

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPARATIVA EXPERIMENTAL DE UM COLETOR SOLAR
TUBULAR DO TIPO *HEAT-PIPE* COM UM DO TIPO *WATER-IN-GLASS*

por

Humberto Alejandro Rolon Ortiz

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2020

ANÁLISE COMPARATIVA EXPERIMENTAL DE UM COLETOR SOLAR
TUBULAR DO TIPO *HEAT-PIPE* COM UM DO TIPO *WATER-IN-GLASS*

por

Humberto Alejandro Rolon Ortiz
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof. Dr.^a. Adriane Prisco Petry: PROMEC / UFRGS

Prof. Dr.^a. Letícia Jenisch Rodrigues: DEMEC / UFRGS

Prof. Dr.^a Rejane De Césaró Oliveski: PPG em Eng. Mecânica / UNISINOS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 Março de 2020

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arno Krenzinger na orientação deste trabalho, pela disposição, pelo conhecimento me passado.

A minha mãe pela boa educação, carinho, amor, pensando na minha melhor formação como pessoa.

Aos meus amigos que também me apoiaram durante essa caminhada com muito companheirismo, carinho e paciência.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

Agradeço também aos gigantes donos dos ombros nos quais me apoiei.

RESUMO

O aquecimento de água ocupa um lugar importante na utilização da energia solar. O mercado mundial de coletores solares se multiplicou ano após ano. Os coletores de tubos evacuados, objeto de estudo neste trabalho, são equipamentos que trabalham através de tubos de vidro concêntricos com vácuo entre os dois, sendo o interno revestido com uma camada absorvedora. O vácuo reduz drasticamente as perdas por convecção e a superfície seletiva é responsável por absorver a radiação eletromagnética no espectro solar e por evitar perdas por radiação ao ambiente. Os coletores de tubos evacuados são fabricados em várias configurações. Entre elas estão a de contato direto (também conhecido como coletor de tubo preenchido ou *water-in-glass*) e as de contato indireto (tubo de calor ou *heat-pipe*). A primeira configuração é a mais simples que pode ser encontrada. Nela os tubos são preenchidos diretamente com o fluido de trabalho e aproveitam o mecanismo de termossifão para movimentar o fluido. Já o tipo *heat-pipe* usa um tubo de cobre com um fluido em seu interior. A troca de fase deste fluido transfere a energia para um pequeno condensador submerso no fluido de trabalho. Para a realização desta pesquisa, foi necessária a montagem e instrumentação de uma bancada de testes com dois coletores; um tipo *heat-pipe* e outro tipo *water-in-glass*. Os dois são montados em série a fim de garantir que a vazão de água fosse a mesma durante o experimento. Da mesma forma, os dois coletores são instalados no mesmo plano para que recebessem a mesma radiação. Para monitorar a quantidade de energia absorvida pelos coletores são instalados sensores de temperatura (PT 100) nas entradas e saídas dos coletores. Também são instalados sensores para medir a temperatura ambiente, temperatura da água no reservatório e para registrar a irradiância global incidente no plano dos coletores. Os resultados mostraram que o coletor *heat-pipe* apresenta um desempenho superior ao coletor *water-in-glass* em dias de céu limpo, produzindo até 20% a mais de energia em média. Por outro lado, o coletor de contato direto demonstrou comportar-se melhor em dias parcialmente nublados.

Palavras-chave: Coletor solar; *Heat-pipe*; *Water-in-glass*; Energia térmica; Tubo evacuado.

ABSTRACT

Water heating plays an important role in the use of solar energy. The global market for solar collectors has multiplied over the years. Evacuated tube collectors, the object of study in this work, are equipment that employ concentric glass tubes with vacuum between them. The inner tube is coated with a selective absorber layer. The vacuum reduces dramatically the convection losses and the selective surface absorbs electromagnetic radiation in the solar spectrum and minimizes radiation losses to the environment. Evacuated tube collectors are manufactured in various configurations. Direct contact collectors, also known as water-in-glass, present the simplest possible configuration. The tubes are filled directly with the working fluid, employing the thermosyphon mechanism to move the fluid. Other common configuration is the indirect contact or heat-pipe collectors, which uses a copper tube containing a phase changing fluid that evaporates and transfers energy to a condenser submersed in the work fluid. To perform this research it was necessary to assemble an instrumented bench consisting in two solar water collectors (one heat-pipe type and the other a water-in-glass type). Both were mounted in series in order to guarantee the same flow through them. They were also tilted at the same angle and pointed to the same direction so they receive equal radiation. The temperatures at the inlets and outlets of the collectors, the ambient air temperature and the water temperature inside the thermal tank were sensed by thermoresistors (PT100). The irradiance on the plane of the collectors was monitored with a thermal pyranometer. Tests were conducted to analyze the daily performance under diverse environmental conditions. The results indicated that, in clear days, the heat-pipe collector presented efficiencies up to 20% superior when compared to the water-in-glass collector. In the other hand, the water-in-glass collector performed better on days with intermittent sunny/cloudy intervals.

Keywords: Solar collector; Heat-pipe; Water-in-glass; Thermal solar energy; Evacuated tube.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Estado da Arte	3
1.2	Objetivos	5
2	SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR RADIAÇÃO SOLAR	7
2.1	Classificação de Coletores Solares	7
2.1.1	Coletores Sem Cobertura	7
2.1.2	Aquecedores de Placa Plana	7
2.1.3	Coletor Solar de Tubo de Vidro Evacuado	8
2.1.4	Comparativo <i>Heat-pipe</i> vs <i>Water-in-glass</i>	12
2.1.5	Componentes Básicos de Coletores Solares	13
3	MONTAGEM EXPERIMENTAL	17
3.1	Medição da Radiação	17
3.2	Medição da vazão	19
3.3	Medição da Temperatura	20
3.4	Tubulações	22
3.5	Sistema de Aquisição de Dados	23
3.6	Determinação da Incerteza	24
4	MODELO DE ESTUDO DE COLETORES SOLARES	26
4.1	Modelo Simplificado do Coletor	26
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	28
5.1	Análise das Características Ópticas dos Tubos	28
5.1.1	Procedimento Experimental	29
5.2	Cálculo da Constante de Tempo do Coletor	31
5.2.1	Procedimento Experimental	31
5.3	Ensaio Externo de Eficiência em Regime Permanente	34

5.3.1	Procedimento Experimental	34
5.4	Ensaio da Influência da Pasta Térmica em Coletores <i>heat-pipe</i>	35
6	RESULTADOS	37
6.1	Ensaio em Dia com Nebulosidade	43
7	CONCLUSÕES	44
7.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Capacidade instalada de equipamentos de conversão térmica da energia solar em operação e produção anual de energia de 2000 a 2018 [Adaptado de Weiss e Spörk-dur, 2019]	1
Figura 1.2	Distribuição da capacidade instalada de coletores solares ao nível mundial pelo tipo deles. [Adaptado de: Weiss e Spörk-dur, 2019]	2
Figura 1.3	Distribuição da capacidade instalada de coletores solares por tipo dele:(a) mundial e (b) Brasil [Adaptado de Weiss e Spörk-dur, 2019]	3
Figura 2.1	Aquecedor de água para piscina. [Adaptado de Prolazerdf, 2019] .	8
Figura 2.2	Coletor de placa plana. [Adaptado de Hudon, 2014]	8
Figura 2.3	Desenho esquemático de um tubo a vácuo. [Adaptado de Zhiqiang, 2005]	9
Figura 2.4	Resposta espectral da camada de SS/Mo/Al ₂ O ₃ . [Adaptado de Gao et al., 2016]	9
Figura 2.5	Dimensões tubos de vidro evacuados. [Adaptado de Manea, 2012] .	10
Figura 2.6	Extração de calor do tipo transferência direta. [Adaptado de Morrison et al., 2004.]	11
Figura 2.7	Detalhe do ciclo de trabalho heat pipe. [Adaptado de Apricus, 2019]	12
Figura 2.8	Componentes de coletor de tipo heat pipe. [Adaptado de Hudon, 2014]	13
Figura 2.9	Disposições da fonte auxiliar de energia em sistemas passivos. [Adaptado de Manea, 2012]	15
Figura 2.10	a) Sistema de aquecimento passivo b) sistema de aquecimento ativo. [Adaptado de Duffie e Beckman, 2013]	16
Figura 3.1	Componentes e sensores da bancada experimental.	18
Figura 3.2	Vista detalhada da montagem.	18

Figura 3.3	Medidor de vazão de boia (rotâmetro) de área variável: esquema de operação (esq) e montagem do instrumento (dir). [Adaptado de Schneider, 2011]	19
Figura 3.4	Detalhe da instalação do PT100 encapsulado em aço. [Adaptado de Naranjo Toro et al., 2015]	21
Figura 3.5	Detalhe do encasulamento do PT100 com lâmina de cobre.	21
Figura 3.6	Lauda modelo ECO GOLD RE 206.	21
Figura 3.7	Curva de calibração e pontos medidos para o sensor de Temperatura ponto 9	22
Figura 3.8	Corte tubulação isolada.	23
Figura 3.9	<i>Data-logger</i> Agilent 34970A.	23
Figura 3.10	Esquema de aquisição de dados	24
Figura 4.1	fluxos de energia num coletor	26
Figura 4.2	Área de abertura coletor solar de tubos a vácuo. [Adaptado de ASHRAE, 2003]	27
Figura 5.1	Bancada utilizada para a avaliação das propriedades.	29
Figura 5.2	Diferença de temperatura entre a entrada e saída de ambos coletores, no primeiro dia de ensaio	30
Figura 5.3	Diferença de temperatura entre a entrada e saída de ambos coletores, no segundo dia de ensaio	31
Figura 5.4	Constante de tempo do coletor. [Adaptado de ABNT, 2009]	32
Figura 5.5	Variação da diferença de temperatura ao longo do tempo do coletor de <i>heat-pipe</i>	33
Figura 5.6	Variação da diferença de temperatura ao longo do tempo do coletor de <i>Water-in-glass</i>	33
Figura 5.7	Bancada utilizada para a avaliação das propriedades.	35
Figura 5.8	Influência da pasta térmica no coletor solar <i>heat-pipe</i>	36
Figura 6.1	Razão entre a potência térmica convertida no colector <i>heat-pipe</i> e <i>water-in-glass</i> no dia 24 de setembro	38
Figura 6.2	Evolução da entrega de potência térmica ao longo do um dia de ensaio, dia 24 de setembro.	38

Figura 6.3	Evolução da eficiência instantânea ao longo do um dia de ensaio, dia 24 de setembro.	40
Figura 6.4	Razão entre a potência térmica convertida no colector <i>heat-pipe</i> e <i>water-in-glass</i> em dia 28 de novembro 2019	40
Figura 6.5	Evolução da potência térmica convertida ao longo do um dia de ensaio em dia 28 de novembro	41
Figura 6.6	Razão entre a potência térmica convertida no coletor <i>heat-pipe</i> e <i>water-in-glass</i> no dia 30 de setembro de 2019	42
Figura 6.7	Razão entre a potência térmica convertida no colector <i>heat-pipe</i> y <i>water-in-glass</i> em dia 11 de outubro 2019	42
Figura 6.8	Evolução da potência térmica convertida em cada coletor no dia 9 de outubro.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Resumo dos valores das incertezas de cada grandeza medida. . . .	25
Tabela 6.1	Resumo das condições ambientais nos dias de ensaio.	37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA	Aquecedor de ar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Aquecedor de placa plana
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i> Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado
ASV	Aquecedor sem vidro
ATE	Aquecedor de tubo evacuado
CPC	<i>Compound-parabolic-concentrator</i> concentrador parabólico composto
FPC	<i>Flat plate collector</i> aquecedor de placa plana
IEA	Agencia internacional de energia
PPR	Polipropileno Copolímero Random
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
SI	Sistema Internacional
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Area, m ²
Ay_b	Volume do elemento boiante, m ³
A_c	Area de abertura do coletor, m ²
C_p	Calor específico, kJ/kg-K
d	Diametro do tubo, m
\dot{E}_{sol}	Taxa de energia solar absorvida, W
F_a	Força de arrasto, N
FR	Fator de remoção do calor
FS	Fração Solar, adimensional
g	Constante da gravidade, m/s ²
G_t	Irradiância, W/m ²
L	Comprimento do tubo, m
\dot{m}	Vazão mássica, kg/s
N	Numero de tubos
Q_{acs}	Calor acumulado do sistema, kJ
Q_{ans}	Calor acumulado não solar, kJ
Q_{as}	Calor acumulado solar, kJ
Q_{par}	Calor parasita, kJ
Q_{res}	Calor acumulado no reservatório, kJ
\dot{Q}_e	Taxa de transferência de calor na entrada, W
\dot{Q}_s	Taxa de transferência de calor na saída, W
\dot{Q}_{perd}	Taxa de transferência de calor perdido, W
R	Resistividade, Ohm
R_0	Resistividade na temperatura T_0 , Ohm
T_0	Temperatura de referencia, °C
T	Temperatura, °C
T_a	Temperatura ambiente, °C
T_e	Temperatura na entrada, °C

T_m	Temperatura média, °C
T_s	Temperatura na saída, °C
t	Tempo, s
ΔT_s	Diferença de temperatura no reservatório, °C
ΔT_{hp}	Diferença de temperatura no coletor <i>heat-pipe</i> , °C
ΔT_{wig}	Diferença de temperatura no coletor <i>water-in-glass</i> , °C
U_L	Coefficiente global de transferência de calor, W/(m ² K).
W_A	Incerteza da curva ajuste de calibração
W_D	Incerteza de calibração do dispositivo ou sensor
W_G	Medida da grandeza
W_S	Incerteza do instrumento de aquisição de dados
w	Função para o cálculo da grandeza

Símbolos Gregos

α	Coefficiente de temperatura do condutor a 0 °C
η	Eficiência do coletor
ρ	Densidade mássica, kg/m ³
ρ_f	Densidade do fluido, kg/m ³
σ_w	Valor da incerteza propagada
$(\tau\alpha)$	Produto efetivo da transmitância absorvância

1 INTRODUÇÃO

O mercado da conversão térmica da energia solar no mundo tem aumentado ano após ano desde 2000, quando se tinha instalado 62 GW, até chegar em 2018, quando estavam em operação 480 GW, segundo os dados da Agência internacional de energia no relatório Solar Heat Worldwide 2018 publicado em 2019 pelo ministério austríaco de transporte inovação e tecnologia em associação com EIA [Weiss e Spörk-dur, 2019]. Além disso, essa produção poupou as emissões de CO_2 de 41,7 em 2000 para 134,7 milhões de toneladas em 2019. A Figura 1.1 mostra o crescimento da energia solar térmica desde 2000 até 2018, tanto na capacidade de potência em operação, quanto produção anual de energia.



Figura 1.1 – Capacidade instalada de equipamentos de conversão térmica da energia solar em operação e produção anual de energia de 2000 a 2018 [Adaptado de Weiss e Spörk-dur, 2019]

Dentro da matriz energética chamada de alternativa, a energia solar térmica para aquecimento (excluindo a solar térmica para produzir eletricidade) ocupa o terceiro lugar, superada pela eólica e fotovoltaica. Até 2017 ocupou o segundo lugar, sendo ela maior do que a solar fotovoltaica em capacidade instalada. Para 2018 a potência instalada foi 480 GW. Na Figura 1.2 percebe-se o lugar da solar térmica em relação às demais fontes.

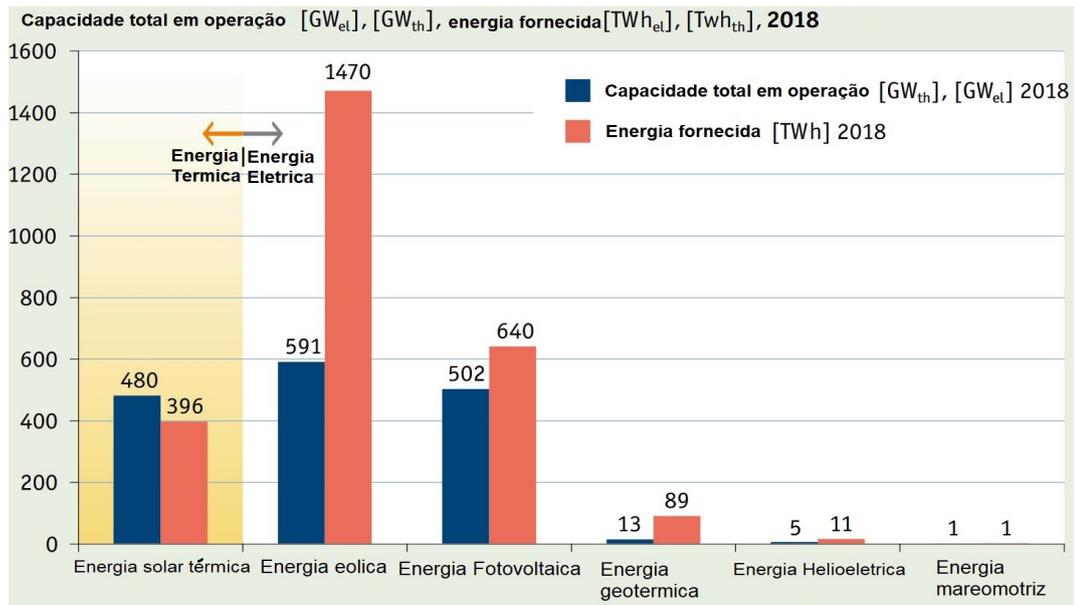


Figura 1.2 – Distribuição da capacidade instalada de coletores solares ao nível mundial pelo tipo deles. [Adaptado de: Weiss e Spörk-dur, 2019]

A quantidade de energia solar térmica produzida no Brasil coloca o país no quinto lugar em produção, com 9,7055 MWh segundo dados da IEA [Weiss e Spörk-dur, 2019]. No país, dentro da matriz de energia renovável, a solar térmica representa somente 0,6% da produção total, que fica ao redor de 5095 PJ [Bioenergy, 2019]. Há diversas tecnologias existentes para aquecimento de água, embora, de modo geral, elas sejam classificadas em 3 grupos: aquecedor de placa plana APP, de tubos evacuado ATE e aquecedores sem vidro ASV, além dos aquecedores de ar AA.

