

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gabriel Silva de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE COLETORES SOLARES DE BAIXO CUSTO
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA EM PISCINAS RESIDENCIAIS**

Cachoeira do Sul, RS
2019

Gabriel Silva de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE COLETORES SOLARES DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA EM PISCINAS RESIDENCIAIS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana

Cachoeira do Sul, RS

2019

Gabriel Silva de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE COLETORES SOLARES DE BAIXO CUSTO PARA
AQUECIMENTO DE ÁGUA EM PISCINAS RESIDENCIAIS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 11 de julho de 2019:

Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. César Gabriel dos Santos (UFSM)

Prof. Dr. Juan Galvarino Cerda Balcazar (UFSM)

Cachoeira do Sul, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente em cada etapa deste estudo e, agradeço também, de maneira especial:

- A Deus, pelo dom da vida e toda a proteção;
- Aos meus pais, Fábio Rogério de Oliveira e Rosângela Silva de Oliveira, por todo o amor, carinho, incentivo e dedicação para minha educação.
- Ao Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana pelos ensinamentos e orientações para o desenvolvimento deste trabalho.
- A minha irmã, Luiza Silva de Oliveira, por todo o amor e apoio em todos os momentos.
- A minha namorada, Steffani Streb de Lima, por todo carinho, amor, paciência e conselhos ao longo da realização deste trabalho.
- A minha tia, Ângela Silva de Oliveira, por todo o empenho e dedicação no auxílio da realização deste estudo.
- Ao Prof. Dr. Charles Rech pela disponibilização dos sensores de temperatura.
- A Prof. Dr. Jordana Moura Caetano pela disponibilização dos dados da estação meteorológica fornecida pela empresa METOS.

*"Quando tudo tiver parecendo ir contra
você, lembre-se que o avião decola
contra o vento, e não a favor dele."*

(Henry Ford)

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE COLETORES SOLARES DE BAIXO CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA EM PISCINAS RESIDENCIAIS

AUTOR: Gabriel Silva de Oliveira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana

Neste estudo foi analisado a viabilidade de instalação de aquecedores solares alternativos de baixo custo na cidade de Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, tendo seu principal foco no aquecimento de água para piscinas residenciais, visando garantir o conforto térmico. Para tal, foi realizado um estudo térmico em dois modelos de coletores solares, um com cobertura e o outro sem. Os coletores desenvolvidos foram construídos com tubos de PVC, e, no caso do coletor com cobertura, foi também construída com a utilização de garrafas do tipo PET. O método para avaliar o desempenho de ambos os coletores foi por meio da medição experimental da variação da temperatura da água armazenada no coletor. Os resultados mostraram a inviabilidade do projeto de aquecedores solares de baixo custo em piscinas residenciais devido à grande quantidade de coletores necessários para o aquecimento do volume de água e a baixa eficiência dos aquecedores. O maior valor de eficiência encontrado foi para o coletor solar com cobertura, em torno de 15,92%, sendo a temperatura máxima atingida no interior do aquecedor, de 50°C. Entretanto, fica comprovada a capacidade dos aquecedores solares desenvolvidos de realizar um incremento considerável de temperatura, em torno de 36°C, para baixos volumes de água, abrindo uma grande possibilidade de aplicação em residências para o aquecimento da água do chuveiro e possibilitando a diminuição do consumo de energia elétrica para conversão em energia térmica.

Palavras-chave: Aquecedor solar alternativo. Análise experimental de aquecedores. Dimensionamento térmico.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF LOW COST SOLAR COLLECTORS FOR WATER HEATING IN RESIDENTIAL SWIMMING POOLS

AUTHOR: Gabriel Silva de Oliveira

ADVISOR: Prof. Dr. Cristiano Frandalozo Maidana

In this study, the feasibility of installing low cost alternative solar heaters in the city of Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, was analyzed. Its main focus is on the heating of water for residential swimming pools, in order to guarantee thermal comfort. For this, a thermal study was carried out on two models of solar collectors, one with cover and the other without. The collectors developed were constructed with PVC pipes, and in the case of the collector with cover, it was also built using PET bottles. The method to evaluate the performance of both collectors was by means of the experimental measurement of the temperature variation of the water stored in the collector. The results showed the inviability of the project of low cost solar heaters in residential swimming pools due to the large quantity of collectors required for the heating of the water volume and the low efficiency of the heaters. The highest efficiency found was for the solar collector with coverage, around 15,92%, and the maximum temperature reached inside the heater of 50 ° C. However, the capacity of the solar heaters to realize a considerable increase of temperature for low volumes of water is proved, opening a great possibility of application in residences for the heating of the water of the shower and enabling the reduction of the consumption of electric energy for conversion into energy thermal.

Keywords: Alternative Solar Heater. Experimental analysis of heaters. Thermal dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos tipos de aquecedores de água.	14
Figura 2 – Aquecedor a gás do tipo de passagem (esquerda) e do tipo acumulação (direita)..	16
Figura 3 – Aquecedor solar comercial.....	18
Figura 4 – Aquecedor solar de baixo custo em PVC.....	18
Figura 5 – Radiação solar no verão para uma superfície a 45°.....	19
Figura 6 – Radiação solar no inverno para uma superfície a 45°.	20
Figura 7 – Radiação solar em Santa Maria.....	21
Figura 8 - Balanço de energia nos tubos do coletor solar com cobertura.....	23
Figura 9 - Projeto coletor solar sem cobertura elaborado no software SolidWorks®.....	26
Figura 10 - Detalhamento da montagem do coletor solar elaborado no software SolidWorks®.	26
Figura 11 - Projeto da cobertura dos coletores solares.....	27
Figura 13 - Conexão entre TÊs.....	29
Figura 14 - Montagem dos tubos.....	29
Figura 15 – Processo de pintura do coletor solar.....	30
Figura 16 – Termômetro de platina instalado no coletor solar.....	31
Figura 17 - Termômetro de mercúrio utilizado para medição da temperatura do ar.....	31
Figura 18 - Coletor finalizado. As setas vermelhas indicam os locais de instalação dos sensores de temperatura.	32
Figura 19 – Processo de colagem dos cilindro de garrafa PET para a construção da cobertura.	33
Figura 20 - Coletor solar com cobertura.....	34
Figura 21 - Gráfico de aferição dos sensores.	35
Figura 23 - Relação do volume de água aquecido ao número de aquecedores sem cobertura necessários.....	44
Figura 24 - Relação do número de aquecedores com cobertura ao volume de água aquecido a 30°C.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Área do coletor solar
ANAPP	Associação Nacional dos Fabricantes Construtores de Piscinas e Produtos Afins
G	Irradiação solar
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
\bar{h}	Coefficiente de transferência de calor por convecção médio
I	Índice de radiação solar
m	Massa da água
NBR	Normas Brasileiras
PET	Politereftalato de etileno
PVC	Policloreto de vinila
S	Área do coletor solar
UV	Ultra Violeta
A_{cob}	Área da cobertura
c_p	Calor específico da água a pressão constant
G_{abs}	Irradiação absorvida pelo material
q_{ar}	Quantidade de calor perdida por convecção natural
Q_C	Quantidade de calor
q_{cond}	Quantidade de calor que entra através da cobertura
q_{conv}	Quantidade de calor que é perdida por convecção natural
q_{entra}	Quantidade de calor que entra no sistema
q_{rad}	Quantidade de calor proveniente de radiação solar
r_{cob}	Raio do cilindro da cobertura
r_{tubo}	Raio do tubo de PVC do coletor
t_f	Temperatura final da água
t_i	Temperatura inicial da água
T_{m_e}	Temperatura da água na entrada do coletor
T_{m_s}	Temperatura da água na saída do coletor
T_s	Temperatura da superfície do coletor solar
$T_{S_{cob}}$	Temperatura superfície da cobertura
T_{∞}	Temperatura do fluido (ar)
α	Absortividade do material

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA	10
1.2	CONTEXTO	10
1.3	FOCO	11
1.4	OBJETIVOS	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	ESTADO DA ARTE.....	12
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS AQUECEDORES	14
2.2.1	Aquecedores elétricos.....	15
2.2.2	Aquecedores a gás	15
2.2.3	Aquecedores solares	17
2.3	POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR DO RIO GRANDE DO SUL.....	19
2.4	EQUACIONAMENTO.....	21
2.4.1	Dimensionamento Térmico	21
3	METODOLOGIA	25
3.1	PROJETO E CONSTRUÇÃO DAS BANCADAS DE TESTES	25
3.1.1	Projeto	25
3.1.2	Materiais para construção do protótipo analisado	28
3.1.3	Construção das bancadas	29
3.2	AFERIÇÃO DOS SENSORES.....	34
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	RESULTADOS DO COLETOR SOLAR SEM COBERTURA.....	36
4.2	RESULTADOS DO COLETOR SOLAR COM COBERTURA	44
4.3	COLETOR SEM COBERTURA X COLETOR COM COBERTURA	51
5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A utilização de novas formas de energia para aquecimento da água, principalmente as energias limpas, se torna de grande valia, visto que, a poluição ambiental é um assunto preocupante e que deve ser levado em consideração em qualquer projeto.

Portanto, este estudo trata da utilização de uma forma alternativa de energia para aquecimento de água através da utilização da energia solar, uma vez que este é um recurso energético abundante no Brasil e sem um valor financeiro agregado, bem como, sem prejuízos ambientais.

A aplicação deste estudo é voltada para a utilização da energia solar para o aquecimento de água em piscinas residenciais, garantindo o conforto térmico dos banhistas através da utilização de coletores solares de baixo custo, com materiais alternativos.

1.2 CONTEXTO

O consumo de água quente no Brasil é influenciado por diversos fatores, como as condições climáticas, o crescimento de novas tecnologias e principalmente o costume dos consumidores. (BRECHT, 2016).

A partir do estudo de Silva et al. (2005), as novas formas de produção de energia, principalmente as renováveis, se encaminham para o desenvolvimento e maior aplicação. Visto que o petróleo não é uma fonte renovável de energia e sua disponibilidade está aumentando o valor no mercado global, assim como a energia elétrica que não é disponibilizada em regiões mais afastadas.

Conforme Santos (2010), o Sol é encarregado pelo princípio de todas as outras fontes de energia, ou seja, estas são decorrentes da energia do Sol. Uma das mais propícias entre todas as energias, assim como fonte de calor quanto de luz, está a energia proveniente do Sol, interminável na escala terrestre de tempo.

Segundo Eletrobrás (2012), nos anos 1970, devido à crise do petróleo, teve início estudos e conceitos introduzidos sobre o aquecimento solar no mercado brasileiro. Em 1980 o crescimento do setor foi parcialmente baixo, entretanto, verificou-se uma maior especialização na área devido ao aparecimento de empresas puramente ligadas ao aquecimento solar de água. O crescimento ocorreu na década de 1990, quando aconteceu um aumento da prática da qualidade, da variedade de produtos acessíveis, da credibilidade e da tecnologia solar.

De acordo com Moreira (2013), o aumento exponencial da população faz com que cresça a dificuldade em atender as necessidades humanas, é fundamental que a energia solar aplicada seja da melhor forma possível, visto que o Brasil tem um amplo potencial de energia renovável, principalmente a energia solar.

1.3 FOCO

Está baseado na análise térmica da utilização de coletores solares de baixo custo para a aplicação no aquecimento de água em piscinas residenciais, através da construção de um coletor a partir de materiais alternativos, visando o baixo custo e o menor impacto ambiental.

1.4 OBJETIVOS

Desta forma, com base no que foi exposto, o objetivo geral deste estudo consiste na realização da análise térmica experimental de um coletor solar de baixo custo aplicado a piscinas residenciais. Os objetivos específicos são:

- Construir e analisar experimentalmente um aquecedor solar, com cobertura e sem, baseado nos requisitos de projeto;
- Realizar um comparativo entre os desempenhos apresentados com a introdução da cobertura.
- Identificar a viabilidade de aplicação de coletores solares de baixo custo no aquecimento de água de piscinas residenciais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTADO DA ARTE

Diversos autores já realizaram estudos sobre aquecedores solares de baixo custo, objetivando diversos aspectos deste instrumento de aquecimento de água. A seguir são relatados alguns desses autores apresentando aspectos tidos como importante para a complementação deste estudo.

Em seu estudo, Soares (2012) disserta sobre o uso de energia limpa em um sistema de aquecimento de água para piscina, na cidade de Medianeira, no Paraná. O sistema é constituído em canos de PVC objetivando resistir a degradação devido ao alto teor de cloro da água de piscinas e reduzir o custo de fabricação. Foram constituídos 6 coletores com área de 1,5m², possuindo controle tanto manual quanto automatizado através do uso de controladores de temperatura. A partir de dados de temperatura de entrada e saída da água no sistema foi possível a verificação da eficiência de funcionamento do aquecedor solar alternativo. Os coletores desenvolvidos efetuaram o aquecimento da água de acordo com a irradiação solar e não tiveram vazamentos identificados. Para uma circulação de 3.000l/dia foi possível obter uma temperatura média de saída da água de 30°C, para dias com boa insolação. Obteve-se também um ganho de 50% na temperatura da água que circula neste aquecedor.

Costa (2007), desenvolveu um sistema alternativo de aquecimento solar, em regime de termossifão, formado por um coletor solar e reservatório armazenador, ambos alternativos. A superfície absorvedora dos coletores foi construída em canos de PVC pintados de preto fosco e ligados em paralelo, com uma estrutura fabricada com um material compósito, constituído por gesso e isopor. O custo deste aquecedor solar apresentou uma vantagem na utilização de sistemas alternativos relativos aos sistemas disponíveis comercialmente, tendo seu custo inferior a R\$1.000,00. Foi observado que a temperatura dos tubos absorvedores estava abaixo de 60°C, considerado o nível crítico para o início do processo de degradação térmica, a qual tem seu efeito reduzido pela tinta fosca dos tubos, pois os pigmentos pretos são absorvedores da radiação ultravioleta.

Uma comparação realizada por Siqueira (2009) entre aquecedores solares de baixo custo para aquecimento de água em residência, todos constituídos em materiais poliméricos, podendo ser construídos manualmente e com um baixo investimento, foi analisado dois tipos de coletores em relação aos coletores convencionais, constituído em cobre. O primeiro deles, foi construído com perfis planos de PVC rígido e sem costura e o outro coletor utilizou placas de

polipropileno, sendo um material que possui um aditivo anti-UV. Para a realização experimental foi desenvolvido uma bancada de ensaios, visando avaliar as eficiências dos aquecedores solares. O sistema que apresentou o melhor desempenho térmico foi o constituído em polipropileno, pois possibilitou a maior transferência de quantidade útil de calor para a água em relação ao construído em forro de PVC. Os melhores resultados de eficiência térmica para ambos os coletores se obtiveram para uma vazão de 40l/h.

