



INSTITUTO LATINO-
AMERICANO DE INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)

**PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO INTERDISCIPLINAR EM
ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO
CALHA PARABÓLICA DE BAIXO CUSTO AUXILIADO POR SISTEMA DE
RASTREAMENTO SOLAR**

LUCIANO ARI FIAMONZINI

Foz do Iguaçu-PR
2022

LUCIANO ARI FIAMONZINI

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO
CALHA PARABÓLICA DE BAIXO CUSTO AUXILIADO POR SISTEMA DE
RASTREAMENTO SOLAR**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa De Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia E Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade, sob orientação do Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas e Coorientação do professor Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

Foz do Iguaçu - PR
2022
LUCIANO ARI FIAMONZINI

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

F439

Fiamonzini, Luciano Ari.

Projeto e desenvolvimento de um concentrador solar tipo calha parabólica de baixo custo auxiliado por sistema de rastreamento solar / Luciano Ari Fiamonzini. - Foz do Iguaçu-PR, 2022.

75 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu-PR, 2022.

Orientador: Gustavo Adolfo Ronceros Rivas.

1. Bancada didática. 2. Energia Solar Térmica Concentrada. 3. Concentrador Solar Parabólico. 4. Sistemas de rastreamento Solar. I. Rivas, Gustavo Adolfo Ronceros. II. Título.

CDU 620.91

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO
CALHA PARABÓLICA DE BAIXO CUSTO AUXILIADO POR SISTEMA DE
RASTREAMENTO SOLAR**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade, sob orientação do Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas e Coorientação do professor Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas (PPGIES/UNILA)

Co-Orientador: Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior (PPGIES/UNILA)

Dr. Valeri Vlassov Vladimirovich (INPE)

Dr. Diego Cunha Malagueta (UFRJ)

Dr. Jiam Pires Frigo (UNILA)

Foz do Iguaçu, 04 de maio de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

LUCIANO ARI FIAMONZINI

Curso: Mestrado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade

Tipo de Documento

- | | |
|------------------------|--|
| (.....) graduação | (.....) artigo |
| (.....) especialização | (.....) trabalho de conclusão de curso |
| (X.) mestrado | (.....) monografia |
| (.....) doutorado | (X..) dissertação |
| | (.....) tese |
| | (.....) CD/DVD – obras audiovisuais |
| | (.....) _____ |

Título do trabalho acadêmico: Projeto E Desenvolvimento De Um Concentrador Solar Tipo Calha Parabólica De Baixo Custo Auxiliado Por Sistema De Rastreamento Solar

Nome do orientador (a): Dr. Gustavo Adolfo Ronceros Rivas

Data da Defesa: 04/05/2022.

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, 24 de Maio de 2022.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Espectro de luz emitido pelo sol em relação a sua intensidade.	21
Figura 2: Relação em entre temperatura e relação de concentração para diferentes tecnologias.	23
Figura 3: Coletor solar de disco parabólico.	23
Figura 4: Coletor solar de torre central com heliostatos.	24
Figura 5: Coletor de calha parabólica.	25
Figura 6: Representação do movimento aparente do sol.....	26
Figura 7: fluxograma representativo do método utilizado para pesquisa bibliográfica	26
Figura 8: Modelo de protótipo de baixo custo.	29
Figura 9: Sistema modular com 3 diferentes configurações.	30
Figura 10: Modelo de coletor solar com alto fator de concentração	30
Figura 11: Coletor solar parabólico estacionário.	31
Figura 12: Tubo evacuado tipo TPCT.....	32
Figura 13: Diferentes modos de rastreamento analisados.....	32
Figura 14: Comparação entre os modelos de simulação e o experimental em 5 diferentes condições de teste.	33
Figura 15: Comparação entre, (a) critérios de avaliação de desempenho (PEC); (b) eficiência térmica modificada.	34
Figura 16: Modelo de tubo senoidal estudado	35
Figura 17: Parâmetros geométricos de um CSCP, onde o corte na figura indicado pela letra (B) representa o tubo absorvedor.....	37
Figura 18: Variação do angulo de borda.	38
Figura 19: (a) Base para apoio da parábola; (b) Detalhe da fixação da mão francesa.	40
Figura 20: Base articulada da parábola (a) Detalhe dos mancais utilizados; (b) Base de fixação da parábola.....	41
Figura 21: Base do CSCP.....	42
Figura 22: Esquema do circuito hidráulico do CSCP.	43
Figura 23: (a) Sensor de posicionamento solar; (b) Vista da base do sensor de posicionamento solar, (c) LDR <i>Light Dependent Resistor</i>	44
Figura 24: (a). Atuador azimutal com motor elétrico redutor com acionamento por corrente. (b) Atuador linear com sistema de rosca.	45
Figura 25: Diagrama de blocos representativo do sistema de rastreamento.	45

Figura 26: Algoritmo decisório para correção do alinhamento vetorial da calha.	46
Figura 27: Captura de tela do painel de visualização dos dados.	47
Figura 28: Diagrama de funcionamento do sistema de aquisição de dados.	48
Figura 29: Estação meteorológica.	49
Figura 30: Determinação da constante de tempo.	51
Figura 31: Gráfico da eficiência pelo parâmetro representativo de calor.	54
Figura 32: Temperatura máxima atingida com o tubo “ao vazio”.	59
Figura 33: Avaliação do tempo de aquecimento do coletor.	60
Figura 34: Temperatura ambiente e velocidade do vento no dia do ensaio.	60
Figura 35: Eficiência em função do fluxo de massa.	61
Figura 36: Eficiência e variação de temperatura entre entrada e saída do coletor em função das horas do dia.	62
Figura 37: Eficiência do coletor em função da variação de temperatura C'	63
Figura 38: Comparação entre a eficiência teórica e experimental	64
Figura 39: Rugosidade da calha, (a) Foto mostrando a difusidade refletida na calha; (b) efeito dessa difusidade,	65

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1: Quantitativo de artigos encontrados por combinação de palavras chaves.	27
Tabela 2: Portfólio bibliográfico	28
Tabela 3: Lista de materiais utilizados na construção do CSCP.	36
Tabela 4: Parâmetros geométricos do CSCP.....	39
Tabela 5: Grandezas calculadas do coletor proposto.	57
Tabela 6: Valores de incertezas expendidas	58
Tabela 7: Comparação de rendimento térmico entre diferentes coletores.	63
Tabela 8: Resumo das propriedades óticas do CSCP proposto.....	65
Tabela 9: Custo por componente do coletor.....	66
Tabela 10: Comparação de custo com diferentes autores	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

θ	Ângulo de incidência (°)
φ_r	Ângulo de borda (°)
η_e	Eficiência experimental
η_t	Eficiência teórica
η_o	Eficiência ótica
ρ	Refletância da superfície refletiva
τ	Fator de transmissividade do envelope de vidro
τ_b	Fator de atenuação atmosférica
λ	Fator de absorção do tubo
γ	Fator de interceptação
σ	Constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
σ'_{sun}	Distribuição da energia solar
σ'_{esp}	Especularidade da superfície refletora
σ'_{rug}	Rugosidade da superfície refletora
σ'_{tra}	Distribuição dos erros de rastreamento
σ'_{con}	Erro de contorno
μ	Viscosidade dinâmica (N.s/m ²)
ΔT	Variação de temperatura (K)
ε	Emissividade
$\varepsilon_{\dot{m}}$	Erro do fluxo de massa
ε_{C_p}	Erro do CP
$\varepsilon_{\Delta T}$	Erro da variação de temperatura
ε_{A_a}	Erro da área de abertura
ε_{I_b}	Erro da radiação solar direta
ε_{η}	Incerteza expandida
ε_{max}	Incerteza máxima
A_a	Área de abertura (m ²)
A_f	Fator geométrico
A_l	Altitude local em relação ao nível do mar (km)
A_{ro}	Área externa do tubo absorvedor (m ²)
A_{ri}	Área interna do tubo absorvedor (m ²)

C	Fator de concentração
C_p	Calor específico (J/Kg.K)
C_t	Constante de tempo (min)
d	Densidade específica (Kg/m ³)
D_e	Diâmetro externo do tubo absorvedor (m)
D_i	Diâmetro interno do tubo absorvedor (m)
f	Distância focal (m)
F	Coefficiente de atrito
F'	Fator de eficiência do coletor
F_r	Fator de remoção
h_a	Coefficiente convectivo do ar (w/m ² K)
h_r	Coefficiente de radiação (w/m ² K)
h_f	Coefficiente convectivo do fluido (w/m ² K)
H_p	Largura da parábola na distância focal (m)
I_b	Radiação solar direta (W/m ²)
I_d	Radiação solar difusa (W/m ²)
I_g	Radiação solar global (W/m ²)
I_{ec}	Radiação solar extraterrestre corrigida (W/m ²)
I_e	Radiação solar extraterrestre (W/m ²)
n	Dia do ano (Calendário Juliano)
K_θ	Fator de modificação de ângulo (rad)
K	Condutividade térmica do tubo absorvedor (w/mK)
K_f	Condutividade térmica do fluido (w/mK)
L	Comprimento do tubo absorvedor (m)
L/min	Vazão volumétrica, (L/min).
\dot{m}	Vazão mássica (Kg/s)
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Q_u	Ganho de energia (J)
Q_s	Radiação solar disponível (J)
Re	Número de Reynolds
S	Comprimento do raio parabólico (m)
T_a	Temperatura ambiente (K)

T_{ea}	Temperatura média do tubo (K)
T_e	Temperatura de entrada do tubo (°C)
T_s	Temperatura de saída do tubo (°C)
T_m	Temperatura média no tubo (°C)
U_L	Coefficiente de perdas térmica (w/m ² K)
U_o	Coefficiente global de perdas térmica (w/m ² K)
x	Distância horizontal no plano cartesiano (m)
y	Distância vertical no plano cartesiano (m)
W_a	Abertura da calha (m)
v	Velocidade do vento (m/s)
v_f	Velocidade do fluido (m/s)
CNC	Comando numérico por computador
CSP	Coletor solar de Potência
CSCP	Coletor solar de calha parabólica
PDC	Coletor solar de disco parabólico
FTC	Fluido de transporte de calor
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional
PEC	Critério de avaliação de desempenho
LDR	Resistor dependente da luz
MCA	Metros coluna de Água
RTC	<i>Real time clock</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	19
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	20
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
2.1	ENERGIA SOLAR.....	21
2.2	COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E SISTEMAS DE RASTREAMENTO.....	22
2.2.1	Coletor de disco parabólico (PDC).....	23
2.2.2	Coletor de torre central	23
2.2.3	Coletor solar de calha parabólica.....	24
2.2.4	Rastreadores solares.....	25
2.3	PORTFOLIO BIBLIOGRÁFICO (ESTADO DA ARTE).....	26
2.3.1	Methodi in Ordinatio	26
2.3.2	Revisão bibliográfica	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	MATERIAIS.....	36
3.2	GEOMETRIA DO COLETOR.....	36
3.3	ESTRUTURA DO CSCP	39
3.3.1	Suporte da parábola	40
3.3.2	Base articulada para o suporte da parábola.....	41
3.3.3	Base do CSCP.....	42
3.4	CIRCUITO HIDRÁULICO.....	42
3.5	RASTREAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS	43
3.5.1	Rastreamento e movimentação da calha parabólica	43
3.5.2	Aquisição dos dados	46
3.6	MEDIÇÕES METEOROLÓGICAS E SOLARIMÉTRICA	48
3.6.1	Modelo para a determinação da radiação solar.....	49
3.7	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	50

3.7.1	Condições de ensaio.....	51
3.8	ANALISE ÓTICA DO COLETOR.....	51
3.9	ANALISE TÉRMICA DO COLETOR.....	53
3.10	DETERMINAÇÃO DOS ERROS.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	CONDIÇÕES DE ENSAIO E DESEMPENHO DO COLETOR.....	59
4.2	DESEMPENHO TÉRMICO.....	61
4.3	DESEMPENHO ÓTICO	64
4.4	ANÁLISE DE CUSTO	65
5	CONCLUSÃO.....	68
	REFERENCIAS	70

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu professor orientador e coorientador pela constante dedicação e empenho a execução deste estudo.

Aos demais professores que de forma direta ou indireta também contribuíram a realização deste estudo.

Aos colegas de curso, pela amizade e ajuda.

E, a minha companheira pela motivação e paciência durante a execução deste trabalho

Aos meus pais pelo apoio.

“A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio”.

Martin Luther King

**FIAMONZINI, LUCIANO ARI. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM
CONCENTRADOR SOLAR TIPO CALHA PARABÓLICA DE BAIXO CUSTO
AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR.
2021. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – UNIVERSIDADE FEDERAL DA
INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA, FOZ DO IGUAÇU, 2022. 71 PÁGINAS.**

FIAMONZINI, LUCIANO ARI. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO CALHA PARABÓLICA DE BAIXO CUSTO AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

2021. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA, FOZ DO IGUAÇU, 2022. 71 PÁGINAS.

RESUMO

A energia solar é considerada uma fonte de energia renovável, encontrada de forma abundante na natureza, e se apresenta como uma opção de grande interesse na geração de energia, reduzindo as emissões de carbono (CO₂), e ao mesmo tempo, participando da segurança energética, sendo este um dos maiores desafios tecnológicos do século XXI. No que respeita às tecnologias de sistemas de concentração solar, conhecidas internacionalmente como CSP (*Concentrated Solar Power* – Energia Solar Térmica Concentrada), estas são encontradas tanto no meio industrial como científico. Sendo o coletor solar de calha parabólica (CSCP), a mais estudada e conhecida internacionalmente, possuindo diversas aplicações, tais como: geração de energia elétrica, dessalinização, geração de vapor, sistemas de refrigeração, dentre outras. No entanto, é notório o aumento na pesquisa e no desenvolvimento (P&D) de novos materiais, geometrias do tubo absorvedor, sistemas de rastreamento solar (Solar Tracking) e utilização de novos fluidos de trabalho (óleos térmicos, nanofluidos) que têm o intuito de melhorar, o desempenho dos CSCP. Desta forma, o presente trabalho trata sobre o desenvolvimento de um protótipo CSCP de baixo custo para fins didáticos e de pesquisa. O CSCP foi construído com um ângulo de borda de 120°, área de abertura de 2,2 m² e tubo absorvedor de cobre de 42mm de diâmetro externo sem envelope de vidro. A estrutura da calha é composta de chapas de madeira cortadas no formato parabólico, onde é apoiado uma chapa de aço galvanizado revestida com um filme refletivo *solarium*. O sistema de rastreamento solar é do tipo ativo de dois eixos, para isto, utiliza-se sensores foto resistivos para a determinação da posição solar e de atuadores elétricos para a correção do posicionamento da calha. Por outro lado, o sistema de monitoramento foi desenvolvido por meio de um painel interativo para a visualização; dos parâmetros de funcionamento dos elementos sensores, termopares que medem a temperatura de entrada e saída no tubo absorvedor, e sensor de fluxo, para a medição da vazão do fluido de transporte de calor. Cabe ressaltar, que os ensaios laboratoriais foram realizados com água deionizada. Com respeito aos limites de operação, foram estabelecidas duas condições de ensaios. O primeiro buscou avaliar a eficiência do coletor para diferentes temperaturas, assim, a temperatura de entrada foi variada, na faixa de 30 a 70 °C, apresentando uma vazão fixa de 0,020Kg/s. No segundo caso buscou-se avaliar a eficiência do coletor para diferentes vazões, para isto, o coletor foi submetido a vazões mássicas de 0,002 à 0,030 Kg/s. Assim, o coletor proposto obteve um rendimento em função da temperatura representada pela expressão $\eta=0,332-1,867 c'$, onde c' é um parâmetro que relaciona a temperatura de entrada à temperatura ambiente em função da radiação solar disponível. Para a eficiência em função da vazão, obteve o melhor rendimento quando o regime do escoamento se tornava turbulento. Pode-se concluir que o coletor solar proposto obteve um rendimento menor quando comparado a outros coletores da literatura, este fato pode ser assumido pelas perdas associadas à difusidade do refletor da calha parabólica e perdas térmicas por convecção no tubo absorvedor (eficiência ótica, fator de remoção e coeficiente de perda térmica).

Palavras-chave: Bancada didática, Energia Solar Térmica Concentrada, Concentrador Solar Parabólico, Sistemas de rastreamento Solar (*tracking*).

**FIAMONZINI, LUCIANO ARI. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM
CONCENTRADOR SOLAR TIPO CALHA PARABÓLICA DE BAIXO CUSTO
AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR.
2021. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – UNIVERSIDADE FEDERAL DA
INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA, FOZ DO IGUAÇU, 2022. 71 PÁGINAS.**

ABSTRACT

Solar energy is considered a renewable energy source, found abundantly in nature, and presents itself as an option of great interest in energy generation, reducing carbon emissions (CO₂) and, at the same time, participating in energy security. , which is one of the biggest technological challenges of the 21st century. Concerning the technologies of concentrating solar systems, known internationally as CSP (Concentrated Solar Power), these are found in both the industrial and scientific fields. Being the parabolic trough solar collector (PTSC), the most studied and internationally known, having several applications, such as: electricity generation, desalination, steam generation, cooling systems, among others. However, increasing research and development (R&D) of new materials, absorber tube geometries, solar tracking systems, and the use of new working fluids (thermal oils and nanofluids) that have the aim of improving CSCP performance. Thus, the present work deals with the development of a low-cost CSCP prototype for teaching and research purposes. The CSCP was constructed with an edge angle of 120°, an opening area of 2.2 m² and a 42mm outer diameter copper absorber tube without a glass envelope. The structure of the gutter is made up of wooden sheets cut in a parabolic shape, on which a galvanized steel sheet coated with a *solarium* reflective film is supported. The solar tracking system is active with two axes, using light depend resistor to determine the solar position and electric actuators to correct the positioning of the gutter. In the same way, the monitoring system was developed through an interactive panel for visualization; of the operating parameters of the sensing elements, thermocouples that monitor the inlet and outlet temperature in the absorber tube, and the flow sensor, for measuring the flow of the heat transport fluid. It is worth mentioning that the laboratory tests were carried out with deionized water. With respect to the operating limits, two test conditions were established. The first sought to evaluate the efficiency of the collector for different temperatures; therefore, the inlet temperature was varied, in the range of 30 to 70 °C, presenting a fixed flow of 0.020Kg/s. In the second case, it was sought to evaluate the efficiency of the collector for different flows, for this, the collector was submitted to mass flows from 0.002 to 0.030 Kg/s. Thus, the proposed collector obtained an efficiency as a function of the temperature represented by the expression $\eta=0.332-1.867 c'$, where c' is a parameter that relates the inlet temperature to the ambient temperature as a function of available solar radiation. For efficiency as a function of flow, it obtained the best performance when the flow regime became turbulent. It can be concluded that the proposed solar collector obtained a lower performance when compared to other collectors in the literature; this fact can be assumed by the losses associated with the diffusivity of the parabolic trough reflector and thermal losses by convection in the absorber tube (optical efficiency, removal, and heat loss coefficient).

Key words: Teaching bench, Concentrated Thermal Solar Energy, Parabolic Solar Concentrator, Solar Tracking Systems

1 INTRODUÇÃO

A quantidade de energia demandada pela sociedade aumenta a cada ano, e com o aumento desta demanda, também cresce a preocupação com os impactos que a produção energética causa ao meio ambiente, principalmente no que diz respeito as emissões de gases de efeito estufa e nas alterações climáticas causadas pelo uso indiscriminado de combustíveis fósseis. Cabe ressaltar, que de toda a emissão de gases de efeito estufa, aproximadamente 25% são oriundos da geração de energia (IPCC, 2022, NASA, 2022). No Brasil a matriz energética é predominantemente renovável, com aproximadamente 83%, sendo a maior parcela suprida pela energia proveniente das diversas hidroelétricas instaladas no território nacional, no entanto a energia eólica e fotovoltaica tem crescido substancialmente (BEN, 2022).

