

FABRICIO RODRIGUES FALCÃO

Coletor solar utilizando calhas e tubos de lâmpadas fluorescentes

Fabricio Rodrigues Falcão

Coletor Solar Utilizando Calhas E Tubos De Lâmpadas Fluorescentes

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coorientador: Prof. Dr. José Luz Silveira
Coorientador: Profa Dra. Márcia R. de Freitas

F178c	Falcão, Fabrício Rodrigues Coletor solar utilizando calhas e tubos de lâmpadas fluorescentes / Fabrício Rodrigues Falcão – Guaratinguetá, 2019. 70 f. : il. Bibliografia : f. 55-57 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna Co-Orientadores: Prof. Dr. José Luz Silveira Profª Drª Márcia R. de Freitas 1. Aquecimento solar. 2. Energia solar. 3. Reaproveitamento. I. Título. CDU 620.91.
-------	--

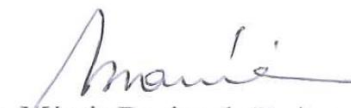
Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

FABRICIO RODRIGUES FALCÃO

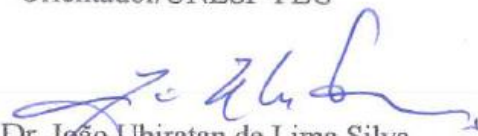
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Profa. Dra. Márcia Regina de Freitas
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. João Ubiratan de Lima Silva
UNESP-FEG


Prof. Me. Fernando Henrique Mayworm de Araújo
UNESP-FEG

Junho de 2019

dedico este trabalho

de modo especial, à memória de meu saudoso
e amado irmão, Paulo Henrique Rodrigues das
Chagas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família, por todo suporte e incentivo aos estudos, conhecimento e cultura. Agradeço pela oportunidade de viver este momento. Agradeço minha vida e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus coorientadores, *Prof. Dr. José Luz Silveira e Profa. Dra. Márcia Regina de Freitas*, por toda confiança, incentivo e oportunidade de demonstrar meu trabalho. Sem a sua orientação, dedicação e imaginação, o estudo aqui apresentado não existiria;

ao técnico e amigo *Rodolfo dos Santos*, pelo prazer na ajuda fornecida na execução mecânica deste projeto. Sem sua fiel cooperação este trabalho não seria possível.

aos membros do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) de Guaratinguetá e do Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE), pelo suporte e companhia ao longo da execução deste trabalho

aos meus pais *Reinaldo Moreira Falcão e Rosilaini Rodrigues das Chagas Falcão*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e me deram total apoio. A determinação de vocês me trouxe até aqui e me inspira a continuar lutando pelos meus sonhos a cada dia.

à minha namorada *Danielli Souza da Silva* por todo incentivo, amor, paciência e carinho ao longo de toda a graduação. Sem sua companhia nos momentos mais difíceis, eu não teria chegado até aqui.

aos professores da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá que, apesar de todas as dificuldades encontradas no decorrer do curso, forneceram-me um ensino de qualidade e mudaram minha vida através do conhecimento passado.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação no atendimento.

ao CNPq - PIBIC pelo financiamento do trabalho. Sem esta ajuda, a execução do trabalho seria inviável.

à todas as pessoas que contribuíram para este trabalho.

“Eu preferiria ser um fracasso em algo que amo do que um sucesso em algo que odeio.”
George Burns

RESUMO

A energia solar pode se tornar um importante contribuinte para a produção e/ou conservação de energia elétrica. Neste trabalho, é apresentado dois modelos de Sistema de Aquecimento Solar (SAS), utilizando calhas e tubos de lâmpadas fluorescentes para aquecimento de água para banho: o primeiro modelo é um coletor solar alternativo com circulação por termossifão e o segundo modelo, uma serpentina solar com circulação forçada. Os protótipos foram baseados em estudos previamente realizados que permitiram suas construções. Na fase inicial deste relatório, faz-se uma introdução expondo o consumo mundial de energia, a Matriz Energética Brasileira (MEB) e as características técnicas dos sistemas de termossifão e de serpentina. Experimentalmente, obtiveram-se, para os dois modelos propostos, dados de temperatura da água aquecida em função do tempo de exposição à radiação solar, a fim de se determinar a Produção Média Diária de Energia Específica (PMDEE) e a eficiência energética (η) para ambos os modelos. Dessa forma, foi possível realizar o dimensionamento para aplicação em residências, análise econômica e comparação dos modelos a outros coletores e serpentinas do mercado. De acordo com os dados calculados, pode-se concluir que ambos os sistemas são economicamente viáveis e apresentam desempenho térmico superior ou igual à maioria dos SAS avaliados no mercado.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecedor solar. ASBC. Energia solar. Reciclagem. SAS.

ABSTRACT

Solar energy can become an important contributor to the production and / or conservation of electrical energy. In this work, two models of Solar Heating System (SAS) are presented, using linear high bay fixtures and tubes of fluorescent lamps for water heating for bath: the first model is an alternative solar collector with thermosyphon circulation and the second model, a solar coil with forced circulation. The prototypes were based on previously realized studies that allowed their constructions. In the initial part of this report, there is an introduction exposing world energy consumption, the Brazilian Energy Matrix (MEB) and the technical characteristics of thermosyphon and coil systems. Experimentally, for the two models proposed, temperature data of the heated water were obtained as a function of the time of exposure to solar radiation, in order to determine the Average Daily Production of Specific Energy (PMDEE) and the energy efficiency (η) for both models. In this way, it was possible to perform the design for residential applications, economic analysis and comparison of the models to other collectors and coils on the market. According to the calculated data, it can be concluded that both systems are economically viable and have thermal performance higher than or equal to the majority SAS evaluated on the market.

KEYWORDS: Solar heater. ASBC. Solar energy. Recycling. SAS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo Mundial de Energia por Tipo e por Ano.....	16
Figura 2 – Repartição da MEB em 2016	18
Figura 3 – Repartição de lixívia e outras renováveis em 2015.....	18
Figura 4 – Consumo residencial de energia em 2015.....	19
Figura 5 – Emissões totais, em MtCO ₂ -eq, associadas à MEB em 2015.....	20
Figura 6 – Modelos de coletores solares tipo placa.....	21
Figura 7 – (a) Reservatório térmico padrão em metal; (b) constituição de um reservatório térmico	21
Figura 8 – Sistema passivo de aquecimento solar de água.....	22
Figura 9 – Sistema de circulação forçada.....	23
Figura 10 – (a) Esquema simplificado da serpentina; (b) Esquema simplificado do coletor ...	25
Figura 11 – Dimensões em mm da calha utilizada.....	26
Figura 12 – Esquema hidráulico termossifão	26
Figura 13 – Esquema hidráulico lateral.....	27
Figura 14 – Esquema hidráulico serpentina	27
Figura 15 – Medidas mínimas do esquema hidráulico.....	29
Figura 16 – (a) Inclinação do coletor; (b) orientação do coletor	31
Figura 17 – Temperaturas obtidas no dia 29/05/2017 pelos termopares na entrada e na saída do coletor	40
Figura 18 – Temperaturas obtidas no dia 03/06/2017 pelos termopares na entrada e na saída do coletor	41
Figura 19 – Temperaturas obtidas no dia 04/06/2017 pelos termopares na entrada e na saída do coletor	41
Figura 20 – Temperaturas obtidas no dia 27/07/2018 para a serpentina.....	45
Figura 21 – Temperaturas obtidas no dia 28/07/2018 para a serpentina.....	45
Figura 22 – Temperaturas obtidas no dia 30/07/2018 para a serpentina.....	46
Figura 23 – Valores de $I_{G-anual}$	70
Quadro 1 – Classificação de um coletor para banho em função de sua PMME.....	43
Fotografia 1 – Calha utilizada	26
Fotografia 2 – Vidro para proteção do coletor e isolantes térmicos da tubulação.....	29
Fotografia 3 – Coletor solar finalizado.....	30
Fotografia 4 – Vidro e isolante térmico	30

Fotografia 5 – Serpentina finalizada.....	30
Fotografia 6 – Termômetro digital para leitura dos termopares	32
Fotografia 7 – Instalação dos termopares utilizados	33
Fotografia 8 – Termômetro de mercúrio utilizado.....	33
Fotografia 9 – Termopares instalados.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oferta interna de energia da MEB	17
Tabela 2 – Produção energética de lixívia e outras renováveis	18
Tabela 3 – Dados obtidos nos dias: 29/05/2017, 03/06/2017 e 04/06/2017	42
Tabela 4 – Valores obtidos para PMDEE e η do termossifão	42
Tabela 5 – Valores obtidos para $\overline{PMDEE}$ e $\bar{\eta}$ do termossifão.....	43
Tabela 6 – Distribuição da Eficiência energética Média, $\bar{\eta}$, de todos os 227 coletores avaliados pelo INMETRO	44
Tabela 7 – Distribuição de $\bar{\eta}$ dos 67 coletores que receberam classificação ‘A’ pelo INMETRO	44
Tabela 8 – Dados obtidos nos dias: 27/07/2018, 28/07/2018 e 30/07/2018	46
Tabela 9 – Valores obtidos para PMDEE e η da serpentina.....	47
Tabela 10 – Valores obtidos para $\overline{PMDEE}$ e $\bar{\eta}$ da serpentina	47
Tabela 11 – Gastos para se produzir o termossifão proposto	48
Tabela 12 – Dados de dimensionamento do termossifão proposto	49
Tabela 13 – Custo anual com o chuveiro elétrico para obtermos a mesma capacidade de aquecimento do termossifão dimensionado	49
Tabela 14 – Análise econômica do termossifão dimensionado	49
Tabela 15 – Gastos para se produzir a serpentina proposta	50
Tabela 16 – Dados de dimensionamento da serpentina proposta	50
Tabela 17 – Custo anual com o chuveiro elétrico para obtermos a mesma capacidade de aquecimento da serpentina dimensionada	51
Tabela 18 – Análise econômica da serpentina dimensionada.....	51
Tabela 19 – Análise econômica da aplicação do sistema de termossifão na FEG.....	52
Tabela 20 – Análise econômica da aplicação do sistema de serpentina na FEG.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASBC	Aquecedor Solar de Baixo Custo
BEN	Balanço Energético Nacional
CO ₂	Dióxido de carbono
CPVC	Policloreto de Vinila Clorado
EDP	Energias de Portugal
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
INMETRO	Instituto nacional de metrologia, qualidade e tecnologia
IPBEN	Instituto de Pesquisa em Bioenergia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LOSE	Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos
MEB	Matriz Energética Brasileira
NBR	Norma Brasileira Registrada
PCD	Ponto de coleta de dados
PMDEE	Produção média diária de energia específica do coletor solar
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
SAS	Sistema de Aquecimento Solar
SINDA	Sistema integrado de dados ambientais

LISTA DE SÍMBOLOS

M_{tep}	Megatonelada equivalente de petróleo
mil Tep	Mil tonelada equivalente de dióxido de carbono
$MtCo_2\text{-eq}$	Megatonelada equivalente de dióxido de carbono
$A_{coletora}$	Área coletora
I_G	Irradiação global média diária
E_{util}	Energia útil
FC_{instal}	Fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar
V_{armaz}	Volume de armazenamento
ρ	Massa específica da água
C_p	Calor específico da água
T_{armaz}	Temperatura de armazenamento da água
T_{amb}	Temperatura ambiente média diária do local de instalação durante a realização do experimento
β	Inclinação do coletor em relação ao plano horizontal
$\beta_{ótimo}$	Inclinação ótima do coletor para o local de instalação
γ	Ângulo de orientação dos coletor solares em relação ao norte geográfico
η	Eficiência energética do coletor
$PMDEE$	Produção média diária de energia específica do coletor solar
$PMMEe$	Produção Média Mensal de Energia Específica do coletor solar
$V_{consumo}$	Volume de consumo
Q_p	Vazão do chuveiro
T	Tempo médio de uso diária do chuveiro
$T_{consumo}$	Temperatura de consumo
$T_{ambiente}$	Temperatura ambiente média anual do local de instalação
$I_{G-anual}$	Irradiação global média anual para o local de instalação
VPL	Valor presente líquido
TIR	Taxa interna de retorno
B/C	Relação benefício custo
Tr	Payback corrigido
I	Investimento inicial
FCt	Fluxo de Caixa