Santos (2007) comparou quatro tipos diferentes de coletores solares alternativos construídos com garrafas do tipo PET. No primeiro aquecedor construído de 48 garrafas PETs e 8 tubos de PVC, obteve-se uma temperatura média de saída de 40,0°C para uma temperatura de entrada média da água de 31,2°C. O coletor com latas semi-abertas, o qual apresentava a mesma configuração do anterior, apresentava três latas semi-abertas no interior das unidades aquecedoras, apresentou uma temperatura média de saída de 37,9°C para uma temperatura média de entrada de 30,2°C. O coletor de latas fechadas continha a mesma configuração do segundo coletor, porém latas fechadas ao invés de semi-abertas, obteve uma temperatura de saída abaixo do anterior, ou seja, temperatura de saída de 36,3°C para a temperatura média de entrada de 30,3°C. E por fim o coletor aletado duplo, composto pelo dobro da área do primeiro, utilizava 96 garrafas PETs, obtendo uma temperatura média de saída de 47,0°C para 33,3°C de temperatura média de entrada.

Em sua pesquisa, Rua et al. (2009) analisou o uso de materiais alternativos, recicláveis e de baixo custo, para o aquecimento de água em residências. Para isso, realizou a construção e análise de um protótipo de aquecedor solar, constituído de um tubo metálico com espessura de parede de 0,3 mm. Visando melhorar a absorção da radiação solar deste tubo, o mesmo foi pintado em preto fosco e envolvido por garrafas do tipo PET transparentes. A análise deste protótipo se deu em leituras de temperatura da água, sendo 6 ao longo do dia, entre as 10 e 16 horas, durante os dias 2 a 4 de julho do ano de 2004. Para um fluxo constante de água de 20l/h obteve-se uma absorção energética no valor de 2,33kW/dia, representando 7,77kW/dia.m² da superfície do coletor solar.

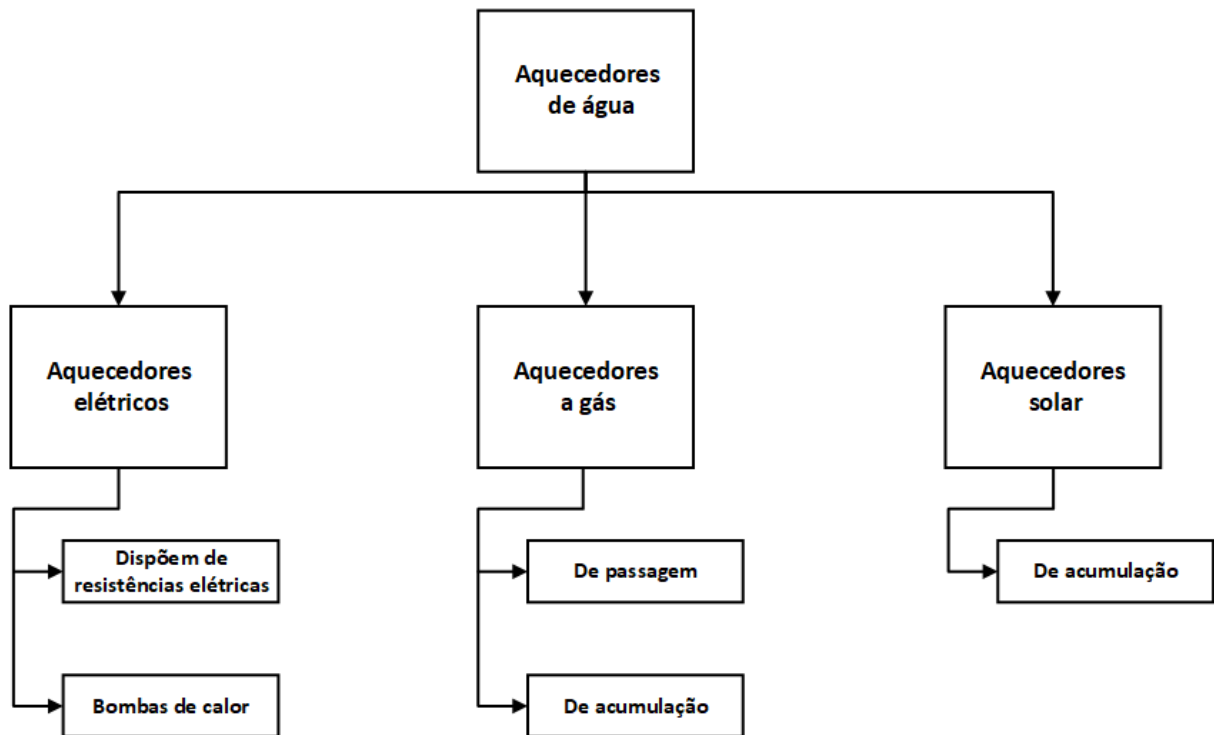
Objetivando a determinação da eficiência térmica de um coletor solar de baixo custo, Coimbra et al. (2008), desenvolveu um estudo sobre um aquecedor solar construído com garrafas do tipo PET e caixas de leite *tetrapak*. Mediu-se o ganho de temperatura da água ao passar por este aquecedor através de uma bancada de testes, inserindo dois PT100, um na entrada e outro na saída do aquecedor, visando a coleta automática de dados para a determinação da eficiência térmica deste coletor, para uma radiação artificial estimada em 800

W/m². O resultado obtido de eficiência média do aquecedor não foi considerado satisfatório pelos autores, apresentando apenas 11% de eficiência, calculada através da razão entre a taxa de transferência de calor cedida pelas lâmpadas pela taxa de transferência de calor adquirida pelo coletor.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AQUECEDORES

Os aquecedores podem ser classificados, conforme Marques (2006), de três maneiras quanto ao tipo de energia consumida. São eles: os aquecedores elétricos, aquecedores a gás e os aquecedores solares. Na Figura 1 são apresentados os principais tipos de aquecedores de água para uso residencial.

Figura 1 – Esquema dos tipos de aquecedores de água.



Fonte: Adaptado de MARQUES (2006).

Em piscinas residenciais o seu uso está muito associado ao conforto térmico e psicológico. Sendo assim, a temperatura da água deve estar alinhada a estes objetivos. A NBR 10339 regulamenta sobre projeto e execução de piscina, não apresentando, entretanto, valores ideais de temperatura da água que garanta o conforto térmico dos usuários.

A ANAPP (Associação Nacional dos Fabricantes Construtores de Piscinas e Produtos Afins) apresenta alguns valores de temperatura para determinadas atividades físicas em

piscinas, considerando as pessoas que as praticam. A temperatura entre 25°C a 28°C é utilizada em piscinas olímpicas, locais onde são realizados treinamentos esportivos avançados, pois o corpo libera alta quantidade de calor.

Segundo a ANAPP, a faixa de 29°C a 30°C, usada na maioria das piscinas, é indicada para a prática de esportes aquáticos por amadores. Por fim, entre 31°C e 32°C é indicada para bebês de até dois anos de idade e para hidroterapias. Sendo assim, com base nestes valores, para piscinas residenciais podemos definir uma faixa de temperatura adequada entre 27°C e 31°C.

2.2.1 Aquecedores elétricos

Os aquecedores elétricos são aqueles que utilizam a energia elétrica como fonte térmica. Podem ser classificados em dois tipos: os que dispõem de resistências elétricas, que aproveitam do calor fornecido pela energia liberada por efeito joule para aquecimentos de água, e os que são conhecidos como bombas de calor que deslocam calor do ambiente para a água, aquecendo-a. (MARQUES, 2006).

As bombas de calor são utilizadas, conforme Santos (2010), em situações em que se almeja o aquecimento de um fluido ou ambiente, para tal emprega-se dois trocadores de calor, uma válvula de expansão e um compressor. A utilização de energia solar com este ciclo termodinâmico para aquecer a água é, por conta de não depender totalmente de condições ambientais oportunas, considerada inovadora.

De acordo com Manea (2009) a principal desvantagem da energia elétrica é devido ao fato de ser a energia final com menor compatibilidade em relação aos métodos de conversão de energia utilizável na forma de calor.

2.2.2 Aquecedores a gás

A utilização do gás e o suplemento com energia termo-solar, sempre que realizável, expõe como vantagem a ocorrência da energia final ser mais conciliável com os processos de mudança em energia útil na forma de calor. (RAIMO, 2007).

Na última década, segundo Raimo (2007), ainda que apresente alta introdução no sistema produtivo do país e seja uma energia primária, do ponto de vista termodinâmico, harmonizável para aquisição de calor, o gás natural apresenta influência pouco expressiva na área residencial, apresentando maior aplicação para processos de cocção (cozimento).

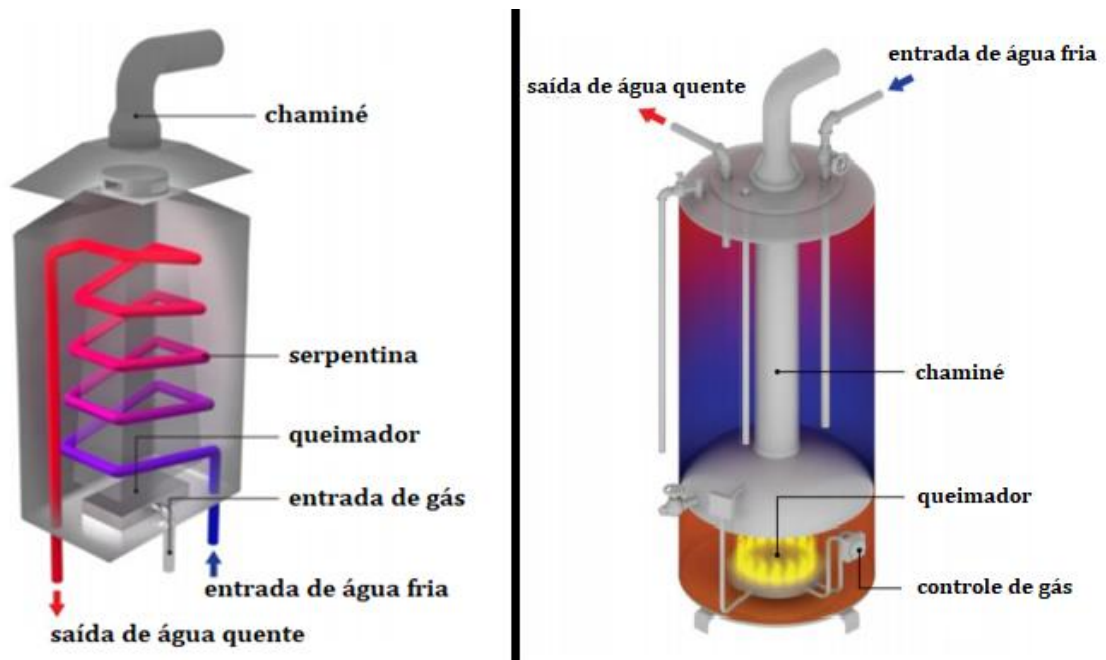
De acordo com Marques (2006), os aquecedores a gás são aqueles que a fonte térmica é disposta do gás liquefeito de petróleo (GLP), comumente presente nas instalações domésticas,

ou também com operação através de gás natural (GN), comumente utilizado em instalações industriais. São normalmente fabricados dois tipos de aquecedores a gás, sendo eles, o de passagem e o de acumulação.

Conforme Lafay (2005), em seu estudo, os aquecedores a gás têm vasta utilização no Brasil para o aquecimento de água. Os aquecedores do tipo de passagem possuem uma eficiência de aproximadamente 80% enquanto que os aquecedores do tipo de acumulação apresentam 85%, avaliando apenas a eficiência de transmissão de calor através câmara de combustão e a água.

Os aquecedores de passagem são compostos por uma unidade de aquecimento em que existe um queimador que possibilita a combustão do gás natural e um trocador de calor que transmite calor gerado para a água, este tipo de aquecedor está ilustrado na Figura 2. O controle do aquecimento é feito mediante um termostato, que possibilita o ajuste de acordo com as demandas do usuário. (COMGÁS, 2011).

Figura 2 – Aquecedor a gás do tipo de passagem (esquerda) e do tipo acumulação (direita).



Fonte: Adaptado de COMGAS (2011).

Na Figura 2, é possível a visualização do princípio de funcionamento, bem como os principais componentes que são essenciais para o funcionamento adequado do aquecedor a gás do tipo de passagem, mais utilizado em residências para o aquecimento de água.

2.2.3 Aquecedores solares

Os aquecedores solares são aqueles que aproveitam como fonte térmica a luz do sol para o aquecimento da água. Quando ocorre inexistência da fonte solar por um longo tempo, muitos destes aquecedores empregam um sistema elétrico adjunto. Comumente aplicado em instalações domésticas. Sua aplicação industrial é restringida pela dificuldade de conseguir grandes potências por conta da necessidade da vasta dimensão dos painéis. (MARQUES, 2006).

Coletor solar, ou aquecedor solar, é o encarregado, conforme Manea (2009), por elevar a temperatura da água devido a absorção da energia irradiada pelo sol sobre o mesmo. Utilizam-se placas de metal, como cobre ou alumínio, para absorção da energia as quais devem ser retratas de cor escura visando melhorar a captação.

Lafay (2005) relata que a energia solar geralmente, para o aquecimento de água, emprega a eletricidade como uma fonte auxiliar de energia. É aplicada uma grande área de coletores solares, devido ao fato de serem projetados de maneira a reduzir a porcentagem da fonte auxiliar de energia, por conta do seu alto custo e para prover as necessidades nos meses de inverno. Por conseguinte, eleva o custo de implementação e proporciona um excesso de calor no verão.

O principal ponto positivo do uso de coletores solares térmicos está na diminuição da utilização de eletricidade, já que ocorre a utilização do aquecimento direto através dos coletores ao invés de utilizar a energia elétrica para o aquecimento da água. (OLIVEIRA, 2014). Inclusive, já existem no mercado vários modelos de chuveiros elétricos compatíveis com o uso conjunto de aquecedores solares.

As Figuras 3 e 4 abaixo apresentam, respectivamente, um coletor solar comercial fabricado pela empresa *Soletrol* e um aquecedor de baixo custo, construído com canos de PVC.

Figura 3 – Aquecedor solar comercial.



Fonte: Adaptado de SOLETROL (2018).

Figura 4 – Aquecedor solar de baixo custo em PVC.



Fonte: Adaptado de SOARES (2012).

