



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LICENCIATURA EM FÍSICA - RAMO APLICADA
SECÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
TRABALHO DE LICENCIATURA

DESEMPENHO TÉRMICO DO COLECTOR SOLAR
DE TUBOS EVACUADOS PARA COZINHA SOLAR

Autor:
Simão Artur Zunguze

Supervisor:
Prof. dr. Luís Chea

Co-Supervisores:
Mestre Alberto Navungo
Lic. Cláudio Tingote
Mestre Tomas Nhabetse

Maputo, Setembro de 2024

Agradecimentos

Agradecer ao corpo docente do Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), que tornou possível a minha formação acadêmica. Em especial, ao dr. Cláudio Tingote, ao dr. Alberto Navungo, Dr. Nhabetse, Dr. Michael Becker e Prof. Luís Chea pela assistência, disposição e pelo conhecimento transmitido.

Aos meus Pais, Sra. Madalena e Sr. Artur pela boa educação, carinho, amor, pensando na minha melhor formação como pessoa. Aos meus irmão, Jordão, Florda e Zeferino, aos amigos, Filipe, Bila, Nelson e Érica que também me apoiaram durante essa caminhada com muito companheirismo, carinho e paciência. A minha querida esposa Cristina Muthemba pelo amor e atenção dispensada durante a elaboração deste trabalho.

Aos companheiros de batalha na academia, Mavie (Mana), Ibrahim (Cota Ibra), Vasco (Lord B), Dércio Bene entre outros pela camaradagem durante a caminhada.

O meu *Khanimanbo* aos gigantes donos dos ombros nos quais me apoiei.

Declaração de Honra

Declaro, por minha honra, que o presente trabalho acadêmico foi elaborado por mim próprio. Não se recorreu a quaisquer outras fontes, para além das indicadas, e todas as formulações e conceitos usados, quer adoptados literalmente ou adaptados a partir das suas ocorrências originais (em fontes impressas, não impressas ou na internet), se encontram adequadamente identificados e citados, com observância das convenções do trabalho académico em vigor.

Mais declaro que este trabalho não foi apresentado, para efeitos de avaliação, a qualquer outra entidade ou instituição, para além da Universidade Eduardo Mondlane.

Autor

(Simão Artur Zunguze)

Resumo

Os colectores solares de tubos evacuados são ainda pouco conhecidos em Moçambique, contudo em algumas regiões como a China e Europa são muito usados, por ter maior capacidade de aquecimento mesmo em dias de céu nublado (radiação difusa). Esta tecnologia pode ser usada para diferentes fins domésticos e industriais. Neste trabalho pretende-se avaliar experimentalmente o desempenho térmico de um colector solar de tubos evacuados instalado no terraço do Departamento de Física, Faculdade de Ciências da UEM para aquecimento de um fluido térmico a ser usado num fogão solar. O colector solar de tubos evacuados é constituído por 15 tubos de borosilicato com área de abertura de $1,39 \text{ m}^2$ e área de absorção de $1,21 \text{ m}^2$. Foi usada uma metodologia baseada em um balanço de energia térmica entre o colector e o fluido térmico. Para medição da temperatura e radiação solar foram usados termopares tipo K , uma célula fotovoltaica e para aquisição de dados foi usado um datalogger NI 9213. Para automação dos dados um *software* baseado na linguagem de programação orientada ao objecto LabVIEW foi desenvolvido. Foram analisados para um conjunto de vazões mássicas os perfis de temperaturas na entrada e saída do fluido térmico, assim como foi calculado a eficiência. Os resultados mostraram que o comportamento térmico do colector em 2h de medição a uma radiação média de $889,32 \text{ W/m}^2$ a temperatura máxima de estagnação foi de $186,54^\circ\text{C}$. Para as vazões mássicas de $1,62 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $6,45 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,51 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ as temperaturas médias foram $133,87 \pm 28,87 \text{ }^\circ\text{C}$, $90,18 \pm 15,24 \text{ }^\circ\text{C}$, $69,51 \pm 9,22 \text{ }^\circ\text{C}$, as eficiências foram 23%, 55,28% e 57,41% respectivamente.

Palavras-chave: Energia solar; colector solar tubos evacuados, desempenho térmico, fogão solar.

Abstract

Evacuated tube solar collectors are still little known in Mozambique, however in some regions such as China and Europe they are widely used because they have greater heating capacity even on cloudy days (diffuse radiation). This technology can be used for different domestic and industrial purposes. In this work we intend to experimentally evaluate the thermal performance of evacuated tubes solar collector installed at the top of the Faculty of science, department of Physics of Eduardo Mondlane University for heating a thermal fluid to be used in a solar cooker. The evacuated tube solar collector consists of 15 borosilicate tubes with an aperture area of 1.39 m² and an absorption area of 1.21 m². A methodology based on a thermal energy balance between the collector and the thermal fluid was used. *K*-type thermocouples and a photovoltaic cell were used to measure temperature and solar radiation, and a NI 9213 datalogger was used for data acquisition. For data automation, software based on the object-oriented programming language LabVIEW was developed. The temperature profiles at the inlet and outlet of the thermal fluid were analyzed for a set of mass flows, as well as the efficiency was calculated. The results showed for an average radiation of 889.32 W/m² a stagnation temperature of 186.54°C. For mass flows of $1.62 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, $6.45 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.51 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ the average temperatures were $133.87 \pm 28.87 \text{ }^\circ\text{C}$, $90.18 \pm 15.24 \text{ }^\circ\text{C}$, $69.51 \pm 9.22 \text{ }^\circ\text{C}$, the efficiencies were 23%, 55.28% and 57.41% respectively.

Keywords: Solar energy; solar collector evacuated tubes, thermal performance, solar cooker.

Conteúdo

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificação do Problema	2
1.3 Objectivos da Pesquisa	2
1.3.1 Objectivo Geral	2
1.3.2 Objectivos Específicos	2
1.4 Perguntas de Pesquisa	3
1.5 Estrutura do Trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Radiação Solar	4
2.1.1 O Sol	4
2.1.2 Irradiância Solar na Terra	6
2.1.3 Componentes da Radiação Solar	6
2.1.4 Instrumentos de Medição da Radiação Solar	7
2.1.5 Direcção da Radiação Incidente Numa Superfície	8
2.2 Colectores Solares	10
2.2.1 Colector Solar de Tubo Evacuado	11
2.2.2 Modelação Matemática	14
2.3 Cozinha Solar	16
3 Material e Métodos	17
3.1 Localização e Descrição do Sistema	17
3.2 Equipamentos Utilizados	19
3.2.1 Colector Solar de Tubos Evacuados	19
3.2.2 Fluido Termodinâmico	20
3.2.3 Reservatórios do Fluido Térmico	20
3.3 Instrumentos de Colecta de Dados	21
3.3.1 Data Logger	21
3.3.2 Medição da Radiação Solar	22
3.3.3 Medição da Temperatura	22
3.4 Sistema de Aquisição de Dados	23
3.4.1 Programa Computacional	23
3.5 Medição da Vazão	27

3.6	Determinação da Quantidade de Calor no Sistema	27
3.6.1	Determinação da Quantidade de Calor Útil	27
3.6.2	Determinação da Quantidade de Calor Incidente	27
3.6.3	Determinação da Quantidade de Calor Perdido	27
3.7	Determinação da Eficiência Térmica do Colector	28
4	Resultados e Discussão	29
4.1	Vazão Mássica	29
4.2	Programa Computacional	29
4.3	Avaliação dos Perfis de Temperatura no Colector Solar	30
4.4	Energia Produzida pelo Colector Solar e as Perdas Térmicas	34
4.5	Análise da Eficiência do Colector	37
4.5.1	Temperatura de Estagnação	38
5	Conclusões e Recomendações	39
5.1	Conclusão	39
5.2	Recomendações	40
6	Referências Bibliográficas	41

Lista de Figuras

1	Principal tipo de energia ou combustível usado para cozinha (Finscope, 2019).	1
2	Estrutura solar. Fonte: Duffie and Beckman (2013).	4
3	Intensidade do fluxo radiante emitido pelo Sol (Ponzoni, Antunes, Pinto, Lamparelli, & Junior, 2015).	5
4	Componentes da radiação solar segregados pela atmosfera e superfície (Badescu, 2014).	6
5	(a) Piranômetro termoelétrico e (b) fotovoltaico (Costa, 2021).	7
6	Periliômetro (Costa, 2021).	8
7	Ângulo de incidência e ângulo de inclinação (Sawhney, 2012).	8
8	Classificação dos colectores solares (Al-Waeli, Kazem, Chaichan, & Sopian, 2019; Pandey, Pandey, & Garg, 2021).	10
9	Desenho esquemático de um tubo a vácuo. Adaptado de Zhiqiang (2005).	11
10	Extracção de calor do tipo transferência directa. Fonte: Morrison, Di, and Mills (1993).	12
11	Detalhe do ciclo de trabalho do <i>heat pipe</i> . Fonte: adaptado de Apricus (2019) conforme Ortiz (2020).	13
12	Componentes de colector de tipo <i>heat pipe</i> . Fonte: adaptado de Hudon (2014) conforme Ortiz (2020).	14
13	Eficiência η dos coletores solares em função do parâmetro x . CSP, coletor de placa plana; CSTE, coletor de tubo de vidro evacuado; CSC, coletor solar concentrador (Khartchenko & Kharchenko, 2013).	16
14	Ilustração do sistema de testes. Fonte: autor	17
15	Diagrama esquemático do sistema de testes. Fonte: autor	18
16	Colector solar de tubos evacuados. Fonte: autor.	19
17	Data logger. Fonte: autor.	21
18	Piranómetro fotovoltaico. Fonte: autor.	22
19	Termopar tipo k. Fonte: autor.	23
20	Equipamento de visualização e aquisição de dados. Fonte: autor.	23
21	Esquema de aquisição de dados. Fonte: autor.	23
22	Ilustração do painel frontal do programa final construído. Fonte: autor.	26
23	Variação da temperatura e eficiência em função da radiação solar do dia 09/06/22. Fonte: autor	30
24	Variação da temperatura e eficiência em função da radiação solar do dia 10/06/22. Fonte: autor	31
25	Variação da temperatura e eficiência em função da radiação solar do dia 16/06/22. Fonte: autor	32

26	Varição da quantidade de calor incidente, utilizado e perdido em função do tempo (09/06/22). Fonte: Autor	34
27	Varição da quantidade de calor incidente, utilizado e perdido em função do tempo (10/06/22). Fonte: Autor	35
28	Varição da quantidade de calor incidente, utilizado e perdido em função do tempo (16/06/22). Fonte: Autor	36
29	Curva característica do colector solar. Fonte: autor	37
30	Varição da temperatura de estagnação. Fonte: autor	38

Lista de Tabelas

1	Especificações técnicas do colector solar. Fonte: ITS TM	19
2	Especificações técnicas do tubo evacuado. Fonte: ITS TM	20
3	Especificações técnicas do fluido termodinâmico. Fonte: Fuchs Renolin Therm	20
4	Propriedades termo-mecânicas do balde. Fonte: Braskem	21
5	Modos de temporização e mostragem do datalogger NI 9213	21
6	Determinação da vazão mássica. Fonte: Autor	29
7	Ficheiro Excel contendo os parâmetros para análise do desempenho do colector solar produzido pelo programa computacional. Fonte: autor	29

Lista de Siglas e Abreviaturas

- CSC – Colector Solar Composto;
- CSP – Colector Solar de Placa Plana;
- CSTE – Colector Solar de Tubo Evacuado;
- CTE – Célula de Tecnologia Equivalente;
- DAQ – *Data AcQuisition*
- GPIB – *General Purpose Interface Bus*;
- LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*;
- NI – *National Instruments*;
- PXI – *PCI eXtensions for Instrumentation*;
- RS-232 – *Recommended Standard 232*
- TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*;
- USB – *Universal Serial Bus*;
- VI – *Virtual Instrument*;
- WHO – *World Health Organization*.

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

A_c - Área do colector, m^2 ;

C_p - Calor específico do fluido térmico, $J/(kg \cdot K)$;

dt - Variação infinitesimal do tempo, s ;

F_R - Factor de eficiência;

G - Radiação global, W/m^2 ;

G_b - Radiação difusa, W/m^2 ;

G_d - Radiação directa, W/m^2 ;

\dot{m} - Vazão mássica, kg/s ;

Q_a - Calor absorvido, W ;

Q_p - Calor perdido, W ;

Q_u - Calor útil, W ;

T_a - Temperatura ambiente, $^{\circ}C$;

T_e - Temperatura do óleo térmico na entrada do colector, $^{\circ}C$;

T_m - Temperatura média do óleo térmico no colector, $^{\circ}C$;

T_s - Temperatura do óleo térmico na saída do colector, $^{\circ}C$;

U_L - Coeficiente de perda de calor;

V - Volume, m^3 ;

Símbolos Gregos

α - Ângulo de altitude, $^{\circ}$;

γ - Ângulo de azimute de superfície, $^{\circ}$;

β - Ângulo de inclinação, $^{\circ}$;

δ - Declinação, $^{\circ}$;

Δt - Variação do tempo, s ;

η - Eficiência do coletor;

θ - Ângulo de incidência, $^{\circ}$;

λ - Latitude, $^{\circ}$;

ρ - Densidade mássica do óleo térmico, kg/m^3 ;

$(\tau\alpha)$ - Produto efetivo do coeficiente de transmitância e absorptância;

ω - Ângulo horário, $^{\circ}$;

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO

1 Introdução

1.1 Motivação

Cozinhar é parte integrante de todo ser humano, pois a alimentação é uma das necessidades básicas da vida. As fontes de energia comumente utilizadas para cozinhar em Moçambique segundo o inquérito Finscope (2019) são: lenha com 64% da população, carvão vegetal com 22%, electricidade da rede com 8%, gás de petróleo liquefeito GPL 3%, energia solar 1%, querosene 1%, gerador privado 0,1%, e outros ou os que não cozinham fazem parte dos 3% da população conforme ilustra a Figura 1.

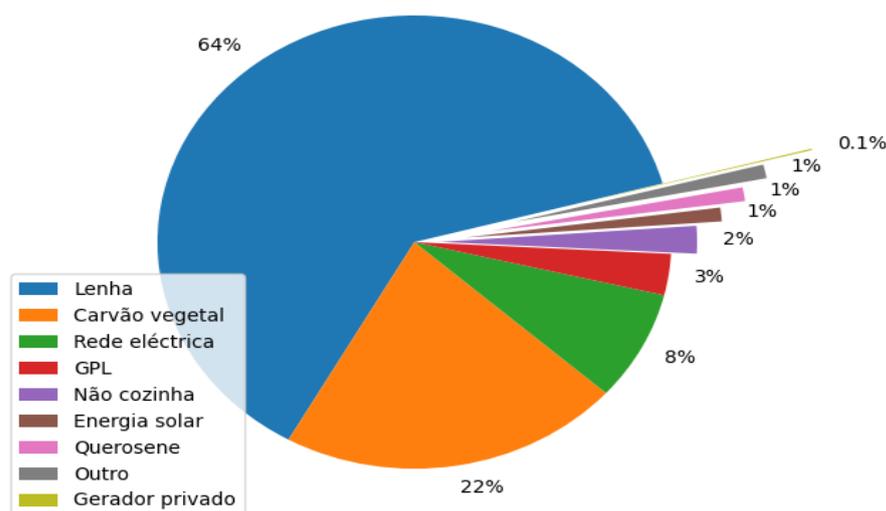


Figura 1: Principal tipo de energia ou combustível usado para cozinha (Finscope, 2019).

Observa-se que cerca de 86% da população moçambicana supre as suas necessidades energéticas na cozinha recorrendo a lenha e carvão vegetal, e as preferências são influenciadas pela localização, rendimento familiar, o agregado familiar, local de aquisição, preço, durabilidade, características do fogo e nível de educação, este facto cria uma pressão sobre as florestas contribuindo para o desflorestamento.

Moçambique possui quantidade abundante de energia solar na maioria das regiões, tornando o local ideal para o aproveitamento de energia solar. Com uma insolação média mínima de 5,2 kWh/m²/dia (Cuamba *et al.*, 2006), pode-se confiar nesta fonte de energia com segurança. O cozimento solar é a maneira mais simples, segura, ecológica e conveniente de cozinhar. É uma bênção para aqueles que cozinham com lenha e carvão, caminhando quilómetros para recolher lenha, sofrendo com a poluição de ar em suas cozinhas. Consequentemente, o cozimento solar desempenhará um papel importante na solução de problemas energéticos futuros.

O uso da energia solar térmica para satisfação das necessidades energéticas na cozinha concorda com a Estratégia de Energia do Ministério da Energia, que reafirma a determinação de proporcionar o acesso a energias modernas às populações desfavorecidas e a diversificar a matriz energética nacional, com ênfase particular para as fontes renováveis (Ministério da Energia, 2007).

1.2 Justificação do Problema

A cozinha baseada em energia solar nunca foi forte concorrente no mercado comercial ou mesmo perto de ser um método preferido de cozinhar. Eles foram relegados a aparelhos de demonstração dos conceitos baseados em energia solar. Neste modo, cozinhar não é mais uma actividade independente do tempo que pode ser realizada a qualquer hora do dia. Somos forçados a cozinhar apenas em determinados momentos, quando há insolação suficiente.