Diante desses fatos, muitos países ao redor do mundo começaram a rever suas políticas energéticas. Conduzindo-os ao aumento e inserção de fontes renováveis nas suas matrizes energéticas. É claro que as energias renováveis virão a desempenhar um papel muito importante na segurança energética mundial, mas deverá ficar claro a potencialidade e aplicabilidade destes recursos.

Boa parte das fontes renováveis utilizadas no planeta provem do sol, principal fonte de energia da terra, sendo este necessário para a fotossíntese das plantas, que posteriormente serão convertidas em biocombustíveis e biomassa; ou ainda atuando no clima, promovendo um regime de chuvas, que por sua vez promove a formação dos rios e assim tem-se a força hídrica necessária para a geração de energia em usinas hidroelétricas; ou na formação dos ventos, recurso principal da energia eólica.

A energia solar é abundante, podendo ser aproveitada na geração de energia elétrica e calor, assim, podemos mencionar duas tecnologias solares que vem ganhando muito espaço a nível mundial: 1) CSP (*Concentrated Solar Power* – Energia Solar Térmica Concentrada), isto é, mediante o uso de plantas de energia solar concentrada, que produzem energia por meio de ciclos termodinâmicos; 2) PV (*PhotoVoltaic* - Fotovoltaica), conversão direta da energia elétrica usando painéis fotovoltaicos (GOLDEMBERG, LUCON, 2007, PENA, 2022).

No Brasil devido a sua localização geográfica, estando o norte do país localizado próxima à linha do equador, acaba por receber radiação solar de maneira constante durante todas as estações do ano, garantindo um grande potencial para aproveitamento da energia solar, tanto na geração direta, assim como, na produção de biomassa e biocombustíveis,

e em sistemas de coletores solares. (FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2018, VILAÇA GOMES, KNAK NETO, *et al.*, 2018).

Dentre as tecnologias CSP, os coletores solares de calha parabólica (CSCP) ou *Parabolic Trough Collector* (PTC) é um sistema muito difundido no mercado. Essa tecnologia está disponível em mais de 20 países, com mais de 90 plantas instaladas até o ano de 2014, com uma capacidade de 4,7GW. É esperado que até 2025 a produção mundial de energia com o uso de CSCP supere os 10GW, podendo em um cenário otimista, chegar a 22GW. A fim de cumprir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e zerar a emissão de carbono até 2050, a capacidade anual de geração solar concentrada deve ser ampliada em 6,7GW por ano até 2030 (BOJEK, BAHAR, 2021, IBGE, 2022, QAZI, 2017).

Além das aplicações na produção de energia ainda é possível utilizar esta tecnologia para produção de calor em processos termoquímicos. Também é possível otimizar a eficiência global desses sistemas reduzindo as perdas térmicas e óticas. Por outro lado é importante desenvolver métodos de armazenamento térmico que melhorem a disponibilidade e autonomia do sistema (DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014).

Os coletores CSCP para aplicações de geração de vapor operam em temperaturas superiores a 250°C e para isso utilizam-se espelhos refletores de grandes aberturas e altos fatores de concentração. No entanto, para atingir esses patamares de temperatura são necessários dispositivos que otimizem a eficiência do coletor, como fluidos térmicos mais eficientes, sistemas de rastreamentos precisos e tubos coletores mais eficientes (ABDULHAMED, ADAM, *et al.*, 2018, JEBASINGH, HERBERT, 2016).

Além disso, é possível notar que os desenvolvimentos mais recentes publicados a respeito de CSCP, estão em aplicações de baixa temperatura e baixo custo. Desta forma, tem-se pesquisado a viabilidade e aplicabilidade dos CSCP como conversores de energia para aplicações em sistemas de aquecimento para processos industriais, dessalinização de água e sistemas de refrigeração por absorção. (BARBOSA, MARTINS, *et al.*, 2020, TAHJIB, TANZIN, *et al.*, 2020, TORRES, Hugo M., CARRILLO, *et al.*, 2020, UPADHYAY, PATEL, *et al.*, 2021, ZHANG, LUO, *et al.*, 2020).

Assim, a importância da construção de CSCP de baixo custo é uma maneira de promover a difusão da tecnologia, permitindo que novos estudos sejam desenvolvidos, testando novos modelos, materiais ou técnicas construtivas mais eficientes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é o projeto e desenvolvimento de um sistema termosolar didático móvel de baixo custo, do tipo coletor solar de calha parabólica (CSCP) auxiliado por sistema de rastreamento solar ativo de dois eixos para aplicações em projetos de pesquisa e ensino.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo proposto está previsto atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver o projeto mecânico e estrutural de uma bancada CSCP;
- Implementar instrumentação meteorológica e estimar de forma teórica a incidência solar;
- Elaboração de um sistema de rastreamento de dois eixos com a utilização de sistemas de controle realizados no Arduino;
- Desenvolver um sistema de aquisição e monitoramento de dados com a utilização de sensores de temperatura, sensor de vazão e elaboração de um painel que permita o monitoramento remoto da bancada;
- Validar o protótipo do sistema proposto, realizando ensaios a fim de determinar a performance final do coletor.

1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa visa disponibilizar um sistema didático de tecnologia termosolar concentrada que contribua com os seguintes aspectos: (i) Possibilidade de realizar ensaios em diferentes fluidos térmicos e em diferentes condições de trabalho. (ii) A tecnologia envolvida na construção dessa bancada possa ser disponibilizada de maneira gratuita (iii). Que a bancada seja disponibilizada para o uso didático dos docentes e discentes na área de energia solar desta instituição e demais instituição interessadas no desenvolvimento de tecnologia solar concentrada. iv) Aplicação deste know-how (conhecimento) em projetos de pesquisas mais elaborados.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O aumento no consumo de energia, atrelada à preocupação gerada pelo esgotamento de recursos energéticos, tem alavancado a busca de fontes sustentáveis. Dessa forma, a utilização da energia solar, considerada uma fonte limpa e abundante em toda a superfície terrestre, por meio de tecnologias CSP, basicamente a tecnologia CSCP, tem se mostrado uma alternativa viável. No entanto, o estudo do potencial para utilização desta tecnologia em diferentes aplicações, e o próprio avanço tecnológico destes sistemas passa por estudos práticos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo trata-se da introdução dos assuntos abordados, a qual, apresenta a proposta, seguida da problemática envolvida, logo é definido os objetivos, a justificativa, bem como a relevância e contribuição da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica, onde é apresentado uma revisão bibliográfica das tecnologias de concentradores solares e a descrição da tecnologia CSCP, além de um portfólio bibliográfico que visa determinar as principais evoluções deste modelo de coletor solar.

Na sequência o terceiro capítulo apresenta a metodologia do estudo, contextualizando as decisões para a elaboração do projeto, e os materiais necessários para desenvolvimento da bancada didática, além das análises teóricas e experimentais a serem desenvolvidas.

No quarto capítulo apresenta-se a descrição dos resultados obtidos, referentes ao parâmetro de funcionamento do coletor e sua eficiência térmica e ótica.

E por fim, no quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões a respeito do estudo, sugestões de melhoria a serem implementadas, assim como os trabalhos futuros.

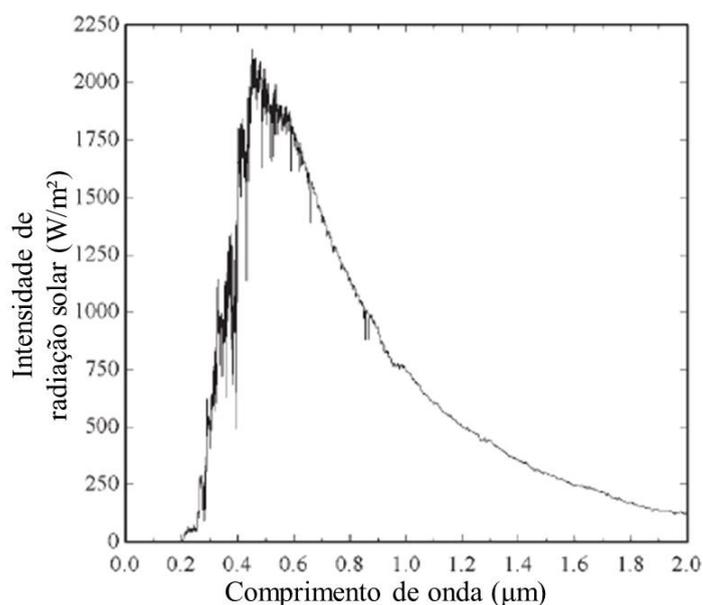
2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Neste capítulo apresenta-se as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do projeto. Bem como a pesquisa com as principais evoluções da tecnologia CSCP. Durante esta pesquisa foi feito uso da metodologia *InOrdinato*, que tem como objetivo priorizar os artigos com maior relevância e facilitar a organização de uma pesquisa que envolvam muitos resultados.

2.1 ENERGIA SOLAR

O sol emite aproximadamente $3,8 \times 10^{28}$ kW de energia e devido à distância e ao diâmetro terrestre somente incide na terra $1,4 \times 10^{14}$ kW. A luz emitida pelo sol cobre um amplo comprimento de onda, conforme mostra a Figura 1, variando de $0,25 \mu\text{m}$ a $3,0 \mu\text{m}$ sendo todo esse espectro importante para utilização da energia solar. Uma grande parte desta emissão encontra-se no espectro de luz visível que vai de $0,38 \mu\text{m}$ a $0,78 \mu\text{m}$, a parcela restante encontra-se no espectro infravermelho e uma outra pequena porção na faixa ultravioleta. (DUFFIE, BECKMAN, 2013, SUMATHI, ASHOK KUMAR, *et al.*, 2015).

Figura 1: Espectro de luz emitido pelo sol em relação a sua intensidade.



Fonte: Adaptado de DUFFIE, BECKMAN, (2013)

A luz solar que penetra a atmosfera sofre uma complexa interação com os componentes que a formam, como os gases e a umidade do ar, além das partículas suspensas, assim aproximadamente 51% da radiação que incide no planeta realmente chega diretamente a superfície terrestre, o restante é refletido para o espaço ou sofre um espelhamento na atmosfera.

A energia solar que atinge o solo se divide em duas parcelas, radiação direta (I_b) e difusa (I_d), sendo a radiação direta aquela que não sofreu espalhamento pela atmosfera e a difusa a que sofreu esse espalhamento e a soma destas duas é a radiação global (I_g) (DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014).

Conforme mencionado anteriormente, a energia solar tem se destacado entre as fontes de energia renováveis, isso deve-se ao fato principalmente da imensa disponibilidade, e baixo impacto ambiental das suas instalações. É estimado que quase 4 milhões de exajoules ($1Ej = 10^{18}$ joules) chegam à terra anualmente, no entanto é possível que somente uma fração desta energia possa ser aproveitada, mesmo assim estima-se que o potencial energético que pode ser captado supere os 5×10^4 Ej. Desta forma, a intensidade de fluxo de radiação solar que chega ao solo é dependente de diversos fatores como latitude, variação entre dia e noite, clima e geografia, chegando uma quantidade média de radiação solar na ordem de 342 W/m^2 (KABIR, KUMAR, *et al.*, 2018).

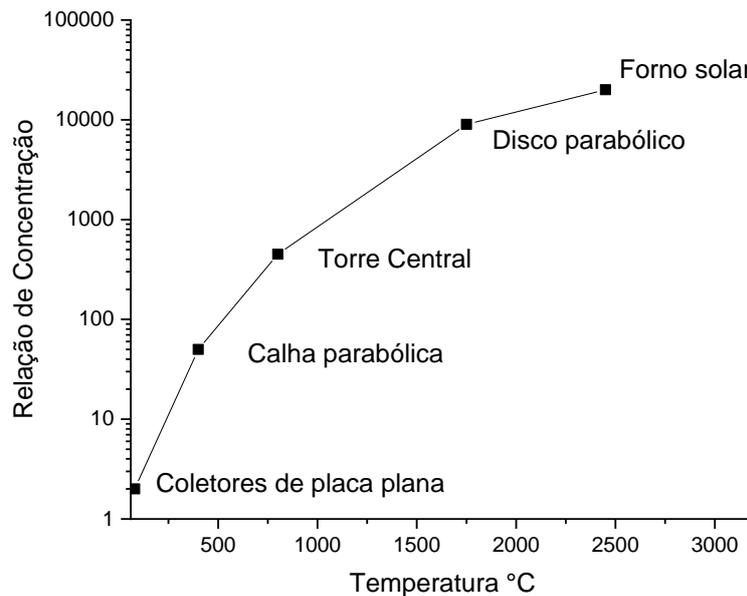
Em países situados próximos a linha do equador, a incidência da radiação solar é mais uniforme durante o ano, este fato é possível pois em latitudes mais próximas a zero a variação sazonal do foto período diário, ou seja, quantas horas de sol tem-se em um dia, é menos acentuado. Mesmo o Brasil sendo um país com clima predominantemente tropical e com irradiação solar global média diária que supera a de países europeus, ainda é pouco utilizado este meio para a produção energética (VILAÇA GOMES, KNAK NETO, *et al.*, 2018).

O calor produzido por sistemas solares térmicos pode ser utilizado em diferentes processos, como aquecimento, secagem, geração de vapor, geração de energia elétrica, dentre outros (KALOGIROU, 2014, SAMPAIO, GONZÁLEZ, 2017).

2.2 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E SISTEMAS DE RASTREAMENTO

Os coletores solares concentradores, utilizam espelhos ou lentes para concentrar a radiação solar em um ponto ou linha focal, permitindo a obtenção de temperaturas elevadas. Devido às diversas tecnologias disponíveis e a ampla faixa de concentração possível, os sistemas solares concentrados operam em uma grande faixa de temperatura, conforme apresentado na Figura 2, a tecnologia de coletor de calha parabólica possui uma faixa de concentração entre 5 e 50 vezes podendo atingir temperaturas de até $700 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a tecnologia de forno solar a tecnologia com maior concentração disponível (KALOGIROU, 2014, SUMAN, KHAN, *et al.*, 2015).

Figura 2: Relação em entre temperatura e relação de concentração para diferentes tecnologias.

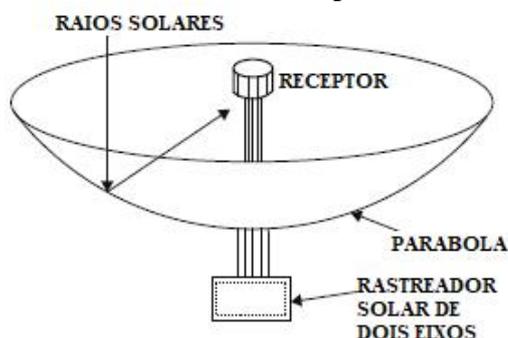


Fonte: Adaptado de (SUMAN, KHAN, *et al.*, 2015)

2.2.1 Coletor de disco parabólico (PDC)

Este sistema consiste em uma disco em formato parabólico com uma superfície refletiva que concentra em um absorvedor a radiação solar, esse absorvedor converte a energia térmica para um FTC, ver Figura 3. Dentre os sistemas concentradores CSP o PDC tem uma alta eficiência térmica e óptica, no entanto o custo construtivo por unidade de área é muito elevado (SOLTANI, BONYADI, *et al.*, 2019, SUMAN, KHAN, *et al.*, 2015).

Figura 3: Coletor solar de disco parabólico.



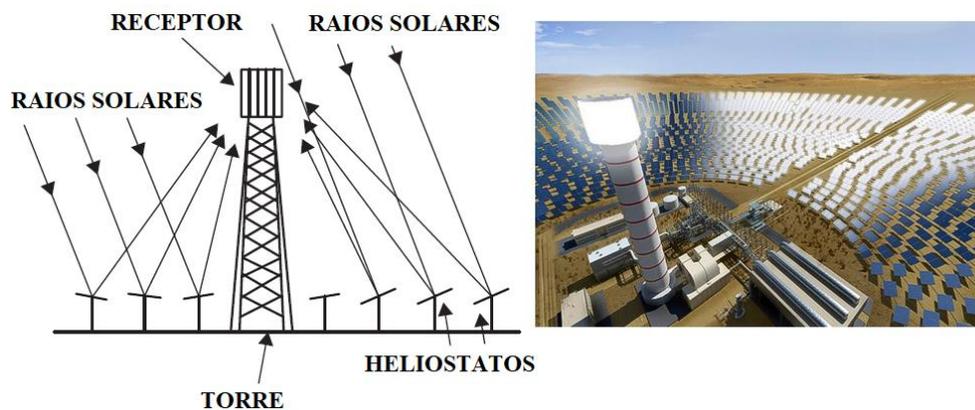
Fonte: Adaptado de (KALOGIROU, 2014).

2.2.2 Coletor de torre central

O sistema de torre central, é composto por uma torre onde na sua extremidade superior é posicionado o coletor de calor, composto por uma superfície absorvedora de calor,

entorno da torre um campo de heliostatos rastreiam o movimento aparente do sol focando a radiação solar na extremidade da torre, ver Figura 4. Como principal característica desse sistema tem-se uma grande eficiência térmica, uma alta capacidade e elevada temperatura, dentre as desvantagens, destaca-se o alto custo de construção, a dificuldade operacional imposta pela quantidade de heliostatos necessárias e sua manutenção (ASHLEY, CARRIZOSA, *et al.*, 2019, WEINSTEIN, LOOMIS, *et al.*, 2015).

Figura 4: Coletor solar de torre central com heliostatos.

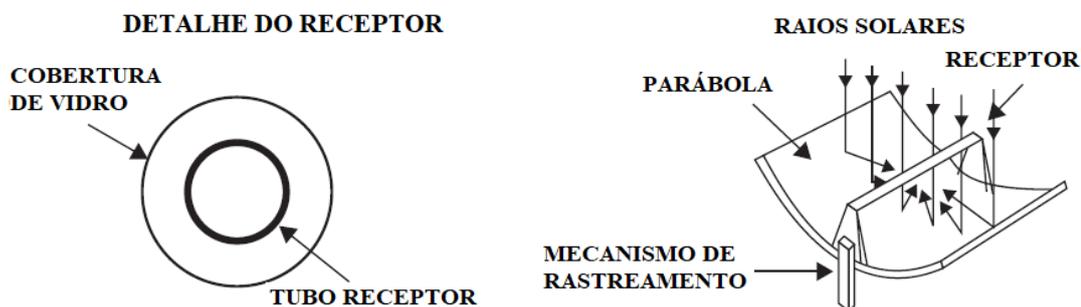


Fonte: Adaptado de (KALOGIROU, 2014).

2.2.3 Coletor solar de calha parabólica

O coletor solar de calha parabólica, pode ser descrito como uma calha em formato parabólico, revestida em sua parte interna com material de alta refletividade, na qual converge a radiação solar em uma linha focal, lugar onde um tubo absorvedor de material metálico é posicionado, conforme Figura 5. Neste tubo absorvedor ou receptor ocorre a troca térmica entre a energia proveniente do sol e o Fluido de Transporte de Calor (FTC). Este absorvedor, normalmente é de formato cilíndrico ou retangular, comumente confeccionado em aço inox com revestimento externo de pintura preta ou eletrodeposição de materiais, compostos de óxido de alumínio e níquel atuando de forma seletiva, ou seja, absorvendo o espectro da luz solar e ao mesmo tempo apresentando baixa emissividade. O tubo ainda pode receber uma proteção externa de vidro denominado envelope, conforme mostra a Figura 5. Assim, entre o tubo e o envelope é criado e mantido vácuo, afim de reduzir as perdas convectivas. E pelo interior do tubo circula o fluido por onde ocorrerá a troca térmica (FTC).