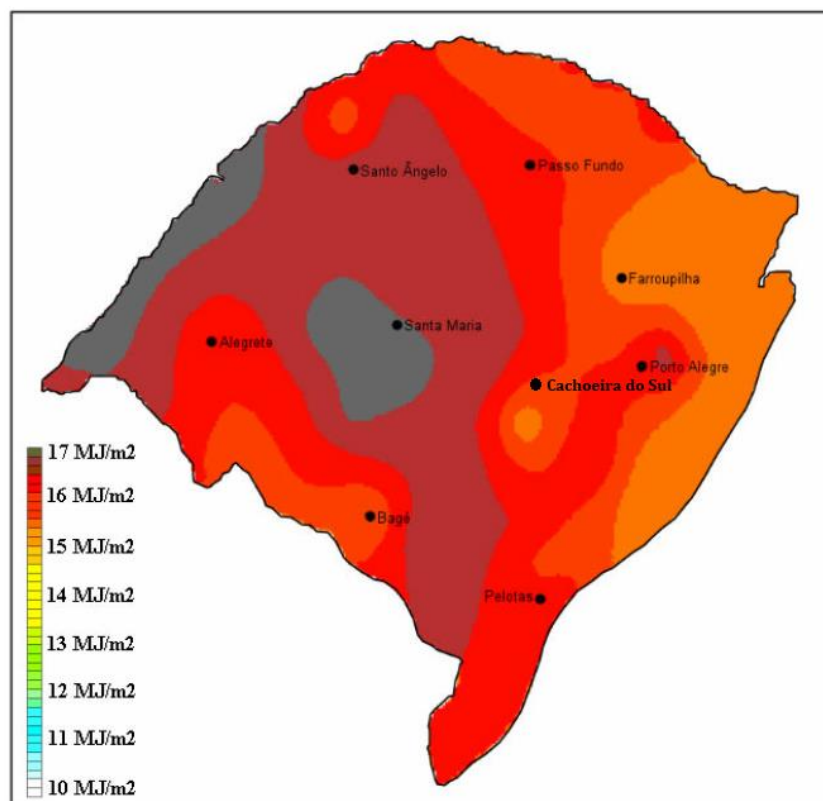
Na Figura 3, podemos ver um aquecedor solar disponível no mercado, com alto grau de tecnologia empregada e, conseqüentemente, um custo mais elevado quando comparado ao aquecedor ilustrado na Figura 4, construído em canos de PVC.

2.3 POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR DO RIO GRANDE DO SUL

De acordo com Macagnan (2010) a radiação solar, pela qual não ocorre nenhum tipo de disseminação pela atmosfera terrestre é denominada de radiação direta, recebida pelo Sol. A radiação difusa é aquela, também recebida pelo Sol, posteriormente a sua mudança de direção devido ao espalhamento da atmosfera. Por fim, a radiação global ou total é dada pelo somatório da radiação direta com a radiação difusa que uma superfície recebe.

Durante o desenvolvimento de sua pesquisa, Pianezzola (2006) construiu mapas de energia solar para uma superfície inclinada em 45° para todas as estações do ano do Estado do Rio Grande do Sul, apresentando a radiação solar total (direta e difusa). A Figura 5, apresenta a radiação solar para o verão, época de maior utilização de piscinas residenciais, para uma superfície a 45°.

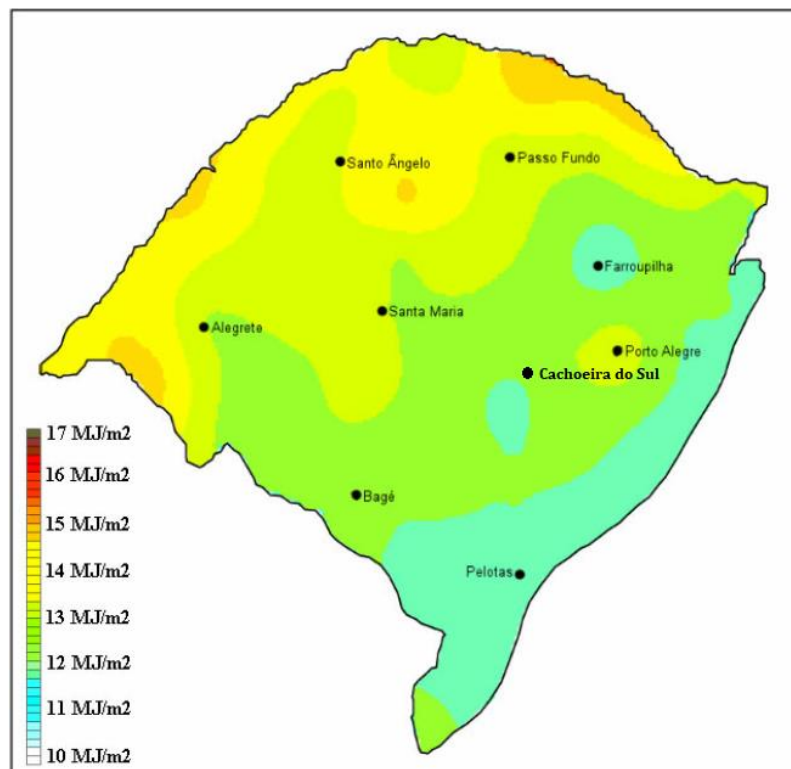
Figura 5 – Radiação solar no verão para uma superfície a 45°.



Fonte: Adaptado de PIANEZZOLA (2006).

Na Figura 5 é possível identificar o grande potencial de radiação solar recebido pela região central do Rio Grande do Sul no verão, sobre uma superfície inclinada a 45°. Este fato favorece a instalação de aquecedores solares no estado, além disso, sugere a instalação do mesmo a 45°.

Figura 6 – Radiação solar no inverno para uma superfície a 45°.

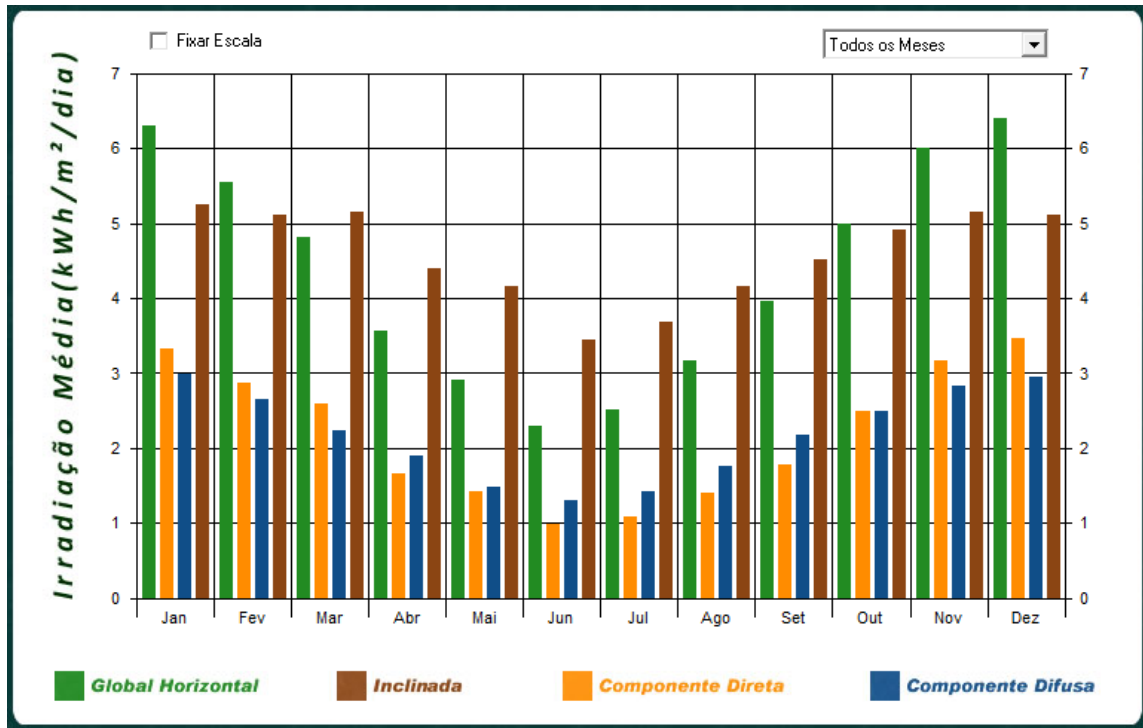


Fonte: Adaptado de PIANEZZOLA (2006).

Na Figura 6 é possível visualizar o potencial solar para o inverno, uma situação extrema na qual mais se necessita a utilização de aquecedores solares em piscinas residenciais, lembrando que nos mapas é apresentado a radiação total, tanto direta quanto difusa.

Utilizando o software *Radiasol2* desenvolvido pelo laboratório de energia solar - LABSOL da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi possível encontrar valores de irradiação média horizontal, inclinada, difusa e direta para a cidade de Santa Maria, RS, a cidade mais próxima de Cachoeira do Sul, onde desenvolveu-se o estudo, com dados disponíveis. A Figura 7 apresenta uma imagem gerada pelo software *Radiasol2* para radiação solar na cidade de Santa Maria, considerando uma superfície horizontal e uma superfície inclinada a 45°.

Figura 7 – Radiação solar em Santa Maria.



Fonte: *Radiasol2*.

Analisando os dados da Fig. 7 podemos ver que para uma superfície inclinada a variação de radiação entre os meses de verão e inverno é menor quando comparada a uma superfície horizontal. Devido a necessidade de aquecimento tanto no inverno quanto no verão, considerando que a menor irradiância ocorre no inverno, podemos perceber que a superfície inclinada apresenta maiores valores de radiação no inverno.

2.4 EQUACIONAMENTO

2.4.1 Dimensionamento Térmico

Mogawer e Souza (2004) realizaram um estudo sobre o dimensionamento de um coletor solar de baixo custo para aquecimento de água em uma residência popular localizada no estado do Rio Grande do Norte. Neste estudo de caso, o dimensionamento foi baseado em duas equações, a primeira para obtenção da quantidade de calor, Q_c , necessária para elevar a temperatura da água na qual era necessária e a segunda para determinar a eficiência do coletor solar, η . As equações utilizadas são:

$$Q_c = mc_p(t_f - t_i) \quad (1)$$

$$n = \frac{Q_c}{IS} \quad (2)$$

onde m é a massa da água [kg], c_p o calor específico da água a pressão constante [kJ/kg°C], t_i é a temperatura inicial da água [°C], t_f a temperatura final da água [°C], I é o índice de radiação [kJ/m² dia] e S é a área do coletor solar [m²].

Os coletores solares recebem sua energia térmica através do sol, ou seja, por irradiação térmica sobre as superfícies externas do aquecedor. A irradiação solar pode ter uma parte ou toda absorvida por uma determinada superfície e por consequência resulta em um aumento da energia térmica do material, a porção pela qual a irradiação é absorvida pelo material dependerá das características do material e é dada pela absorvidade do mesmo, sendo assim é possível calcular a quantidade de irradiação absorvida: (INCROPERA et al., 2008).

$$G_{abs} = \alpha G \quad (3)$$

onde G_{abs} é a irradiação absorvida pelo material [W/m^2], α é a absorvidade do material e G é a irradiação solar [W/m^2].

Sabendo-se a quantidade de irradiação que é absorvida pelo material do coletor solar, é possível calcular a quantidade de calor recebido pelo coletor solar por radiação térmica proveniente do sol, através de:

$$q_{rad} = G_{abs} * A \quad (4)$$

onde q_{rad} é a quantidade de calor proveniente da radiação solar [W] e A é a área do coletor solar [m^2].

Um dos coletores desenvolvidos será formado por tubos com seção transversal circular e não possuíra cobertura, sendo assim, estará exposto ao ar ambiente e perderá calor para o mesmo caracterizando assim uma forma de perda de energia térmica do aquecedor desenvolvido. Esta perda de calor por convecção natural (q_{ar}) pode ser encontrada através da seguinte equação: (INCROPERA et al., 2008).

$$q_{ar} = A\bar{h}(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

onde \bar{h} é o coeficiente de transferência de calor por convecção médio do ar [$W/m^2°C$], T_s é a temperatura da superfície do coletor solar [°C] e T_∞ é a temperatura do fluido (ar) [°C].

Então, torna-se possível encontrar o calor total que entra na superfície do coletor solar, dado pela diferença entre o calor transferido por radiação e o calor perdido por convecção natural, sendo assim, temos: (INCROPERA et al., 2008).

$$q_{entra} = q_{rad} - q_{ar} \quad (6)$$

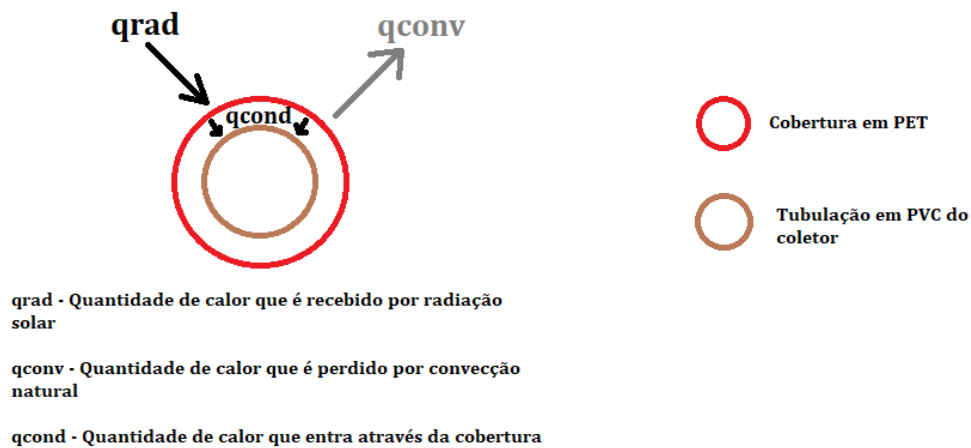
O tempo necessário para que a água no interior do coletor chegue a temperatura desejada na saída do coletor a partir de uma temperatura de entrada da água pode ser obtido através da seguinte forma:

$$t = \frac{m \cdot C_p \cdot (Tm_s - Tm_e)}{q_{entra}} \quad (7)$$

onde m é a massa de água presente no interior do coletor [Kg], C_p é o calor específico da água a pressão constante, Tm_s é a temperatura da água na saída do coletor, Tm_e é a temperatura da água na entrada do coletor e q_{entra} é a quantidade de calor que entra no coletor.

Para o caso do coletor solar com cobertura, será construído um cilindro com garrafas PETs para que a superfície do coletor solar perca menos energia térmica por convecção natural. Como o ar estará confinado no interior deste cilindro, supõe-se que a transferência de calor neste meio se dará por condução de calor, conforme ilustrado na Figura 8 a seguir:

Figura 8 - Balanço de energia nos tubos do coletor solar com cobertura.



Fonte: Autor.

