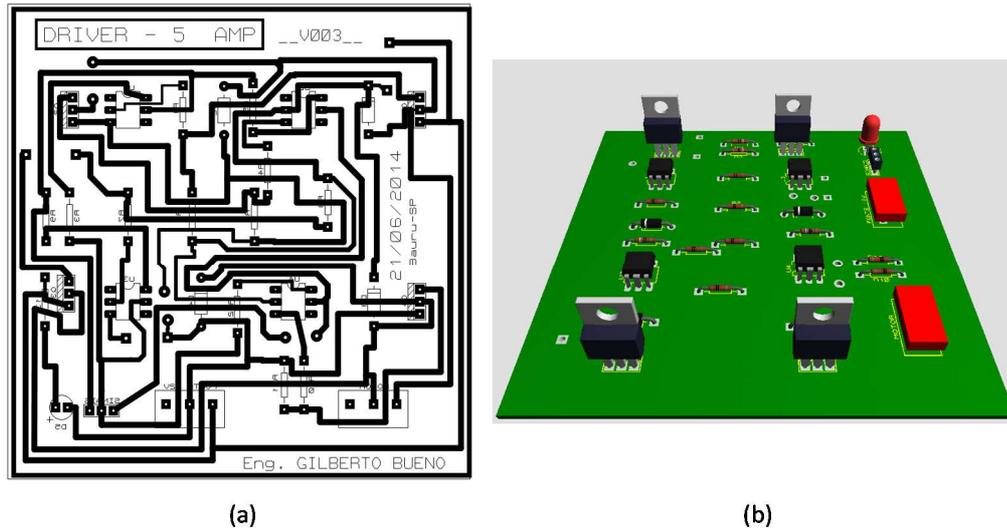


Figura 19 – (a) Circuito impresso. (b) Visualização da placa no software Proteus/Ares.

O próximo passo foi transferir o circuito impresso para uma placa de fenolite cobreada e soldar os componentes eletrônicos, concluindo assim a construção do módulo de Ponte H específico para os motores utilizados (Figura 20).

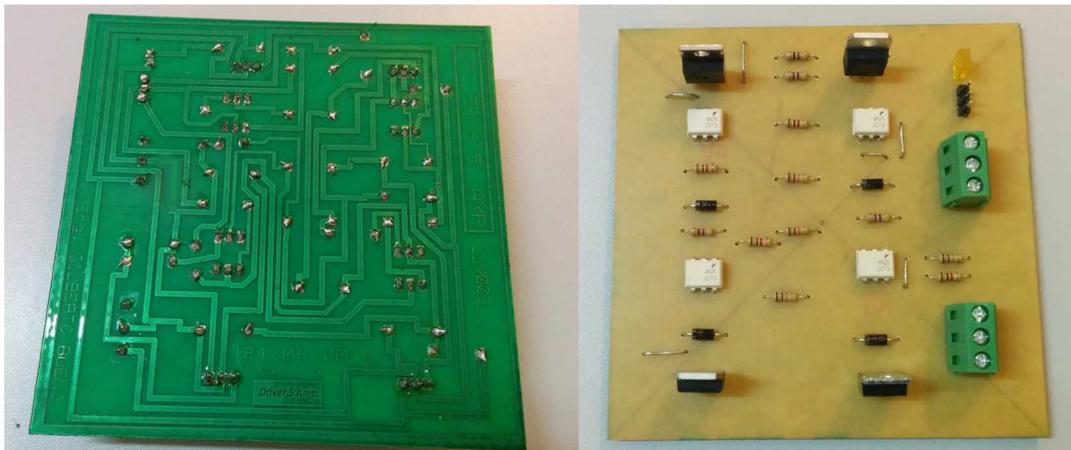


Figura 20 – Placa eletrônica da Ponte H, finalizada.

3.4 Instrumentação

A parte fundamental de um trabalho experimental é medir as diversas variáveis físicas de um protótipo em operação, de forma a avaliar seu funcionamento. A instrumentação consiste no aparelhamento do sistema experimental com os mais diversos sensores, tais como temperatura, luminosidade, dentre uma extensa gama de variedades, respeitando seus limites e condições de trabalho.

Com sensores devidamente posicionados e sincronizados entre si, obtém-se todos os dados da operação, através de um sistema de aquisição. Os dados organizados e armazenados refletirão o comportamento do sistema analisado. Os sistemas de instrumentação são elementos relativamente caros, seja pela tecnologia de suas construções, seja porque são quase todos desenvolvidos no exterior. Dessa forma, para a realização deste trabalho, optou-se pela construção de todo o sistema desde a seleção e encapsulamento dos sensores até a construção de um datalogger.

3.4.1 Sensores de Temperatura

Sensores de temperatura são colocados em pontos-chave que permitam a quantificação da energia térmica absorvida pelo sistema. Assim, estes sensores estão posicionados da seguinte forma:

- Entrada e saída do absorvedor
- Na parte superior do equipamento, para medir a temperatura ambiente

Para monitorar as temperaturas cujo valor não ultrapasse os 125°C, serão utilizados sensores de temperatura do tipo Silício (Figura 21), conhecidos como DS18B20, da fabricante Maxim Integrated, cujo custo-benefício o torna uma escolha viável. Uma das grandes qualidades deste tipo de sensor é sua alta estabilidade mesmo sob condições ambientais agressivas (FERREIRA, 2012). Além disso, este sensor possui precisão e repetibilidade excelentes (Tabela 2).



Figura 21 – Sensor de temperatura DS18B20, fabricado pela Maxim.

Tabela 2 - Característica principais do sensor DS18B20.

Características	Valores
Intervalo de Medições	-55°C até +125°C
Acuracidade	±0.5°C (entre -10°C to +85°C)
Tensão de Funcionamento	3.0 V até 5.5 V
FONTE: (INTEGRATED, 2008)	

3.4.2 Termopar

Para medir a temperatura de saída do fluido térmico que passa pelo trocador de calor situado no foco da parábola, foi utilizado um termopar do tipo K. Este termopar é ligado a um módulo digital (MAX 6675), cuja função é obter a temperatura do termopar e transformar em um sinal analógico (entre 0 e 5 V) para posterior leitura do microcontrolador responsável pela sua aquisição (Figura 22).



Figura 22 – Termopar tipo "K" e o módulo MAX6675.

Resumidamente, este módulo tem a função de amplificar o sinal de tensão gerado pela nas junções “quente” e “fria” do termopar e, simultaneamente, atuar na compensação da temperatura da “ponta-fria” do sensor, simplificando o processo de aquisição dos sinais gerados.

3.4.3 Sensor de Irradiação Solar

Componente essencial para os cálculos da eficiência energética, a irradiação solar deve ser aquiritada, simultaneamente ao funcionamento do experimento.

Dessa forma, foi utilizado um solarímetro TES modelo 1333 (Figura 23), fabricado pela TES Electrical Electronic Corp, empresa sediada em Taiwan.



Figura 23 – Solarímetro (marca TES) utilizado para aquisição da irradiação solar durante o experimento.

Segundo o fabricante, sua acuracidade está em $\pm 10 \text{ W/m}^2$ e resolução de 1 W/m^2 .

No experimento detalhado na seção dos resultados, a aquisição da irradiação solar foi aquisitada em períodos de aproximadamente 20 minutos. Com estes pontos experimentais, foi possível traçar uma equação que descreve o comportamento da irradiação solar durante todo o período. Neste caso foi utilizado a regressão quadrática, que apresenta melhor ajuste aos dados obtidos.

3.4.4 Balança de Precisão

Devido às altas temperaturas obtidas neste tipo de experimento, não foi possível construir um medidor de vazão que pudesse aquisitar esse dado em tempo real.

A solução encontrada foi retirar amostras periódicas do fluido térmico na saída do absorvedor. Com os pontos experimentais obtidos, foi possível ajustar uma curva de função quadrática, permitindo discretizar o comportamento da vazão mássica no período.

Dessa forma, as amostras foram obtidas durante o intervalo de um minuto, e a massa obtida neste período foi mensurada através de uma balança de precisão. Cada amostra foi retirada em intervalos de aproximadamente 30 minutos durante todo o processo experimental.

A balança utilizada foi a Adventurer Pro, da marca Ohaus cuja resolução é de 0,01 g (Figura 24).



Figura 24 – Balança de precisão, marca Ohaus, utilizada para medir as massas das amostras de fluido térmico.

3.5 Absorvedor

O absorvedor é o principal componente térmico do sistema, pois trata-se de um trocador de calor, onde será realizado o balanço energético do sistema. Sua função é receber a irradiação solar concentrada pela parábola, e transmiti-lo para o fluido térmico de trabalho.

Esse trocador foi construído a partir de um tubo de cobre de diâmetro externo 8,1 mm (Figura 25). Para isso, o tubo foi moldado em formato de uma espiral, cujo diâmetro total é de 93 mm. Esse formato possibilita maior troca de calor, porque maximiza a área de absorção e ainda promove mudança de direção do fluido no seu interior, possibilitando a sua mistura.



Figura 25 – Trocador de Calor constituído por um tubo de cobre em formato espiral.

A escolha do cobre como material de construção do absorvedor foi devido às suas propriedades físicas, principalmente sua condutividade térmica, que é muito maior que quaisquer outros metais disponíveis para esse tipo de uso. Embora seu custo seja mais elevado, sua alta durabilidade e eficiência na condução do calor justificam seu uso neste sistema.

A Tabela 3, faz a comparação, entre a condutividade térmica e o custo, dos metais cobre e alumínio, sendo este uma segunda opção de material para aplicações térmicas. Ocorre que a condutividade do cobre é 70% maior que a do alumínio, embora o preço do primeiro seja três vezes maior.

Tabela 3 – Comparativo entre os preços do cobre e do alumínio.

	Cobre	Alumínio
Condutividade Térmica (W/m.K)	401	237
Preço (US\$ / ton)	5.547,00	1.652,88

FONTE: alumínio (INCROPERA, 2008), (“London Metal Exchange”, 2015)

Posteriormente, o trocador (espiral de cobre) foi alojado no interior de uma caixa metálica com dimensões de 100 mm na largura e também no comprimento, e ainda 85 mm de profundidade (Figura 26). A fim de garantir o isolamento térmico, esta caixa foi revestida internamente com lã-de-rocha, um conhecido isolante que suporta altas temperaturas.



Figura 26 – Trocador montado em caixa isolada termicamente.

A lã-de-rocha tem a composição semelhante a de outro isolante térmico conhecido como lã-de-vidro. Ambas são constituídos de areia de quartzo, dolomita e calcário. Além disso,

são adicionados nesse isolante, materiais aglutinadores e óleo, a fim de, aumentar sua resistência mecânica. O que difere a lã-de-rocha da lã-de-vidro é que a primeira passa por um processo de aglomeração a altas temperaturas, e permitindo a produção de diferentes tamanhos de fibras. Assim, torna-se um produto mais pesado que o seu par, porém com alta resistência a elevadas temperaturas (PAPADOPOULOS, 2005).

A lã de rocha é um isolante altamente indicado para altas temperaturas, pois além de resistente ao fogo, seu ponto de ebulição é de aproximadamente 1200°C. Além disso, é um material que não se deteriora com o tempo e também não é combustível.

Na parte inferior do conjunto absorvedor, foram colocados os sensores de temperatura para monitorar a variação de temperatura do fluido. Na entrada do trocador, foi utilizado o sensor DS18B20 (silício) cuja faixa de operação permite temperaturas até 125°C. Já na saída, foi utilizado o termopar que suporta temperaturas muito maiores, uma vez que pretende-se chegar a temperaturas próximas à 200°C.

Essa proximidade dos sensores de temperatura com o trocador de calor é fundamental para minimizar as perdas de calor do fluido aquecido, conferindo maior precisão na avaliação da eficiência energética.

3.6 Sistema de Controle

Para coordenar o funcionamento dos módulos que controlam as diversas funções do sistema concentrador, foi necessário integrar todas as partes envolvidas através de três microcontroladores.

O sistema de controle (Figura 27) é um conjunto integrado composto pelos seguintes módulos:

- 2 Módulos de Ponte H responsáveis pelo controle dos atuadores que movimentam a parábola. (Figura 27, A, B)
- 1 Módulo de Ponte H para controle da bomba de fluido térmico. (Figura 27, C)

- 1 Módulo de Controle dos Sensores de Luminosidade, para aquisição dos valores enviados pelos sensores. (Figura 27, D)
- 1 Módulo de Aquisição de Temperaturas (Termopar e DS18B20). (Figura 27, E)
- 1 Módulo Principal (Arduíno Nano). (Figura 27, F)
- 1 Módulo Auxiliar (Arduíno Uno) – Controlador do Motor da Bomba. (Figura 27, G).
- 1 Módulo do Painel de Controle (Arduíno Nano). (Figura 27, H)
- Fonte Chaveada 12V, alimenta todos os módulos envolvidos. (Figura 27, J)

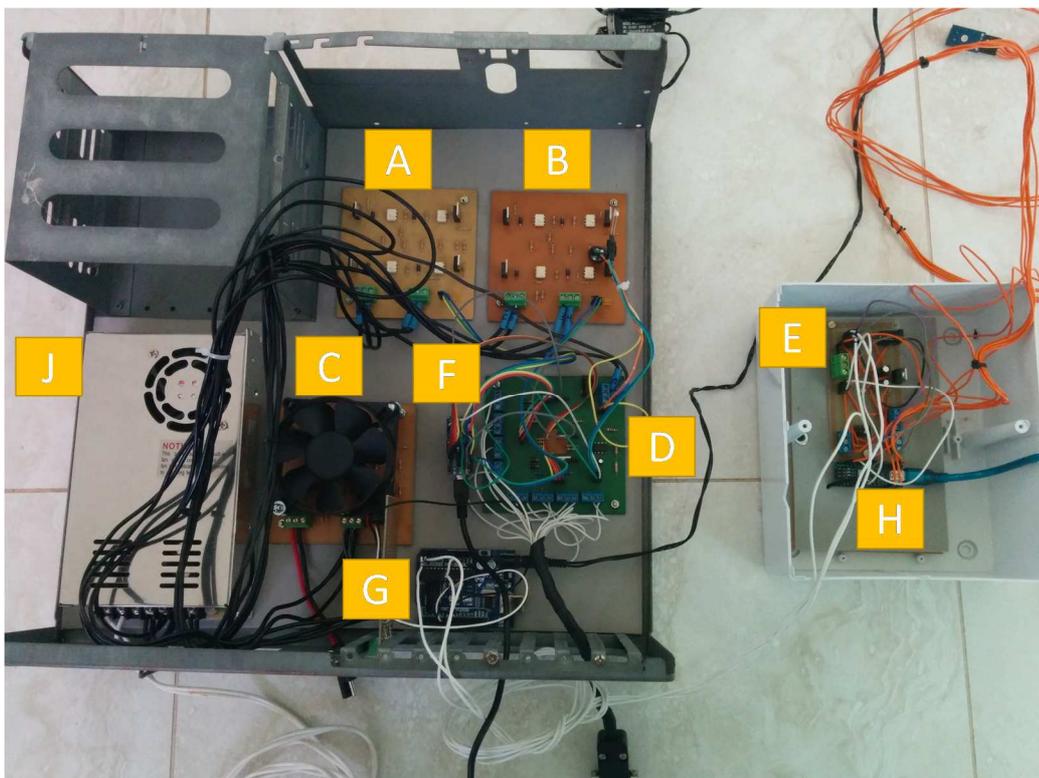


Figura 27 – Sistema Eletrônico de Controle.

Todos os microcontroladores utilizados neste projeto são da Marca Atmel, e do tipo ATMEGA328, que por sua vez é o núcleo da plataforma Open Source Arduíno, utilizado em todo o projeto. Essa plataforma, apresenta uma linguagem chamada de alto nível, isto é, sua programação é realizada através de bibliotecas que simplificam o acesso e domínio de todas as funcionalidades do microcontrolador.

Pode-se dividir o sistema eletrônico deste projeto em duas partes fundamentais, conforme mostrado na Figura 28:

- Módulo Principal (Figura 27, F) ;
- Módulo do Painel de Controle (Figura 27, H).