TMA	Taxa mínima de atratividade
Bt	Valor atual de benefícios
Ct	Valor atual de custos
T2	Termopar na entrada
T1	Termopar na saída
T max	Temperatura máxima do dia
T min	Temperatura mínima do dia
$\overline{PMDEE}$	PMDEE média do coletor
$\bar{\eta}$	Eficiência energética média do coletor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSUMO ENERGÉTICO GLOBAL	16
1.2	MEB	17
1.2.1	Oferta interna de energia	17
1.2.2	Consumo residencial de energia	19
1.2.3	Emissões antrópicas associadas à MEB	19
1.3	COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS)	20
1.3.1	Coletor solar	20
1.3.2	Reservatório térmico	21
1.4	O SISTEMA E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	21
1.4.1	Circulação natural/termossifão	22
1.4.2	Circulação forçada	22
1.5	OBJETIVOS	23
1.6	JUSTIFICATIVAS	24
2	METODOLOGIA	25
2.1	ESQUEMA HIDRÁULICO	26
2.2	EXECUÇÃO DAS LIGAÇÕES HIDRÁULICAS	27
2.2.1	Sistema termossifão	28
2.2.2	Sistema serpentina	30
2.3	ORIENTAÇÃO DOS COLETORES	31
2.4	COLETA DE DADOS	31
2.4.1	Sistema termossifão	32
2.4.2	Sistema serpentina	33
2.5	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	34
2.5.1	Cálculos das características do coletor proposto	34
2.5.2	Metodologia de dimensionamento	36
2.5.3	Metodologia de análise econômica	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.1	CÁLCULOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS	40
3.1.1	Sistema termossifão	40
3.1.2	Sistema serpentina	44
3.2	DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA	48

3.2.1	Sistema termossifão	48
3.2.2	Sistema serpentina	50
3.3	DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS PARA A MORADIA ESTUDANTIL DA FEG	51
3.3.1	Sistema termossifão	51
3.3.2	Sistema serpentina	52
4	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	55
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	57
	APÊNDICE A – Dimensionamento do termossifão para uma família de quatro pessoas	58
	APÊNDICE B – Dimensionamento da serpentina para uma família de quatro pessoas	61
	APÊNDICE C – Dimensionamento do termossifão para aplicação na moradia da FEG	64
	APÊNDICE D – Dimensionamento da serpentina para aplicação na moradia da FEG	67
	ANEXO A – Irradiação global.....	70

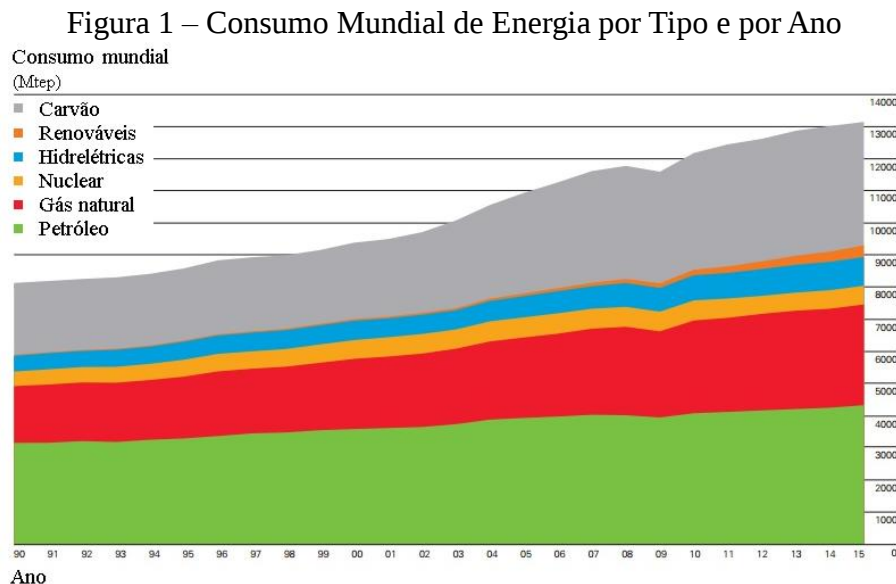
1 INTRODUÇÃO

“Globalmente, o crescimento econômico e populacional continuou sendo o principal responsável pelo aumento das emissões de Dióxido de carbono (CO₂) pela combustão de combustíveis fósseis” (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2014, p. 5).

Dessa forma, a mitigação das mudanças climáticas está fortemente associada ao setor energético, sobretudo as energias renováveis, sendo necessário o desenvolvimento deste setor, a fim de reduzir as emissões de CO₂ e o efeito estufa.

1.1 CONSUMO ENERGÉTICO GLOBAL

A Figura 1, presente no Relatório Estatístico de Energia Global 2018 do BP Group, uma das maiores empresas de energia do mundo, fornece o consumo energético mundial, entre 1992 e 2017, por tipo e por ano, em Mtep.



Fonte: BP Group (2016)

Analisando os dados fornecidos, é possível verificar que o consumo de energia proveniente do petróleo, gás natural e carvão são predominantes. Além disso, o aumento da utilização de combustíveis renováveis é grande, no entanto, relativamente, representa uma baixa porcentagem do consumo total.

Globalmente, entre 2005 e 2015, a energia renovável utilizada na geração de energia cresceu 15,2 %, ligeiramente abaixo do crescimento médio de 15,9 %; no entanto, estes números representam um incremento recorde de +213 TWh, que foi aproximadamente igual ao aumento total na geração de energia. Além disso, as energias renováveis representaram 6,7 % da geração de energia global, sendo que, China (+20,9 %) e Alemanha (+23,5 %) registraram os maiores incrementos na geração de energias renováveis.(BP GROUP, 2015, p. 3)

Ainda assim, em relação às energias renováveis:

A energia eólica, com um aumento de 17,4 % em 2015, continua a ser globalmente a maior fonte de eletricidade renovável, representando 52,2 % da geração renovável global, sendo a Alemanha responsável pelo maior crescimento (+53,4 %). Por outro lado, a geração de energia solar cresceu 32,6 % em 2015, com a China (+69,7 %), os EUA (+41,8 %) e o Japão (+58,6 %) responsáveis pelos maiores aumentos, sendo a China o principal gerador mundial de energia solar (BP GROUP, 2015, p. 4)

1.2 MEB

Segundo BRASIL (2016, p. 5), o Balanço Energético Nacional (BEN) tem por finalidade apresentar a contabilização relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil conforme a MEB, contemplando as atividades de extração de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, importação e exportação, a distribuição e uso final da energia.

1.2.1 Oferta interna de energia

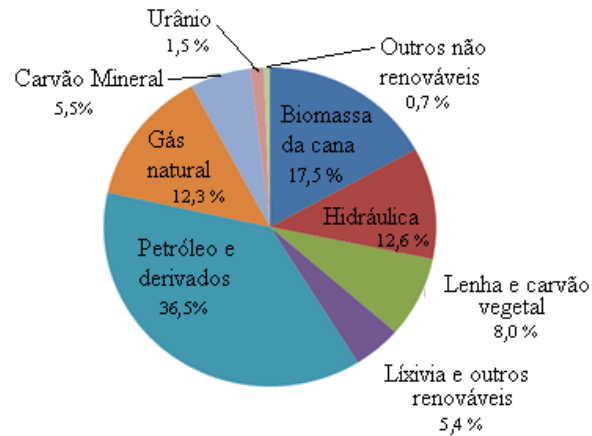
“Em 2015, a oferta interna de energia atingiu 299,2 Mtep, sendo que a participação de renováveis na MEB manteve-se entre as mais elevadas do mundo: 41,2 %, enquanto as fontes não renováveis representam 58,8 %” (BRASIL, 2016, p. 13). A Tabela 1 e a Figura 2 ilustram, segundo o BEN, a MEB em 2015.

Tabela 1 – Oferta interna de energia da MEB

Fonte (Mtep)		2015
Renováveis	Energia hidráulica	33,9
	Biomassa da cana	50,6
	Lenha e carvão vegetal	24,5
	Lixívia e outros renováveis	14,2
Não Renováveis	Petróleo e derivados	111,6
	Gás natural	41,0
	Carvão mineral	17,7
	Urânio (U ₃ O ₈)	3,9
	Outros não renováveis	1,8

Fonte: Adaptado de Brasil (2016)

Figura 2 – Repartição da MEB em 2016



Fonte: Adaptado de Brasil (2016)

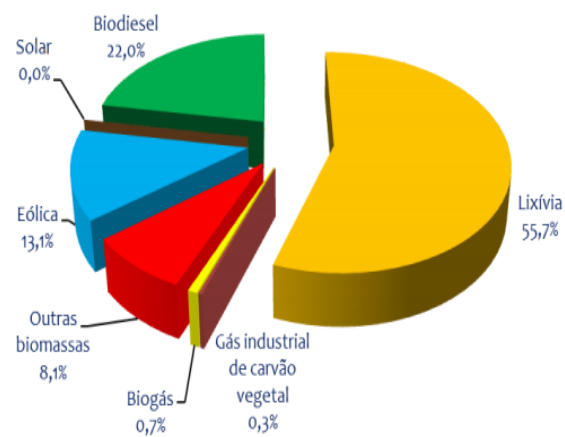
A Tabela 2 e a Figura 3 representam repartição da fonte lixívia e outras renováveis:

Tabela 2 – Produção energética de lixívia e outras renováveis

Lixívia e outras renováveis (mil tep)	2015
Lixívia	7905,0
Biodiesel	3126,0
Outras biomassas	1152,0
Biogás	104,0
Gás industrial de carvão vegetal	43,0
Eólica	1860,0
Solar	1,4
Total	14191,0

Fonte: Adaptado de Brasil (2016)

Figura 3 – Repartição de lixívia e outras renováveis em 2015



Fonte: Brasil (2016)

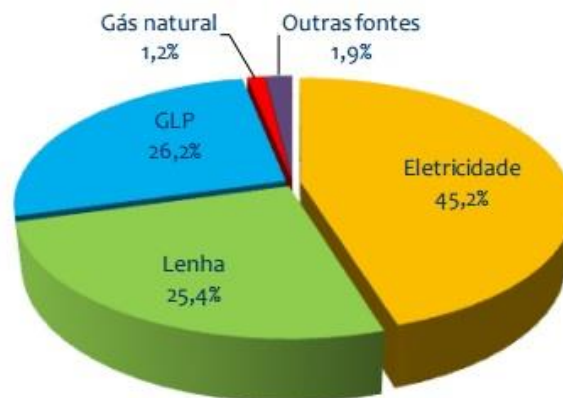
Além disso, segundo Pereira et al. (2006), o potencial anual médio de energia solar para o Brasil está na faixa de $5,0 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$ a $5,9 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$, sendo a região Nordeste a região com maior disponibilidade energética.

1.2.2 Consumo residencial de energia

Em 2015, o consumo residencial de energia, Figura 4, atingiu 25.0 Mtep, com uma proporção de 61 % de renováveis.

Nesse cenário, um chuveiro elétrico de 3000 W representa um consumo mensal médio de 70 kWh para banhos diários de dez minutos em uma família de quatro pessoas; dessa forma, este consumo pode corresponder a uma fração entre 30% a 45 % do valor da fatura mensal. (Energias de Portuga - EDP, 2013).

Figura 4 – Consumo residencial de energia em 2015

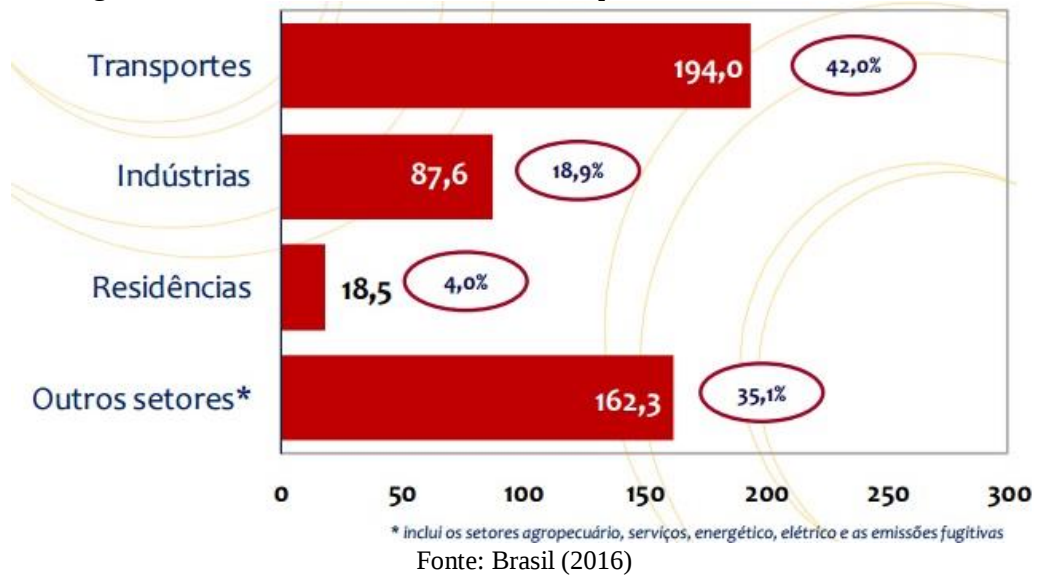


Fonte: Brasil (2016)

1.2.3 Emissões antrópicas associadas à MEB

Conforme a Figura 5 em 2015, o total de emissões antrópicas associadas à MEB atingiu 462,34 MtCO₂-eq.