Figura 5: Coletor de calha parabólica.



Fonte: Adaptado de (KALOGIROU, 2014).

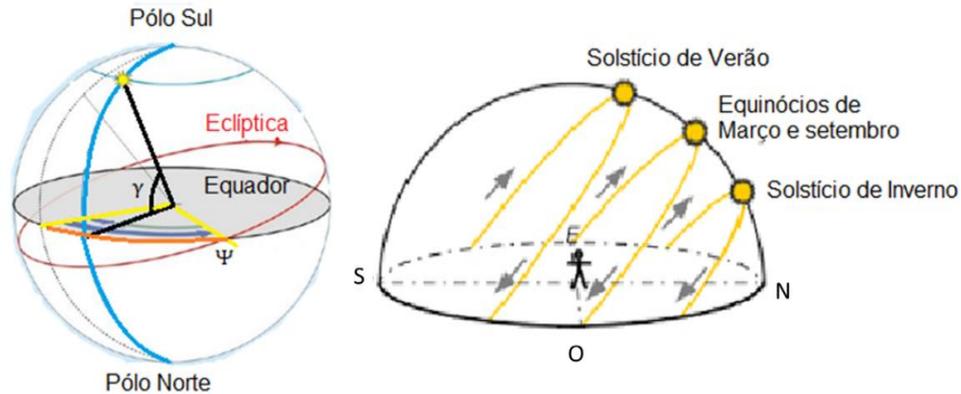
2.2.4 Rastreadores solares

Para os coletores concentradores é necessário um alinhamento entre o vetor perpendicular ao plano do coletor e o vetor da radiação solar, sendo este ângulo denominado de ângulo incidência (θ), que varia com a declinação solar e as horas do dia. Nos coletores de calha parabólica é necessário manter o alinhamento entre esses vetores para que a linha focal da parábola coincida com o tubo coletor, e para prover essa função é necessário o uso de um rastreador solar (ACHKARI, EL FADAR, *et al.*, 2021, MUNANGA, CHINGUWA, *et al.*, 2020).

O rastreador solar pode contar com duas tecnologias de segmento solar. A primeira delas é um algoritmo que efetua a movimentação da calha seguindo parâmetros pré-estabelecidos, a precisão deste sistema depende do algoritmo e do sistema de movimentação da calha. O segundo sistema designado como rastreadores ativos, possuem sensores que detectam a posição do sol e por meio de controladores atuam sobre os mecanismos de movimentação do rastreador realizando assim o seguimento solar. E por fim tem-se os sistemas híbridos, que possuem um algoritmo que mantém o alinhamento do coletor, independente da disponibilidade de radiação solar, e um sensor de posicionamento, que confere e ajusta possíveis desalinhamentos apresentados. (KALOGIROU, 2004, UPADHYAY, PATEL, *et al.*, 2021).

Para compreender a dinâmica do rastreamento é necessário considerar o movimento aparente do sol em relação à terra, assim durante o dia o sol traça uma trajetória de leste para oeste caracterizado pelo ângulo azimutal (Ψ), destacado em amarelo na Figura 6, e um ângulo de altitude (γ), destacado em preto na mesma Figura 6, o ângulo de altitude depende da estação do ano e posição de latitude do observador (OLIVEIRA FILHO, OLIVEIRA, 2019).

Figura 6: Representação do movimento aparente do sol.



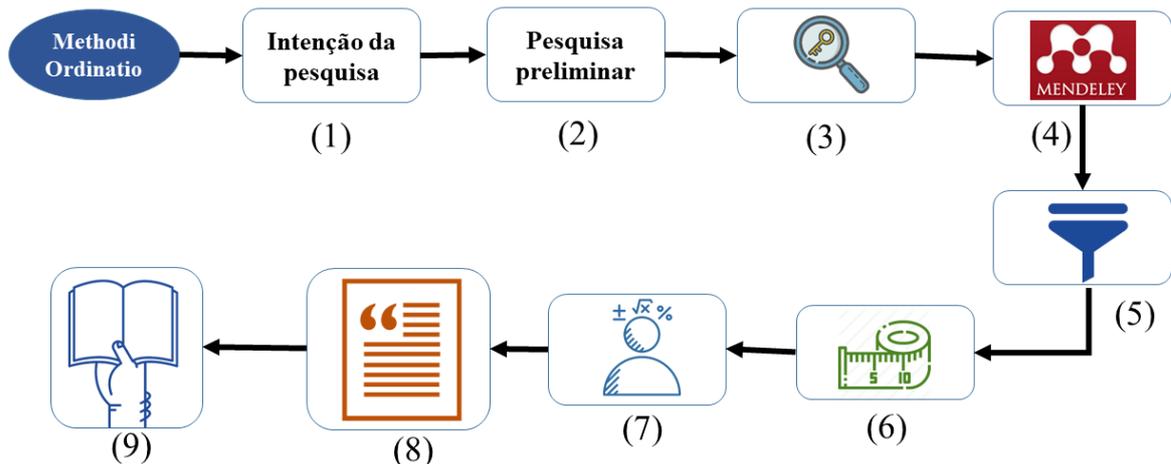
Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA FILHO, OLIVEIRA, 2019).

2.3 PORTFOLIO BIBLIOGRÁFICO (ESTADO DA ARTE)

2.3.1 Methodi in Ordinatio

Para a realização do portfólio o presente trabalho aplicou o método descrito por (PAGANI, KOVALESKI, *et al.*, 2015). Este método facilita a organização e a classificação dos artigos relacionados ao tema da pesquisa. O método é composto por nove etapas representadas conforme mostra a Figura 7.

Figura 7: fluxograma representativo do método utilizado para pesquisa bibliográfica



$$InOrdinato = \left(\frac{IF}{1000} \right) + \alpha * [10 - (ResearchYear - PublishYear)] + \left(\sum c_i t_i \right)$$

1. Determinação da intenção da pesquisa;
2. Pesquisa preliminar e exploração de combinações de palavras chaves e bases de dados.
3. Definição de palavras chaves

4. Pesquisa final nas bases de dados (Mendeley)
5. Processo de filtragem
6. Identificar as métricas dos artigos
7. Cálculo do índice in Ordinatío
8. Obter o artigo na integra
9. Fazer leitura na integra do artigo

Foram escolhidas duas combinações de palavras chaves ("*parabolic trough collector*" AND "*prototype*" e "*parabolic trough collector*" AND "*low cost*"), sendo estas pesquisadas em três bases de dados (*Science Direct*, *Scopus* e Google acadêmico).

A pesquisa por combinação de palavras chaves levou a um total de 8722 artigos que continham as combinações de palavras selecionadas relacionadas conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Quantitativo de artigos encontrados por combinação de palavras chaves.

Palavras chaves utilizadas	Science Direct	Scopus	Google
" <i>parabolic trough collector</i> " AND " <i>prototype</i> "	1010	65	1730
" <i>parabolic trough collector</i> " AND " <i>low cost</i> "	3460	187	2270
Total de resultados			8722

Fonte: Do autor

Para gerir um número grande de artigos é necessário a utilização de uma ferramenta de gestão de referências, neste trabalho optou-se por utilizar o gerenciador Mendeley. Assim, durante o processo de análise dos artigos observou-se que a maioria destes (8052) não estavam diretamente relacionados ao assunto desta pesquisa ou eram duplicados, portanto, foram eliminados no processo de filtragem dos artigos. Neste caso, o processo de filtragem consiste na leitura do título do artigo, onde os artigos não relacionados foram eliminados, dos artigos restantes foi efetuada a leitura do resumo do artigo, onde mais uma vez os artigos não relacionados ou redundantes foram excluídos. Na sétima etapa os artigos são classificados utilizando-se da equação proposta pelos autores, onde são considerados o fator de impacto do artigo, o ano de sua publicação o número de citações e uma nota atribuída pelo autor. O que permite classificar os artigos por sua relevância. Por fim dos 620 artigos classificados foram aproveitados apenas 11 relacionados na Tabela 2, vale ressaltar que os artigos utilizados não estão necessariamente na ordem de classificação pois, mesmos artigos bem classificados não foram utilizados neste trabalho.

Tabela 2: Portfólio bibliográfico

	Autor	Título	Revista	Ano
1	(TORRES, Hugo M., CARRILLO, <i>et al.</i> , 2020)	Design and construction of an experimental parabolic trough collector using low cost alternative materials	AIP Conference Proceedings	2020
2	(UPADHYAY, PATEL, <i>et al.</i> , 2021)	Design, development and techno economic analysis of novel parabolic trough collector for low-temperature water heating applications	Case Studies in Thermal Engineering	2021
3	(TAHJIB, TANZIN, <i>et al.</i> , 2020)	Design and Implementation of Parabolic Trough Solar Thermal Collector	Symposium (TENSYP)	2020
4	(BARBOSA, MARTINS, <i>et al.</i> , 2020)	Experimental evaluation of a stationary parabolic trough solar collector: Influence of the concentrator and heat transfer fluid	Journal of Cleaner Production	2020
5	(FATHABADI, 2020)	Novel low-cost parabolic trough solar collector with TPCT heat pipe and solar tracker: Performance and comparing with commercial flat-plate and evacuated tube solar collectors	Solar Energy	2020
6	(AGAGNA, SMAILL, <i>et al.</i> , 2018)	Experimental and numerical study of parabolic trough solar collector of MicroSol-R tests platform	Experimental Thermal and Fluid Science	2018
7	(LIU, LV, <i>et al.</i> , 2019)	Effects of rib arrangements on the performance of a parabolic trough receiver with ribbed absorber tube	Applied Thermal Engineering	2019
8	(BITAM, DEMAGH, <i>et al.</i> , 2018)	Numerical investigation of a novel sinusoidal tube receiver for parabolic trough technology	Applied Energy	2018
9	(UPADHYAY, PATEL, <i>et al.</i> , 2019)	A detailed review on solar parabolic trough collector	International Journal of Ambient Energy	2019
10	(CHEVAPRUK, CHOMCHAROEN, <i>et al.</i> , 2020)	Solution-based Ni-Al ₂ O ₃ Solar Selective Coating using Convective Deposition	Materials Today: Proceedings	2018
11	(ACHKARI, EL FADAR, <i>et al.</i> , 2021)	A new sun-tracking approach for energy saving	Renewable Energy	2021

2.3.2 Revisão bibliográfica

A construção de um coletor solar de baixo custo e com materiais alternativos foi descrita por Torres, Hugo M., Carrillo, *et al.*, (2020), onde neste estudo o autor listou as etapas necessárias para projetar e executar tal coletor, como resultado foi construído um coletor solar com aproximadamente 1,0 m² de área custando aproximadamente U\$130,00, ver Figura

8. O autor concluiu que a confecção manual da parábola ocasionou uma deformação na formação da imagem refletida ao tubo, o que aumentou as perdas óticas do conjunto, outro ponto destacado é que a radiação solar foi estimada em 900 w/m^2 . No entanto, devido à nebulosidade do local e as condições meteorológicas, possivelmente o valor de radiação foi menor que o estimado. Finalmente, o autor conclui que o protótipo deste projeto CSCP, pode ser considerado para aplicações em pequenas escalas e dirigidas ao meio acadêmico. Considerando que este protótipo não é ideal para a aplicações industriais, enfatizando que o uso de madeira deve ser evitado, e que a chapa de aço galvanizado com papel alumínio pode ser uma boa alternativa como superfície refletiva.

Figura 8: Modelo de protótipo de baixo custo.



Fonte: TORRES, CARRILLO, *et al.*, 2020)

No estudo desenvolvido por Upadhyay, Patel, *et al.* (2021), o autor desenvolveu um CSCP modular, onde é possível escolher o elemento do sistema a qual você deseja estudar, tais como: a cobertura de vidro, o sistema de rastreamento, o material e a geometria da superfície refletiva, conforme mostra a Figura 9. Eles também realizaram um estudo para determinar o retorno do investimento realizado para a construção do coletor, em comparação com as fontes mais comuns utilizadas para aquecimento de água, sendo estimado o retorno em 5 anos para o sistema com valor mais elevado.

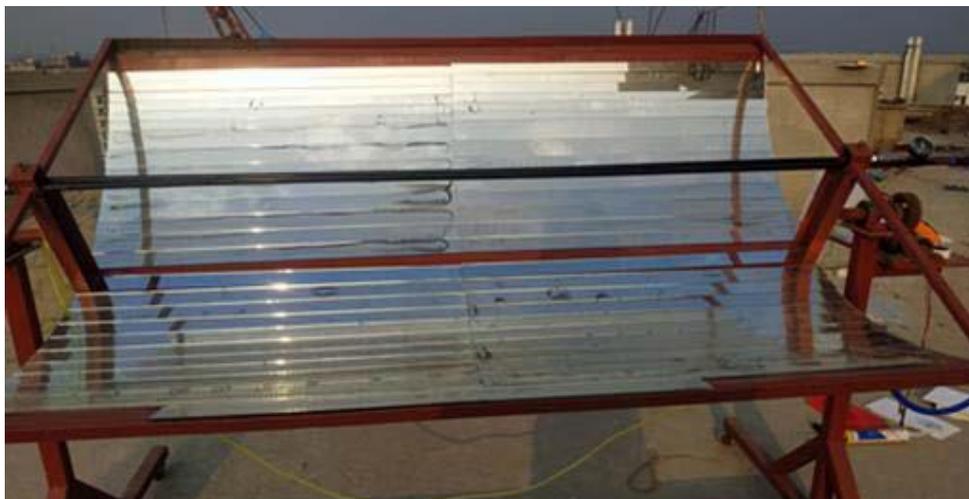
Figura 9: Sistema modular com 3 diferentes configurações.



Fonte: UPADHYAY, PATEL, *et al.*, 2021

Por outro lado, a construção de um coletor solar de calha parabólica para fins de geração de vapor e produção de energia, foi proposta por Tahjib, Tanzin, *et al.* (2020), a estratégia, consiste na implementação de um coletor solar com uma alta taxa de concentração geométrica, ver Figura 10, o que por sua vez aumenta a temperatura máxima de operação do equipamento, outro ponto interessante é a utilização de um compressor para aumentar a pressão do vapor antes de chegar à turbina, a fim de que a turbina opere em condições ideais de pressão. Como resultado ele obteve uma pequena geração de energia e a também vislumbrou a possibilidade de utilização do equipamento para a purificação de água por meio de um sistema de destilação.

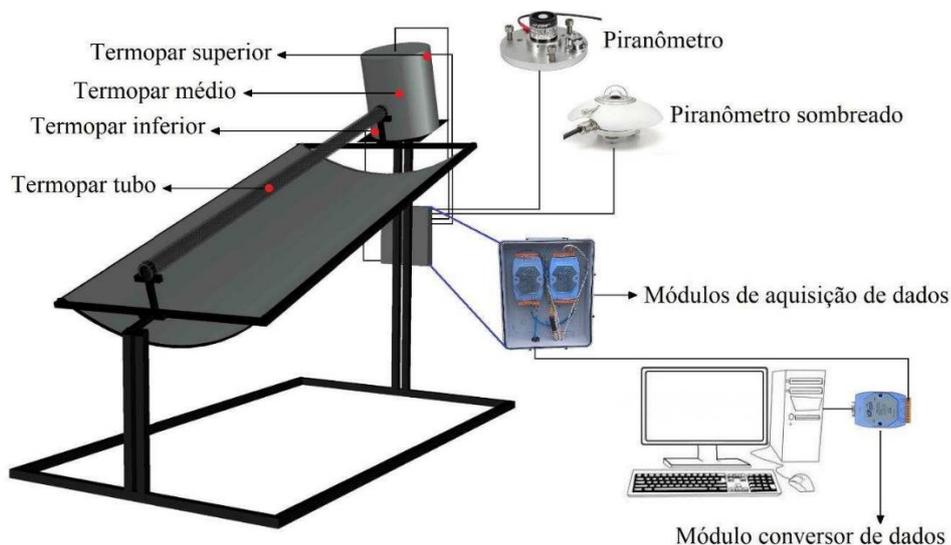
Figura 10: Modelo de coletor solar com alto fator de concentração



Fonte: TAHJIB, TANZIN, *et al.*, 2020

No trabalho desenvolvido por Barbosa, Martins, *et al.*, (2020), foi efetuado um estudo prático da utilização de um coletor solar de calha parabólica estacionário, para o aquecimento de um volume fixo de água, foi estudado também as perdas térmicas do sistema. A análise foi feita de maneira contínua durante 3 dias onde a temperatura no reservatório era monitorada constantemente. Como principal diferencial desse estudo tem-se a utilização do CSCP de maneira estacionária, o que pode ser descrito como um uso incomum deste tipo de equipamento, um outro ponto do estudo foi a real contribuição da superfície refletiva para o ganho de potência do coletor, para isso o autor realizou estudos com a superfície refletiva coberta. Por fim, foi possível concluir que a superfície refletiva efetivamente amplia a capacidade térmica do dispositivo, mesmo sendo de forma estacionária.

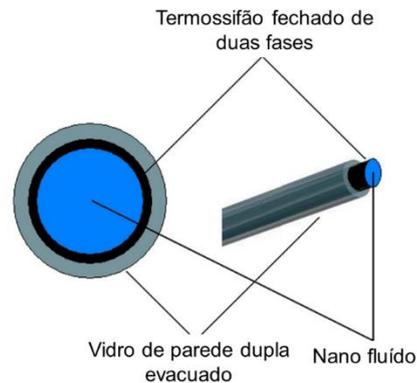
Figura 11: Coletor solar parabólico estacionário.



Fonte: BARBOSA, MARTINS, *et al.*, 2020

Outro trabalho de interesse, mostra um CSCP de baixo custo, a qual, foi construído por Fathabadi (2020), para utilização de em um tubo coletor do tipo termossifão fechado de duas fases descrito, em maior detalhe na Figura 12, a superfície refletiva do coletor foi composta de uma chapa de aço inoxidável polido. Para comprovar o baixo custo o autor comparou o valor de construção de seu coletor com o preço comercial dos coletores concorrentes e chegou a uma relação de Euro/w, onde o coletor proposto ficou com uma taxa de 0,4467 Euro/W, enquanto o coletor de tubo evacuado ficou com um custo de 0,8364 Euro/W, não sendo mais barato que o de placa plana que obteve um custo de 0,344 Euro/W.

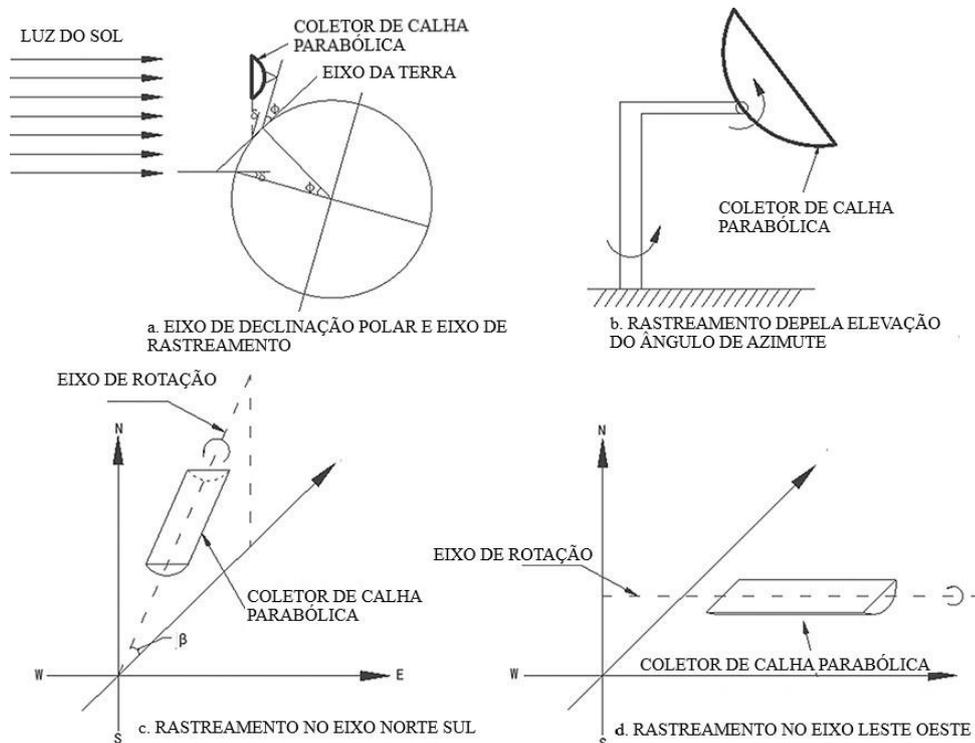
Figura 12: Tubo evacuado tipo TPCT.