A geografia da actividade culinária também se afasta da cozinha. A cozinha não é mais o coração da casa, pois a actividade culinária real muda para os telhados ou plataformas de alta insolação. Isto aumenta ainda mais a inconveniência, além de não ser possível cozinhar à noite ou durante dias nublados ou durante a maior parte dos dias de inverno.

Portanto, esta pesquisa apresenta a possibilidade de utilização de colectores solares térmicos para aquecimento de óleo térmico que pode ser armazenado no tanque dentro da cozinha, possibilitando cozinhar à sombra e a qualquer hora do dia. O colector de tubos evacuados foi testado e um programa computacional foi desenvolvido. Os perfis de temperatura de saída do fluido térmico para circulação passiva para um conjunto de vazões mássicas foram analisadas e a eficiência do colector calculada.

1.3 Objectivos da Pesquisa

1.3.1 Objectivo Geral

- ✓ Avaliar o desempenho térmico do colector solar de tubos evacuados para cozinha solar.

1.3.2 Objectivos Específicos

- ✓ Desenvolver um programa computacional para monitoramento e aquisição dos dados dos perfis de temperatura do colector solar de tubos evacuados;
- ✓ Determinar a energia produzida pelo colector solar de tubos evacuados e as perdas térmicas;
- ✓ Avaliar a eficiência térmica do colector solar de tubos evacuados.

1.4 Perguntas de Pesquisa

Da descrição acima feita, urge-nos a levantar as seguintes perguntas de partida:

- ✓ Qual é o comportamento dinâmico dos perfis de temperatura e quantidade de calor produzido pelo colector solar de tubos evacuados para diferentes vazões do fluido térmico?
- ✓ Qual é o rendimento do colector solar de tubos evacuados e a temperatura máxima que pode ser obtida?
- ✓ A quantidade de calor produzida pelo colector de tubos evacuados e transferida para o fluido térmico pode ser aproveitada para cozinhar e armazenada para uso posterior?

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturada em cinco (5) capítulos. O primeiro capítulo, introduz o tema a ser abordado e a sua importância no contexto actual, apresenta também os objectivos (geral e específicos) que se pretendem atingir e a justificação do problema. No segundo capítulo, é feita uma revisão da literatura, abordando de forma descritiva os seguintes temas: radiação solar, os colectores solares e o fogão solar. No terceiro capítulo, é apresentado a metodologia do trabalho, ou seja, apresenta-se detalhadamente os materiais utilizados, os instrumentos de colecta de dados e os procedimentos da recolha de dados. No quarto capítulo faz-se a análise e discussão dos resultados. No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do estudo com intuito de avaliar os resultados obtidos e apresentados e propor recomendações para trabalhos futuros. E finalmente apresentam-se as referências bibliográficas.

CAPITULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

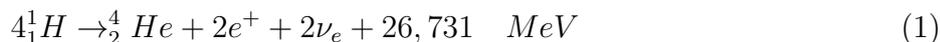
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Radiação Solar

2.1.1 O Sol

O sol é uma esfera de matéria gasosa com um raio visível de cerca de $6,96 \times 10^5$ km e uma massa de aproximadamente $1,99 \times 10^{30}$ kg. Consiste em cerca de 80% de hidrogénio, 20% de hélio e apenas 0,1% de outros elementos mais pesados, incluindo oxigénio (O), carbono (C), nitrogénio (N), neónio (Ne), ferro (Fe), silício (Si), magnésio (Mg), enxofre (S) e cálcio (Ca) (Liou, 2002; Quaschnig, 2016).

O sol é também a estrela central do nosso sistema solar e emite grandes quantidades de energia. Essa energia emitida pelo sol tem origem no núcleo onde acontecem reacções de fusão contínua (ver eq. 1), que envolvem quatro átomos de hidrogénio se combinando para formar um átomo de hélio e são gerados 90% da energia do sol (Quaschnig, 2016; Sawhney, 2012)



O núcleo encontra-se localizado na região interna do sol e ocupa 15% do volume e cerca de 40% da massa do sol, um raio aproximadamente igual a $0,23R$ (onde R é o raio do sol).

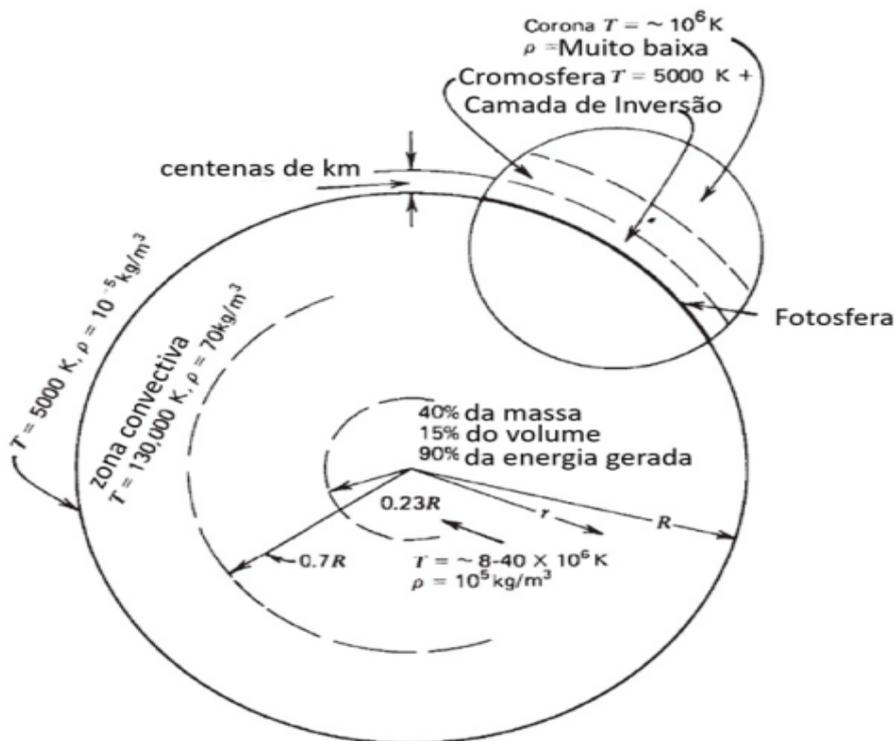


Figura 2: Estrutura solar. Fonte: Duffie and Beckman (2013).

Para além do **núcleo**, tendo em conta a estrutura estratificada, a região interna do sol é constituída por regiões **radioactiva** e **convectiva** em sequência também destacam-se as regiões externas constituídas: a **fotosfera**, **chromosfera** e **coroa** conforme é apresentado na Figura 2 da estrutura do sol.

A produção total de energia do sol é de $3,8 \times 10^{20}$ MW, o que equivale a 63,3 MW por metro quadrado da superfície do sol. Essa energia calorífica é uniformemente irradiada para fora em todas as direcções, na forma de ondas electromagnética que viajam no espaço em vários comprimentos de onda que variam entre 0,25 a 3,0 μm , distribuídos em ultravioleta (menos de 0,4 μ), visível (0,4 e 0,7 μm) e infravermelho (mais de 0,7 μm). A maior parte dessa energia está concentrada na faixa de comprimento de onda do visível e do infravermelho próximo. A Figura 3 mostra o espectro de radiação solar.

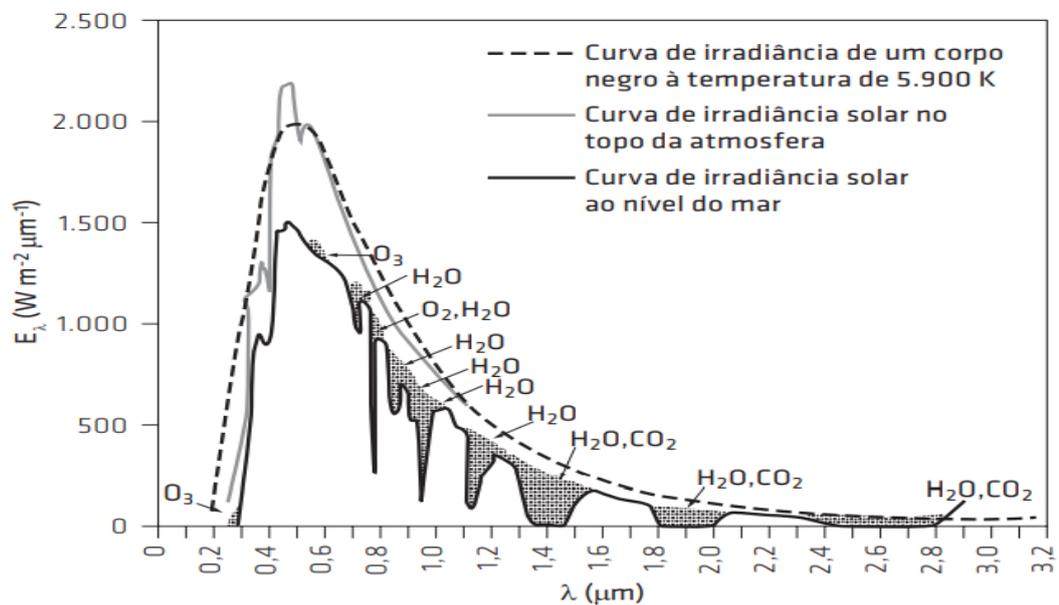


Figura 3: Intensidade do fluxo radiante emitido pelo Sol (Ponzoni *et al.*, 2015).

O espectro da radiação solar descreve a composição da luz e a contribuição dos diferentes comprimentos de onda da radiação total. Em relação a quantidade de energia a maior parte está concentrada na faixa de comprimento de onda do visível e do infravermelho próximo.

Contudo, o que realmente importa é o fluxo da radiação que chega ao topo da atmosfera terrestre que é designada **constante solar**. Duffie & Beckman (2013) definem a constante solar como a “energia por unidade de tempo emitida pelo sol que é recebida por uma unidade de área de uma superfície perpendicular à direcção de propagação da radiação situada fora da atmosfera terrestre”. Para os autores acima referenciados, a constante solar possui um valor médio equivalente a **1367 W/m²**.

2.1.2 Irradiância Solar na Terra

A irradiância solar que atinge a superfície da Terra é altamente variável dependendo da distância que o feixe percorre na atmosfera, pressão, humidade, nebulosidade e qualidade do ar. O efeito de uma atmosfera clara sobre a luz solar é caracterizado pelo conceito chamado **massa de ar**, que representa o comprimento relativo do caminho do feixe solar através da atmosfera. A massa de ar é a unidade, abreviada como AM1, quando o sol está em sua posição mais alta no céu em um dia claro ao nível do mar e sob condições físicas normais. Matematicamente, a massa de ar expressa-se como inverso do cosseno do ângulo zenital ($1/\cos\theta_z$). Para o mesmo ângulo zenital, corresponde à AM1, ao nível extraterrestre, essa massa de ar denota-se por AM0. AM1.5, que corresponde ao ângulo zenital de 48,2 graus, é considerado como a irradiância típica na superfície da Terra em um dia claro correspondente à irradiância solar máxima de 1 kW/m^2 (Singh, 2015; Soysal & Soysal, 2020).

A irradiância solar recebida ao nível do solo pode ser superior a 1 kW/m^2 devido a reflexões (como em solo coberto de neve em um dia claro). Ao longo do ano, a irradiância máxima disponível em um local varia consideravelmente devido à rotação da Terra, condições climáticas e poluição do ar (Soysal & Soysal, 2020).

2.1.3 Componentes da Radiação Solar

A radiação solar ao interagir com a atmosfera sofre segregação e pode ser classificada em vários componentes consoante o tipo de interação quando atinge a superfície terrestre (Figura 4)(Myers, 2017).

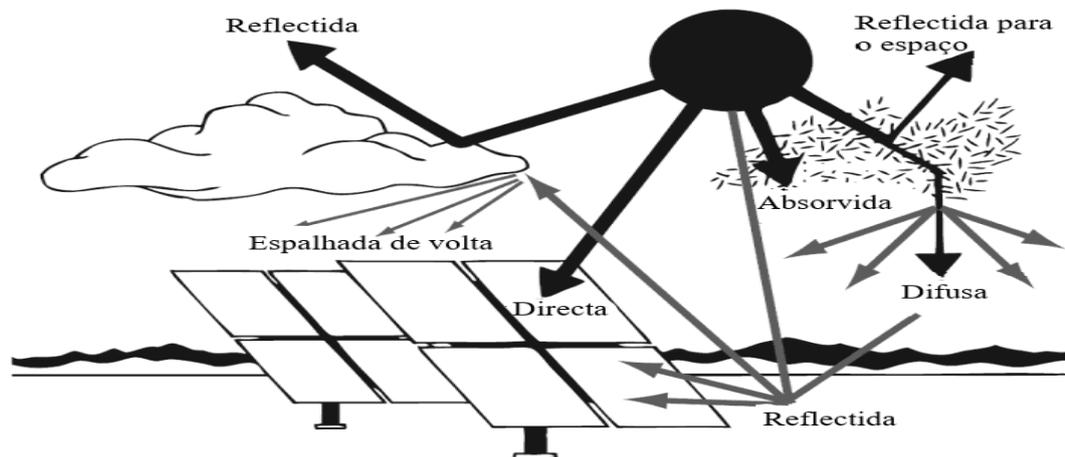


Figura 4: Componentes da radiação solar segregados pela atmosfera e superfície (Badescu, 2014).

O feixe da radiação que atinge um determinado ponto pode vir directamente do disco solar é chamada **radiação directa**. A radiação directa consiste na radiação solar que chega à superfície terrestre e que não foi dispersa nem absorvida na atmosfera; ou é chamada **indirecta (difusa)** quando a radiação solar chega ao observador depois de ter interagido com a atmosfera passando

por processos de dispersão. Para além das duas componentes da radiação, a superfície terrestre reflete parte da radiação nela incidente para objectos circundantes. Esta radiação chama-se **albedo**.

A **radiação global (G)** medida na superfície terrestre é soma da radiação directa (G_d) e difusa (G_b) conforme a equação:

$$G = G_b + G_d \quad [Watts] \quad (2)$$

Para aplicações e aproveitamento da radiação solar em particular na forma térmica, requer-se dias de céu claro caracterizados de feixes directos que permitem aos sistemas receber tanta densidade de potência possível do sol.

2.1.4 Instrumentos de Medição da Radiação Solar

A medição da radiação solar global, directa e difusa é de extrema importância na avaliação técnica e económica em projectos de aproveitamento do recurso solar. Para o efeito, os instrumentos comumente utilizados são pireliómetro e o piranómetro (Pinho & Galdino, 2014).

2.1.4.1 Piranómetros

O piranómetro é destinado a medição da radiação global e difusa. Existem dois tipos comumente utilizados que, diferem-se pelo princípio de funcionamento, um baseia-se no efeito termoeléctrico e outro no fotovoltaico. A Figura 5 apresenta um modelo de piranómetro termoeléctrico e fotovoltaico.



Figura 5: (a) Piranómetro termoeléctrico e (b) fotovoltaico (Costa, 2021).

Um piranómetro térmico é baseado no uso de termopilhas para fazer a medição da irradiância através da variação de temperatura entre as junções quente e fria do elemento sensor, sendo a junção quente revestida de preto, e a junção fria em contacto com a caixa do piranómetro, que age como um dissipador de calor (Figura 5(a)). O piranómetro de termopilha é o instrumento com menor incerteza para medir a radiação solar, apresentando desvios inferiores a 1% dependendo de sua classificação (Inhaquites *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2017).

O piranómetro fotovoltaico utiliza como sensor uma célula semicondutora (fotodíodo) que converte directamente a radiação solar em corrente eléctrica proporcional à irradiância solar incidente (Figura 5(b)). Possui maiores incertezas que podem chegar a 5% comparado ao piranómetro termoeléctrico, por conta disso apresenta um menor custo (Pereira *et al.*, 2017).

2.1.4.2 Pireliômetro

O pireliômetro mede a radiação solar directa. Possui um colimador com abertura suficiente para permitir apenas a componente directa normal da radiação solar. O colimador tem um ângulo de abertura de 5° por padrão internacional (Figura 6). O pireliômetro deve ser conectado a um sistema rastreador solar para estar sempre direccionado para o Sol (Pereira *et al.*, 2017). Este equipamento possui um custo elevado e necessita de uma mão-de-obra frequente e especializada.



Figura 6: Pireliômetro (Costa, 2021).

2.1.5 Direcção da Radiação Incidente Numa Superfície

O conhecimento da localização é importante para determinar os valores da radiação num determinado local assim como prever a energia a ser absorvida por uma instalação de aquecimento solar. Nesse sentido para entender como colectar energia do sol, deve-se primeiro ser capaz de prever a localização do sol em relação ao dispositivo de colecta.