Figura 5 – Emissões totais, em MtCO₂-eq, associadas à MEB em 2015



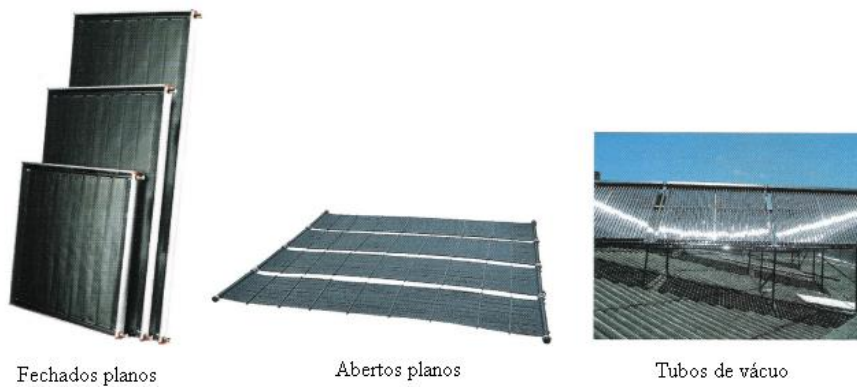
1.3 COMPONENTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS) PADRÃO

O Sistema de Aquecimento Solar (SAS) é “composto por coletor(es) solar(es), reservatório(s) térmico(s), aquecimento auxiliar, acessórios e suas interligações hidráulicas que funcionam por circulação natural ou forçada” (NORMA BRASILEIRA REGISTRADA -NBR 15569, 2008, p. 4).

1.3.1 Coletor solar

“O coletor solar é o equipamento responsável por absorver a radiação solar aquecendo a água que circula em seu interior” (BOAS PRÁTICAS, 2009, p. 10). Dessa forma, há diversos modelos, podendo ser do tipo serpentina, placa, etc, Figura 6. Os coletores solares desenvolvidos neste trabalho são do tipo serpentina e termossifão, com, respectivamente circulação forçada e natural.

Figura 6 – Modelos de coletores solares tipo placa



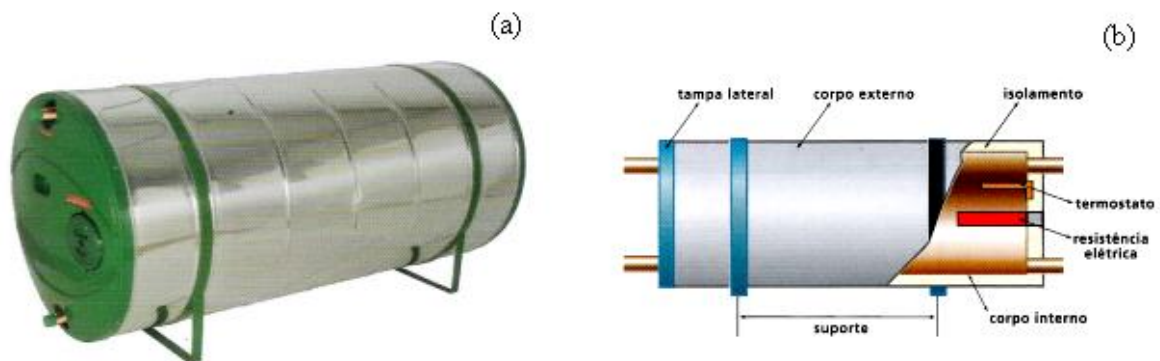
Fonte: Boas práticas (2009)

1.3.2 Reservatório térmico

O reservatório térmico (ou boiler), Figura 7a, “é um tanque termicamente isolado que armazena a água aquecida durante o dia na placa coletora, usado para garantir o suprimento noturno de água quente assim como nos dias chuvosos”. (OLIVEIRA et al., 2009, p. 3).

Além disso, como demonstra a Figura 7b, o boiler “é constituído por corpo externo, isolamento térmico, corpo interno e tubulações, podendo apresentar em seu interior, quando necessário, um sistema de aquecimento auxiliar e de proteção contra corrosão”. (BOAS PRÁTICAS, 2009, p. 12).

Figura 7 – (a) Reservatório térmico padrão em metal; (b) constituição de um reservatório térmico



Fonte: Boas práticas (2009)

1.4 O SISTEMA E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

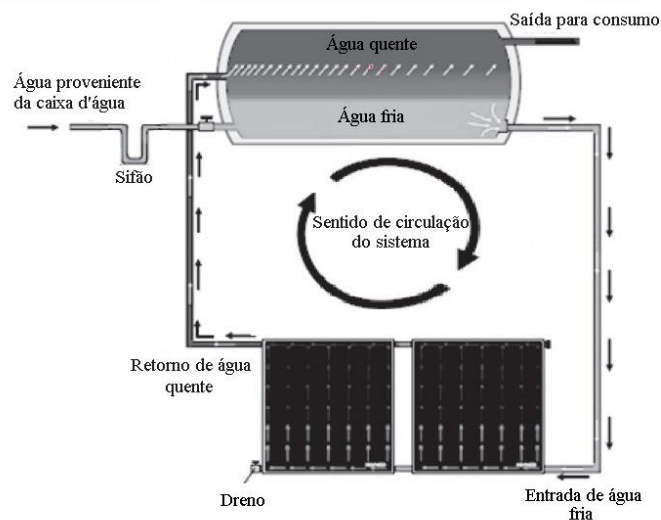
Os sistemas de termossifão e serpentina possuem seu funcionamento baseado na utilização da energia solar para aquecimento de água, diferenciando-se pela forma como a circulação de água ocorre nos sistemas.

1.4.1 Circulação natural/termossifão

O sistema de termossifão com circulação natural, Figura 8, é baseado na variação da densidade da água em diferentes temperaturas. Este sistema é utilizado em situações de pequeno porte, nas quais o volume reservado de água é de até 1000 l. Seu funcionamento ocorre da seguinte forma: “a água quando aquecida fica mais leve (menos densa) e, dessa forma, é empurrada pela água mais fria (maior densidade), fazendo o sistema circular” (BOAS PRÁTICAS, 2009, p. 13).

Nesse sistema, a vazão é proporcional à radiação solar e a circulação da água só será interrompida quando a intensidade de radiação for insuficiente para manter a temperatura da água a níveis diferentes ou quando for alcançado o equilíbrio térmico entre o coletor e o reservatório térmico (OLIVEIRA et al., 2009, p. 4).

Figura 8 – Sistema passivo de aquecimento solar de água

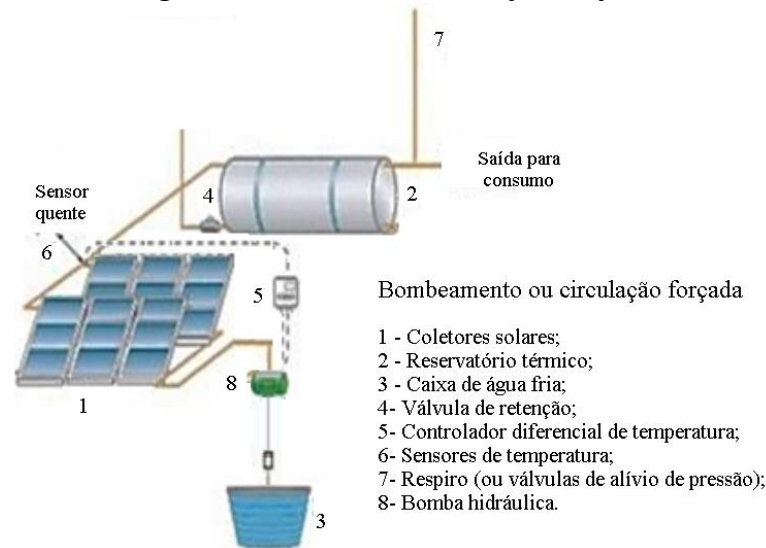


Fonte: Komeco (2015)

1.4.2 Circulação forçada

O sistema de circulação forçada adaptado para serpentina, Figura 9, possui a presença de uma bomba hidráulica ativada pelo controle diferencial de temperatura que realiza a circulação da água no coletor, com uma vazão definida.

Figura 9 – Sistema de circulação forçada



Fonte: Adaptado de Boas práticas (2009)

1.5 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver, utilizando materiais de baixo custo, como calhas e tubos de lâmpadas fluorescentes, um sistema de aquecimento de água com funcionamento por serpentina e outro com funcionamento por termossifão. A finalidade deste sistema é aquecimento de água para banho em residências, a fim de reduzir o consumo de energia elétrica de modo sustentável. Por outro lado, são objetivos específicos:

- Estudar os termossifões e serpentinhas disponíveis atualmente no mercado.
- Desenhar e construir um termossifão e uma serpentina, utilizando materiais recicláveis.
- Analisar termodinamicamente os sistemas de aquecimento, com base em dados de temperatura obtidos, a fim de determinar as características de cada sistema, como a Produção Média Diária de Energia Específica (PMDEE) e o rendimento (η); possibilitando realizar o dimensionamento, análise econômica e comparação dos sistemas a outros coletores e serpentinhas do mercado.
- Realizar o dimensionamento e análise econômica de ambos os sistemas para uma residência de quatro moradores, com base na NBR 15569.
- Realizar o dimensionamento e análise econômica dos sistemas para possível utilização na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG), com base na NBR 15569.

- Comparar os métodos de funcionamento do sistema de aquecimento de água - termossifão ou serpentina de aquecimento - para determinar qual é o método mais eficiente, de acordo com a PMDEE e η .

1.6 JUSTIFICATIVAS

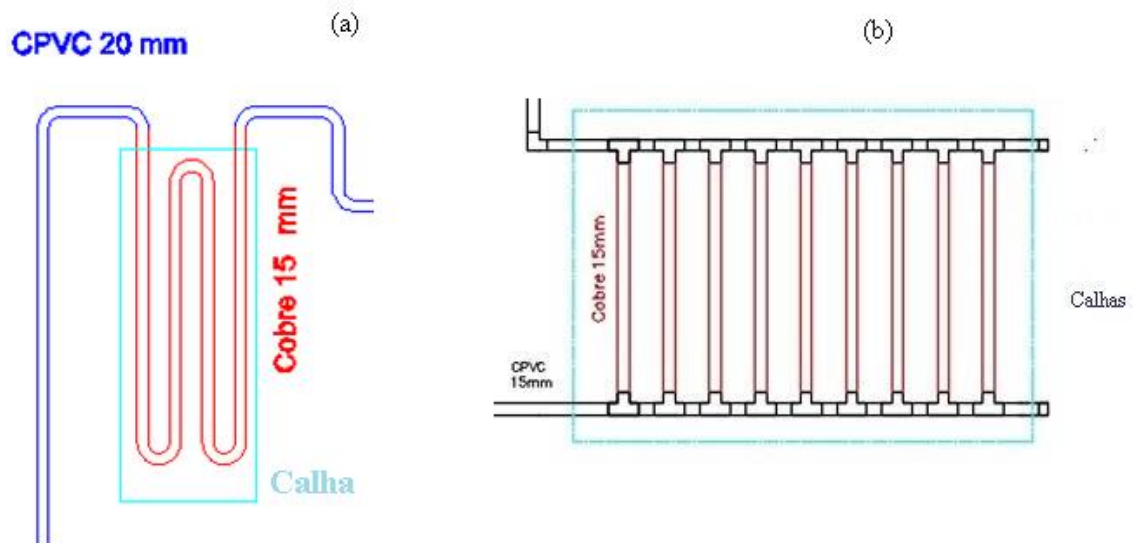
Neste trabalho, os sistemas serão construídos utilizando calhas e tubos de lâmpadas fluorescentes, visando à reciclagem deste material que possui grande quantidade disponível no campus FEG e está na pauta de logística reversa da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Além disso - de acordo com os fatores: alto potencial brasileiro solar, de $5,0 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$ a $5,9 \frac{kWh}{m^2 \cdot ano}$, Pereira et al. (2006); baixo percentual de participação da energia solar na Matriz energética brasileira, em torno de 0,0% (BRASIL, 2016); alto custo do chuveiro elétrico em residências - o investimento e desenvolvimento da tecnologia de energia solar é importante, visto que esta é uma fonte de energia renovável e atualmente, as emissões antrópicas associadas à MEB, em MtCO₂-eq são altas (BRASIL, 2016).