Como é mostrado na Figura 1.3 (a), em nível mundial a tendência do mercado de aquecedores é a instalação dos sistemas de tubo evacuado. Do total instalado de 480 GW 71% correspondem ao ATE. Segundo os dados publicados pela IEA, resumidos na Figura 1.3 (b), no Brasil acontece o contrário, onde uma parcela menor do que 1% é ocupada pelos ATE.

Os coletores de tubo evacuado no Brasil ainda não tem muita presença devido ao uso estendido de coletores planos, uma tecnologia bem conhecida e que tem bom rendimento em climas tropicais como os que se encontram no norte e nordeste do país. Para climas mais frios como aqueles apresentados na região sul, os aquecedores de tubo evacuado poderiam ter melhor rendimento [Ayompe et al., 2011].

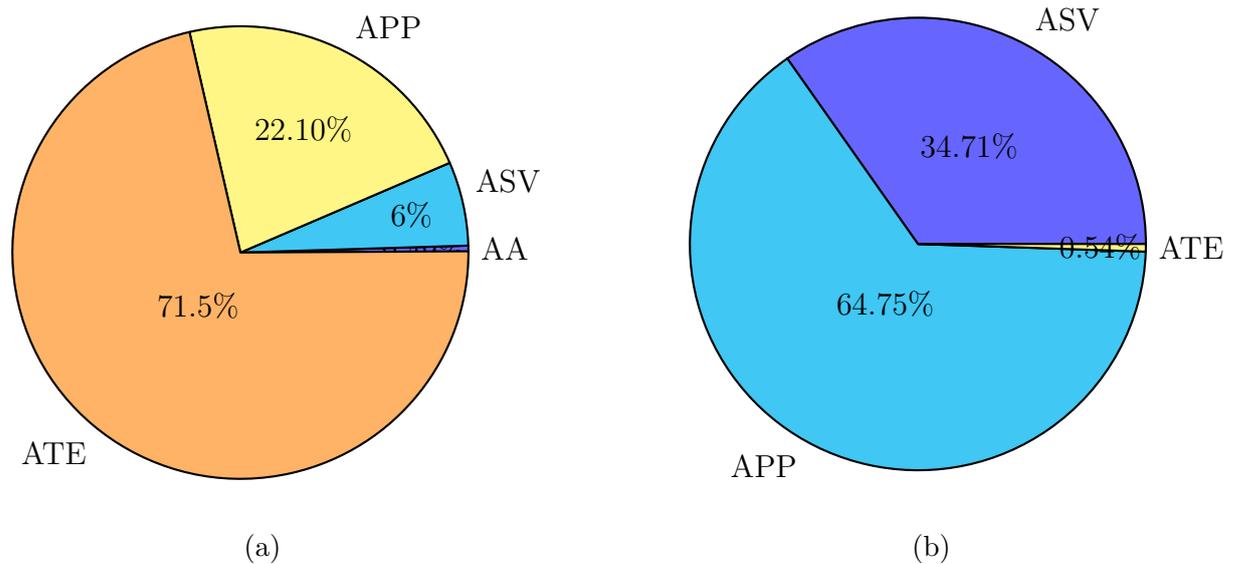


Figura 1.3 – Distribuição da capacidade instalada de coletores solares por tipo dele:(a) mundial e (b) Brasil [Adaptado de Weiss e Spörk-dur, 2019]

1.1 Estado da Arte

As análises comparativas são importantes para compreender as vantagens que um sistema tem sobre outro em condições específicas de funcionamento. Haim et al., 2018 desenvolveram uma bancada para estudos de coletores solares segundo a norma IRAM, 2016, padrão para Argentina. Além disso, testaram coletores de placa plana com e sem cobertura, além de aquecedores de tubo evacuado do tipo *water-in-glass*. Eles encontraram que o aquecedor de tubo a vácuo tem melhor desempenho sobre os outros quando a temperatura ambiente é baixa em relação à da entrada do coletor, isto é, com temperatura de entrada com mais de 30 °C acima da temperatura ambiente. David et al., 2016 fizeram uma análise comparativa entre um coletor de placa plana e um do tipo tubo evacuado de contato direto, os dois submetidos às mesmas condições ambientais. Eles encontraram que o coletor de tubos a vácuo conseguiu chegar em uma temperatura de saída superior em uma faixa entre 2 °C e 4 °C com relação ao coletor de placa plana. Porém, considerando a economia de energia envolvida, como a diferença de temperatura entre o APP e o ATE varia de 0,10°C a 6,80°C, o APP é adequado para aquecer a água para uso doméstico, dadas as condições climáticas prevalecentes na cidade de Coimbatore, na Índia. Naranjo Toro et al., 2015 fizeram a análise comparativa de um coletor de tubos

evacuados tipo *water-in-glass* trabalhando em circulação forçada e livre, achando que o último tinha maior produção anual devido à melhor estratificação térmica.

Hayek et al., 2011 ensaiaram durante o período do inverno dois coletores, um do tipo *heat-pipe* e o outro do tipo *water-in-glass*. Os resultados encontrados mostram que o primeiro tem eficiência superior ao outro dentro de 15% e 20% e, além disso, concluíram que o sistema *heat-pipe* tem um tempo de retorno de investimento superior no mercado local do Líbano. Ayompe et al., 2011 fez o monitoramento durante um ano de dois coletores, um do tipo *heat-pipe* e o outro do tipo placa plana, para uma irradiação de 1087 kWh/m^2 durante um ano. Eles encontraram que a quantidade de energia auxiliar que foi suprida fez com que a fração solar fosse de 38,6% para placa plana e de 40,2% para o tubo evacuado, e a eficiência de sistema obtida foi de 37,9% e 50,3% respectivamente. Allouhi et al., 2015 fez a simulação de um coletor plano e outro do tipo *water-in-glass* no software TRANSOL. A análise, feita no Marrocos, mostra que a fração solar varia desde 52% para o aquecedor de placa plana e 66% para o tubo de vidro evacuado.

Pei et al., 2012 estudaram o comportamento de dois coletores de tubo a vácuo com concentradores parabólicos tipo *Mini-Compound Parabolic Concentrating* (CPC) com razão de concentração menor que um, os resultados mostram que o sistema sem CPC tem melhor eficiência térmica e exérgica em baixas temperaturas, fazendo ela apropriada para aplicações domésticas. Por outro lado, o sistema com CPC tem maior eficiência em altas temperaturas, o que faz mais apropriado para aplicações industriais. No ensaio a temperatura inicial foi de $26,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e foram alcançadas temperaturas $55 \text{ }^\circ\text{C}$, $65 \text{ }^\circ\text{C}$, $75 \text{ }^\circ\text{C}$, $85 \text{ }^\circ\text{C}$, e $95 \text{ }^\circ\text{C}$ chegando em eficiências meias de 55 %, 53 %, 52 %, 51 % e 47% para sistema com CPC e 62 %, 57 %, 55 %, 53 % e 45 % para o sistema sem CPC.

Mazarrón et al., 2016 estudaram o comportamento de um sistema de aquecimento de água com coletor solar do tipo *heat-pipe*, analisando a relação entre o incremento da temperatura de utilização da água quente e a diminuição da eficiência que o sistema consegue atingir, afetando a rentabilidade dele. Eles testaram temperaturas de 40°C , 50°C , 60°C , 70°C , e 80°C , levando o sistema ter eficiências de 64%, 61%, 56%, e 55% para as temperaturas requeridas. Zambolin e Del Col, 2010 avaliaram dois coletores, um de placa plana e o outro de tubo evacuado, comparando os resultados entre o estado estável e o *quasi-dinâmico*, eles encontraram que o coletor de placa plana é mais sensível às variações da temperatura ambiente, e além disso acharam que a análise *quasi-dinâmica*

serve para avaliar a eficiência diária dos coletores com condições meteorológicas pouco estáveis e também como ferramenta rápida para caracterizar os dois coletores. Budihardjo e Morrison, 2009 analisaram o comportamento de um sistema *water-in-glass*, estudando o rendimento óptico e as perdas térmicas, além de fazer a simulação do tubo para depois compará-la com o desempenho do um coletor plano. Eles acharam que um coletor de 30 tubos evacuados tem menor economia de energia do que $3,7 \text{ m}^2$ de um coletor plano para a cidade de Sydney, e também acharam que o sistema de tubos evacuados é menos sensível ao tamanho do tanque do que o coletor plano.

Al-Joboory, 2019, fez uma análise experimental entre dois coletores, um de contato direto ou *water-in-glass* e o outro de contato indireto ou tipo *heat-pipe*, os dois com o tanque no cabeçote, os tanques com capacidade de 80, 100 e 120 l. Ele os comparou nas mesmas condições ambientais em Bagdade, Iraque, e submetendo-os a diversas condições de carga: ausente, intermitente e contínua, isto para simular os padrões de consumo da comunidade. Os coletores em carga ausente, que dizer, em ciclo fechado sem extração de água, mostraram que o coletor *heat-pipe* conseguiu ter uma eficiência acima do *water-in-glass* ao redor 22.5%, 16% e 15.57% para os tanques de 120 L, 100 L e 80 L respectivamente. Os experimentos também mostraram uma eficiência superior do coletor *heat-pipe* de 22.5% para carga ausente, 42.5% para carga intermitente e 32.4% para carga contínua. Achando que o aquecedor do tipo *heat-pipe* tinha um desempenho superior em 22,5%, 42,5%, 32,4%, para dado modo de carga respectivamente.

1.2 Objetivos

Em vista da situação, o objetivo deste trabalho foi fazer um análise comparativa experimental de dois coletores de tubo evacuado, um do tipo *heat-pipe* e o outro *water-in-glass*, para determinar em que situações de operação cada um tem vantagens de ganho de energia em relação ao outro. Essa comparação é feita instalando os coletores nas mesmas condições de vazão, orientação, inclinação, velocidade do vento, temperatura ambiente e irradiância. Como objetivos específicos tem-se:

1. Montagem de uma bancada experimental com dois coletores, um do tipo *heat-pipe* e um *water-in-glass* conectados em série, com aquisição de dados automatizada.
2. Análise comparativa das características ópticas e térmicas com relação à trans-

ferência de calor dos tubos dos coletores em relação à absorção de radiação e à transferência de calor ao ambiente.

3. Análise comparativa experimental de energia transferida à água nos coletores.

2 SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR RADIAÇÃO SOLAR

2.1 Classificação de Coletores Solares

Os coletores solares são dispositivos que convertem a radiação que vem do Sol em energia térmica que é aproveitada para aquecer água ou ar. Como foi assinalado, há três grupos principais para aquecimento de água para aplicações com temperaturas abaixo de 90°C: coletor de placa plana, de tubos evacuados e coletores sem cobertura.

2.1.1 Coletores Sem Cobertura

Os coletores solares sem cobertura são os dispositivos mais simples que se pode encontrar no mercado de aquecimento solar, eles são compostos de um material que pode ser plástico, metálico, EPDM, borracha ou polipropileno. Ele absorve a radiação e a transfere para o fluido que escoar pela parte traseira ou através dele. Esses dispositivos não têm isolamento para o ambiente e por conseguinte não são aptos em lugares onde a temperatura ambiente está abaixo da temperatura de trabalho ou com uma alta velocidade do vento. A eficiência desses coletores é muito sensível às variações da temperatura ambiente, portanto são apropriados para aplicações de baixa temperatura ou como pré-aquecedor para complementar sistemas existentes. A aplicação mais comum para esses coletores é o aquecimento de água para piscina como se mostra na Figura 2.1 .

2.1.2 Aquecedores de Placa Plana

Os coletores de placa plana são o tipo de aquecedor mais popular no Brasil [Weiss e Spörk-dur, 2019], e são tipicamente projetados para aquecer fluidos entre 60 °C 80 °C. Eles são constituídos por uma placa metálica pintada com tinta preta, aproveitando a radiação direta e a difusa. O fluido é conduzido por meio de tubos metálicos soldados na placa absorvedora. A placa também serve como superfície estendida para melhorar a transferência de calor para o líquido. Além disso, eles têm uma cobertura de vidro ou plástico que é transparente à radiação de onda curta, mas praticamente opaca à radiação térmica de longo comprimento, promovendo o efeito estufa entre a cobertura e a placa absorvedora. A Figura 2.2 mostra um coletor de placa plana.



Figura 2.1 – Aquecedor de água para piscina. [Adaptado de Prolazerdf, 2019]

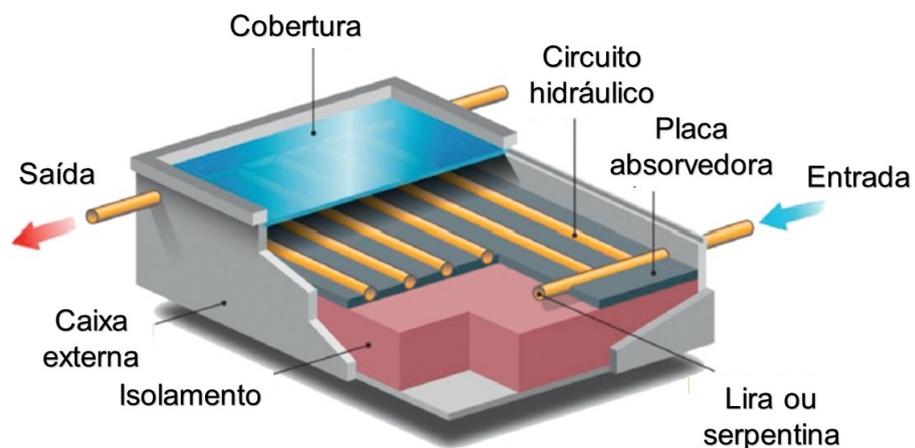


Figura 2.2 – Coletor de placa plana. [Adaptado de Hudon, 2014]

2.1.3 Coletor Solar de Tubo de Vidro Evacuado

Os coletores de tubo evacuado têm vantagem sobre os coletores planos, pois ao serem isolados pelo vácuo têm perdas quase nulas por convecção para o ambiente. Os tubos recebem radiação que é captada por uma superfície chamada de seletiva, que tem alta absorvância no espectro solar na faixa dos 200 nm a 2000 nm e baixa emitância em radiação de longo comprimento de onda de mais de 2000 nm. A Figura 2.3 mostra as

partes do tubo.

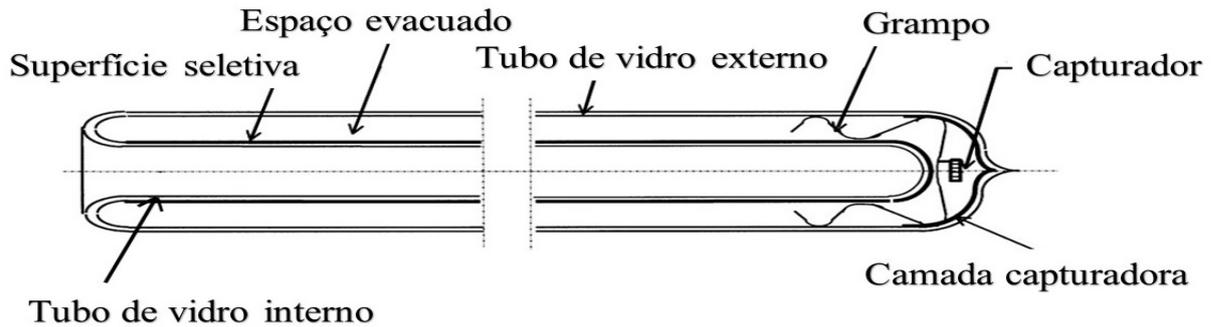


Figura 2.3 – Desenho esquemático de um tubo a vácuo. [Adaptado de Zhiqiang, 2005]

Entre o vidro interno e o externo existe um espaço que deve se manter vácuo, o *getter* é encarregado de capturar o gás residual dentro do tubo mediante uma reação química. Quando as moléculas de gás residual colidem com o material capturador elas se combinam quimicamente com ele. Assim sendo, o *getter* as remove diminuindo essa transferência de calor indesejada. O tubo é de vidro de borossilicato, a camada seletiva (a que é encarregada de captar a radiação recebida) é feita de camadas de (AL-N/AL), (ALN/AIN-SS/CU) ou (SS/Mo/Al₂O₃). A Figura 2.4 mostra a resposta espectral da camada da (SS/Mo/Al₂O₃). Ela é depositada pelo processo de pulverização catódica, uma técnica física na qual a vaporização dos átomos de um material sólido chamado "alvo" ocorre pelo bombardeio de íons energéticos.

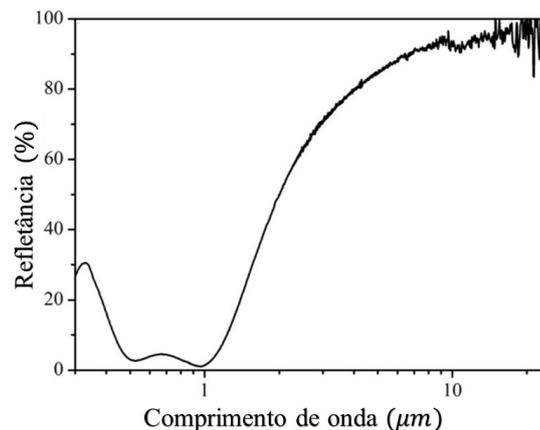


Figura 2.4 – Resposta espectral da camada de SS/Mo/Al₂O₃. [Adaptado de Gao et al., 2016]

Os tubos de borossilicato têm uma espessura de 1,5 mm, comprimento de 1.800 mm, uma pressão interna de 5 mPa, coeficiente de absorção de 95% e de emissividade de 5%, segundo os dados especificados pelo fabricante Suntask, 2019. A Figura 2.5 mostra as dimensões dos tubos dos coletores usados neste trabalho.