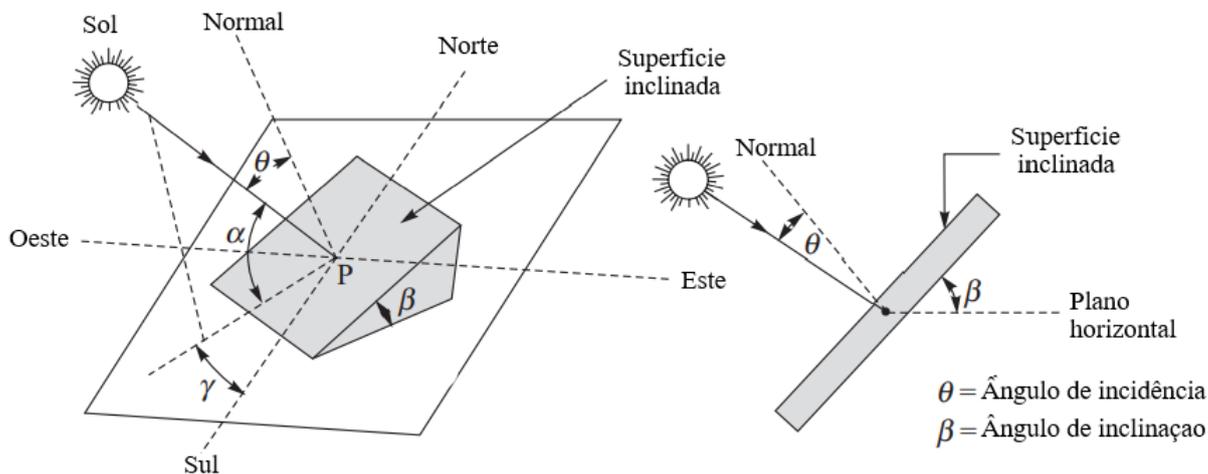


Figura 7: Ângulo de incidência e ângulo de inclinação (Sawhney, 2012).

Latitude λ - A latitude de um local na superfície da Terra é o ângulo formado pela linha radial que une a lação especificada ao centro da Terra com a projecção de sua linha no plano equatorial. A latitude no equador é zero e é 90° nos pólos (Sawhney, 2012).

Declinação δ - É o ângulo formado pela linha que une os centros do sol e da terra com o plano equatorial. O ângulo de declinação varia quando a terra gira em torno do sol. Tem valor

máximo de 23,45 quando a Terra atinge uma posição orbital correspondente a 21 de Junho e tem valor mínimo de -23,45 quando a Terra está em posição orbital correspondente a 22 de Dezembro. O ângulo de declinação é considerado positivo quando medido acima do plano equatorial no hemisfério norte (Khan, 2017). O ângulo de declinação pode ser dado por:

$$\delta = 23,45^\circ \text{sen} \left[\frac{360}{364^\circ} (284 + n) \right] \quad [\text{graus}] \quad (3)$$

onde n é o número do dia durante um ano, com 1 de Janeiro sendo n = 1 (Goswami, 2015).

Ângulo Horário ω - O ângulo horário em qualquer instante é o ângulo através do qual a Terra deve girar para alinhar o meridiano do observador directamente com os raios do sol. É o ângulo em graus traçado pelo sol em 1h com referência às 12 horas do local. A Terra completa uma rotação (360°) em 24h, isto é, 1h corresponde a 15° da rotação da Terra. Como ao meio-dia solar os raios solares estão alinhados com o meridiano ou longitude local, o nosso ângulo nesse instante é zero (Sawhney, 2012). O ângulo horário pode ser dado da seguinte forma:

$$\omega = [\text{Hora Solar} - 12] \times 15^\circ \quad [\text{graus}] \quad (4)$$

Ângulo de Altitude α - É o ângulo entre o raio do sol e sua projecção na superfície horizontal como mostrado na Figura 7.

Ângulo de Incidência θ - O ângulo de incidência para qualquer superfície é definido como o ângulo formado entre a direcção do raio de sol e a linha normal à superfície (ver Figura 7).

Ângulo de Inclinação β - O ângulo de inclinação é o ângulo entre a inclinação inclinada e o plano horizontal conforme mostrado na Figura 7.

Ângulo de Azimute de Superfície γ - É o ângulo no plano horizontal entre a linha para o sul e a projecção horizontal da normal à superfície do plano inclinado. É considerado positivo quando medido de sul para oeste.

Tais dispositivos que permitem fazer a absorção da radiação solar são designados colectores ou concentradores solares que serão abordados no subcapítulo a seguir.

2.2 Colectores Solares

Os colectores solares são trocadores de calor responsáveis pela captação da energia do sol e sua conversão em calor utilizável (Kalogirou, 2004). Os colectores solares convertem a radiação solar em energia térmica e a transferem para um fluido de trabalho (água, óleo ou ar) (Pandey *et al.*, 2021; Sawhney, 2012).

Os colectores solares podem ser classificados com base no modo de operação: passivo e activo (Figura 8 (a)); com base na temperatura: baixa, média e alta (Figura 8 (b)) com base no regime: estacionário e rastreador (Figura 8 (c)); e com base na concentração: concentrador e não concentrador (Kalogirou, 2004). Para o presente estudo interessa ao autor a classificação quanto ao regime de operação e para uma melhor compreensão a Figura 8 apresenta os diferentes tipos de classificação.

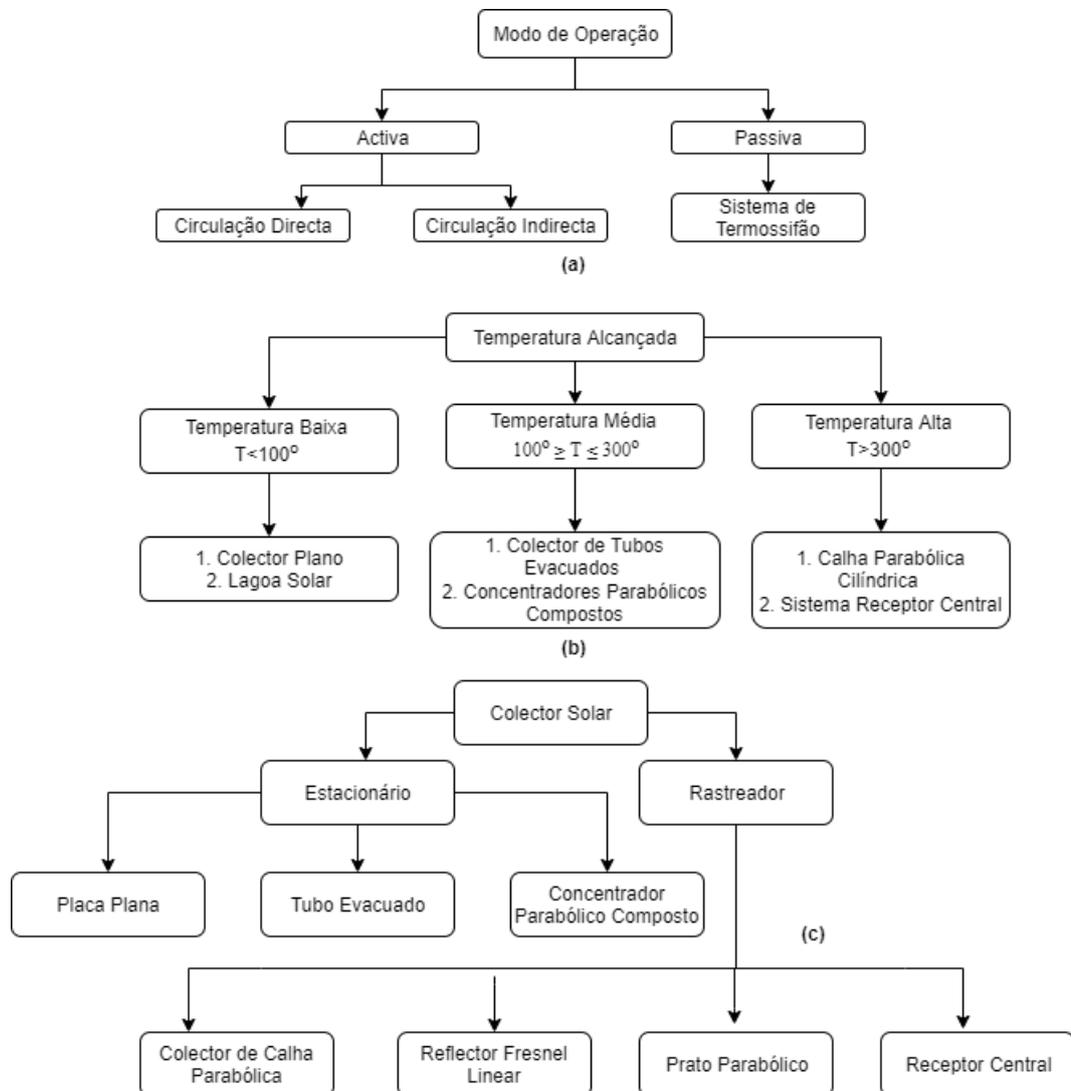


Figura 8: Classificação dos colectores solares (Al-Waeli *et al.*, 2019; Pandey *et al.*, 2021).

A escolha do tipo de colector depende da temperatura do funcionamento e aplicação pretendida. Para aplicações de baixa temperaturas, até 100 °C geralmente são utilizados colectores

solares planos, e para aplicações que necessitam temperaturas medias-a-altas (acima dos 100 °C), os concentradores solares são os mais apropriados (Kalogirou, 2004). Porém, o presente trabalho centra-se exclusivamente no colector solar de tubos evacuados e será abordado na próxima subsecção.

2.2.1 Colector Solar de Tubo Evacuado

Um colector de tubo de vidro evacuado é feito de tubos de vidro borossilicato paralelos. Cada tubo evacuado é constituído por dois tubos, um interior e outro exterior conforme a Figura 9.

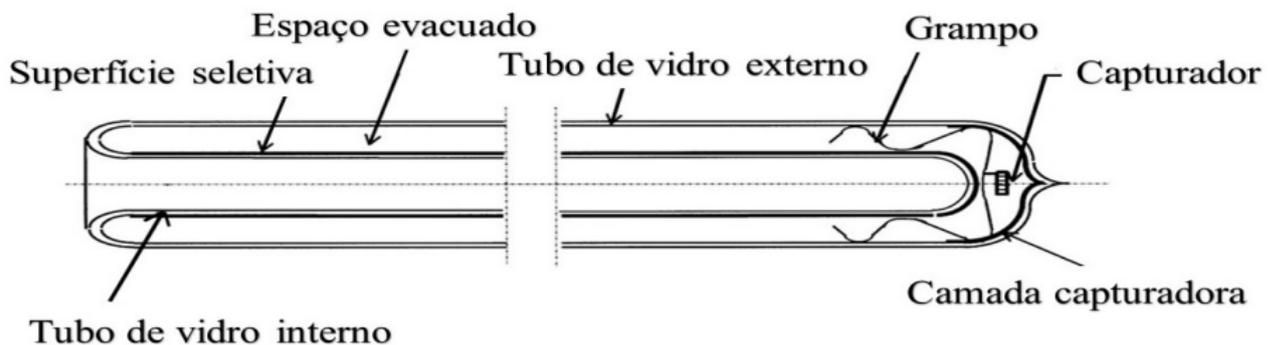


Figura 9: Desenho esquemático de um tubo a vácuo. Adaptado de Zhiqiang (2005).

O tubo interno é revestido de superfície selectiva (a que é encarregada de captar a radiação recebida) feita de camadas de (AL-N/AL), (ALN/AIN-SS/CU) ou (SS/Mo/Al₂O₃), que tem alta absorptância (95%) no espectro solar na faixa dos 0,2 μm a 2 μm e baixa emitância (5%) em radiação de longo comprimento de onda de mais de 2 μm , enquanto o tubo externo é transparente. Segundo Zhiqiang (2005), a superfície selectiva é depositada pelo processo de pulverização catódica, uma técnica física na qual a vaporização dos átomos de um material sólido chamado “alvo” ocorre pelo bombardeio de iões energéticos.

Os raios de luz passam pelo tubo externo transparente e são absorvidos pelo tubo interno. O tubo interno é aquecido enquanto a luz solar passa pelo tubo externo e, para manter o calor dentro do tubo interno, é criado um vácuo que permite que a radiação solar passe, mas não permite que o calor seja transferido. O *getter* é encarregado de capturar o gás residual dentro do tubo mediante uma reacção química. Quando as moléculas de gás residual colidem com o material capturador elas se combinam quimicamente com ele. Assim sendo, o *getter* as remove diminuindo essa transferência de calor indesejada. Para criar o vácuo, os dois tubos são fundidos na parte superior e o ar existente é bombeado para fora. Assim, o calor fica dentro dos tubos internos e colecta a radiação solar de forma eficiente.

A transferência de calor pode ocorrer directamente no fluido a ser aquecido, quando o design do colector permite que o fluido circule em cada tudo de vidro (*water in glass*), ou indirectamente quando o colector de tubo de vidro apresentar um trocador de calor (*heat pipe*).

2.2.1.1 Colector Solar de Contacto Directo ou *Water-in-glass*

Os colectores solares do tipo de contacto directo, são os mais simples que podem se encontrar no mercado dos colectores de tubo a vácuo. Em geral, os tubos são preenchidos com a água directamente, precisando somente dos tubos e o cabeçote para funcionar. Esses colectores têm melhor desempenho em ambientes frios e atingem temperaturas maiores que os de placa plana. Por esse motivo, abrange também usos industriais além dos domésticos. Os colectores de contacto directo ou *water-in-glass* constam de tubos de vidro evacuado preenchidos com água e ligados pelo cabeçote, que leva o fluido para o tanque de armazenamento, localizados de forma horizontal ou vertical segundo a aplicação, comumente para aquecimento doméstico. Os tubos são acomodados verticalmente com inclinação dependente da latitude do lugar, apontando para o Norte no caso do hemisfério Sul o para Sul no caso do Norte, e podem trabalhar em circulação forçada com uma bomba ou em convecção natural aproveitando o efeito de termossifão. A Figura 10 mostra o processo, o tubo de vidro absorve a radiação aquecendo a parede interna dele e a sua vez o líquido. Portanto, quando o líquido é aquecido a convecção natural faz subir o fluido mais leve e quente para o cabeçote e a sua vez o líquido mais pesado e frio desce, repetindo o ciclo.

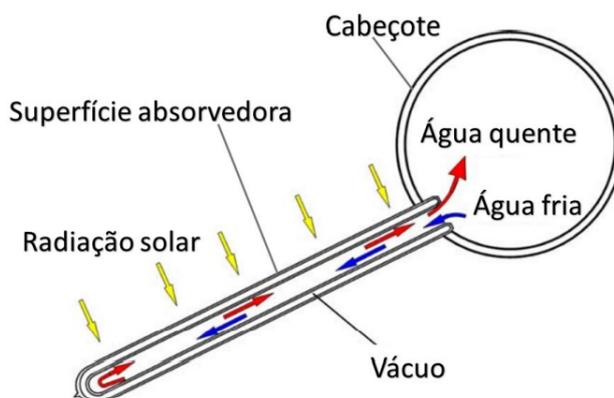


Figura 10: Extração de calor do tipo transferência directa. Fonte: Morrison *et al.* (1993).

2.2.1.2 Colector Solar de Tipo Indirecto ou *Heat-Pipe*

O colector *heat-pipe* é formado por tubos de vidro paralelos que contêm, cada um, um tubo de calor de cobre ou *heat-pipe* soldado em uma aleta absorvedora. O *heat-pipe* é um tubo selado a vácuo, tipicamente de cobre, preenchido com um fluido que sofrerá mudança de fase em seu interior. Isto permite ele transferir calor com uma alta eficiência de acordo com Kalogirou (2004). O fluido passa por um ciclo de ebulição-condensação. Neste ciclo, a radiação solar incidente aquece o líquido e ele evapora. O vapor gerado desloca-se para o topo do tubo, que fica em contacto com o fluido de trabalho que escoar no cabeçote, e ali transfere seu calor latente. Em seguida ele condensa e volta para a base do tubo onde o processo se repete. A Figura 11 apresenta o funcionamento do tubo de calor. Esses colectores oferecem uma vantagem sobre os demais, pois, ao trabalhar com fluidos com troca de fase, não é possível atingir temperaturas acima da temperatura de mudança de fase, o que oferece uma protecção contra o superaquecimento. Este controle auto-limitante é exclusivo ao colector tipo *heat-pipe*.

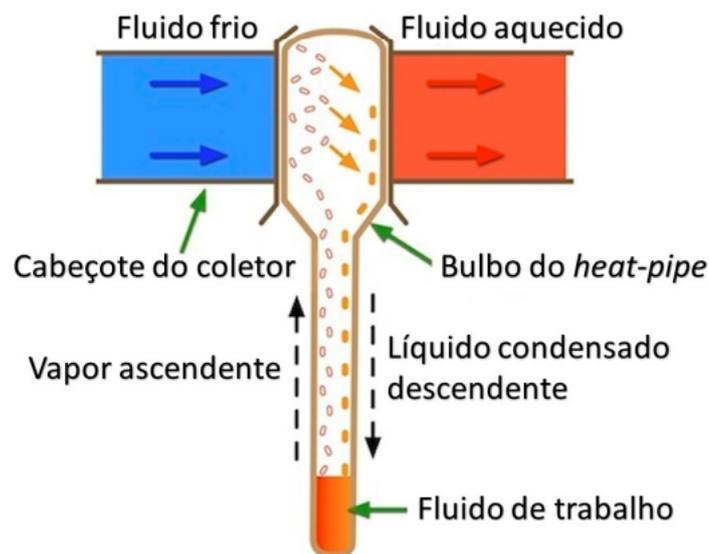


Figura 11: Detalhe do ciclo de trabalho do *heat pipe*. Fonte: adaptado de Apricus (2019) conforme Ortiz (2020).