Onde a quantidade de radiação absorvida, é determinada através da Equação (4). Já a quantidade de calor perdida por convecção natural pode ser calculada pela Equação (5), considerando, neste caso, a temperatura da superfície como sendo a temperatura da cobertura de PET.

A partir do balanço de energia e da união da Equação (6) com a Lei de Fourier aplicado na camada de ar da cobertura, a quantidade de calor que entra pode ser calculada através da seguinte equação:

$$q_{entra} = q_{cond} = \frac{A_{cob} * (T_s - T_{s_{cob}})}{\ln\left(\frac{r_{cob}}{r_{tubo}}\right)} \quad (8)$$

onde A_{cob} é a área da cobertura [m^2], $T_{s_{cob}}$ é a temperatura da superfície da cobertura [$^{\circ}C$], r_{cob} é o raio do cilindro da cobertura [m] e r_{tubo} é o raio do tubo de PVC do coletor [m].

Sendo assim, é possível encontrar, com as Equações (6), (7) e (8), o tempo necessário para que a água no coletor com cobertura atinja uma determinada temperatura de saída ou final.

3 METODOLOGIA

Neste estudo foram desenvolvidas análises em um coletor solar construído através de materiais alternativos com a aplicação voltada para piscinas residenciais, visando analisar o desempenho dos dispositivos e sua capacidade de garantir o conforto térmico. O primeira análise baseou-se no coletor solar, o qual foi construído em tubos de PVC, sem cobertura e proteção, e a outra após a instalação de uma cobertura de garrafas do tipo PET de cor transparente.

Posteriormente a construção de ambas as bancadas foram feitas medidas experimentais, através de sensores de temperatura, procurando definir condições ambientais próximas ao local de instalação dos dois coletores. Também foram realizadas medições de temperatura da água de entrada e de saída de cada coletor, com o intuito de obter o ganho térmico de cada um dos dispositivos testados.

Os experimentos foram realizados no mês de junho do ano de 2019, na cidade de Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, onde foi feita a aferição de temperatura nos sensores a cada uma hora e a coleta dos dados para os dois aquecedores. A partir dos dados obtidos foram construídas tabelas, visando analisar e comparar os dados de ambos os coletores.

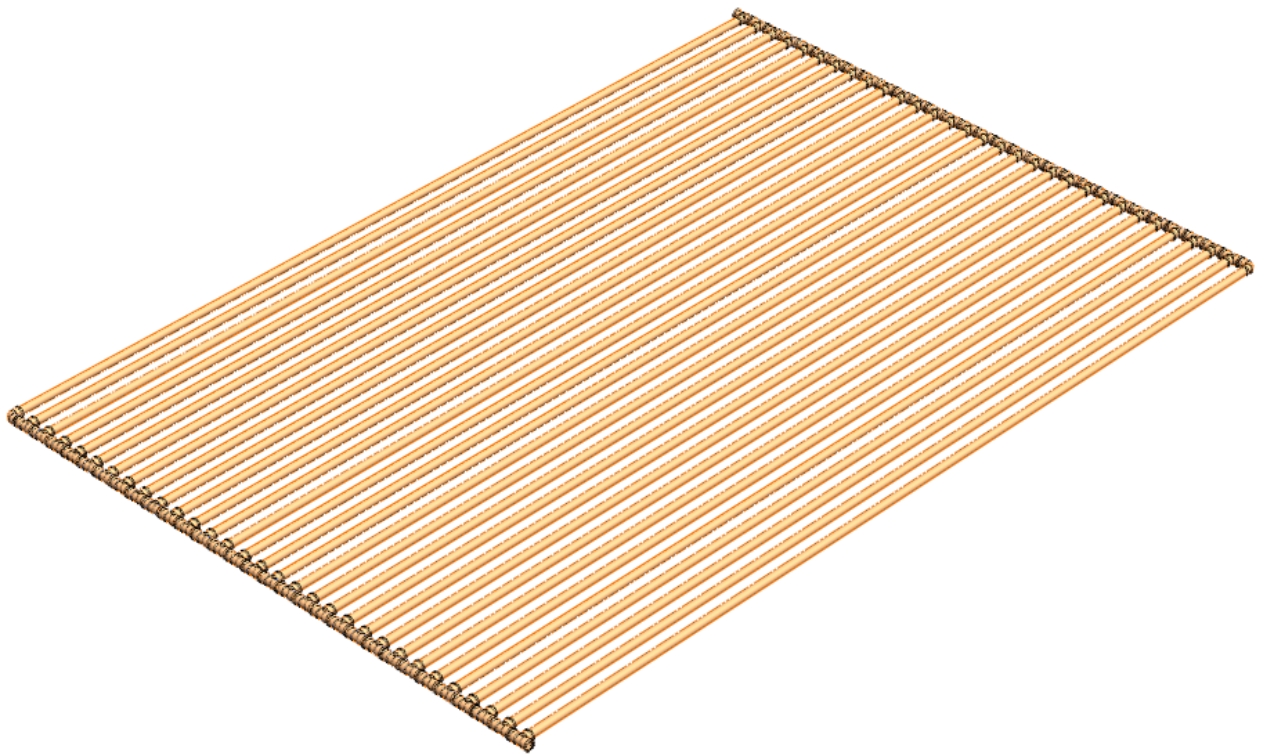
3.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DAS BANCADAS DE TESTES

3.1.1 Projeto

Primeiramente, definiu-se uma área necessária para o coletor solar e o tubo de PVC. Para a escolha da bitola do tubo de PVC, optou-se por tubos encontrados comercialmente e com um custo menor em comparação aos tubos metálicos, além disso, possuem uma menor massa e maior facilidade de montagem. Devido a esses fatores, foi escolhido o tubo de PVC ¾” o qual apresenta um diâmetro externo de 25mm e um diâmetro interno de 21,6mm.

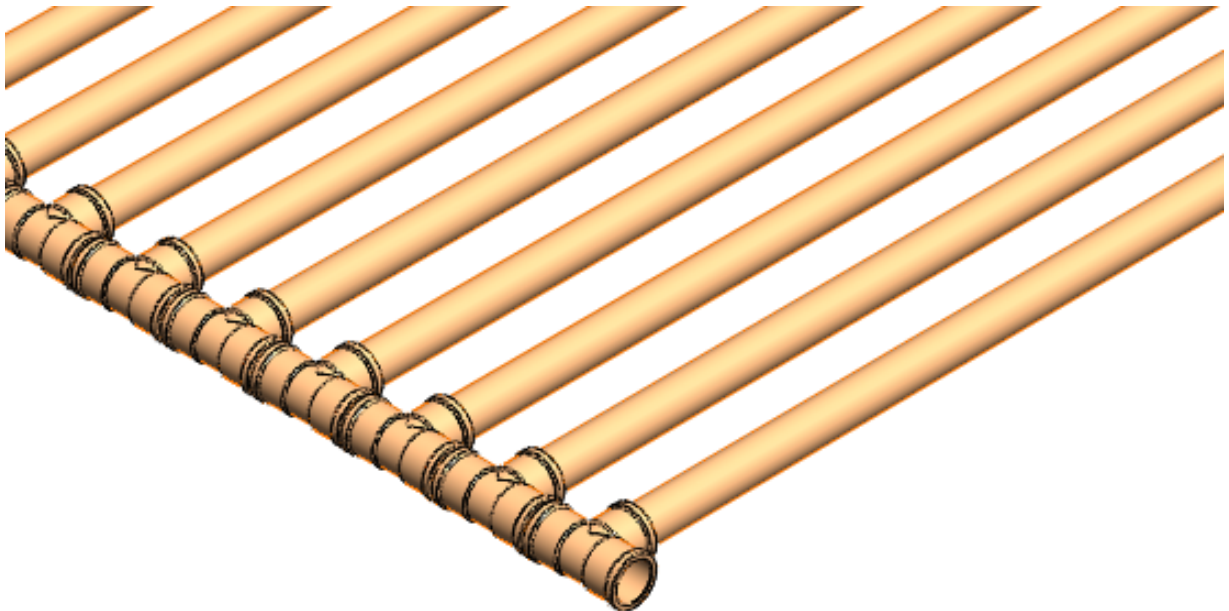
Definido isso, partiu-se para a especificação das dimensões do coletor solar baseando-se nas referências utilizadas, sendo definido para o mesmo a largura de 2000mm e uma altura de 3000mm. Para facilitar a visualização do projeto e a construção do mesmo, foi desenhado os tubos, as conexões utilizadas e feita a montagem do coletor com o auxílio do *software SolidWorks®*. As Figuras 9 e 10 apresentam a montagem final do coletor solar sem cobertura no software.

Figura 9 - Projeto coletor solar sem cobertura elaborado no software SolidWorks®.



Fonte: Autor.

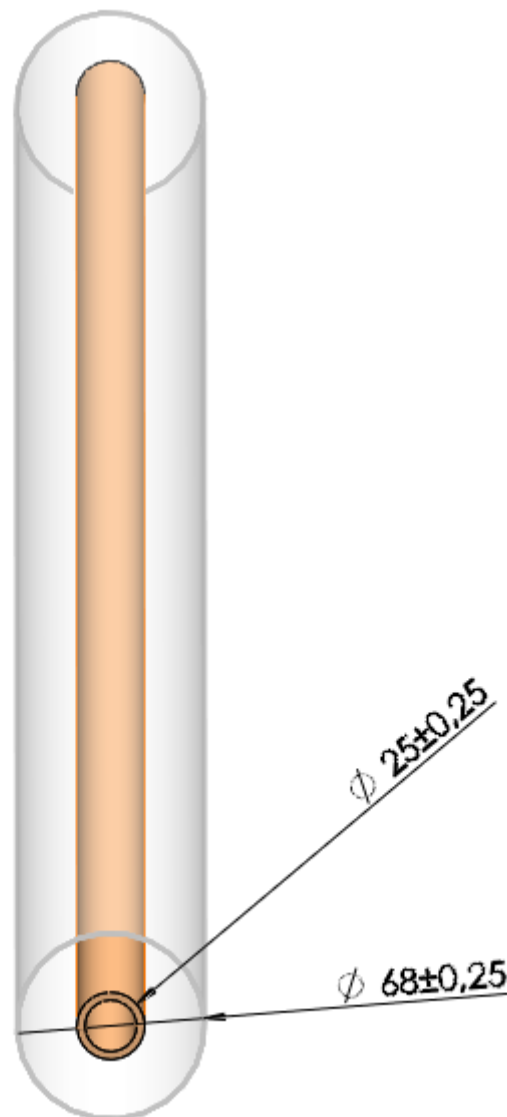
Figura 10 - Detalhamento da montagem do coletor solar elaborado no software SolidWorks®.



Fonte: Autor.

Após a definição do projeto da bancada do coletor solar sem cobertura, decidiu-se projetar uma cobertura possível de ser encaixada no coletor sem cobertura, transformando-o em um coletor com cobertura e permitindo novos testes. Sabendo-se que o tempo de decomposição do PET é superior a cem anos, decidiu-se utilizar garrafas transparentes de 600ml deste material para fazer a cobertura. O projeto consiste em formar um cilindro em torno dos tubos de PVC, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Projeto da cobertura dos coletores solares.



Fonte: Autor.

3.1.2 Materiais para construção do protótipo analisado

Os materiais utilizados para realizar a concepção das bancadas de ensaio dos coletores solares estão listados abaixo:

- 16 Tubos de PVC 3/4" de 6000mm de comprimento;
- Aproximadamente 620 garrafas do tipo PET de 600ml transparente;
- Colas;
- 2 Sensores de temperatura de platina;
- 1 Sensor de temperatura de mercúrio;
- 60 Conexões do tipo TÊ 3/4";
- 2 Conexões 90° 3/4";
- Serra manual;
- Lixas;

Definindo-se os materiais necessários para a construção de ambos os coletores é possível calcular o custo total do projeto, o qual está apresentado na Figura 12.

Quadro 1 - Custo do projeto.

Custo do projeto			
Material	Quantidade	Custo unitário	Custo total
Tubos 3/4"	16,00	R\$ 14,85	R\$ 237,60
Conexão TÊ 3/4"	60,00	R\$ 0,75	R\$ 45,00
Conexão 90° 3/4"	2,00	R\$ 0,65	R\$ 1,30
Cola para cano	1,00	R\$ 18,00	R\$ 18,00
Total			R\$ 301,90

Fonte: Autor.

Analisando a Figura 12 podemos perceber que o custo total do projeto de 301,90 reais se torna um valor considerável. Entretanto, quando comparado aos aquecedores comerciais, o coletor solar alternativo ainda apresenta um custo menor. As garrafas PETs não foram contabilizadas no custo pelo fato de que as mesmas foram oriundas de doações, sendo consideradas materiais de descarte.

3.1.3 Construção das bancadas

Neste item será apresentado o processo de construção da bancada de ambos os coletores, com e sem cobertura. Tudo se trata de apenas um coletor, o qual posteriormente foi acoplada a cobertura, tendo-se assim ensaios em duas bancadas diferentes, com e sem cobertura.

O primeiro passo para a construção foi o corte de 60 tubos de 40mm de comprimento para fazer a conexão entre as junções. Feito isso, foram lixados e colados fazendo a conexão de 2 hastes de 30 TÊs conforme apresentado na Figura 13.

Figura 12 - Conexão entre TÊs.



Fonte: Autor.

Ao final de cada uma das hastes foi colado uma conexão 90°. Sendo assim, temos 31 conexões para serem feitas entre as duas hastes por tubos de comprimento igual a 3000mm, os quais tiveram suas extremidades lixadas e coladas, dando forma ao coletor solar, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 13 - Montagem dos tubos.



Fonte: Autor.

Com a montagem do coletor finalizada, partiu-se para o processo de pintura na coloração preto fosco, com o objetivo de melhorar a absortividade do coletor, fator esse que influencia no desempenho do equipamento. A Figura 15 apresenta o processo de pintura do coletor.