2 METODOLOGIA

O sistema de serpentina proposto possui uma área de $0,30 \text{ m}^2$ e escoar um volume diário de 30 litros. Sendo assim, o modelo possui circulação forçada e, basicamente, é constituído pelos seguintes materiais: calhas e lâmpadas fluorescentes, tubo de cobre, peças de fixação e tubos e conexões de Policloreto de Vinila Clorado (CPVC), Figura 10a. O coletor solar proposto possui uma área de $0,9188 \text{ m}^2$ e um reservatório térmico de 90 l e apresenta circulação por termossifão, Figura 10b. Além disso, é constituído pelos mesmos materiais do sistema de serpentina.

Figura 10 – (a)Esquema simplificado da serpentina; (b) esquema simplificado do coletor



Fonte: Autor

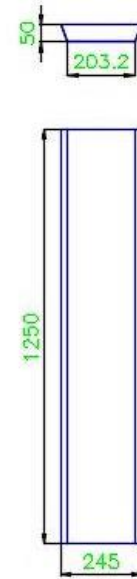
As dimensões, em mm, da calha unitária utilizada, Fotografia 1, para ambos os sistemas estão definidas na Figura 11; apresentando uma área de aproximadamente $0,30 \text{ m}^2$.

Fotografia 1 – Calha utilizada



Fonte: Autor

Figura 11 – Dimensões em mm da calha utilizada

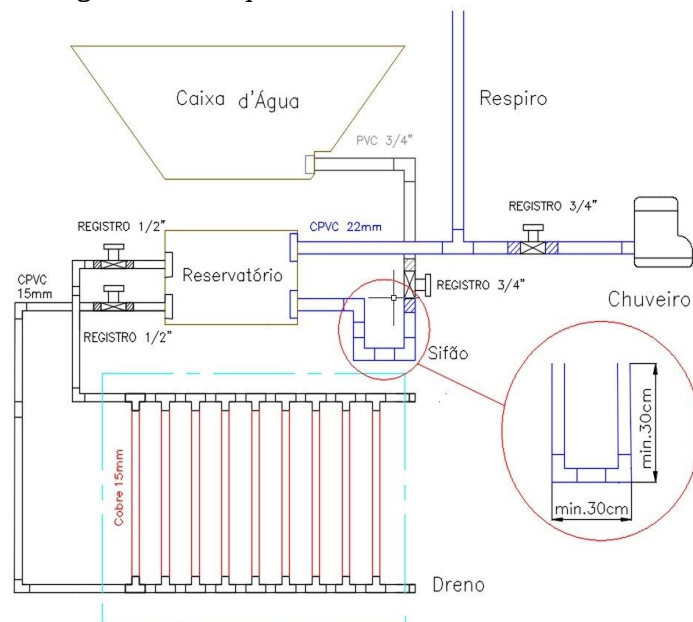


Fonte: Autor

2.1 ESQUEMA HIDRÁULICO

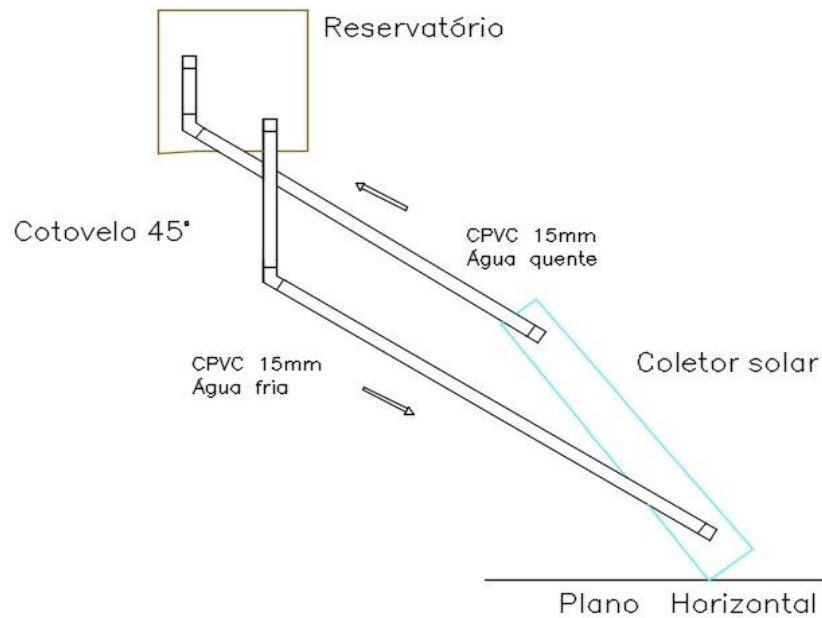
O esquema hidráulico montado para o sistema de termossifão é mostrado nas Figuras 12 e 13. Por outro lado, o esquema hidráulico do sistema de serpentina é detalhado na Figura 14.

Figura 12 – Esquema hidráulico termossifão



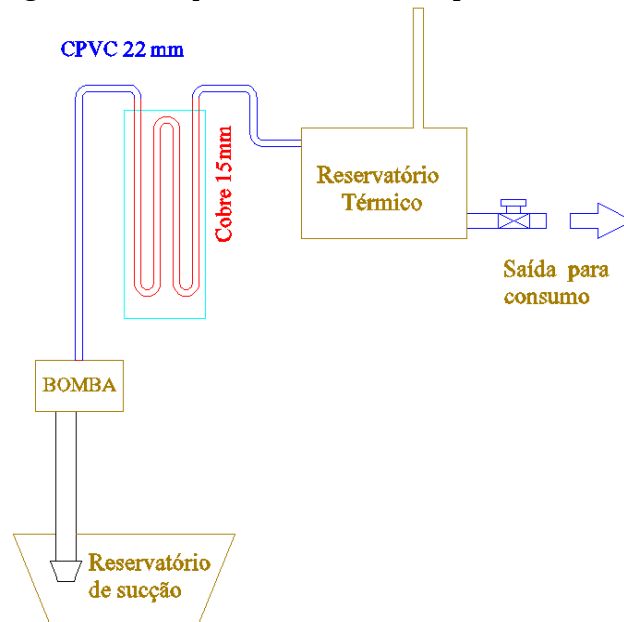
Fonte: Autor

Figura 13 – Esquema hidráulico lateral



Fonte: Autor

Figura 14 – Esquema hidráulico serpentina



Fonte: Autor

2.2 EXECUÇÃO DAS LIGAÇÕES HIDRÁULICAS

Para ambos os sistemas (termossifão e serpentina), pode-se observar, nas Figuras 12 e 14, que as dimensões dos tubos e conexões estão definidas por um esquema de cores: vermelho - cobre 15 mm; azul - CPVC 22 mm; preto - CPVC 15 mm; cinza – Policloreto de Vinila

(PVC) $\frac{3}{4}$ ", sendo importante ressaltar que a tubulação de CPVC foi utilizada devido às altas temperaturas alcançadas no coletor e ambos os sistemas.

2.2.1 Sistema termossifão

Conforme a norma NBR 15569 (2008), deve-se utilizar o sifão detalhado na Figura 12 e instalar a tubulação de fornecimento de água fria para o reservatório com um comprimento mínimo de 1,5 m a fim de evitar o retorno de água quente para a caixa d'água. Em contrapartida, a norma recomenda, quando possível, o uso de curvas de 45 ° no lugar de curvas de 90 ° a fim de evitar perda de carga, Figura 13.

Além disso, todas as conexões das Figuras 12 e 13, com exceção das conexões de cobre, foram unidas utilizando cola apropriada para CPVC e PVC, seguindo especificações do fabricante. Vale ainda ressaltar que, para a união das tubulações com os registros, foram utilizados conectores tipo bolsa/rosca, os quais estão destacados na Figura 12 pelo uso de hachura.

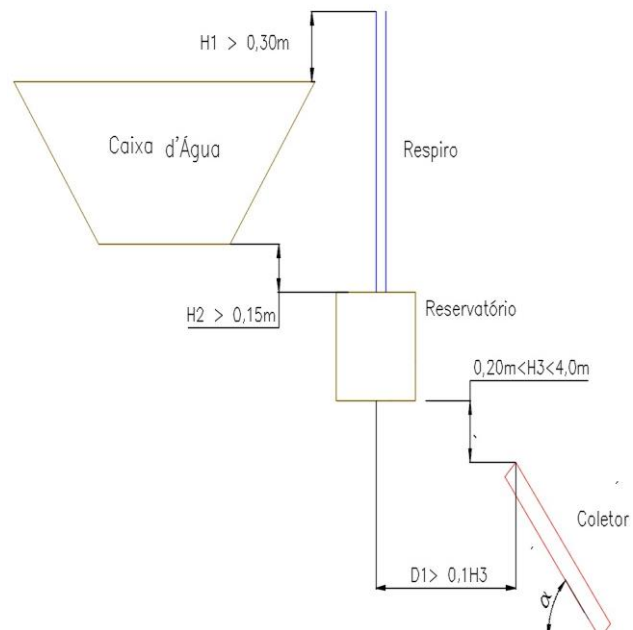
Ainda assim, para a união entre as tubulações de cobre e CPVC-15 mm, foram utilizadas, a fim de viabilizar o custo do projeto e manter um desempenho satisfatório, conexões TEE de CPVC - 15 mm unidas ao cobre pela abertura de rosca nas peças, visto que as conexões TEE de cobre apresentam um maior valor agregado e necessitam de solda de acetileno-oxigênio para a sua instalação, dificultando o projeto.

No entanto, de acordo com BOAS PRÁTICAS (2009, p. 18), a Figura 15 ilustra as dimensões mínimas a serem seguidas durante a instalação hidráulica do termossifão. Sendo assim, o não cumprimento dessas medidas, inviabiliza o funcionamento do sistema.

Apesar disso, segundo a Universidade do sol (2005) é importante evitar a criação de sifões na tubulação, pois, durante o aquecimento da água, ocorre formação de bolhas de ar que ficam aprisionadas nos sifões, causando interrupção do fluxo de água no sistema. Dessa maneira, é necessário garantir a ascendência da tubulação em direção ao reservatório térmico para as bolhas serem eliminadas pelo respiro.

Por fim, de acordo com a Fotografia 2, foi instalado e vedado com silicone o vidro para proteção do coletor e, durante a instalação da tubulação externa ao coletor, foram utilizados isolantes térmicos na tubulação, visando amenizar as perdas de calor para o meio ambiente.

Figura 15 – Medidas do esquema hidráulico



Fonte: Autor

Fotografia 2 – Vidro para proteção do coletor e isolantes térmicos da tubulação



Fonte: Autor

A Fotografia 3 apresenta o coletor finalizado.

Fotografia 3 – Coletor solar finalizado



Fonte: Autor

2.2.2 Sistema serpentina

No sistema de serpentina, assim como no sistema termossifão, foi utilizado o sifão detalhado na Figura 14. Por outro lado, a tubulação de cobre da serpentina foi realizada com curvas de 180°, soldadas com solda de prata.

Além disso, de acordo com a Fotografia 4, o vidro para proteção da serpentina foi instalado e vedado com silicone. Durante a instalação da tubulação externa da serpentina, foram utilizados isolantes térmicos na tubulação, visando amenizar as perdas de calor para o meio ambiente. A Fotografia 5 apresenta a serpentina finalizada.

Fotografia 4 – Vidro e isolante térmico



Fonte: Autor

Fotografia 5 – Serpentina finalizada



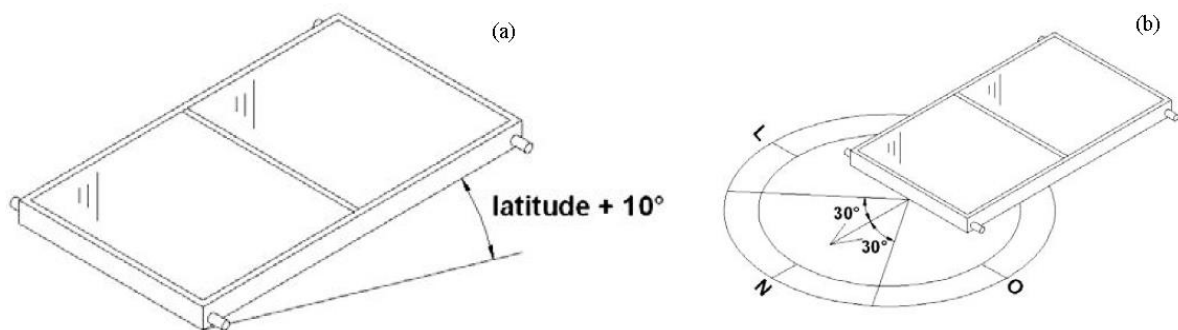
Fonte: Autor

2.3 ORIENTAÇÃO DOS COLETORES

Em relação à orientação dos coletores (termossifão e serpentina), um fato importante para o funcionamento dos sistemas é o ângulo α de inclinação. Dessa forma, como demonstra a Figura 16a, a norma NBR 15569 (2008, p.18) sugere que o “ângulo de inclinação seja igual ao da latitude local acrescido de 10° , no entanto, não podendo ser menor que 15° após a soma”. No caso de Guaratinguetá, a latitude é igual a $-22^\circ 48' 59''$ e, dessa forma, a inclinação ideal para o coletor é de $32^\circ 48' 59''$.