Fonte: Adaptado de Fathabadi, 2020

No artigo escrito por Kong, Zhang, *et al.*, (2020), o autor comparou os diferentes modos de rastreamentos utilizados em CSCP, o objetivo deste trabalho era determinar qual tipo de rastreamento, de um eixo Norte-Sul ou Leste-Oeste, e ainda de duplo eixo, ver Figura 13. O estudo foi conduzido realizando-se um estudo teórico sobre a incidência solar em diferentes localidades nos diferentes sistemas. Ao final do estudo, foi observado que certamente o sistema de duplo eixo apresenta maior eficiência em relação à radiação solar recebida.

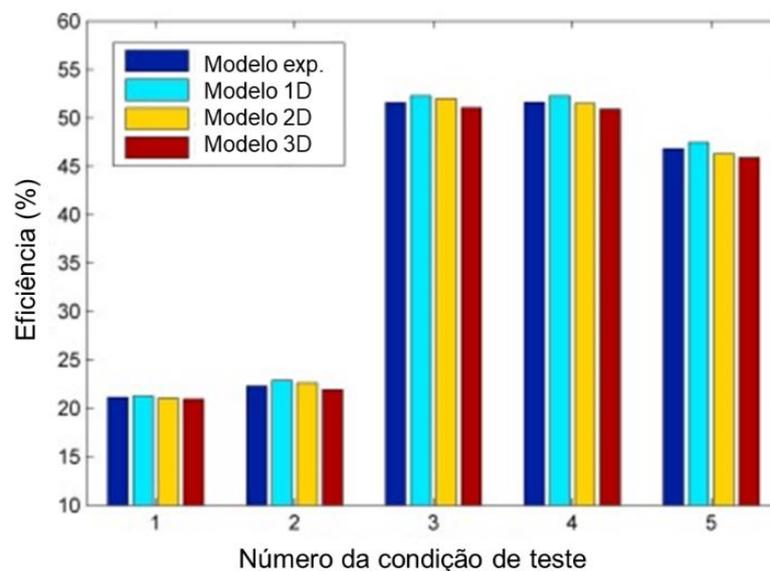
Figura 13: Diferentes modos de rastreamento analisados.



Fonte: Adaptado de KONG, ZHANG, *et al.*, 2020

Já no estudo desenvolvido por Agagna, Smaili (2018), foram comparadas diferentes técnicas de modelagem computacional e comparadas com um equipamento experimental. Para este estudo desenvolveu-se três modelos analíticos, o modelo 1D é baseado no balanço de energia do tubo absorvedor, onde o escoamento e a distribuição de energia é considerada uniforme e unidimensional em todo o tubo. O modelo 2D, é um modelo menos complexo, e acaba por ser uma extensão do modelo 1D, na prática o tubo foi segmentado e cada parte era analisada de maneira individual, aplicando a distribuição de energia de maneira unidimensional. No modelo 3D de maior complexidade, foi utilizada a técnica da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), os autores realizaram um estudo fluidodinâmico e de transferência de calor no tubo absorvedor, além de simular a radiação solar por meio da técnica de *Monte Carlo Ray Tracing*. Por fim o autor conseguiu concluir, em 5 diferentes condições de ensaio, que os modelos mais simples 1D e 2D podem prever o desempenho geral do CSCP incluindo a eficiência e a perda de calor, conforme demonstrado na Figura 14. Mas, o modelo 3D pode ir além e prever a não uniformidade do fluxo de calor no interior do tubo absorvedor, e o gradiente de temperatura externo do tubo.

Figura 14: Comparação entre os modelos de simulação e o experimental em 5 diferentes condições de teste.

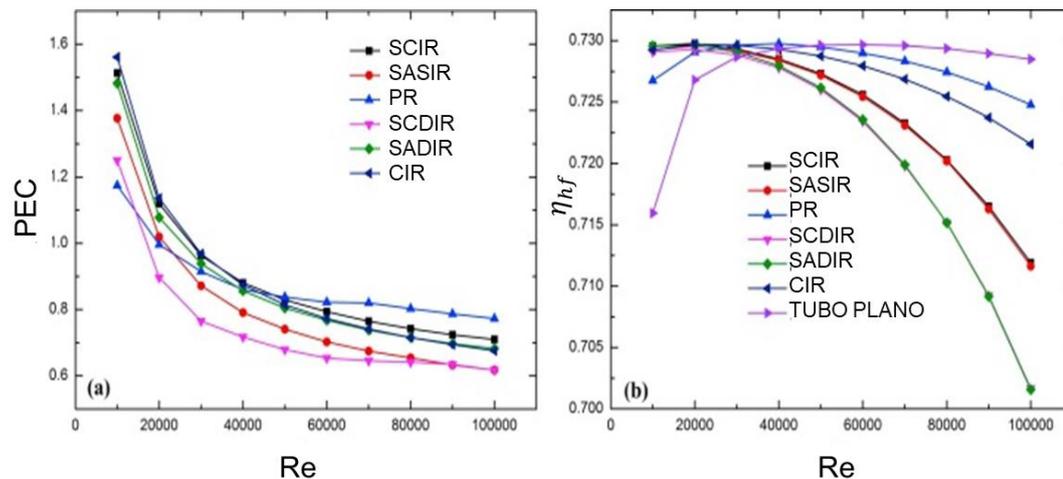


Fonte: Adaptado de Agagna, Smaili, *et al.*, 2018.

Em estudos relacionados ao tubo absorvedor, visando a melhoria da eficiência de troca de calor do tubo para o fluido, Liu, Lv, *et al.*, (2019), adicionou pequenas aletas, em diferentes direções ao longo do tubo coletor, no total foram testadas 6 diferentes configurações.

Na Figura 15, tem-se a comparação entre número de Reynolds e o Critério de Avaliação de Desempenho (PEC) que é um fator que relaciona o desempenho térmico e as perdas hidráulicas. Assim é possível observar que houve um ganho de eficiência chegando a valores superiores a $PEC=1,6$ para valores de Reynolds abaixo de 20000. Também, foi possível reduzir significativamente a distribuição térmica ao longo da circunferência do tubo e consequentemente reduzir a temperatura de pico em até $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 15: Comparação entre, (a) critérios de avaliação de desempenho (PEC); (b) eficiência térmica modificada.

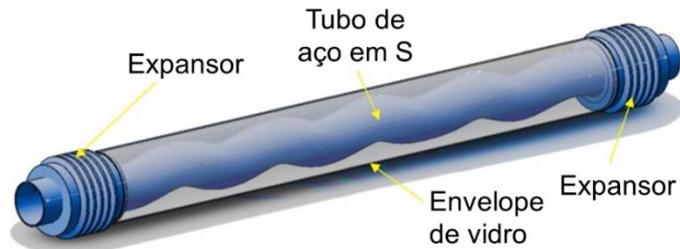


Fonte: Adaptado de Liu & Lv, *et al.*, 2019

No estudo desenvolvido por Bitam, Demagh, *et al.*, (2018), foi realizada o estudo de um novo modelo de tubo absorvedor do tipo formato senoidal Figura 16, com o intuito de aumentar a turbulência interna do fluido. O autor aplicou o fator PEC que compara os desempenhos térmicos e hidráulicos, o máximo valor de PEC foi de 1,35; considerando que com valores acima de 1 aconteceram ganhos efetivos na eficiência, o autor conclui que houve redução na temperatura de pico do tubo absorvedor, e para escoamentos abaixo de 10000 Re houve ganhos efetivo na eficiência.

Cabe ressaltar que um ponto de convergência no estudo realizado por diversos autores, foi revestimento do tubo absorvedor, que deve ter como característica básica uma superfície não seletiva, ou seja, deve absorver todas as faixas de luz, assim normalmente é aplicada um revestimento preto. No entanto a aplicação de um revestimento com características seletivas, que absorvem a radiação no espectro de luz solar e não emite radiação no espectro infravermelho, é considerada muito mais eficiente (UPADHYAY, PATEL, *et al.*, 2019).

Figura 16: Modelo de tubo senoidal estudado



Fonte: Bitam, Demagh, *et al.*, (2018).

No estudo efetuado por Chevapruck, Chomcharoen, *et al.* (2020), o autor analisou as propriedades óticas como, refletância, emissividade e absorbância de um filme de níquel com Al_3O_2 de diferentes concentrações e com diferentes tempos de deposição. O autor conclui que valores maiores de 80% em massa de níquel melhoram as propriedades seletivas e piora a refletância do revestimento, e de maneira geral 95% da luz incidente é absorvida.

Já Achkari & El Fadar (2021) fizeram estudos por meio de simulações a comparação entre a energia térmica produzida e a energia elétrica que é gasto no rastreador, estes deduziram que no solstício de inverno o consumo do rastreador correspondeu a 28,21% da energia térmica gerada, já no solstício de verão corresponde a 4,62%, para uma localização de (31 ° 57'N, 5 ° 19'E), finalmente, concluíram que não é viável utilizá-lo em pequenos painéis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para o levantamento dos materiais a serem utilizados na construção do coletor, conforme apresentados na Tabela 3, foi efetuado um projeto inicial com as dimensões e o formato desejado para o coletor. Como a intenção é de construir um coletor de baixo custo utilizou-se materiais alternativos aos utilizados em CSCP comerciais, sempre que possível eram escolhidos materiais de fácil acesso, ou seja, que são amplamente distribuídas.

Tabela 3: Lista de materiais utilizados na construção do CSCP.

Descrição	Quantidade	Local a ser utilizado
Barra de aço quadrado de 50mm	2	Base e suporte da calha
Barra de aço quadrada de 70mm	1	Base
Cantoneira tipo mão francesa de 40x30	8	Suporte da calha
Barra chata de 5mm X15mm	1	Fixação de componentes
Mancais de rolamento para eixos de 20mm	4	Articulação do suporte da calha
Rodízios giratórios para 50 kg de carga	4	Base
Tubo de cobre tipo E Ø 42mm.	1	Calha
Chapa de aço galvanizado de 1,2 X 2,0 m	1	Calha
Adesivo refletivo 1,5 X 0,5 metros 5%	4	Calha
Motor elétrico 12v	2	Atuador de movimentação
Barra roscada 1/2"	1	Atuador de movimentação
Caixa redutora redução de 1/32	1	Atuador de movimentação
Bomba de circulação	1	Equipamento auxiliar
Sensor de temperatura DS18B20	2	Montada no tubo absorvedor
Sensor de fluxo YF-S201	1	Pós bomba de circulação
LDR (<i>Light Dependent Resistor</i>)	4	Sensor de posição do sol
Arduino® uno R3	2	Datalogger e o rastreador solar
Shield RTC com SD card	1	Datalogger
Módulo de reles de 5v com 4 reles	1	Rastreador solar

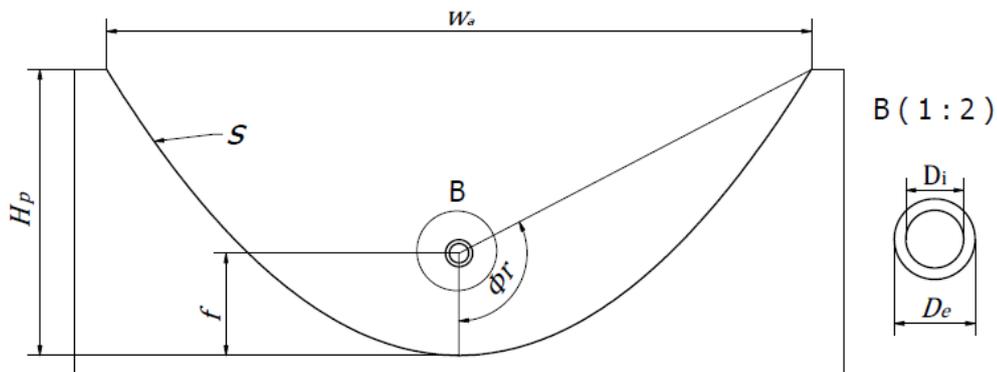
Fonte: do autor

3.2 GEOMETRIA DO COLETOR

Para o projeto de um CSCP deve-se considerar alguns parâmetros construtivos que determinam as características de funcionamento do futuro coletor. Para o coletor proposto, Figura 17, mostra um corte transversal do CSCP onde pode se observar a geometria proposta. A geometria em questão, tem como características principais o ângulo de borda superior, quando comparado a coletores semelhantes, a escolha desse ângulo teve como justificativa a necessidade de se obter um ângulo de aceitação do coletor, calculado pela equação (3), maior que 1 reduzindo assim a necessidade de um sistema de rastreamento de

maior precisão, e como vantagem adicional tem-se ainda a possibilidade de instalação de uma cobertura de vidro sobre a superfície refletiva, a fim de proporcionar um efeito estufa sobre todo o coletor (BEHAR, KHELLAF, *et al.*, 2015).

Figura 17: Parâmetros geométricos de um CSCP, onde o corte na figura indicado pela letra (B) representa o tubo absorvedor



Fonte: do autor

Dentre os parâmetros a serem considerados, um dos mais importantes é a taxa de concentração (C), determinada por meio da equação (1). No sistema proposto, devido às limitações impostas como a abertura máxima do coletor que é de 110 cm. E a utilização de um tubo de 42mm de diâmetro, obteve-se um fator de concentração de 8,34, sendo a faixa de referência entre 5 e 70 (DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014). O W_a representa a largura da calha parabólica e D_e o diâmetro externo do tubo absorvedor.

$$C = \frac{W_a}{\pi D_e} \quad (1)$$

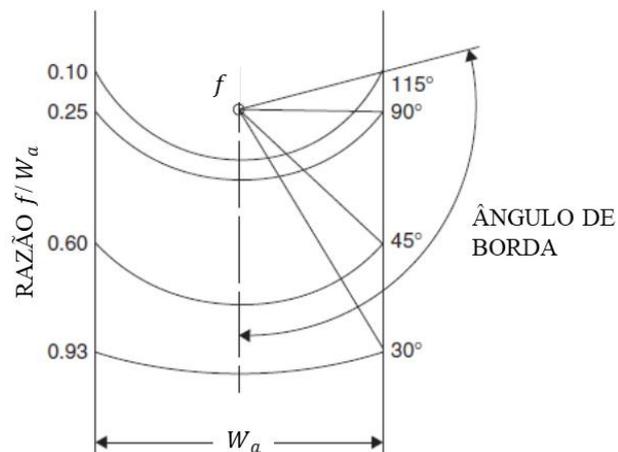
Outro parâmetro que deve ser analisado é o ângulo de borda, que normalmente está entre 70° e 120° e para que ele fique compreendido nessa faixa deve-se observar a relação da equação (2). Onde φ_r corresponde ao Ângulo de borda e f a distância focal.

$$\tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) = \frac{W_a}{4f} \quad (2)$$

Existem outras variáveis que devem ser consideradas para a determinação deste ângulo, de maneira geral a utilização de ângulos próximos a 90° tendem a ter uma melhor

eficiência ótica pois a distância entre o foco e a superfície refletora é mais regular, assim o coletor sofre menos com erro de alinhamento e rastreamento. Por outro lado a utilização de ângulos menores exigem uma menor superfície refletiva barateando e facilitando a produção do refletor, conforme mostra a **Figura 18** (BEHAR, KHELLAF, *et al.*, 2015, DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014).

Figura 18: Variação do ângulo de borda.



Fonte: Adaptado de (KALOGIROU, 2014)

O ângulo de aceitação determinado pela equação (3), representa o alcance angular dos raios solares diretos refletidos que incidem no tubo absorvedor sem que necessite movimentar a calha, conforme Duffie & Beckman (2015) e Behar et al. (2013) o menor ângulo de aceitação possível é de aproximadamente $0,53^\circ$, esse valor representa a média do ângulo de correspondente a esfera solar vista da terra, ainda em relação a esse ângulo, valores menores que 1° exigem rastreamento preciso e ângulos maiores reduzem a temperatura máxima de operação do coletor.

$$\text{sen}\theta = \frac{D_e}{2f(1 + (x/2f)^2)} \quad (3)$$

O x é a posição na qual está se medindo o ângulo de aceitação, sendo o menor ângulo calculado para este coletor de $2,19^\circ$.

Por fim resta apenas o desenho da parábola, que deve obedecer a equação (4) (DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014).

$$y^2 = 4f \quad (4)$$

Onde:

y : Coordenada no eixo Y.

Sendo o comprimento da curva dado por meio da equação (5) (DUFFIE, BECKMAN, 2013).

$$S = \frac{Hp}{2} \left\{ \sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \ln \left[\sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \right] \right\} \quad (5)$$

Onde:

S : Comprimento do raio parabólico (m);

H_p : Largura da parábola na distância focal.

Na Tabela 4 é apresentado os parâmetros geométricos do CSCP proposto, onde o comprimento do coletor foi determinado pelo comprimento do filme refletivo disponível e o comprimento máximo permitido para o futuro local onde o mesmo ficara estocado, quando fora de uso.

Tabela 4: Parâmetros geométricos do CSCP.

Parâmetro	Dimensão
Abertura da calha parabólica (W_a)	110 cm
Comprimento da calha parabólica (L)	200 cm
Área de abertura do coletor	2,2 m ²
Fator de concentração geométrica (C)	8,34
Ângulo de abertura (φ_r)	120°
Abertura do coletor na altura focal (H_p)	44,75 cm
Comprimento da curva da parábola (S)	140 cm
Distância focal (f)	16 cm

Fonte: Do autor

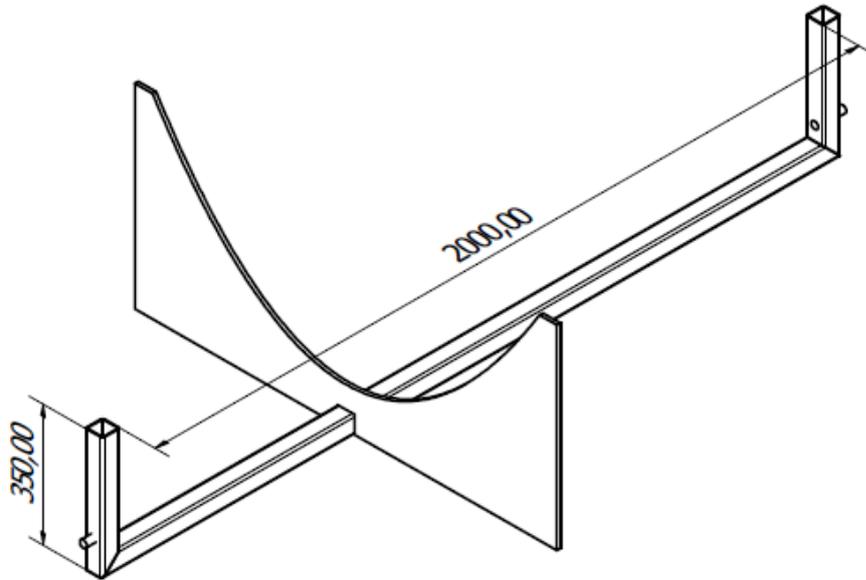
3.3 ESTRUTURA DO CSCP

A estrutura do CSCP foi montada utilizando-se tubos de aço quadrados disponíveis no laboratório, os tubos foram escolhidos por fornecerem a resistência mecânica necessária para suportar o peso do coletor e ainda as intempéries que o mesmo poderá sofrer. A estrutura foi dividida em suporte da parábola, base articulada da parábola e base do CSCP.