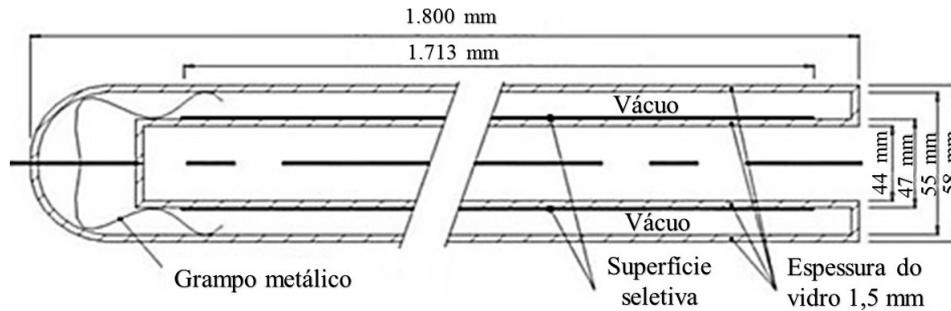


Figura 2.5 – Dimensões tubos de vidro evacuados. [Adaptado de Manea, 2012]

2.1.3.1 Coletor Solar de Contato Direto ou *Water-in-glass*

Os coletores solares do tipo de contato direto, são os mais simples que podem se encontrar no mercado do coletores de tubo a vácuo. Em el tubos são preenchidos com a água diretamente, precisando somente os tubos e o cabeçote para funcionar. Esses coletores têm melhor desempenho em ambientes frios e atingem temperaturas maiores que os de placa plana. Por esse motivo, abrange também usos industriais além dos domésticos. Os coletores de contato direto ou *water-in-glass* constam de tubos de vidro evacuado preenchidos com água e ligados pelo cabeçote, que leva o fluido para o tanque de armazenamento, localizados de forma horizontal ou vertical segundo a aplicação, comumente para aquecimento doméstico. Os tubos são acomodados verticalmente com inclinação dependente da latitude do lugar, apontando para o Norte no caso do hemisfério Sul o para Sul no caso do Norte, e podem trabalhar em circulação forçada com uma bomba ou em convecção natural aproveitando o efeito de termossifão. A Figura 2.6 mostra o processo, o tubo de vidro absorve a radiação aquecendo a parede interna dele e a sua vez o líquido. Portanto, quando o liquido é aquecido a convecção natural faz subir o fluido mais leve e quente para o cabeçote e a sua vez o liquido mais pesado e frio desce, repetindo o ciclo.

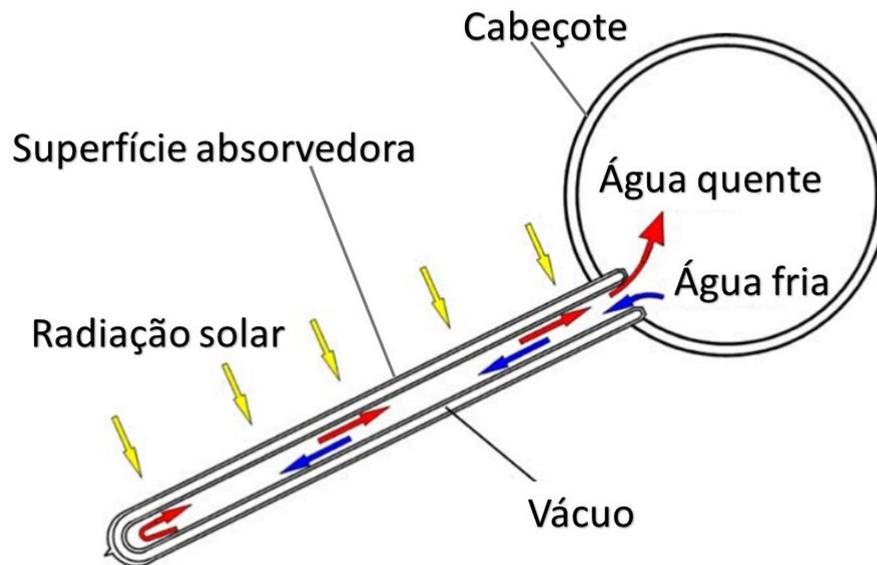


Figura 2.6 – Extração de calor do tipo transferência direta. [Adaptado de Morrison et al., 2004.]

2.1.3.2 Coletor Solar de Tipo Indireto ou *Heat-Pipe*

O coletor *heat-pipe* é formado por tubos de vidro paralelos que contêm, cada um, um tubo de calor de cobre ou *heat-pipe* soldado em uma aleta absorvedora. O *heat-pipe* é um tubo selado a vácuo, tipicamente de cobre, preenchido com um fluido que sofrerá mudança de fase em seu interior. Isto permite ele transferir calor com uma alta eficiência de acordo com Kalogirou, 2013. O fluido passa por um ciclo de ebulição-condensação. Neste ciclo, a radiação solar incidente aquece o líquido e ele ebuli. O vapor gerado desloca-se para o topo do tubo, que fica em contato com o fluido de trabalho que escoar no cabeçote, e ali transfere seu calor latente. Em seguida ele condensa e volta para a base do tubo onde o processo se repete. A Figura 2.7 apresenta o funcionamento do tubo de calor. Esses coletores oferecem uma vantagem sobre os demais, pois, ao trabalhar com fluidos com troca de fase, não é possível atingir temperaturas acima da temperatura de mudança de fase, o que oferece uma proteção contra o super aquecimento. Este controle autolimitante é exclusivo ao coletor tipo *heat-pipe*.

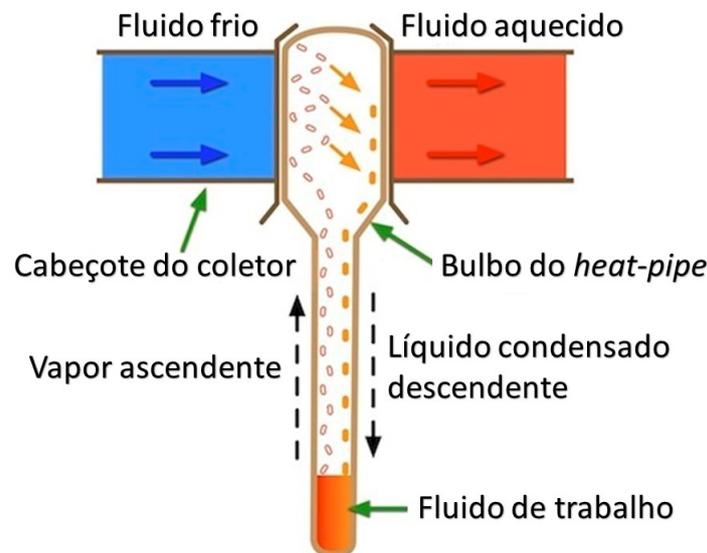


Figura 2.7 – Detalhe do ciclo de trabalho heat pipe. [Adaptado de Apricus, 2019]

Em geral são mais eficientes do que os coletores de placa plana, pois a eficiência não decai tão pronunciadamente em temperaturas ambiente baixas como nos anteriores [Ayompe et al., 2011]. A Figura 2.8 mostra os componentes do coletor.

2.1.4 Comparativo *Heat-pipe* vs *Water-in-glass*

Cada um dos coletores possui características diferentes em suas construções. Devido à sua configuração construtiva, caso haja quebra do tubo de vidro em um coletor com *heat-pipe* não ocorre o vazamento da água do sistema, enquanto em um coletor *water-in-glass* haveria vazamento da água circulando. Essa característica também influencia a manutenção, os selos dos coletores de tubo preenchido são muito importantes já que eles evitam que a água vaze pelos tubos. Por outro lado, nos coletores do tipo *heat-pipe* os selos são somente para o ajuste do tubo evacuado no cabeçote sem influir no selamento hidráulico dele. Com o passar do tempo aqueles selos, comumente de borracha, endurecem por estarem submetidos às condições exteriores, e numa operação de manutenção posterior poderiam gerar problemas na desmontagem. Outra desvantagem dos coletores de tubo evacuados *water-in-glass* é que não se aproveita todo o comprimento do tubo, já que uma porção em torno de 10% do tubo fica com água estagnada, a que também acumula componentes sólidos diminutos presentes na água, tal como assinalado por Budihardjo e Morrison, 2009.

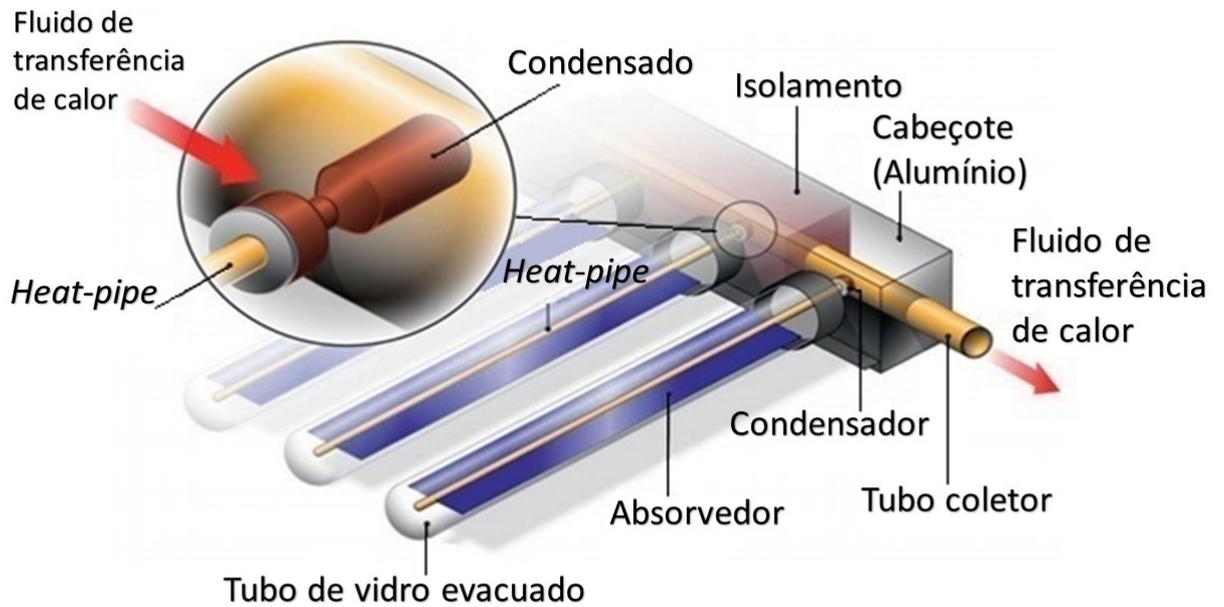


Figura 2.8 – Componentes de coletor de tipo heat pipe. [Adaptado de Hudon, 2014]

Outra característica positiva que têm os coletores *heat-pipe* é que são mais leves, eles só levam água no cabeçote e não nos tubos, facilitando a montagem de grandes instalações em telhados sem reforçar a estrutura, do mesmo modo que se teria que reforçar para coletores de tubo preenchido.

2.1.5 Componentes Básicos de Coletores Solares

2.1.5.1 Reservatório Térmico

O reservatório térmico é o equipamento encarregado de acumular a água de serviço que foi aquecida pelo coletor. Para a maioria dos sistemas solares, a água é o material ideal para acumular o calor útil, pois neste mesmo meio, no fluido, a energia é agregada e removida pelo transporte entre o coletor e o consumo. Segundo Duffie e Beckman, 2013, a capacidade de acumulação do reservatório Q_s é dada pela Equação 2.1, onde m é a massa do fluido em kg, C_p é o calor específico em kJ/kg-K, e ΔT_s é a diferença de temperatura em K para o ciclo em operação. O intervalo de temperatura para operação do reservatório térmico terá um limite inferior dado pela aplicação da água aquecida; que pode ser industrial ou doméstica; e o limite superior, o qual vem dado pelo processo de

ganho de energia, quer dizer a temperatura máxima atingida pelo equipamento aquecedor.

$$Q_{res} = (mC_p)\Delta T_s \quad (2.1)$$

Os reservatórios devem permitir suprir a demanda calculada de água quente em qualquer hora do dia, e é por isso que os materiais usados têm que ser isolantes para o meio externo e evitar ao máximo as perdas pela convecção e radiação, além de serem resistentes a temperaturas superiores aos 90 °C e também devem ter, obrigatoriamente, válvulas de alívio de pressão. Comumente eles são construídos com aço inoxidável ou polímeros de alta resistência e isolados com capas de materiais com baixa condutividade térmica, como poliuretano, poliestireno ou lã de vidro. Uma característica que têm os tanques térmicos é a estratificação térmica, onde o fluido mais frio e denso fica embaixo e o mais quente e leve fica acima. Isto ocorre em ausência de misturador, o qual pretende homogeneizar a temperatura da água dentro do coletor. Diversos autores como Lafay, 2005 e Morrison e Braun, 1985 recomendaram tanques do tipo vertical pois eles permitem uma maior estratificação térmica, fazendo que nas camadas inferiores a água atinja menores temperaturas, o que aumenta a eficiência do sistema de aquecimento.

2.1.5.2 Energia Auxiliar

Os sistemas de aquecimento solares são tipicamente projetados para suprir só uma parte da energia consumida, isto devido ao fato de que o recurso solar não é controlável e pode ser instável tendo dias com irradiância alta e outros com baixa. Em dias com pouca radiação, é necessário um sistema de respaldo. Do ponto de vista econômico e técnico, não é viável ter um sistema somente solar, pois ele precisaria de muitos coletores e reservatórios também muito grandes para atender a demanda e isso faz com que a instalação tenha um custo exageradamente alto.

O desempenho de um coletor é dado pela fração solar FS, de acordo com Hudon, 2014, é a porcentagem de água quente que pode ser conseguida com energia solar vem dado pela equação:

$$FS = \frac{Q_{acs}}{Q_{ans}} \quad (2.2)$$

na qual:

$$Q_{acs} = Q_{ans} - (Q_{as} + Q_{par}) \quad (2.3)$$

na qual Q_{acs} é a quantidade de energia colectada usando o sistema de aquecimento solar, Q_{ans} é a quantidade de energia necessária para suprir a demanda de água quente do sistema. Q_{as} é a energia acumulada só pelo coletor solar. Q_{par} é a energia parasita, é aquela associada com a operação de equipamentos secundários como bombas e controles. Todos os valor de energia em kJ. Segundo Duffie e Beckman, 2013 o valor recomendado para a fração solar é 75% e a ABNT, 2008, não há consenso num valor fixo e para cada caso o valor é diferente. A energia auxiliar pode vir de diversas fontes, sendo que as mais comuns são as resistências elétricas, que utilizam o efeito joule, e o GLP. Na Figura 2.9 são mostrados os diversos tipos de configurações de aquecedores auxiliares, onde: a) o aquecedor é inserido no tanque reservatório; b) o aquecedor é instalado em série com a saída para o consumo de água e c) o aquecedor é instalado em paralelo com o tanque reservatório.

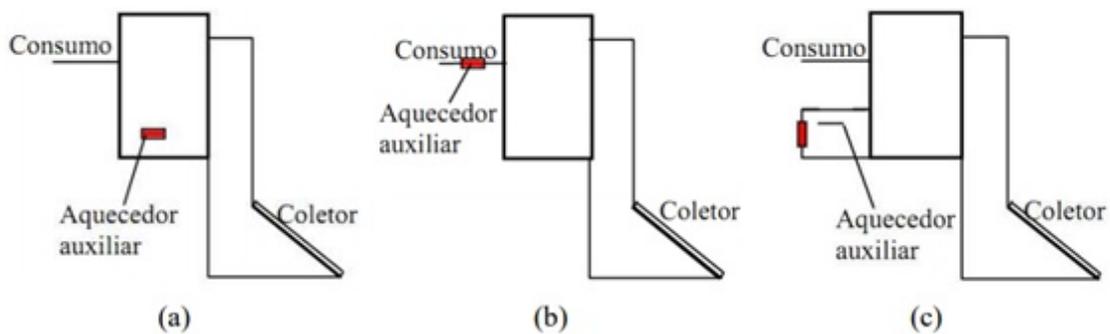


Figura 2.9 – Disposições da fonte auxiliar de energia em sistemas passivos. [Adaptado de Manea, 2012]

2.1.5.3 Coletores Solares Ativos e Passivos

Os aquecedores também se classificam de acordo com o regime de fluxo em que eles trabalham. Se o movimento da água é pela convecção natural ou termossifão, se diz que o sistema é passivo. O efeito de termossifão é produzido pela variação térmica da massa específica num fluido, pois à medida que é aquecido, o processo de convecção natural entra em ação, o que faz com que o fluido mais denso e frio escoe para a parte inferior e o mais quente e leve suba para a parte superior. Se, pelo contrário, o fluido é movimentado por uma bomba, se diz que é do tipo forçado. Essa bomba é ativada pelo

controlador diferencial, que é ligado quando a temperatura no coletor solar é maior que a temperatura do reservatório. Esses sistemas são os mais comumente usados em casos onde há vários coletores ligados em série e a perda de carga é muito alta, onde o reservatório fica muito mais alto que o nível dos coletores ou em lugares muito frios, para evitar o congelamento. A Figura 2.10 mostra o esquema do funcionamento de ambos os sistemas.

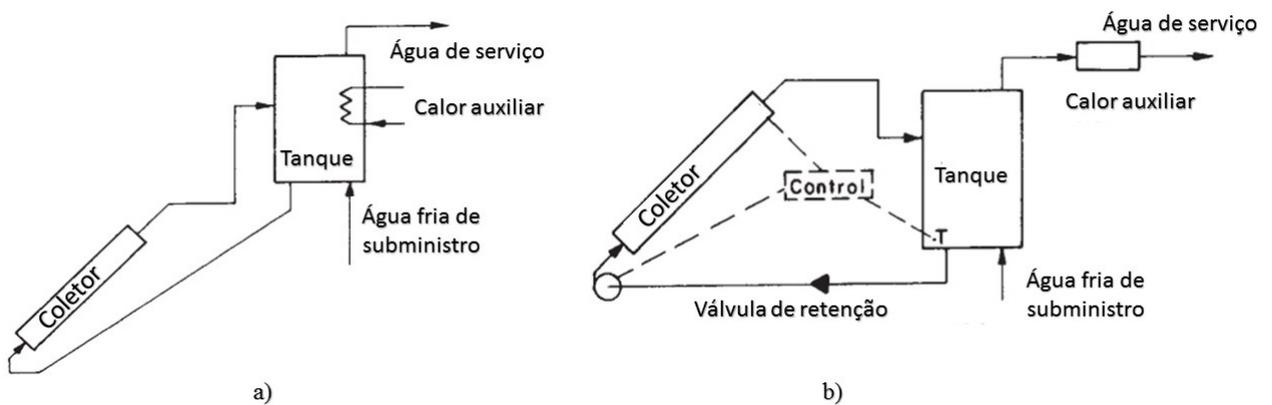


Figura 2.10 – a) Sistema de aquecimento passivo b) sistema de aquecimento ativo.