Em geral são mais eficientes do que os colectores de placa plana, pois a eficiência não decai tão acentuadamente em temperaturas ambiente baixas como nos anteriores (Ayompe *et al.*, 2011). A Figura 12 mostra os componentes do colector.

Os colectores de tubo evacuado estão se tornando populares a cada dia por sua singularidade, pois são capazes de colectar energia do sol durante todo o dia em ângulos baixos devido ao seu formato tubular. Os colectores de tubos evacuados encontram a sua função em varias aplicações térmicas da energia solar, isto é, no aquecimento de água, dessalinização da água e cozinha solar. Na subsecção a seguir, é feita a modelagem matemática do colector solar de tubo evacuado.

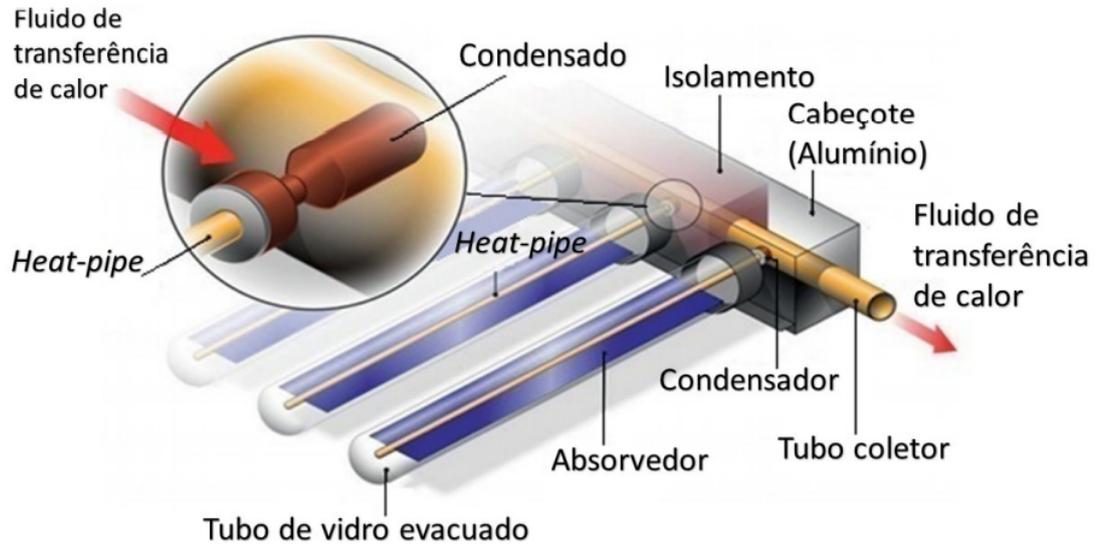


Figura 12: Componentes de coletor de tipo *heat pipe*. Fonte: adaptado de Hudon (2014) conforme Ortiz (2020).

2.2.2 Modelação Matemática

Existem dois procedimentos diferentes para medir a eficiência de colectores solares térmicos: método de teste de estado estacionário e método de teste quase dinâmico (Hayek *et al.*, 2011). As condições de contorno para irradiação solar, temperatura ambiente e temperatura de entrada dos colectores são mantidas constantes durante o método de ensaio de estado estacionário e para ensaio quase dinâmico, as condições de contorno podem variar. Em ambas as técnicas, a energia solar é a fonte de calor nos colectores solares; portanto, a irradiação é a potência de entrada que é recebida e absorvida pelo coletor e então transferida para um fluido de trabalho. As perdas térmicas ocorrem no processo de transferência de calor envolvido em um coletor solar de tubo evacuado. A transferência de calor pode ocorrer por condução, convecção e radiação. Para realizar o equilíbrio térmico, os processos de transferência de calor precisam ser incluídos (Sabiha *et al.*, 2015).

2.2.2.1 Balanço Termodinâmico de Energia no Coletor

A perda térmica, Q_p pode ser expressa como:

$$Q_p = Q_a - Q_u \quad [Watts] \quad (5)$$

O calor útil (Q_u) que é fornecido por um coletor solar é a diferença entre a energia absorvida (Q_a) pelo fluido de trabalho e as perdas de calor da superfície para o ambiente.

$$Q_u = Q_a - Q_p \quad [Watts] \quad (6)$$

A energia útil também pode ser expressa como:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_s - T_e) \quad [Watts] \quad (7)$$

Onde: \dot{m} é a vazão mássica de água como fluido de trabalho em $[kg/s]$, C_p é a capacidade calorífica do fluido térmico em $[J/(kg^\circ C)]$, T_e é a temperatura de entrada da água e T_s é a temperatura de saída do fluido térmico em $[\circ C]$. Enquanto a energia absorvida pelo colector solar é calculada pela equação:

$$Q_u = A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L(T_m - T_a)] \quad [Watts] \quad (8)$$

Onde A_c é a área do colector solar em $[m^2]$, F_R é o factor de eficiência, G é a radiação solar em $[W/m^2]$, $(\tau\alpha)$ é o produto entre o coeficiente de absorvância e de transmitância, U_L é o coeficiente de perda de calor, T_m é a temperatura média do refrigerante e T_a é a temperatura ambiente em $^\circ C$.

2.2.2.2 Eficiência Térmica do Colector

A eficiência do colector solar é definida como a razão do ganho de energia útil para a radiação solar que entra na área de abertura do colector, então a eficiência do colector solar segundo Duffie e Beckman (2013) pode ser escrita como:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{A_c G} \quad (9)$$

A Equação 9 fornece a eficiência do colector evacuado com o valor conhecido da vazão mássica do fluido e o valor medido da temperatura de entrada e saída do fluido. Pela Equação 8, a eficiência do colector solar pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \eta = \frac{Q_u}{A_c G} &= \frac{A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L(T_m - T_a)]}{A_c G} \\ &= F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{T_m - T_a}{G} \end{aligned} \quad (10)$$

A Equação 10 é chamada de equação de Hottel-Whillier.

2.2.2.3 Curva Característica do Colector Solar

A curva característica de um coletor solar é o gráfico que mostra a relação entre a eficiência do coletor η e o parâmetro $x = (T_m - T_a)/G$. A temperatura é media entre a temperatura de entrada e saída do colector, $T_m = (T_e + T_s)/2$.

Este gráfico é usado para determinar tais parâmetros de desempenho do coletor como a eficiência óptica efetiva η_{opt} , ou seja, a ordenada do gráfico em $x = 0$, e o coeficiente de perda de calor efetiva do coletor U_L , ou seja, a tangente da inclinação angular do gráfico.

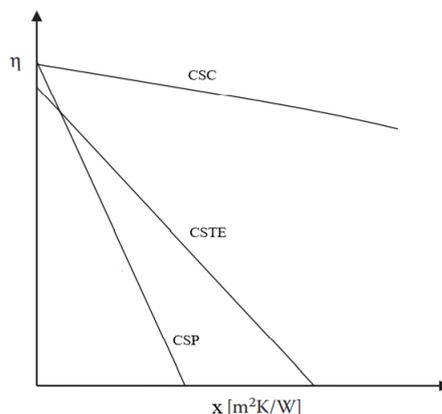


Figura 13: Eficiência η dos coletores solares em função do parâmetro x . CSP, coletor de placa plana; CSTE, coletor de tubo de vidro evacuado; CSC, coletor solar concentrador (Khartchenko & Kharchenko, 2013).

A Figura 13 mostra as curvas de eficiência de um concentrador CSP, CSTE e CSC na faixa de pequenos valores de x , ou seja, de 0 a $0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$.

2.3 Cozinha Solar

Um fogão solar é um dispositivo que utiliza a energia do sol para cozinhar alimentos. Os sistemas de cozimento solar que utilizam colectores de tubo evacuado apresentam diversas vantagens. A necessidade de rastreamento solar é eliminada, uma vez que operam com radiação solar directa e difusa, altas temperaturas podem ser alcançadas, o cozimento pode ocorrer à sombra ou dentro de um edifício devido à separação espacial da parte colectora e da unidade do forno.

Kumar *et al.* (2001) projectaram a panela de pressão solar tipo comunitária baseada em um coletor de tubo evacuado. A cozinha solar consistia de um coletor solar tubular evacuado e uma panela de pressão que funcionava tanto como unidade de cozimento assim como unidade de armazenamento de energia térmica. Ambas unidades foram acopladas por um trocador de calor.

Na Austrália, Morrison *et al.* (1993) desenvolveram um tipo de fogão solar interno usando tubos evacuados com um tanque de armazenamento térmico de água pressurizada com apelo semelhante a um fogão eléctrico normal. O fogão usava um sistema sofisticado pelo qual o vapor gerado em um absorvedor tubular evacuado era transferido através de um longo sistema de tubos para um recipiente de armazenamento conectado às placas de cozimento. O projecto desenvolvido por Esen (2004) de um coletor solar de tubo evacuado usando diferentes fluidos de transferência de calor nos tubos de calor com um sistema de armazenamento de energia térmica de óleo. O reservatório de óleo com capacidade de 9 litros foi utilizado para armazenamento de calor permitindo que o fogão seja pré-aquecido e os alimentos mantidos quentes após o cozimento. A temperatura máxima obtida em um pote contendo 7 litros de óleo comestível foi de $175 \text{ }^\circ\text{C}$. O fogão foi utilizado com sucesso para cozinhar vários alimentos e os processos de cozimento foram realizados com o fogão em períodos de 27 a 70 minutos.

CAPITULO 3: MATERIAL E MÉTODOS

3 Material e Métodos

3.1 Localização e Descrição do Sistema

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa experimental no Laboratório de Ensaio de Energias Renováveis no Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, Campus Principal localizado na Cidade de Maputo. O sistema foi instalado no terraço do Departamento de Física com as seguintes coordenadas geográficas: $25^{\circ} 57'$ S de latitude; $32^{\circ} 34'$ E de longitude e 70 metros de altitude. O sistema em estudo é ilustrado na Figura 14.

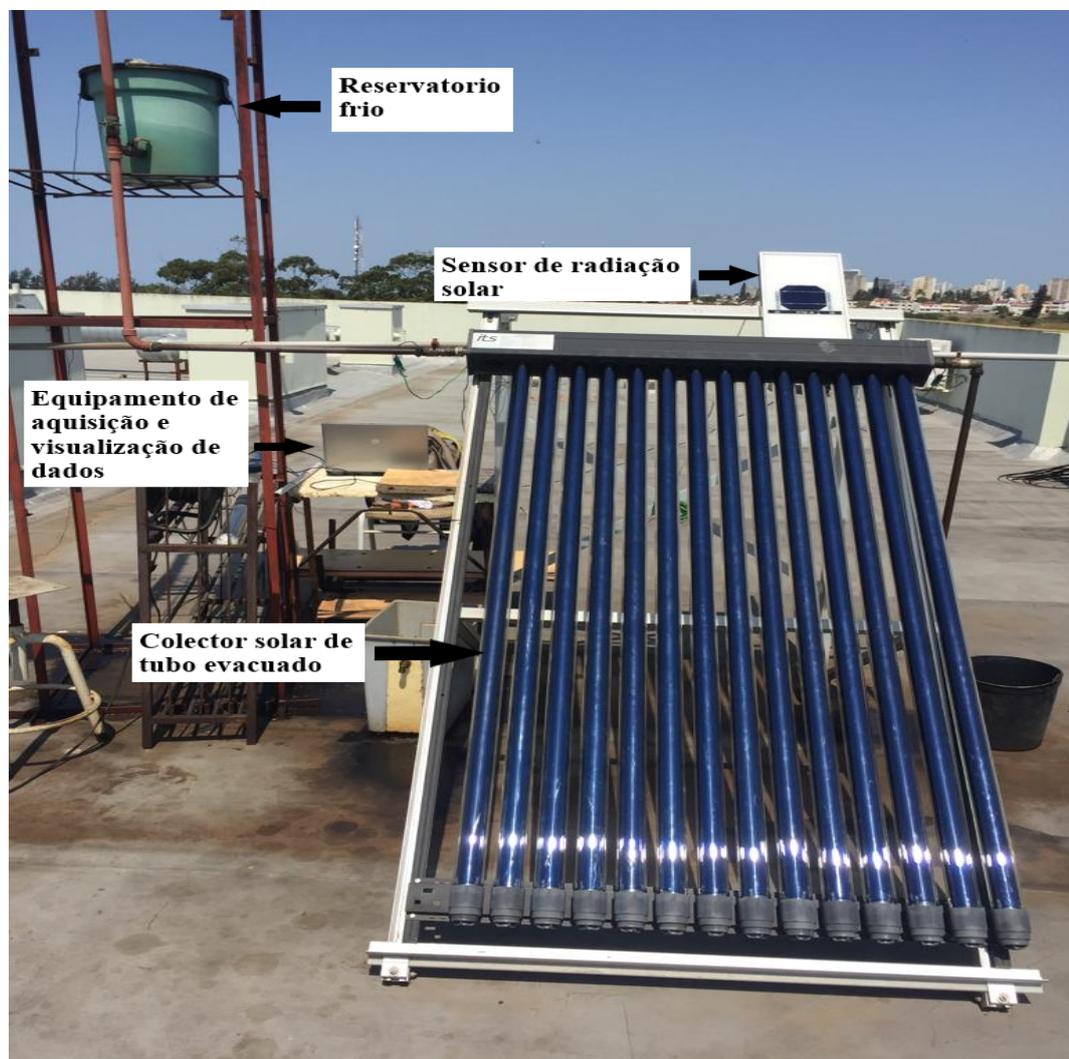


Figura 14: Ilustração do sistema de testes. Fonte: autor

O coletor solar tubos evacuados foi instalado e orientado ao Norte geográfico com um ângulo de desvio de 18° para o Nordeste do sul magnético. O ângulo de inclinação do coletor é de 45° em relação ao plano horizontal. Este ângulo foi estabelecido pelo fabricante com o

propósito de obter melhor captação e maior intensidade de radiação solar quando o colector encontrar-se instalado com este ângulo estabelecido. Este feito, ocorre quando o colector é instalado naquele ângulo em altas altitudes (supondo que foi projectado para latitudes entre 40 e 50).

No entanto, o ângulo de inclinação aceitável para a melhor captação durante o ano é o ângulo correspondente à latitude de lugar que neste caso é de $25^{\circ}, 57'$ para Maputo.

O sistema em estudo consiste de um colector de tubo evacuado, dois reservatórios térmicos, sensor de radiação, termopares tipo K e um datalogger que é ligado a um computador portátil. A Figura 15 mostra a configuração experimental e os respectivos componentes para realizar o experimento.

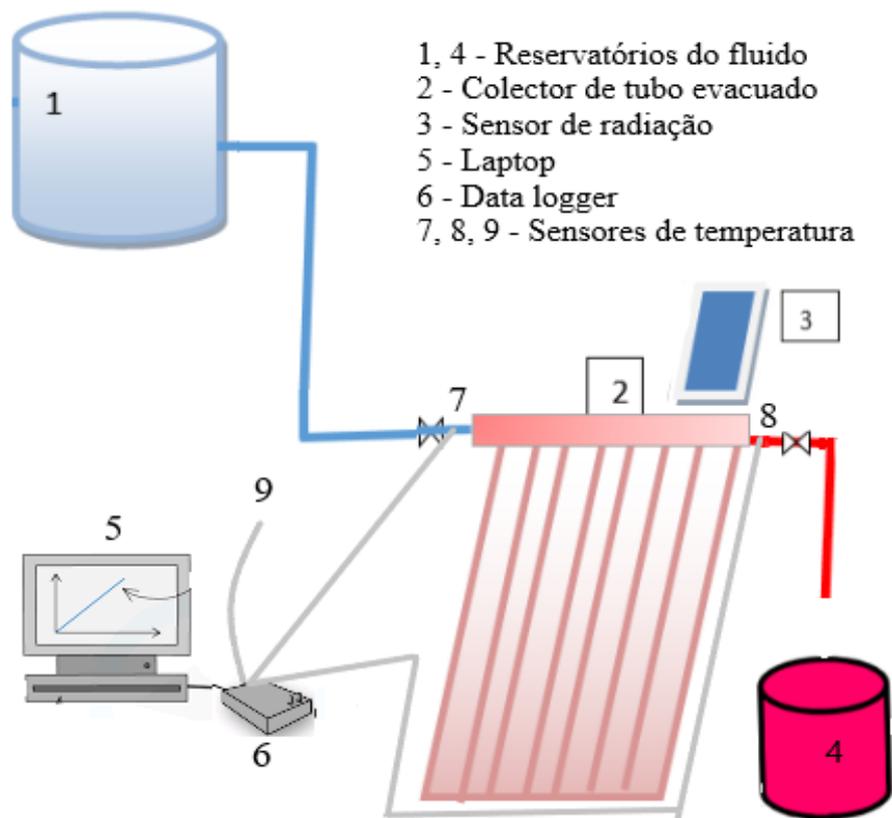


Figura 15: Diagrama esquemático do sistema de testes. Fonte: autor

O óleo flui por gravidade do tanque frio para o tubo evacuado quando a válvula é aberta, passa pelo termopar que mede a temperatura de entrada, entra no colector onde é aquecido, sai do mesmo passando pelo termopar que mede a temperatura de saída e depois desce para o tanque de armazenamento quente. O terceiro termopar mede a temperatura ambiente e encontra-se instalado ao lado do colector.