3.3.1 Suporte da parábola

Para o desenho da geometria da parábola, determinada na etapa anterior, foi cortado em um equipamento CNC (Comando numérico por computador), um molde em EPS expandido no futuro formato da calha, e com esse molde foi realizada a marcação e corte de 4 chapas de compensado de 15mm de espessura. E este compensado, conforme a Figura 19 (a), foi fixado à estrutura metálica com o uso de cantoneiras tipo mão francesa, ver Figura 19 (b). Para a estrutura metálica foram utilizados tubos de aço quadrado de 50mm de aresta e 0,8 mm de espessura.

Figura 19: (a) Base para apoio da parábola; (b) Detalhe da fixação da mão francesa.



(a)

Fonte: do autor



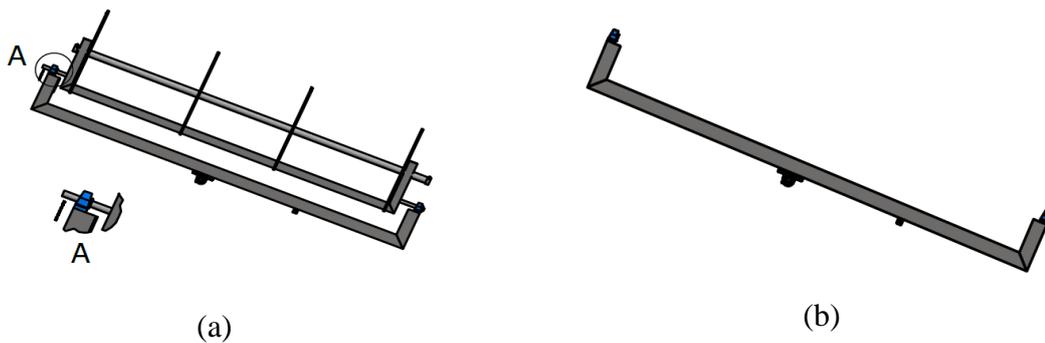
(b)

Fonte: do autor

3.3.2 Base articulada para o suporte da parábola.

A base da calha foi montada com a utilização de tubos de aço quadrado, de 75mm de aresta conforme mostra a Figura 20(b), disponíveis no laboratório da instituição. E esta base recebeu dois mancais de rolamentos em suas extremidades, Figura 20(a), para garantir o movimento angular do rastreador solar no plano azimutal.

Figura 20: Base articulada da parábola (a) Detalhe dos mancais utilizados; (b) Base de fixação da parábola.



(a)

(b)

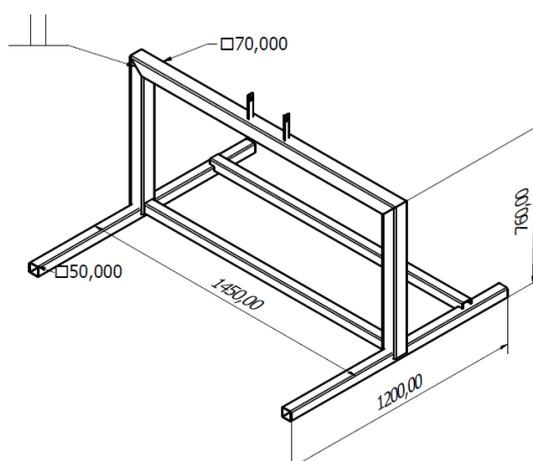
Fonte: do autor

Esta estrutura ainda irá suportar o sistema de movimentação azimutal que será composto por um redutor, um motor elétrico e um sistema com corrente e cora e pinhão.

3.3.3 Base do CSCP

A base de apoio para o CSCP além da base articulada da calha parabólica, suporta diversos componentes necessários ao montagem e funcionamento do equipamento. Dentre eles o sistema hidráulico, composto pela bomba de circulação e reservatório, além do atuador de altitude e os rodízios que permitem a movimentação do equipamento. Este suporte também foi montado com tubos quadrados de 70mm de aresta.

Figura 21: Base do CSCP

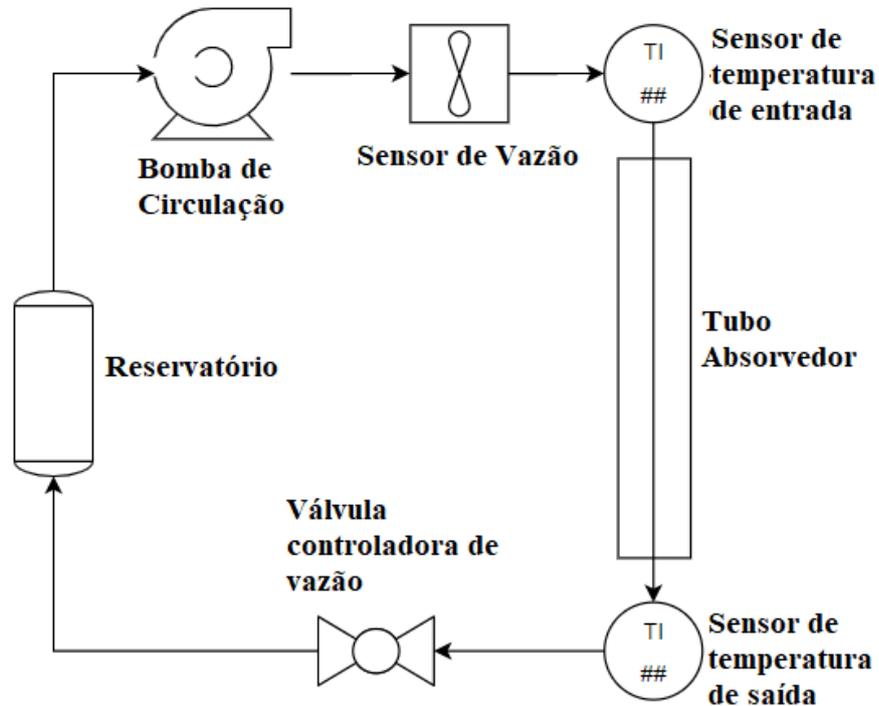


Fonte: do autor

3.4 CIRCUITO HIDRÁULICO

O circuito hidráulico do CSCP é formado pelo tubo absorvedor, descrito anteriormente, uma válvula reguladora de vazão do tipo gaveta da marca Imperatriz, um reservatório de água, uma bomba de circulação do tipo radial da marca Texius modelo TBHGF, ela possui uma carga manométrica de 12,5 metro coluna de água (m.c.a.), e uma vazão máxima de 58 L/min, suportando temperaturas de até 90°C, (TEXIUS, 2012). Além destes itens foram instalados tubos e mangueiras de 6,35mm de diâmetro. Na Figura 22, tem-se o esquema de ligação do circuito hidráulico do sistema. Devido às características do projeto as perdas térmicas que por ventura ocorrem neste circuito não serão consideradas, pois a variação de temperatura medida é ocorre no interior do tubo absorvedor, não sendo aplicado assim nenhum tipo de isolamento térmico a esses componentes, espera-se assim que o CSCP entre em um regime estacionário ou permanente onde a temperatura fique estável.

Figura 22: Esquema do circuito hidráulico do CSCP.



Fonte: do autor

3.5 RASTREAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Para esta etapa foi desenvolvido um sistema de rastreamento ativo e de aquisição de dados. O sistema de rastreamento é composto por um sensor de posição solar e os atuadores que realizam os movimentos na calha. Já o sistema de aquisição de dados possui sensores de temperatura e vazão além de um dispositivo que armazena os dados registrados e transmite para uma base de dados online e assim possibilita o monitoramento remoto do coletor.

O sistema de rastreamento utilizado foi baseado em um sistema apresentado por (THARAMUTTAM, NG, 2017), que em seu estudo comparou a utilização de sistemas ativos passivos e híbridos para aplicações fotovoltaicas.

3.5.1 Rastreamento e movimentação da calha parabólica

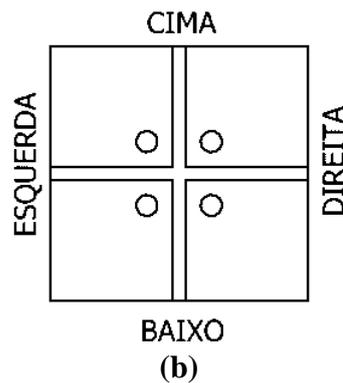
Para prover a função de rastreamento solar um sensor de posicionamento solar composto por um conjunto com 4 LDRs (*Light Dependent Resistor*), ver Figura 23.c montados na base da Figura 23.a, colados nos furos de 5mm localizados no vértice, ficando perpendiculares a torre divisora, assim é observado que com um erro no ângulo de incidência superior a $2,3^\circ$ o sensor deverá estar totalmente sombreado, condição limite na qual deve ocorrer a correção do posicionamento da parábola. O material utilizado para a execução da torre

foi ABS, devendo o sensor ser fixado em um ponto aonde se possa confirmar o alinhamento entre a calha e o próprio sensor, para este protótipo foi escolhido o suporte de fixação do tubo absorvedor como ponto de ancoragem do sensor.

Figura 23: (a) Sensor de posicionamento solar; (b) Vista da base do sensor de posicionamento solar, (c) LDR *Light Dependent Resistor*



(a)



(b)



(c)

Fonte: do autor

A movimentação da calha é efetuada por dois atuadores, sendo um atuador linear para a correção de ângulo de altitude Figura 24.b e de um atuador ligado a um conjunto redutor ligado por uma corrente a calha para o movimento azimutal Figura 24.b , ambos acionados por motores elétricos de corrente continua de 12V empregados em mecanismos de

levantamento de vidro de porta de automóveis, estes foram escolhidos, pois possuem um torque aproximado de 10 N e isolamento IP42.

Figura 24: (a). Atuador azimuthal com motor elétrico redutor com acionamento por corrente. (b) Atuador linear com sistema de rosca.



(a)

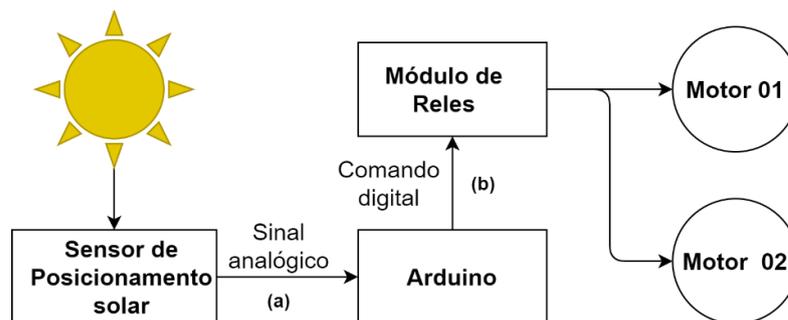


(b)

Fonte: do autor

E para o controle desse sistema de rastreamento foi idealizado um controlador, baseado em modelo de desenvolvimento de plataforma aberta (Arduino), tendo o sensor de posicionamento solar, os reles de comando dos motores e os motores dos atuadores interligados conforme diagrama da Figura 25.

Figura 25: Diagrama de blocos representativo do sistema de rastreamento.

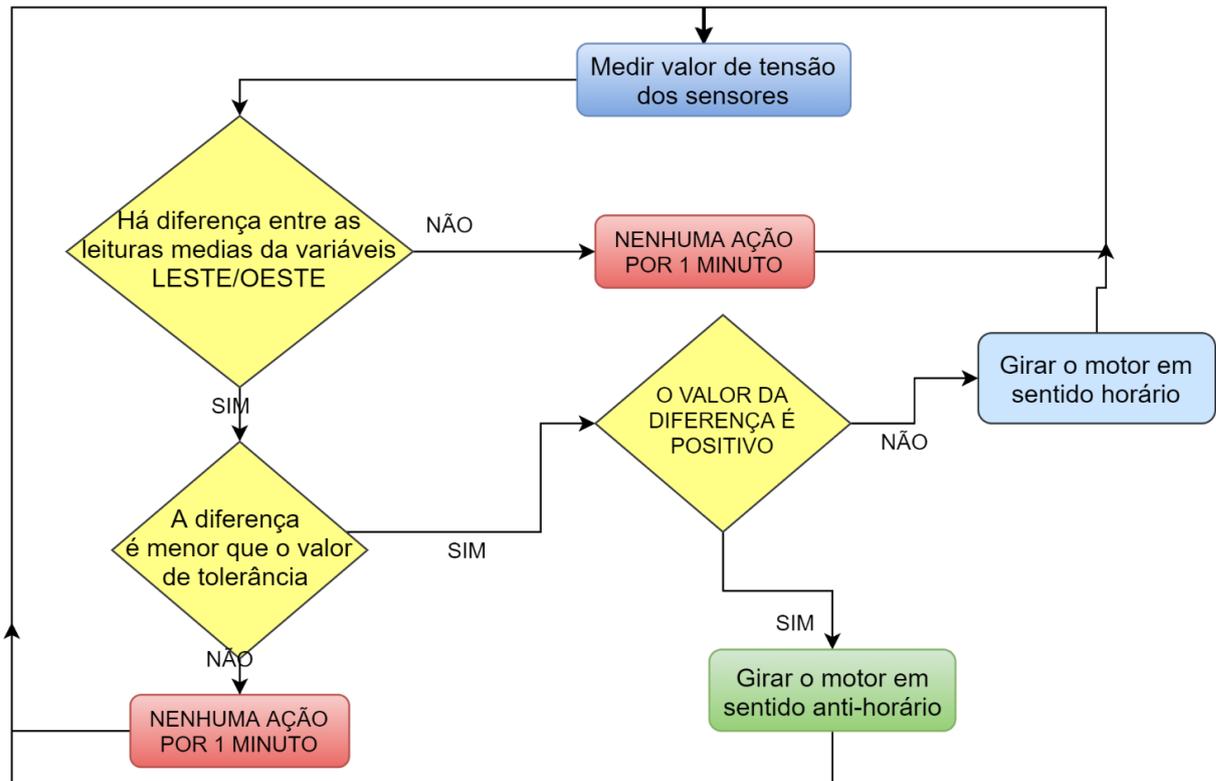


Fonte: do autor

O funcionamento do sistema de rastreamento ocorrerá da seguinte maneira, os LDRs do sensor de posicionamento variam a tensão de saída do sensor em função luminosidade que está incidindo sobre a sua superfície de cada LDR, se os quatro LDRs estiverem expostos ao sol o valor de tensão lido pelo Arduino é similar nos quatro LDRs, e se um deles estiver sombreado o nível de tensão dele irá se elevar e assim por meio do algoritmo

da Figura 26, acionará o rele correspondente ao sentido de giro necessário a correção da defasagem do vetor do perpendicular do coletor, em relação ao ângulo de incidência solar.

Figura 26: Algoritmo decisório para correção do alinhamento vetorial da calha.



Fonte: do autor

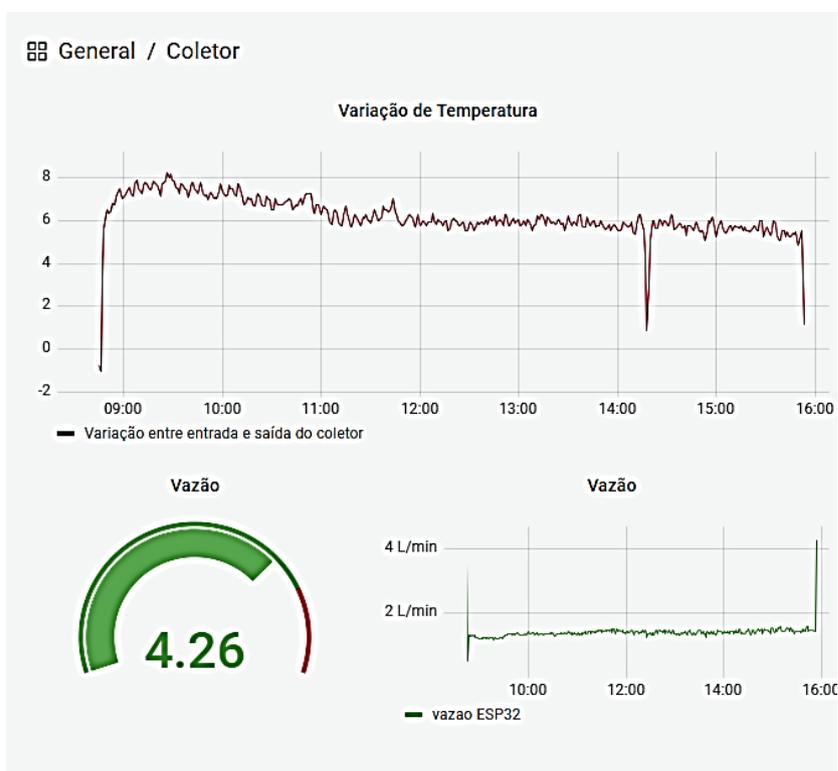
3.5.2 Aquisição dos dados

Para o monitoramento do CSCP foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados também baseado em um modelo de desenvolvimento de plataforma aberta (Arduino). Para esse sistema foi necessário um módulo RTC (*Real Time Clock*), que pode gravar a data e a hora reais, independente de alimentação externa, esse módulo ainda possui um adaptador de SD (*Secure Digital Card*), conhecido como cartão de memória, onde serão armazenados os dados de funcionamento do coletor e um adaptador de internet para enviar os dados para a base de dados online.

O Sistema de monitoramento do CSCP é responsável pela coleta dos dados de funcionamento do coletor e de disponibiliza-los de maneira gráfica para os usuários do coletor, dessa forma, são coletados: os dados de temperatura, na entrada e saída do tubo absorvedor; vazão mássica do fluido de transporte e a temperatura externa do tubo absorvedor. Já para a

visualização, foi elaborado um painel visual que exibe em tempo as condições de funcionamento do CSCP, em tempo real.

Figura 27: Captura de tela do painel de visualização dos dados.



Fonte: do autor

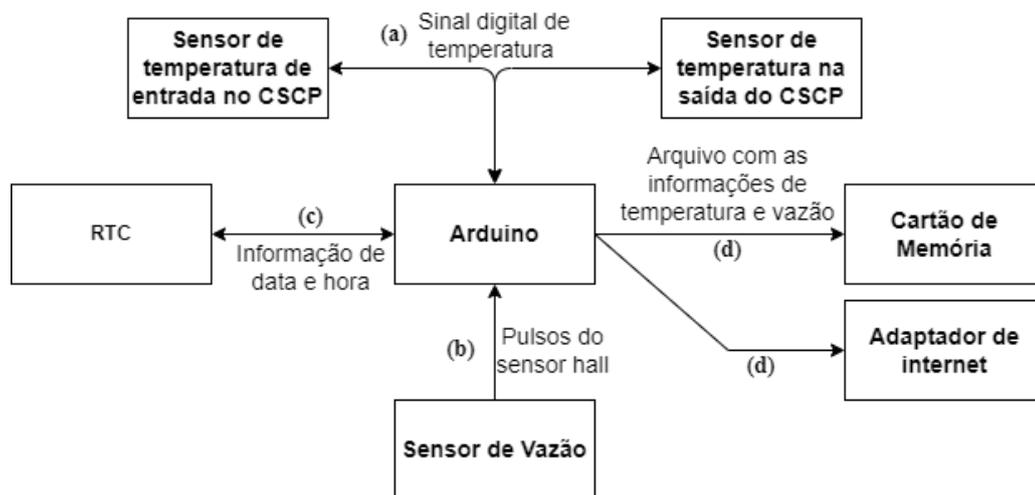
Para a medição da temperatura foram utilizados termopares tipo K, e como compensação de junta fria foi utilizado um circuito integrado do modelo max6675 que possui além da compensação da junta fria uma saída digital de 12bits o que fornece uma resolução de 0,25 °C, com erro de 0,5 °C.