[Adaptado de Duffie e Beckman, 2013]

Outra classificação que têm os aquecedores é pela via de transferência de calor. Por um lado existem os de contato direto, que são aqueles onde os tubos são preenchidos com a água que vai ser usada e recebe diretamente a radiação. Por outro lado, existem os de contato indireto ou *heat-pipe*, onde o fluido de trabalho não é a água de serviço, mas o fluido encapsulado num tubo de cobre em baixa pressão, que é quem recebe a energia do Sol e, ao ser aquecido, muda de fase. Nessa mudança de fase (vapor-líquido) a energia é transferida para a água de consumo. Seja qual for a natureza dos coletores, os sistemas de aquecimento incluem, além do próprio coletor, reservatório, tanque e fonte de energia auxiliar.

3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental foi feita em duas etapas, a primeira compreendeu a montagem de dois coletores do tipo *water-in-glass* em série com o mesmo cabeçote, mesma inclinação e sendo a única diferença a marca dos tubos. Um dos coletores foi montado com o tubo de vidro de um coletor de tubo de vidro evacuado com *heat-pipe* da marca Suntask, esse coletor foi montado sem suas partes internas(aleta e tubo de calor) e foi preenchido diretamente com água. O outro coletor foi montado com o tubo de vidro de um coletor do tipo evacuado *water-in-glass* da marca SolAtivo. Essa montagem teve como objetivo avaliar as diferenças, caso houvesse, entre os dois tubos e assegurar que suas características de transmitância, absorvância e perdas térmicas, as quais são importantes para a segunda fase dos ensaios, podem ser consideradas iguais. Na segunda parte, dois coletores, um do tipo *heat-pipe* e o outro do tipo *water-in-glass*, foram instalados. Neste caso, a instrumentação e a estrutura usada no primeiro caso foi aproveitada. Na Figuras 3.1 e 3.2 são mostrados os componentes da montagem. Nesta montagem todas as tubulações e acessórios suportam água quente. Para facilidade na montagem foram escolhidas tubulações flexíveis na entrada dos coletores e na saída deles. As demais, como as que conectam os coletores entre si e as que saem do tanque, são de tubulação rígida PPR de 32 mm. Além disso, foi instalado um sistema de *by-pass* com válvulas de gaveta com a finalidade de regular a vazão da bomba, ele permite também usar o sistema de circulação natural fechando a válvula na entrada de fluxo da bomba e permitindo escoar a água direto desde o tanque para a entrada do coletor. Para a circulação da água foi utilizada uma bomba centrífuga Weg de 0,8 CV. Também foi instalado um termostato capilar com intervalo de temperatura de 20 a 120 °C conectado em uma unidade controladora tripolar Weg Cw07 para ligar e desligar a resistência interna do tanque na temperatura especificada do teste.

3.1 Medição da Radiação

A irradiância foi medida por um piranômetro térmico. Esses dispositivos usam o princípio de detecção termoeletrica, segundo o qual a radiação recebida é absorvida quase inteiramente por uma superfície horizontal enegrecida, para uma faixa de comprimento de onda entre 285 - 3000 nm para o instrumento utilizado, neste caso o piranômetro MS-80.

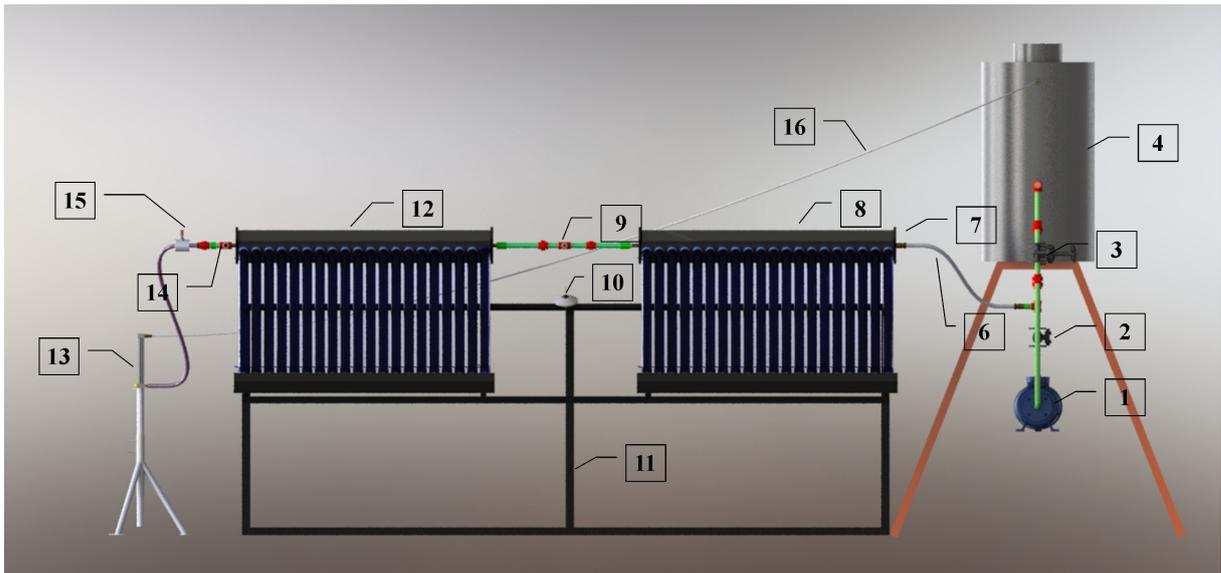


Figura 3.1 – Componentes e sensores da bancada experimental. 1.Bomba de recirculação 2.Válvula de *check* 3.Válvula de gaveta 4. Tanque de aço isolado com resistência interna 5. Estrutura de ferro 6. Tubulação flexível de entrada 7. Sensor de temperatura PT100 de entrada 8. Coletor de tubo evacuado 9. Sensor de temperatura PT100 do meio 10. Sensor de radiação global 11. Estrutura de suporte 12. Coletor de tubo evacuado 2 13. Rotâmetro 14. Sensor de temperatura PT100 na saída 15. Válvula de esfera 16. Tubulação flexível de saída.

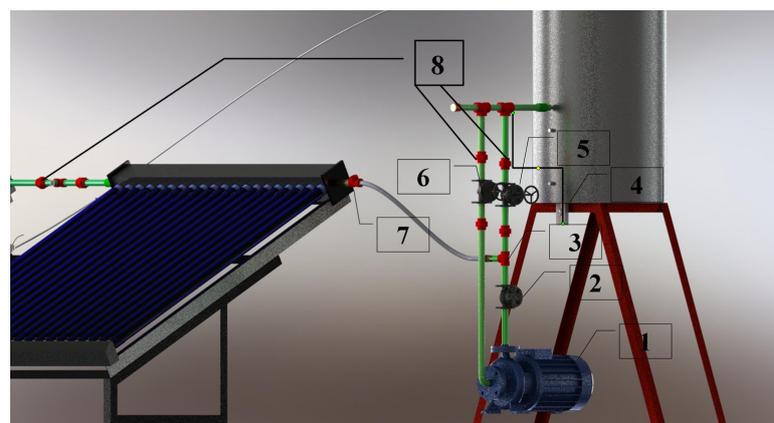


Figura 3.2 – Vista detalhada da montagem. 1. Bomba 2. Válvula de retenção 3. Derivação de desvio 4. Termostato 5. Válvula de desvio 6. Válvula de entrada da bomba 7. Sensor de temperatura PT100 8. Uniões universais.

O aumento de temperatura resultante é medido através de termopares conectados em série ou em série / paralelo para formar a termopilha. As junções ativas (quentes) estão localizadas abaixo da superfície enegrecida do receptor e usam a radiação absorvida pelo revestimento preto para aquecer. As juntas passivas (frias) da termopilha mantêm um contato térmico com a caixa do piranômetro, que atua como um dissipador de calor.

3.2 Medição da vazão

A medição da vazão foi feita por um dispositivo mecânico chamado rotâmetro, o qual é constituído de um tubo de área variável, comumente de vidro que aproveita a força de arrasto que gera um fluido ao escoar, essa força eleva um pequeno flutuador que boia equilibrado com a força de gravidade, quanto mais vazão tem o flutuador se eleva, tendo uma relação direta entre o fluxo e a altura.

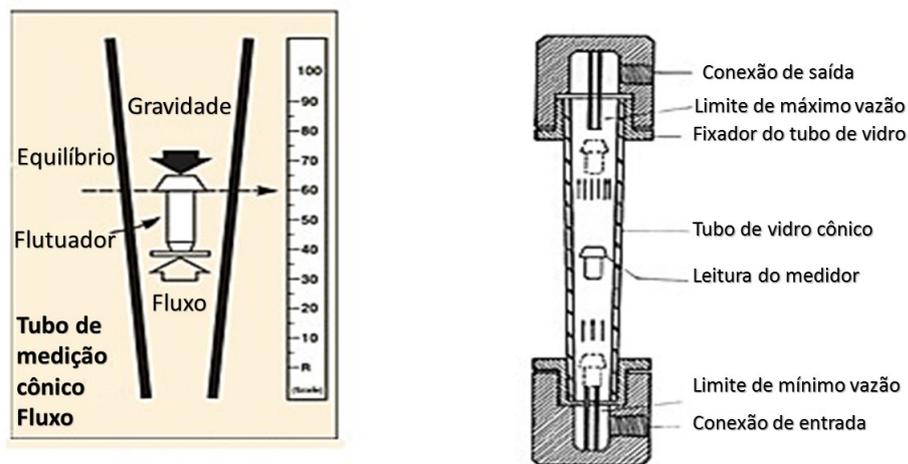


Figura 3.3 – Medidor de vazão de boia (rotâmetro) de área variável: esquema de operação (esq) e montagem do instrumento (dir). [Adaptado de Schneider, 2011]

A posição onde a boia estabiliza-se ao longo desse tubo vertical é usada para a indicação da vazão de um determinado fluido. O balanço na boia é dado por:

$$F_a + \rho_f (Ay)_b g = \rho_b (Ay)_b g \quad (3.1)$$

na qual F_a é a força de arrasto em N, ρ_f em kg/m^3 é a densidade do fluido $(Ay)_b$, é o volume do elemento boiante em m^3 , A a área dele em m^2 e y representa a cota superior

em m.

3.3 Medição da Temperatura

A temperatura mediu-se por meio de sensores de resistência RTD (*resistance temperature detector*) de platina PT100, esses instrumentos aproveitam a variação da resistência elétrica do metal com relação à temperatura. Ao aumentar a temperatura vai ter uma maior agitação térmica o que faz os elétrons se chocarem e diminuir a sua velocidade média aumentando a sua resistência elétrica, esse comportamento é descrito pela Equação 3.2:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (3.2)$$

$$\Delta T = T - T_0 \quad (3.3)$$

na qual R_0 , é a resistência do metal em Ohm na temperatura de referência em Ohm T_0 em °C, α é o coeficiente de temperatura especificado do condutor e ΔT , é o desvio da temperatura em relação à T_0 . A norma internacional IEC 751 especifica as tolerâncias dos sensores RTD industriais. Existem duas principais tolerâncias definidas para os sensores Pt100: classe A, com uma tolerância de $\pm 0,15$ °C a 0 °C e classe B, com uma tolerância de $\pm 0,3$ °C a 0 °C. Foram utilizados sensores PT100 classe A com ligação a quatro fios, eles vêm em diversas apresentações. Neste trabalho foi utilizada uma configuração do tipo encapsulado em aço com bitola roscada para que fosse instalado mais facilmente nas tubulações. Por outro lado, na instalação dos sensores no cabeçote do aquecedor *heat-pipe* foi necessário construir um encapsulamento com lamina de cobre que permitisse encostar o sensor mais facilmente no furo aonde encaixa o bulbo do tubo de calor. Já que o coletor de tubo evacuado com *heat-pipe* utilizado, possuía 30 tubos, sendo necessário utilizar apenas 20 tubos deste coletor para que a área de abertura fosse equivalente à área de abertura do coletor *water-in-glass*, não era possível instalar o sensor na tubulação da entrada pois ficaria longe demais e teria perdas de calor não medidas até chegar ao primeiro tubo variando a temperatura. Os tipos de encapsulamento utilizados se apresentam nas Figuras 3.4 e 3.5.

A calibração dos sensores foi feita por meio de um banho termostático, eles foram inseridos no banho na mesma altura e foi tomada a leitura de resistência em (Ohm) para cada uma das temperaturas que foram testadas.

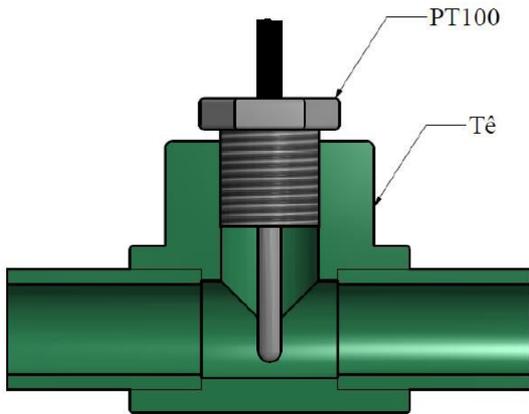


Figura 3.4 – Detalhe da instalação do PT100 encapsulado em aço. [Adaptado de Naranjo Toro et al., 2015]



Figura 3.5 – Detalhe do encasulamento do PT100 com lâmina de cobre.

Neste caso a calibração foi feita em uma faixa de 25 a 65 °C, em intervalos de 10 °C. O equipamento empregado foi um banho da marca Lauda, modelo ECO GOLD RE 206 mostrado na Figura 3.6 o qual oferece uma incerteza na medição de 0,02 °C. Com os pontos medidos foi construída uma reta de ajuste com a regressão de mínimos quadrados tendo coeficientes de indeterminação $R^2 > 0,999$ para todos os sensores. A curva de calibração e os pontos medidos dos sensores é representada na Figura 3.7.



Figura 3.6 – Lauda modelo ECO GOLD RE 206.

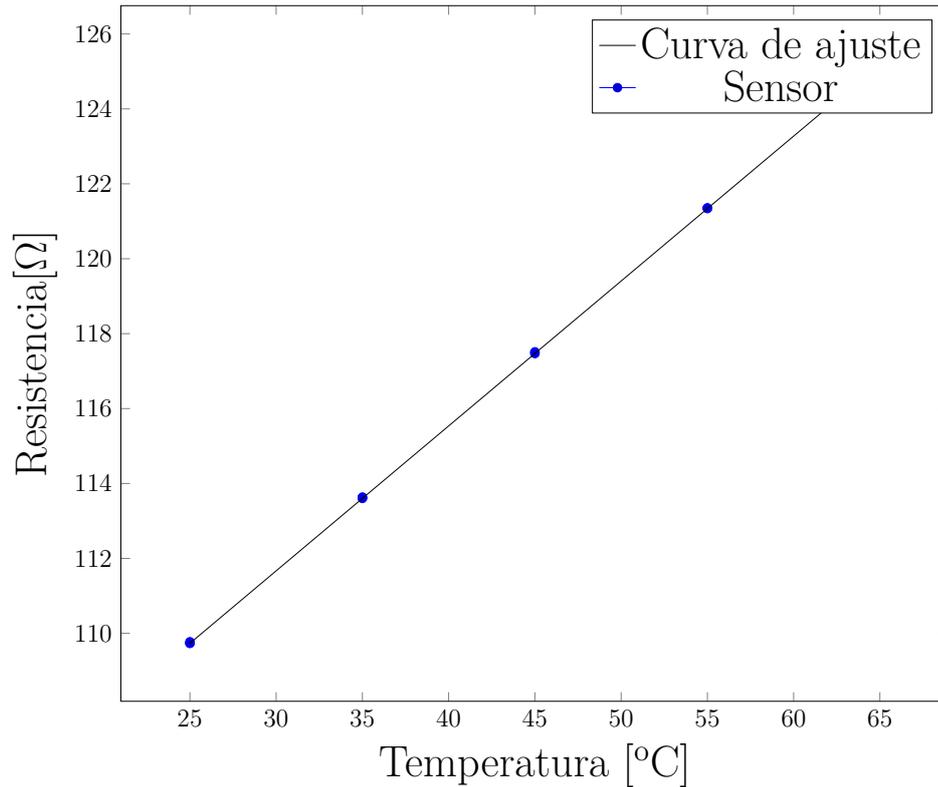


Figura 3.7 – Curva de calibração e pontos medidos para o sensor de Temperatura ponto

9

3.4 Tubulações

As tubulações usadas foram para água quente tipo PPR na maior parte da instalação. O polipropileno copolímero random (PPR) é uma resina termoplástica derivada de processos químicos, que tem como principal componente o petróleo. O material suporta altas temperaturas e pressões, além ser atóxico e resistente à corrosão, características propícias à fabricação de tubos para a condução de fluídos. As tubulações tem baixa condutividade térmica $0,24 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. As tubulações foram instaladas em bitola 32, o qual corresponde a diâmetro interno de $23,2 \text{ mm}$ e diâmetro externo de 32 mm . As conexões hidráulicas do sistema de bombeamento foram realizadas com mangueiras de borracha para água quente de 19 mm . Todas as tubulações foram isoladas com espuma preta elastomérica de 25 mm de espessura. Este tipo de isolamento tem condutividade térmica de $0,037 \text{ W/m }^\circ\text{C}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. O esquema dos tubos é mostrado na Figura 3.8.

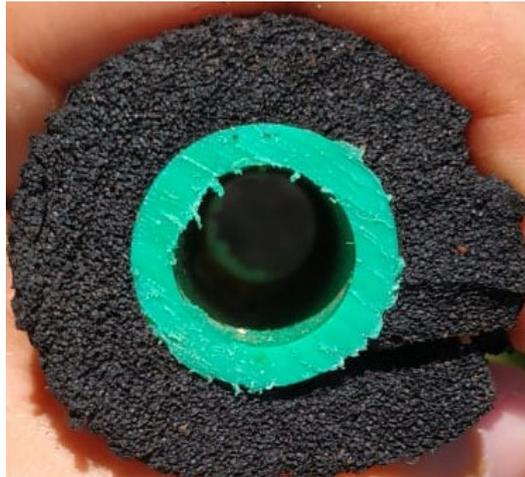


Figura 3.8 – Corte tubulação isolada.

3.5 Sistema de Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi realizada por meio de um *data-logger* digital marca Agilent, modelo 34970A como se mostra na Figura 3.9. As medidas de temperatura e radiação correspondem a sinais de resistência em (Ohm) e tensão em (mV) respectivamente. O *data-logger* é ligado a um computador via porta serial GPIB 232 que é comandado através de um software desenvolvido pela Agilent, que permite configurar os canais dos diferentes módulos. O *data-logger* foi programado para realizar medidas a cada 30 s com uma resolução de 6,5 dígitos. O esquema de aquisição de dados se mostra na Figura 3.10.