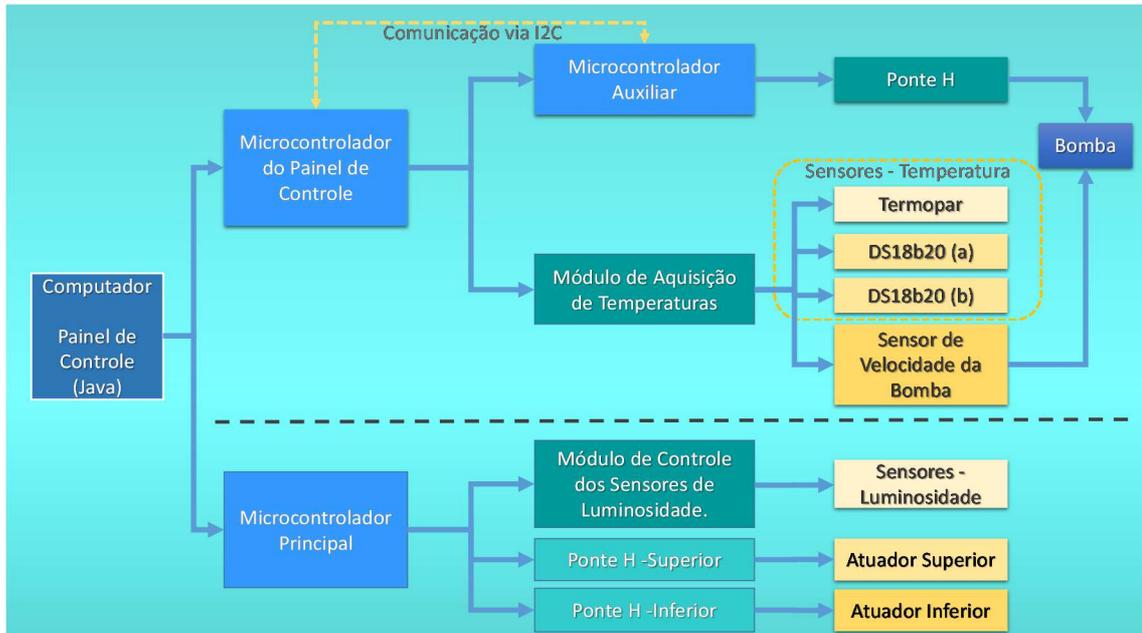


Figura 28 – Diagrama da hierarquia interna do Sistema de Controle.

O Módulo Principal está programado para obter a leitura dos sensores de luminosidade e processar esses sinais, através de um algoritmo selecionador. O resultado destes cálculos, determina a direção para a qual a parábola deve se deslocar, a fim de, encontrar a maior incidência de luz no seu foco. Assim, entra em ação a outra parte do algoritmo cuja função é acionar os atuadores de forma pulsante, para que a máxima precisão focal seja alcançada. Ao final de cada movimento destes atuadores, cuja duração não ultrapassa 0,5 segundos, os sinais de luminosidade são novamente processados, em uma iteração que permita encontrar a melhor concentração de raios do Sol.

Este módulo é o responsável pela automatização do processo de movimentação da parábola, sendo por isso, a principal estrutura de controle do sistema.

Já a segunda parte, denominada de “Módulo do Painel de Controle”, é responsável pela recepção de sinais dos sensores de temperatura e do sensor de velocidade do motor. Esses sinais são organizados de forma sequencial para serem transmitidos para o aplicativo Java “Painel de Controle”.

Além de receber os dados dos sensores, este dispositivo tem a função de controlar o Módulo Auxiliar, repassando a este as instruções que comandam o Módulo “Ponte H” da bomba, determinando a sua velocidade de operação.

A comunicação entre esses dois Arduínos (Módulo Painel de Controle e Módulo Auxiliar) é realizada através do protocolo I2C (sigla para Inter-Integrated Circuit), que permite ampla comunicação bidirecional entre estes dispositivos, utilizando apenas duas portas analógicas.

Assim, enquanto o Módulo Painel de Controle está enviando variáveis, como temperatura e rotação do eixo da bomba para o aplicativo Painel de Controle, este mesmo aplicativo está enviando, simultaneamente, informação para o Módulo Auxiliar, determinando qual a rotação desejada pelo operador.

Embora os Módulos Principal e Painel de Controle trabalhem de forma conjunta, eles possuem controles separados, isto é, não interagem entre si.

3.7 Aquisição de Dados (Software / Físico)

Para a aquisição dos dados, enviados pelo conjunto de microcontroladores, foi necessário elaborar um software para armazenamento desses dados e também um painel de controle para visualizar o comportamento dos parâmetros durante o experimento.

Esse software, desenvolvido em linguagem Java (Figura 29), foi construído simultaneamente à produção do sistema de microcontroladores e sensores, o que possibilitou uma grande integração entre o software e os dispositivos físicos.



Figura 29 – Painel de Controle do Experimento (Datalogger). Desenvolvido em linguagem Java.

O painel de controle é capaz de receber e enviar dados de forma simultânea aos processadores, isto é, recebe os dados de temperatura e rotação da bomba do fluido térmico, e permite o ajuste da velocidade deste bombeamento pelo usuário através desta interface.

A partir do momento em que o procedimento de controle é inicializado, os dados passam a ser armazenados na memória e, quando finalizado o experimento, os dados gerados são transferidos para um arquivo tipo texto (".txt"). Esses dados são liberados na seguinte ordem:

- 1) Número da aquisição.
- 2) Data/horário.
- 3) PWM para controle da velocidade do motor.
- 4) Temperatura do foco.
- 5) Temperatura ambiente.
- 6) Temperatura de entrada do fluido.
- 7) Temperatura de saída do fluido.

3.8 Fluido Térmico

O fluido para transferência térmica do sistema concentrador foi escolhido baseado na sua capacidade de suportar altas temperaturas sem que haja degradação dos componentes químicos. Inicialmente, cogitou-se a utilização da água, porém, essa hipótese foi descartada devido à necessidade de pressurização do sistema de circulação, o que não poderia ser realizado, pois alguns componentes utilizados no circuito não permitem variação de pressão.

Dessa forma, utilizou-se óleo térmico, no estado líquido, que suportasse temperaturas de até 200°C em circuito aberto, pois o sistema de circulação do fluido não pode ser considerado fechado em sua totalidade, uma vez que, seu reservatório é aberto.

Para este experimento foi utilizado um óleo térmico, importado, Paratherm. Este produto é composto por uma base mineral e permite temperaturas máximas de 310°C em circuito fechado. Incolor e com baixa pressão de vapor, são muito utilizados em secadores de lodo, lavanderias e indústrias químicas. Segundo seu manual de aplicação, o seu ponto de fulgor (temperatura mínima em que o produto libera vapor inflamável) é de 210°C. Como o sistema deste experimento é realizado em circuito aberto, pois o reservatório é aberto à atmosfera, os ensaios não poderão ultrapassar a temperatura de 210°C, temperatura mínima do ponto de fulgor.

3.9 Balanço Energético no Sistema

Equipamentos como turbinas, compressores e bocais, que operam por longos períodos sob as mesmas condições, são conhecidos como dispositivos de escoamento em regime permanente.

Segundo Çengel e Boles (2006), processos em regime permanente são transformações durante as quais as propriedades do fluido podem mudar de um ponto para outro dentro do volume de controle, mas em qualquer ponto fixo elas permanecem constantes durante todo o processo.

Para o balanço energético do fluido que cruza o sistema, temos a equação abaixo.

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \cdot c_{med} \cdot (T_{sai} - T_{ent}) \quad (1)$$

3.9.1 Cálculo da Radiação Térmica

Segundo INCROPERA (2008), a irradiação total (G) representa a taxa na qual a radiação incide por unidade de área a partir de todas as direções e em todos os comprimentos de onda.

O solarímetro fornece, assim, a medida da irradiação solar do momento.

A Equação (2) fornece a potência energética emitida pelo Sol, ou Radiação Solar Incidente (I), que é o produto da irradiação solar incidente (G) pela área de abertura da parábola.

$$I = G * A_a \quad (2)$$

3.9.2 Cálculo da Área de Abertura e do Absorvedor

A área de abertura (A_a) de um concentrador solar é a dimensão que permite a incidência dos raios do Sol. Quanto maior essa área, maior a capacidade de absorção de energia.

A parábola utilizada possui diâmetro médio de 0,615 m, o que resulta em uma área de abertura de 0,2971 m².

A área do absorvedor (A_{abs}) foi aproximada pelo formato de um disco, cujo diâmetro possui 93 mm. Assim o valor da sua área é de 0,0068 m².

3.9.3 Cálculo da Eficiência Térmica

Eficiência térmica é um dos termos mais usados no estudo da termodinâmica, pois indica o nível de aproveitamento em um processo de transferência de calor ou conversão de energia (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Este é o principal parâmetro que interessa ao presente trabalho, uma vez que, todos os instrumentos projetados e construídos até aqui, não possuem finalidade alguma se este parâmetro de qualidade não for mensurado e comprovado, o que viabiliza um projeto.

Para calcular a eficiência térmica no absorvedor (η_{abs}) do processo de transformação da energia solar em calor, utiliza-se a Equação (3) que é a relação entre a Taxa de Transferência de Calor Útil (\dot{Q}_u) e a Radiação Solar Incidente (I) que incide sobre a abertura da parábola.

$$\eta_{abs} = \frac{\dot{Q}_u}{I} \quad (3)$$

3.10 Cálculo da Taxa de Concentração

O segundo parâmetro que caracteriza um sistema de concentração é a taxa de concentração que indica a proporção da concentração da energia solar incidente sobre um coletor. A expressão que relaciona esse fenômeno é:

$$C = \frac{A_a}{A_{abs}} \quad (4)$$

Onde: A_a é a área de abertura e A_{abs} é a área do absorvedor

Em sistema de coletores planos (muito utilizados no aquecimento residencial de água) tem-se que $C = 1$, pois a área de abertura é igual a área do absorvedor. Já em sistemas concentradores a taxa de concentração (C) será sempre maior que a unidade.

Dados referentes ao equipamento utilizado:

$$A_a = 0,2971 \text{ m}^2.$$

$$A_{abs} = 0,0068 \text{ m}^2.$$

Assim, a taxa de concentração deste equipamento é de 43,73, ou seja, o absorvedor está recebendo uma concentração de radiação solar 43 vezes maior do que sua superfície é capaz de captar.

3.11 Descrição do Ensaio

A finalidade deste trabalho é promover um estudo sobre o comportamento de um sistema de concentração solar, avaliando os materiais utilizados, o formato do absorvedor, a influência do uso de película seletiva no absorvedor, a sua capacidade de movimentação para alinhamento do sistema em relação ao Sol, utilizando como parâmetro principal a sua eficiência energética.

Para isso, em todos os ensaios a serem realizados, o balanço energético do fluido térmico circulante é calculado utilizando os valores das temperaturas de entrada e saída do absorvedor, simultaneamente à aquisição da respectiva vazão volumétrica do fluido.

3.12 Vazão Volumétrica do Fluido Térmico.

Para calcular a densidade do fluido térmico, foram utilizados dados pontuais da vazão obtidos no experimento. Com a massa encontrada experimentalmente, bastou encontrar a temperatura média entre a entrada e a saída do absorvedor, para assim realizar a interpolação da densidade fornecida pelo *datasheet* do fabricante do fluido de trabalho.

Com a densidade calculada nestes pontos, passou-se ao cálculo do volume neste pontos. Esses valores pontuais permitiram a construção de uma segunda curva de regressão quadrática da vazão volumétrica pelo tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teste de Temperatura de Estagnação

O primeiro teste realizado no sistema de concentração solar foi para determinar a temperatura de estagnação, isto é, a máxima temperatura que o absorvedor pode atingir sem a presença de fluido trocando calor no seu interior. Este parâmetro é considerado uma característica importante de um sistema concentrador, pois representa sua capacidade de transformar a irradiação solar em calor a altas temperaturas.

Na Figura 30 é apresentado o equipamento em um dos seus primeiros dias de funcionamento. Nesta fase de desenvolvimento, o concentrador está equipado com o primeiro tipo de absorvedor, o qual foi substituído antes dos testes finais por um outro absorvedor mais eficiente.



Figura 30 – Equipamento no momento do teste da temperatura de estagnação (dezembro/2014). Nesta etapa do projeto foi testado o primeiro tipo de absorvedor.

Na Figura 31 é mostrada a superfície de absorção do referido protótipo recebendo a incidência solar concentrada pela parábola. Com o termopar (tipo K) posicionado na referida superfície foi possível registrar temperaturas máximas atingidas pelo sistema, cujos valores são apresentados na Figura 32.



Figura 31 – Absorvedor seco realizando o teste de temperatura de estagnação (17/12/2014).

Primeiro Teste - Temperatura de Estagnação - 17/12/2014

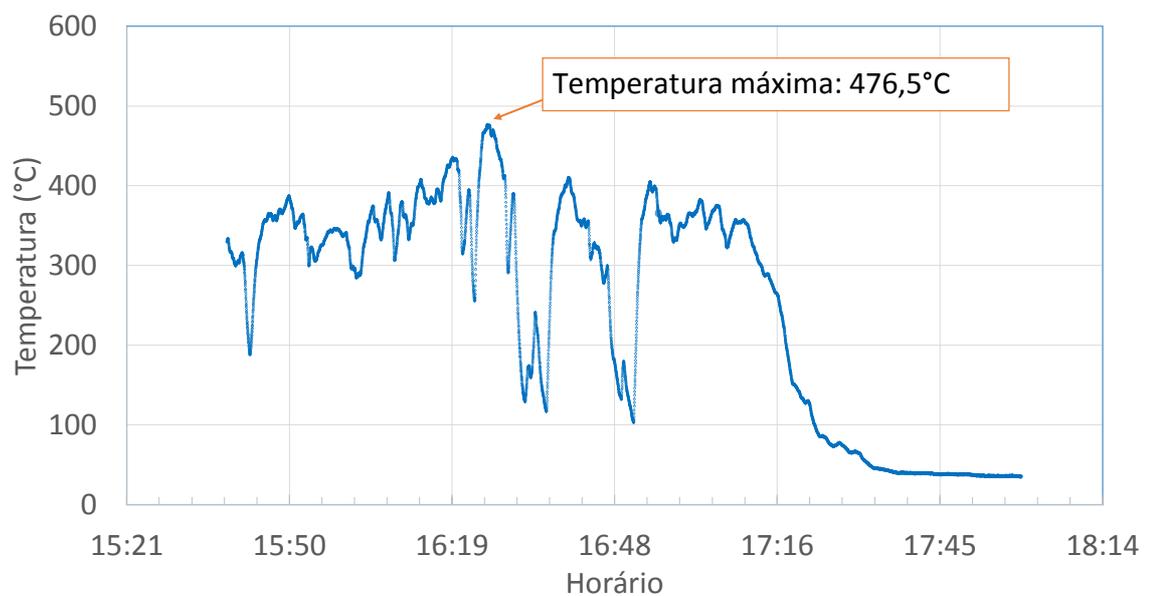


Figura 32 – Resultado do teste para verificação da maior temperatura obtida no anteparo.

Na Figura 32, percebe-se a grande oscilação do perfil de temperatura registrado no foco. Isso ocorreu porque, embora o dia estivesse bem ensolarado, houve a presença de nuvens passageiras gerando sombreamento no local de testes, reduzindo a intensidade da incidência solar e, assim, ocasionando quedas abruptas de temperatura.

A temperatura máxima atingida neste teste foi de 476,5°C, registrado às 16h 25 min, determinando a temperatura de estagnação do sistema.

Entretanto, não foi possível medir a irradiação solar durante este teste porque ainda não dispunha-se de instrumentação completa naquele momento. Este dado é fundamental para referenciar o potencial de energia disponível.

Mesmo sem a presença de um solarímetro, é possível afirmar que esta temperatura de estagnação pode aumentar em novos testes, pois o horário em que a mesma foi obtida não fornece a máxima irradiação solar de um dia comum, o que ocorre aproximadamente ao meio-dia. Além disso, a presença de nuvens atrapalhou a captação de irradiação solar direta naquele momento, que é a fundamental ao sistema óptico de concentração.

4.2 Sistema Concentrador em Operação

Na Figura 33 é mostrado como ficou a montagem de todo o sistema concentrador solar composto pela parábola, o absorvedor, o reservatório térmico, a bomba de fluido térmico e todo o sistema eletrônico acoplado.



Figura 33 – Concentrador em operação no dia 27/07/2015. Ao fundo, o céu sem nuvens durante todo o período.

Foi selecionado o período da tarde para todos os ensaios, uma vez que, o local escolhido não possui área aberta que permitisse a incidência solar em outros períodos do dia. Entretanto os teste foram iniciados próximos às 13 horas, o que possibilitou o aproveitamento de grande parte da incidência solar do dia.

4.3 Principais Resultados

Em um segundo tipo de experimento acréscimo de um novo absorvedor tipo serpentina helicoidal, como descrito em materiais e métodos. Foram realizados dois ensaios nos dias 27 e 28 de julho de 2015. Estes referidos testes consistiram no funcionamento do sistema concentrador durante um período de aproximadamente 3 horas, cujos dados do dia 27 foram selecionados para compor os resultados deste trabalho.