Para a medição da vazão, o sensor de fluxo foi aplicado logo após a bomba de circulação, o modelo utilizado é o YF-S201 para vazões de 1 a 30L/min, seu mecanismo de monitoramento é do tipo efeito hall, onde um ímã é fixado a uma das pás internas da microturbina presente no sensor, paralelo ao ímã está um sensor de efeito hall que envia um sinal de resposta a cada volta da microturbina (DALLE, TAMJIDI, *et al.*, 2020).

Conforme mostra a Figura 28, o diagrama de blocos permite a visualização da rotina de aquisição de dados, os sensores de temperatura são monitorados pelo Arduino, sendo eles digitais, enviam a informação de temperatura acompanhada da identificação de qual sensor é essa temperatura Figura 28.a, no mesmo instante o sensor de vazão é necessário realiza uma contagem de pulsos, Figura 28.b, ou seja, para cada vez que uma delas passa pelo sensor

o Arduino armazena e conta o número de pulsos, para este modelo de sensor o normal e a cada litro de água pura a temperatura ambiente serem contabilizados 407 pulsos, que passa a ser a constante para cálculo da vazão, ao adicionarmos uma contagem de tempo, passamos a ter uma contagem de pulsos por tempo, sendo assim possível calcular a vazão em litros por minuto. A informação de data e hora reais é gravada no RTC no carregamento da rotina, a partir deste ponto ele passa a enviar essa informação quando requerida pelo Arduino, ver Figura 28.c, a cada intervalo predeterminado, as informações de temperatura de entrada e saída do coletor, vazão e data e hora, Figura 28.d são armazenadas em um arquivo no cartão de memória, e simultaneamente enviadas ao banco de dados remotos.

Figura 28: Diagrama de funcionamento do sistema de aquisição de dados.



Fonte: do autor

3.6 MEDIÇÕES METEOROLÓGICAS E SOLARIMÉTRICA

Para a coleta de dados da temperatura ambiente, umidade, velocidade e direção do vento, foi utilizada a estação meteorológica instalada próximo ao coletor solar, ela possui sensores de temperatura ambiente, umidade, velocidade e direção do vento, além de um pluviômetro, ver **Figura 29**.

Figura 29: Estação meteorológica.



Fonte: do autor

3.6.1 Modelo para a determinação da radiação solar

Para a determinação da radiação solar direta incidente sobre o coletor foi utilizado o modelo matemático apresentado por (DUFFIE, BECKMAN, 2013), que leva em consideração as equação proposta por (HOTTEL, 1976) onde para a determinação da radiação incidente em uma superfície deve-se considerar a radiação solar extraterrestre disponível I_e que pode ser considerada 1367W/m^2 , a esse valor aplica-se a correção presente na equação (6), uma vez que este valor sofre variação ao longo do ano, devido a órbita elíptica da terra em torno do sol, para isso n é o dia do ano considerando um calendário Juliano.

$$I_{ec} = I_e \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (6)$$

Onde:

I_{ec} : Radiação solar extraterrestre corrigida (W/m^2);

I_e : Radiação solar extraterrestre (W/m^2);

n : Dia do ano (Calendário Juliano).

Para saber a radiação incidente em um local específico é necessária ainda saber a sua altitude (A_l) e ângulo azimutal (θ_z), assim definindo o conjunto de equações (7), (8), (9) e (10). Obtêm-se um fator de atenuação (τ_b), que é aplicado ao valor de radiação extraterrestre corrigido obtido na equação (6). Onde a_0 , a_1 e a_2 : São fatores de correção devido a atmosfera, o ângulo azimutal deve ser considerado em radianos e a altitude em quilômetros.

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-a_2}{\cos \theta_z}\right) \quad (7)$$

$$a_0 = 0,4237 - 0,00821(6 - A_l)^2 \quad (8)$$

$$a_1 = 0,5055 + 0,00595(6,5 - A_l)^2 \quad (9)$$

$$a_2 = 0,2711 + 0,01858(2,5 - A_l)^2 \quad (10)$$

3.7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fim de garantir de que os dados coletados obtidos experimentalmente se enquadrem dentro do regime estacionário, o parâmetro constante de tempo do coletor (C_t), é avaliado. Este valor corresponde ao tempo necessário para que o coletor atinja 63,2% da temperatura máxima constante, conforme mostra a equação (11).

$$\Delta t_{ct} = 0,632(T_s - T_a) - (T_e - T_a) \quad (11)$$

Onde:

Δt_{ct} : Variação de temperatura relativa (°C);

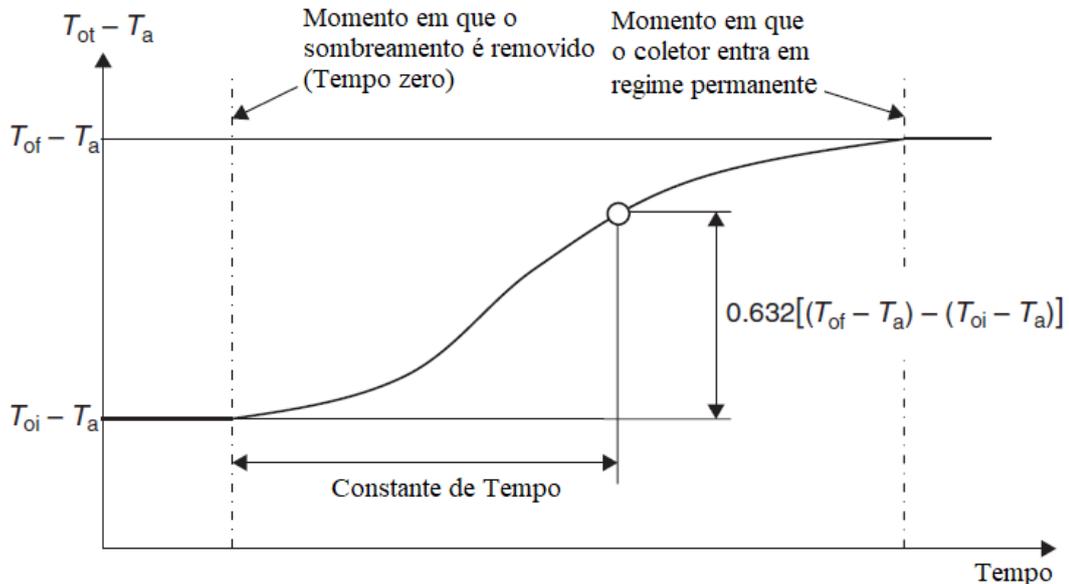
T_s : Temperatura de saída do fluido (°C);

T_e : Temperatura de entrada do fluido (°C);

T_a : Temperatura ambiente (°C).

Para determinar esse percentual, utiliza-se a equação (11). O procedimento para determinação deste tempo consiste em cobrir a superfície refletiva do coletor, estabelecer um fluxo contínuo de fluido, descobrir o coletor, iniciar a contagem de tempo até que a variação de temperatura na saída do coletor seja menor que 0,05 °C por minuto. A determinação deste intervalo de tempo é necessária para a correta avaliação da eficiência do coletor, pois em regimes transitórios a eficiência pode ser subestimada devido a transferências de calor para a vizinhança do coletor (KALOGIROU, 2014).

Figura 30: Determinação da constante de tempo.



Fonte: Adaptado de (KALOGIROU, 2014)

Assim o coletor irá ser testado em duas diferentes situações, a primeira condição efetua-se a variação da vazão do fluido de transporte de calor variando-o entre 5 e 70 kg/h, com a temperatura de entrada fixa em 30°C.

O segundo teste foi realizado com uma vazão fixa de aproximadamente 70 Kg/h, em diferentes temperaturas de entrada de fluido de transferência de calor, o fluido utilizado para ambos os ensaios foi a água deionizada.

3.7.1 Condições de ensaio

Os ensaios foram realizados entre os dias 23/10/2021 e 05/11/2021 entre as 9:30 e 16:00, com céu limpo, e temperatura ambiente média de 25°C. Onde, o coletor ficou alinhado na direção do eixo norte sul, e localizado nas coordenadas S 25.43816, O 54.59679.

3.8 ANÁLISE ÓTICA DO COLETOR

Para o coletor proposto a determinação da parcela analítica foi efetuado conforme a metodologia construída por Abed & Afgan (ABED, AFGAN, 2020) que foi baseado nas equações propostas por (DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014).

Iniciando pela análise ótica, onde para se determinar sua eficiência ótica (η_o), utiliza-se a equação (12). Onde (ρ) é a refletância da superfície refletiva, (τ) fator de transmissividade do envelope de vidro, (λ) fator de absorção do tubo, (γ) fator de interceptação, (A_f) fator geométrico e (θ) ângulo de incidência (KALOGIROU, 2014).

$$\eta_0 = \rho\tau\lambda\gamma[(1 - A_f \tan(\theta) \cos(\theta))] \quad (12)$$

A eficiência da equação (12) varia conforme o ângulo de incidência da radiação solar (θ), Que pode ser modelada como um fator de modificação de ângulo ($K\theta$), definido pela equação (13).

$$K\theta = \frac{\eta_o(\theta)}{\eta_{o,max}} \quad (13)$$

O fator de modificação de ângulo ($K\theta$), é uma função dos parâmetros geométricos do CSCP derivado da equação (14).

$$K\theta = \cos(\theta) - \frac{f}{L_c} \left(1 + \frac{A_a^2}{48f^2} \right) \sin(\theta) \quad (14)$$

Para dar sequência na resolução da equação (12) deve-se determinar fator geométrico por meio da equação (15).

$$A_f = \frac{2/3 w_a H_p + f w_a \left(1 + \frac{(w_a)^2}{48f^2} \right)}{A_a} \quad (15)$$

O fator de interceptação é a condição mais complexa para a determinação da eficiência ótica do coletor, conforme Kalogirou (2014) esse fator é uma razão entre a energia refletida, pela energia interceptada pela calha parabólica. A formação deste fator é a combinação de erros aleatórios e não aleatórios. Para os erros aleatórios como por exemplo, os erros de inclinação da parábola, de mudança na largura aparente do sol e a difusidade da superfície refletiva, com erros não aleatórios considera-se desvios de alinhamento entre parábola e receptor ou ainda as imperfeições da superfície refletiva, Assim devido à complexidade de determinação do fator de interceptação e de que é para um CSCP convencional com ângulo de incidência zero o valor de eficiência ótica está entorno de 75%, (BEHAR, KHELLAF, *et al.*, 2015). Assim, esses fatores foram modelados estatisticamente por Güven & Bannerot (1986), gerando a equação (16) descrita por (KALOGIROU, 2014, KALOGIROU, LLOYD, *et al.*, 1994).

$$\gamma = \frac{1 + \cos(\varphi_r)}{2 \sin(\varphi_r)} \int_0^{\varphi_r} Erf \left\{ \frac{\sin(\varphi_r)[1 + \cos(\varphi)][1 - 2d' \sin(\varphi)] - \pi\beta'[1 + \cos(\varphi_r)]}{\sqrt{2\pi}\sigma'[1 + \cos(\varphi_r)]} \right\} - Erf \left\{ -\frac{\sin(\varphi_r)[1 + \cos(\varphi)][1 + 2d' \sin(\varphi)] + \pi\beta'[1 + \cos(\varphi_r)]}{\sqrt{2\pi}\sigma'[1 + \cos(\varphi_r)]} \right\} \frac{d\varphi}{(1 + \cos \varphi)} \quad (16)$$

Onde a parcela Erf e a função de erro de Gauss. Sendo (d') fator de erro não aleatório de desalinhamento e geometria do receptor assumido o máximo valor de 0,043 rad (β') fator de erro não aleatório devido a erros angulares igual a 0,0035 rad, (σ') parâmetro de erro aleatório universal 0,00861 rad (KALOGIROU, LLOYD, *et al.*, 1994)

O parâmetro de erro aleatório geral pode ser descrito como a soma dos erros de distribuição da energia solar (σ'_{sun}), especularidade da superfície refletora (σ'_{esp}), rugosidade da superfície refletora (σ'_{rug}), distribuição dos erros de rastreamento (σ'_{tra}) e de contorno (σ'_{con}).

$$\sigma'^2 = 4\sigma'_{con}{}^2 + \sigma'_{esp}{}^2 + \sigma'_{sun}{}^2 + \sigma'_{tra}{}^2 + \sigma'_{rug}{}^2 \quad (17)$$

3.9 ANÁLISE TÉRMICA DO COLETOR

Conforme Kalogirou (2014), a eficiência do coletor solar (η), pode ser medida de maneira experimental (η_e) utilizando a equação (18), que é a razão entre o ganho de energia (Q_u), pela radiação solar disponível (Q_s) obtida com os dados de radiação solar direta (I_b) e a área da abertura do coletor (A_a), onde (C_p) e (\dot{m}) correspondem respectivamente, ao calor específico o fluxo de massa do FTC.

$$\eta_e = \frac{[\dot{m} C_p (T_s - T_e)]}{[A_a I_b]} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (18)$$

Na equação (19) o valor do rendimento teórico é calculado utilizando-se um balanço de energia no receptor, Onde (C) é fator de concentração obtido da equação (1); (U_L) é o coeficiente de perdas térmicas; (A_r) sendo a área externa do tubo absorvedor.

$$\eta_t = \frac{A_r F_r \left[\eta_o I_b - \frac{U_L}{C} (T_e - T_a) \right]}{[A_a I_b]} \quad (19)$$

Uma maneira alternativa de determinar a eficiência térmica é construir um gráfico que relaciona a eficiência do coletor, equação (18), com um parâmetro representativo de calor (c'), assim o rendimento térmico passa a ser representado por uma linha, onde a interceptação desta linha no eixo da eficiência global representa o parâmetro (b') e a inclinação corresponde ao parâmetro (a'), conforme a **Figura 31**, assim é possível determinar essa eficiência ótica com o uso da equação (20).

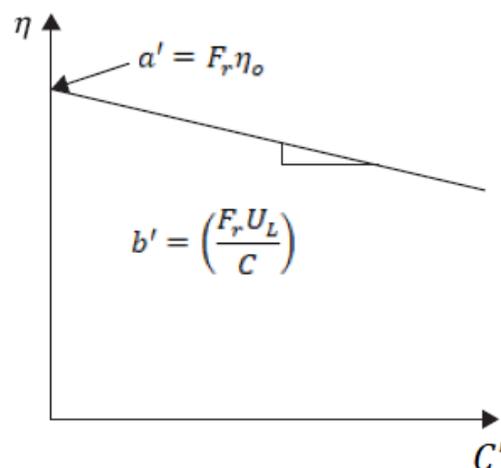
$$a' = F_r \eta_o \quad (20)$$

$$b' = \left(\frac{F_r U_L}{C} \right) \quad (21)$$

$$c' = \left(\frac{T_e - T_a}{I_b} \right) \quad (22)$$

$$\eta_t = a' + b' c' \quad (23)$$

Figura 31: Gráfico da eficiência pelo parâmetro representativo de calor.



Fonte: Adaptado de (KALOGIROU, 2014).

Desta forma a determinação da eficiência térmica passa a ser uma equação linear nos termos da equação (23), assim deve-se obter diversas medidas de eficiência, fazendo variações no parâmetro representativo (c'), preferencialmente fazendo medições em diferentes

temperaturas de entrada do fluido, a fim de obter dados suficientes para a determinação desta reta. (COCCIA, DI NICOLA, *et al.*, 2015, DUFFIE, BECKMAN, 2013, KALOGIROU, 2014).

Assim para poder se determinar a eficiência ótica deve-se calcular os parâmetro (F_r) conforme a equação (24).

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p}{A_{ri}U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_{ri}}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (24)$$

E o coeficiente global de transferência de calor (U_o) obtido conforme a equação (25), onde (k) é o valor de condutividade térmica do tubo, (h_f) é o coeficiente de transferência de calor do FTC, (D_e) e (D_i) correspondem ao diâmetro externo e interno do tubo absorvedor, respectivamente.

$$U_o = \left[\frac{1}{U_l} + \frac{D_e}{h_f D_i} + \frac{D_e \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2k} \right]^{-1} = \frac{U_L}{F'} \quad (25)$$

Sendo (F') reescrito como a equação (26).

$$F' = \frac{1/U_l}{1/U_l + D_e/(h_f D_i) + D_e \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)/2k} \quad (26)$$

Sendo (U_L) o coeficiente de perda térmica que pode ser descrito como a somas das perdas por convecção, condução e irradiação equação(27).

$$U_L = h_{amb} + h_r + h_c \quad (27)$$

Onde pode-se calcular o coeficiente de transferência de calor do ambiente (h_{amb}), por meio da equação (28), sendo o número de Nusselt da equação (28) calculado conforme aproximação proposta na equação (29) por Duffie, Beckman (2013), e o coeficiente de transferência de calor por radiação (h_r), por meio da equação (30) e o coeficiente de perdas por condução (h_c) será desprezado Onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ constante de Stefan-Boltzmann, (v_{vent}) é a velocidade do vento e (ε) corresponde a emissividade do revestimento externo do tubo absorvedor.

$$h_{amb} = \frac{Nu_{ar} K_{ar}}{D_e} \quad (28)$$

$$Nu_{ar} = 0,30 Re^{0,6} \text{ Para } 1000 < Re < 50000 \quad (29)$$

$$h_r = 4\sigma\epsilon T_{et}^3 \quad (30)$$

A emissividade (ϵ) varia conforme a cobertura do tubo absorvedor e pela temperatura média do receptor equação (31).

$$\epsilon = 0,062 + 2 \times 10^{-7} \times T_o^2 \quad (31)$$

Para a obtenção de coeficiente de transferência de calor do FTC (h_f), a equação (32), é necessário determinar o número adimensional de Nusselt (Nu); onde (K_f) representa a condutividade térmica do fluido de transporte de calor da água, os valores de condutividade térmica foram obtidos conforme correlações descritas por (WAGNER, KRETZSCHMAR, 2007).

$$Nu = \frac{h_f D_i}{K_f} \quad (32)$$

O número de Nusselt pode ser obtido através da equação de Petukhov (33). (BERGMAN, INCROPERA, *et al.*, 2011).

$$Nu = \frac{\left(\frac{F}{8}\right) Re Pr}{1,07 + 12,7 \left(\frac{F}{8}\right)^{0,5} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (33)$$

O fator de atrito (F), dada pela equação (34) é uma relação válida para o regime turbulento totalmente desenvolvido ($3000 < Re < 5 \times 10^6$). Onde Reynolds é calculado pela equação (35), onde (r), (v_f) e (D_i), representam a densidade do fluido, velocidade do escoamento e diâmetro interno do tubo absorvedor, respectivamente. A equação (36) é o número de Prandtl (Pr), que é uma relação da capacidade térmica por sua condutividade térmica.

$$F = (0,75 \ln Re^{1,64})^{-2} \quad (34)$$

$$Re = \frac{d v_f D_i}{\mu} \quad (35)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K_F} \quad (36)$$

Na Tabela 5 tem-se o resumo das propriedades calculadas ou medidas utilizando-se da metodologia apresentada neste capítulo, trazendo assim um resumo do desempenho do coletor. Devido à natureza dinâmica das medias os valores aqui representados são às medias do dia 13/10/2021.

Tabela 5: Grandezas calculadas do coletor proposto.