Figura 3.9 – *Data-logger* Agilent 34970A.

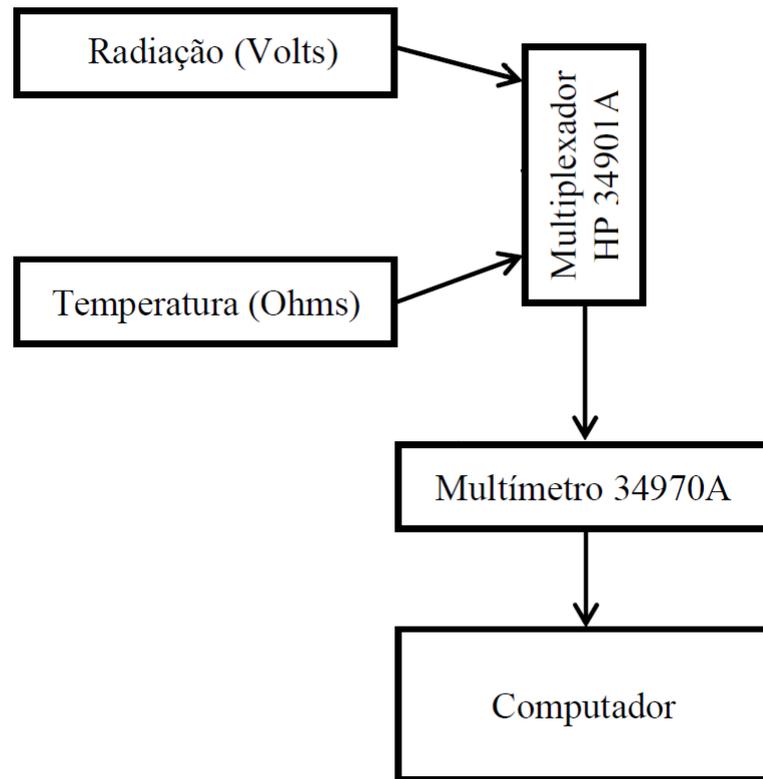


Figura 3.10 – Esquema de aquisição de dados

3.6 Determinação da Incerteza

As incertezas nas medidas foram calculadas levando em conta as incertezas combinadas associadas aos instrumentos de medida, da curva de ajuste, das observações e da grandeza medida, isto é a incerteza acumulada. Esta é calculada com a equação:

$$W_D = \sqrt{W_S^2 + W_A^2 + W_G^2} \quad (3.4)$$

na qual W_D é a incerteza de calibração do dispositivo ou sensor, W_S é a incerteza do instrumento de aquisição de dados, W_G é da medida da grandeza e W_A é a de ajuste da curva de calibração. A incerteza propagada, que é aquela inerente nas grandezas obtidas pela operação de parâmetros medidos foi calculada por meio da equação:

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (3.5)$$

onde w é a função que permite o cálculo da grandeza requerida e o σ representa o valor da incerteza combinada na variável da função e σ_w é o valor da incerteza propagada.

A Tabela 3.1 resume as incertezas nas grandezas medidas neste trabalho.

Tabela 3.1 – Resumo dos valores das incertezas de cada grandeza medida.

Grandeza	Valor de incerteza
Irradiância	$\pm 10 \text{ W FDE (FDE} = 1000 \text{ W/m}^2\text{)}$
Tensão	$\pm 0,005 \text{ (V)}$
Diferença de temperatura	$\pm 0.12 \text{ (}^\circ\text{C)}$
Temperatura	$\pm 0.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$

4 MODELO DE ESTUDO DE COLETORES SOLARES

4.1 Modelo Simplificado do Coletor

Duffie e Beckman, 2013 apresentam uma metodologia para o análise térmica de coletores planos. Em regime permanente o comportamento de um coletor solar pode ser descrito pela primeira lei da termodinâmica com um balanço de energia:

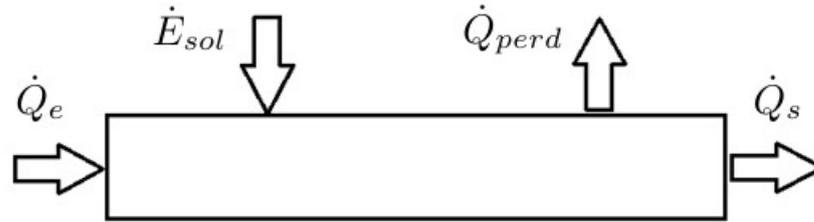


Figura 4.1 – fluxos de energia num coletor

$$\dot{E}_{sol} + \dot{Q}_e = \dot{Q}_s + \dot{Q}_{perd} \quad (4.1)$$

onde: \dot{E}_{sol} , \dot{Q}_e , \dot{Q}_s e \dot{Q}_{perd} são a taxa de energia solar absorvida, a taxa de calor na entrada, a taxa de calor na saída, e a taxa de calor transferido ao ambiente. A taxa de energia incorporada à água, também conhecida como calor útil Q_u vem dado pela equação:

$$A_c = LdN \quad (4.2)$$

na qual C_p , T_e , T_s , e \dot{m} , são o calor específico em kJ/kg, a temperatura na entrada em °C, a temperatura na saída em °C e a vazão mássica em kg/m³. Esse calor útil também pode ser escrito discriminando as perdas ópticas e térmicas como é proposto por Duffie e Beckman, 2013 segundo a Equação 4.4, onde A_c , G_t , $(\tau\alpha)$, U_L , T_{pm} , T_a são a área de abertura do coletor em m², a irradiância solar total no plano do coletor W/m², o produto efetivo da transmitância da cobertura e da absortância do absorvedor adimensional, o coeficiente global de transferência de calor W/(m²°C), a temperatura média do coletor e a temperatura do ambiente em °C. A área de abertura A_c do coletor foi determinada segundo a relação estabelecida pela ASHRAE, 2003, dada pela Equação 4.2.

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_s - \dot{Q}_e = \dot{m}C_p(T_e - T_s) \quad (4.3)$$

onde L é o comprimento do tubo em m, d o seu diâmetro externo em m e N o número de

tubos, como é apresentado na Figura 4.2:

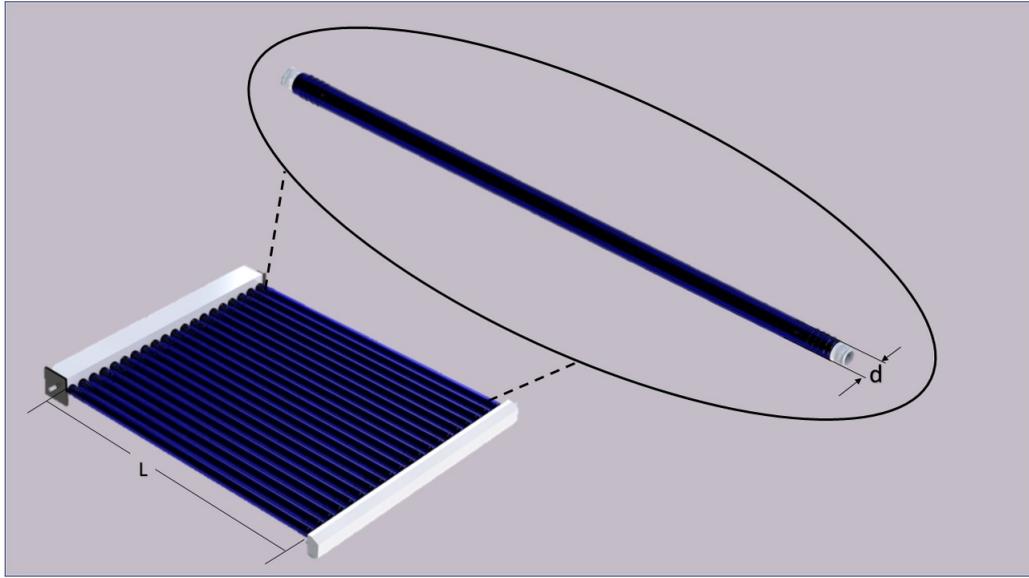


Figura 4.2 – Área de abertura coletor solar de tubos a vácuo. [Adaptado de ASHRAE, 2003]

$$\dot{Q}_u = A_c [G_t (\tau \alpha) - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (4.4)$$

A eficiência η é definida como a razão entre a energia disponível e a utilizada. Nesta dissertação o valor da eficiência foi determinado usando a Equação 4.5 com intervalos de tempo de 300 s (5 min), o qual depois dos coletores chegarem ao regime permanente. Em dias em que a radiação solar era intermitente não foi possível determinar a eficiência instantânea, já que a capacidade térmica fez que a resposta em temperatura dos coletores não correspondesse à radiação incidente no mesmo intervalo de tempo. Nesses dias com nuvens intermitentes e nos outros, foram determinadas as potência térmicas da conversão da energia solar entregue à água pelos coletores (numerador da Equação 4.5) em intervalos de 5 minutos, bem como o valor total diário obtido em todo o período de análise.

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_U dt}{A_c \int G_t dt} \quad (4.5)$$

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1 Análise das Características Ópticas dos Tubos

Como mencionado anteriormente, os coletores que foram analisados são de tubo a vácuo, um de contato direto e o outro do tipo *heat-pipe*. Os coletores vêm de fabricantes diferentes e, embora ambos usem tubos a vácuo e funcionem de modo similar (os dois aproveitam o vácuo para diminuir as perdas convectivas e têm camada seletiva para coletar a radiação) eles poderiam ter características construtivas diferentes quanto à qualidade da superfície seletiva, do vácuo, além de outras. Essas características são as que indicam em que proporção os tubos estão absorvendo a energia e entregando-a à água, e quanto calor é transferido ao ambiente.

Os tubos são a parte mais importante de ambos aquecedores, já que eles são os encarregados de transferir a energia. Por um lado, no aquecedor *water-in-glass* de maneira direta para à água e por o outro, no coletor do tipo *heat-pipe* para aquecer o tubo de calor que aquecera a água depois. O objetivo desta dissertação não é testar os tipos de tubo, mas o tipo de aquecedor, por causa disso foi necessário caracterizar os tubos para conhecer a diferença em suas qualidades ópticas e térmicas e evitar que isto influencie o teste comparativo. Esta comparação é importante, pois caso se um dos tubos tivesse características superiores, coletando mais energia porque sua camada seletiva ou vácuo são melhores com respeito ao outro, o resultado da análise comparativa iria ser afetada.

Com esse intuito, foi construída uma bancada com os dois coletores em configuração *water-in-glass* submetidos às mesmas condições de radiação, vazão, vento circundante e perdas pelo cabeçote. A bancada é mostrada na Figura 5.1. Sob esta hipótese, a única diferença observável no aumento de temperatura entre a entrada e a saída de cada um dos coletores seria devida à diferença de materiais ou tecnologia de montagem. Se houvesse dessemelhança na magnitude da diferença de temperatura, seria levada em consideração nos cálculos posteriores, como um coeficiente que afeta o cálculo do calor entregue. Foram escolhidos dias nos quais o céu estivesse limpo, e os coletores foram expostos perto do meio dia para eles aquecerem mais rápido. Os testes foram feitos duas vezes para confirmar os resultados.



Figura 5.1 – Bancada utilizada para a avaliação das propriedades.

5.1.1 Procedimento Experimental

1. Foram montados dois coletores um do lado do outro, colocando no primeiro 20 tubos da marca Suintask e no segundo 20 tubos da marca SolAtivo, de forma que a única diferença entre um coletor e outro fosse a origem dos tubos. A montagem foi feita com as especificações do Capítulo 3.
2. Foi aquecida água no tanque até que sua temperatura estivesse acima da temperatura ambiente, com o objetivo de evitar ganho de energia de outras fontes.
3. Circulou-se água com a bomba a uma vazão constante para homogeneizar a temperatura do sistema.
4. Desligou-se a bomba e deixou-se escoar o fluido com a água do reservatório térmico até ele esvaziar.
5. Os dados das temperaturas diversas e da irradiância solar foram coletados por um sistema de aquisição em intervalos de 30 s.

No primeiro dia de ensaio (3 de junho de 2019 perto de meio dia), se observou o que depois de uma hora de exposição, a diferença na temperatura entre a entrada e a saída de cada coletor esteve ao redor de $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma irradiância que variou ao redor de 700 W/m^2 a 800 W/m^2 . Os resultados são mostrados na Figura 5.2.

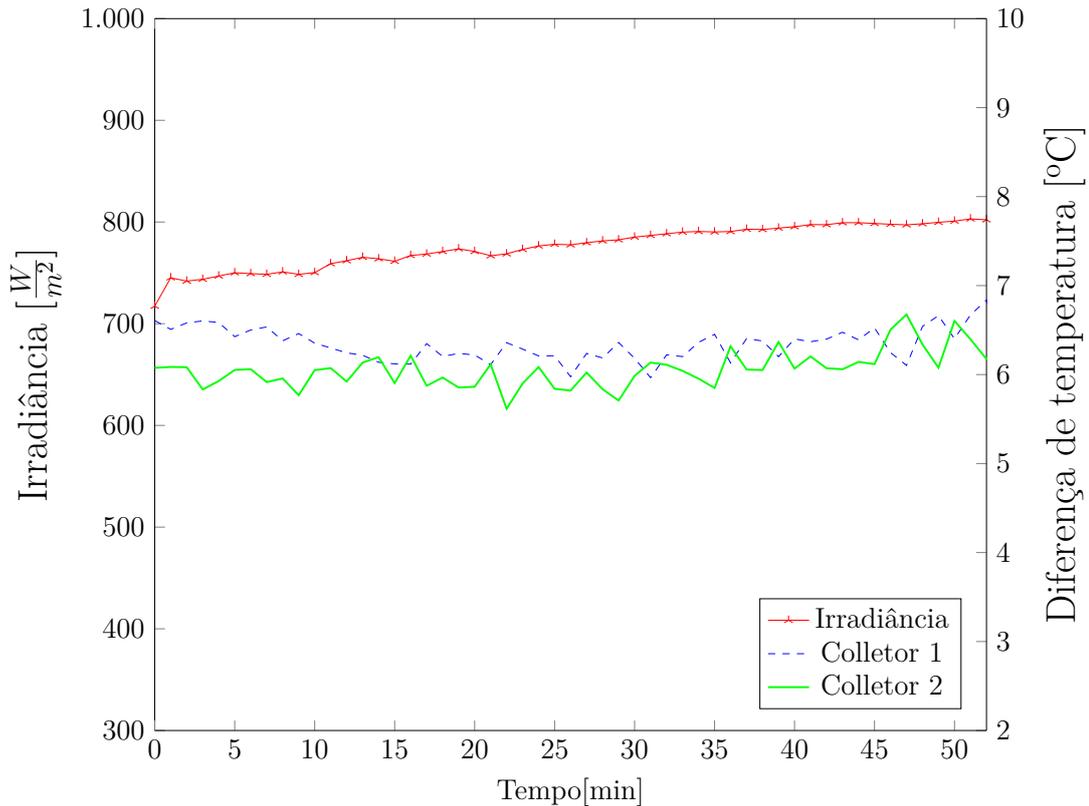


Figura 5.2 – Diferença de temperatura entre a entrada e saída de ambos coletores, no primeiro dia de ensaio

No segundo dia de ensaio (4 de junho de 2019 perto de meio dia), os coletores foram expostos em um dia com condições parecidas de radiação ao do primeiro dia. Quando os coletores chegaram no regime *quasi* permanente a diferença de temperatura se estabilizou ao redor de 6,8 °C para os dois coletores, como mostrado na Figura 5.3. Os dois dias escolhidos tinham condições de céu limpo. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.2 e 5.3. Segundo observado, quando os coletores chegam a um regime *quasi* permanente, depois de uma hora de exposição, a diferença no ganho de temperatura da água entre a entrada e a saída de cada coletor, varia em um intervalo que está dentro de $\pm 0,3$ °C, sendo que a incerteza na medição em cada ponto de temperatura foi de $\pm 0,12$ °C (a qual pode ser atribuída aos sensores PT 100). Destes resultados concluiu-se que as pequenas diferenças obtidas na comparação dos dois coletores indicam que os tubos podem ser considerados com características idênticas para fins experimentais.

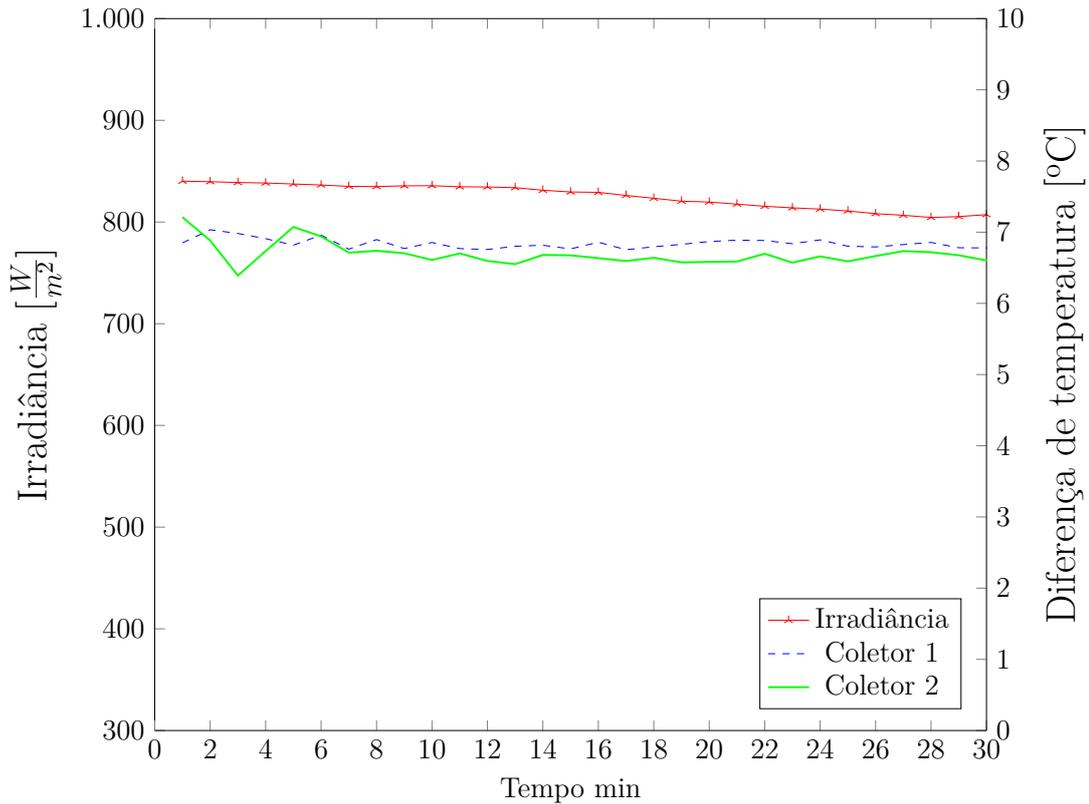


Figura 5.3 – Diferença de temperatura entre a entrada e saída de ambos coletores, no segundo dia de ensaio

5.2 Cálculo da Constante de Tempo do Coletor

A constante de tempo é um parâmetro importante dentro da caracterização dos coletores, essa constante indica quanto tempo demora o coletor para chegar em regime permanente. Seu valor é de vital importância pois as condições meteorológicas durante os ensaios são variáveis. A norma ABNT, 2009 define a constante de tempo como 63,2% do período necessário para que o coletor atinja o valor de regime permanente. A Figura 5.4 mostra um exemplo de ensaio da constante de tempo segundo a norma citada. A norma assinala o procedimento para levar a cabo a estimativa da constante de tempo, a metodologia usada detalha-se abaixo.