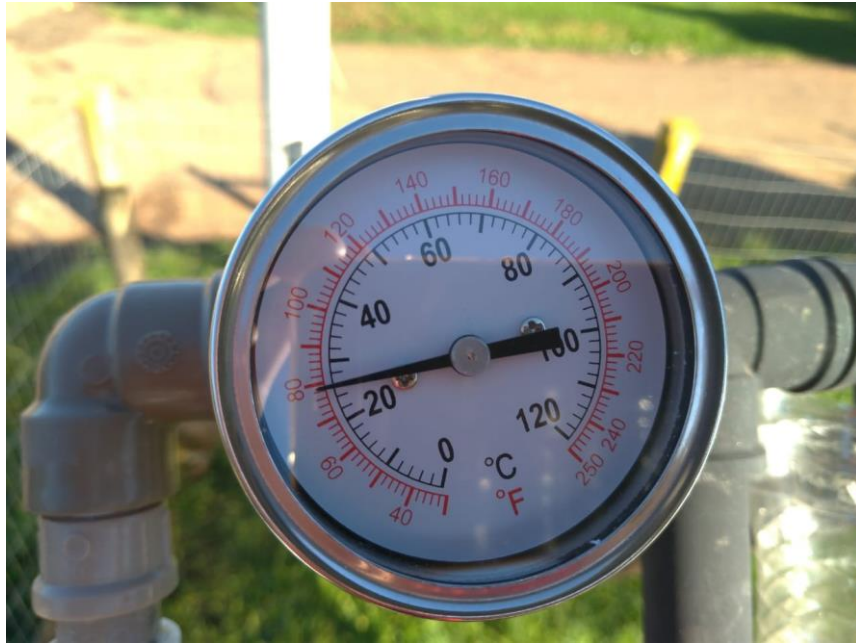
Figura 14 – Processo de pintura do coletor solar.



Fonte: Autor.

Para finalizar a montagem do coletor sem cobertura, foi feita a instalação dos sensores de temperatura de platina, um deles logo na entrada do coletor solar e o outro localizado aproximadamente no centro do mesmo. Os termômetros utilizados são do fabricante Thermal Beer, tendo sua aplicação voltada para medição de temperatura de líquidos, e apresentam uma faixa de medição de 0 a 120 °C e resolução de 2°C. Foi utilizado ainda um termômetro de mercúrio modelo Incoterm 5012 para a realização da medição da temperatura do ar, o qual apresenta uma faixa de medição de - 10°C a 110°C e resolução de 1°C. A Figura 16 apresenta o termômetro de platina instalado no coletor solar e a Figura 17 o termômetro de mercúrio utilizado.

Figura 15 – Termômetro de platina instalado no coletor solar.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Termômetro de mercúrio utilizado para medição da temperatura do ar.



Fonte: Incoterm (2019).

A Figura 18 apresenta o coletor solar pronto para ser analisado experimentalmente, sendo necessário realizar apenas a instalação dos sensores de temperatura:

Figura 17 - Coletor finalizado. As setas vermelhas indicam os locais de instalação dos sensores de temperatura.



Fonte: Autor.

Os sensores foram instalados na entrada e no meio do coletor para que evitar a distorção de temperatura causada pelo efeito de borda, sendo assim, apresentados valores de temperatura inadequados para o estudo.

Para o processo de construção da cobertura da bancado do coletor solar foram coletadas aproximadamente 600 garrafas PET com volume de 600 ml. Para possibilitar a instalação das garrafas PET, foi realizada a higienização, retirada dos rótulos e um corte nas duas extremidades de cada garrafa, com o objetivo de obter cilindros de comprimento aproximado de 150 mm. A Figura 19 apresenta dois cilindros de 150mm que foram conectados para a montagem da cobertura.

Figura 18 – Processo de colagem dos cilindro de garrafa PET para a construção da cobertura.



Fonte: Autor.

Para a obtenção das coberturas dos tubos do coletor, foi realizada a colagem das garrafas PET através da utilização de fita adesiva transparente e de encaixe de um cilindro menor dentro do outro. Após a construção de 29 cilindros de 3000mm, foi realizado um corte lateral ao longo de todo o seu comprimento para que fosse possível acoplar aos tubos do coletor, o qual foi vedado após o acoplamento com fita adesiva, sendo assim, foi possível cobrir apenas uma parte do coletor solar, devido ao alto número de garrafas PET necessárias. Os tubos foram vedados nas extremidades por meio de fita adesiva, a fim de que o ar permanecesse confinado no interior da cobertura. A Figura 20 apresenta o coletor solar com cobertura finalizado.

Figura 19 - Coletor solar com cobertura.



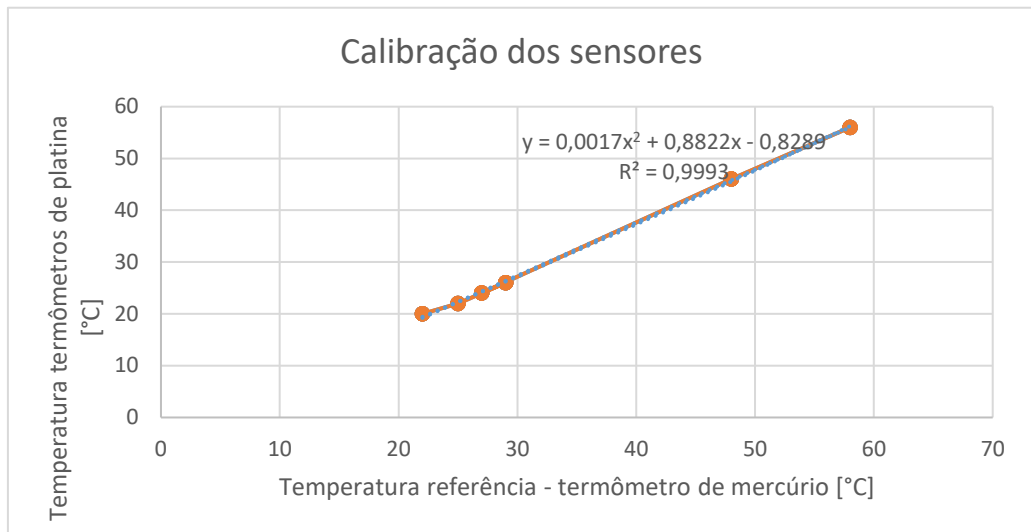
Fonte: Autor.

3.2 AFERIÇÃO DOS SENSORES

Para a calibração dos termômetros de platina, utilizados para aferição da temperatura da água no interior do coletor, foi utilizado um termômetro de mercúrio como referência, pois o mesmo possibilita uma fácil medição e dificilmente perde sua calibração ao longo do tempo. Foram realizadas 5 repetições para 6 valores diferentes de temperatura da água medidas com o termômetro de mercúrio, 22°C, 25°C, 27°C, 29°C, 48°C e 58°C.

O procedimento de calibração se deu através da utilização de dois recipientes com água, um a temperatura ambiente e outro nas temperaturas mencionadas anteriormente. A medição foi realizada primeiramente com a água aquecida e depois feita a medição na água a temperatura ambiente, repetindo 5 vezes para cada temperatura. A comparação entre os valores de temperatura medidos com os sensores de platina e o sensor de referência são apresentados na Figura 21:

Figura 20 - Gráfico de aferição dos sensores.



Fonte: Autor.

É possível perceber que a partir do coeficiente de correlação R^2 que a curva utilizada se ajusta bem aos dados e com base nos resultados da Figura 25, os sensores de platina possuem uma boa repetibilidade, não variando a temperatura medida ao longo das repetições para uma dada temperatura. Entretanto, percebeu-se que para ambos os sensores é apresentado um erro próximo a sua resolução de -2°C , conforme apresentado na Figura 25.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A realização do experimento constituiu-se basicamente de duas etapas, sendo a primeira o posicionamento do coletor solar e a segunda a aquisição de dados. Para o posicionamento do mesmo, foi utilizado uma estrutura de aço para fazer o apoio do coletor solar a aproximadamente 30° , ângulo da latitude da cidade de Cachoeira do Sul, e o mesmo foi voltado para o norte, visando um maior tempo de incidência solar. Após o posicionamento do coletor, foi utilizado uma mangueira para fazer o preenchimento do mesmo com água, a qual permaneceu no coletor durante o tempo de ensaio, sendo a água substituída a cada manhã antes de iniciar os ensaios.

A aferição dos dados foi realizada de hora em hora, iniciando-se as 9:00 horas e encerrando as 17:00 horas. A retirada de dados foi realizada no sensor localizado na entrada de água do aquecedor solar e também no sensor localizado no meio do aquecedor. Além disso, através de um sensor de mercúrio foi realizada a medição da temperatura ambiente, retirando-se assim os dados experimentais do aquecedor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DO COLETOR SOLAR SEM COBETURA

A partir da retirada de dados dos sensores de temperatura foi possível fazer a compilação de uma tabela contendo os dados de todos os dias, como o horário da medição, a temperatura do ar ou ambiente e também a temperatura da água no interior do coletor. Os principais resultados obtidos para as medidas realizadas com o coletor solar sem cobertura são apresentados na Quadro 2.

Quadro 2 - Valores de temperatura do ar e da água medidos para o coletor solar sem cobertura a cada dia, bem como os valores de radiação solar.

Dados experimentais - Coletor solar sem cobertura						
Horário	Dia 1			Dia 2		
	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	17	16	1	17	20	41
10:00	18	16	32	19	20	98
11:00	19	18	90	21	22	290
12:00	19	21	121	22	33	403
13:00	20	21	138	22	28	297
14:00	20	21	67	23	25	330
15:00	19	21	29	23	25	220
16:00	19	21	14	23	25	131
17:00	18	20	7	22	22	66
	Média		55,44	Média		208,44

Horário	Dia 3			Dia 4		
	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	20	18	51	18	18	38
10:00	21	20	131	20	22	209
11:00	22	28	273	23	24	361
12:00	24	30	331	24	30	493
13:00	25	30	288	24	30	522
14:00	26	30	367	25	33	496
15:00	26	30	235	27	27	261
16:00	26	25	93	25	26	119
17:00	24	23	65	22	22	62
	Média		203,78	Média		284,56

Horário	Dia 5			Dia 6		
	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	18	17	63	21	20	63
10:00	20	21	152	24	25	229
11:00	23	25	241	26	28	322
12:00	25	28	396	27	32	381
13:00	27	30	301	29	34	424
14:00	28	30	341	30	36	375
15:00	29	29	281	32	36	270
16:00	26	27	148	27	32	119
17:00	24	24	74	26	27	68
	Média		221,89	Média		250,11

Horário	Dia 7			Dia 8		
	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar [°C]	Temp. água [°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	21	22	83	21	20	49
10:00	22	24	182	23	22	99
11:00	25	28	301	24	27	332
12:00	26	30	357	25	32	479
13:00	25	30	390	25	30	373
14:00	25	30	376	26	38	304
15:00	25	33	238	26	38	247
16:00	25	28	127	26	35	76
17:00	24	26	71	25	26	63
	Média		236,11	Média		224,67

Fonte: Autor.

A temperatura da água no interior do coletor apresentada no Quadro 2 foi obtida através de uma média feita entre os valores dos dois sensores instalados no coletor solar. Os valores apresentados já estão com a correção efetuada devido a curva de correção da Figura 25.

Para a realização dos cálculos, a fim de utilizar dados reais de radiação solar para a cidade de Cachoeira do Sul, recorreu-se a uma miniestação meteorológica instalada no campus da Universidade Federal de Santa Maria campus Cachoeira do Sul. A miniestação meteorológica é da marca Pessl Instruments e modelo IMT300, sendo que esta estação possui a capacidade de medição de diversas variáveis climáticas, dentre eles, velocidade do vento, temperatura do ar, ponto de orvalho, umidade relativa e radiação solar. Para este estudo, a variável importante se trata da radiação solar, visto que o coletor solar não está instalado próximo ao local da estação meteorológica.

A medição de radiação solar pela estação meteorológica é feita através do sensor LI-200SZ, apresentando um erro absoluto máximo de 5% e um erro absoluto de normalmente 3%, capaz de trabalhar em uma faixa de temperatura de -20°C a 65°C . Apresenta uma dependência da temperatura de 0,15% por $^{\circ}\text{C}$. Os valores de radiação solar para cada dia de teste do coletor solar sem cobertura e a média de radiação solar diária estão apresentados no Quadro 2.

A partir dos dados experimentais e dos valores de radiação solar foi possível a realização dos cálculos para que seja viável a comparação de tempo de aquecimento entre os mesmos. Isso possibilita diversas análises para o coletor solar sem cobertura, a primeira delas em relação ao tempo para que o coletor solar atinja a temperatura de 30°C , considerada como a temperatura ideal para banho em piscinas residenciais, conforme apresentado no referencial teórico. O Quadro 3 apresenta os tempos obtidos experimentalmente bem como os tempos calculados para a água atingir 30°C no interior do coletor solar.

Quadro 3 - Tempos teóricos e experimentais para que a água no coletor sem cobertura atinja a temperatura de 30°C a cada dia, bem como o erro percentual da diferença entre o valor experimental e teórico.

	Dia 1 - 08/06		Dia 2 - 09/06		Dia 3 - 10/06		Dia 4 - 11/06	
Tempo teórico (horas)	X	X	0,67	ERRO (%)	0,63	ERRO (%)	0,44	ERRO (%)
Tempo experimental (horas)	X	X	2,72	75,55	3,00	79,07	3,00	85,33

	Dia 5 - 12/06		Dia 6 - 13/06		Dia 7 - 14/06		Dia 8 - 15/06	
Tempo teórico (horas)	0,58	ERRO (%)	0,37	ERRO (%)	0,38	ERRO (%)	0,45	ERRO (%)
Tempo experimental (horas)	4,00	85,50	2,80	86,79	3,00	87,33	2,80	83,93

Fonte: Autor.

No primeiro dia de experimento, 08 de junho de 2019, o coletor solar não atingiu a temperatura desejada de 30°C, uma vez que neste dia estava nublado e apresentava pancadas de chuva. Sendo assim, neste dia tivemos uma radiação solar média de apenas 55,44 W/m² e não foi considerado para esta análise por isso está assinalado com um X no Quadro 3.

Para o dia 2, 09 de junho de 2019, o coletor solar levou em torno de 2,72 horas para atingir a temperatura de 30°C, este valor foi encontrado através de uma interpolação, visto que as verificações experimentais de temperatura eram feitas de hora em hora. Neste dia, o valor de radiação solar médio foi maior estando igual a 208,44 W/m², a temperatura de entrada da água foi de 20°C e uma temperatura do ar média de 19,5°C. Para os cálculos, o tempo apresentado foi de 0,67 horas, essa diferença entre o valor experimental e o teórico era esperada devido as diversas variáveis ambientais que afetam na prática o desempenho do coletor solar e que não foram considerados nos cálculos.

No terceiro dia de ensaios, 10 de junho de 2019, o coletor solar levou 3 horas para atingir a temperatura de 30°C, entretanto, para os cálculos o valor encontrado foi de 0,63 horas. Essa diferença pode ser explicada por conta de diversas outras variáveis que não puderam ser analisadas e contabilizadas no estudo. Podemos citar a velocidade e presença de vento, os quais podem aumentar a perda de energia térmica por convecção natural. Além disso, podemos ter a presença de nuvens em determinados períodos do dia, fazendo com que o dia se torne nublado em algumas horas e aumente o tempo para que o coletor atinja os 30°C. Para este dia, a radiação solar média estava um pouco abaixo do dia anterior, apresentando o valor de 203,78 W/m², a temperatura de entrada da água estava em 18°C e a temperatura média do ar em 22°C. É perceptível que o incremento de temperatura foi superior neste dia, 12°C, explicando-se assim o maior tempo para aquecimento em comparação ao dia anterior.