O ensaio selecionado foi realizado em um dia muito favorável à recepção da luz solar, uma vez que, em nenhum momento houve presença de nuvens, o que poderia diminuir a incidência solar sobre o sistema.

A Figura 34 mostra o comportamento das temperaturas de entrada e saída do fluido térmico no absorvedor, bem como a temperatura do ambiente nas proximidades do experimento. Este gráfico foi obtido através da aquisição dos dados em períodos de 1 segundo, o que permitiu a formação de uma densa nuvem de pontos. Essas nuvens delinearam o comportamento das temperaturas através dos perfis formados.

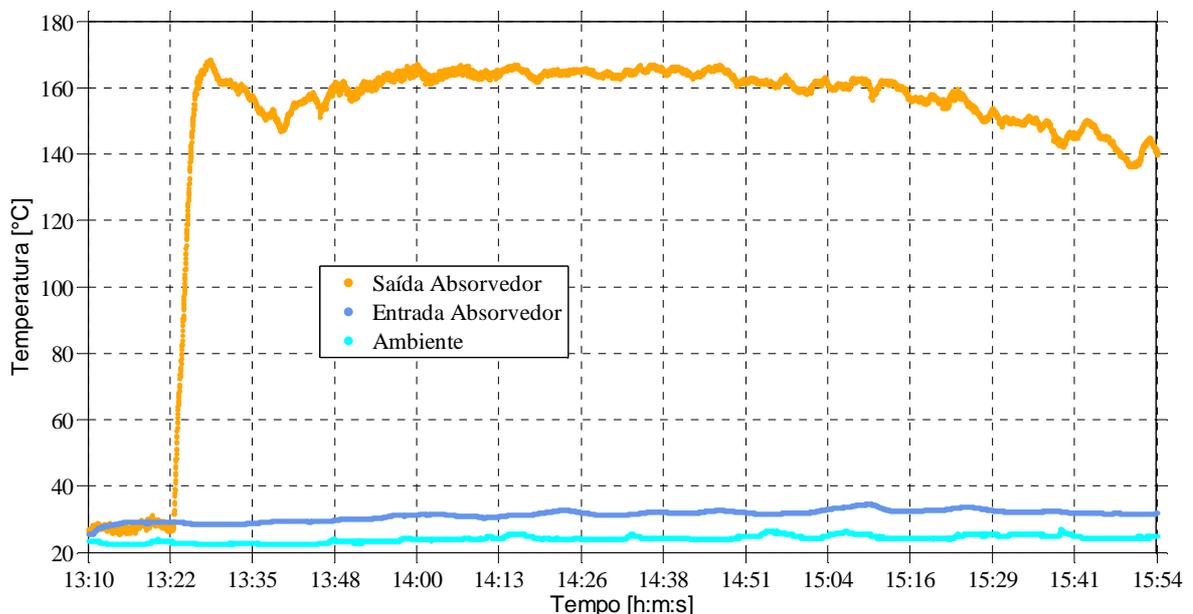


Figura 34 – Comportamento das temperaturas do óleo térmico de trabalho na entrada e saída do absorvedor, e temperatura ambiente.

O primeiro ponto a ser observado nesta figura é o degrau de elevação que ocorreu com a temperatura do fluido térmico na saída do absorvedor, por volta de 13h23min. O referido degrau indica o momento em que o sistema eletrônico de rastreamento e a bomba de fluido térmico foram acionados permitindo o alinhamento da parábola com os raios do Sol e a circulação do fluido pelo absorvedor, respectivamente.

Antes disso, no período que abrange entre o início da coleta de dados até as 13h23min, o sistema está em equilíbrio com o ambiente, ou seja, os sensores de temperatura do fluido térmico registram temperaturas iniciais de aproximadamente 22°C, e que vão incrementando até 29°C. Esse leve aumento de temperatura ocorreu porque o sistema estava em campo aberto, recebendo a incidência solar. Enquanto que o sensor da temperatura ambiente, que estava abrigado do Sol, apresentou temperaturas quase constantes de, aproximadamente 23°C, neste período.

A partir de 13h22min, quando é iniciado o sistema de rastreamento solar e a circulação do fluido, a temperatura de saída do absorvedor aumenta de 27 °C para 168,5°C em apenas 360 segundos. Em seguida, a temperatura tem uma queda para 147 °C às 13h 40min, voltando a aumentar de forma gradual até um patamar constante de 165°C às 13h 58min, permanecendo estável por aproximadamente uma hora.

Embora a vazão do fluido varie com a temperatura, como será visto mais a frente, a rotação do motor da bomba foi ajustada para ser constante durante todo o ensaio.

A temperatura do fluido que sai do absorvedor, começa a cair de forma mais significativa a partir das 14h 50min, momento em que apresenta 162°C, para atingir 140°C ao final do experimento.

A Figura 35 foi obtida com base nos dados da irradiação solar captadas em intervalos de aproximadamente 20 minutos durante o processo de funcionamento. Os pontos plotados serviram como base para construção da equação tipo função quadrática do comportamento da irradiação. A escolha de uma regressão quadrática é apoiada no fato de que a curva característica da incidência solar possui um formato parabólico, conforme pode-se verificar do gráfico da Figura 36.

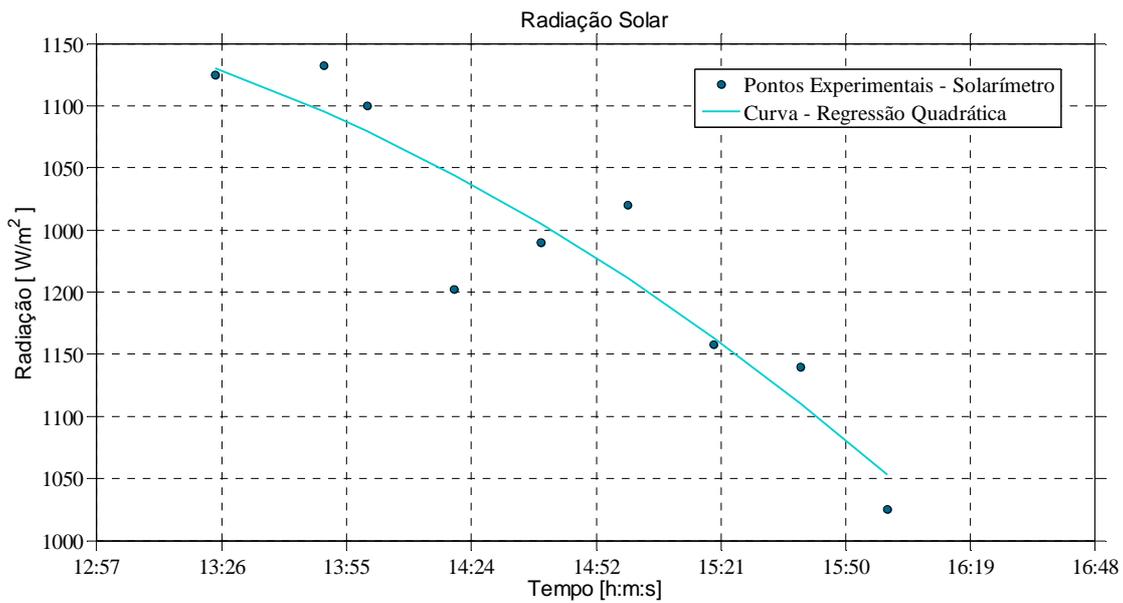


Figura 35 – Comportamento da irradiação solar no período do experimento (27/07/2015).

Dessa forma, Kalogirou (2013) (Figura 36), mostra que os dados da irradiação solar durante um dia ensolarado, quando plotados em um gráfico, formam curvas que se assemelham a uma parábola.

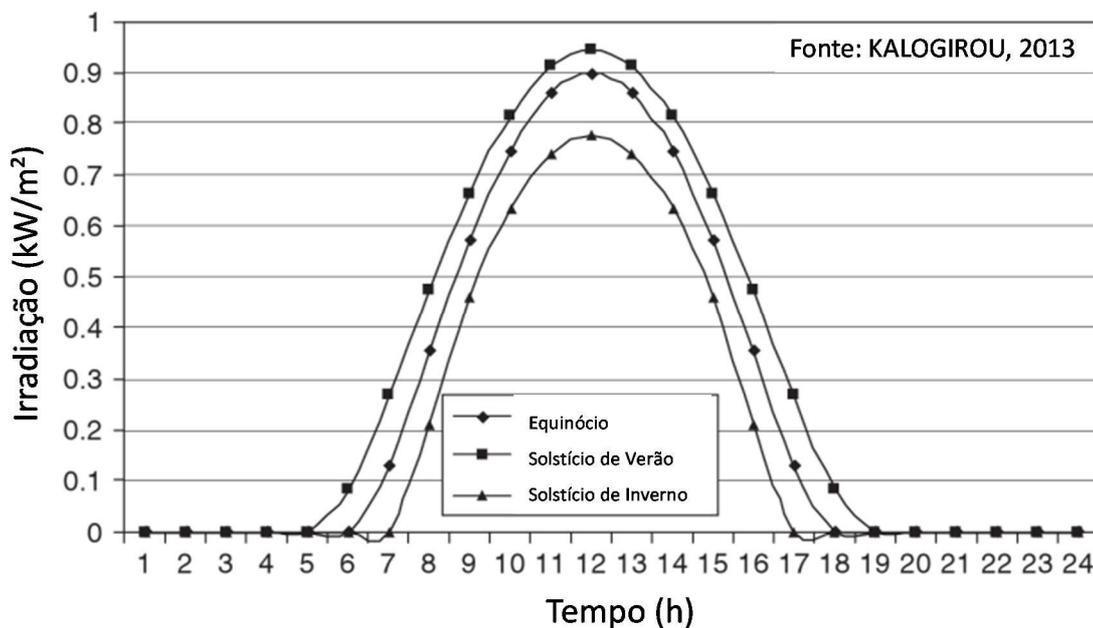


Figura 36 – Comportamento da curva da irradiação solar durante 24 horas do dia (Dados da cidade de Nicosia-Chipre).

Na Figura 35, observa-se que a irradiação solar tem sua intensidade máxima às 13 h 23 min, alcançando 1150 W/m^2 . É justamente neste momento em que é iniciado o experimento solar, cuja temperatura máxima atingiu o pico de $168,5 \text{ }^\circ\text{C}$. No gráfico da Figura 35, nota-se que a irradiação solar possui tendência decrescente em todo período de aquisição de dados, apresentando o valor final de 1010 W/m^2 às 16 h 00 min, quando se encerram os testes.

A tendência da queda de temperatura observada na saída do absorvedor após às 14 h 50 min (Figura 34) é consequência direta da queda da irradiação solar observada na Figura 35, que diminuiu em 140 W/m^2 , no decorrer do ensaio.

Já a temperatura na entrada do absorvedor apresentou leve aumento durante o processo de funcionamento, devido ao ganho de energia dentro do reservatório de fluido térmico. Este reservatório não possui revestimento térmico porque a finalidade deste experimento não foi medir a energia acumulada em seu interior, mas sim a eficiência na aquisição e transformação da energia solar em energia útil na forma de calor.

Mesmo assim, uma diminuta parcela de calor, proveniente do fluido que sai do absorvedor, acabou sendo armazenada dentro deste reservatório, permitindo um ligeiro e gradual aumento da temperatura do fluido térmico. Assim, a temperatura de entrada do fluido térmico, que sai do reservatório e entra no absorvedor, aumentou de $29 \text{ }^\circ\text{C}$, no início do experimento, para $31,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ao seu final.

A vazão mássica do fluido térmico que escoar pelo absorvedor, medida em gramas por minuto pode ser observada no gráfico da Figura 37.

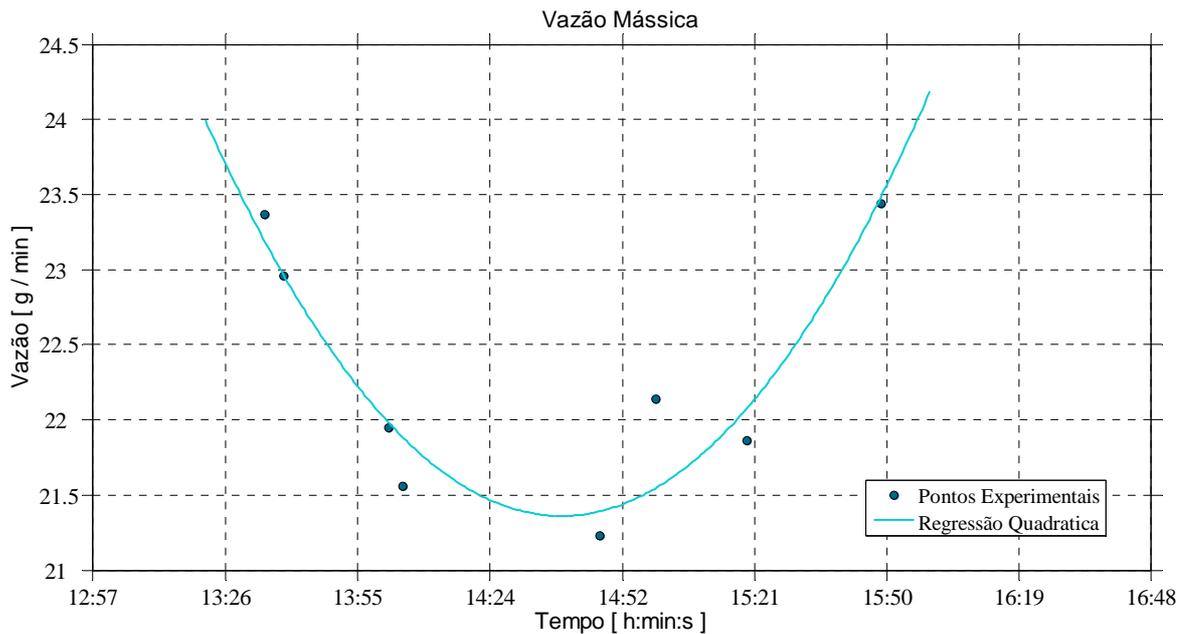


Figura 37 – Pontos experimentais da vazão mássica do óleo térmico dada em gramas por minuto no dia 27/07/2015.

Utilizando os pontos experimentais obtidos, foi possível obter uma equação quadrática cuja representação pode ser vista na mesma figura. Essa curva quadrática foi utilizada para calcular a vazão a cada segundo durante todo o experimento, uma vez que, os dados das temperaturas foram obtidos com essa mesma frequência.

Da mesma forma, a Figura 38 mostra a evolução da vazão volumétrica apresentada em mililitros por minutos durante todo o período experimental. A curva obtida também é uma regressão quadrática dos pontos experimentais da vazão mássica (detalhado na parte de materiais e métodos – Seção 3).

Os gráficos das vazões permitem concluir que tanto no início como no final do experimento as vazões são maiores que as registradas na faixa central que representa este processo.

Uma possível explicação para esta variação na vazão está na variação da temperatura média que ocorre entre a entrada e a saída do fluido térmico no absorvedor.

A Figura 39 permite comparar diretamente esses dois parâmetros. Entre os horários de 13 h 26 min e 13 h 55 min é possível verificar um decréscimo na temperatura média do fluido. Neste mesmo período, a vazão apresenta valores entre 23,37g/min a 22,96g/min. O

mesmo ocorre entre os horários de 15 h 21 min e 15 h 50 min, momento em que a temperatura média começa a diminuir, e simultaneamente, a vazão tem leve aumento.