Em contrapartida, a norma NBR15569 (2008, p. 18) sugere, para melhor aproveitamento da energia solar, conforme a Figura 16b, “que os coletores sejam instalados com a face voltada para o Norte geográfico com desvio máximo de até 30° desta direção”. Este passo pode ser feito com auxílio de uma bússola, considerando a declinação magnética.

Figura 16 – (a) Inclinação do coletor; (b) orientação do coletor



Fonte: NBR15569 (2008)

2.4 COLETA DE DADOS

As medidas de temperatura do sistema de aquecimento, para os dois sistemas, foram obtidas através de termopares tipo J devidamente calibrados e conectados a um termômetro digital, ilustrado na Fotografia 6.

Fotografia 6 – Termômetro digital para leitura dos termopares



Fonte: Autor

Os dados meteorológicos utilizados, como temperatura ambiente, irradiação global média anual ($I_{G-anual}$) para o local de instalação, foram obtidos, respectivamente, pela Plataforma de Coleta de Dados (PCD) N° 32524 instalada na FEG (SISTEMA INTEGRADO DE DADOS AMBIENTAIS-SINDA, 2017) e pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017).

2.4.1 Sistema termossifão

Os termopares foram instalados, de acordo com a Fotografia 7, na entrada e na saída do termossifão.

Os dados dos termopares foram anotados no intervalo entre as 10h e 16h, com medidas de 15 em 15 minutos. Além disso, os dias escolhidos para a realização dos experimentos apresentavam características parecidas, como temperatura, irradiação, quantidade de nuvens e velocidade do vento desprezível.

Por outro lado, para obtenção da temperatura de armazenamento do boiler (T_{armaz}), foi utilizado o termômetro de mercúrio da Fotografia 8. Dessa forma, a leitura da temperatura do reservatório foi realizada após 30 minutos do fim da coleta de dados dos termopares, ou seja, em torno das 16h30min, a fim de assegurar a homogeneização da temperatura dentro do boiler.

Fotografia 7 – Instalação dos termopares utilizados



Fonte: Autor

Fotografia 8 – Termômetro de mercúrio utilizado



Fonte: Autor

2.4.2 Sistema serpentina

As medidas de temperatura do sistema de aquecimento foram obtidas através de termopares tipo J devidamente calibrados e conectados a um termômetro digital, ilustrado na Fotografia 6. O termopar foi instalado na saída da serpentina, de acordo com a Fotografia 9.

Fotografia 9 – Termopares instalados



Fonte: Autor

Os dados dos termopares foram anotados no intervalo entre as 10h e 16h, com medidas de 25 em 25 minutos. Além disso, os dias escolhidos para a realização dos experimentos apresentavam características parecidas, como temperatura, irradiação, quantidade de nuvens e velocidade do vento desprezível.

Detalhadamente, a obtenção dos dados é realizada da seguinte forma: em intervalos de 25 minutos, o escoamento é forçado pela tubulação, obtendo um volume escoado de 2 l; no entanto, como o volume interno da tubulação é de 1 l, é necessário retirar duas vezes toda a água da tubulação para totalizar 2 l, o que implica em duas leituras de temperatura a cada 25 minutos, uma leitura para primeiro litro retirado (1ª retirada) e outra leitura para o segundo litro retirado (2ª retirada); repete-se o processo até que o volume diário escoado seja igual a 30 l/dia. A temperatura de armazenamento (T_{armaz}) será a média de todas as leituras.

2.5 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Os cálculos relativos à definição das características dos sistemas e seus dimensionamentos são baseados na NBR 15569 (2018), enquanto a análise econômica baseia-se na literatura de ARAÚJO et al. (2012).

2.5.1 Cálculos das características do coletor proposto

Para a possível comparação dos coletores propostos com os coletores avaliados no mercado, foram realizados cálculos com base na NBR 15569 (2018), a fim de determinar a Produção Média Diária de Energia Específica do coletor solar (PMDEE), expressa em kWh/m²·dia, a Produção Média Mensal de Energia Específica do coletor (PMMEe), expressa em kWh/m²·mês, e a Eficiência Energética do coletor (η), expressa em %. Segundo a NBR 15569 (2008), a PMDEE é definida pela equação (1).

$$PMDEE = \frac{(1,15 \cdot E_{util}) \cdot FC_{instal} \cdot 4,901}{A_{coletora} \cdot I_G} \quad (1)$$

Onde:

$A_{coletora}$ é a área coletora, expressa em metros quadrados (m²), neste caso, igual a 0,9188 m² para o termossifão e 0,30 m² para a serpentina.

I_G é o valor da irradiação global média diária para o local de instalação, expresso em quilowatts hora por metro quadrado dia (kWh/m²·dia);

E_{util} é a energia útil, em quilowatts hora por dia (kWh/dia), definida pela equação (2).

FC_{instal} é o fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar devido à instalação; é obtido pela equação (3);

A equação (2), para o cálculo de E_{util} , é definida abaixo (NBR 15569, 2008).

$$E_{util} = \frac{V_{armaz} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{armaz} - T_{amb})}{3600} \quad (2)$$

Onde:

V_{armaz} é o volume armazenado no boiler, igual a 0,090 m³ (90 l) para o termossifão e 0,030 m³ (30 l) para a serpentina (m³);

ρ é a massa específica da água igual a 1000 kg/m³;

Cp é o calor específico da água igual a 4,18 kJ/kg.K;

T_{armaz} é a temperatura de armazenamento da água, expressa em grau Celsius (°C), obtida pelo uso do termômetro de mercúrio (termossifão) ou termopar (serpentina);

T_{amb} é a temperatura ambiente média diária do local de instalação, expressa em grau Celsius, durante a realização do experimento, ou seja, entre as 10h e as 16h;

A equação (3), para o cálculo de FC_{instal} , é definida abaixo (NBR 15569, 2008).

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2]} \quad (3)$$

Onde:

β é a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, expressa em graus (°) igual a 30° neste caso;

$\beta_{ótimo}$ é a inclinação ótima do coletor para o local de instalação definida na Figura 16, igual a 32°48' 59 ";

γ é o ângulo de orientação dos coletor solares em relação ao norte geográfico, expresso em graus e adotado como 5 °;

A Eficiência Energética do coletor (η) pode ser definida através da equação (4) e a PMMEe, pela equação (5), em função da PMDEE média ($\overline{PMDEE}$) (NBR 15569, 2008).

$$\eta = \frac{PMDEE}{4,901} \cdot 100 \quad (4)$$

$$PMMEe = \overline{PMDEE} \cdot 30 \quad (5)$$

2.5.2 Metodologia de dimensionamento

Baseado na NBR 15569 (2008), o dimensionamento do coletor, em função da PMDEE obtida, segue as etapas a seguir.

Primeiramente, é calculado, equação (6), o volume de consumo (V_{consumo}), expresso em m^3 , em função da vazão do chuveiro, do número de pessoas que utilizarão a residência e da frequência de utilização (NBR 15569, 2008).

$$V_{\text{consumo}} = Q_p \cdot T \cdot \text{frequência de uso} \quad (6)$$

Onde:

Q_p : é a vazão do chuveiro, expressa em metros cúbicos por segundo (m^3/s) igual a $0,0833 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$;

T : é o tempo médio de uso diário do chuveiro (tempo médio de um banho), expresso em segundos (s);

frequência de uso: é o número total de utilizações da peça por dia (Número de banhos por dia);

Dessa forma, é calculado o volume de armazenamento necessário (V_{armaz}), equação (7) (NBR 15569, 2008):

$$V_{\text{armaz}} = \frac{V_{\text{consumo}}(T_{\text{consumo}} - T_{\text{ambiente}})}{T_{\text{armaz}} - T_{\text{ambiente}}} \quad (7)$$

Onde:

V_{consumo} : é o volume de consumo diário, expresso em metros cúbicos (m^3) e calculado pela equação (6);

V_{armaz} : é o volume armazenado no boiler, expresso em metros cúbicos (m^3) (sugere-se que $V_{\text{armaz}} \geq 0,75 V_{\text{consumo}}$);

T_{consumo} : é a temperatura de consumo de utilização, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (sugere-se que seja adotada $T_{\text{consumo}} = 40^{\circ}\text{C}$);

T_{armaz} : é a temperatura de armazenamento da água, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (sugere-se que seja adotada $T_{\text{armaz}} \geq T_{\text{consumo}}$);

T_{ambiente} : é a temperatura ambiente média anual do local de instalação, neste caso, para a cidade de Guaratinguetá, é igual a 23°C (PEREIRA et al., 2006);

Por fim, a área necessária do coletor proposto é definida manipulando-se a equação (1) para obter a equação (8) (NBR 15569, 2008):

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot E_{util}) \cdot FC_{instal} \cdot 4,901}{\overline{PMDEE} \cdot I_{G-anual}} \quad (8)$$

Onde:

$I_{G-anual}$ é o valor da irradiação global média anual para o local de instalação, expresso quilowatts hora por metro quadrado dia (kWh/ m²·dia), adotada como 5,0 kWh/ m²·dia para a cidade de Guaratinguetá (PEREIRA et al., 2006). Ver Anexo A – Irradiação Global para esclarecimento do valor utilizado.

$\overline{PMDEE}$ é a PMDEE média do coletor ($\overline{PMDEE}$), expressa em quilowatts hora por metro quadrado dia (kWh/ m²·dia), calculada pela média de todos os valores obtidos de PMDEE para os coletores.

2.5.3 Metodologia de análise econômica

A fim de analisar os coletores propostos financeiramente, serão calculados quatro indicadores financeiro-econômicos: Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), Relação Benefício Custo (B/C) e *payback* corrigido (Tr).

O VPL é definido pela equação (9) e representam a diferença entre o investimento inicial (I) e o somatório dos fluxos de caixa dos n períodos em que se deseja fazer a análise financeira (ARAÚJO et al, 2012). Dessa forma, um investimento é economicamente viável se $VPL > 0$.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} \quad (9)$$

Onde:

FC_t é o fluxo de caixa no t -ésimo período;

TMA é o custo de capital ou taxa mínima de atratividade;

O TIR é definido pela equação (10) e representa taxa para a qual, no tempo de vida útil do projeto, o somatório dos fluxos de caixa se iguala ao investimento inicial (I), ou seja, o VPL é nulo. (ARAÚJO et al., 2012). Dessa forma, um investimento é economicamente viável se $TIR > TMA$.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (10)$$

A Relação Benefício Custo é definida pela equação (11) e representa razão entre o valor atual de benefícios (B_t) e o valor atual de custos (C_t), incluindo o investimento inicial (I) (ARAÚJO et al., 2012, p. 4). Dessa forma, um investimento é economicamente viável se $B/C > 1$.

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+TMA)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+TMA)^t}} \quad (11)$$

O *payback* corrigido é definido pela equação (12) e representa o tempo (t) necessário para que o investimento inicial seja pago com os valores corrigidos para a moeda atual. Dessa forma, quanto menor o *payback* (Tr), mais atrativo é o investimento.