5.2.1 Procedimento Experimental

1. Cobre-se o coletor com uma cobertura refletora, bloqueando a radiação solar no seu plano;

2. Ajusta-se a vazão mássica para 0,02 kg/s por metro quadrado da área de abertura de coletor;
3. Ajusta-se a temperatura na seção de entrada do coletor para $\pm 1^\circ\text{C}$ da temperatura ambiente;
4. A irradiância solar total deve ser maior que 700 W/m^2 ;
5. Quando a diferença de temperatura da água entre as seções de entrada e saída do coletor variar menos que $0,1^\circ\text{C}$ por minuto define-se o instante t_0 , no qual se retira a cobertura e começa o ensaio.
6. Aguarda-se até que o sistema entre em regime permanente.

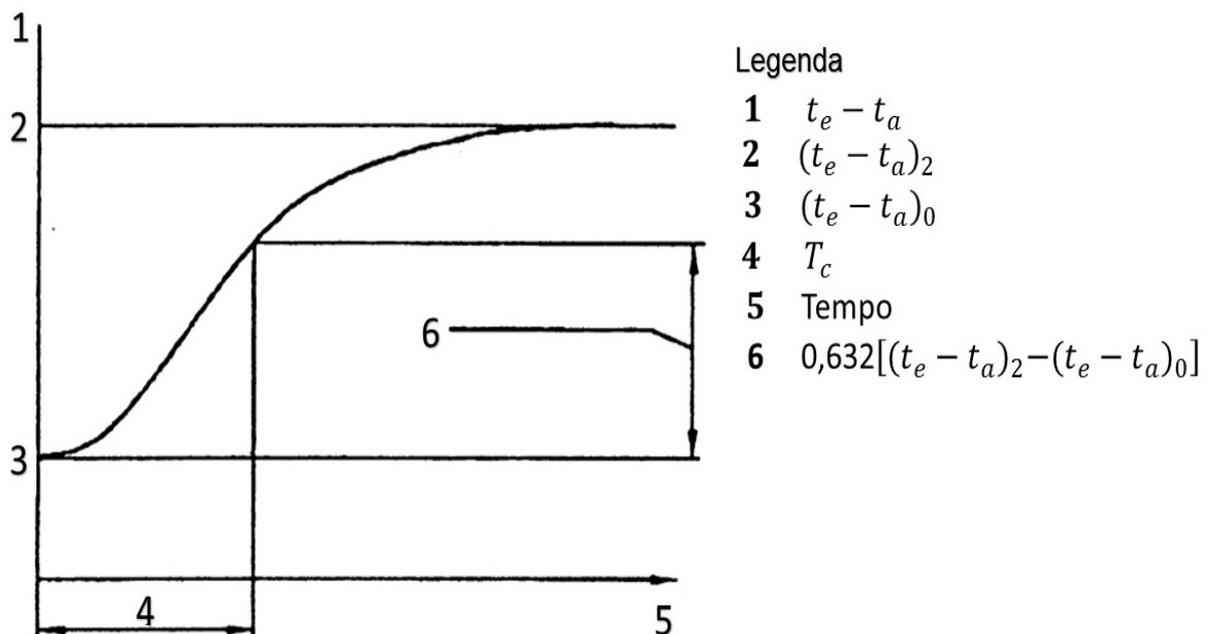


Figura 5.4 – Constante de tempo do coletor. [Adaptado de ABNT, 2009]

O regime permanente é alcançado quando o valor da temperatura na saída do coletor não varia mais que $0,5^\circ\text{C}$ por minuto. Durante o ensaio é preciso manter certas condições constantes, a norma indica que deve ser mantida uma taxa de flutuação máxima em torno do 2% da vazão mássica e a radiação não deve variar em $\pm 50\text{W}$.

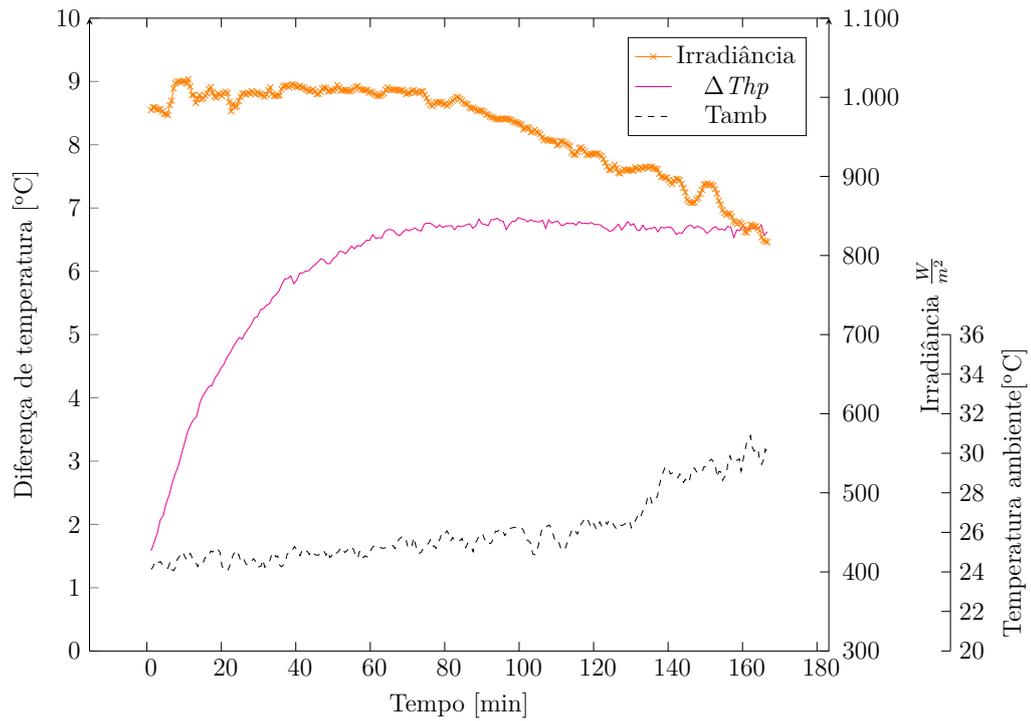


Figura 5.5 – Variação da diferença de temperatura ao longo do tempo do coletor de *heat-pipe*

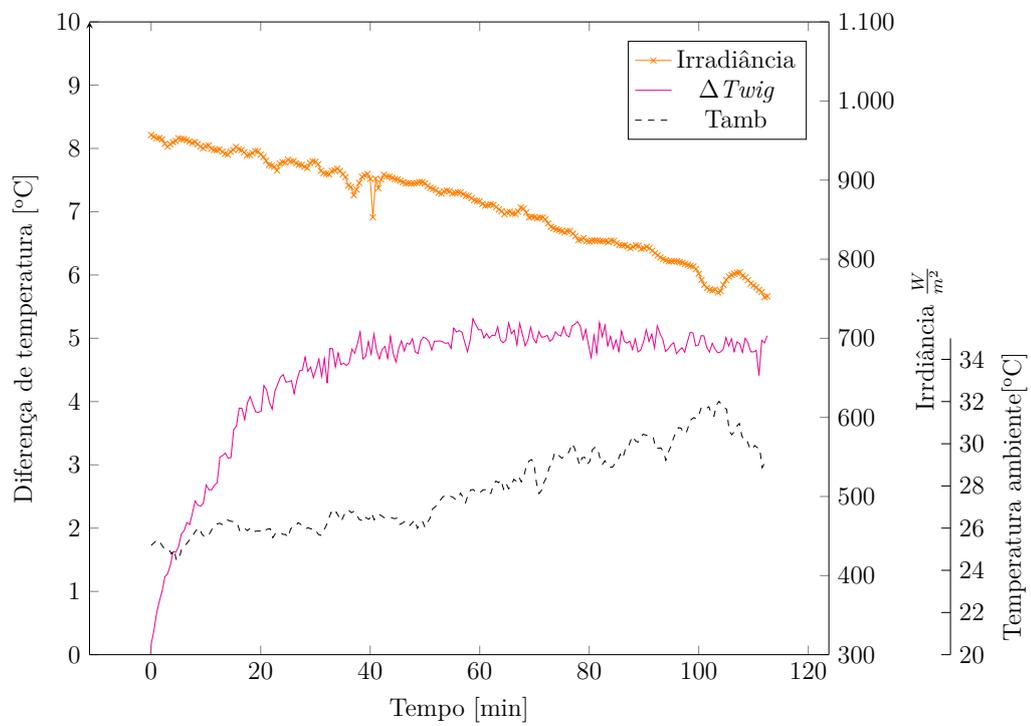


Figura 5.6 – Variação da diferença de temperatura ao longo do tempo do coletor de *Water-in-glass*

O procedimento utilizado para o cálculo da constante de tempo foi o detalhado na Seção 5.2, o tempo da constante achado foi de 25 minutos para o coletor de *heat-pipe* e de 39,4 minutos para o coletor de *water-in-glass*, os ensaios são mostrados nas Figuras 5.5 e 5.6 respectivamente. Esses valores são superiores em comparação aos obtidos para coletores planos híbridos como os encontrados por Ancines, 2016, de 15 minutos, e os 6 minutos obtidos por Facão e Oliveira, 2006 para coletores planos. Isto mostra a grande capacidade térmica que têm os coletores de tubo evacuado se comparado aos coletores de placas planas. Pelo seu princípio de funcionamento, o efeito de termossifão precisa de um tempo maior para se estabilizar, pelo qual é muito complexo manter as condições descritas na norma em um ensaio fora de um simulador solar.

5.3 Ensaio Externo de Eficiência em Regime Permanente

Com a bancada e os instrumentos instalados e calibrados como assinalou-se na Seção 3, foi feito o teste de eficiência em regime permanente. O procedimento foi baseado na norma ABNT, 2009, mas não foi possível garantir todas as especificações que a norma exige em relação aos itens referentes ao campo de visão dos coletores e com a medição na vazão. Qualquer diferença entre os coletores durante a operação está relacionada à questões intrínsecas, não possuindo relação ao procedimento do ensaio, visto que os dois coletores estão conectados em série, na mesma inclinação, com a mesma vazão e no mesmo plano.

5.3.1 Procedimento Experimental

Conforme o mencionado anteriormente, se procedeu fazer o experimento seguindo os parâmetros listados embaixo. Para o ensaio dos coletores, se escolheram dias com céu limpo, se monitoraram os sensores desde o nascer do Sol ate o por do Sol, coletando as temperaturas e radiação com o intuito de obter a curva de desempenho do dia testado.

1. A bomba foi ligada no dia anterior ao dia de ensaio e a vazão foi ajustada para 0,02 kg/s por m^2 de coletor
2. Deixou-se escoar a água em um circuito fechado
3. Foi monitorada a radiação e a vazão em intervalos de 5 minutos

4. O teste termina quando a radiação cai por baixo dos 500 W/m^2 .

5.4 Ensaio da Influência da Pasta Térmica em Coletores *heat-pipe*

Durante a montagem alguns fabricantes recomendaram usar pasta térmica para melhorar a condução de calor entre o bulbo do *heat-pipe* e o cabeçote do coletor Fujisol, 2019 e Zantia, 2019 recomendam aplicar o produto, enquanto fabricantes como Spower, 2019 e Firebird, 2019 não fazem menção sobre isto nos seus manuais de instalação. Assim sendo optou-se por realizar um teste para identificar o efeito da pasta térmica no desempenho do coletor de tubo de vidro evacuado com *heat-pipe*. Para isso o cabeçote do coletor *heat-pipe* foi instrumentado com termopares tipo T para medir o aumento de temperatura nesse caso. Na Figura 5.7 é mostrado como foi instrumentado o cabeçote do coletor.

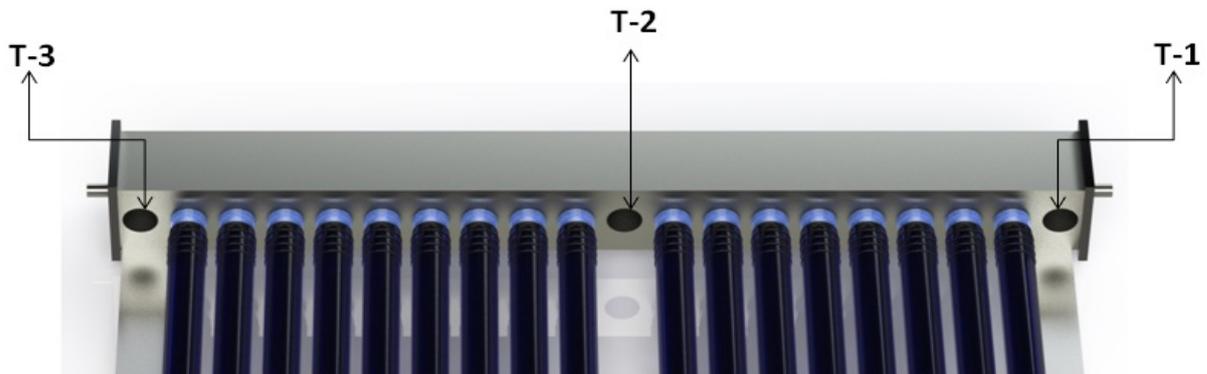


Figura 5.7 – Bancada utilizada para a avaliação das propriedades.

A água entra pelo lado do sensor T-1 e sai pelo T-3, sendo que os primeiros dez tubos foram instalados com pasta térmica no bulbo e nos seguintes não foi instalada. Mediu-se o aumento de temperatura entre cada um dos pontos para encontrar a diferença no aumento de temperatura. Os resultados obtidos são exibidos na Figura 5.8. Os resultados mostram que a pasta térmica tem pouca influência na transferência de calor entre o bulbo e o cabeçote, pois a diferença entre o aumento de temperatura entre os tubos de calor com o produto e aqueles que não tinham, caíram dentro das incertezas de medidas, assim sendo não se instalaram os tubos com a pasta térmica.

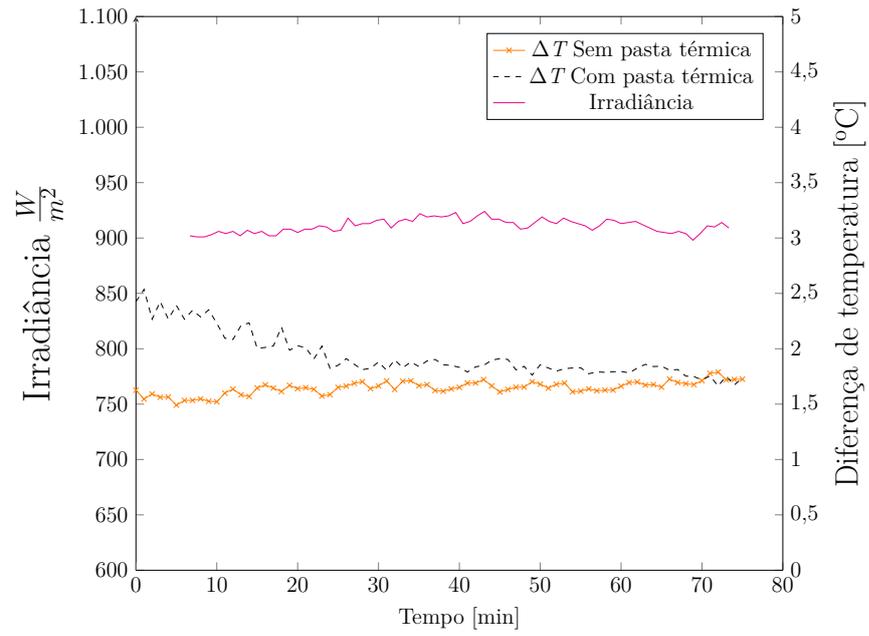


Figura 5.8 – Influência da pasta térmica no coletor solar *heat-pipe*

6 RESULTADOS

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para o desempenho térmico de cada tecnologia estudada nesta dissertação. O calor convertido, a partir da radiação solar, foi calculado com as medidas obtidas da temperatura e por meio da Equação 4.3. A Figura 6.1 apresenta a evolução da irradiância no primeiro dia de ensaio, os dias de ensaio, suas condições ambientais e a irradiação do dia se detalham na Tabela 6.1. A linha laranja indica a razão entre o calor ganho pelo coletor *heat-pipe* e *water-in-glass*. Com esses resultados, também é possível identificar uma diferença entre os coletores nas primeiras horas do dia, onde o coletor *heat-pipe* apresenta uma entrega de energia de 50% mais sobre o outro.

Essa diferença pode ser devido à alta capacidade térmica que tem o coletor *water-in-glass*, a que está diretamente ligada à grande quantidade de massa da água contida nele, pelo qual, ao começo do dia o aquecedor *heat-pipe* aparenta ser mais eficiente. Esse comportamento é coerente com os resultados do ensaio prévio na Seção 5.2, onde o coletor *water-in-glass* exibiu uma constante de tempo superior, ou seja, precisa mais tempo para chegar em condições de regime permanente. Ao final do dia, um fenômeno parecido é observado. Neste caso, o coletor *heat-pipe* aparenta estar menos eficiente ao cair a irradiância, isto pode ser devido ao sistema reagir mais rapidamente, já que a diminuição na entrega de calor acompanha a queda da radiação. Esse fenômeno também pode estar relacionado à sua menor capacidade térmica vinculada com a baixa quantidade de massa em seu interior.