Uma ponderação interessante de se fazer, é o fato de que os valores de radiação disponibilizados se tratam de uma média do dia e como os valores de temperatura igual a 30°C se deram entre as 11:00 e 13:00 horas, podemos ter valores de radiação menores neste horário e por isso uma certa diferença entre o valor medido e o valor calculado.

No dia 4, 11 de junho de 2019, o valor de radiação foi consideravelmente mais alto, chegando a média de 284,56 W/m². A temperatura de entrada da água foi de 18°C e a temperatura média do ar estava em 21°C. Entretanto, o tempo necessário para alcançar 30°C foi igual ao dia anterior, necessitando de 3 horas. O incremento de temperatura neste dia foi o mesmo do anterior, porém a temperatura média do ar estava mais baixa, favorecendo a perda

de energia térmica por convecção natural, por isso levou o mesmo tempo para se alcançar o mesmo incremento de temperatura apesar de a radiação solar média ao longo do dia ser bem superior. Para os cálculos, o tempo necessário seria de 0,44 horas. Isto pode ser explicado pelas variações ambientais ao longo do dia, como também pela mesma consideração exposta anteriormente, de que o valor de radiação considerado para os cálculos se trata de uma média diária, tanto que a temperatura máxima encontrada no dia 4 foi superior ao dia 3, visto que a radiação solar foi maior.

Para o quinto dia de análises, 12 de junho de 2019, o tempo de aquecimento apresentado foi de 4 horas, para uma radiação solar média de $221,89 \text{ W/m}^2$, uma temperatura de entrada da água de 17°C e uma temperatura média do ar de $22,5^\circ\text{C}$. O incremento de temperatura neste dia foi de 13°C , o maior até então, bem como o tempo de aquecimento. Para os cálculos, o tempo de aquecimento apresentado foi de 0,58 horas, um tanto quanto discrepante em relação ao que foi encontrado na prática, entretanto as mesmas considerações dos dias anteriores são válidas para este dia, visto que as variáveis ambientais são diversas e variam constantemente ao longo do dia.

No dia 6, 13 de junho de 2019, teve-se uma radiação solar média de $250,11 \text{ W/m}^2$, a temperatura de entrada da água de 20°C e uma temperatura média do ar de 24°C . Neste dia, o incremento de temperatura foi de 10°C e o tempo de aquecimento foi de 2,8 horas, um dos menores encontrados ao longo do estudo, isso pelo fato de que o incremento de temperatura necessário não foi tão alto e também pelo fato de que a perda por convecção natural não é muito elevada, pois a temperatura média do ar não apresenta um gradiente de temperatura muito alto em relação aos 30°C . Para este dia, o tempo calculado de aquecimento foi de 0,37 horas, apresentando uma defasagem de aproximadamente 2,4 horas em relação ao tempo medido experimentalmente.

O dia 7, 14 de junho de 2019, apresentou um tempo de aquecimento de 3 horas para uma radiação solar média de $236,11 \text{ W/m}^2$, uma temperatura de entrada da água de 22°C e uma temperatura média do ar de $23,5^\circ\text{C}$. Neste dia, tivemos uma radiação solar média um pouco menor comparado ao dia anterior, bem como a média de temperatura do ar, entretanto o incremento de temperatura neste dia foi de apenas 8°C . O tempo calculado de aquecimento foi de 0,38 horas. Possibilitando perceber que cada dia possui a sua peculiaridade, não sendo possível ter uma precisão quando utilizamos os cálculos para os diversos dias, pois existem diversos fatores que não são levados em conta. Portanto, os cálculos servem para uma aproximação dos valores de tempo.

No último dia, dia 15 de junho de 2019, o tempo de aquecimento encontrado foi de 2,8 horas, para um valor de radiação solar média de 224,67 W/m², uma temperatura de entrada da água de 20°C e uma temperatura média do ar de 23°C. Para este caso, o incremento de temperatura foi de 10°C, superior ao dia anterior, com uma radiação solar e uma temperatura média do ar inferiores, e um tempo de aquecimento inferior ao dia anterior. Portanto, podemos perceber que este fenômeno não segue um comportamento linear, e novamente percebemos a influência de outras variáveis no tempo de aquecimento da água no interior do coletor solar. O valor calculado foi de 0,45 horas, bastante semelhante ao encontrado para o dia anterior, onde os dados de entrada para os cálculos são próximos, entretanto na prática isso não se aplica.

Sendo assim, após ser feita a análise do tempo necessário para que o coletor solar atinja a temperatura desejada para banhos em piscinas residenciais, é possível fazer outra análise. Sendo assim, será analisado o tempo necessário para que a água no interior do coletor solar atinja a temperatura máxima ao longo de cada dia, analisando a influência da radiação solar média, da temperatura de entrada e da temperatura média do ar neste tempo. O Quadro 4 apresenta os tempos teóricos e experimentais para que a água no interior do coletor solar sem cobertura atinja a temperatura máxima.

Quadro 4 - Tempos teóricos e experimentais para que a água no interior do coletor sem cobertura atingir a temperatura máxima a cada dia, assim como o erro percentual da diferença entre o tempo experimental e teórico.

	Dia 1 - 08/06		Dia 2 - 09/06		Dia 3 - 10/06		Dia 4 - 11/06	
Tempo teórico (horas)	0,95	ERRO(%)	0,99	ERRO(%)	0,63	ERRO(%)	0,60	ERRO(%)
Tempo experimental (horas)	2,00	52,44	3,00	66,87	3,00	79,00	5,00	88,00

	Dia 5 - 12/06		Dia 6 - 13/06		Dia 7 - 14/06		Dia 8 - 15/06	
Tempo teórico (horas)	0,58	ERRO(%)	0,68	ERRO(%)	0,57	ERRO(%)	1,07	ERRO(%)
Tempo experimental (horas)	4,00	85,50	5,00	86,40	6,00	90,50	5,00	78,60

Fonte: Autor.

No dia 1, a temperatura máxima encontrada foi de 21°C e com isso o incremento de temperatura atingido neste dia foi de 5°C. Neste dia, as condições ambientais não foram favoráveis, pois o dia estava nublado e com chuva. O tempo experimental para que este incremento de temperatura seja possível foi de 2 horas e o tempo teórico foi de 0,95 horas. A radiação solar média neste dia foi de 55,44 W/m², a temperatura de entrada da água de 16°C e a temperatura média do ar de 18°C.

Já no dia 2, a temperatura máxima encontrada da água no interior do coletor solar foi de 33°C, representando um incremento de temperatura em relação a temperatura de entrada de 13°C. Visto que, neste dia, a temperatura de entrada da água no coletor solar foi de 20°C, a temperatura média do ar foi de 19,5°C e a radiação solar média ao longo deste dia foi de 208,44 W/m². O tempo necessário para a obtenção deste incremento de temperatura foi de 3 horas, enquanto que o tempo calculado foi de 0,99 horas.

No terceiro dia de estudo, a temperatura máxima da água foi de 30°C para uma temperatura de entrada da água de 18°C e uma temperatura média do ar de 22°C. Para este dia a radiação solar média foi de 203,78 W/m², sendo necessário um tempo de 3 horas para atingir a máxima temperatura. O tempo calculado para atingir a temperatura máxima foi de 0,63 horas.

Para o dia 4, a máxima temperatura da água foi de 33°C representando um incremento máximo de temperatura igual a 15°C. A temperatura de entrada da água foi de 18°C, a temperatura média do ar de 21,5°C e uma radiação solar média de 284,56 W/m². O tempo de aquecimento foi de 5 horas enquanto que o tempo calculado foi de 0,60 horas.

No dia 5, obteve-se um incremento de temperatura máximo de 13°C, pois a temperatura máxima alcançada foi de 30°C. A temperatura de entrada da água foi de 17°C, para uma temperatura média do ar de 22,5°C e uma radiação solar média de 221,89 W/m². O tempo necessário para alcançar este incremento de temperatura foi de 4 horas, porém o tempo calculado foi de 0,58 horas, as justificativas para essa defasagem apresentadas na análise anterior ainda são válidas.

Para o sexto dia de análises, a temperatura máxima obtida foi de 36°C representando um incremento de temperatura máximo de 16°C. Para este dia, a temperatura de entrada da água foi de 20°C, para uma temperatura média do ar de 25,5°C e uma média de radiação solar de 250,11 W/m². O maior incremento de temperatura pode estar ligado ao fato de ter-se uma temperatura média do ar mais elevada, diminuindo a perda de energia térmica por convecção natural. O tempo de aquecimento foi de 5 horas, enquanto que o tempo calculado foi de 0,68 horas.

O dia 7 apresentou uma temperatura máxima de 33°C, sendo assim teve-se um incremento de temperatura de 11°C, pois a temperatura de entrada da água foi de 22°C, para uma temperatura média do ar de 23°C e uma radiação solar média de 236,11 W/m². O tempo necessário para este incremento 6 horas e o tempo calculado foi de 0,57 horas.

No último dia de ensaios, dia 8, apresentou-se a máxima temperatura da água no interior do coletor solar sem cobertura igual a 38°C. Neste dia a temperatura de entrada da água no coletor solar foi de 20°C representando assim um incremento de temperatura de 18°C, o maior

incremento alcançado com o coletor solar sem cobertura. A temperatura média do ar foi de 23,5°C e a radiação solar média foi igual a 224,67 W/m². O tempo de aquecimento foi igual a 5 horas, enquanto que o tempo calculado foi de 1,07 horas.

A partir da análise dos resultados para o coletor solar sem cobertura, foi possível perceber, em determinados dias, um incremento alto na temperatura em determinados horários, levando a supor que neste horário o coletor solar recebeu uma maior radiação solar. Sendo assim, decidiu-se fazer uma análise em relação aos incrementos de temperatura ao longo dos dias, lembrando que nesta análise o dia 1 não foi considerado devido as condições desfavoráveis do mesmo.

Para o dia 2, no horário entre as 11 e 12 horas, obteve-se um incremento bastante considerável de temperatura, na ordem de 11°C. Nesta uma hora o coletor solar atingiu a temperatura máxima da água no seu interior. Isso, propõe que neste horário tivemos a maior radiação recebida pelo coletor, o que realmente aconteceu, pois, as 12 horas foi registrado 403 W/m² e depois, devido aos fatores ambientais, como a velocidade do vento que teve seu ápice as 13 horas, com um valor de 4,7 m/s, o mesmo não teve um incremento elevado de temperatura, novamente elucidando a defasagem entra os cálculos e a prática.

No dia 3, o incremento de temperatura se deu mais cedo, entre as 10 e 11 horas, o mesmo foi inferior e igual a 8°C. Entretanto, o coletor solar recebeu um valor maior de radiação solar sendo capaz de elevar a temperatura em mais 2°C até atingir a temperatura máxima deste dia.

O quarto dia teve incrementos mais graduais de temperatura, sendo que o maior incremento se deu entre as 11 e 12 horas, apresentando uma elevação em 6°C. Porém, ao longo dia, o coletor solar ainda continuou elevando a temperatura, mas com incrementos menores.

Para o dia 5 e 7, os incrementos de temperaturas foram bastante graduais ao longo do dia, mantendo uma faixa de elevação de 2 a 3°C a cada hora em que se teve incremento, entretanto para ambos os dias o maior incremento foi de 4°C e ocorreu entre as 10 e 11 horas. No dia 6, os incrementos de temperatura não ocorreram de forma muito significativa, sendo que o maior incremento foi de 4°C e se deu entre as 11 e 12 horas.

Pode-se perceber que ao longo de todos esses dias, os maiores incrementos de temperatura se deram no horário entre 10 e 12 horas, diferentemente do último dia analisado.

O último dia, dia 8, foi o mais atípico entre os analisados. Neste dia, teve-se a maior temperatura da água encontrada no interior do coletor solar sem cobertura, entretanto o maior incremento de temperatura de 8°C observado ocorreu entre as 13 e 14 horas, diferentemente dos dias anteriores.

Sendo assim, utilizando as Equações (1) e (2) foi possível calcular a eficiência do coletor solar para cada dia de estudo. Para isso foi necessário a utilização da massa de água contida no interior do coletor solar, do calor específico a pressão constante da água, o máximo incremento de temperatura obtido no determinado dia, bem como a área da bancada de ensaios e a radiação solar presente em cada dia. O Quadro 5 apresenta os valores de eficiência para cada dia de ensaio do coletor solar sem cobertura.

Quadro 5 - Eficiência do coletor solar sem cobertura a cada dia.

Eficiência do coletor solar sem cobertura				
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4
Eficiência (%)	10,69	7,39	6,98	6,25

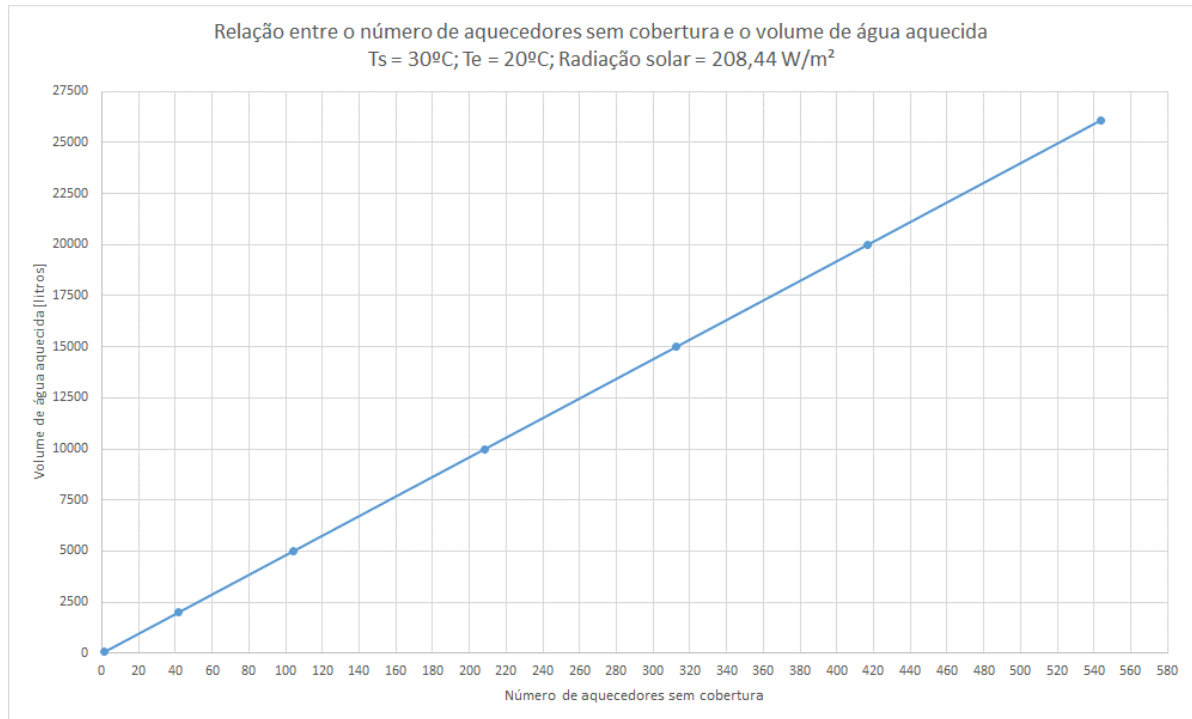
	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8
Eficiência (%)	6,94	7,58	5,52	9,49

Fonte: Autor.