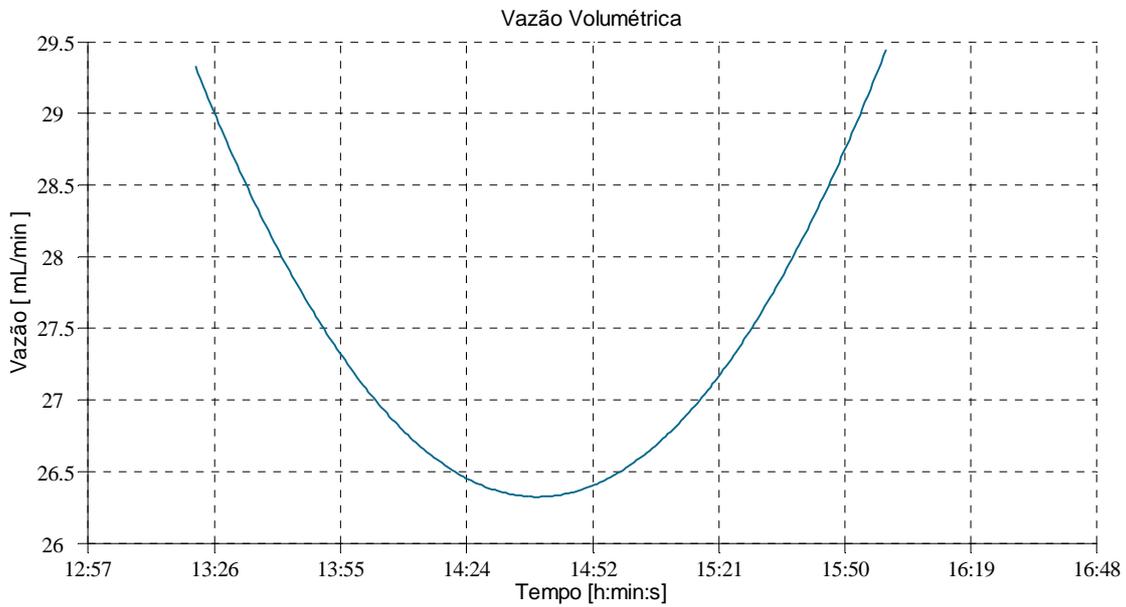


Figura 38 – Curva da regressão quadrática para vazão volumétrica em mililitros por minuto do experimento do dia 27/07/2015.

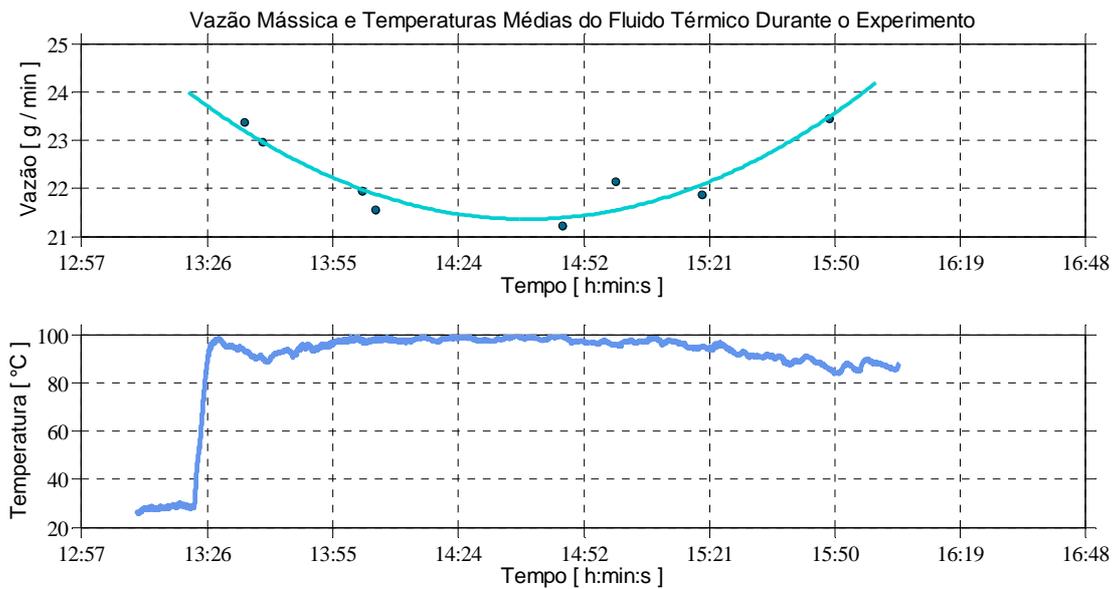


Figura 39 – Comparativo entre a vazão mássica e a temperatura média do fluido térmico ao longo do experimento.

No intervalo que abrange os horário das 13 h 55 min até às 15 h 21 min, observa-se um aumento da temperatura média em relação ao início e final do experimento. Essa temperatura estabiliza-se em torno de 98°C e, neste intervalo, a vazão cai para os menores níveis durante todo esse processo.

Parece haver, portanto uma relação entre a temperatura do fluido e sua respectiva vazão, uma vez que quanto maior a temperatura média do fluido térmico, menor a vazão.

4.4 Eficiência Térmica

A Figura 40 apresenta a eficiência térmica do sistema de concentração solar. Nela é possível verificar o mesmo degrau observado na Figura 34 (aumento expressivo da temperatura do fluido na saída do absorvedor), pois é neste momento em que se dá o início do experimento com o rastreamento do sol pelo sistema posicionador.

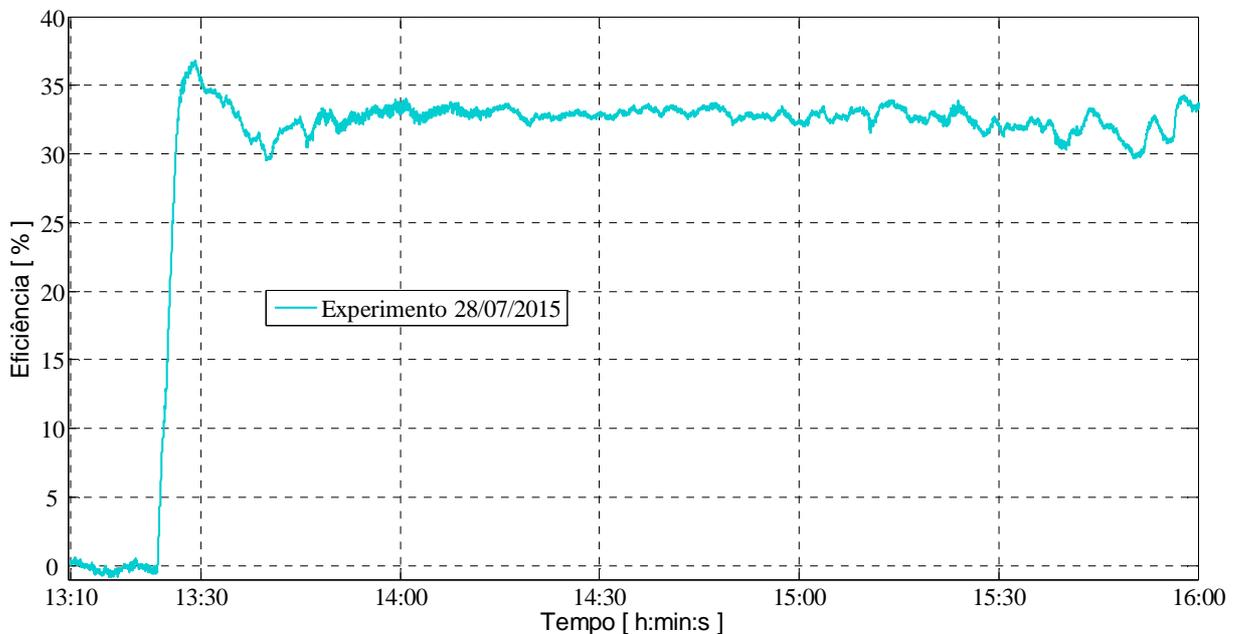


Figura 40 – Eficiência térmica do sistema concentrador solar proposto.

Esse fenômeno (degrau) já era esperado, uma vez que, a variação de temperatura do fluido, entre a entrada e a saída do absorvedor, ser um dos principais componentes da equação da eficiência.

Essa rampa observada no gráfico da eficiência energética apresenta uma informação de grande relevância pois, no momento em que a temperatura de saída do fluido atinge o pico de 168,5°C (Figura 34), a eficiência também atinge um pico de 36,8%, para se estabilizar em torno dos 33%. A informação produzida por este pico de rendimento, mostra como seria ideal se o equipamento produzisse altas temperaturas, para a mesma incidência solar.

Ocorre que, a eficiência de 36,8% atingida inicialmente não pode ser considerada real, pois ela não está dentro da região de equilíbrio de operação, pois trata-se de um período em regime transiente. Isso significa que as altas temperaturas geradas no início do experimento resultam da inércia térmica do absorvedor, que recebeu irradiação solar sem a circulação do fluido térmico.

A explicação para isso é que, após o acionamento da bomba, o fluido térmico requer um certo tempo para percorrer a tubulação que liga o reservatório até o centro da espiral do absorvedor. Assim, neste intervalo de tempo há acúmulo de energia na estrutura do absorvedor, ocasionando grande aumento de temperatura naquele local, situação semelhante ao que ocorre em testes para medir a temperatura de estagnação. Do exposto conclui-se que, somente após se estabelecer o escoamento do fluido térmico pelo absorvedor é que se deve iniciar a incidência solar no sistema.

Portanto, o período que mais interessa a este trabalho é o regime permanente, onde os valores da eficiência serão reais, refletindo a real capacidade deste equipamento de transformar irradiação solar em calor, de forma constante.

A Figura 41 faz uma comparação direta entre a eficiência térmica e a potência útil absorvida pelo sistema. Por ela é possível verificar que o regime permanente de funcionamento começa por volta da 13 h 45 min, estendendo-se até o final da operação às 16 h 00 min.

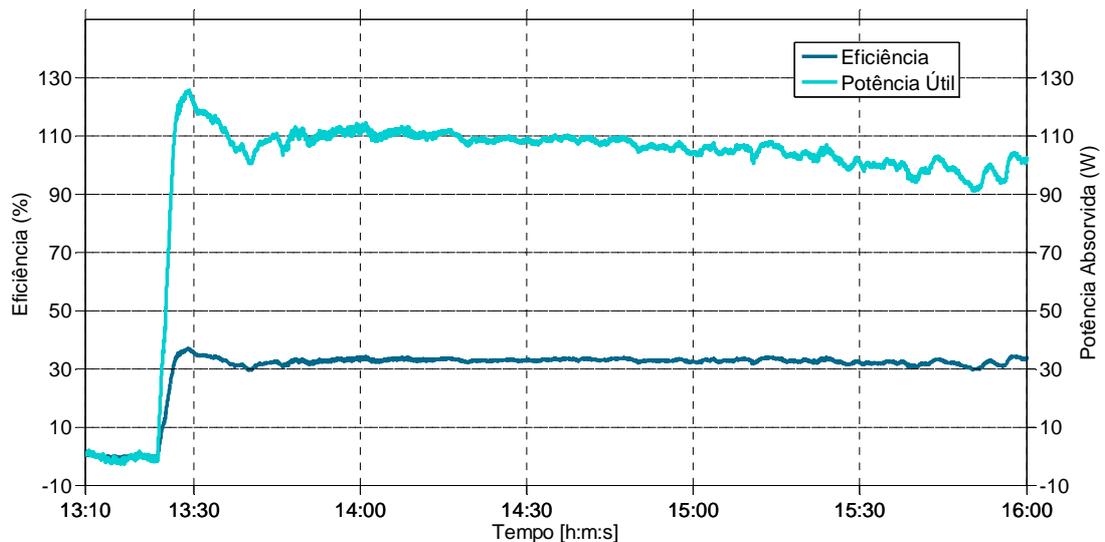


Figura 41 – Gráfico que permite a comparação entre a eficiência térmica do sistema e a potência útil extraída da irradiação solar incidente.

Considerando uma análise do início do regime permanente (13 h 45 min), pode-se afirmar que a energia útil absorvida pelo sistema tem média de 110W na primeira hora de operação, diminuindo gradualmente de 110 para 90 W no período final do experimento.

A redução na quantidade de potência útil é consequência da diminuição da incidência solar neste período final da operação. Entretanto, mesmo havendo redução desta energia absorvida no período que abrange entre às 14 h 30 min e 16 h 00 min, a eficiência não se altera nesta mesma proporção, isto é, a sua média neste período permanece praticamente a mesma do restante do experimento.

A Tabela 4 possibilita comparar as médias das eficiências em cada período do experimento.

Observa-se que a eficiência do sistema de concentração apresenta valores médios próximos ou iguais a 33% entre o segundo e o quinto períodos considerados em regime permanente (13 h 30 min às 15 h 30 min). Já no último período desta divisão (entre 15 h 30 min e 16 h 00 min), houve redução aproximada de um ponto percentual no valor da eficiência, o que não representa queda significativa comparado ao valor absoluto da eficiência.

Tabela 4 – Eficiência térmica para cada período do experimento.

Intervalo de Tempo		Eficiência Média (%)
13:10	13:30	8,8
13:30	14:00	32,5
14:00	14:30	33,0
14:30	15:00	33,0
15:00	15:30	32,7
15:30	16:00	31,9

4.5 Eficiência Baseada em Equações Empíricas da Irradiação

No cálculo da eficiência demonstrado na seção anterior, a irradiação solar foi medida através de um solarímetro digital. Neste tópico, propõe-se estudar a eficiência utilizando a irradiação solar calculada através de equações empíricas desenvolvidas por Hottel (1976). A equação proposta por este autor, permite o cálculo da irradiação solar direta para um dia claro, isto é, sem nebulosidade (ANEXO I).

Felizmente, o dia deste teste experimental foi extremamente ensolarado, não apresentando uma nuvem sequer, o que permitiu assumir a condição imposta pelo autor citado acima.

Partindo do equacionamento proposto por Hottel (1976), que calcula a irradiação solar direta normal, e também pelo equacionamento proposto por Liu e Jordan (1960), que permite calcular a irradiação solar difusa, foi possível construir as curvas demonstradas na Figura 42.

Na Figura 42 é possível verificar que a irradiação direta normal, que é a parcela da irradiação solar captada por um sistema de concentração solar de dois eixos, alcança valores superiores quando comparados com as demais componentes, inclusive com a irradiação global.

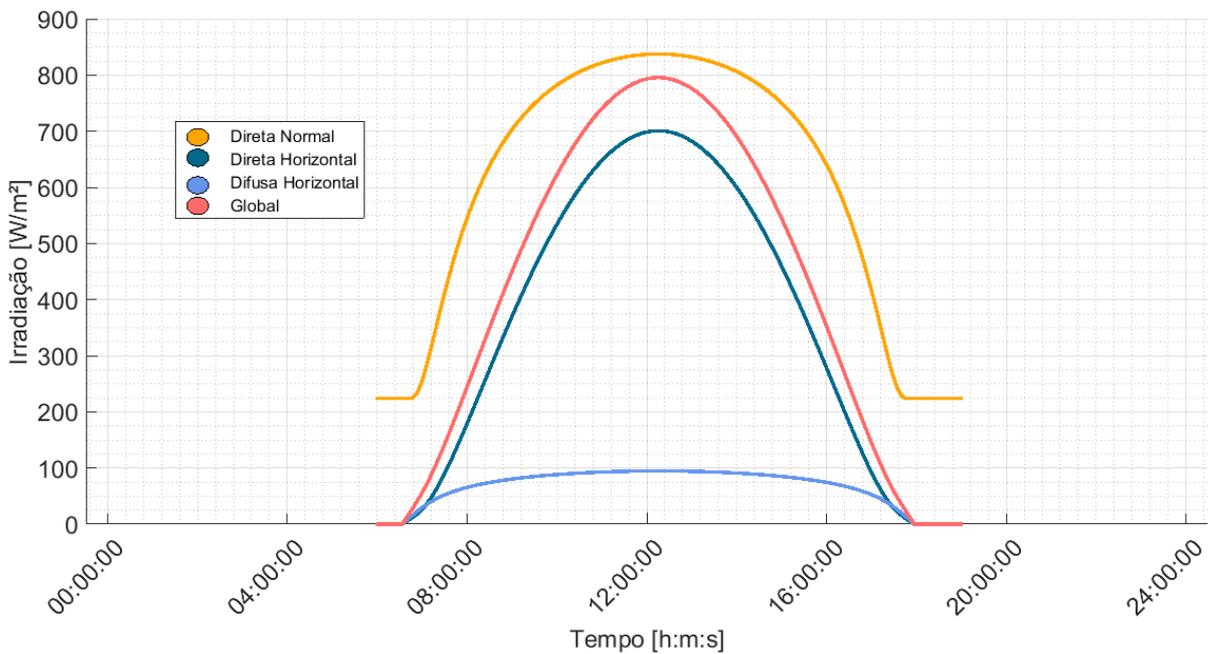


Figura 42 — Curvas da irradiação solar obtida através de cálculos empíricos propostos por Hottel (1976) e Liu e Jordan (1960).

Isso porque, a irradiação global não é um simples somatório das componentes conhecidas como irradiação direta e irradiação difusa. Na verdade, a irradiação global (G) é resultado do somatório da irradiação difusa mais o produto da irradiação direta normal pelo cosseno do ângulo zenital (ANEXO I).

$$G = I_{cb} + G_{cnb} * \cos \theta_z \quad (13)$$

Na Figura 42 é possível visualizar a componente difusa da irradiação solar que é obtida com base no cálculo da irradiação direta normal, conforme proposição de Liu e Jordan (1960). Também foi calculada a irradiação solar direta normal à uma superfície horizontal, para fins de comparação com a irradiação solar direta normal à Terra.