O equipamento de aquisição e registo de dados consiste de três termopares e um piranometro fotovoltaico ligados a um datalogger que converte o sinal analógico para digital e transfere através de um cabo USB para um computador onde são visualizados e registados.

3.2 Equipamentos Utilizados

3.2.1 Colector Solar de Tubos Evacuados

Para realização do estudo, um colector solar de tubo evacuado de tubo de calor (heat pipe) comercial da marca ITSTM foi utilizado para captação e conversão da radiação solar em energia térmica. O colector é constituído por quinze (15) tubos evacuados, no entanto, apenas catorze (14) tubos foram usados neste estudo conforme a Figura 16, visto que um tubo encontra-se danificado.

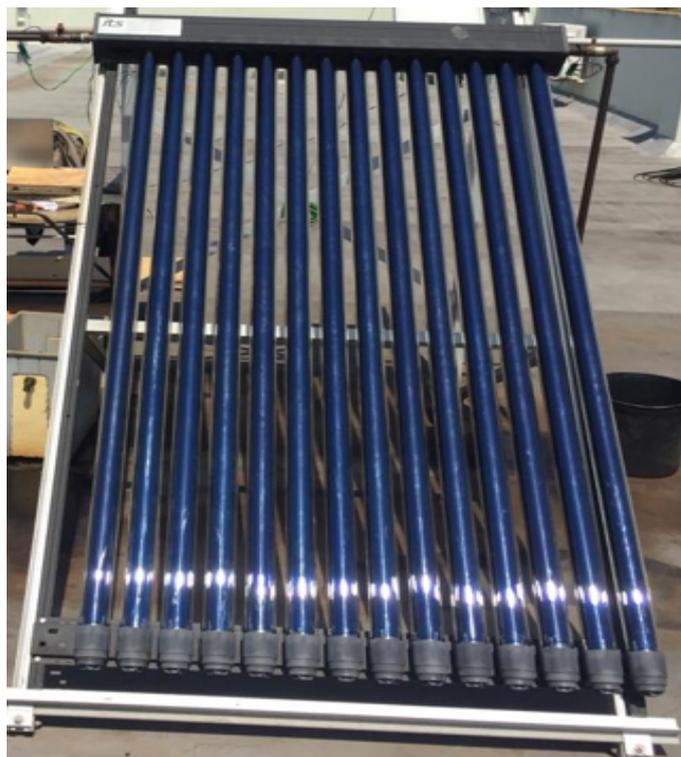


Figura 16: Colector solar de tubos evacuados. Fonte: autor.

As características do colector são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Especificações técnicas do colector solar. Fonte: ITSTM.

Características do Colector	
Número de tubos	15
Distância dos tubos	75 mm
Dimensões (mm)	1250 × 2000 × 110
Energia estimada	4,17KWhr/m ² /dia
Conexões dos tubos	22 mm
Resistência a pressão	6 Bar
Temperatura de estagnação	250 °C
Teor de Fluido	0,98 l
Peso (Vazio)	52 kg

Tabela 2: Especificações técnicas do tubo evacuado. Fonte: ITSTM.

Tubo Evacuado	
Material	Vidro borossilicato
Expansão térmica	$3,3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Diâmetro do tubo de cobertura	58 mm
Diâmetro do tubo absorvedor	47 mm
Espessura do vidro	2,2 mm
Comprimento	1800 mm
Material de revestimento	AlN/AlN-SS/Cu
Vácuo	$\leq 3 \times 10^{-4}$
Coefficiente de Absorção	0,94-0,96

3.2.2 Fluido Termodinâmico

Recorreu-se ao óleo térmico da marca Fuchs Renolin Therm B22, com grau de viscosidade ISO 32, como fluido trocador de calor. Fuchs Renolin Therm é formulado com óleos de base parafínicos altamente refinados e destina-se a sistemas de transferência de calor fechados com temperatura de óleo a granel de até 320 °C. Oferece excelente resistência ao fracionamento térmico e à oxidação química, não é tóxico, tem um nível de odor muito baixo e não prejudica as vedações seleccionadas. Também fornece alto calor específico e condutividade térmica em todas as temperaturas e, portanto, proporciona aquecimento rápido e operação eficiente do sistema de transferência de calor. Suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Especificações técnicas do fluido termodinâmico. Fonte: Fuchs Renolin Therm

Propriedades		Propriedades	
Grau de viscosidade	32	Ponto de inflamação	222 °C
Viscosidade 40 °C	32,5 mm ² /s	Ponto de fluidez	-9 °C
100 °C	5,5 mm ² /s	Coefficiente de expansão térmica	$7,88 \times 10^{-4}$ 1/K
Índice de viscosidade	105	Condutividade térmica 38 °C	0,126 W/m/K
Densidade 35 °C	876 kg/m ³	Calor específica 25 °C	1910 J/kg/K

3.2.3 Reservatórios do Fluido Térmico

Foi usado neste trabalho como reservatório do fluido térmico frio, um balde de polipropileno (polímero propenoeteno) de 20 litros de capacidade e um outro do mesmo material reforçado (para suportar altas temperaturas) com 10 litros de capacidade como reservatório para a recolha do fluido quente. As propriedades deste polímero encontram-se disponíveis na Tabela 4, conforme o fabricante Braskem.

Tabela 4: Propriedades termo-mecânicas do balde. Fonte: Braskem .

Índice de fluidez	0,6 g/min
Densidade	903 kg/m ³
Modulo de elasticidade	1350 MPa
Resistência a tração no escoamento	27 MPa
Condutibilidade térmica	0,17 W/mK
Resistência ao impacto	55 J/m
Temperatura de fusão	130 °C

3.3 Instrumentos de Colecta de Dados

3.3.1 Data Logger

Para automação das medições e aquisição de dados dos parâmetros medidos durante os testes, recorreu-se ao data logger da National Instruments, modelo NI 9213 conforme ilustra a Figura 17.

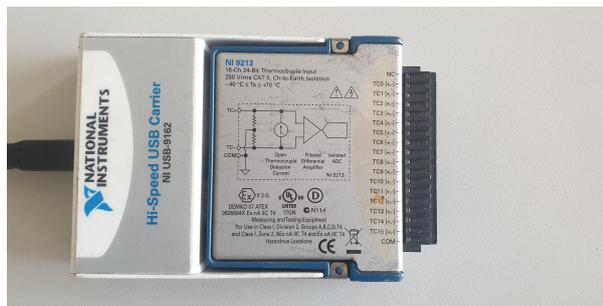


Figura 17: Data logger. Fonte: autor.

O dispositivo é de 24-bits¹, 16 canais de termopares com faixa de medição de tensão de $\pm 78,125$ mV, funciona em faixas de temperatura definidas pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (tipos de termopares *J*, *K*, *T*, *E*, *N*, *B*, *R*, *S*). Possui precisão de medição de temperatura menor que 0,02 °C e erro de ganho de 0,07% típico e 0,15%.

A Tabela 5 apresenta os modos de temporização e mostragem do data logger NI 9213.

Tabela 5: Modos de temporização e mostragem do datalogger NI 9213 .

Modo de temporização	Tempo de conversão/canal	Taxa de amostragem
Alta Resolução	55 ms	1 amostra/s
Alta velocidade	750 μ s	75 amostra/s

¹O dispositivo converte o sinal analógico para um valor digital de 24 bits, isto é, tem uma resolução de 24 bits.

3.3.2 Medição da Radiação Solar

A proporcionalidade directa entre a corrente de curto-circuito e radiação solar, possibilita o uso de uma célula solar como sensor da radiação solar. Na verdade, este é o princípio de funcionamento de um piranómetro fotovoltaico.

Piranómetro fotovoltaico consiste de uma célula única de silício monocristalino, considerado também Célula de Tecnologia Equivalente (CTE) do tipo BP Solar 324337 S (ver Figura 18), com constante de calibração igual a $30,0 \text{ mV}/1000 \text{ W}/\text{m}^2$, protegida por uma moldura de alumínio cuja caixa de conexões encontra-se na parte traseira, dentro da qual está afixada uma resistência *shunt* de aproximadamente 0.50% e de valor igual a $0,01\Omega$ (formada por duas resistências de $0,02\Omega$ em paralelo para evitar o aquecimento excessivo pela corrente que a célula fornece a aproximadamente $1000 \text{ W}/\text{m}^2$), cuja função é de converter a corrente de curto-circuito em voltagem medida na saída da célula. Esta voltagem é convertida em irradiação de acordo com a constante de calibração.



Figura 18: Piranómetro fotovoltaico. Fonte: autor.

O sensor de irradiação é colocado no mesmo plano do colector solar que se pretende estudar, de forma que tanto o colector quanto a célula, estejam nas mesmas condições quanto a irradiação incidente. As medições da irradiação foram feitas num plano virado para o norte, com inclinação de cerca de 45° , a uma altura média de 1,75 m relativamente a base.

3.3.3 Medição da Temperatura

As temperaturas foram medidas utilizando termopares do tipo *k* é formado por fios de Cromel (90% Níquel e 10% Cromo), como termoelemento positivo e Alumel (95% Níquel e 5% Alumínio), como termoelemento negativo. Para identificar a polaridade e descobrir qual é o lado positivo do termopar basta observar qual fio é mais resistente a torção.

Os termopares tipo *k* são sensores que actuam numa faixa de $220 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1260 \text{ }^\circ\text{C}$, com sensibilidade de aproximadamente $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e precisão de $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. São revestidos de tranças de fio de amianto, que lhes conferem uma excelente flexibilidade, resistência química, térmica e à tracção, conforme a Figura 19.

Os termopares para medir a temperatura do fluido na entrada e saída do colector foram instalados no interior dos tubos de condução, fixando-os de forma centralizada na direcção



Figura 19: Termopar tipo k. Fonte: autor.

contrária ao fluxo do fluido e para a temperatura ambiente, o termopar foi colocado da superfície do colector.

3.4 Sistema de Aquisição de Dados

O registo de dados foi realizada por meio de um data-logger digital da National Instruments, modelo NI 9213 e um computador como se mostra na Figura 20. As medidas de temperatura e radiação correspondem a sinais de tensão em (mV). O data-logger é ligado a um computador via porta USB que é comandado através de um software desenvolvido pelo autor, que permite configurar quatro (4) termopares e um (1) piranometro fotovoltaico. O data-logger foi programado para realizar medidas a cada 1 s com uma resolução de 6,5 dígitos.



Figura 20: Equipamento de visualização e aquisição de dados. Fonte: autor.

O esquema de aquisição de dados se mostra na Figura 21.

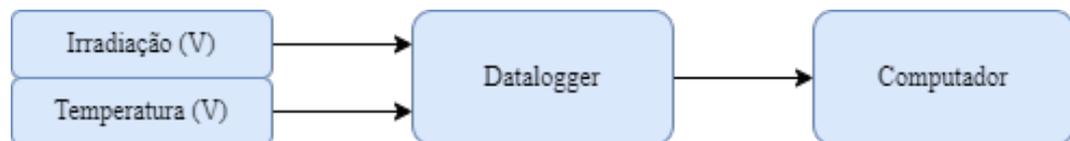


Figura 21: Esquema de aquisição de dados. Fonte: autor.

3.4.1 Programa Computacional

Foi desenvolvido um software com recurso a linguagem de programação *LabVIEW* para automação das medições de quatro (4) termopares e um (1) sensor de radiação solar. O presente

programa computacional fundamentou-se nos seguintes critérios para criação e funcionamento:

- ✓ Inicialização da comunicação (comunicação serial) entre o PC e o instrumento;
- ✓ Configuração dos parâmetros (taxa de transmissão, número de bit de dados, sentido de paridade, número de bits de parada e tempo de atraso) para o estabelecimento da comunicação;
- ✓ Configuração dos canais para a medição (um (1) canal para a medição da radiação, quatro (4) canais para medição temperatura);
- ✓ Envio de comando ao instrumento para a visualização das medições;
- ✓ Visualização numérica do estado de teste em cada instante durante o teste;
- ✓ Visualização gráfica das 5 medições em tempo real;
- ✓ Aquisição de dados de medição;
- ✓ Escolha do directório para salvamento de ficheiro de dados.

Para melhor compressão é necessário descrever detalhadamente a teoria na qual baseou-se a criação do programa computacional pelo que, abaixo são abordados alguns princípios fundamentais da linguagem de programação utilizada.

3.4.1.1 Princípios Básicos do LabVIEW

LabVIEW (acrónimo para **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench) é uma plataforma de *design* e desenvolvimento gráfico da National Instrument que tem sua aplicação em aquisição de dados, controle de instrumentos e automação industrial (Reddy *et al.*, 2020). O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que utiliza ícones, em vez de linhas de texto, para criar aplicações. Utiliza programação baseada no fluxo de dados, onde o fluxo de dados determina a execução. Qualquer programa feito em LabVIEW é chamado de instrumento virtual (*VI-virtual instrument*) uma vez que sua aparência e operação assemelham-se à de instrumentos reais (LabVIEW, 2005). Basicamente pode-se identificar em um VI duas partes que o compõem:

- Diagrama de blocos: é a estrutura do programa propriamente dita que contém o código fonte construído de forma gráfica;
- Painel frontal: constitui a interface com o usuário, apresentando de forma visual todos os controlos, gráficos e indicadores formando uma tela que simula o painel físico de um instrumento.

3.4.1.2 Comunicação entre LabVIEW e o Instrumento

O LabVIEW é totalmente integrado para comunicação com *hardwares* como GPIB, PXI, RS-232, RS-485, USB, ethernet e outros padrões de dispositivos para aquisição de dados (DAQ). Além de ser compatível com todos hardwares da National Instruments, o LabVIEW possui compatibilidade com vários dispositivos de outras empresas fabricantes de hardwares.

A conectividade do LabVIEW permite ainda o acesso via WEB com outros dispositivos e sistemas por meio de protocolos TCP/IP e Active X. O acesso a planilhas na plataforma Microsoft Excel é um dos grandes atractivos para laboratórios de ensaios que trabalham com documentos electrónicos e planilhas de dados. Durante o estudo, estabeleceu-se a comunicação entre LabVIEW 2016 e o Datalogger (NI 9213) via cabo USB (NI 192256A-01 USB A/B 2.0), o registo dos dados medidos ocorreu em tempo real numa planilha na plataforma Microsoft Excel.

Dois canais físicos foram criados, um para medição de temperaturas e outro para a irradiação, ambos com o modo de temporização de alta resolução. O canal de temperatura foi configurado para medir quatro temperaturas, com recurso a termopares tipo K. O canal de irradiação é na verdade um canal para medição de tensão obtida pelo sensor de irradiação que, multiplicado com a constante de calibração fornece a irradiação. O canal de tensão foi configurado para ler tensões na faixa de $\pm 78,125$ mV em Volts. Estes canais não são fixos, isto é, durante o teste pode-se configurar cada medição em qualquer um dos 16 canais disponíveis no *datalogger*. O programa apresenta também a data e hora de cada medição realizada, esses dados são lidos directamente do computador usado para realização das medições com a respectiva formatação local.

3.4.1.3 Descrição do Painel Frontal do Programa

A Figura 22 mostra o painel frontal do programa final construído.

A. Descrição do Campo A

Este campo é composto por três botões: iniciar, abortar e STOP. Os de iniciar e abortar são predefinidos pela linguagem de programação segundo a qual, o botão iniciar dá início a realização das medições e o botão de abortar (*abort execution*) para aborta a execução das medições sem gravar os dados medidos durante o teste. O botão STOP para o teste e salva os dados num ficheiro Excel no directório detalhadamente descrito no próximo campo.

B. Descrição do Campo B

Este campo deve ser devidamente preenchido antes do início das medições.

- ✓ A *Pasta p/salvar* dados é composta pelo directório onde se encontra o ficheiro Excel previamente criado e nomeado no qual gravar-se-á todos dados medidos durante o teste;

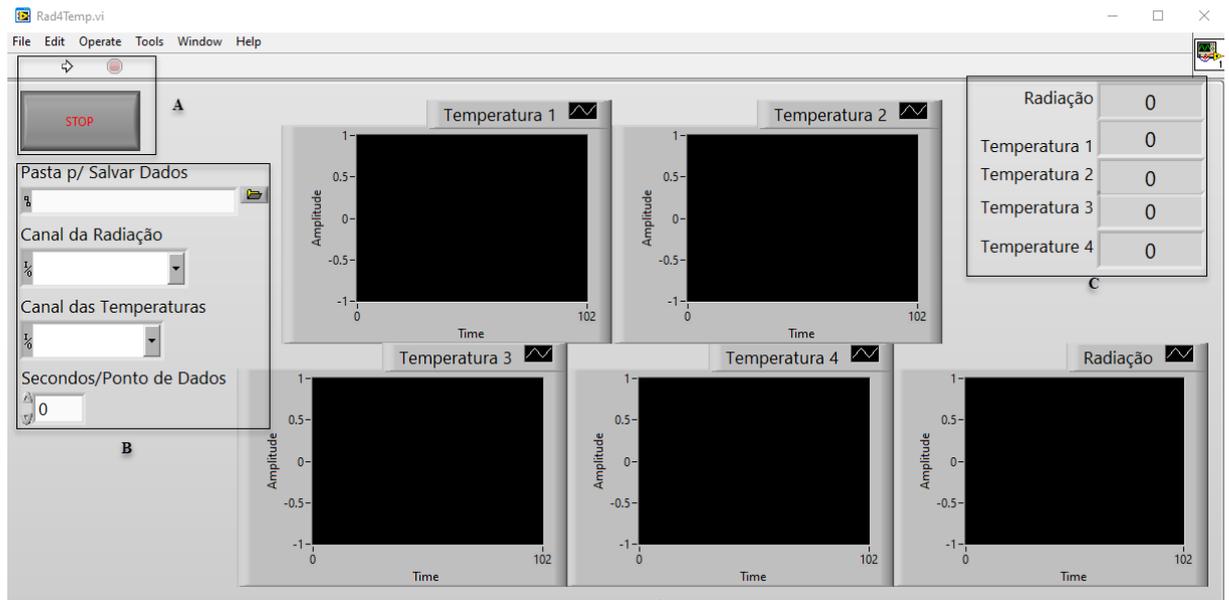


Figura 22: Ilustração do painel frontal do programa final construído. Fonte: autor.