Analisando os resultados de eficiência do coletor solar sem cobertura, podemos perceber que de forma geral, fazendo uma média de eficiência, o mesmo apresentou uma eficiência de 7,6%. A máxima eficiência alcançada foi de 10,69% encontrada no dia 1.

A última análise feita para o coletor solar sem cobertura foi baseada no número de aquecedores necessário para aquecer determinados volumes de água. Essa análise é interessante para perceber a viabilidade ou não dos aquecedores alternativos para aquecimento de água de piscinas. Os resultados estão apresentados na Figura 23.

Figura 21 - Relação do volume de água aquecido ao número de aquecedores sem cobertura necessários.



Fonte: Autor.

Através da Figura 23 é possível perceber o número de aquecedores necessário para aquecer um volume de 26100 litros, este volume de água está presente nas piscinas residenciais de dimensão 6m x 3m x 1,45m. Para a realização deste gráfico, utilizou-se como referência o dia 2, o qual o coletor solar sem cobertura levou menos tempo para alcançar os 30°C , considerando uma temperatura de entrada de 20°C e uma radiação solar média $208,44 \text{ W/m}^2$. Sendo assim, para a piscina residencial apresentada seriam necessários 544 coletores solares para que a temperatura da água atingisse 30°C em 2,72 horas.

4.2 RESULTADOS DO COLETOR SOLAR COM COBERTURA

A partir da construção da cobertura do coletor solar foi feita a instalação da mesma sobre a bancada de ensaios, possibilitando a realização dos testes do coletor solar com cobertura. Partiu-se então para a aquisição de dados e construiu-se uma tabela com os resultados para o coletor solar com cobertura, a qual está apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 - Valores de temperatura do ar e da água medidos para o coletor solar com cobertura a cada dia, bem como os valores de radiação solar.

Dados experimentais - Coletor solar com cobertura						
Horário	Dia 1			Dia 2		
	Temp. ar [°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar [°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	20	18	35	21	20	59
10:00	21	22	85	21	24	188
11:00	23	22	196	23	26	367
12:00	23	26	329	23	38	472
13:00	23	32	402	25	42	514
14:00	23	32	457	25	46	417
15:00	23	38	272	25	46	244
16:00	23	38	84	25	42	50
17:00	22	26	53	22	30	67
		Média	212,56		Média	264,22

Horário	Dia 3			Dia 4		
	Temp. ar[°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar[°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	16	12	93	14	10	95
10:00	17	20	267	14	16	261
11:00	17	20	420	16	18	412
12:00	18	28	520	17	32	513
13:00	18	32	559	18	40	553
14:00	20	34	531	18	44	528
15:00	19	36	250	18	46	247
16:00	19	34	57	19	44	22
17:00	18	20	15	19	28	8
		Média	301,33		Média	293,22

Horário	Dia 5			Dia 6		
	Temp. ar[°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar[°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	14	12	78	18	14	55
10:00	14	14	123	19	18	192
11:00	16	16	294	21	26	366
12:00	19	26	448	21	40	443
13:00	19	36	527	22	46	536
14:00	19	40	453	22	50	497
15:00	20	42	264	23	46	244
16:00	19	34	72	23	44	46
17:00	19	24	60	23	34	33
		Média	257,67		Média	268,00

Horário	Dia 7			Dia 8		
	Temp. ar[°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]	Temp. ar[°C]	Temp. água[°C]	Radiação solar [W/m ²]
09:00	20	16	74	20	16	83
10:00	20	18	206	22	22	225
11:00	21	22	388	23	26	366
12:00	24	40	482	26	40	450
13:00	24	50	527	26	46	486
14:00	23	50	500	26	46	429
15:00	24	50	243	26	44	246
16:00	24	46	51	25	38	131
17:00	23	32	53	24	30	68
		Média	280,44		Média	276,00

Fonte: Autor.

Novamente, utilizando a estação meteorológica foi possível a aquisição da radiação solar média para cada dia de ensaio do coletor solar com cobertura. Os valores de radiação solar média para cada dia estão apresentados no Quadro 6.

A partir dos dados experimentais para cada dia, como temperatura média do ar, temperatura de entrada da água e temperatura de saída da água no coletor, além dos valores médios de radiação solar para cada dia, foi possível realizar os cálculos através da Equação (7)

para encontrar os tempos teóricos necessários para estas condições. Sendo assim, com estes dados possibilita a realização de diversas análises, a primeira delas em relação aos tempos teóricos e experimentais para cada dia a temperatura do coletor solar atingir 30°C, conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Tempos teóricos e experimentais para que a água no coletor com cobertura atingir a temperatura de 30°C a cada dia, bem como o erro percentual da diferença entre o valor teórico e experimental.

	Dia 1 - 17/06		Dia 2 - 18/06		Dia 3 - 19/06		Dia 4 - 20/06	
Tempo teórico (horas)	84,57	ERRO (%)	21,26	ERRO (%)	26,82	ERRO (%)	25,17	ERRO (%)
Tempo experimental (horas)	4	95,27	2,5	88,24	4	85,09	3	88,08

	Dia 5 - 21/06		Dia 6 - 22/06		Dia 7 - 23/06		Dia 8 - 24/06	
Tempo teórico (horas)	21,81	ERRO (%)	45,64	ERRO (%)	> 100	ERRO (%)	< 0	ERRO (%)
Tempo experimental (horas)	3,53	83,81	2,37	94,81	2,37	X	2,37	X

Fonte: Autor.

Para o primeiro dia de ensaio do coletor solar com cobertura, dia 17 de junho de 2019, teve-se uma temperatura média do ar de 21,5°C, uma temperatura de entrada da água de 18°C e radiação solar média de 212,56 W/m². Sendo assim, para este dia tivemos um incremento de temperatura de 12°C, o qual levou um tempo experimental de aquecimento de 4 horas, enquanto que para o valor calculado este tempo seria de 84,57 horas.

No dia 2, 18 de junho de 2019, o tempo necessário de aquecimento foi de 2,5 horas, enquanto que o tempo teórico foi de 21,26 horas. Neste dia, a temperatura média do ar foi de 22°C, a temperatura de entrada da água foi de 20°C e uma radiação solar média de 264,22 W/m². O incremento de temperatura alcançado foi de 10°C.

O terceiro dia de ensaio, 19 de junho de 2019, apresentou um incremento de temperatura de 18 °C, pois a temperatura de entrada da água foi de 12°C. A temperatura média do ar foi de 17°C e radiação solar média de 301,33 W/m². O tempo experimental para este dia foi de 4 horas, enquanto que o tempo calculado foi de 26,82 horas.

As considerações das influencias de outras variáveis ambientais na defasagem entre o tempo teórico e experimental ainda são válidas para o coletor solar com cobertura. Entretanto, por conta da diferença entre os mesmos ser bastante considerável, acredita-se que ocorreu uma troca de energia térmica por convecção.

No dia 4, dia 20 de junho de 2019, teve-se uma temperatura média do ar de 15,5°C, uma temperatura de entrada da água de 10°C e uma radiação média solar de 293,22 W/m². Para o dia em questão, o incremento de temperatura apresentado foi de 20°C e tempo experimental necessário para o mesmo foi de 3 horas, enquanto que o tempo teórico foi de 25,17 horas. Aqui pode-se perceber claramente a influência de outras variáveis ambientais no desempenho do coletor solar, pois, em relação ao dia 3, o incremento de temperatura foi maior mesmo a temperatura do ar estando mais baixa, assim como a radiação solar.

O dia 5, dia 21 de junho de 2019, o tempo de aquecimento experimental foi de 3,53 horas sendo que a temperatura média do ar foi de 16,5°C e a radiação solar média de 257,67 W/m². A temperatura de entrada da água no coletor solar com cobertura foi de 12°C representando um incremento de 18°C. O tempo teórico encontrado foi de 21,81 horas.

Para o dia 6, dia 22 de junho de 2019, a radiação solar média foi de 268 W/m², a temperatura média do ar de 19,5°C e a água entrou no coletor com uma temperatura de 14°C. Teve-se um incremento de 16°C, levando um tempo experimental de 2,37 horas, entretanto o tempo teórico foi de 45,64 horas.

Para o dia 7, 23 de junho de 2019, o tempo teórico calculado foi superior a 100 horas representando uma defasagem muito alta em relação ao apresentado na prática, visto isso, o mesmo não foi considerado nos resultados. O dia 8 teve uma temperatura média do ar de 23°C, uma temperatura de entrada de 16°C e uma radiação solar média de 280,44 W/m². O incremento de temperatura foi de 14°C e o tempo necessário experimentalmente foi de 2,37 horas.

No último dia, dia 24 de junho de 2019, a utilização da formulação apresentada resultou em um tempo teórico de aquecimento negativo. Sabe-se que este fato é impossível na prática, portanto não foi considerado e apresentado nos resultados. Neste dia, teve-se uma temperatura média do ar de 22°C, uma temperatura de entrada de 16°C e um valor de radiação solar de 276 W/m². O incremento de temperatura foi de 14°C e o tempo de aquecimento experimental 2,37 horas.

Outra análise realizada foi em relação ao tempo necessário para que a temperatura da água no interior do coletor solar com cobertura atingisse a temperatura máxima ao longo de cada dia, pois percebeu-se que o coletor solar com cobertura teve média de temperatura superior ao coletor solar sem cobertura.

Quadro 8 - Tempos teóricos e experimentais para que a água no interior do coletor solar com cobertura atingir a temperatura máxima a cada dia, assim como o erro percentual da diferença entre o tempo teórico e experimental.

	Dia 1 - 17/06		Dia 2 - 18/06		Dia 3 - 19/06		Dia 4 - 20/06	
Tempo teórico (horas)	20,05	ERRO(%)	12,38	ERRO(%)	17,52	ERRO(%)	14,84	ERRO(%)
Tempo experimental (horas)	6	70,07	5	59,61	6	65,75	6	59,57

	Dia 5 - 21/06		Dia 6 - 22/06		Dia 7 - 23/06		Dia 8 - 24/06	
Tempo teórico (horas)	14,24	ERRO(%)	14,04	ERRO(%)	14,66	ERRO(%)	18,46	ERRO(%)
Tempo experimental (horas)	6	57,87	5	64,39	4	72,71	4	78,33

Fonte: Autor.

No primeiro dia a máxima temperatura alcançada foi de 38°C, representando um incremento de 20°C, pois a temperatura de entrada da água foi de 18°C. A temperatura média do ar foi 21,5°C e a radiação solar média de 212,56 W/m². O tempo necessário experimentalmente para alcançar a temperatura máxima foi de 4 horas, enquanto que o tempo teórico foi de 20,05 horas. Novamente a defasagem entre o experimental e teórico foi considerável e as mesmas considerações anteriores são válidas.

O dia 2 apresentou uma temperatura máxima superior ao primeiro dia, 46°C, o tempo experimental necessário para a água no interior do coletor com cobertura atingir essa temperatura foi de 5 horas, enquanto que o experimental foi de 12,38 horas. A radiação solar média para este dia foi de 264,22 W/m², a temperatura média do ar de 23°C e a temperatura da água que entrou no coletor de 20°, representando um incremento de temperatura de 26°C.

O terceiro dia teve como temperatura máxima 36°C, as condições apresentadas eram de temperatura média do ar de 17,5°C, temperatura de entrada da água de 12°C e a radiação solar média de 301,33 W/m². O incremento de temperatura alcançado foi de 24°C e o tempo experimental necessário foi de 6 horas em comparação a um tempo teórico de 17,52 horas.

Para o dia 4 a temperatura máxima alcançada foi de 46°C, representado um incremento de temperatura de 36°C, visto que a temperatura de entrada da água foi de 10°C. A temperatura média do ar ficou em 16°C para uma radiação solar média de 293,22 W/m². O tempo necessário experimentalmente para conseguir este elevado incremento de temperatura foi de 6 horas e o tempo teórico de 14,84 horas.

No quinto dia, o tempo necessário para alcançar a temperatura máxima foi de 6 horas experimentalmente e de 14,24 horas de forma teórica. A temperatura máxima atingida foi de

42°C, representado um incremento de 20°C para uma temperatura média do ar de 17°C, uma radiação solar de 257,67 W/m² e uma temperatura de entrada da água de 12°C.

O dia 6 apresentou uma temperatura máxima de 50°C para uma temperatura de entrada da água de 14°C, representado um incremento de 36°C, o maior atingido pelo coletor solar com cobertura. A temperatura média do ar foi de 20°C e a radiação solar média foi de 268 W/m², fazendo com que o tempo experimental necessário para conseguir este alto incremento de temperatura seja de 5 horas, enquanto que o tempo teórico foi 14,04 horas.

No sétimo dia, assim como no anterior, a temperatura máxima atingida foi de 50°C. Neste dia o incremento de temperatura foi de 34°C, pois a temperatura de entrada da água foi de 16°C. A temperatura média do ar foi de 22°C e a média de radiação solar do dia foi de 280,44 W/m². O tempo experimentalmente necessário para atingir a temperatura máxima foi de 4 horas, enquanto que o tempo teórico foi de 14,66 horas.

Para o último dia, a temperatura máxima atingida pelo coletor solar com cobertura foi de 46°C, representando um incremento de 30°C. O tempo experimental foi de 4 horas enquanto que o tempo teórico foi de 18,46 horas. As condições desses dias foram: temperatura média do ar de 23°C e radiação solar média de 276 W/m².

A discrepância dos tempos calculados em relação ao tempo experimental pode ser explicada devido a um alto número de Biot encontrado para o sistema. Isso revela que determinadas considerações utilizadas não podem ser aplicadas devido ao fato de que a temperatura não é uniforme ao longo da seção transversal do tubo e, nem mesmo, ao longo do comprimento do mesmo. Por isso, seria necessária uma instrumentação maior no coletor solar para que fosse possível a coleta de temperatura em diversos pontos.