Grandeza	Valor	Unidade	Observação
Varição de temperatura	7,8	°C	Medida
Temperatura média	45,2	°C	Medida
Vazão volumétrica	0,0192	Kg/s	Medida
Potencia experimental	641	W	Equação (18)
Potencia teórica	615,74	W	Equação (19)
Radiação direta calculada	905	W/m ²	Equação (6)
Eficiência experimental	0,32		Equação (18)
Eficiência Teórica	0,4		Equação (19)
Fator C'	0,009306	°C.m ² / W	Equação (22)
Temperatura ambiente	32,9	°C	Medida
h_f	579,94	W/m ² .K	Equação (32)
h_r	6,5	W/m ² .K	Equação (31)
h_{amb}	46,18	W/m ² .K	Equação (28)
Reynolds	64640		Equação (35)
Nusselt	26		Equação (33)
Atrito F	6,67x10 ⁻⁴		Equação (34)
U_L	52,68	W/m ² .K	Equação (27)
F_r	0,844		Equação (24)
Eficiência ótica	0,38		Equação (12)

Fonte: Do autor.

3.10 DETERMINAÇÃO DOS ERROS

Para determinar o erro na medida de eficiência é necessária a análise de propagação de erro. Considerando a equação (18) onde a incerteza expandida corresponde a (ϵ_η) , sendo o erro do rendimento dada pela equação (37).

$$\frac{\epsilon_{\eta}}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon C_p}{C_p}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon \Delta T}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon I_b}{I_b}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon A_a}{A_a}\right)^2} \quad (37)$$

Desta forma, a incerteza expandida de cada elemento da equação (18) é apresentada na Tabela 6. A distribuição de probabilidade obtida com a equação (37) é gaussiana mesmo que as entradas não tenham a mesma distribuição.

Tabela 6: Valores de incertezas expandidas

Grandeza	Representação	Desvio padrão	Distribuição
Fluxo de massa	$\epsilon_{\dot{m}}$	0,001	Gaussiana
C _p	ϵC_p	Ver equação (38)	Gaussiana
Varição de temperatura	$\epsilon \Delta T$	0,5	Gaussiana
Área do coletor	ϵA_a	0,01	Uniforme
Radiação direta	ϵI_b	Constante	Uniforme

A incerteza atribuída a C_p foi relacionada conforme a equação (38), onde $T_m = (T_o - T_i)/2$, levando em consideração as propriedades físicas da água descritas por (WAGNER, KRETZSCHMAR, 2007).

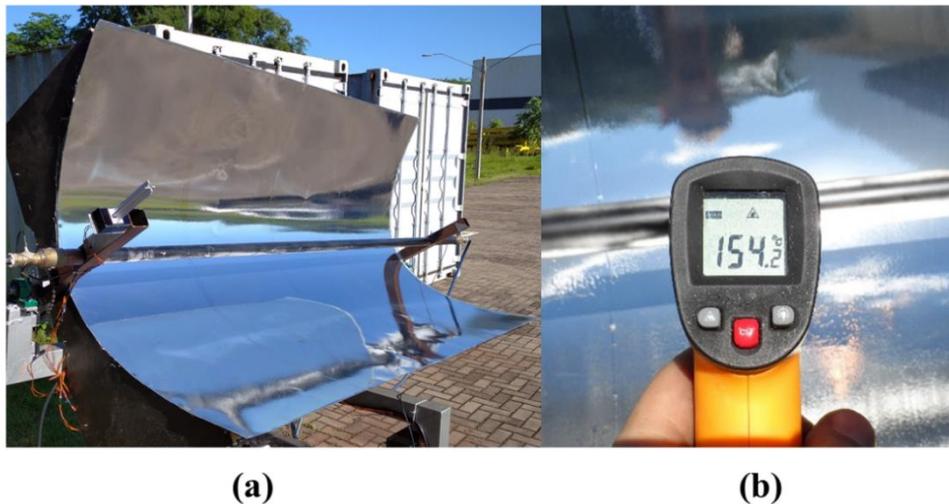
$$\epsilon C_p = \frac{\partial C_p}{\partial T_m} \epsilon \Delta T \quad (38)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONDIÇÕES DE ENSAIO E DESEMPENHO DO COLETOR

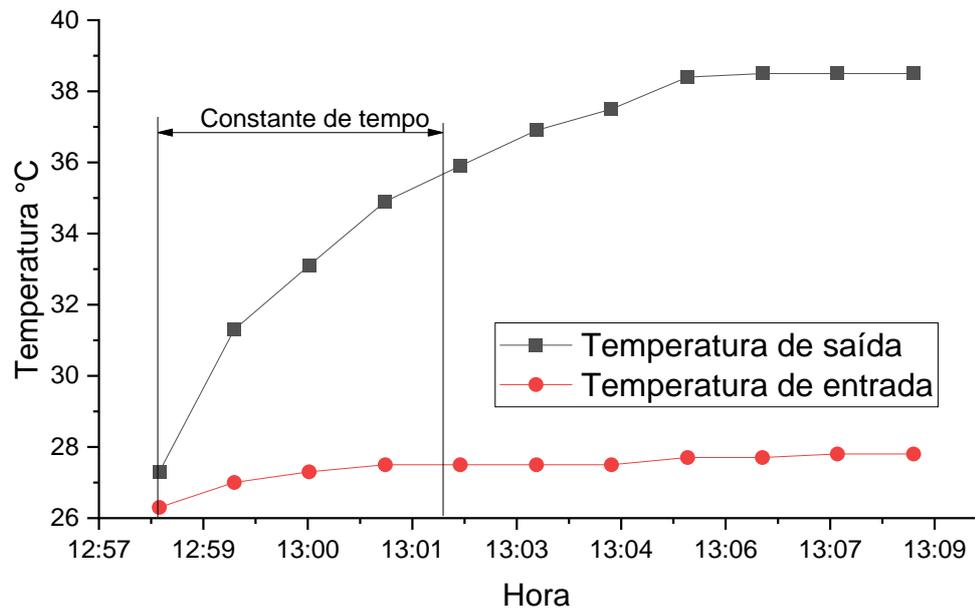
Antes do início dos ensaios funcionais procurou-se estabelecer os parâmetros máximos de funcionamento do CSCP construído. Assim foram executados dois ensaios práticos a fim de determinar dois limites operacionais. No primeiro ensaio determinou-se a máxima e a mínima vazão possível para o circuito hidráulico, desta forma, foi realizado um único ensaio com duração de 15 min, onde a vazão máxima e mínima medida foi de 0,10 Kg/s à 0,016 Kg/s respectivamente. O outro ensaio foi relacionado à temperatura máxima de operação, para este ensaio o tubo absorvedor foi esvaziado e a calha foi exposta ao sol entre 14:00 e 16:00, com temperatura ambiente a 34°C, e velocidade do vento menor que 0,5m/s, nesta condição a temperatura máxima sob a superfície do tubo absorvedor foi de 154,2 °C, ver Figura 32, para a medição desta temperatura, foi utilizado um termômetro por infravermelho, com precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ para medições até 2 metros de distância.

Figura 32: Temperatura máxima atingida com o tubo “ao vazio”.

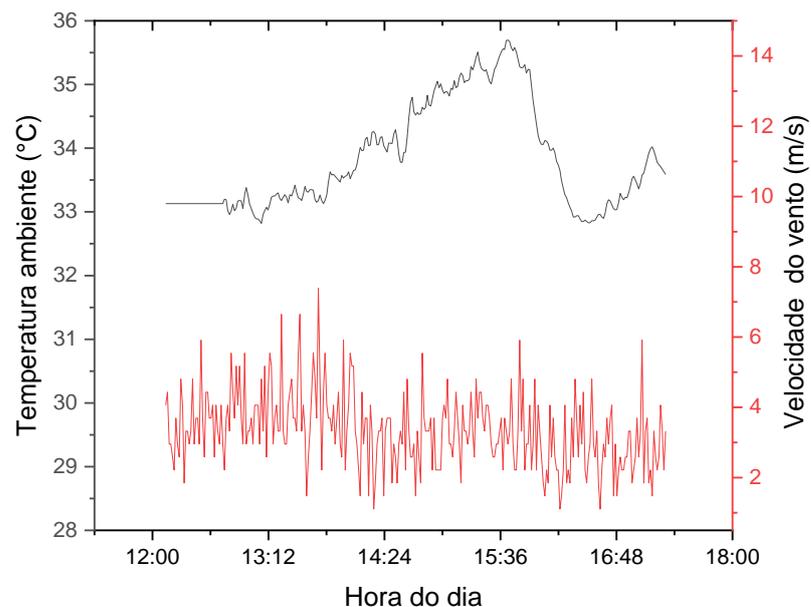


Fonte: do Autor

Posteriormente foi determinado a constante de tempo do coletor conforme descrito por (KALOGIROU, 2014). Aplicando a equação (11) nos dados da Figura 33, foi estabelecido que tempo necessário para o aquecimento do coletor proposto foi de 4,5 minutos, atingindo assim 63,2% da variação de temperatura entre o início do ensaio e a estabilização da temperatura de saída. A determinação deste tempo é importante pois estabelece um tempo mínimo de ensaio para que o coletor alcance um equilíbrio térmico.

Figura 33: Avaliação do tempo de aquecimento do coletor

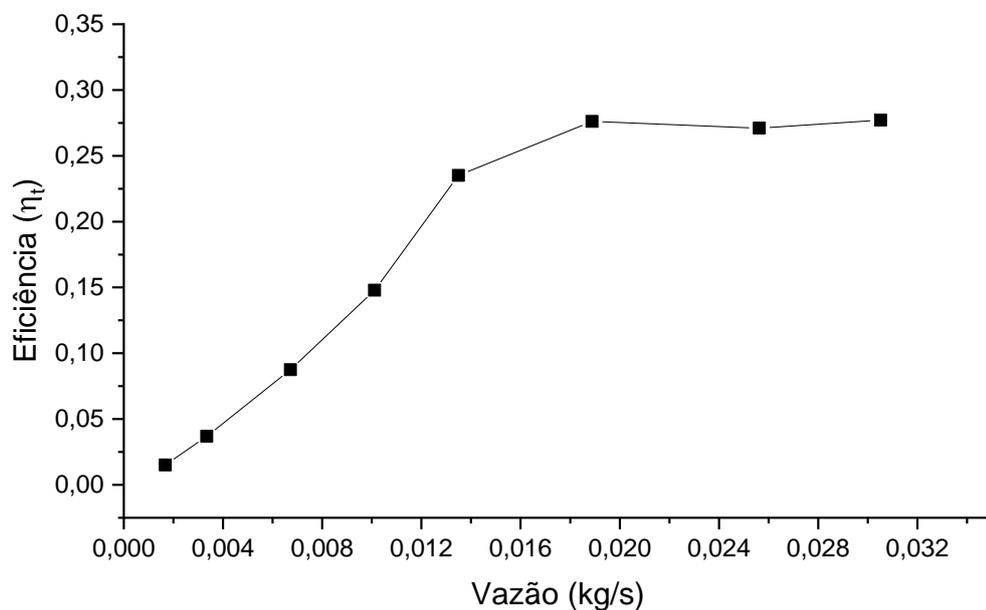
As condições de temperatura e velocidade do vento registradas no dia 13 de outubro de 2021, são apresentadas na Figura 34, este dia foi escolhido para representar o clima que predominou nos dias de ensaio. Assim, é possível notar uma baixa amplitude térmica com a temperatura média de 34,3°C, é a grande amplitude na velocidade do vento, indicando que o mesmo ocorre em rajadas.

Figura 34: Temperatura ambiente e velocidade do vento no dia do ensaio.

4.2 DESEMPENHO TÉRMICO

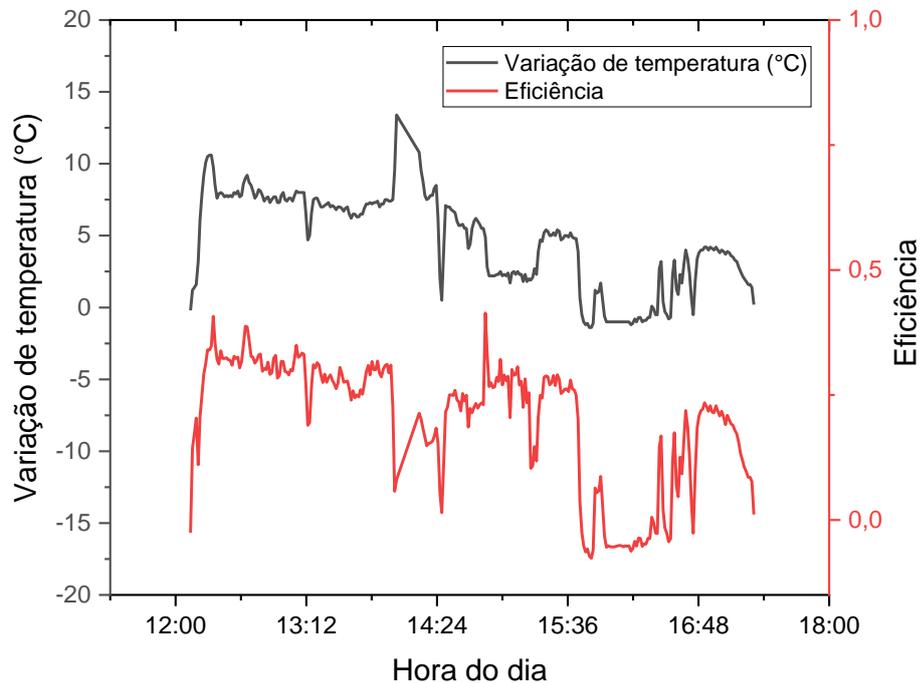
A eficiência do coletor foi avaliada em função da vazão mássica, conforme mostra a Figura 35. O aumento da vazão mássica de forma gradativa, implica em um aumento na eficiência térmica, isso pode ser atribuído ao fato de que o aumento do número de Reynolds aumenta o coeficiente convectivo do FTC. Ainda, é possível observar uma tendência à estabilização da eficiência após a vazão mássica alcançar o valor de 0,020 Kg/s. Valor que se enquadra dentro do regime turbulento do escoamento (i.e. $Re > 4000$) (BARBOSA, MARTINS, *et al.*, 2020, ÇENGEL, CIMBALA, 2007).

Figura 35: Eficiência em função do fluxo de massa.

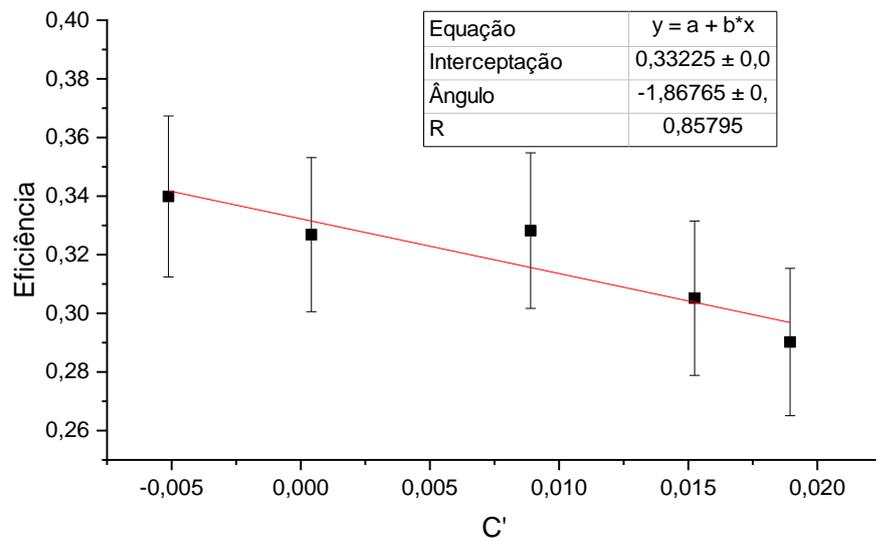


Uma das limitações deste projeto foi a falta de medições de radiação solar direta por meio de piranômetros. Motivo pela qual, foi utilizado um modelo, que apesar da boa precisão, não foi capaz de compensar as intempéries climáticas que afetam o funcionamento do coletor, como a nebulosidade. Assim, é possível notar no gráfico da Figura 36, uma dependência da eficiência em relação a variação de temperatura entre a entrada e a saída do coletor, sendo possível dizer que nos períodos onde a diferença de temperatura foi pequena ou até mesmo com uma tendência a zero, indica períodos onde houve sombreamentos do coletor.

Figura 36: Eficiência e variação de temperatura entre entrada e saída do coletor em função das horas do dia.



Para a determinação da eficiência em função da temperatura de entrada do fluido foi aplicada a metodologia proposta por Kalogirou (2014), que fornece uma equação de eficiência em função da relação entre temperatura de entrada, temperatura ambiente e radiação solar direta conforme descrito da equação (20). Pode-se assim observar na Figura 37 que a eficiência obtida por esse método para o coletor proposto segue a equação: $\eta = 0,332 - 1,868 c'$. Pode-se observar que existe uma perda de eficiência em função do aumento do parâmetro $c' = (T_e - T_a/I_b)$, ou seja com o aumento da temperatura de entrada há á uma redução da eficiência deste coletor, uma vez que a radiação solar foi considerada fixas em 905 W/m^2 seguindo a metodologia proposta por (DUFFIE, BECKMAN, 2013). Por fim o erro médio (ϵ_η) ficou em 0,039 e o erro máximo (ϵ_{max}) está em 0,042 sendo assim foi possível plotar o erro de cada medição no gráfico da Figura 37.

Figura 37: Eficiência do coletor em função da variação de temperatura C' 

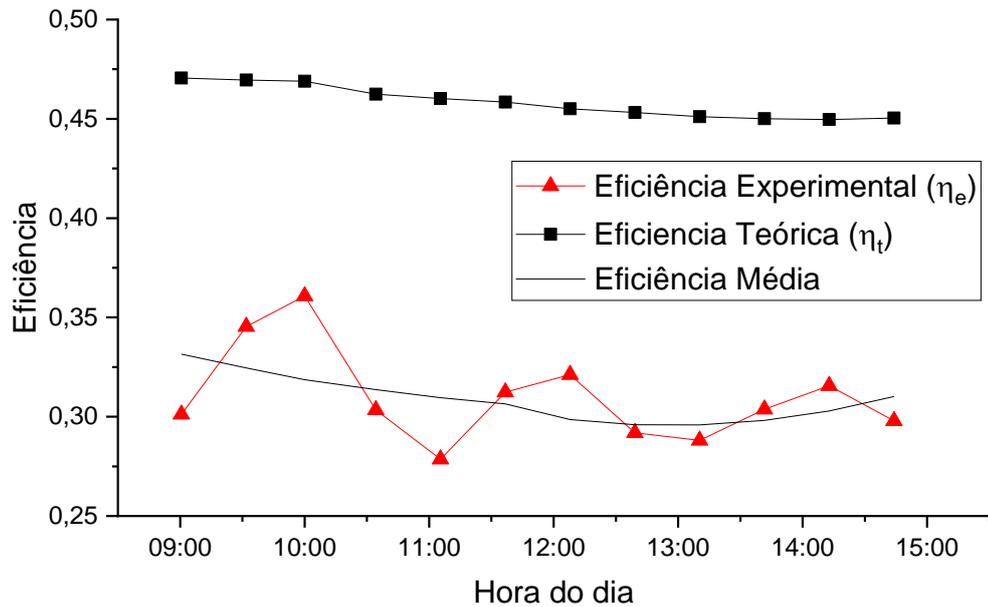
Assim também foi possível realizar uma comparação entre os modelos teóricos e experimental apresentados. O modelo teórico utiliza os dados de temperatura ambiente e de entrada do fluido, obtidos experimentalmente, a utilização dos dados de temperatura é necessária pois dá uma maior confiabilidade ao modelo matemático, conforme a equação (18). Com relação ao cálculo da eficiência experimental, equação (19), os dados de temperatura fluxo de massa foram obtidos experimentalmente, já a radiação solar incidente foi calculada conforme a metodologia apresentada. A diferença presente entre os modelos teórico e experimental deve-se principalmente ao fato do sistema apresentar perdas térmicas e óticas não previstas no modelo teórico, no entanto pode se notar a correlação entre a eficiência teórica e a média da eficiência experimental, sendo 45% e 31% respectivamente.