- ✓ O *Canal da Radiação* descreve a posição da linha digital I/O no data logger onde o sensor da irradiação solar será conectado, salientar que a contagem do número de portas inicia do zero, isto é, para o primeiro canal temos a descrição Dev1/ai0 e para o décimo sexto canal temos a descrição Dev1/ai15;
- ✓ O *Canal das Temperaturas* descreve a posição das linhas digitais I/O no data logger onde os termopares tipo K serão conectados, para o efeito apenas quatro conexões são admitidas neste canal, a separação entre os canais é feita por uma vírgula, isto é, para os quatro canais tem-se: Dev1/ai0, Dev1/ai1, Dev1/ai2, Dev1/ai3, de acordo com a posição do termopar no data logger. Salientar que a ordem segundo a qual as posições são introduzidas no canal influi na saída;
- ✓ O *Segundo/Ponto de dados* é o intervalo de atraso entre as medições, medido em segundos. No teste realizado, configurou-se um intervalo de um segundo de atraso entre as medições, isto é, a cada segundo tínhamos um dado dos parâmetros medidos durante o teste.

C. Descrição do Campo C

Neste campo são exibidos valores dos parâmetros medidos durante o teste com precisão de duas casas decimais em conformidade com o tempo de atraso, isto é, para cada um segundo eram apresentados valores das temperaturas e irradiação medidos, dados estes que são automaticamente gravados no ficheiro Excel em tempo real.

D. Descrição do Restante Campo

No restante campo são apresentados cinco gráficos que descrevem em tempo real o comportamento das medições de temperatura e irradiação a cada segundo.

3.5 Medição da Vazão

Determinou-se a vazão mássica pelo método directo, com base numa proveta graduada de capacidade máxima de 300 ml volume e um cronómetro digital, conforme a figura abaixo ilustra. No instante inicial da saída do óleo quente do interior do colector, foi accionado o cronómetro medindo assim o tempo gasto para o enchimento, pausando a contagem temporal apenas quando este atingisse o nível dos 300 ml. Este processo é repetido por três vezes no mínimo por forma a aferir a margem de erro durante as medições e apenas o valor médio com respectivo desvio era considerado.

$$\dot{m} = \rho \frac{V}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad \dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \quad \dot{m} = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots + \dot{m}_n}{n} \quad (11)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica em [kg/s], ρ é a densidade do fluido térmico em [kg/m³], Δt é o tempo em [s], \dot{m}_n é a n-ésima medição experimental da vazão mássica.

A vazão mássica foi obtida pelo produto entre a densidade do fluido e a vazão volumétrica (razão entre o volume do fluido e o tempo gasto para enche-lo).

3.6 Determinação da Quantidade de Calor no Sistema

3.6.1 Determinação da Quantidade de Calor Útil

O calor útil (Q_u) é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura do fluido de trabalho que, da Primeira Lei da Termodinâmica, tem-se:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad (12)$$

3.6.2 Determinação da Quantidade de Calor Incidente

Quantidade de calor radiante incidente é a quantidade de radiação solar que intercepta a área do colector, conforme a equação:

$$Q_i = G \cdot A_c \quad (13)$$

3.6.3 Determinação da Quantidade de Calor Perdido

A quantidade de calor perdido é a diferença entre a quantidade de calor radiante incidente e a quantidade de calor útil, conforme a equação:

$$Q_p = Q_i - Q_u \quad (14)$$

3.7 Determinação da Eficiência Térmica do Colector

Para o intervalo de teste para cada ponto de dados de eficiência, o valor de eficiência é calculado usando a equação:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{m}C_p(T_s - T_e)dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} Gdt} \quad (15)$$

Pelo menos 16 pontos de dados devem ser obtidos para o estabelecimento da curva de eficiência, e uma equação para a curva deve ser obtida usando a técnica de ajuste de quadrados-mínimos. A curva não deve ser extrapolada além do limite dos dados.

CAPITULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4 Resultados e Discussão

4.1 Vazão Mássica

A vazão mássica do fluido foi determinada conforme a Equação (11), enquanto adopta-se a densidade e o volume como constantes. A Tabela 6 apresenta os valores da vazão mássica do fluido usados durante os ensaios e seus respectivos valores médios.

Tabela 6: Determinação da vazão mássica. Fonte: Autor

Data	Vaz. 1 (kg/s)	Vaz. 2 (kg/s)	Vaz. 3 (kg/s)	Média (kg/s)	Erro (%)
09/06/2022	0.006494	0.006548	0.006281	0.0064936	0.0115
10/06/2022	0.015135	0.015067	0.015135	0.0151352	0.0032
16/06/2022	0.001654	0.001641	0.00156	0.0016408	0.0041

4.2 Programa Computacional

Para avaliar o desempenho térmico de um colector solar térmico de tubos evacuados para cozinha solar foi necessário desenvolver um programa computacional que fornecesse dados tais como tempo, radiação e temperatura. O programa desenvolvido tem por resultado uma representação gráfica da radiação e temperaturas e produz um ficheiro Excel conforme ilustra a Tabela 7.

Tabela 7: Ficheiro Excel contendo os parâmetros para análise do desempenho do colector solar produzido pelo programa computacional. Fonte: autor

Date	Time	Radiação	Temperatura 1	Temperatura 2	Temperatura 3
6/16/2022	9:31:36 AM	0	36.126539	76.766406	30.986449
6/16/2022	9:31:41 AM	712.212361	36.284025	76.582703	30.962825
6/16/2022	9:31:42 AM	712.374968	36.044136	76.551154	30.972229
6/16/2022	9:31:43 AM	712.758877	36.1852	76.546679	30.970853
6/16/2022	9:31:44 AM	712.453128	35.833875	76.538624	30.963513
6/16/2022	9:31:45 AM	712.583693	35.621289	76.517368	30.972
6/16/2022	9:31:46 AM	713.315874	35.656913	76.478435	30.955027
6/16/2022	9:31:47 AM	712.736417	36.296349	76.454269	30.959385
6/16/2022	9:31:48 AM	712.604655	36.038885	76.427195	30.952504
6/16/2022	9:31:49 AM	712.984071	36.199807	76.404149	30.943558

4.3 Avaliação dos Perfis de Temperatura no Colector Solar

No dimensionamento de um sistema solar térmico para o aquecimento do fogão solar, a maior preocupação tomada em conta é a temperatura mínima necessária para cozer os alimentos, que é a temperatura de ebulição da água (100 °C). Para além da temperatura desejada, é também observada a eficiência do sistema e quantidade de calor produzido pelo colector.

No entanto, neste estudo foi realizada uma série de ensaios com o objectivo de conhecer as temperaturas que podem ser alcançadas no aproveitamento da radiação solar, bem como avaliar a eficiência do sistema. Com base no programa de leitura e aquisição de dados (LabVIEW) desenvolvido, foi possível registar os valores dos parâmetros térmicos durante os experimentos.

O primeiro ensaio teve lugar no dia 09 de Junho de 2022, sob céu totalmente limpo no período de manhã durante 4h, isto é, das 9:30h às 14:30h período em que registou-se um comportamento quadrático da radiação. O experimento foi realizado sob um regime permanente, com uma vazão mássica de 0,0064 kg/s onde observou-se um aumento da temperatura de saída (T_s) conforme o aumento da radiação solar com $90,18 \pm 5,24$ °C, 113,57 °C e 81,06 de média, máximo e mínimo respectivamente. Porém para radiações acima dos 900 W/m² verifica-se uma saturação da temperatura, conforme ilustra a Figura 23. A temperatura de saída (T_s) apresenta um aumento conforme o aumento da radiação solar dado que o reservatório fica exposto a acção da radiação e da temperatura ambiente.

A eficiência foi determinada conforme a Equação (15) obtendo-se 55,28 %, observou-se que ela apresenta um comportamento similar a temperatura de saída, porém constata-se ainda que a maior eficácia do colector solar é observada com a absorção da radiação solar de menor intensidade antes de se atingir a radiação máxima que como consequência, aumenta a temperatura média do fluido.

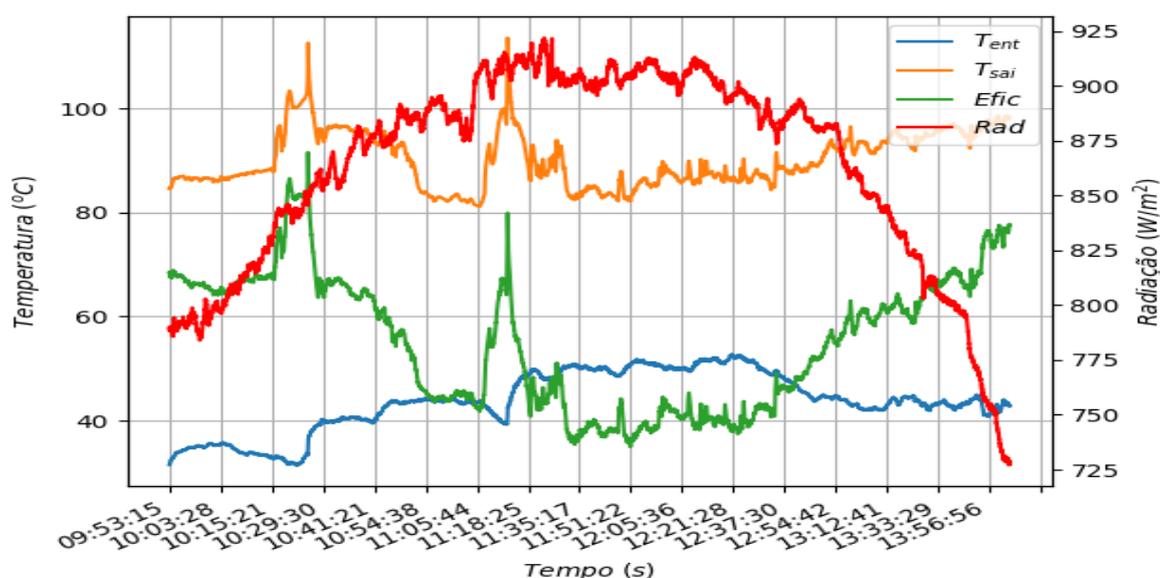


Figura 23: Variação da temperatura e eficiência em função da radiação solar do dia 09/06/22. Fonte: autor

A fim de aprofundar o estudo, um segundo ensaio foi realizado no dia 10 de Junho de 2022, sob céu totalmente limpo num período de 3h, isto é, das 10:00h às 13:00h em que o comportamento da radiação permanece quadrático. Alterando a vazão mássica para 0,0151 kg/s obteve-se os resultados apresentados na Figura 24.

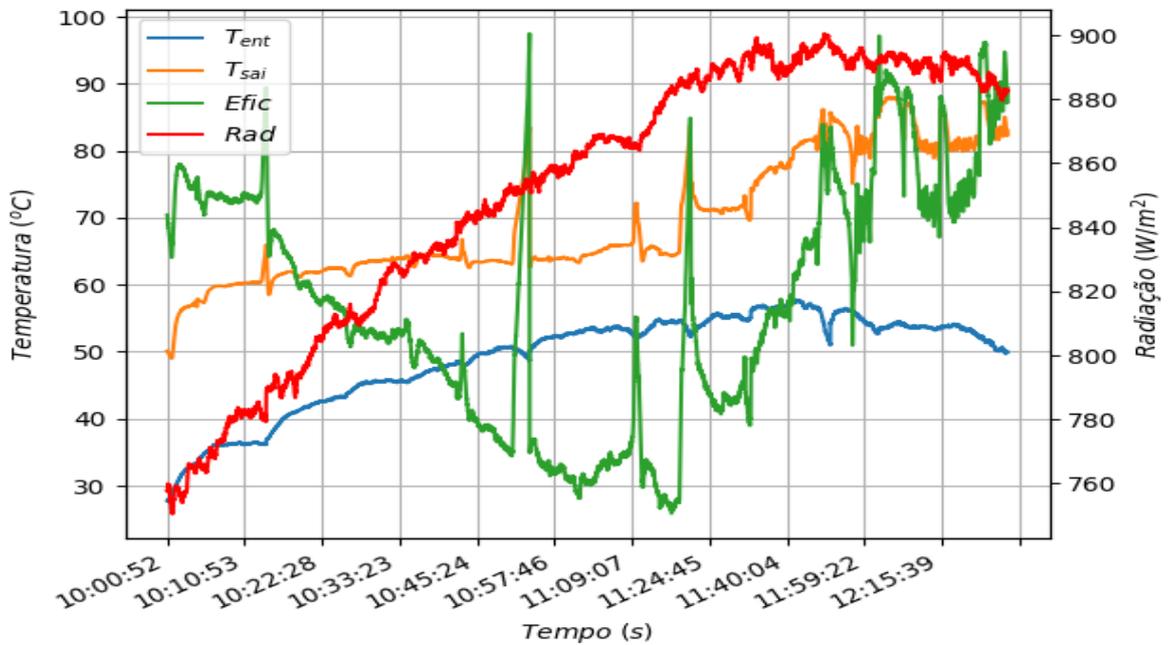


Figura 24: Variação da temperatura e eficiência em função da radiação solar do dia 10/06/22. Fonte: autor

O comportamento da temperatura de entrada mostra uma forte influência da radiação solar, a temperatura de saída apresenta um aumento ligeiro do período das 10h até as 11:30h, das 11:30h por diante intensifica-se conforme aumenta a radiação.

Relativamente a eficiência observa-se que do período das 10:33h as 11:45h, decresce significativamente devido a baixa diferença entre a temperatura de entrada e saída conforme ilustra o gráfico acima. Conforme o aumento da vazão realizada registou-se uma eficiência de 57, 41% e 69,51 ± 9 °C, 89,43 °C e 48,98 °C de temperatura média, máxima e mínima. A partir das 11:33h tanto a temperatura de saída quanto a eficiência regista um crescimento conforme o aumento da radiação, isso deve-se a vazão mássica com que o fluido de trabalho é escoado na saída do colector.

Analisando a eficiência e a temperatura de saída do fluido da Figura 23 em comparação com a Figura 24 tomando em conta a variação da vazão mássica efectuada observa-se um aumento significativo na eficiência com o aumento da vazão, isto é, a vazão mostra-se directamente proporcional a eficiência enquanto a temperatura de saída regista um ligeira diminuição dado que com o aumento da vazão mássica o fluido escoar com maior velocidade dispondo assim de pouco tempo para extracção de calor do colector solar.

A proporcionalidade directa entre a vazão mássica e a eficiência está estreitamente ligado

a primeira lei da termodinâmica que estabelece uma proporcionalidade directa entre a vazão mássica e a quantidade de calor útil que por sua vez é directamente proporcional a eficiência ($\eta \sim Q_u \sim \dot{m}$) conforme ilustra a Equação 5.

Com o intuito de alcançar a máxima temperatura possível para alimentar a cozinha solar, reduziu-se a vazão mássica até 0,0016 kg/s que é o mínimo possível configurável para uma circulação natural, os resultados do ensaio são apresentados na Figura 25.

O ensaio foi realizado no dia 16 de Junho de 2022, sob céu totalmente limpo no período de manhã durante 2h, isto é, das 9:30h as 11:10h período em que a radiação registou um aumento quase linear conforme a Figura 25.