Novamente, utilizando as Equações (1) e (2) foi possível calcular a eficiência do coletor solar com cobertura ao longo de cada dia, conforme apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Eficiência do coletor solar com cobertura a cada dia.

Eficiência do coletor solar com cobertura				
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4
Eficiência (%)	11,15	11,66	9,44	14,55

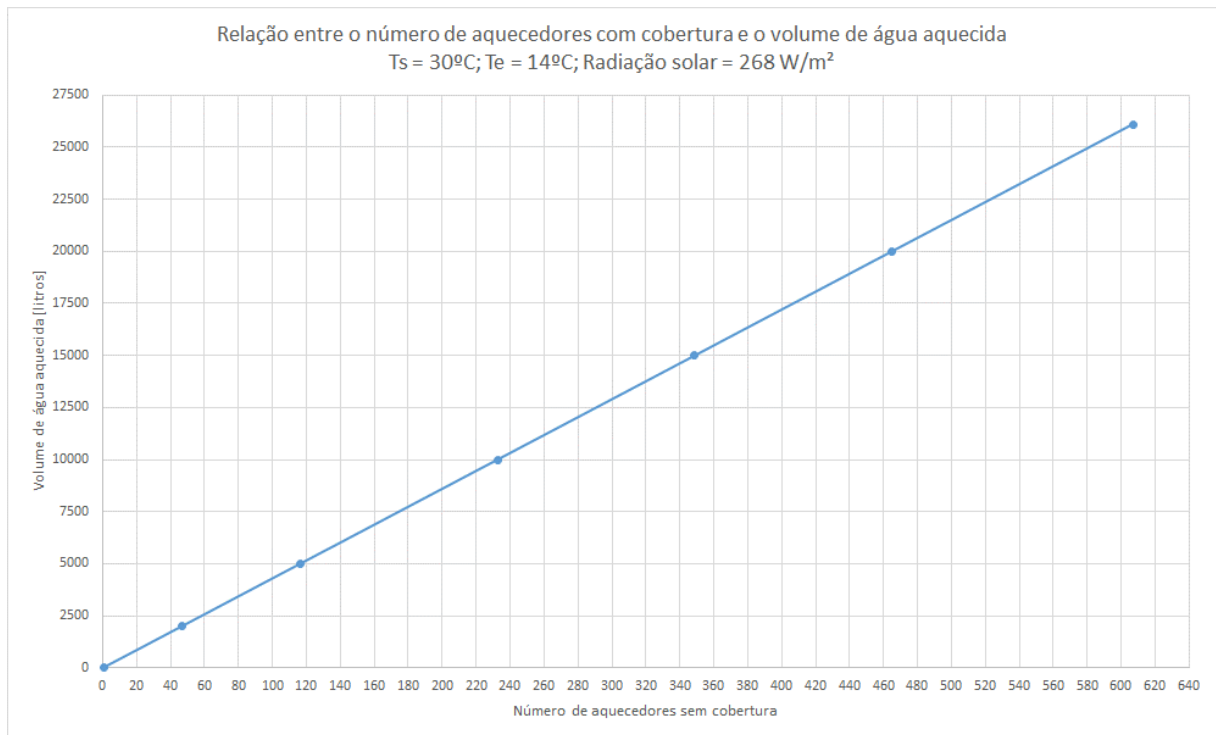
	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8
Eficiência (%)	9,20	15,92	14,37	12,88

Fonte: Autor.

Para o coletor solar com cobertura pode-se perceber que a eficiência foi mais alta, apresentando uma média de eficiência de 12,40%. A eficiência mais alta encontrada para o coletor solar com cobertura se deu no dia 6, 15,92%. O pior valor de eficiência foi para o dia 5, 9,20%.

A última análise feita para o coletor solar com cobertura foi referente ao número de aquecedores necessário para aquecer determinados volumes de água até 30°C. Para isso, considerou-se uma temperatura de entrada de 14°C e uma radiação solar de 268 W/m². Os resultados estão apresentados na Figura 24.

Figura 22 - Relação do número de aquecedores com cobertura ao volume de água aquecido a 30°C.



Fonte: Autor.

A partir da Figura 24, tem-se que para uma piscina residencial com dimensões 6m x 3m x 1,45m, o número de aquecedores seria 607, pois a área com cobertura é menor. Neste caso, o tempo de aquecimento seria de 2,37 horas para que todo o volume da piscina atinja 30°C. Pode-se encontrar ainda o número de aquecedores para diversos volumes que sejam de interesse.

4.3 COLETOR SEM COBERTURA X COLETOR COM COBERTURA

Uma análise importante é referente ao desempenho dos coletores em comparação um com o outro, ou seja, a comparação do coletor solar sem cobertura com o coletor solar com cobertura. Para que essa comparação seja viável é preciso comparar dias em que as radiações solares estejam próximas, visto isso, a primeira comparação feita foi do dia 1 do coletor solar com cobertura e o dia 5 do coletor solar sem cobertura, conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 - Comparação do coletor solar sem cobertura no dia 5 com o coletor solar com cobertura no dia 1.

	T _{máx} [°C]	Tempo - 30°C [h]
Coletor com cobertura	38	4
Coletor sem cobertura	30	4

Fonte: Autor.

Para o dia 1 do coletor solar com cobertura, a radiação solar média foi de 212,56 W/m², enquanto que para o dia 5 do coletor solar sem cobertura foi de 221,89 W/m². Porém, pode-se perceber que apesar do coletor solar com cobertura receber um pouco menos de radiação, o mesmo atingiu uma temperatura máxima mais elevada que o coletor solar sem cobertura.

Para o dia 1 do coletor solar com cobertura, a temperatura de entrada da água foi de 18°C e a temperatura média do ar foi de 21,5°C, representando um incremento máximo de 20°C, sendo necessário um tempo de 4 horas para o incremento máximo. No dia 5 do coletor sem cobertura a temperatura de entrada da água foi de 17°C, representando um incremento máximo de 13°C, visto que a temperatura média do ar estava em 23°C, levando 4 horas para o incremento máximo.

Em relação ao tempo para atingir a temperatura de 30°C o coletor solar com cobertura apresentou o mesmo tempo do coletor sem cobertura, entretanto, no primeiro a temperatura de entrada da água foi de 18°C, representando um incremento de 12°C para uma temperatura do ar de 21,5°C. Já para o dia 5 do coletor solar sem cobertura o tempo foi o mesmo, porém o incremento de temperatura foi de 13°C, pois a temperatura de entrada da água foi de 17°C e a temperatura média do ar de 23°C.

Fez-se a mesma análise para o dia 5 do coletor solar com cobertura, o qual apresentou uma radiação solar média de 257,67 W/m² e o dia 6 do coletor solar sem cobertura, que apresentou 250,11 W/m² de radiação solar. Os resultados estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 - Comparação do coletor solar sem cobertura no dia 6 com o coletor solar com cobertura no dia 5.

	T _{máx} [°C]	Tempo - 30°C [h]
Coletor com cobertura	42	3,53
Coletor sem cobertura	36	2,8

Fonte: Autor.

Apesar do fato de que o dia 6 do coletor solar sem cobertura recebeu um pouco menos de radiação solar, o coletor solar com cobertura atingiu no dia 5 uma temperatura máxima de 6°C mais elevada que o coletor solar sem cobertura. Para o dia 6 a temperatura de entrada da água foi de 17°C, representando um incremento de 19°C para uma temperatura média do ar de 24°C, levando 4 horas para atingir. Já o dia 5 do coletor solar com cobertura teve-se uma temperatura de entrada da água de 12°C, um incremento de 30°C para uma temperatura média do ar de 18°C, levando 6 horas para atingir.

Para a análise do tempo para atingir 30°C, o dia 5 do coletor solar com cobertura obteve um incremento de 18°C para uma temperatura média do ar de 18°C, sendo necessário um tempo de 3,53 horas. Para o dia 6, o coletor solar sem cobertura levou 2,8 horas para obter um incremento de 13°C, porém a temperatura média do ar foi de 24°C.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi analisado o desempenho de um coletor solar em duas situações distintas, com e sem cobertura, constituído de tubos de PVC, a cobertura foi construída com garrafas do tipo PET. Os ensaios foram realizados na cidade de Cachoeira do Sul entre os dias 8 e 24 de junho de 2019.

A partir da análise do coletor solar sem cobertura observou-se que a temperatura máxima atingida pelo mesmo foi de 38°C, tendo como menor tempo para atingir a temperatura de 30°C, considerada como ideal para o banho em piscinas residenciais, de 2,72 horas. Enquanto que o coletor solar com cobertura apresentou como temperatura máxima de 50°C e o tempo mínimo para atingir os 30°C de 2,37 horas. Sendo assim, é possível afirmar que a cobertura teve influência significativa perante o coletor solar obtendo um melhor desempenho do mesmo.

A eficiência encontrada para o coletor solar sem cobertura foi tida como satisfatória visto que os equipamentos responsáveis por transferência de energia térmica, normalmente, apresentam uma baixa eficiência. Além disso, os valores encontrados estão próximos ao que foi apresentado no referencial teórico. Já para o coletor solar com cobertura os valores de eficiência superaram as expectativas, estando consideravelmente acima do coletor solar sem cobertura, próximos a 15%.

A defasagem entre os valores teóricos e experimentais de tempo pode ser corrigida através da aplicação de uma instrumentação da bancada, com mais sensores para a medição das temperaturas e da velocidade do ar externo. Desta forma, seria possível a coleta de valores que serviriam como parâmetro para a elaboração de um modelo teórico mais preciso.

Conclui-se que devido à baixa eficiência se torna inviável a aplicação dos coletores solares alternativos em piscinas residenciais, pois pelo fato de piscinas deterem de um grande volume de água, necessitando assim de um número muito elevado de coletores. Todavia, notou-se a grande utilidade em residências, onde o volume consumido durante o banho em chuveiros é menor, consequentemente a utilização do coletor solar resulta em uma menor utilização da energia elétrica.

Como sugestão aos próximos trabalhos, pode-se dizer a realização da instrumentação e aquisição remota de dados para que se tenha uma maior precisão nas medidas dos tempos necessários para atingir determinadas temperaturas, assim como a instalação da bancada próxima a uma estação meteorológica para que os dados de outras variáveis ambientais sejam

medidos e controlados, como velocidade do vento, por exemplo. Desta forma, os dados medidos com esta instrumentação possibilitariam a realização de um modelo matemático mais preciso que descreva o sistema de aquecimento de água solar.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. ELETROBRAS. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil**. Rio de Janeiro: Júlio Santos, 2012. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/121976/mod_resource/content/1/Livro%20Solar.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2018.
- BRECHT, Douglas Gherardt. **Estado da arte sobre aquecimento de água no brasil**. 2016. 203 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/AquecimentoDeAgua.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- COIMBRA, Núbia et al. **Eficiência Térmica de Coletor Solar de Baixo Custo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/medterm/trabalhos/trabalhos-2008/coletorsolarbaixocusto.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2018.
- COMGÁS. **Sistemas de Aquecimento de Água para Edifícios através da associação Energia Solar e Gás Natural**. São Paulo: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/manuais/Manual_Tecnico_para_Projeto_e_Construcao_de_Sistemas_de_Aquecimento_Solar_e_Gas_Natural.pdf>. Acesso em: 05 set. 2018.
- COSTA, Raimundo Nonato Almeida. **Viabilidade térmica, econômica e de materiais de um sistema solar de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/123456789/15527/1/RaimundoNAC.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2018.
- SOLETROL (São Paulo). **Coletor Solar de Piscina Soletrol Ecospark®**. Disponível em: <<https://www.soletrol.com.br/produtos/piscinas/ecospark/>>. Acesso em: 29 set. 2018.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS E PROFISSIONAIS DE PISCINAS (São Paulo). **Temperatura ideal para piscinas**. Disponível em: <<http://www.anapp.org.br/blog/temperatura-ideal-para-piscinas>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- INCOTERM. **Termômetro químico escala interna divisão -10+110:1°C - 260mm Incoterm 5012**. 2019. Disponível em: <<https://www.incoterm.com.br/solucoes-em-medicao/termometros-quimicos-escala-interna/produto/5012-termometro-quimico-escala-interna-divisao--10-110-1-c-260mm>>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. (FRANK P. INCROPERA).
- LAFAY, Jean-marc Stephane. **LAFAY, J. M. S. Análise energética de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás. Porto Alegre, junho de 2005**. 2005. 173 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5911/000477619.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

- MACAGNAN, Mario H. **Introdução à radiação solar**. 2010. 100 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo, 2010. Disponível em: <http://professor.unisinos.br/mhmac/Energia%20Solar%20Termica/Apostila_nova_ver_2010_full.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.
- MANEA, Tiago Francisco. **Avaliação de sistemas de aquecimento de água solar-gás**. 2009. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24030/000742670.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 04 out. 2018.
- MARQUES, Maurício Nunes. **Aquecedores de água: Tipos, características e projeto básico**. 2006. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
- MOGAWER, Tamer; SOUZA, Teófilo Miguel de. **Sistema solar de aquecimento de água para residências populares**. Guaratinguetá: Unesp, 2004.
- MOREIRA, Francisco Bastos. **Coletores solares em instalações prediais: Desempenho e viabilidade técnico - econômica para sistema de aquecimento de chuveiro**. 2013. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- OLIVEIRA, Álvaro Daniel de. **Análise de custos entre coletores solares quanto a aspectos construtivos**. 2014. 37 f. Monografia (Especialização) - Curso de Eficiência Energética, Universidade Aberta do Brasil, Novo Hamburgo, 2014.
- PIANEZZOLA, Gilberto. **Mapas de complementaridade dos potenciais solar e eólico no estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7608/000549565.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 19 set. 2018.
- RAIMO, Patrícia Abdala. **Aquecimento de água no setor residencial**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- RUAS, Renato Adriane Alves et al. **Análise energética de um protótipo de aquecedor solar de baixo custo**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- SANTOS, Natanaelyfle Randemberg Gomes dos. **Projeto, construção e análise de desempenho de coletores solares alternativos utilizando garrafas pet**. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.
- SANTOS, Rafael Rabello dos. **Estudo da viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema de aquecimento de água utilizando energia solar**. 2010. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- SILVA, Fabio M. da et al. **Desempenho de um aquecedor de água a biogás**. Jaboticabal: Unesp, 2005.

SIQUEIRA, Débora Abrahão. **Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo.** 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

SOARES, Gabriel Nunes. **Aquecedor solar para piscina com canos de PVC e controle de temperatura.** 2012. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade Tecnológica do Paraná, Medianeira, 2012.