Tabela 6.1 – Resumo das condições ambientais nos dias de ensaio.

Data	Faixa de temperatura ambiente no dia °C	Dia	Irradiação do dia kWh/m ²
24/09/2019	10 a 29	1	6,106
30/09/2019	28 a 36	2	2,371
09/10/2019	26 a 40	3	7,362
11/10/2019	31 a 41	4	5,064
28/11/2019	10 a 34	5	4,429

A evolução instantânea do rendimento individual de cada um dos aquecedores é apresentada na Figura 6.2, a eficiência foi calculada por meio da Equação 4.5, a linha preta mostra a evolução da entrega de potência térmica do coletor *heat-pipe*.

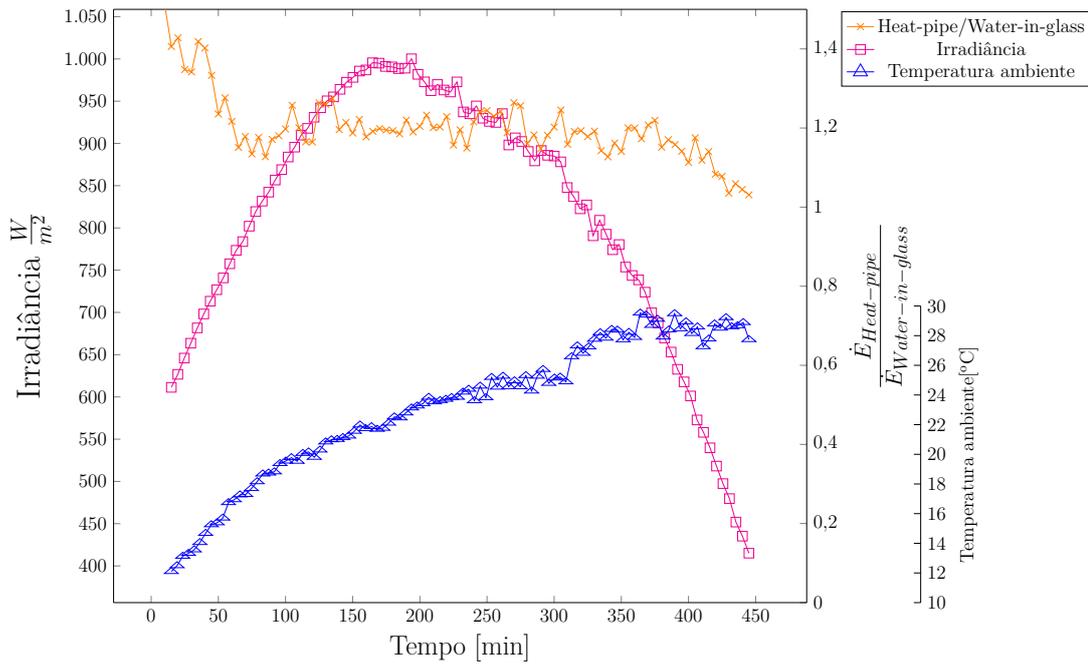


Figura 6.1 – Razão entre a potência térmica convertida no coletor *heat-pipe* e *water-in-glass* no dia 24 de setembro

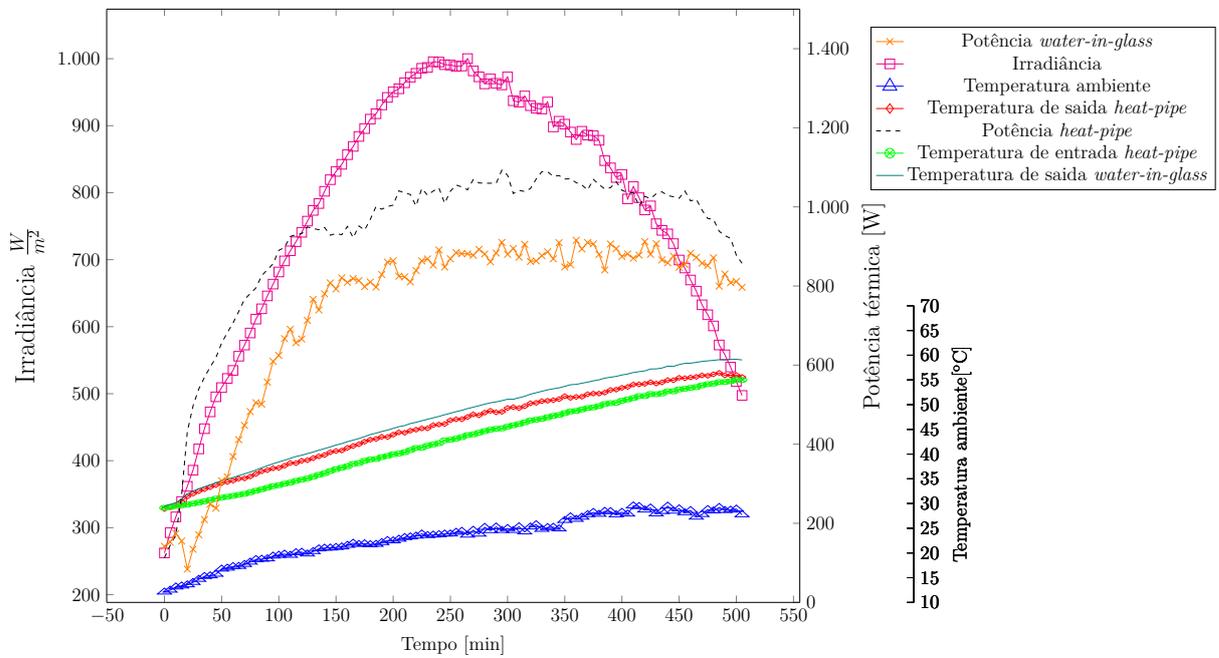


Figura 6.2 – Evolução da entrega de potência térmica ao longo de um dia de ensaio, dia 24 de setembro.

Os dados demonstram que o coletor *heat-pipe* entra em regime mais rapidamente do que o coletor *water-in-glass*, ele aumenta a sua potência térmica com o aumento da radiação solar. Quando a irradiância sobe acima dos 700 W/m^2 a potência térmica deixa de aumentar e se estabiliza ao redor de 930 W e 1050 W aproximadamente. Do mesmo modo, a linha laranja mostra a evolução da entrega de energia do coletor *water-in-glass* no dia de ensaio. Os dados apresentados mostram um comportamento parecido com o outro coletor, embora, como foi mencionado anteriormente, a capacidade térmica faz que a sua entrega comece aproximadamente 25 minutos depois. A razão do ganho de calor da água no coletor continua aumentando até a radiação chegar perto dos 600 W/m^2 , onde se estabiliza em um valor que varia em uma faixa de 800 W e 870 W aproximadamente. Ambos valores representam a potência média em períodos de 5 minutos. Ao finalizar o dia quando a radiação diminui abaixo dos 700 W/m^2 aproximadamente, a razão do ganho de calor diminui em ambos, para o coletor do tipo *heat-pipe* se reduz de forma mais pronunciada, isto por causa da menor capacidade térmica. Juntamente com o ensaio do dia 24 de setembro, foi obtida uma curva da evolução da eficiência, ela é apresentada na Figura 6.3. A eficiência instantânea foi calculada a partir da Equação 4.5, a informação obtida mostra uma queda na eficiência dos coletores quando a temperatura da água aumenta, isto ocorre quando os coletores atingem condições de regime *quasi* permanente, e mesmo com o aumento da radiação, a razão de transferência de calor entregue pelo coletor não aumenta, e a eficiência diminui. A entrega de energia do coletor *heat-pipe* foi de 29 MJ e para o *water-in-glass* foi de 23,5 MJ aproximadamente. Para conferir os resultados obtidos no dia 24 de setembro o teste foi repetido no dia 28 de novembro. Como se mostra na Figura 6.4 esse dia de ensaio, caracterizou-se por ter um perfil meteorológico parecido ao dia 24 setembro, com céu limpo e poucas nuvens. Nos resultados percebe-se concordância com os obtidos anteriormente, onde a potência térmica do *heat-pipe* esteve ao redor de 20% acima em relação ao coletor *water-in-glass* no período de estudo. De novo, a capacidade térmica fez com que o coletor *heat-pipe* nas primeiras horas mostrasse uma superioridade muito acentuada em relação ao coletor *water-in-glass*. No resto do dia, o sistema manteve praticamente o mesmo comportamento do dia anterior. Adicionalmente foram analisados os dados obtidos no dia 28 de novembro em relação à potência térmica convertida, os dados se mostram na Figura 6.5 para cada um dos coletores. O coletor *heat-pipe* entregou 44 MJ e o coletor *water-in-glass* 31,72 MJ aproximadamente.

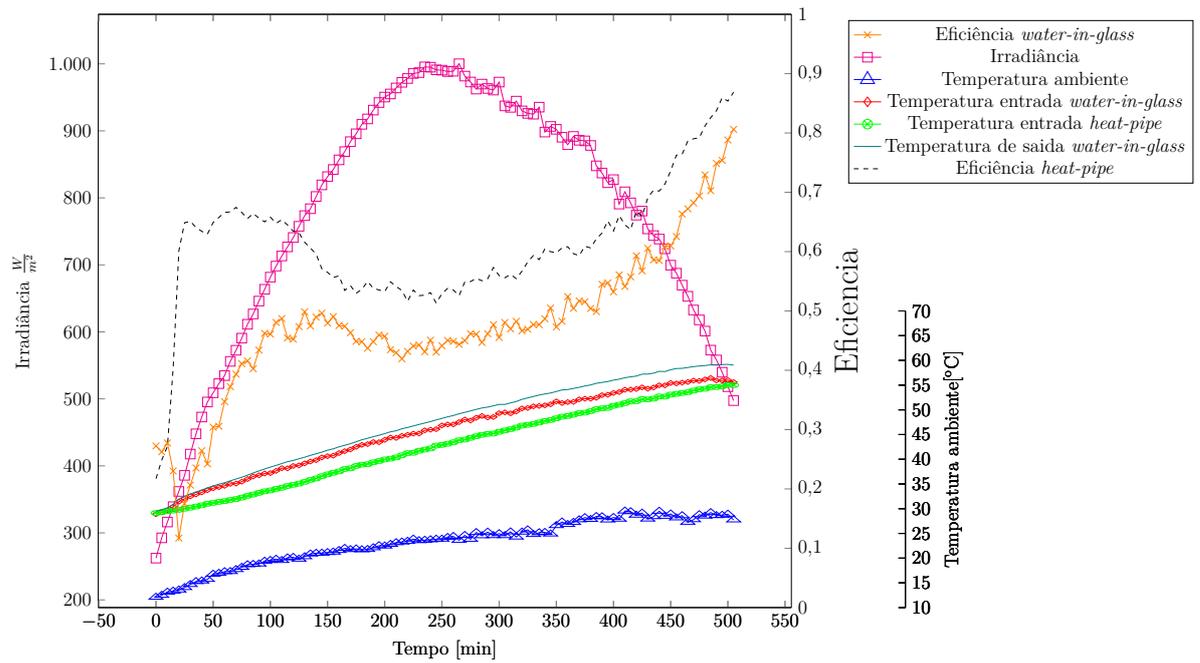


Figura 6.3 – Evolução da eficiência instantânea ao longo do um dia de ensaio, dia 24 de setembro.

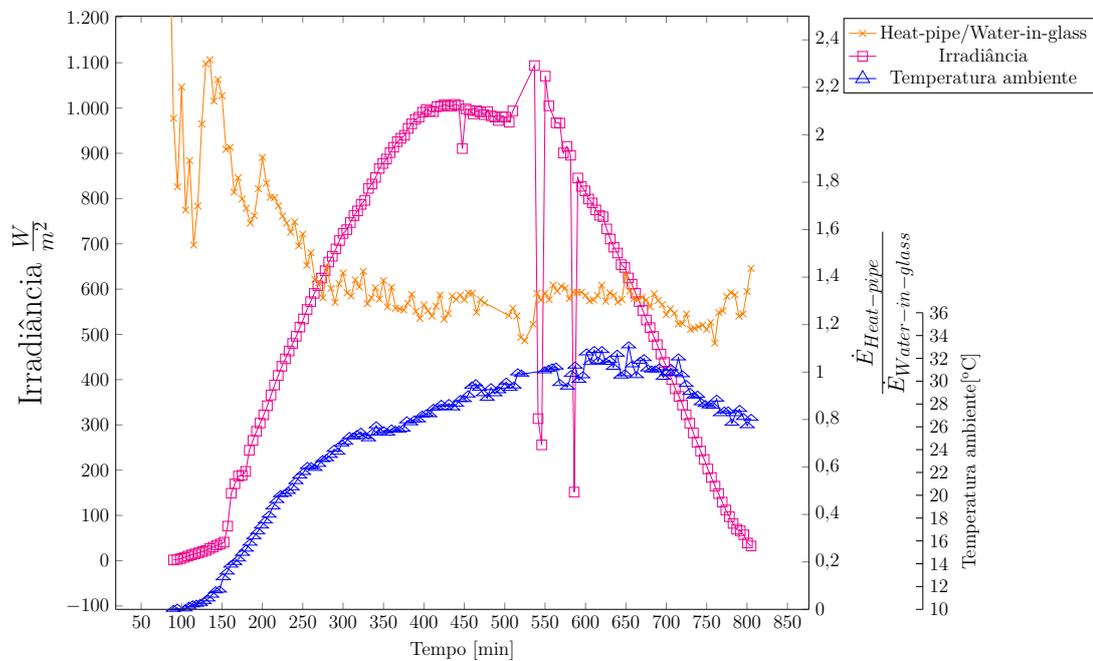


Figura 6.4 – Razão entre a potência térmica convertida no coletor *heat-pipe* e *water-in-glass* em dia 28 de novembro 2019

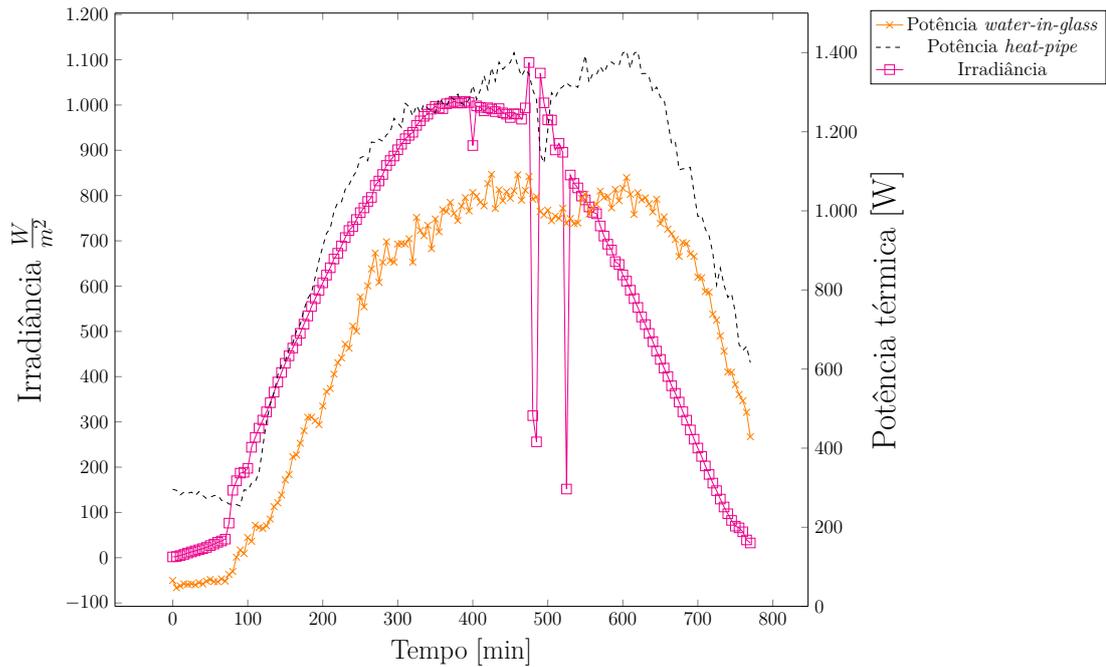


Figura 6.5 – Evolução da potência térmica convertida ao longo do um dia de ensaio em dia 28 de novembro

Conforme os resultados obtidos, e em concordância com os coletados no dia 24 de setembro o *heat-pipe* entra em regime mais rápido, e além disso, produz mais energia que o coletor *water-in-glass*. Foram realizados ensaios dos coletores em dias com diferentes condições com o intuito de analisar seu comportamento sob diversas circunstâncias, especialmente de irradiância. Na Figura 6.6, são indicados os resultados do dia 30 de setembro. Nesse dia, utilizaram-se as medidas na faixa horária próximo ao meio dia, com o objetivo dos coletores aquecerem mais rápido. O dia caracterizou-se por ter uma temperatura ambiente um pouco maior que nos outros dias utilizados, variando entre de 26°C e 35°C. Do mesmo modo, os resultados obtidos são consistentes com os resultados medidos no dia 24 de setembro e 28 de novembro, como pode ser visualizado nas Figuras 6.4 e 6.1 respectivamente, resultados similares aos obtidos por [Hayek et al., 2011] e [Al-Joboory, 2019]. Novamente, a eficiência média do coletor *heat-pipe* esteve por volta de 20% acima do coletor *water-in-glass*. A Figura 6.7 indica o penúltimo ensaio realizado, no dia 11 de outubro. Esse dia caracterizou-se por ter períodos nublados e temperaturas ambiente altas, variando de 30 °C a 40 °C. Mais uma vez, esse dia mostrou uma mesma condição comparado aos outros dias, isto é, uma eficiência 20% superior no *heat-pipe* com respeito ao coletor *water-in-glass*.