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} \quad (12)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CÁLCULOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS

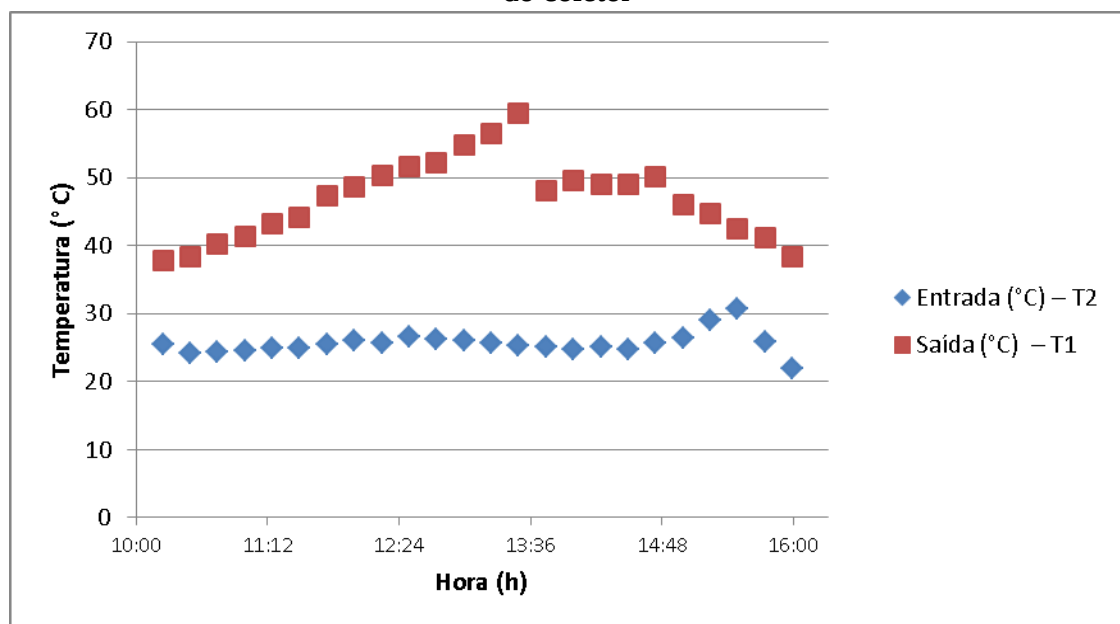
A fim de se determinar as características dos coletores propostos (serpentina e termossifão), foram obtidos dados de temperaturas que permitiram calcular os índices PMDEE e η dos sistemas, possibilitando suas análises.

3.1.1 Sistema termossifão

Para determinação da PMDEE do coletor solar, foram realizados três dias de coletas de dados com o coletor funcionando em circulação natural (termossifão). Os dados foram coletados nos dias: 29 de maio de 2017; 03 de junho de 2017 e 04 de junho de 2017.

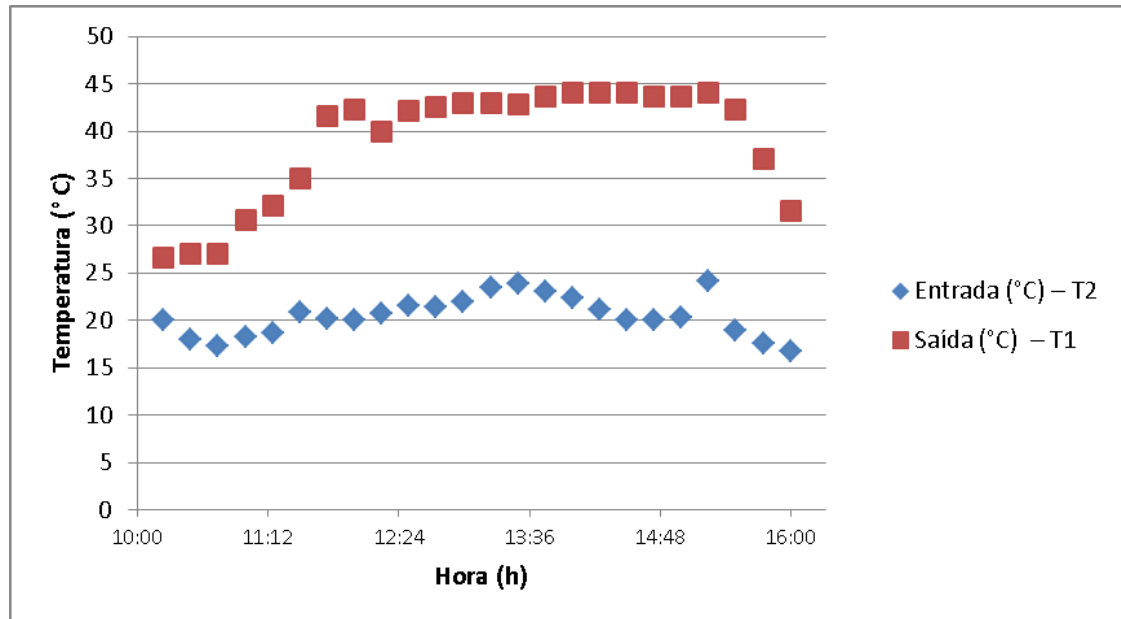
Os dados de temperaturas obtidos pelo uso dos termopares na entrada (T2) e na saída (T1) do coletor são ilustrados, com auxílio do software Excel, pelas Figuras 17, 18 e 19.

Figura 17 – Temperaturas obtidas no dia 29/05/2017 pelos termopares na entrada e na saída do coletor



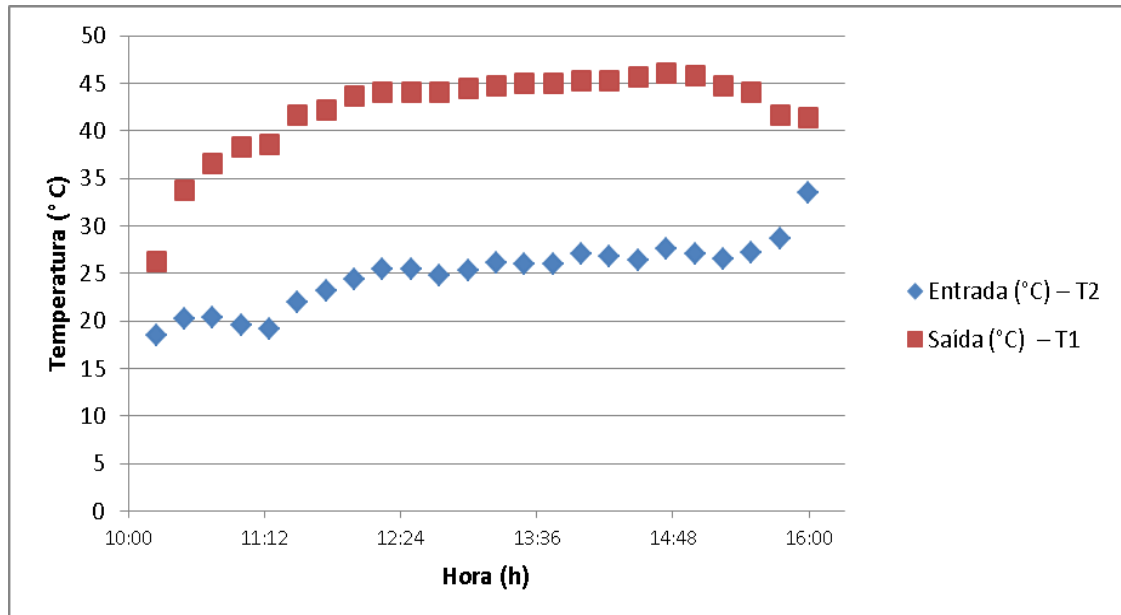
Fonte: Autor

Figura 18 – Temperaturas obtidas no dia 03/06/2017 pelos termopares na entrada e na saída do coletor



Fonte: Autor

Figura 19 – Temperaturas obtidas no dia 04/06/2017 pelos termopares na entrada e na saída do coletor



Fonte: Autor

De acordo com as Figuras 17, 18 e 19, pode-se observar que a maior temperatura observada na saída do coletor foi de 59 °C no dia 29/05/2017, o qual, conforme a Tabela 3, apresentou as melhores condições meteorológicas para realização do experimento. A queda brusca da temperatura na saída do coletor na Figura 17 ocorreu devido a presença de nuvens

entre as 13:45 e 14:30. De modo geral, nos três dias de ensaio o comportamento das curvas foi semelhante: a diferença de temperatura, no período da tarde, entre a entrada e a saída atingiu, em média, 20 °C; a temperatura de entrada tem uma tendência linear ao longo do experimento, variando significativamente somente na primeira e na última hora do experimento; a temperatura de saída se atinge um patamar linear no período da tarde e tem uma queda na última hora de experimento.

Os dados obtidos pela PCD - N° 32524 (SINDA, 2017), pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017) e pelo termômetro de mercúrio (T_{armaz}) estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados obtidos nos dias: 29/05/2017, 03/06/2017 e 04/06/2017

Data	T_{amb} (°C)	T max (°C)	T min (°C)	T_{armaz} (°C)	I_G (kWh/ m ² .dia)
29/05/2017	22,7	32	18,5	45,0	4,2
03/06/2017	19,5	27,5	14,5	38,0	4,2
04/06/2017	20,8	31,5	15,0	40,5	4,2

Fonte: Produção do próprio autor

Com base na norma NBR 15569 e nos dados contidos na Tabela 3, foi possível determinar a PMDEE nos três dias de ensaio e, dessa forma, a PMDEE média do coletor ($\overline{PMDEE}$). Os resultados calculados para a PMDEE e para a Eficiência energética do coletor (η), para cada dia de ensaio, de acordo com as equações (1), (2), (3) e (4), estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores obtidos para PMDEE e η do termossifão

Data	FC_{instal}	E_{util} (kWh/dia)	$PMDEE$ (kWh/ m ² . mês)	η (%)
29/05/2017	1,0017	2,33	3,41	69,57
03/06/2017	1,0017	1,93	2,83	57,77
04/06/2017	1,0017	2,06	3,00	61,36

Fonte: Produção do próprio autor

Dessa forma, os valores de PMDEE média do coletor ($\overline{PMDEE}$), da Eficiência energética média do coletor ($\overline{\eta}$) e da PMMEe, conforme a equação (5), para os três dias de ensaio, estão definidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores obtidos para $\overline{PMDEE}$ e $\overline{\eta}$ do termossifão

$\overline{PMDEE}$ (kWh/ m ² ·dia)	$PMMEe$ (kWh/ m ² . mês)	$\overline{\eta}$ (%)
3,08	92,4	62,89

Fonte: Produção do próprio autor

Segundo o Programa Brasileiro de Etiquetagem - Coletor Solar aplicação para Banho e Piscina - (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO, 2016), para um coletor destinado a banho, o Quadro 1 classifica os coletores em função de sua PMMEe.

Quadro 1 – Classificação de um coletor para banho em função de sua PMMEe

Intervalo (kWh/ m ² ·dia)	Classificação
80,3 < PMMEe	A
73,3 < PMMEe ≤ 80,3	B
63,3 < PMMEe ≤ 73,3	C
59,3 < PMMEe ≤ 66,3	D
52,3 < PMMEe ≤ 59,3	E

Fonte: INMETRO (2016)

O valor obtido para a PMMEe, segundo Programa Brasileiro de Etiquetagem - Coletor Solar aplicação para Banho e Piscina - fornecido por INMETRO (2016), é relativamente alto, visto que somente 11,45 % dos 227 coletores analisados pelo documento possuem uma PMMEe maior que $90 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{mês}}$. Por outro lado, de acordo com o Quadro 1, o coletor proposto recebe, em função de sua PMMEe ($92,4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{mês}}$), uma classificação “A”, que somente 67 dos 227 coletores analisados (29,52 %) pelo INMETRO (2016) receberam, evidenciando que o coletor necessita de uma área reduzida, se comparado à maioria dos modelos avaliados no mercado, para produzir uma mesma quantidade de energia.

Além disso, através do Programa Brasileiro de Etiquetagem - Coletor Solar aplicação para Banho e Piscina - fornecido por INMETRO (2016), foi possível elaborar a Tabela 6, na qual estão definidas as porcentagens de ocorrência da Eficiência Energética Média dos coletores ($\overline{\eta}$) avaliados no mercado e a Tabela 7, na qual está expressa a distribuição de $\overline{\eta}$ dos 67 coletores que receberam classificação ‘A’.

Tabela 6 – Distribuição da Eficiência energética Média, $\bar{\eta}$, de todos os 227 coletores avaliados pelo INMETRO

Intervalo	Numero de coletores	Porcentagem do total (%)
$40 \% < \bar{\eta} \leq 50 \%$	9	3,97
$50 \% < \bar{\eta} \leq 60 \%$	47	20,71
$60 \% < \bar{\eta} \leq 65 \%$	61	26,87
$65 \% < \bar{\eta} \leq 70 \%$	63	27,75
$70 \% < \bar{\eta} \leq 75 \%$	22	9,69
$75 \% < \bar{\eta} \leq 80 \%$	25	11,01
TOTAL	227	100

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 7 – Distribuição de $\bar{\eta}$ dos 67 coletores que receberam classificação ‘A’

Intervalo	Numero de coletores	Porcentagem do total (%)
$40 \% < \bar{\eta} \leq 50 \%$	0	0
$50 \% < \bar{\eta} \leq 60 \%$	17	25,37
$60 \% < \bar{\eta} \leq 65 \%$	14	20,90
$65 \% < \bar{\eta} \leq 70 \%$	29	43,28
$70 \% < \bar{\eta} \leq 75 \%$	7	10,45
$75 \% < \bar{\eta} \leq 80 \%$	0	0
TOTAL	67	100

Fonte: Produção do próprio autor

De acordo com os dados da Tabela 6, o valor de 62,89 % encontrado para o $\bar{\eta}$ do coletor proposto é maior que aproximadamente 50 % dos valores de $\bar{\eta}$ dos coletores avaliados no mercado; além disso, 54,62 % dos coletores avaliados no mercado operam com $\bar{\eta}$ variando de 60 % a 70 % (INMETRO 2016), evidenciando que o coletor proposto possui um valor de $\bar{\eta}$ perfeitamente aceitável para os padrões avaliados no mercado.