A eficiência do coletor pode ser comparada na Tabela 7 com sistemas semelhantes aos encontrados na literatura.

Tabela 7: Comparação de rendimento térmico entre diferentes coletores.

Autor	Eficiência	Característica básica
Torres (2020)	52,38 % (max)	Refletor de alumínio polido e tubo de cobre sem envelope de vidro;
Coccia (2015)	65,00 (max)	Refletor de aço inoxidável, tubo de alumínio com envelope de vidro não evacuado;
Jaramillo (2013)	67,00 % (max)	Refletor em película refletiva e tubo em cobre com envelope de vidro;
Coletor proposto	36,5% (max)	Refletor em película refletiva e tubo em cobre sem cobertura;

Fonte: Do autor

Figura 38: Comparação entre a eficiência teórica e experimental

4.3 DESEMPENHO ÓTICO

A parcela ótica do coletor é composta essencialmente da superfície refletiva e do tubo coletor, estes componentes devem permanecer alinhados perpendicularmente com a direção da radiação solar e o sistema de rastreamento é o responsável por manter esse alinhamento (DUFFIE, BECKMAN, 2013, KONG, ZHANG, *et al.*, 2020). Durante os ensaios observou-se que apesar de ser um sistema simples e construído com materiais alternativos houve uma boa precisão de rastreamento e o erro máximo observado ficou menor que 1° . Conforme a metodologia apresentada é possível obter a eficiência ótica de maneira experimental, utilizando-se da equação (20) ou ainda de maneira analítica com a equação (12). No entanto, conforme a Tabela 8, onde tem-se um resumo das propriedades óticas avaliadas, a eficiência ótica calculada, tendo como base os dados experimentais, está abaixo da eficiência calculada de maneira analítica.

Levando em consideração a eficiência ótica obtida experimentalmente e aplicando esse valor a equação (39) tem-se um novo valor do fator de interceptação (γ) que fica em 0,52.

$$\gamma = \frac{\eta_0}{\rho\tau\lambda[(1 - A_f \tan(\theta) \cos(\theta))]} \quad (39)$$

Tabela 8: Resumo das propriedades óticas do CSCP proposto

Parâmetro do CSCP proposto	Medida	Observação
Refletância da superfície (ρ)	0,95	Dados fabricante
Fator de absorção do tubo (λ)	0,9	Kalogirou (2004)
Fator de interceptação (γ)	0,7	Equação (17)
Fator geométrico (A_f)	11,11	Equação (15)
Ângulo de incidência (θ)	0	Eficiência máxima equação (14)
Eficiência ótica teórica (η_0)	0,59	Equação (12)
Eficiência ótica experimental	0,45	Equação (20)

Fonte: Do autor

O possível fator responsável pela baixa eficiência ótica do coletor, pode estar relacionada com a rugosidade da superfície refletiva, ver Figura 39 (a), pois ela compõe uma parcela dos erros que afetam a eficiência ótica, assim a imagem refletida pela superfície fica difusa, Figura 39(b), (RABL, 1985).

Figura 39: Rugosidade da calha, (a) Foto mostrando a difusidade refletida na calha; (b) efeito dessa difusidade,



Fonte: Adaptado de (RABL, 1985).

4.4 ANÁLISE DE CUSTO

Com o objetivo de fabricar um coletor de baixo custo, foi determinado que preferencialmente seriam utilizados materiais alternativos e de ampla distribuição. Essa escolha facilitou a construção do coletor. E a utilização de materiais alternativos aos convencionais auxiliaram na redução do custo de fabricação, como por exemplo o uso de filme refletivo como elemento refletor e a utilização de madeira na fabricação do perfil parabólico. Na Tabela 9,

encontra-se listados os materiais utilizados para a fabricação do coletor proposto, não foram considerados os custos referentes ao tempo e a mão de obra gastos para a execução do projeto.

Tabela 9: Custo por componente do coletor.

Descrição	Quantidade	Valor em R\$
Barra de aço quadrado de 50mm	2	150,00
Barra de aço quadrada de 70mm	1	90,00
Cantoneira tipo mão francesa de 40x30	8	80,00
Barra chata de 5mm X15mm	1	15,00
Mancais de rolamento para eixos de 20mm	4	100,00
Rodízios giratórios para 50 kg de carga	4	60,00
Tubo de cobre tipo E Ø 42mm.	1	250,00
Chapa de aço galvanizado de 1,2 X 2,0 m	1	100,00
Adesivo refletivo 1,5 X 0,5 metros 5%	4	180,00
Motor elétrico 12v	2	30,00
Barra roscada 1/2"	1	25,00
Caixa redutora redução de 1/32	1	150,00
Bomba de circulação	1	250,00
Sensor de temperatura DS18B20	2	50,00
Sensor de fluxo YF-S201	1	45,00
LDR (Light Dependent Resistor)	4	2,00
Arduino® uno R3	2	80,00
Shield RTC com SD card	1	25,00
Módulo de reles de 5v com 4 reles	1	40,00
TOTAL		1722,00

Fonte: Do autor

Para avaliar o custo efetivo do coletor, o mesmo foi submetido à metodologia proposta por (FATHABADI, 2020), quem avaliou o custo do coletor em função da potência em Watts gerada, assim com uma potência média de 600w e com um custo total de R\$ 1722,00 o coletor ficou com um custo de 2,87 R\$/Watts, conforme Tabela 10.

Tabela 10: Comparação de custo com diferentes autores

Autor	Custo em R\$/Watts	Custo na moeda publicada no artigo
Coletor proposto	2,87	2,87 R\$/Watt
(FATHABADI, 2020)	2,51	0,4464 Euro/Watt
(TORRES, Hugo M., CARRILLO, <i>et al.</i> , 2020)	0,55	0,1024 Dollar/Watt

Fonte: Do autor Cotação
Dollar no dia 01/05/2022 R\$ 5,05.

É possível estimar que o coletor proposto ficou mais caro devido à baixa eficiência obtida, deixando o custo por Watt produzido mais elevado, outro ponto é a diferença no preço e a lista dos materiais necessários, nos artigos comparados, a lista de equipamentos não contemplam alguns itens necessários como barras de aço e a bomba de circulação.

5 CONCLUSÃO

O coletor proposto teve um tempo de aquecimento relativamente curto, possibilitando que diferentes ensaios sejam realizados em um curto espaço de tempo.

Para o coletor proposto obteve-se uma eficiência térmica abaixo da eficiência encontrada em coletores similares. E pode se atribuir essa diferença principalmente a duas características do coletor, a primeira é pela falta do envelope de vidro sobre o tubo coletor, que proporciona uma maior perda térmica por convecção, e essa perda está diretamente relacionada as condições ambientais, tais como, velocidade do vento e temperatura ambiente. A segunda condição que pode prejudicar a eficiência térmica é o tipo de revestimento utilizado no tubo absorvedor que apresenta uma alta emissividade, permitindo que uma parcela do calor absorvido se perca em forma de radiação térmica. Portanto, para evoluções futuras, recomenda-se a utilização de um envelope de vidro evacuado ao redor do tubo absorvedor (de forma concêntrica) e a utilização de uma cobertura seletiva para melhora do rendimento do CSCP (BELLAS, LIDORIKIS, 2017)

No caso da eficiência ótica, a mesma apresenta valores abaixo do esperado, quando comparado a sistemas similares, isso pode ser ao fato da superfície refletiva ser parcialmente difusa, devido à rugosidade da chapa de aço utilizada como base, aumentando em aproximadamente 25% o erro de formação da imagem no sistema. As demais variáveis como a precisão geométrica construtiva e o sistema de rastreamento solar, apresentaram um bom desempenho.

O modelo aplicado na parte analítica leva em consideração os parâmetros calculados com a equação da eficiência obtida de forma experimental, assim o erro entre os valores encontrados se deve principalmente ao fato de não possuir dados reais da radiação solar direta, e pela grande distribuição dos valores de eficiência em função da temperatura de entrada, o que torna a relação linear obtida menos precisa, contribuindo para o aumento deste erro.

Com relação à aplicação didática, as características construtivas e o sistema de aquisição e visualização de dados, mostraram-se eficientes e de fácil utilização, possibilitando o uso do coletor com o mínimo de supervisão e com grande confiabilidade. Trazendo assim, de maneira simples a tecnologia de concentradores termosolares para um meio acadêmico, as melhorias a serem implementadas estão relacionadas a criação de procedimentos ou roteiros que facilitem a prática docente e a realização de experimentos futuros.

Como sugestão de trabalhos futuros é proposto uma análise da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), que pode ser realizada para visualização e quantificação da fluidodinâmica e perdas de transferência de calor, para efeitos de melhorias do projeto.

REFERENCIAS

- ABDULHAMED, A. J., ADAM, N. M., AB-KADIR, M. Z. A., *et al.* "**Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications**", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 822–831, 1 ago. 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.085. .
- ABED, N., AFGAN, I. "**An extensive review of various technologies for enhancing the thermal and optical performances of parabolic trough collectors**", *International Journal of Energy Research*, v. 44, n. 7, p. 5117–5164, 10 jun. 2020. DOI: 10.1002/er.5271. .
- ACHKARI, O., EL FADAR, A., AMLAL, I., *et al.* "**A new sun-tracking approach for energy saving**", *Renewable Energy*, v. 169, p. 820–835, maio 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.039. .
- AGAGNA, B., SMAILI, A., FALCOZ, Q., *et al.* "**Experimental and numerical study of parabolic trough solar collector of MicroSol-R tests platform**", *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 98, p. 251–266, 1 nov. 2018. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.06.001. .
- ASHLEY, T., CARRIZOSA, E., FERNÁNDEZ-CARA, E. "**Heliostat field cleaning scheduling for Solar Power Tower plants: A heuristic approach**", *Applied Energy*, v. 235, p. 653–660, 1 fev. 2019. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2018.11.004. .
- BARBOSA, E. G., MARTINS, M. A., VIANA DE ARAUJO, M. E., *et al.* "**Experimental evaluation of a stationary parabolic trough solar collector: Influence of the concentrator and heat transfer fluid**", *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 124174, dez. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124174. .
- BEHAR, O., KHELLAF, A., MOHAMMEDI, K. "**A novel parabolic trough solar collector model - Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES)**", *Energy Conversion and Management*, v. 106, p. 268–281, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.09.045.
- BELLAS, D. V., LIDORIKIS, E. "**Design of high-temperature solar-selective coatings for application in solar collectors**", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 170, p. 102–113, 2017. DOI: 10.1016/j.solmat.2017.05.056.
- BEN. **Matriz energética brasileira.** 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 10 maio 2022.
- BERGMAN, T. L., INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., *et al.* **Fundamentals of heat and mass transfer.** [S.l.], John Wiley & Sons, 2011.
- BITAM, E. W., DEMAGH, Y., HACHICHA, A. A., *et al.* "**Numerical investigation of a novel**

- sinusoidal tube receiver for parabolic trough technology**", *Applied Energy*, v. 218, p. 494–510, 15 maio 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.177. .
- BOJEK, P., BAHAR, H. **Concentrated Solar Power (CSP)**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/concentrated-solar-power-csp>. Acesso em: 8 mar. 2022.
- ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações**. São Paulo SP, McGrawHill, 2007.
- CHEVAPRUK, T., CHOMCHAROEN, N., TECHAPIESANCHAROENKIJ, R., *et al.* "Solution-based Ni-Al₂O₃ Solar Selective Coating using Convective Deposition", **Materials Today: Proceedings**, v. 23, n. December 2018, p. 745–751, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.268. .
- COCCIA, G., DI NICOLA, G., SOTTE, M. "**Design, manufacture, and test of a prototype for a parabolic trough collector for industrial process heat**", *Renewable Energy*, From Duplicate 2 (Design, manufacture, and test of a prototype for a parabolic trough collector for industrial process heat - Coccia, G; Di Nicola, G; Sotte, M) v. 74, p. 727–736, fev. 2015. DOI: 10.1016/j.renene.2014.08.077.
- DALLE, J., TAMJIDI, M., YUSIRWAN SYAFRUDDIN, S. "**Implementation of Water Debit Measurement Using Microcontroller-Connected Flow Meters**", *TEM Journal*, v. 9, n. 4, p. 1467–1474, 2020. DOI: 10.18421/TEM94-19. .
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- FATHABADI, H. "**Novel low-cost parabolic trough solar collector with TPCT heat pipe and solar tracker: Performance and comparing with commercial flat-plate and evacuated tube solar collectors**", *Solar Energy*, v. 195, p. 210–222, 1 jan. 2020. DOI: 10.1016/j.solener.2019.11.057.
- FERREIRA, A., KUNH, S. S., FAGNANI, K. C., *et al.* "**Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil**", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, n. February 2017, p. 181–191, jan. 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.102. .
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O. "**Energias renováveis: um futuro sustentável**", *Revista USP*, n. 72, p. 6, 1 fev. 2007. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i72p6-15. .
- GÜVEN, H. M., BANNEROT, R. B. "**Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs**", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, v. 108, n. 4, p. 275–281, 1986. DOI: 10.1115/1.3268106.
- HOTTEL, H. C. "**A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres**", *Solar Energy*, v. 18, n. 2, p. 129–134, 1 jan. 1976. DOI:

10.1016/0038-092X(76)90045-1.

IBGE, I. B. de G. e E. **ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2022. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 1 fev. 2022.

IPCC, E. **Climate Change-Mitigation of Climate Change**. 2022. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf. Acesso em: 8 mar. 2022.

JARAMILLO, O. A., VENEGAS-REYES, E., AGUILAR, J. O., *et al.* "**Parabolic trough concentrators for low enthalpy processes**", *Renewable Energy*, v. 60, p. 529–539, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2013.04.019.

JEBASINGH, V. K., HERBERT, G. M. J. "**A review of solar parabolic trough collector**", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 1085–1091, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.043.

KABIR, E., KUMAR, P., KUMAR, S., *et al.* "**Solar energy: Potential and future prospects**", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 894–900, 1 fev. 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.094.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering Processes and Systems**. 2. ed. San Diego, Elsevier Inc, 2014.

KALOGIROU, S. A. "**Solar thermal collectors and applications**", *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004. DOI: 10.1016/j.pecs.2004.02.001.

KALOGIROU, S. A., LLOYD, S., WARD, J., *et al.* "**Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system**", *Applied Energy*, v. 47, n. 4, p. 341–354, 1994. DOI: 10.1016/0306-2619(94)90041-8.

KONG, L., ZHANG, Y., LIN, Z., *et al.* "**Optimal design of the solar tracking system of parabolic trough concentrating collectors**", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 15, n. 4, p. 613–619, 18 nov. 2020. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa065.

LIU, P., LV, J., SHAN, F., *et al.* "**Effects of rib arrangements on the performance of a parabolic trough receiver with ribbed absorber tube**", *Applied Thermal Engineering*, v. 156, n. January, p. 1–13, 2019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.037.

MUNANGA, P., CHINGUWA, S., NYEMBA, W. R. "**Design for manufacture and assembly of an intelligent single axis solar tracking system**", *Procedia CIRP*, v. 91, p. 571–576, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.109.

NASA, editor. **Global Climate Change – Vital Signs of the Planet**. 2022. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/>. Acesso em: 8 jan. 2022.

OLIVEIRA FILHO, K. de S., OLIVEIRA, M. de F. **Astronomia e Astrofísica**. 2019.

Astronomia e Astrofísica. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/livro.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2019.

PAGANI, R. N., KOVALESKI, J. L., RESENDE, L. M. "**Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication**", *Scientometrics*, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 12 dez. 2015. DOI: 10.1007/s11192-015-1744-x. .

PENA, R. F. A. **Fontes renováveis de energia**. 2022. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/fontes-renovaveis-energia.htm>. Acesso em: 8 mar. 2022.

QAZI, S. **Solar Thermal Electricity and Solar Insolation**. [S.l: s.n.], 2017.

RABL, A. **Active Solar Collectors and Their Applications**. New York, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1985.

SAMPAIO, P. G. V., GONZÁLEZ, M. O. A. "**Photovoltaic solar energy: Conceptual framework**", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, p. 590–601, 1 jul. 2017. DOI: 10.1016/J.RSER.2017.02.081.

SOLTANI, S., BONYADI, M., MADADI AVARGANI, V. "**A novel optical-thermal modeling of a parabolic dish collector with a helically baffled cylindrical cavity receiver**", *Energy*, v. 168, p. 88–98, 1 fev. 2019. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.11.097.

SUMAN, S., KHAN, M. K., PATHAK, M. "**Performance enhancement of solar collectors - A review**", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 192–210, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.087. .

SUMATHI, S., ASHOK KUMAR, L., SUREKHA, P. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems**. Cham, Springer International Publishing, 2015. (Green Energy and Technology).

TAHJIB, A., TANZIN, H., AZIM, H., *et al.* "**Design and Implementation of Parabolic Trough Solar Thermal Collector**". 2020. *Anais [...]* [S.l: s.n.], 2020. p. 670–673. DOI: 10.1109/TENSYMP50017.2020.9230854.

TEXIUS, F. **Feeburg-Texius**. 2012. Disponível em: <http://texius.blogspot.com/2012/09/tbhgf-220w.html>. Acesso em: 20 mar. 2020.

THARAMUTTAM, J. K., NG, A. K. "**Design and Development of an Automatic Solar Tracker**", *Energy Procedia*, v. 143, p. 629–634, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.738. .

TORRES, H M, CARRILLO, R. A. M., TORRES, N. M. "**Design and construction of an experimental parabolic trough collector using low cost alternative materials**". 2303, 2020. *Anais [...]* [S.l: s.n.], 2020. DOI: 10.1063/5.0029496.

- TORRES, Hugo M., CARRILLO, R. A. M., TORRES, N. M. "**Design and construction of an experimental parabolic trough collector using low cost alternative materials**", AIP Conference Proceedings, v. 2303, n. December, 2020. DOI: 10.1063/5.0029496.
- UPADHYAY, B. H., PATEL, A. J., RAMANA, P. V. "**A detailed review on solar parabolic trough collector**", International Journal of Ambient Energy, p. 1–21, 3 jul. 2019. DOI: 10.1080/01430750.2019.1636869.
- UPADHYAY, B. H., PATEL, A. J., SADASIVUNI, K. K., *et al.* "**Design, development and techno economic analysis of novel parabolic trough collector for low-temperature water heating applications**", Case Studies in Thermal Engineering, v. 26, n. March, p. 100978, 2021. DOI: 10.1016/j.csite.2021.100978.
- VILAÇA GOMES, P., KNAK NETO, N., CARVALHO, L., *et al.* "**Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues**", Energy Policy, v. 115, n. January, p. 199–206, abr. 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.01.014.
- WAGNER, W., KRETZSCHMAR, H.-J. **International Steam Tables-Properties of Water and Steam based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97: Tables, Algorithms, Diagrams, and CD-ROM Electronic Steam Tables-All of the equations of IAPWS-IF97 including a complete set of supplementary backward**. [S.l.], Springer Science & Business Media, 2007.
- WEINSTEIN, L. A., LOOMIS, J., BHATIA, B., *et al.* "**Concentrating Solar Power**", Chemical Reviews, v. 115, n. 23, p. 12797–12838, 2015. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00397.
- ZHANG, S., LUO, S., DUAN, Y., *et al.* "**Optical Design and Efficiency Analysis of A New Medium Temperature Parabolic Trough Collector**". 16 out. 2020. *Anais [...]* [S.l.], IEEE, 16 out. 2020. p. 1–2. DOI: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276053.