Observa-se também que a curva da irradiação solar direta normal tem seu começo (aproximadamente às 07 h 30 min) e fim (aproximadamente às 18 h 00 min) com valores constantes da ordem de 220 W/m². Embora o gráfico da Figura 42 mostre que nos extremos do dia, os valores da irradiação direta normal tendem a ser constantes e iguais à 220 W/m²,

isso não representa o fenômeno na realidade. Portanto é necessário desprezar o intervalo constante, considerando que esta componente tem valor nulo nestas regiões.

Para validar os cálculos propostos pelos autores citados, buscou-se os dados da irradiação global fornecidos pelo IPMET (Instituto de Pesquisas Meteorológicas - Bauru) no dia deste teste experimental em estudo. Este Instituto conta com um piranômetro que fornece os dados da irradiação global durante todo dia, o que infelizmente não é útil ao presente experimento, já que este trabalha somente com irradiação solar direta normal.

A Figura 43 mostra as curvas da irradiação solar direta normal e global calculadas empiricamente, comparadas com a curva formada pela nuvem de pontos da radiação solar global fornecida pelo IPMET (ANEXO II).

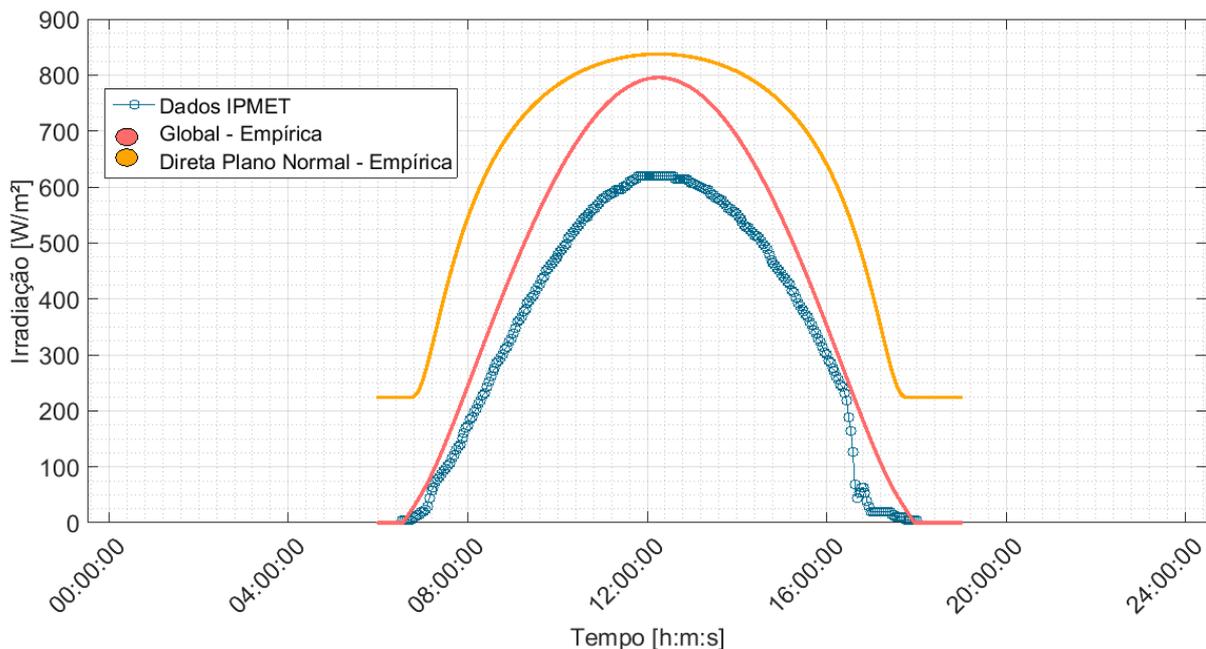


Figura 43 – Curvas da irradiação solar global obtida pelo IPMET comparada com as curvas da irradiação global e direta normal obtidas através de equacionamentos empíricos.

Percebe-se que ambas concordam perfeitamente em seus pontos iniciais e finais do respectivo dia. Entretanto, à medida que as horas se passam, essa concordância vai diminuindo até o momento em que a diferença entre estas duas curvas se torna muito acentuada por volta do meio-dia. Neste momento a diferença entre elas se aproxima de 200 W/m^2 .

Para uma terceira comparação, buscou-se os dados da irradiação global para o município de Bauru no software Radasol (GESTE, 2001), para o mês de Julho. O conjunto de dados obtidos permitiu encontrar que o valor da máxima irradiação solar global para este mês foi de 801 W/m^2 (ANEXO III). O que corrobora exatamente com o valor máximo obtido pelas equações de Hottel (1976) e Liu e Jordan (1960), quando manipuladas para calcular a irradiação global.

Diante do exposto, o cálculo da eficiência do sistema concentrador estudado pode ser perfeitamente realizado utilizando como base a irradiação solar direta normal obtida empiricamente, uma vez que os dados resultantes destes cálculos:

- Foram realizados em um dia sem nuvens.
- Os dados calculados empiricamente são condizentes com resultados obtidos através do programa radiasol.

A Figura 44 mostra a nova eficiência calculada com o uso da irradiação solar direta normal. A curva desta figura apresenta um período transiente logo no seu início, igualmente ocorreu no gráfico da Figura 40. Entretanto, o período de interesse situa-se na região onde ocorre o regime permanente, isto é, entre 13 h 45 min, estendendo-se até o final da operação, às 16 h 00 min.

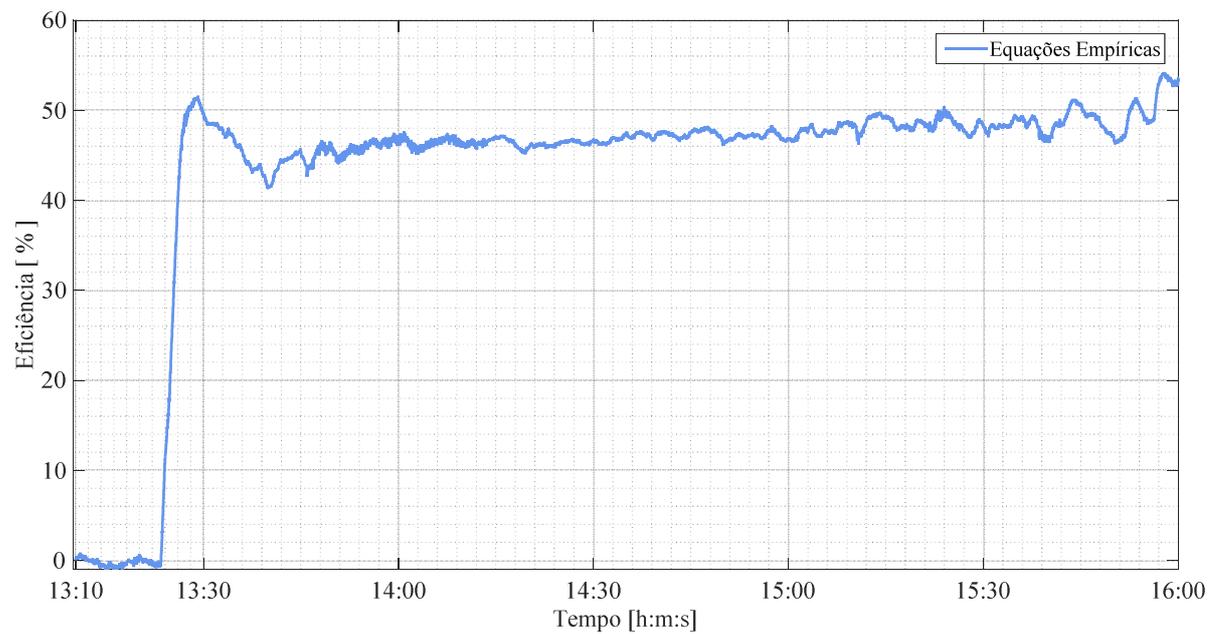


Figura 44 – Eficiência térmica do sistema concentrador solar proposto, com a utilização da irradiação solar direta normal calculada empiricamente.

Percebe-se que neste intervalo a eficiência está próxima de 45%, a qual vai aumentando até atingir aproximadamente 55% ao final do ensaio.

Comparando o comportamento das duas eficiências obtidas, uma experimental (através do solarímetro) e outra empírica (através de equações), pode-se observar que o resultado desta última apresentou um incremento significativo durante todo o período (Figura 45) considerando a região de regime permanente.

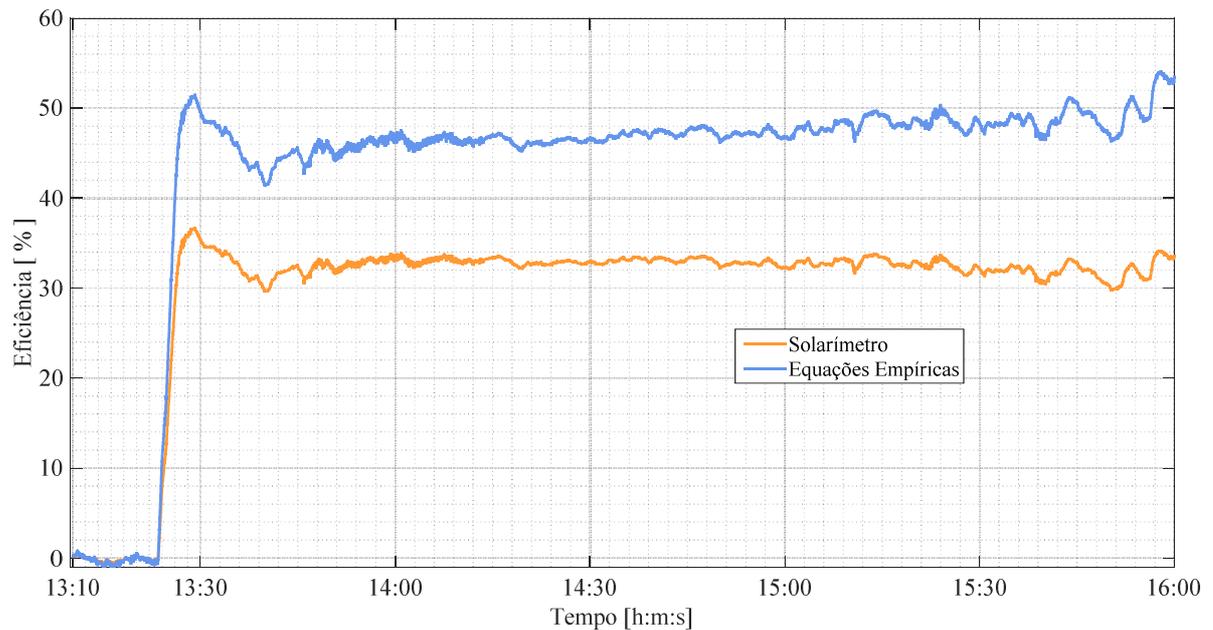


Figura 45 – Comparação entre as eficiências calculadas com irradiações obtidas experimentalmente e empiricamente.

A eficiência obtida experimentalmente varia em torno de 33%, apresentando leve queda próximo às 16 h 00 min. Enquanto que a eficiência calculada pela irradiação solar empírica, possui valores bem superiores, começando em 45% às 13 h 45 min e aumentando até atingir o pico de 54%, próximo ao final. Ou seja, enquanto os resultados da eficiência experimental não apresentaram variações que acentuassem uma tendência, o mesmo não se pode se dizer dos resultados da eficiência empírica, cujo incremento foi de 9 pontos percentuais.

Sem querer estender análise mais profunda nos fenômenos de transferência de calor que ocorrem simultaneamente, tais como a perda de calor, por convecção e por radiação (ambas no foco), pode-se inferir que os resultados baseados na irradiação empírica são mais condizentes com as leis térmicas. Isso porque quanto maior a temperatura no foco, maiores serão as perdas por convecção e radiação, e portanto, menor a eficiência.

A Figura 46, que mostra o comportamento da temperatura média do óleo térmico, isto é, a média das temperaturas da entrada e da saída deste fluido. É possível verificar (período do regime permanente) que as temperaturas são maiores no início do que no final do experimento.

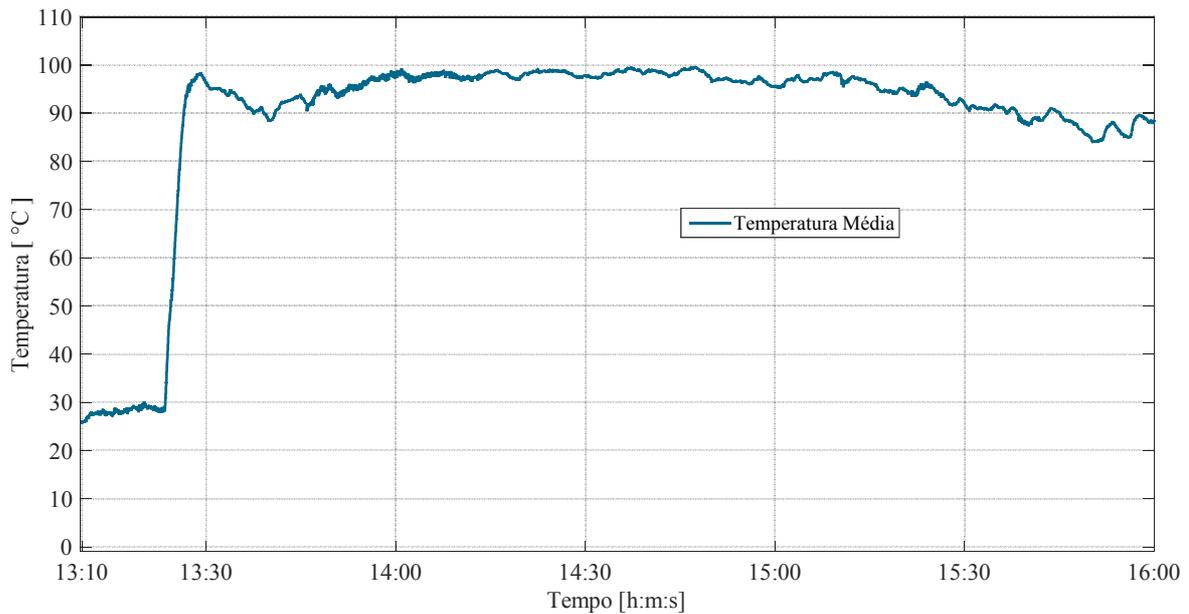


Figura 46 – Temperatura média do óleo térmico no absorvedor (foco).

Dessa forma, com as temperaturas médias diminuindo, as perdas por radiação e convecção na superfície do absorvedor(foco) decrescerão o que, por sua vez, aumenta a eficiência do sistema, como pode ser observado na Figura 44.

Uma comparação mais precisa pode ser feita pela observação das curvas de irradiação mostradas na Figura 47. É possível notar que, com o decorrer do tempo a irradiação empírica tende a diminuir mais rapidamente que a irradiação experimental. No início, às 13 h 30 min, a diferença entre as irradiações é de apenas 320 W/m^2 , mas quando se aproxima do final, por volta de 16 h 00 min, esse diferença cresce para 560 W/m^2 .

Essa queda mais rápida no nível de irradiação pode ser mais condizente com o comportamento da temperatura média observada na Figura 46. Isto é, o óleo térmico experimentou uma diminuição de temperatura decorrente da queda do nível de irradiação solar mais acentuada. Fato este, corroborado pela afirmação anterior de que a eficiência tende a aumentar quando o absorvedor apresenta menor temperatura, isto é, recebe menor irradiação.