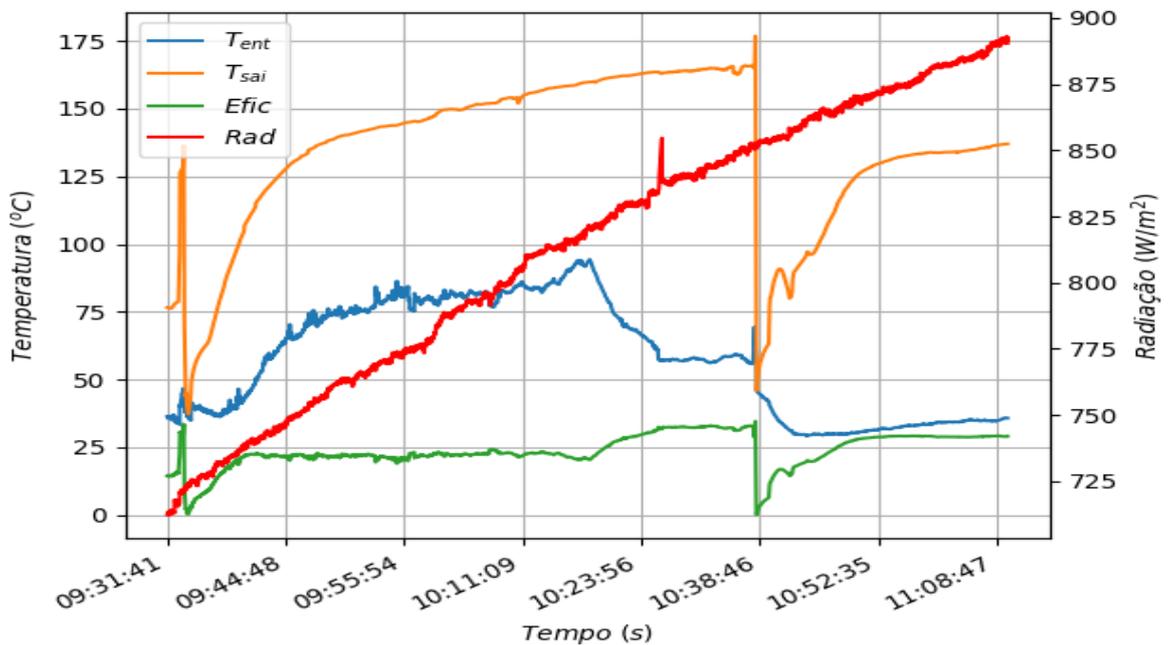


Figura 25: Variação da temperatura e eficiência em função da radiação solar do dia 16/06/22. Fonte: autor

O gráfico mostra uma forte dependência entre a radiação solar e a temperatura de saída do colectador dado que o aumento da radiação implica um aumento quase exponencial da temperatura de saída, isto é, em 14 minutos aumenta de 40 a 140 °C e atinge saturação aos 175 °C. Este resultado aproxima-se ao obtido por Esen (2004) no seu fogão solar de tubo evacuado que foi utilizado com sucesso para cozinhar vários alimentos e os processos de cozimento foram realizados com o fogão em períodos de 27 a 70 minutos.

Devido a baixa velocidade de escoamento do fluido na saída do colectador, verifica-se um aumento não só da temperatura de saída conforme acima citado, mas também da temperatura de entrada visto que o calor produzido pelo colectador transmite-se por convecção para o sensor da temperatura de entrada que só não atinge temperaturas próximas a de saída devido ao fluxo de massa que apesar da sua baixa velocidade opõe-se ao fluxo convectivo de calor.

Avaliando-se ainda o comportamento da eficiência no presente ensaio constata-se uma di-

minuição drástica em comparação com os dois ensaios previamente analisados pois neste a eficiência varia entre 0,04 e 34,60% com uma média de 23,67%. Esta diminuição da eficiência é causada pela diminuição significativa da taxa de variação da temperatura no colector e a diminuição da vazão mássica que resultam numa diminuição do calor útil.

Analisando de forma generalizada os resultados dos três gráficos acima referidos pode-se afirmar que a eficiência do colector é directamente proporcional a vazão mássica, isto é, com o aumento da vazão mássica aumenta a quantidade de calor extraído do colector através do fluido térmico e como consequência aumenta também a eficiência térmica do colector.

A temperatura de saída apresenta um aumento com a diminuição da vazão visto que, com o aumento da vazão mássica aumenta-se a velocidade de escoamento do fluido de trabalho no colector resultando num baixo aproveitamento térmico principalmente em radiações de baixa intensidade.

A temperatura de entrada por sua vez apresenta um comportamento similar com a temperatura de saída em relação a vazão mássica, isto é, a diminuição da velocidade de escoamento do fluido no colector favorece a transmissão do calor por convecção aumentando assim a temperatura de saída.

Durante os ensaios realizados, oscilações bruscas foram verificadas nas curvas de temperatura como ilustram os gráficos acima apresentados, estas oscilações representam o processo de carga e descarga do óleo térmico durante o ensaio.

Os picos são causados pelo aumento do óleo térmico no reservatório que por acção da gravidade aumenta sua energia potencial causando um aumento da pressão sobre as paredes do colector arrastando as partículas de óleo altamente quentes aderidas a mesma escoando-as para a saída do colector passado pelo sensor que regista a sua temperatura, este processo possui uma duração de 3 segundos no máximo. Já os vales por sua vez ocorrem devido a descargas, quando o fluido esgota-se no reservatório e o colector fica preenchido apenas por ar, e o sensor detecta a temperatura do mesmo que é aproximadamente igual a do ambiente.

A energia fornecida pelo colector solar não pode ser controlada devido a intermitência da sua fonte de alimentação e raramente coincide com a variação das necessidades de energia térmica. Para o armazenamento da energia calorífica absorvida pelo óleo térmico, é necessário integrar um termoacumulador no sistema solar possibilitando assim a sua utilização quando necessário. O termoacumulador é um reservatório de fluido térmico (água, gás e ar) revestido de material isolante de baixa condutividade térmica, geralmente usada espuma rígida de poliuretano injectado a alta densidade.

É de salientar que por questões de escassez de recursos financeiros e matérias o estudo do termoacumulador esta fora do escopo do presente trabalho pelo que limitar-se-á a análise do desempenho térmico do colector solar.

4.4 Energia Produzida pelo Colector Solar e as Perdas Térmicas

Durante o processo de aquecimento do óleo térmico é necessário que este receba energia resultante da conversão da radiação solar em energia térmica (calor). Durante o seu funcionamento esta sujeito a perdas térmicas, perdas estas que podem ocorrer por três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Para reduzir estas perdas, os tubos de vidro (com absorvedores internos) são sujeitos a vácuo. Um vácuo menor que $10^{-2} Pa$ dentro do tubo reduz bastante as perdas de calor por condução e elimina as perdas por convecção. Assim, as perdas de calor para a atmosfera são significativamente reduzidas, sendo de realçar que mesmo com uma temperatura de absorção de $120\text{ }^{\circ}C$ ou maior, os tubos de vidro permanecem frios no seu exterior. No que diz respeito a perdas por radiação, uma vez que as características de perda do colector não dependem do meio em que este se encontra, não podem ser reduzidas pela criação de vácuo. Estas perdas de radiação mantêm-se reduzidas, como no caso de colectores planos, pela selecção de bons revestimentos (valor de emissividade abaixo).

Para aferir a quantidade de calor utilizado, incidente e perdido foram usadas as Equações (12), (13) e (14) respectivamente. Os dados experimentais para avaliação das quantidades de calor incidente, utilizado e perdido foram obtidos nos dias 09, 10 e 16 de Junho de 2022 sob condições de céu limpo.

Dos dados experimentais obtidos no dia 09 de Junho de 2022 com uma vazão mássica de $0,0064\text{ kg/s}$, observa-se através dos gráficos abaixo que quando a quantidade de calor disponível aumenta, as perdas térmicas também são maiores e quando esta diminui, as perdas tornam-se menores, Figura 26.

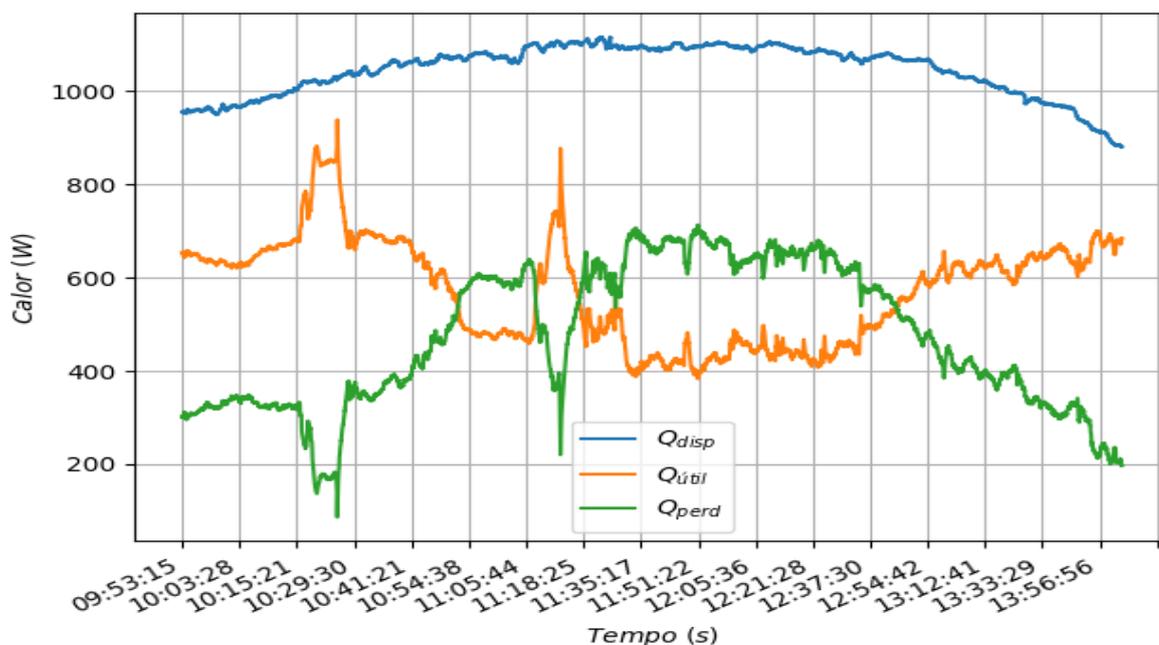


Figura 26: Variação da quantidade de calor incidente, utilizado e perdido em função do tempo (09/06/22). Fonte: Autor

A energia útil transferida para o óleo térmico (Q_u) foi determinada a partir da primeira lei da termodinâmica, Equação 12. As perdas térmicas foram obtidas com base na Equação 14. A quantidade de calor útil produzida pelo colector durante a conversão do calor disponível (radiação incidente) atingiu valores próximos de $571,99 \pm 54,52$ W, 938,11 W e 451,63 W de média, máximo e mínimo respectivamente, quando o calor disponível varia entre 1115,52 e 879,71 Watts. Por outro lado, observa-se que nesse processo de aquecimento do óleo térmico o somatório das perdas térmicas no colector atingiram valores de $472,41 \pm 141,81$ W, 712,99 W e 86,30 W de média, máximo e mínimo respectivamente. Estas perdas térmicas estão ligadas a variação da radiação (calor disponível), ou seja, quando há aumento da radiação, as perdas sofrem um aumento notável e, conseqüentemente, o rendimento do colector solar diminui tornando desta forma o sistema menos eficiente.

Aumentando a vazão mássica para 0,0151 kg/s verifica-se um aumento na quantidade de calor útil produzido pelo colector e uma conseqüente diminuição do calor dissipado conforme ilustram os gráficos da Figura 18 do ensaio que teve lugar no dia 10 de Junho de 2022. Dos dados experimentais obtidos e apresentados na Figura 27 abaixo, observa-se que o calor útil diminui conforme o aumento do calor disponível e aumenta conforme a diminuição do mesmo, isso deve-se ao aumento da temperatura de entrada do fluido no colector por acção da radiação solar incidente. As perdas de calor conforme ilustram os gráficos tem um comportamento similar porem oposto ao calor útil.

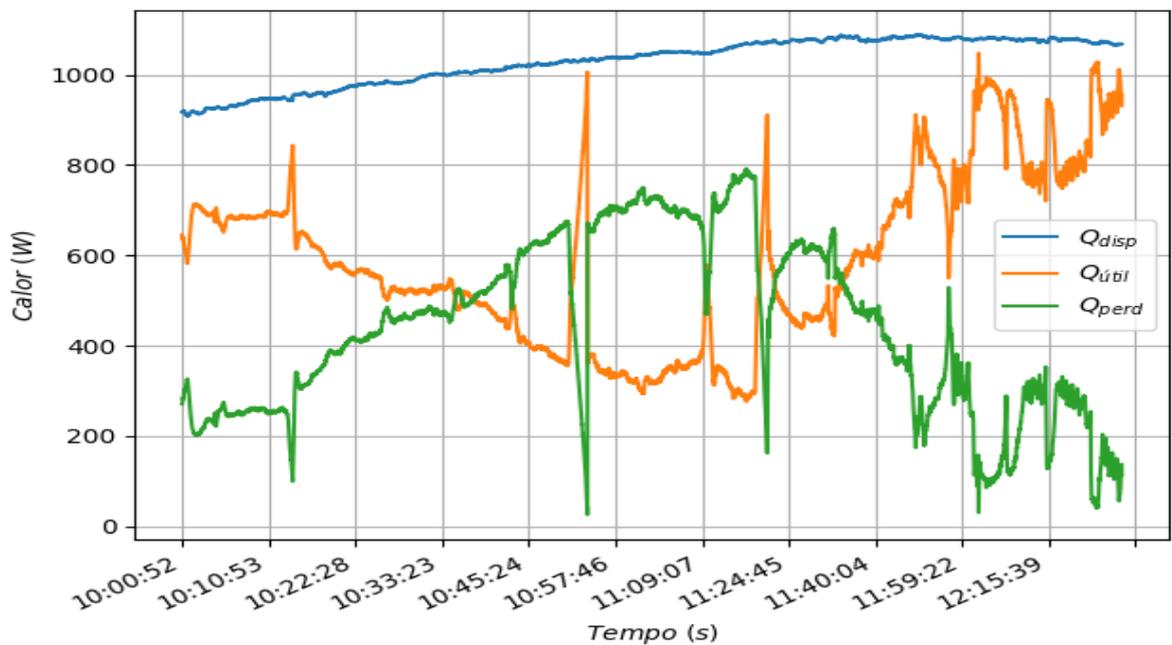


Figura 27: Variação da quantidade de calor incidente, utilizado e perdido em função do tempo (10/06/22). Fonte: Autor

Numericamente falando, para o calor útil obteve-se $590,38 \pm 189,49$, 1047,79 e 276,32 Watts de média, máximo e mínimo. Por outro lado, o calor disponível variava entre 1089,65 e 908,27

Watts, enquanto as perdas variavam entre 792,28 e 25 Watts com uma média de $439,05 \pm 204,55$ Watts.

Reduzindo a vazão mássica para o seu valor mínimo possível, 0,0016 kg/s, a fim de obter temperaturas quase próximas a temperatura de estagnação observa-se uma diminuição drástica da quantidade de calor útil e um aumento significativo da quantidade de calor dissipado conforme os gráficos da Figura 28 do ensaio realizado no dia 16 de Junho de 2022. O calor útil aumenta conforme o calor disponível, isto é, ele aumenta com o aumento da radiação solar mesmo quando este atinge seu pico.

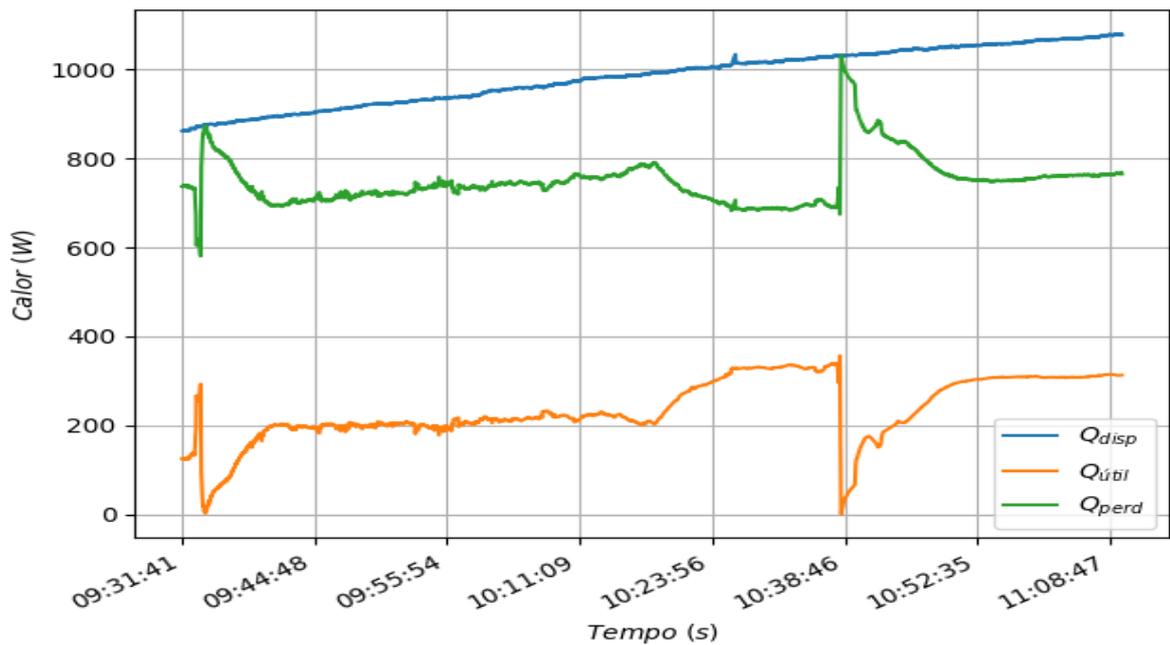


Figura 28: Variação da quantidade de calor incidente, utilizado e perdido em função do tempo (16/06/22). Fonte: Autor

Apesar das temperaturas obtidas neste ensaio serem muito maiores, as perdas também são significativamente altas variando entre 1031,64 a 580,38 Watts, com uma média de $748,99 \pm 264,46$ W, quando o calor disponível varia entre 1080,68 a 861,76 Watts. A quantidade de calor útil por sua vez varia entre 0,44 a 356,67 Watts com uma média de $235,05 \pm 70,32$ Watts.