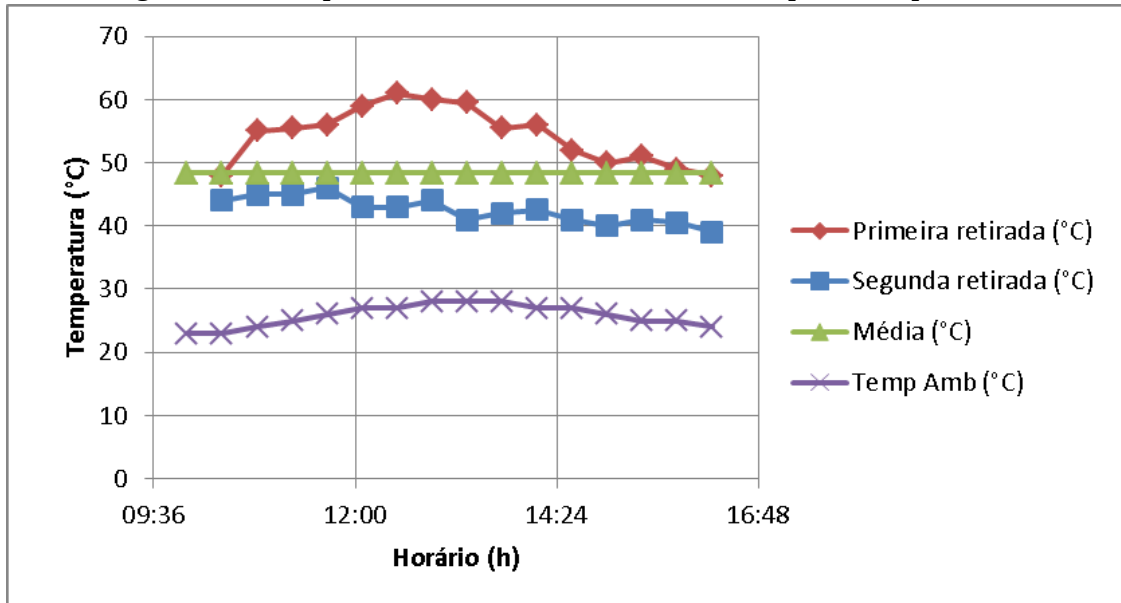
No entanto, através da Tabela 7, é importante evidenciar que altos valores de $\bar{\eta}$ não implicam necessariamente em uma maior PMMEe, visto que há coletores com classificação ‘A’ que possuem valores de $\bar{\eta}$ variando entre 50 % e 75 % (INMETRO 2016). Além disso, a faixa na qual $\bar{\eta}$ varia entre 65 % e 70 % possui a maior porcentagem de coletores com classificação ‘A’: 43,28 %.

3.1.2 Sistema serpentina

Para determinação da PMDEE da serpentina solar, foram realizados três dias de coletas de dados com a serpentina funcionando por circulação forçada. Os dados foram coletados nos dias: 27 de julho de 2018; 28 de julho de 2018 e 30 de junho de 2018.

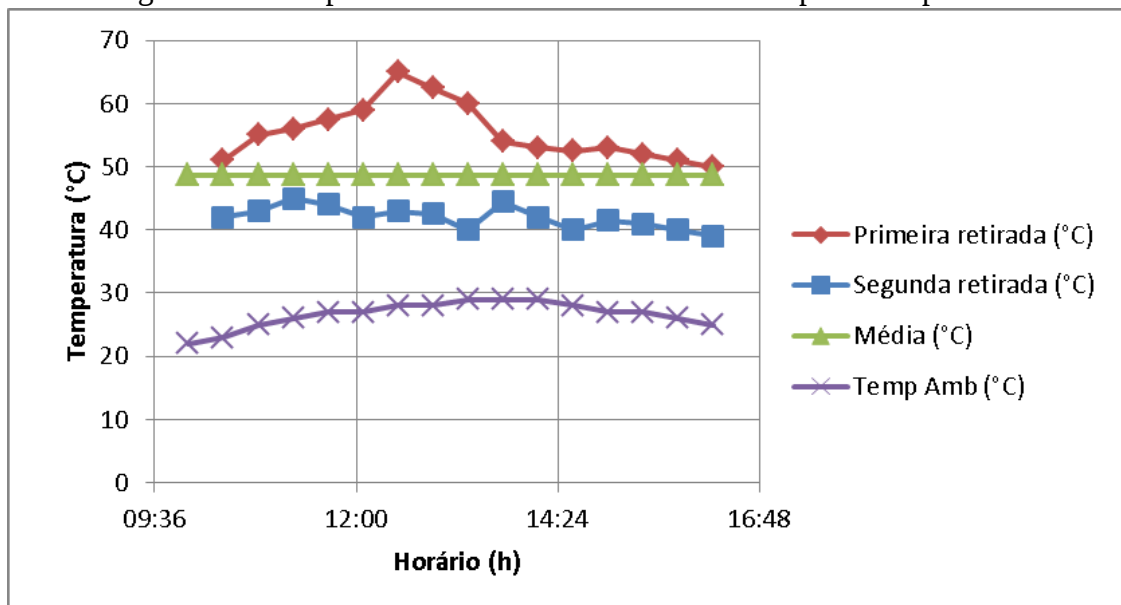
Os dados de temperaturas obtidos pelo uso do termopar na serpentina são ilustrados, com auxílio do software Excel, pelas Figuras 20, 21, 22.

Figura 20 – Temperaturas obtidas no dia 27/07/2018 para a serpentina



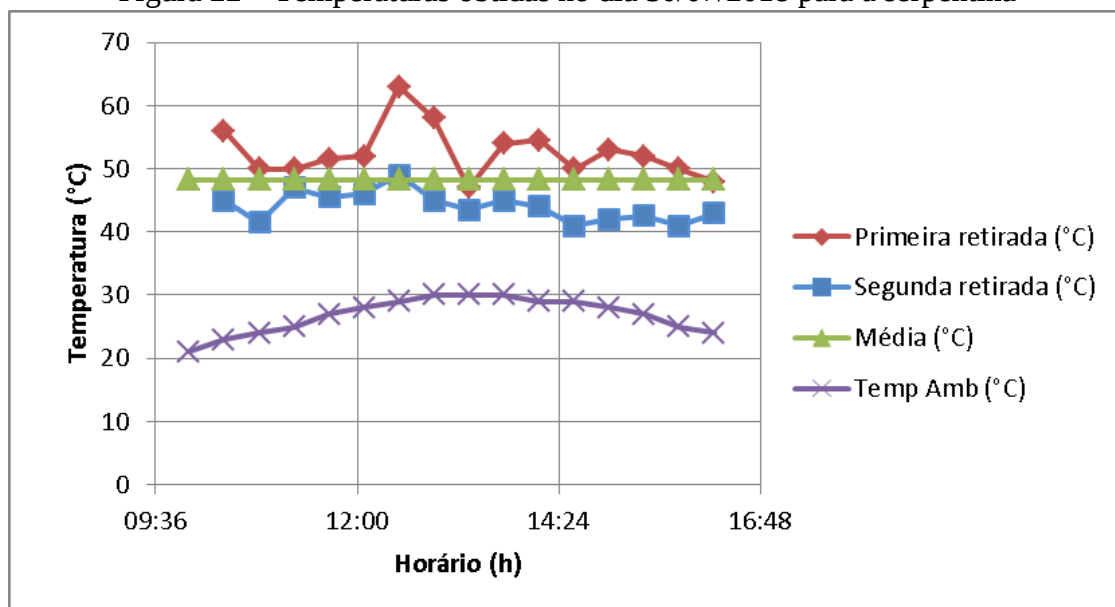
Fonte: Autor

Figura 21 – Temperaturas obtidas no dia 28/07/2018 para a serpentina



Fonte: Autor

Figura 22 – Temperaturas obtidas no dia 30/07/2018 para a serpentina



Fonte: Autor

De acordo com as Figuras 20, 21 e 22, pode-se observar que a maior temperatura observada na saída da serpentina foi de 68 °C no dia 28/07/2018, o qual, conforme a Tabela 8, apresentou as melhores condições meteorológicas para realização do experimento. De modo geral, nos três dias de ensaio o comportamento das curvas foi semelhante: a diferença de temperatura, entre o primeiro e o segundo litro de água retirado, atingiu, em média, 12 °C; a segunda retirada possui um comportamento linear, variando muito pouco a temperatura obtida.

Os dados obtidos pela PCD - N° 32524 (SINDA, 2017), pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017) e pelo uso do termopar tipo J estão expressos na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados obtidos nos dias: 27/07/2018, 28/07/2018 e 30/07/2018

Data	T_{amb} (°C)	T max (°C)	T min (°C)	T_{armaz} (°C)	I_G (kWh/ m ² .dia)
27/07/2018	26	28	23	48,4	4,2
28/07/2018	27	29	22	48,7	4,2
30/07/2018	27,5	30	21	48,3	4,2

Fonte: Produção do próprio autor

Com base na norma NBR 15569 e com os dados contidos na Tabela 8, foi possível determinar a PMDEE nos três dias de ensaio e, dessa forma, a PMDEE média da serpentina ($\overline{PMDEE}$). Os resultados calculados para a PMDEE e para a Eficiência energética da serpenti-

na (η), para cada dia de ensaio, de acordo com as equações (1), (2), (3) e (4), estão expressos na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores obtidos para PMDEE e η da serpentina

Data	FC_{instal}	E_{util} (kWh/dia)	PMDEE (kWh/ m ² .dia)	η (%)
27/07/2018	1,0017	0,7808	3,43	69,99
28/07/2018	1,0017	0,7559	3,32	67,75
30/07/2018	1,0017	0,7257	3,19	65,04

Fonte: Produção do próprio autor

Dessa forma, os valores de PMDEE média da serpentina ($\overline{PMDEE}$), da Eficiência energética média da serpentina ($\overline{\eta}$) e da PMMEe, conforme a equação (5), para os três dias de ensaio, estão definidos na Tabela 10. Além disso, os dados referentes ao sistema de termossifão construído no primeiro de pesquisa também estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores obtidos para $\overline{PMDEE}$ e $\overline{\eta}$ da serpentina

Sistema	$\overline{PMDEE}$ (kWh/ m ² .dia)	PMMEe (kWh/ m ² . mês)	$\overline{\eta}$ (%)
Serpentina	3,31	99,39	67,60
Termossifão	3,08	92,40	62,89

Fonte: Produção do próprio autor

Assim como o sistema de termossifão, a serpentina proposta, conforme o Quadro 1, recebe, em função de sua PMMEe ($99,39 \frac{kWh}{m^2 \cdot mês}$), uma classificação “A”, que somente 67 dos 227 coletores analisados (29,52 %) pelo INMETRO(2016) receberam, evidenciando que a serpentina também necessita de uma área reduzida, se comparado à maioria do modelos avaliados no mercado, para produzir uma mesma quantidade de energia.

De acordo com os dados da Tabela 6, o valor de 67,60 % encontrado para o $\overline{\eta}$ da serpentina proposta é maior que aproximadamente 50 % dos valores de $\overline{\eta}$ dos coletores avaliados no mercado, além disso, 54,62 % dos coletores avaliados no mercado operam com $\overline{\eta}$ variando de 60 % a 70 %, evidenciando que a serpentina proposta possui um valor de $\overline{\eta}$ perfeitamente aceitável para os padrões avaliados no mercado.

No entanto, pela Tabela 7, é importante evidenciar que altos valores de $\overline{\eta}$ não implicam necessariamente em uma maior PMMEe, visto que há coletores com classificação ‘A’ que possuem valores de $\overline{\eta}$ variando entre 50 % e 75 % Além disso, a faixa de valores de $\overline{\eta}$

entre 65 % a 70 % possui a maior porcentagem de coletores com classificação 'A': 43,28 %.

3.2 DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA

A fim de quantificar a aplicação dos sistemas propostos em situação reais, foram definidos os custos envolvidos com os sistemas e o dimensionamento necessário para atender determinada demanda.