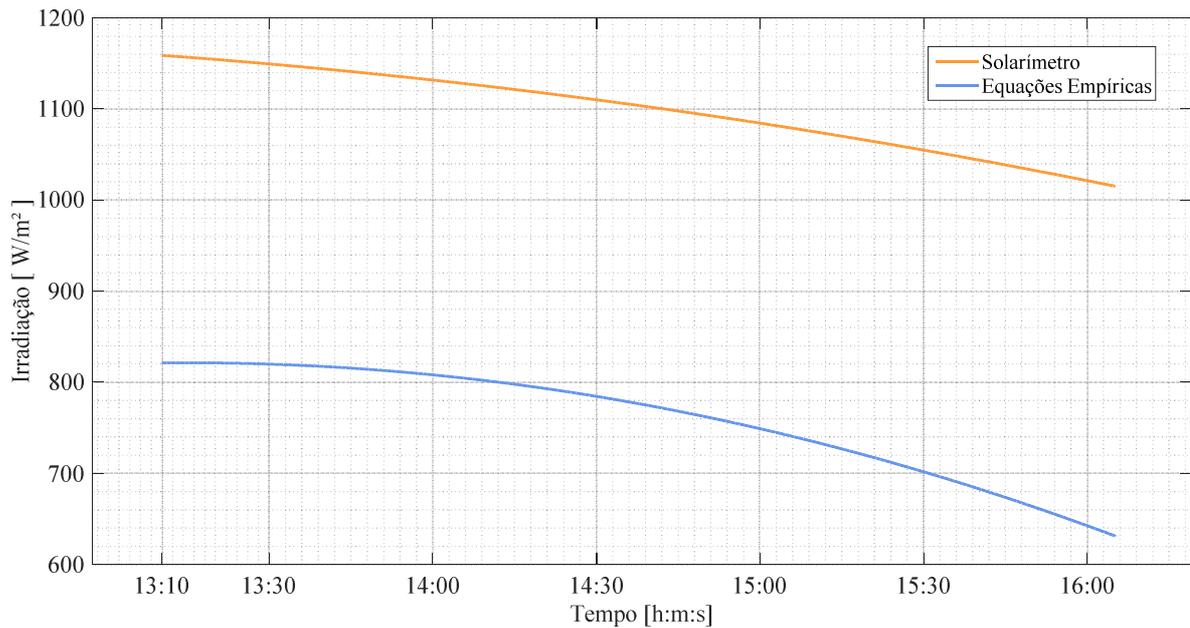


Figura 47 – Comparação entre a irradiação solar direta normal empírica (equações) e experimental (solarímetro).

Por fim, a Figura 48 permite a comparação direta entre a nova eficiência (empírica) e a energia absorvida pelo óleo térmico. Considerando o intervalo referente ao regime permanente, é possível notar que a potência útil apresenta valores de 110 W no início, porém vai decrescendo lentamente, atingindo o mínimo de 90W quando o experimento está próximo ao fim (às 16 h 00 min). Por outro lado, a eficiência (empírica) comporta-se de forma inversamente proporcional, apresentando valores mais elevados ao final do experimento.

Interessante observar (Figura 48) que as maiores potências obtidas no regime permanente ocorrem em uma faixa de eficiência menor. Se essa tendência for extrapolada para encontrar potências maiores, certamente, a eficiência será menor quando o sistema estiver operando com a insolação máxima do dia.

Infelizmente não foi possível realizar novos testes com o equipamento durante o período de um dia inteiro, o que poderia demonstrar o comportamento da eficiência do processo de forma mais clara.

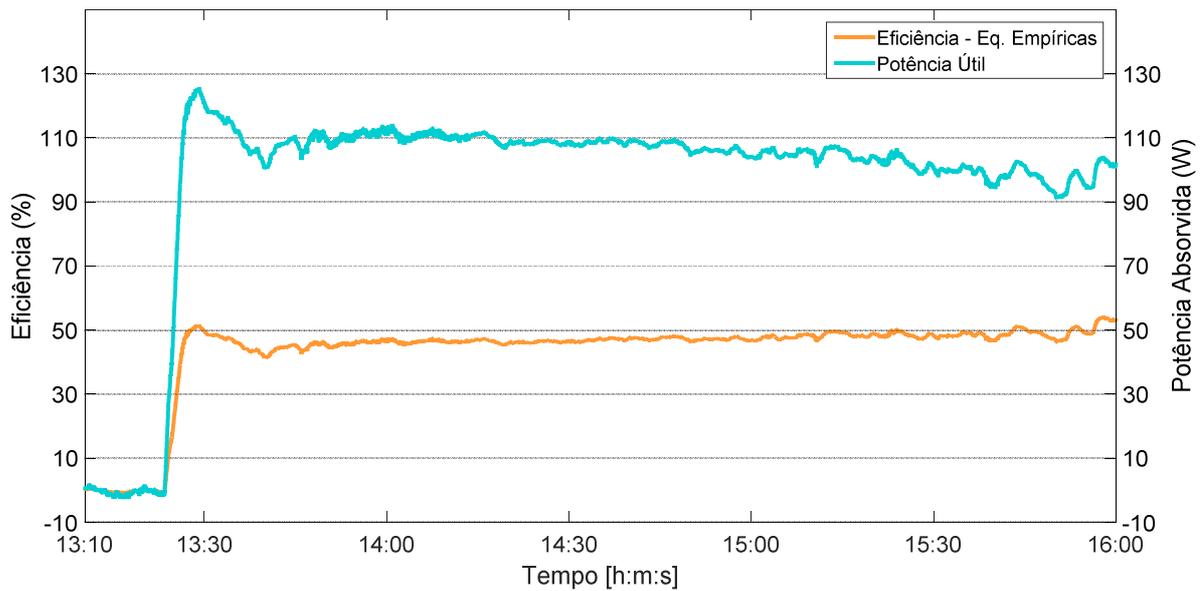


Figura 48 – Gráfico que permite a comparação entre a eficiência térmica dos sistema e a potência útil extraída da radiação solar incidente.

4.6 Incremento da Eficiência

A eficiência obtida neste experimento, certamente pode ser incrementada, uma vez que, o absorvedor não conta com isolamento térmico adequado, não possui barreira contra convecção e nem pintura seletiva.

Observando a Figura 49, que traz a fotografia do absorvedor recebendo a radiação concentrada, é possível afirmar que a eficiência ainda pode ser aumentada com algumas pequenas modificações no equipamento.

Observe que a área ocupada pela concentração da radiação (Figura 49) sobre a espiral é pequena, isto é, a área da espiral é muito maior que a necessária para receber o “foco pontual”, característico dos sistemas de concentração solar parabólica. Isso significa que o fluido térmico, ao percorrer a espiral, está absorvendo calor na região representada pela área mais iluminada, dissipando-o na região menos iluminada. Conseqüentemente, muita energia está sendo perdida neste escoamento, pois a temperatura obtida no foco e transmitida ao fluido, tendem a ser muito elevada, ocasionando grande perda de calor por convecção natural e forçada, assim como por radiação.

Dessa forma, diminuir a área de recepção dos raios concentrados é uma maneira de diminuir as perdas energéticas, aumentando a eficiência.

Um outro modo para aumentar a eficiência é a colocação de um vidro na frente do absorvedor, com a finalidade de diminuir as perdas de calor por convecção e radiação na superfície aquecida da espiral. Mesmo que haja uma perda da eficiência óptica dos raios, pois eles devem atravessar um meio que provoca distorção (vidro), ela é, ainda sim, menor que as perdas decorrentes da convecção.

Por fim, uma outra modificação que incrementaria a eficiência na absorção dos raios do Sol, é o revestimento da superfície frontal da espiral com uma fina película de tinta seletiva. Este revestimento, geralmente na cor negra, tem como característica aumentar a absorção da radiação incidente, o que pode resultar em aumento de até 30% (ABBAS, 2000).

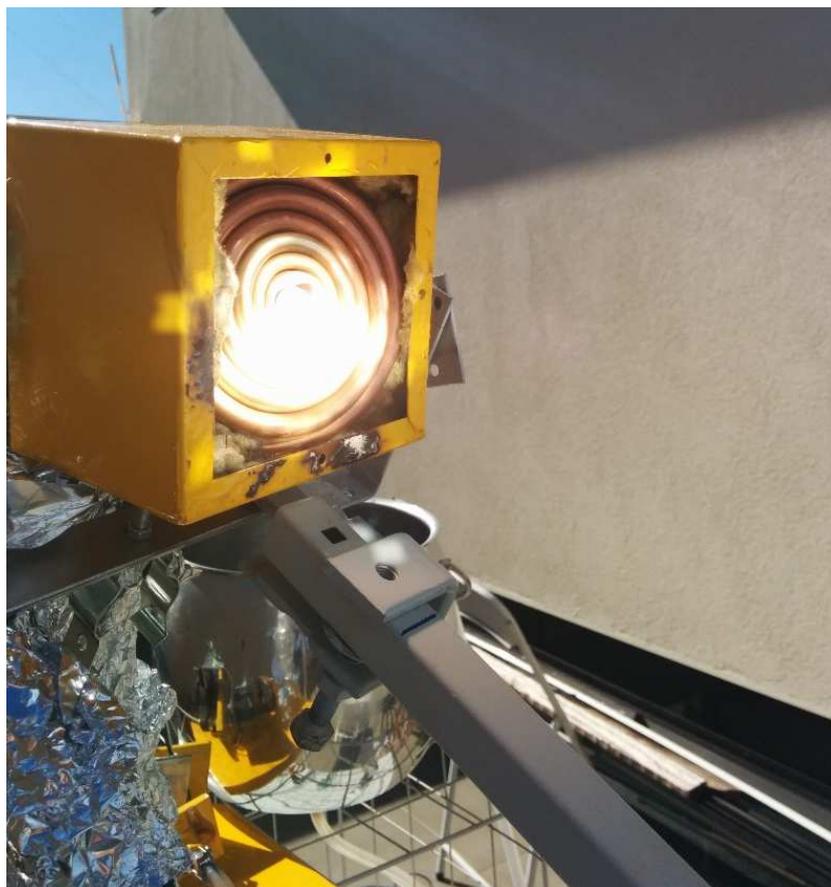


Figura 49 – Absorvedor recebendo a radiação solar concentrada.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve a pretensão de apresentar todos os passos, do projeto à construção, de um sistema concentrador solar com rastreamento automatizado, com movimentos simultâneos de dois eixos. Assim, grande parte do tempo utilizado neste projeto (aproximadamente 80%) foi para desenvolvimento de um sistema confiável de rastreamento solar, o que envolveu severo aprofundamento na parte da microeletrônica.

Ocorre que, pouco tempo resultou devido à complexa construção da bancada experimental, para o desenvolvimento de outros ensaios térmicos mais completos que demonstrariam a capacidade deste sistema operar durante um longo período.

Mesmo assim dois testes foram realizados com sucesso, o que permitiu obter todos dados térmicos dos diversos sensores instalados e, baseado neles, foi possível visualizar todo o comportamento do óleo térmico no interior do absorvedor, para que o balanço térmico pudesse ser realizado.

Além disso, para melhorar a análise da eficiência do sistema, optou-se por usar um conjunto de dados teóricos para irradiação solar direta, baseado unicamente em equações que preveem o seu comportamento durante todo o período.

Assim, os resultados obtidos permitiram chegar às seguintes conclusões:

- O ensaio para obtenção da temperatura máxima do sistema, conhecido como teste de estagnação, alcançou 476,5°C registrado às 16 h 25 min. O que era esperado para este instante do dia.
- Além disso, o teste de estagnação foi realizado com o primeiro tipo de absorvedor construído para este projeto, sendo que ele estava desprovido de qualquer forma de isolamento da superfície absorvedora, o que certamente contribuiu para que a temperatura ficasse abaixo de 500°C.
- A segunda parte do experimento mostrou o comportamento das temperaturas do fluido na entrada e na saída do absorvedor. A temperatura de saída do

absorvedor aumenta de 27 °c para 168,5 °c em apenas 360 segundos, o que representou um degrau notável durante o experimento. Durante o período em que o sistema entra em regime permanente as temperaturas de saída variam entre 162°C, até chegar à 147°C no final do experimento. Embora fosse possível aumentar ainda mais estas temperaturas, certamente o sistema entraria em colapso, porque os materiais empregados para o transporte do óleo térmico não suportam temperaturas acima de 220°C.

- A análise do início do regime permanente (13 h 45 min), permite afirmar que a energia útil absorvida pelo sistema tem média de 110w na primeira hora de operação, diminuindo gradualmente de 110 para 90 w no período final do experimento.
- A eficiência (baseada na irradiação do solarímetro) apresenta valores médios próximos ou iguais a 33% entre o segundo e o quinto períodos considerados em regime permanente (13 h 30 min às 15 h 30 min). Já no último período desta divisão (entre 15 h 30 min e 16 h 00 min), houve redução aproximada de um ponto percentual no valor da eficiência, o que não representa queda significativa comparado ao valor absoluto da eficiência.
- Considerando o novo cálculo da eficiência, baseada em dados teóricos, percebe-se um aumento significativo em relação à eficiência anterior. Em um primeiro momento, a eficiência permanece próxima de 45%, e vai aumentando até atingir aproximadamente 55% ao final do ensaio.
- Com o decorrer do tempo a irradiação empírica tende a diminuir mais rapidamente que a irradiação experimental. Às 13 h 30 min (início do experimento), a diferença entre as irradiações é de apenas 320 w/m², mas quando se aproxima do final, por volta de 16 h 00 min, essa diferença aumenta para 560 w/m². Assim, a irradiação teórica diminui mais rapidamente que a irradiação experimental, ocasionando aumento da eficiência do sistema.

6 TRABALHOS FUTUROS

É notável que, embora este trabalho tenha a finalidade última de avaliar o desempenho térmico do sistema proposto, esta parte não contou com o tempo necessário para avaliar todo o potencial deste equipamento, sendo possível realizar somente dois testes parciais, que serviram de base para este estudo.

Entretanto muitas outras possibilidades podem ser desenvolvidas com esta mesma bancada experimental, tais como:

Modificação do absorvedor: Otimização da superfície de absorção para que ela possua a exata área de absorção exigida pela concentração dos raios do Sol. Além disso, é possível melhorar o isolamento do absorvedor, evitando as perdas térmicas por radiação e convecção, que são consideráveis quando altas temperaturas são manipuladas.

Variação da vazão do óleo térmico: durante este trabalho, a vazão da bomba não foi alterada. Ela simplesmente foi fixada em uma rotação que assegurasse que as temperaturas máximas na saída do absorvedor não ultrapassassem os 200°C. Mas o projeto deste equipamento conta com a possibilidade de variar a vazão em qualquer momento do projeto, isto é, permite que o sistema possa regular automaticamente a melhor vazão para cada intensidade de irradiação, obtendo assim a melhor eficiência. Assim, os próximos estudos podem abranger a análise deste parâmetro, uma vez que o equipamento suporta tal configuração.

Testes em dias nublados: os ensaios deste trabalho contaram com dias sem nenhuma nebulosidade, porém é necessário testar o comportamento deste equipamento em dias que contenham algumas nuvens, para que se possa comparar a eficiência momentânea e suas implicações no seu resultado acumulado no dia.

Discretizar os momentos em que o sistema concentrador move os eixos: Embora estes dados pudessem ser coletados nos experimentos realizados, este parâmetro passou despercebido pelo autor. É importante saber em quais momentos o sistema de tracking responde aos estímulos de mudança de direção, na busca da melhor irradiação solar direta. Isso diz muito sobre a eficiência eletrônica sobre o sistema, e também permite dimensionar a

energia elétrica utilizada para a movimentação dos atuadores durante o dia. Esses dados entrariam nos cálculos da eficiência total do sistema.

7 REFERÊNCIAS

- ABBAS, A. Solchrome solar selective coatings—an effective way for solar water heaters globally. **Renewable Energy**, v. 19, n. 1-2, p. 145–154, jan. 2000.
- ABDALLAH, S.; BADRAN, O. O. Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. **Desalination**, v. 220, n. 1-3, p. 669–676, mar. 2008.
- ALAMI, A. H. Investigation in utilizing paraboloid concentrators for thermal perforation of metals. **Renewable Energy**, v. 56, p. 105–109, ago. 2013.
- ALCIATORE, D. G.; HISTAND, M. B. Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições: 2014.
- ARBAB, H.; JAZI, B.; REZAGHOLIZADEH, M. A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow. **Renewable Energy**, v. 34, n. 4, p. 1114–1118, abr. 2009.
- BADRAN, A. A. et al. Portable solar cooker and water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 8, p. 1605–1609, ago. 2010.
- BARLEV, D.; VIDU, R.; STROEVE, P. Innovation in concentrated solar power. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 95, n. 10, p. 2703–2725, out. 2011.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. **Solar Energy**, v. 77, n. 3, p. 269–280, set. 2004.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. [s.l.] Wiley New York etc., 2013.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. et al. Durability of solar reflector materials for secondary concentrators used in CSP systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 130, p. 51–63, nov. 2014.
- FERREIRA, J. **Benefits of Silicon-Based Temperature Sensors**. Disponível em: <<http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/benefits-silicon-based-temperature-sensors.html>>. Acesso em: 30 set. 2014.
- GESTE, G. DE E. T. E E. **Radiasol** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), , 2001.
- HOLBERT, K. E.; HAVERKAMP, C. J. **Impact of solar thermal power plants on water resources and electricity costs in the Southwest** North American Power Symposium (NAPS), 2009. **Anais...IEEE**, 2009
- HOTTEL, H. C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. **Solar Energy**, v. 18, n. 2, p. 129–134, 1976.
- IEA. **Energy Technology Perspectives 2010 Scenarios & Strategies to**. Paris: [s.n.].
- INCROPERA, F. P. DeWitt; Bergman; Lavine. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISAS, M. **IPMET - UNESP**. Disponível em: <ipmet.unesp.br/index2.php?menu_esq1=&abre=ipmet_html/estacao/index.php>. Acesso em: 27 jul. 2015.