De acordo com os três gráficos pode-se concluir que todo calor disponível, porem não aproveitado converte-se em calor dissipado pelo que o gráfico do calor útil possui um comportamento similar e oposto ao gráfico do calor perdido.

A quantidade de calor produzido pelo colector é uma função dependente da vazão mássica com que se escoar o fluido de trabalho, isto é, com o aumento da vazão mássica verifica-se um aumento da quantidade de calor extraída do colector. Porem esse comportamento não deve ser extrapolado para valores de vazão não propostos no presente trabalho sem os devidos testes visto que o calor produzido também é uma função da variação da temperatura e se esta tender a zero independentemente do valor da vazão esta também tendera a zero.

4.5 Análise da Eficiência do Colector

O presente ensaio foi realizado no dia 15/09/2022, com o céu totalmente limpo, por um período de 21:07 minutos, isto é, das 12:12:55 as 12:34:48 com uma variação crescente da radiação solar de 893,28 a 901,25738 W/m^2 e, decrescendo de 901,25738 a 886,3104 W/m^2 , com uma vazão de 0,017624495 kg/s .

Na Figura 29 é apresentada a dependência linear da eficiência com o parâmetro x . O parâmetro x é definido como $(T_m - T_a)/G$, onde $T_m = (T_s + T_e)/2$.

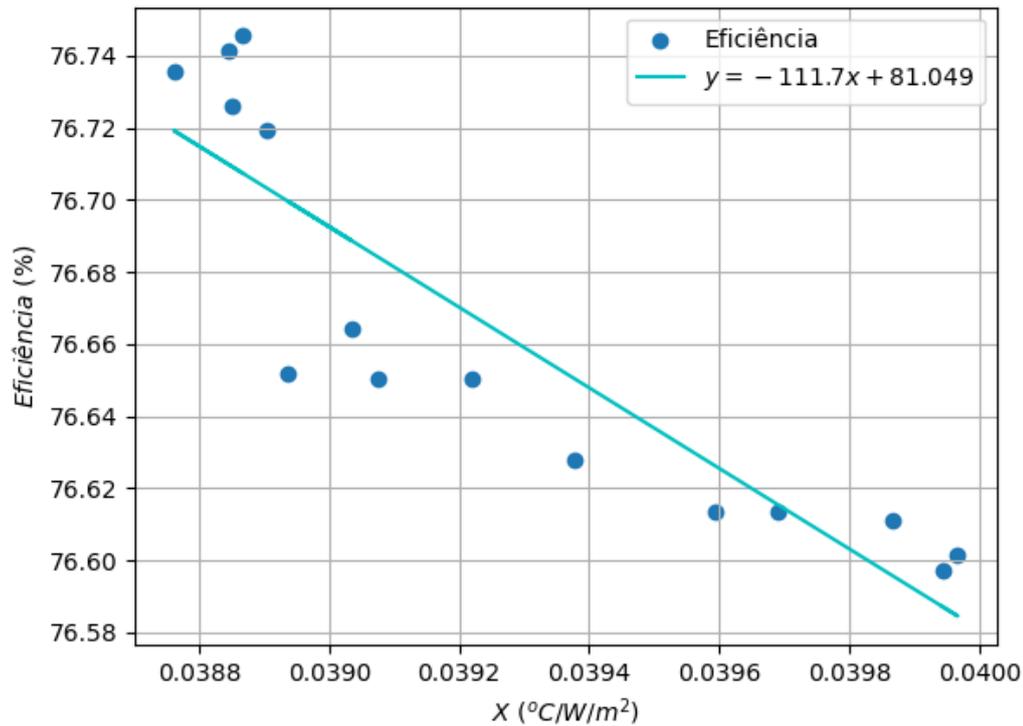


Figura 29: Curva característica do coletor solar. Fonte: autor

Os resultados mostram uma dependência linear descrita por:

$$y = -111,7x + 81,049 \quad (16)$$

Onde valor do factor de determinação $R^2 = 0,7916$ ($R = 0,88971$) indica uma forte relação de correlação entre ambos os parâmetros. O ponto de intersecção das características de eficiência térmica com o eixo y determina aproximadamente a eficiência óptica do coletor solar, mais precisamente, o produto $F_R \cdot (\tau\alpha) = 0,81049$. A tangente do ângulo de inclinação da curva de eficiência ao eixo x , corresponde ao produto $F_R \cdot U_L = 111,7 W/m^2/^\circ C$ e determina as perdas de calor associadas aos parâmetros de construção e material do coletor. Quanto menor o ângulo de inclinação, menor a perda de calor.

4.5.1 Temperatura de Estagnação

A estagnação é o fenómeno que ocorre no colector, quando não há escoamento da energia térmica convertida pelo colector para os pontos de entrega/armazenamento, o colector continua a aquecer até atingir a sua temperatura máxima, que é a sua temperatura de estagnação. A temperatura de estagnação é a temperatura atingida quando a estagnação persiste até que as perdas do colector solar térmico se iguale à energia absorvida. A temperatura de estagnação depende das condições ambientais (temperatura ambiente e irradiância hemisférica) e atinge valores diferentes dependendo dessas condições. Os fabricantes dos colectores solares estabelecem na ficha técnica dos mesmos, a temperatura de estagnação que, para o colector solar usado no trabalho (Modelo: TZ58/1800-15R5), apresenta 250 °C.

Testes para aferir a temperatura de estagnação do colector solar térmico de tubos evacuados foram realizados e, os resultados foram usados para confrontar o valor pré-estabelecido pelo fabricante. Os testes ocorreram num período de 3 dias (07, 08 de Junho e 05 de Setembro de 2022) sob condições de céu limpo, nas horas de sol intenso, das 10:00h as 14:00h. Na Figura 30 são apresentados os gráficos que descrevem o comportamento das temperaturas de estagnação em função da radiação solar.

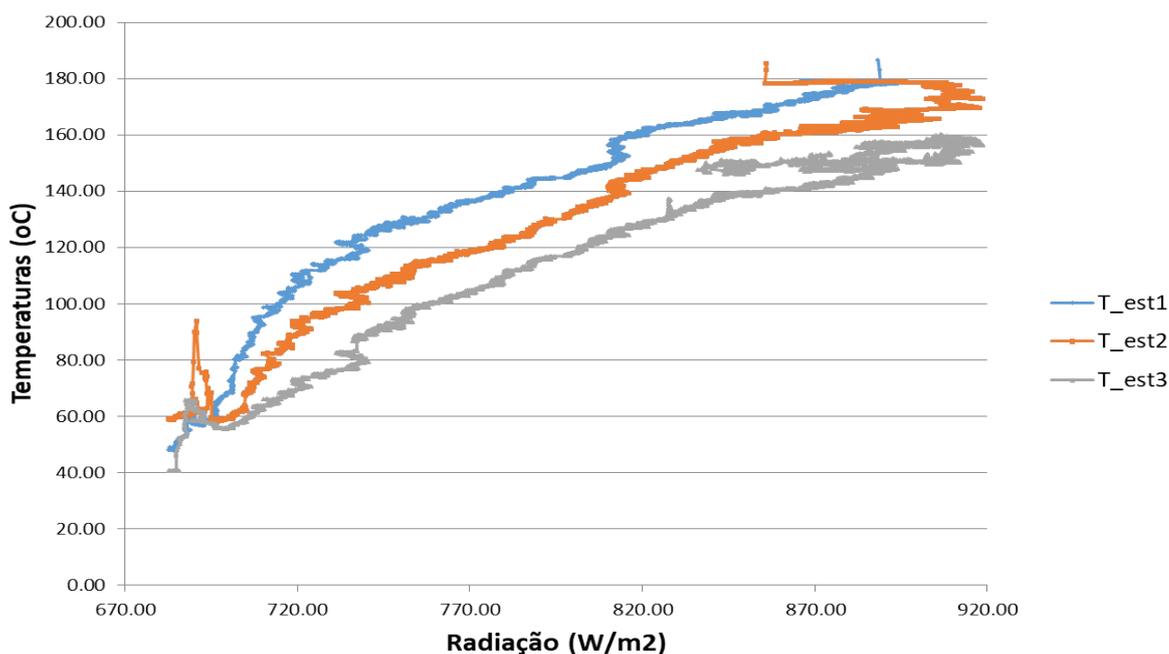


Figura 30: Variação da temperatura de estagnação. Fonte: autor

A temperatura máxima de estagnação dos dias 07/06/22, 08/06/22 e 05/09/22 foi de 186,54, 185,52 e 160,28 °C, para uma radiação solar de 798,81, 773,20 e 845.72 W/m² respectivamente. Da Figura 30 constata-se que a temperatura de estagnação é directamente proporcional a irradiância solar porém, devido a influência negativa da velocidade do vento, ausência de um tubo evacuado no colector e falta de isolamento da entrada do mesmo, não foram atingidos os 250 °C fornecidos pelo fabricante.

CAPITULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5 Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusão

O programa desenvolvido no Laboratório de Testes através da linguagem LabVIEW permite fazer um monitoramento dos perfis de temperatura e da irradiação solar em função do tempo. Este programa permite também, a aquisição e armazenamento de dados no computador que possibilitou a análise do desempenho térmico do colector solar de tubo evacuado.

Durante a análise do desempenho térmico do colector solar de tubo evacuado, avaliou-se a variação da temperatura ambiente e irradiância solar, assim como das condições de operação do colector nomeadamente: a vazão mássica, temperatura do fluido de trabalho na entrada e saída do colector.

O fenómeno de estagnação do fluido térmico no colector foi investigado e obteve-se uma temperatura máxima de 186,54 °C, e uma proporcionalidade entre a irradiação solar e a temperatura de estagnação foi verificada, comprovando assim a possibilidade do uso do colector para aplicações de cozinha solar, visto que necessita de temperaturas acima dos 100 °C que, é a temperatura de ebulição da agua. Foram analisados para um conjunto de vazões mássicas os perfis de temperaturas na entrada e saída do fluido térmico, assim como foi calculada a eficiência. Dos resultados observados conclui-se que a eficiência do colector é máxima para maior vazão possível e mínima para menor vazão, isso deve-se a proporcionalidade directa entre o calor utilizado e a vazão, calor este que por sua vez é directamente proporcional a eficiência.

Constata-se ainda que, quanto maior é a vazão, menor é a diferença de temperaturas de entrada e saída, isso deve-se ao elevado calor específico do fluido, necessita de muita energia para variar a sua temperatura pelo que, a vazão mais recomendável para aplicações de cozinha solar é a de 0,0016 kg/s que apresenta uma temperatura máxima e média de 176,75 e 133,87 ± 28,87 °C. Estas temperaturas entram em conformidade com Esen (2004), num estudo do fogão solar integrado de colector de tubo de vácuo com heat pipe, no qual confeccionou alimentos como arroz, massa esparguete, batatas, frango, omelete e quatro copos de chá no intervalo de 27 à 70 minutos.

Em relação as perdas térmicas no colector também foram analisadas em função das vazões e verificou-se que, quanto menor for a vazão maior serão as perdas de calor. No que diz respeito a curva de eficiência térmica do colector solar verifica-se uma eficiência óptica de 81,049 % e observa-se que o rendimento do colector diminui à medida que a temperatura média do fluido aumenta, ou seja, o colector oferece maior rendimento térmico quando sobre a superfície cilíndrica do colector chega a radiação solar de mínima intensidade.

Desta forma, com os resultados obtidos, conclui-se que o colector de tubo evacuado é capaz de prover energia suficiente para confeccionar alimentos e ser armazenada para uso posterior.

5.2 Recomendações

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- A reposição do tubo evacuado em falta no colector de modo a diminuir as perdas de calor e o uso de termopares tipo T para medição da temperatura de entrada e saída do fluido térmico no colector;
- Desenvolver o estudo do mesmo sistema solar térmico variando neste caso o ângulo de inclinação do colector para ângulos diferentes de 45° , usando o ângulo correspondente a latitude de lugar (Cidade de Maputo);
- Obter a curva característica do colector solar para diferentes ângulos de inclinação em relação a superfície horizontal.
- Uso de uma bomba para uma medição mais precisa da vazão.

6 Referências Bibliográficas

- Al-Waeli, A. H., Kazem, H. A., Chaichan, M. T., & Sopian, K. (2019). *Photovoltaic/thermal (pv/t) systems: Principles, design, and applications*. Springer Nature.
- Ayompe, L., Duffy, A., Mc Keever, M., Conlon, M., & McCormack, S. (2011). Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (etcs) for domestic water heating systems in a temperate climate. *Energy*, 36(5), 3370-3378. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211002003>
- Badescu, V. (2014). *Modeling solar radiation at the earth's surface: Recent advances*. Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from https://books.google.co.mz/books?id=gE_HrQEACAAJ
- Costa, R. C. d. (2021). Utilização da ferramenta on-line do atlas eólico e solar do ceará na avaliação preliminar do potencial solar em duas localidades do estado.
- Cuamba, B. C., Chenene, M., Mahumane, G., Quissico, D., Lovseth, J., & O'Keefe, P. (2006). A solar energy resources assessment in mozambique. *Journal of Energy in Southern Africa*, 17(4), 76–85.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Esen, M. (2004). Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants. *Solar Energy*, 76(6), 751-757. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04000027>
- Finscope. (2019). Inquérito ao consumidor: Destaques. *Finmark*. Retrieved from <https://www.bancomoc.mz/media/g03kokfa/finscope-2019-pt.pdf>
- Goswami, D. (2015). *Principles of solar engineering, third edition*. Taylor & Francis. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=s0n-ugAACAAJ>
- Hayek, M., Assaf, J., & Lteif, W. (2011). Experimental investigation of the performance of evacuated-tube solar collectors under eastern mediterranean climatic conditions. *Energy Procedia*, 6, 618-626. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211014822> (Impact of Integrated Clean Energy on the Future of the Mediterranean Environment?)
- Inhaquites, M. M., et al. (2020). Caracterização da resposta temporal e angular de piranômetro térmico com radiação solar natural. In *Vii congresso brasileiro de energia solar-cbens 2018*.
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000103>
- Khan, B. (2017). *Non-conventional energy resources*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited.
- Khartchenko, N., & Kharchenko, V. (2013). *Advanced energy systems, second edition*. Taylor

- & Francis. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=BSAtAgAAQBAJ>
- Kumar, R., Adhikari, R. S., Garg, H., & Kumar, A. (2001). Thermal performance of a solar pressure cooker based on evacuated tube solar collector. *Applied Thermal Engineering*, *21*(16), 1699–1706.
- LabVIEW, R. (2005). User manual usa. *National Instruments Corporation*.
- Liou, K. (2002). *An introduction to atmospheric radiation*. Elsevier Science. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=6xUpdPOPLckC>
- Ministério da Energia. (2007). *Estratégia de desenvolvimento de energias novas e renováveis*. Ministério da Energia.
- Morrison, G., Di, J., & Mills, D. (1993). Development of a solar thermal cooking system. school of physics, university of sydney.
- Myers, D. (2017). *Solar radiation: Practical modeling for renewable energy applications*. CRC Press. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=or3MBQAAQBAJ>
- Ortiz, H. A. R. (2020). Análise comparativa experimental de um coletor solar tubular do tipo heat-pipe com um do tipo water-in-glass.
- Pandey, V., Pandey, P., & Garg, S. (2021). *Advances in electromechanical technologies: Select proceedings of temt 2019*. Springer Nature Singapore. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=PJKbzgEACAAJ>
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. d., Rütther, R., ... de Souza, J. G. (2017). Atlas brasileiro de energia solar (2a edição). *São José dos Campos: Inpe*, 13.
- Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro, 1*, 47–499.
- Ponzoni, F. J., Antunes, M. A. H., Pinto, C. T., Lamparelli, R. A. C., & Junior, J. Z. (2015). *Calibração de sensores orbitais*. Oficina de Textos.
- Quaschnig, V. (2016). *Understanding renewable energy systems*. Taylor & Francis. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=qyzeCwAAQBAJ>
- Reddy, V., Prasad, V., Wang, J., & Reddy, K. (2020). *Soft computing and signal processing: Proceedings of 2nd icscsp 2019*. Springer Singapore. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=bpXWDwAAQBAJ>
- Sabiha, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Mahian, O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *51*, 1038–1054.
- Sawhney, G. (2012). *Non conventional resources of energy*. PHI Learning. Retrieved from <https://books.google.co.mz/books?id=y-xYsi5469UC>
- Singh, S. (2015). *Non conventional energy resources*. Pearson India. Retrieved from https://books.google.co.mz/books?id=B7_ODAAAQBAJ
- Soysal, O. A., & Soysal, H. S. (2020). *Energy for sustainable society: From resources to users*. John Wiley & Sons.

Zhiqiang. (2005). Development of solar thermal systems in china. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 86(3), 427-442.