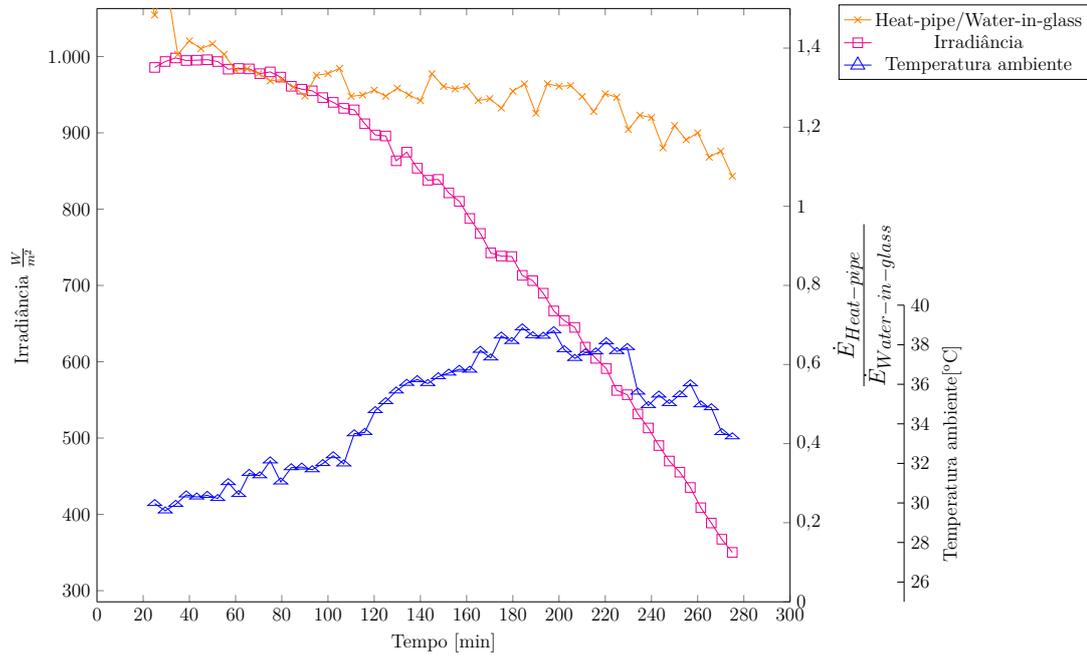


Figura 6.6 – Razão entre a potência térmica convertida no coletor *heat-pipe* e *water-in-glass* no dia 30 de setembro de 2019

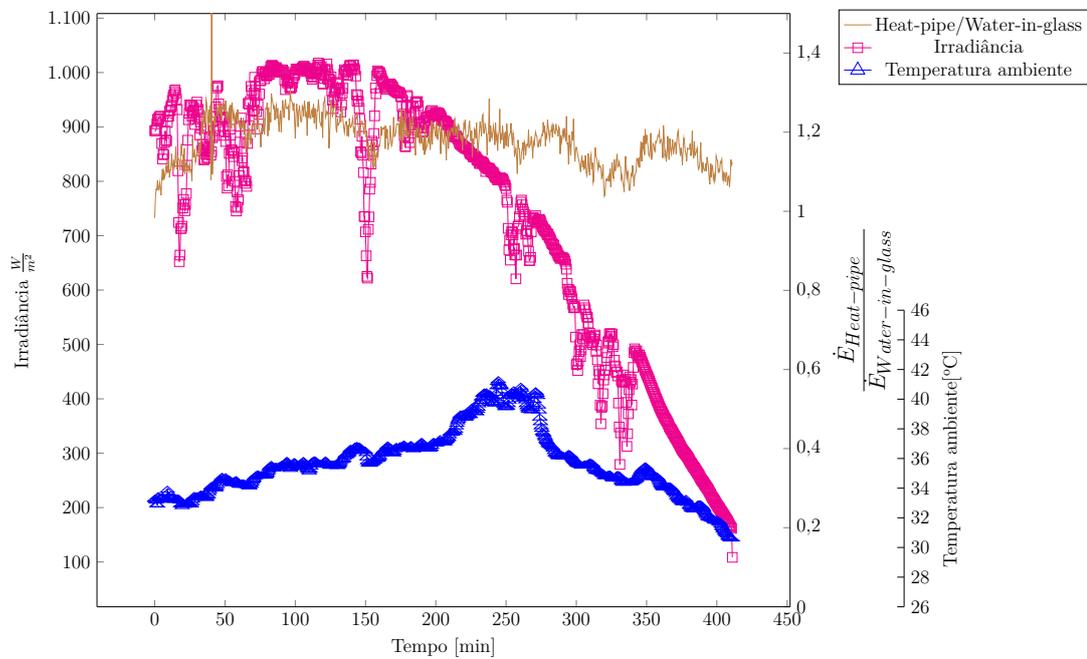


Figura 6.7 – Razão entre a potência térmica convertida no coletor *heat-pipe* y *water-in-glass* em dia 11 de outubro 2019

6.1 Ensaio em Dia com Nebulosidade

Foram feitas medições dos coletores em dias onde a irradiância teve fortes variações, com o objetivo de avaliar a reação dos sistemas e a influência destas no rendimento dos coletores, as medidas foram realizadas no dia 9 de outubro e os resultados são apresentados na Figura 6.8. O intervalo de tempo medido teve valores de temperaturas ambiente na faixa entre 26°C a 35 °C e com presença de nuvens. Os resultados nesse intervalo de tempo medido mostram que ambos os coletores, quando a radiação é obstruída por uma nuvem e a parcela de radiação difusa é maior, sofrem uma queda na sua conversão. Comparado o coletor de tubo preenchido e o *heat-pipe*, o segundo sofre uma queda maior e mais rápida na sua potência térmica. Entretanto, nas condições de céu limpo, quando a nuvem passa, o coletor de *heat-pipe* consegue se recuperar em um tempo menor do que o *water-in-glass*, devido à menor massa de fluido que tem que aquecer. O aquecedor *water-in-glass* mostra ter menor sensibilidade a essas variações devido à maior massa de água contida nos tubos aumentando a sua capacidade térmica. Com isso, a conversão de energia total do período analisado, calculada a partir do somatório dos ganhos instantâneos, foi maior, chegando a 20% mais que o coletor de *heat-pipe* nesse dia. A conversão energética do coletor *heat-pipe* foi de 17,67 MJ enquanto a conversão do coletor *water-in-glass* de 21,19 MJ aproximadamente.

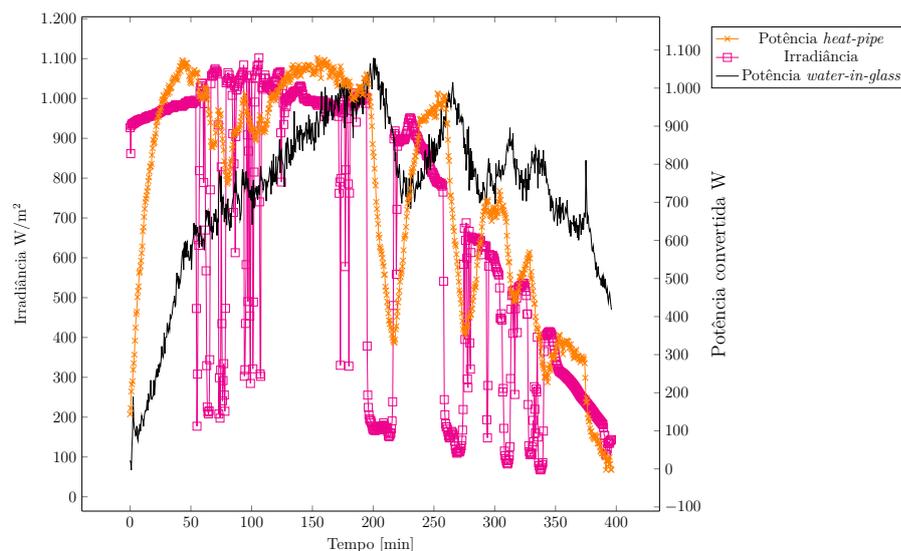


Figura 6.8 – Evolução da potência térmica convertida em cada coletor no dia 9 de outubro.

7 CONCLUSÕES

Foi projetada e construída uma bancada de ensaios com dois coletores solares de tubo evacuado, um do tipo *heat-pipe* e outro do tipo *water-in-glass*, nas instalações do LABSOL-UFRGS. A bancada foi utilizada para realizar a comparação desses dois tipos de coletores solares conectados em série, no mesmo plano e inclinação de modo a garantir que ambos se mantivessem sob condições iguais durante o teste. As provas preliminares dos tubos de vidro, mostraram que eles tinham características térmicas similares, tendo em vista que a diferença entre o aumento de temperatura entre entrada e saída de um coletor com os tubos de um fabricante com relação ao coletor com os tubos de outro fabricante foi menor que $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ o que fica perto das incerteza da medição, e portanto foram assumidos como tendo suas propriedades ópticas e térmicas iguais.

A pasta térmica prevista por alguns fabricantes foi testada para avaliar a influencia dela na transferência de calor em coletores *heat-pipe*. A bancada foi montada utilizando o cabeçote de um coletor *heat-pipe* e instrumentada com sensores de temperatura termopares tipo T. Pelos resultados foi possível concluir que a pasta térmica não tem influencia apreciável no desempenho do coletor, pois o aumento de temperatura na parte instalada com a pasta no coletor foi de $1,5^{\circ}\text{C}$ e sem pasta térmica a diferença foi de $1,6^{\circ}\text{C}$ com uma incerteza de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, isto é, as diferenças nas medições ficaram dentro das incertezas.

Feitas as análises, os resultados obtidos mostram que o coletor do tipo *heat-pipe* apresenta uma conversão energética 18% a 20% superior que o seu par de tubo preenchido. Segundo os dados obtidos nos dias de ensaio exibidos, o tempo para alcançar o regime de operação do coletor *water-in-glass* é superior, devido à sua alta capacidade térmica. Os dias de ensaio caracterizaram-se por apresentarem diferentes temperaturas ambientes ao longo do tempo, com variações de até 15°C em um mesmo dia, embora os coletores não mostraram variações no seu desempenho, isto devido ao isolamento que oferecem os tubos evacuados. O ensaio em dias com intervalos nublados mostrou que a alta capacidade térmica que tem o coletor *water-in-glass* o favorece em dias com nuvens dispersas, devido ao fato que depois dele entrar em regime, ele precisa também mais tempo para reduzir sua taxa de transferência de calor. Por outro lado o coletor *heat-pipe* começa a transferir calor para a água mais rapidamente mas, também é mais sensível às variações da irradiância. Quando a irradiância diminui, a transferência de calor em ambos coletores começa a

reduzir-se, porém a queda na transferência de calor do coletor *heat-pipe* é maior que o outro, mas também se recupera mais rápido. O coletor *water-in-glass* também reduz a sua potência térmica convertida quando a irradiância solar cai, mas não na mesma proporção quanto no *heat-pipe*. Conseqüentemente, quando a nuvem passa e a radiação volta a ter a parcela importante da componente direta, a transferência se reduz menos, a água de preenchimento dos tubos ainda está aquecida, tendo que recuperar menos energia para voltar ao regime de funcionamento. Ao comparar os dias 9 e 11 de outubro, ambos tiveram períodos com nebulosidade, não obstante o dia 9 teve períodos onde a radiação caiu mais do que o dia 11, nesses períodos onde a radiação se manteve baixa por mais tempo o coletor *heat-pipe* mostrou maior diminuição na entrega de energia para a água.

A capacidade térmica tem influência importante sobre o comportamento dos coletores. Observa-se que quando os coletores *water-in-glass* chegam a um regime estável, ficam menos suscetíveis a terem perdas dependentes de diminuições na irradiância. Em dias em que a radiação se apresentou instável, com nuvens intermitentes, os resultados mostraram que o coletor *heat-pipe* teve maior prejuízo na comparação. Nestas condições o desempenho do coletor *heat-pipe* pode estar 20% abaixo do coletor *water-in-glass*.

7.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Realizar simulações anuais de transferência de calor e análise econômica dos coletores.
- Fazer o estudo usando o coletor com tanque acoplado com circulação em convecção natural para os dois coletores.
- Realizar os testes seguindo os parâmetros da ABNT em quanto a medição da diferença de temperatura e monitoramento da vazão.
- Repetir os testes em época do inverno para conhecer o seu rendimento com condições de irradiância baixa e temperatura ambiente fria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação**. Standard, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

ABNT. **Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares Parte 2: Métodos de ensaio**. Standard, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

Al-Joboory, H. Comparative experimental investigation of two evacuated tube solar water heaters of different configurations for domestic application of Baghdad-Iraq, **Energy and Buildings**, vol. 203, p. 109–121, 2019.

Allouhi, A., Jamil, A., Kousksou, T., El Rhafiki, T., Mourad, Y., e Zeraouli, Y. Solar domestic heating water systems in Morocco: An energy analysis, **Energy Conversion and Management**, vol. 92, p. 105–113, 2015.

Ancines, C. **Comparação entre o desempenho de um coletor híbrido térmico fotovoltaico com o de um coletor plano e um módulo fotovoltaico convencional**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Apricus. **Detalhe ciclo de trabalho *heat-pipe***. <http://http://www.apricus.com/>, 2019, Acesso em: 15-06-2019.

ASHRAE. **Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors**. Standard, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GO, 2003.

Ayompe, L., Duffy, A., Mc Keever, M., Conlon, M., e McCormack, S. Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate, **Energy**, vol. 36(5), p. 3370–3378, 2011.

Bioenergy, I. **IEA Bioenergy Countries Brazil Update 2018**. IEA Bioenergy Countries Report Update 2018. Federal Ministry of Transport, Innovation and Technology of Austria, 2019.

Budihardjo, I. e Morrison, G. Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters, **Solar Energy**, vol. 83(1), p. 49–56, 2009.

David, J. S., Viveckraj, J., Seralathan, S., e Varatharajan, K. Comparative Study of Solar Water Heating Systems - Flat Plate Collector (FPC) with Evacuated Tube Collector, **International Journal of Engineering Research in Africa**, vol. 26, p. 76–85, 2016.

Duffie, J. A. e Beckman, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. Wiley, 2013.

Facão, J. e Oliveira, A. C. Analysis of a plate heat pipe solar collector, **International Journal of Low-Carbon Technologies**, vol. 1(1), p. 1–9, 2006.

Firebird. **Installation Instructions TZ58-1800 Heat Pipe Collector.** https://www.firebird-solar.com/images/stories/downloads/TZ58-1800_Firebird_installation_instructions_heat_pipes.pdf, 2019, Acesso em: 29-11-2019.

Fujisol. **Colectores Heat Pipe Fujisol. Manual de instalación uso y mantenimiento.** <https://www.fujisol.com/pdf/FUJI-C-manual-instalacion-mantenimiento.pdf>, 2019, Acesso em: 27-11-2019.

Gao, X., Guo, Z., Geng, Q., Ma, P., e Liu, G. Microstructure and Optical Properties of SS/Mo/Al₂O₃ Spectrally Selective Solar Absorber Coating, **Journal Of Materials Engineering And Performance**, vol. 26(1), p. 161–167, 2016.

Haim, A., Purucke, M., e Fischer, M. Ensayo de colectores solares térmicos bajo norma IRAM - la importancia de métodos estandarizados en la elección del equipo, dimensionamiento de sistemas y regulación del mercado, **3º Congreso Interamericano De Cambio Climatico**, vol. 1(3), p. 3–10, 2018.

Hayek, M., Assaf, J., e Lteif, W. Experimental Investigation of the Performance of Evacuated-Tube Solar Collectors under Eastern Mediterranean Climatic Conditions, **Energy Procedia**, vol. 6, p. 618–626, 2011.

Hudon, K. **Future energy.** Elsevier Science & Technology, Oxford, 2nd edition, 2014.

IRAM. **Energía solar. Sistemas de calentamiento de agua sanitaria. Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares.** Standard, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, CABA, 2016.

Kalogirou, S. **Solar energy engineering.** Academic Press, Elsevier, Amsterdam, 4th edition, 2013.

Lafay, J.-M. S. **Análise Energética de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

Manea, T. **Desenvolvimento de uma Bancada para Ensaio de Coletores Solares de Tubos de Vidro a Vácuo.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

Mazarrón, F., Porras-Prieto, C., García, J., e Benavente, R. Feasibility of active solar water heating systems with evacuated tube collector at different operational water temperatures, **Energy Conversion and Management**, vol. 113, p. 16–26, 2016.

Morrison, G. e Braun, J. System modeling and operation characteristics of thermosyphon solar water heaters, **Solar Energy**, vol. 34(4-5), p. 389–405, 1985.

Morrison, G., Budihardjo, I., e Behnia, M. Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters., **Solar Energy**, vol. 76(1-3), p. 135–140, 2004.

Naranjo Toro, J., Alves Ancines, C., Ferreira dos Santos, C., e Krenzinger, A. Comparative analysis of a passive system with an active water heating system using vacuum glass tubes solar collector, **Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, vol. 1, 2015.

Pei, G., Li, G., Zhou, X., Ji, J., e Su, Y. Comparative Experimental Analysis of the Thermal Performance of Evacuated Tube Solar Water Heater Systems With and Without a Mini-Compound Parabolic Concentrating (CPC) Reflector($C < 1$), **Energies**, vol. 5(4), p. 911–924, 2012.

Prolazerdf. **Aquecedor de piscina**. <http://prolazerdf.com.br/aquecedor-solar-para-piscina-e-residencia-df/>, 2019, Acesso em: 05-06-2019.

Schneider, P. **Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos**, 2011.

Spower. **Installation Instructions Heat Pipe**. <https://enerworks.com/downloads/S-Power-Heat-Pipe-Installation-Manual.pdf?x59561>, 2019, Acesso em: 29-11-2019.

Suntask. **Solar Water Heaters Catalogue**. <http://www.technogroups.com/pdf/thermPDF/suntask/Suntask-Catalogue.pdf>, 2011, Acesso em: 27-11-2019.

Weiss, W. e Spörk-dur, M. **Solar Heat Worldwide**", **Institute for Sustainable Technologies**. <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2019.pdf>, 2019, Acesso em: 02-03-2019.

Zambolin, E. e Del Col, D. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions, **Solar Energy**, vol. 84(8), p. 1382–1396, 2010.

Zantia. **Manual De Instruções Instalação, Utilização E Manutenção Colector Solar De Tubos De Vácuo Sistema Heatpipe**. https://zantia.com/storage/products_files/02/070/015/5/VwNmoJU19t-manualcolectorvacuoheatpipe.pdf, 2019, Acesso em: 27-11-2019.

Zhiqiang, Y. Development of solar thermal systems in China, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 86(3), p. 427–442, 2005.