INTEGRATED, M. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. San Jose, CA: [s.n.]. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. [s.l.] Elsevier Science, 2013.

KAUSHIKA, N. .; REDDY, K. . Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system. **Energy Conversion and Management**, v. 41, n. 7, p. 713–726, maio 2000.

KENNEDY, C. E.; TERWILLIGER, K. **Optical durability of candidate solar reflectors** ASME 2004 International Solar Energy Conference. **Anais...**American Society of Mechanical Engineers, 2004

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p. 1–19, jul. 1960.

London Metal Exchange. Disponível em: <https://www.lme.com/#>. Acesso em: 23 jul. 2015.

LOVEGROVE, K. et al. **Paraboloidal dish solar concentrators for multi-megawatt power generation** ISES Solar World Conference, Goteborg, Sweden. **Anais...**2003

MORTON, O. Solar energy: A new day dawning?: Silicon Valley sunrise. **Nature**, v. 443, n. 7107, p. 19–22, 7 set. 2006.

MOUSAZADEH, H. et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1800–1818, out. 2009.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; TRIEB, F. Concentrating solar power. **A review of the technology**. **Ingenia Inform QR Acad Eng**, v. 18, p. 43–50, 2004.

MUTHU, G.; SHANMUGAM, S.; VEERAPPAN, A. R. Solar Parabolic Dish Thermoelectric Generator with Acrylic Cover. **Energy Procedia**, v. 54, p. 2–10, 2014.

NUWAYHID, R. Y.; MRAD, F.; ABU-SAID, R. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications. **Renewable Energy**, v. 24, n. 2, p. 207–222, out. 2001.

PALAVRAS, I.; BAKOS, G. C. Development of a low-cost dish solar concentrator and its application in zeolite desorption. **Renewable Energy**, v. 31, n. 15, p. 2422–2431, dez. 2006.

PAPADOPOULOS, A. M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 1, p. 77–86, jan. 2005.

PATSKO, L. F. Tutorial Montagem da Ponte H. **Maxwell Bohr-Instrumentação Eletrônica**, 2006.

POULEK, V. **Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors** Photovoltaic Energy Conversion, 1994., Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1994, 1994 IEEE First World Conference on. **Anais...**IEEE, 1994

- PRINSLOO, G.; DOBSON, R.; SCHREVE, K. Mechatronic Platform with 12m² Solar Thermal Concentrator for Rural Power Generation in Africa. **Energy Procedia**, v. 49, p. 1470–1480, 2014.
- ROTH, P.; GEORGIEV, A.; BOUDINOV, H. Cheap two axis sun following device. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 7-8, p. 1179–1192, maio 2005.
- SANGANI, C.; SOLANKI, C. Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 91, n. 6, p. 453–459, 23 mar. 2007.
- SIVAKUMAR, V.; GANAPATHY SUNDARAM, E. Improvement techniques of solar still efficiency: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 246–264, dez. 2013.
- TRACSTAR. **Should You Install a Solar Tracker?** Disponível em: <<http://www.helmholz.us/smallpowersystems/Intro.pdf>>. Acesso em: 9 set. 2014.
- UMMADISINGU, A.; SONI, M. S. Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5169–5175, dez. 2011.
- VIKRAM, T. S.; REDDY, K. S. Investigation of convective and radiative heat losses from modified cavity based solar dish steam generator using ANN. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 87, p. 19–30, jan. 2015.
- WADE, P.; ANTENNAS, O.-F. P. D. **The W1GHZ Online Microwave Antenna Book, 1995 and 1998, Chapter 5**, [s.d.].
- YAO, Y. et al. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. **Renewable Energy**, v. 72, p. 88–98, dez. 2014.
- YETTOU, F. et al. Solar cooker realizations in actual use: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 288–306, set. 2014.

ANEXO I

Determinação da Irradiação Solar Teórica

No presente trabalho, utilizou-se dados da irradiação solar direta baseada em um solarímetro digital. Não foi possível, entretanto, calibrar este dispositivo a fim de verificar os possíveis desvios de leituras, tampouco foi possível obter os dados da irradiação direta do IPMET (INSTITUTO DE PESQUISAS, 2015), uma vez que este instituto não conta com instrumentação capaz de adquirir a parcela direta da irradiação.

Dessa forma, optou-se por estimar a irradiação através de métodos empíricos já utilizados com sucesso, pelo menos desde 1976, momento em que foi publicado o artigo (HOTTEL, 1976) que embasaram os cálculos abaixo.

Além disso, utilizou-se o método de Liu e Jordan (1960) para o cálculo da irradiação solar difusa.

Estimativa da Irradiação “Clear-Sky”

A irradiação solar sofre muitas perdas ao entrar na atmosfera terrestre, pois neste momento os raios do Sol são dispersados e/ou absorvidos pela massa de ar e pelas condições atmosféricas do momento.

Assim é útil definir um padrão conhecido como ‘Clear-Sky’, em que seja possível calcular a irradiação horária e diária que incide sobre uma superfície horizontal situada na superfície da Terra, baseada nestas condições padrões (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Dessa forma, Hottel (1976), apresentou um método teórico para estimar a irradiação solar direta em uma superfície sobre a Terra, podendo estar inclinada ou não. Para isso, este autor criou expressões que levam em conta atmosferas limpas, isto é, sem nuvens, além de computar o ângulo zenital, a altitude do local e o tipo de clima (tropical, subtropical e ártico).

Dessa forma, definiu a transmitância atmosférica para raios diretos assim:

$$\tau_b = a_0 + a_1 * e^{-\left(\frac{k}{\cos \theta_z}\right)} \quad (1.1)$$

As constantes a_0 , a_1 e k , são determinadas para atmosferas com visibilidade de 23 km, e são calculadas através das constantes a_0^* , a_1^* e k^* que são calculadas para altitudes terrenas de até 2,5 km, conforme equações abaixo:

$$a_0^* = 0.4237 - 0.0082 * (6 - A)^2 \quad (1.2)$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595 * (6.5 - A)^2 \quad (1.3)$$

$$k^* = 0.2711 - 0.01858 * (2.5 - A)^2 \quad (1.4)$$

Onde A = altura do terreno (dado em km). Para Bauru, A = 0.526 km.

Além disso, fatores de correção são utilizados para adequar estas constantes de acordo com o tipo de clima local, conforme Tabela I. 1:

Tabela I. 1 - Tabela para correção quanto ao tipo de clima.

Tipo Climático	R0	R1	Rk
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verão –Latitude Média	0.97	0.99	1.02
Sub-Ártico	0.99	0.99	1.01
Inverno – Latitude Média	1.03	1.01	1.00

Assim:

$$R_0 = \frac{a_0}{a_0^*} \quad (1.5)$$

$$R_1 = \frac{a_1}{a_1^*} \quad (1.6)$$

$$R_k = \frac{k}{k^*} \quad (1.7)$$

Já o ângulo zenital (θ_z), por sua vez, exige uma grande quantidade de passos para chegar até seu valor, cujas equações são demonstradas abaixo (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$\cos \theta_z = \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \varphi * \sin \delta \quad (1.5)$$

Onde:

φ = Latitude local.

δ = Declinação Solar.

ω = hora-ângulo.

- **DECLINAÇÃO SOLAR**

Para encontrar a declinação solar (δ):

$$\delta = 23.45 * \sin \left(\frac{360}{365} * (284 + n) \right) \quad (1.6)$$

Onde n é o número do dia no ano.

- **HORA-ÂNGULO**

Calculando a hora-ângulo (ω), temos a seguinte expressão (transformada em minutos):

$$\omega = (AST - 12 * 60) * 0.25 \quad (1.7)$$

Por sua vez, AST (hora Solar) é calculado pela seguinte expressão:

$$AST = LST + E + 4 * (SL - LL) - DS \quad (1.8)$$

Onde:

LST: hora local

SL: Longitude padrão

LL: Longitude local

DS: Horário de Versão

Sendo *E*, conhecida como Equação do Tempo, tem-se que:

$$E = 229.2 * (0.000075 + 0.001868 * \cos B) \\ - 0.032077 * \sin B - 0.014615 \\ * \cos(2 * B) - 0.04089 \\ * \sin(2 * B)) \quad (1.9)$$

Onde *B*, pode ser obtido da seguinte maneira:

$$B = (n - 1) * (360/365) \quad (1.10)$$

Somente após estas equações é possível obter o ângulo zenital.

Todas essas equações foram calculadas para cada minuto durante todo dia, de modo a ser possível a avaliação da irradiação em todos os momentos.

Dessa forma, a irradiação normal para dias ensolarados (G_{cnb}) é o produto da irradiação solar extraterrena normal à Terra (G_{on}) pela transmitância atmosférica para raios diretos (τ_b), conforme equação abaixo:

$$G_{cnb} = G_{on} * \tau_b \quad (1.11)$$

Onde:

$$G_{on} = G_{SC} * \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360 * n}{365}\right) \quad (1.12)$$

Em que:

- A) n é o número do dia do ano, que no caso do estudo é 108.
- B) Constante solar (G_{sc}) é igual a 1367 w/m².

Por fim, para o cálculo da irradiação horária, a irradiação direta normal horária (I_{cb}) é expressa da seguinte maneira:

$$I_{cb} = I_{on} * \tau_b * \cos \theta_z \quad (1.13)$$

Para calcular a transmitância da irradiação difusa Liu e Jordan (1960) desenvolveram uma expressão que calcula seu valor em função da transmitância da irradiação direta normal, conforme segue:

$$\tau_d = 0.271 - 0.294 * \tau_b \quad (1.14)$$

Para o dia do experimento, os resultados das equações acima, são demonstrados pelo gráfico da Figura I. 1 que mostra o comportamento do ângulo zenital durante todo o dia. Tanto no início do dia como no seu final a inclinação é igual a 90°. Mas à medida que se aproxima do meio-dia essa inclinação aumenta, chegando ao seu máximo, por volta de 12 h 30 min. Neste momento esse ângulo mede aproximadamente 32°.

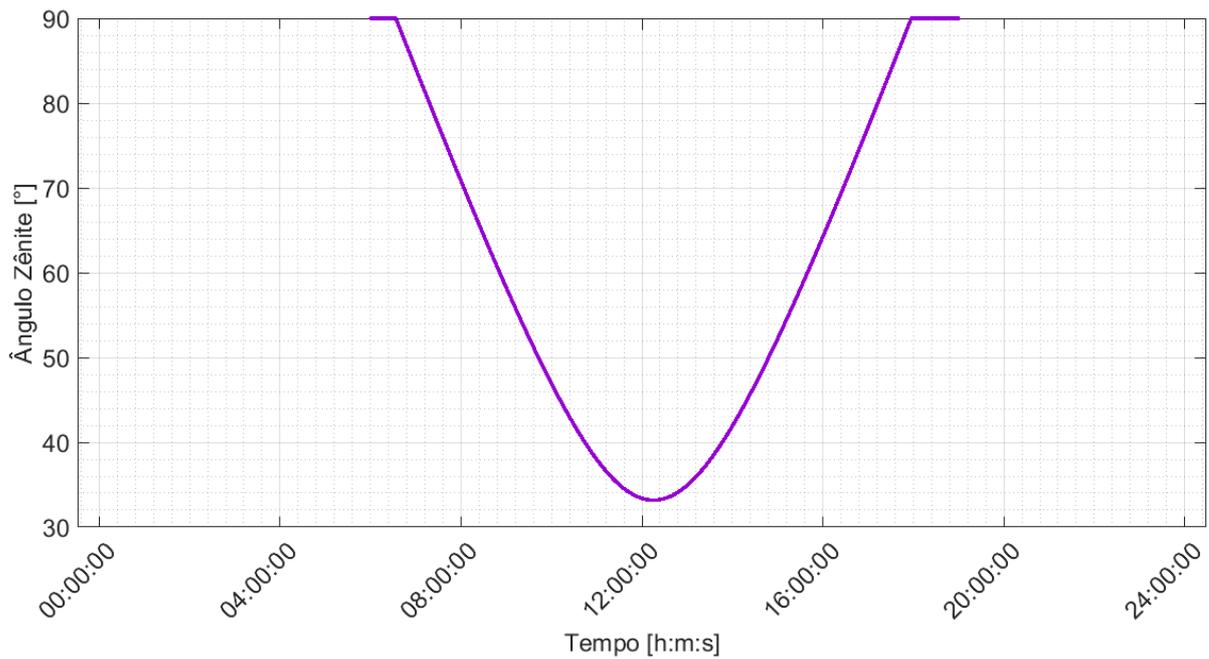


Figura I. 1 – Comportamento do ângulo zênital segundo as equações.

De forma análoga, a Figura I. 2 mostra a variação do ângulo de elevação (α), ou altitude solar, que é complementar do ângulo de zênite (θ_z), isto é:

$$\theta_z + \alpha = 90^\circ \quad (I.15)$$

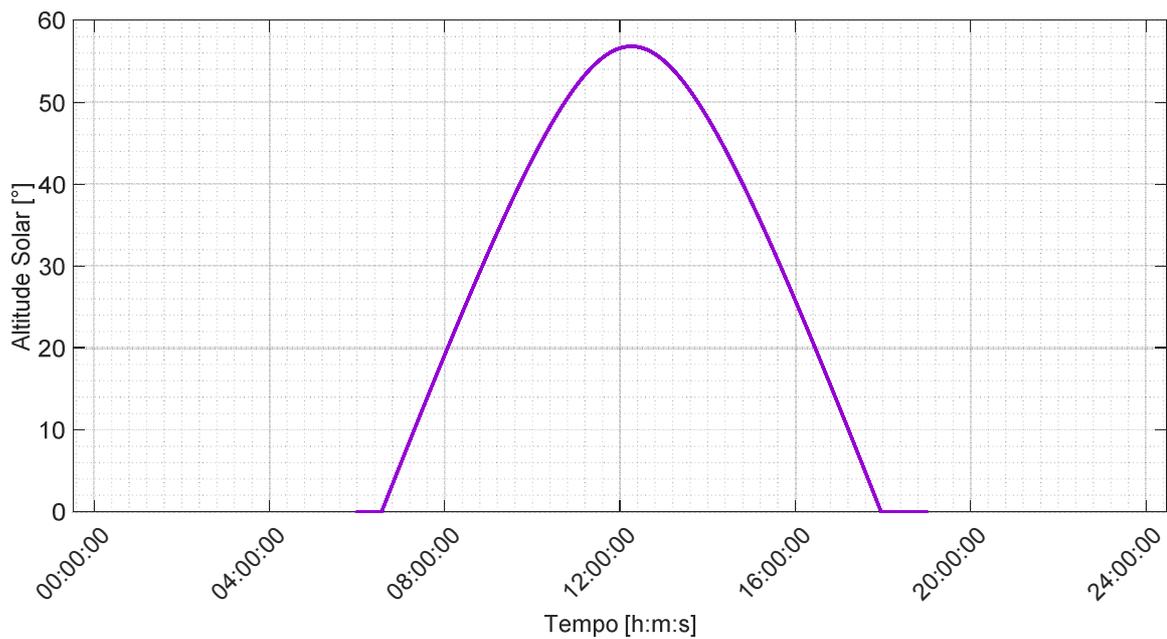


Figura I. 2 – Comportamento da altitude solar.

ANEXO II

Resultados da Irradiação Obtidos pelo IPMET

No dia dos ensaios realizados para este trabalho foi possível obter a curva da irradiação global obtida diretamente do site do IPMET (INSTITUTO DE PESQUISAS, 2015).

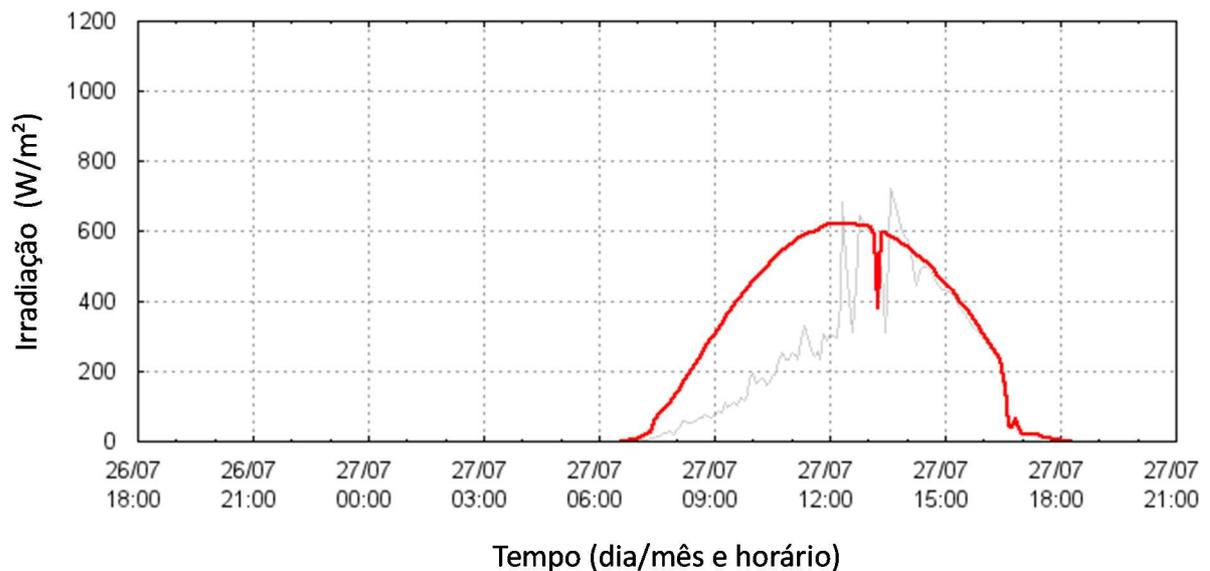


Figura II. 1 – Gráfico da irradiação global obtido no site do IPMET (INSTITUTO DE PESQUISAS, 2015).

Entretanto, para que fosse possível obter os dados contidos nesta figura, foi utilizado um algoritmo capaz de extrair os pixels vermelhos da curva e com estes pontos gerar um gráfico discretizando todos eles.

O resultado da aplicação deste algoritmo está demonstrado na Figura II. 2.

Com estes pontos encontrados foi possível estimar a irradiação global instantânea, além de permitir o cálculo da radiação total de um dia (que não foi analisada neste trabalho).

Importante observar, que na Figura II. 1 existe um vale na curva, logo após às 13 h 00 min, o que não é observado na Figura II. 2. Isso porque, o piranômetro do IPMET está instalado em um local suscetível a sobreamento, fato observado todos os dias.

Como não houve a presença de nuvens neste dia, assumimos que a curva da irradiação poderia ser prolongada, através da superposição de um polinômio que representasse seu

comportamento natural. Portanto, na Figura II. 2, a queda na irradiação foi suprimida por curva polinomial adequada.

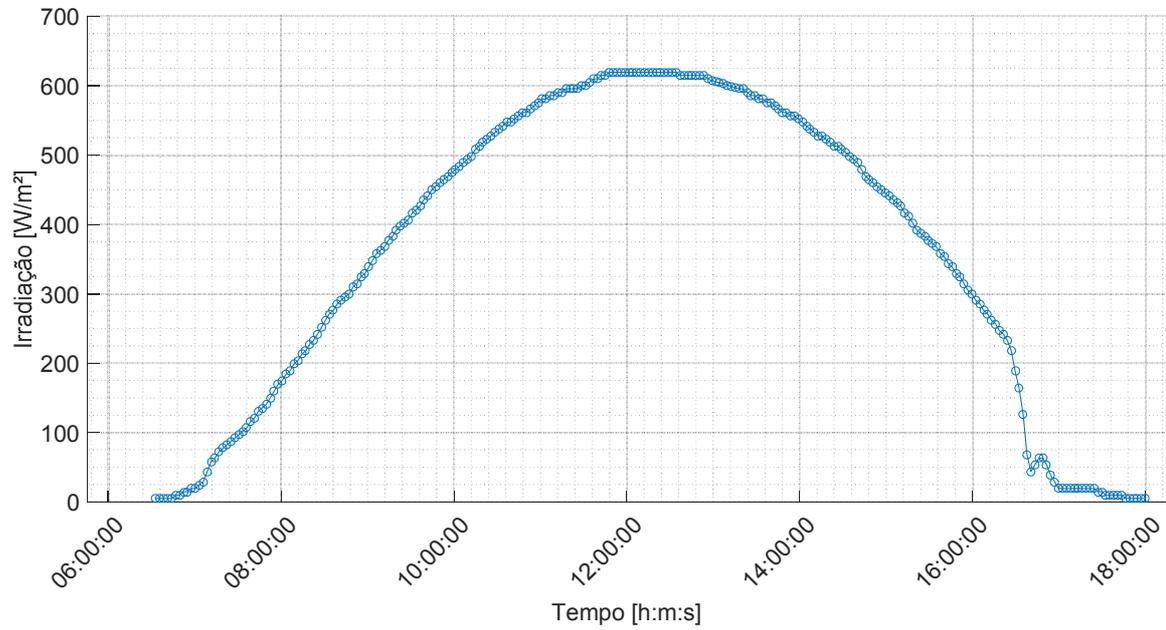


Figura II. 2 – Resultado da aplicação do algoritmo para obtenção da curva da irradiação solar global.

ANEXO III

Resultados da irradiação solar obtida pelo *software* Radasol

O programa Radasol (GESTE, 2001) foi utilizado para adquirir os dados da irradiação global referente ao mês de julho.

Assim foi possível determinar a máxima irradiação global para este mês: 801 W/m² (Tabela III. 1).

Tabela III. 1 – Dados do programa Radasol.

Ano	Mês	Dia	Hora	ETRH	Global	Direta	
1	7	1	1	7	225	24	0
1	7	1	1	8	478	197	36
1	7	1	1	9	684	350	128
1	7	1	1	10	830	482	250
1	7	1	1	11	905	228	6
1	7	1	1	12	905	521	264
1	7	1	1	13	830	394	114
1	7	1	1	14	684	209	12
1	7	1	1	15	478	207	45
1	7	1	1	16	225	62	2
1	7	1	1	17	0	3	0
1	7	1	1	18	0	0	0
1	7	2	2	7	226	64	3
1	7	2	2	8	479	229	69
1	7	2	2	9	685	331	102
1	7	2	2	10	831	596	466
1	7	2	2	11	906	692	572
1	7	2	2	12	906	416	109
1	7	2	2	13	831	537	355
1	7	2	2	14	685	299	66
1	7	2	2	15	479	330	244
1	7	2	2	16	226	90	14
1	7	2	2	17	0	6	0
1	7	2	2	18	0	0	0
1	7	3	3	7	227	135	74
1	7	3	3	8	480	326	237
1	7	3	3	9	686	515	422
1	7	3	3	10	832	667	557
1	7	3	3	11	907	751	627
1	7	3	3	12	907	751	627
1	7	3	3	13	832	667	557
1	7	3	3	14	686	515	422
1	7	3	3	15	480	326	237
1	7	3	3	16	227	135	74
1	7	3	3	17	0	8	0
1	7	3	3	18	0	0	0
1	7	4	4	7	228	116	42
1	7	4	4	8	481	180	23
1	7	4	4	9	687	399	207
1	7	4	4	10	833	169	3
1	7	4	4	11	909	248	9
1	7	4	4	12	909	323	33
1	7	4	4	13	833	244	11
1	7	4	4	14	687	294	60
1	7	4	4	15	481	64	1
1	7	4	4	16	228	21	0
1	7	4	4	17	0	3	0
1	7	4	4	18	0	0	0
1	7	5	5	7	229	91	14
1	7	5	5	8	482	128	4
1	7	5	5	9	688	201	9
1	7	5	5	10	834	448	190
1	7	5	5	11	910	395	86
1	7	5	5	12	910	356	53
1	7	5	5	13	834	168	3
1	7	5	5	14	688	202	10
1	7	5	5	15	482	212	48

1	7	5	16	229	13	0
1	7	5	17	0	3	0
1	7	5	18	0	0	0
1	7	6	7	230	145	91
1	7	6	8	483	349	275
1	7	6	9	690	550	460
1	7	6	10	836	711	594
1	7	6	11	912	801	669
1	7	6	12	912	801	669
1	7	6	13	836	711	594
1	7	6	14	690	550	460
1	7	6	15	483	349	275
1	7	6	16	230	145	91
1	7	6	17	0	9	0
1	7	6	18	0	0	0
1	7	7	7	231	130	63
1	7	7	8	484	186	26
1	7	7	9	691	298	63
1	7	7	10	837	293	28
1	7	7	11	913	549	311
1	7	7	12	913	651	506
1	7	7	13	837	510	298
1	7	7	14	691	264	36
1	7	7	15	484	282	149
1	7	7	16	231	106	28
1	7	7	17	0	5	0
1	7	7	18	0	0	0
1	7	8	7	232	93	15
1	7	8	8	486	310	201
1	7	8	9	693	504	401
1	7	8	10	839	462	209
1	7	8	11	915	641	486
1	7	8	12	915	653	507
1	7	8	13	839	409	129
1	7	8	14	693	392	190
1	7	8	15	486	185	25
1	7	8	16	232	138	77
1	7	8	17	0	7	0
1	7	8	18	0	0	0
1	7	9	7	234	103	24
1	7	9	8	487	268	122
1	7	9	9	694	408	218
1	7	9	10	841	542	356
1	7	9	11	917	744	622
1	7	9	12	917	690	566
1	7	9	13	841	634	521
1	7	9	14	694	407	217
1	7	9	15	487	287	156
1	7	9	16	234	144	86
1	7	9	17	0	9	0
1	7	9	18	0	0	0
1	7	10	7	235	99	19
1	7	10	8	489	207	41
1	7	10	9	696	328	93
1	7	10	10	843	279	22
1	7	10	11	919	386	75
1	7	10	12	919	283	16
1	7	10	13	843	205	5
1	7	10	14	696	146	3
1	7	10	15	489	224	58
1	7	10	16	235	31	0
1	7	10	17	0	4	0
1	7	10	18	0	0	0
1	7	11	7	236	76	5
1	7	11	8	491	245	84
1	7	11	9	698	418	235
1	7	11	10	845	452	189
1	7	11	11	921	674	540
1	7	11	12	921	588	379
1	7	11	13	845	593	452
1	7	11	14	698	407	214
1	7	11	15	491	278	136
1	7	11	16	236	100	20
1	7	11	17	0	8	0
1	7	11	18	0	0	0
1	7	12	7	238	58	1
1	7	12	8	492	297	170
1	7	12	9	700	176	5
1	7	12	10	847	540	347
1	7	12	11	923	530	268
1	7	12	12	923	285	17
1	7	12	13	847	343	57
1	7	12	14	700	366	144
1	7	12	15	492	241	77
1	7	12	16	238	30	0
1	7	12	17	0	5	0
1	7	12	18	0	0	0
1	7	13	7	239	111	30
1	7	13	8	494	271	122

1	7	13	9	702	469	329
1	7	13	10	849	590	442
1	7	13	11	925	716	596
1	7	13	12	925	653	500
1	7	13	13	849	653	542
1	7	13	14	702	465	322
1	7	13	15	494	255	96
1	7	13	16	239	109	28
1	7	13	17	0	8	0
1	7	13	18	0	0	0
1	7	14	7	241	135	65
1	7	14	8	496	266	112
1	7	14	9	704	471	333
1	7	14	10	851	667	557
1	7	14	11	928	661	513
1	7	14	12	928	642	479
1	7	14	13	851	645	531
1	7	14	14	704	480	349
1	7	14	15	496	287	148
1	7	14	16	241	115	34
1	7	14	17	0	9	0
1	7	14	18	0	0	0
1	7	15	7	243	91	12
1	7	15	8	498	286	145
1	7	15	9	707	373	149
1	7	15	10	854	489	245
1	7	15	11	930	476	174
1	7	15	12	930	503	216
1	7	15	13	854	348	60
1	7	15	14	707	480	347
1	7	15	15	498	319	207
1	7	15	16	243	86	9
1	7	15	17	0	8	0
1	7	15	18	0	0	0
1	7	16	7	245	74	4
1	7	16	8	500	150	8
1	7	16	9	709	372	148
1	7	16	10	856	116	1
1	7	16	11	933	348	43
1	7	16	12	933	386	70
1	7	16	13	856	232	8
1	7	16	14	709	366	138
1	7	16	15	500	249	84
1	7	16	16	245	113	31
1	7	16	17	0	4	0
1	7	16	18	0	0	0
1	7	17	7	246	159	105
1	7	17	8	502	357	277
1	7	17	9	711	437	260
1	7	17	10	859	517	294
1	7	17	11	936	605	400
1	7	17	12	936	681	543
1	7	17	13	859	605	462
1	7	17	14	711	475	333
1	7	17	15	502	335	235
1	7	17	16	246	134	58
1	7	17	17	0	10	0
1	7	17	18	0	0	0
1	7	18	7	248	112	27
1	7	18	8	505	360	280
1	7	18	9	714	531	431
1	7	18	10	862	502	263
1	7	18	11	938	640	467
1	7	18	12	938	656	497
1	7	18	13	862	482	227
1	7	18	14	714	500	379
1	7	18	15	505	293	153
1	7	18	16	248	94	13
1	7	18	17	0	9	0
1	7	18	18	0	0	0
1	7	19	7	250	89	9
1	7	19	8	507	297	158
1	7	19	9	716	447	275
1	7	19	10	865	552	356
1	7	19	11	941	536	265
1	7	19	12	941	698	565
1	7	19	13	865	637	513
1	7	19	14	716	455	291
1	7	19	15	507	336	232
1	7	19	16	250	144	74
1	7	19	17	0	10	0
1	7	19	18	0	0	0
1	7	20	7	252	108	22
1	7	20	8	509	259	94
1	7	20	9	719	414	210
1	7	20	10	867	595	436
1	7	20	11	944	498	200
1	7	20	12	944	630	442
1	7	20	13	867	423	134

1	7	20	14	719	542	446
1	7	20	15	509	323	207
1	7	20	16	252	109	23
1	7	20	17	0	10	0
1	7	20	18	0	0	0
1	7	21	7	255	112	26
1	7	21	8	512	196	27
1	7	21	9	722	491	356
1	7	21	10	870	292	24
1	7	21	11	947	533	255
1	7	21	12	947	646	469
1	7	21	13	870	331	44
1	7	21	14	722	436	248
1	7	21	15	512	193	25
1	7	21	16	255	89	9
1	7	21	17	0	8	0
1	7	21	18	0	0	0
1	7	22	7	257	116	29
1	7	22	8	514	261	94
1	7	22	9	725	363	125
1	7	22	10	873	541	327
1	7	22	11	950	421	97
1	7	22	12	950	707	574
1	7	22	13	873	570	383
1	7	22	14	725	342	97
1	7	22	15	514	247	75
1	7	22	16	257	106	19
1	7	22	17	0	10	0
1	7	22	18	0	0	0
1	7	23	7	259	76	4
1	7	23	8	517	204	31
1	7	23	9	728	492	353
1	7	23	10	877	433	142
1	7	23	11	954	515	221
1	7	23	12	954	737	613
1	7	23	13	877	466	191
1	7	23	14	728	317	69
1	7	23	15	517	337	227
1	7	23	16	259	111	23
1	7	23	17	0	10	0
1	7	23	18	0	0	0
1	7	24	7	261	117	28
1	7	24	8	520	214	38
1	7	24	9	731	473	314
1	7	24	10	880	540	319
1	7	24	11	957	619	409
1	7	24	12	957	748	624
1	7	24	13	880	448	162
1	7	24	14	731	355	111
1	7	24	15	520	349	247
1	7	24	16	261	164	102
1	7	24	17	0	12	0
1	7	24	18	0	0	0
1	7	25	7	264	51	1
1	7	25	8	523	161	9
1	7	25	9	734	194	6
1	7	25	10	883	453	168
1	7	25	11	961	372	53
1	7	25	12	961	314	23
1	7	25	13	883	558	351
1	7	25	14	734	454	273
1	7	25	15	523	83	1
1	7	25	16	264	22	0
1	7	25	17	0	8	0
1	7	25	18	0	0	0
1	7	26	7	266	72	3
1	7	26	8	525	114	2
1	7	26	9	737	448	259
1	7	26	10	887	253	11
1	7	26	11	964	692	541
1	7	26	12	964	434	106
1	7	26	13	887	453	165
1	7	26	14	737	198	7
1	7	26	15	525	162	9
1	7	26	16	266	79	4
1	7	26	17	0	9	0
1	7	26	18	0	0	0
1	7	27	7	269	114	23
1	7	27	8	528	306	159
1	7	27	9	740	455	272
1	7	27	10	890	585	399
1	7	27	11	968	770	643
1	7	27	12	968	761	636
1	7	27	13	890	610	448
1	7	27	14	740	502	362
1	7	27	15	528	343	229
1	7	27	16	269	157	83
1	7	27	17	0	14	0
1	7	27	18	0	0	0