3.2.1 Sistema termossifão

De acordo com a mão de obra e materiais necessários para construção e capacitação de uso do coletor proposto, a Tabela 11 ilustra os custos envolvidos no processo. No entanto, os custos com o reservatório, para a instalação do sistema, podem ser reduzidos utilizando uma bombona d'água devidamente isolada termicamente.

Além disso, é importante evidenciar que, para a realização do modelo proposto, a parcela de R\$ 400,00 (referente à mão de obra) que consta no custo do reservatório térmico, foi inexistente, visto que a mão de obra foi executada pelos autores, sendo assim, os custos da Tabela 11 são estimados para o consumidor final.

Tabela 11 – Gastos para se produzir o termossifão proposto	
Componente	Custo (R\$)
Coletor com área de 0,3 m ²	124,00
Reservatório Térmico	$303,00n + 400,00 \frac{n}{2}$
Tubulação	726,00

Fonte: Produção do próprio autor

No qual, n é fração entre a capacidade do reservatório a ser utilizado (CapRes.), expressa em litros, e 90 l ($n = CapRes / 90 \text{ l}$).

A fim de realizar a análise econômica do coletor proposto, foram realizados, de acordo com os dados da Tabela 5, cálculos de dimensionamento utilizando as equações (6), (7) e (8). O coletor foi dimensionado para uma família de quatro pessoas, supondo: banhos diários de dez minutos, vazão do chuveiro igual a cinco litros por minuto, temperatura de armazenamento de 45 ° C e um banho diário por pessoa. Os dados da Tabela 12 resumem os cálculos realizados para o dimensionamento do SAS e seu custo de acordo com a Tabela 11. Ver Apêndice

A - Dimensionamento do termossifão para uma família de quatro pessoas - para esclarecimento dos cálculos.

Tabela 12 – Dados de dimensionamento do termossifão proposto

$V_{consumo}$ (l)	V_{armaz} (l)	Placas necessárias (0,3 m ²)	Custo do SAS (R\$)	Custo de manutenção anual (R\$)
200	180	6	2468,00	100,00

Fonte: Produção do próprio autor

Por outro lado, os dados da Tabela 13 expressam os custos anuais envolvidos para obtermos, por meio da utilização de um chuveiro elétrico de potência igual a 6,8 kW, a mesma capacidade de aquecimento de água do SAS dimensionado na Tabela 12 (supondo: família de quatro pessoas, banhos diários de dez minutos, vazão do chuveiro igual a cinco litros por minuto, temperatura de armazenamento de 45 ° C, um banho diário por pessoa)

Tabela 13 – Custo anual com o chuveiro elétrico para obtermos a mesma capacidade de aquecimento do termossifão dimensionado

Taxa (R\$/kWh)	Consumo por banho (kWh/banho)	Consumo diário (kWh/dia)	Custo de manutenção anual (R\$/ano)	Custo total (R\$/ano)
0,42	1,13	4,53	59,00	754,00

Fonte: Produção do próprio autor

Utilizando as equações (9), (10), (11) e (12), além de uma planilha no Excel para a realização dos cálculos, temos, de acordo com os dados das Tabelas 12 e 13, os seguintes resultados da Tabela 14 para a análise econômica do SAS dimensionado, supondo, segundo Araújo et al. (2012), sua vida útil igual a dez anos e um TMA de 10 %.

Tabela 14 – Análise econômica do termossifão dimensionado

Investimento	R\$ 2468,00
Taxa mínima de atratividade (TMA)	10,00 %
Vida útil do coletor	10 anos
Custo de manutenção anual do coletor	R\$ 100,00 /ano
Economia com o chuveiro elétrico	R\$ 754,00 / ano
Fluxo de Caixa (FCt)	R\$ 654,00 / ano
Valor presente líquido (VPL)	R\$ 1550,55
Taxa interna de retorno (TIR)	23,00 %
Relação Benefício Custo (B/C)	1,50
Payback corrigido (Tr)	5,0 anos

Fonte: Produção do próprio autor

3.2.2 Sistema serpentina

De acordo com a mão de obra e materiais necessários para construção e capacitação de uso da serpentina, a Tabela 15 ilustra os custos envolvidos no processo. No entanto, os custos com o reservatório, para a instalação do SAS, podem ser reduzidos utilizando uma bomba d'água devidamente isolada termicamente.

Além disso, é importante evidenciar que, para a realização do modelo proposto, a parcela de R\$ 400,00 (referente à mão de obra) que consta no custo do reservatório térmico, foi inexistente, visto que a mão de obra foi executada pelos autores, sendo assim, os custos da Tabela 9 são estimados para o consumidor final.

Tabela 15 – Gastos para se produzir a serpentina proposta	
Componente	Custo (R\$)
Coletor com área de 0,30 m ²	190,63
Reservatório Térmico	363,00 n + 400,00 $n/2$
Tubulação	926,00

Fonte: Produção do próprio autor

No qual, n é fração entre a capacidade do reservatório a ser utilizado (CapRes, expressa em litros) e 90 l ($n = CapRes / 90 \text{ l}$).

A fim de realizar a análise econômica da serpentina proposta, foram realizados, de acordo com os dados da Tabela 10, cálculos de dimensionamento utilizando as equações (6), (7) e (8). A serpentina foi dimensionada para uma família de quatro pessoas, supondo: banhos diários de dez minutos, vazão do chuveiro igual a cinco litros por minuto, temperatura de armazenamento de 45 ° C e um banho diário por pessoa. Os dados da Tabela 16 resumem os cálculos realizados para o dimensionamento do SAS e seu custo de acordo com a Tabela 15. Ver Apêndice B - Dimensionamento da serpentina para uma família de quatro pessoas, para esclarecimento dos cálculos.

Tabela 16 – Dados de dimensionamento da serpentina proposta				
$V_{consumo}$ (l)	V_{armaz} (l)	Placas necessárias (0,3 m ²)	Custo do SAS (R\$)	Custo de manutenção anual (R\$)
200	180	6	3196,00	100,00

Fonte: Produção do próprio autor

Por outro lado, os dados da Tabela 17 expressam os custos anuais envolvidos para obtermos, por meio da utilização de um chuveiro elétrico de potência igual a 6,8 kW, a mesma capacidade de aquecimento de água da serpentina dimensionada na Tabela 16.

Tabela 17 – Custo anual com o chuveiro elétrico para obtermos a mesma capacidade de aquecimento da serpentina dimensionada

Taxa (R\$/kWh)	Consumo por banho (kWh/banho)	Consumo diário (kWh/dia)	Custo de manutenção anual (R\$/ano)	Custo total (R\$/ano)
0,4848	1,133	4,533	75,00	877,00

Fonte: Produção do próprio autor

Utilizando as equações (9), (10), (11) e (12), além de uma planilha no Excel para a realização dos cálculos, temos, de acordo com os dados das Tabelas 16 e 17, os seguintes resultados da Tabela 18 para a análise econômica do SAS dimensionado, supondo, segundo Araújo et al. (2012), sua vida útil igual a dez anos e um TMA de 10 %.

Tabela 18 – Análise econômica da serpentina dimensionada

Investimento	R\$ 3196,00
Taxa mínima de atratividade (TMA)	10,00 %
Vida útil do coletor	10 anos
Custo de manutenção anual do coletor	R\$ 100,00 /ano
Economia com o chuveiro elétrico	R\$ 877,00 / ano
Fluxo de Caixa (FCt)	R\$ 777,00 / ano
Valor presente líquido (VPL)	R\$ 1578,00
Taxa interna de retorno (TIR)	21,00 %
Relação Benefício Custo (B/C)	1,41
Payback corrigido (Tr)	5,583 anos

Fonte: Produção do próprio autor

3.3 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS PARA A MORADIA ESTUDANTIL DA FEG

A moradia estudantil da FEG abriga um total de 54 alunos. Dessa forma, sua existência gera custos consideráveis com aquecimento de água para banho, viabilizando uma possível aplicação de fontes renováveis no campus da FEG.

3.3.1 Sistema termossifão

Realizando os mesmos cálculos de dimensionamento e análise econômica do item anterior, mas alterando o número de pessoas para 54, obtêm-se os seguintes dados da Tabela

19 para aplicação do termossifão na moradia estudantil. Ver Apêndice C - Dimensionamento do termossifão para aplicação na moradia da FEG, para esclarecimento dos cálculos.

Tabela 19 – Análise econômica da aplicação do sistema de termossifão na FEG	
$V_{consumo}$	2700 l
V_{armaz}	2070 l
Número de Placas necessárias (0,3 m ²)	65
Investimento	R\$ 24.000,00
Taxa mínima de atratividade (TMA)	10,00 %
Vida útil do termossifão	10 anos
Custo de manutenção anual do termossifão	R\$ 1.525,00 / ano
Economia anual com o chuveiro elétrico	R\$ 13.530,00 / ano
Fluxo de Caixa (FCt)	R\$ 12.005,00 / ano
Valor presente líquido (VPL)	R\$ 49.765,53
Taxa interna de retorno (TIR)	49%
Relação Benefício Custo (B/C)	2,50
Payback corrigido (Tr)	2,417 anos

Fonte: Produção do próprio autor

De acordo com as Tabelas 14 e 19, pode-se observar que, para o coletor proposto, quanto maior o investimento, melhor são os índices econômicos e a rentabilidade do projeto.

3.3.2 Sistema serpentina

Procedendo de forma análoga ao item anterior, é possível construir a Tabela 20 para aplicação serpentina na moradia estudantil. Ver Apêndice D - Dimensionamento da serpentina para aplicação na moradia da FEG para esclarecimento. Dessa forma, pelas Tabelas 18 e 20, pode-se observar que o investimento é diretamente proporcional a rentabilidade do projeto.

Tabela 20 – Análise econômica da aplicação do sistema de serpentina na FEG	
$V_{consumo}$	2700 l
V_{armaz}	2070 l
Número de Placas necessárias (0,3 m ²)	61
Investimento	R\$ 30.000,00
Taxa mínima de atratividade (TMA)	10,00 %
Vida útil da serpentina	10 anos
Custo de manutenção anual da serpentina	R\$ 1.500,00 / ano
Economia anual com o chuveiro elétrico	R\$ 13.530,00 / ano
Fluxo de Caixa (FCt)	R\$ 12.030,00 / ano
Valor presente líquido (VPL)	R\$ 43.919,00
Taxa interna de retorno (TIR)	39,00 %
Relação Benefício Custo (B/C)	2,12
Payback corrigido (Tr)	3,083 anos

Fonte: Produção do próprio autor

4 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho permitiu observar a importância da utilização de fontes renováveis no consumo de energia de modo a reduzir os impactos ambientais do uso de fontes padrões. Assim, a utilização da energia solar para aquecimento de água para banho pode trazer benefícios ambientais, sociais e econômicos. Sendo assim, esta fonte de energia dever ser incentivada, visto que, ainda que o Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, possua grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano, este potencial é pouco utilizado atualmente.

Dessa forma, de acordo com os valores obtidos para $\overline{PMDEE}$ e $\overline{\eta}$ na Tabela 10, a serpentina e o sistema de termossifão propostos apresentam um desempenho igual ou superior à maioria dos coletores avaliados no mercado, os quais apenas 29,52 % tiveram PMDEE maior que 2,68 kWh/m²·dia - Classificação ‘A’.

Pode-se observar que o sistema de serpentina e o sistema de termossifão são economicamente viáveis, visto que, em ambos os casos, $VPL > 0$, $B/C > 1$, $TIR > TMA$, e $Tr < 10$ anos; no entanto, conforme as Tabelas 14, 18, 19 e 20, pode-se observar que, em relação à serpentina, o sistema de termossifão é mais vantajoso financeiramente, sendo o uso da serpentina indicado para casos em que a temperatura de consumo ($T_{consumo}$) necessária seja maior que 45 °C ou o local de instalação não permita, em função das alturas definidas na Figura 15, a utilização do sistema de termossifão,. Além disso, a aplicação dos sistemas em ambientes públicos, como a moradia estudantil da FEG, traria economias consideráveis para a faculdade, colaborando para a sua manutenção financeira em épocas de crise, como a atual.

Por outro lado, pode-se notar que a serpentina é mais eficiente que o sistema por termossifão, visto que, de acordo com a Tabela 10, a serpentina possui maiores valores de $\overline{PMDEE}$ e $\overline{\eta}$. Sendo assim, os resultados obtidos demonstram que a serpentina proposta apresenta um alto desempenho, pois, em função de sua PMMEe, ocupa a 9ª posição entre os 227 coletores avaliados no mercado; podendo, dessa forma, viabilizar a reciclagem dos materiais utilizados. Por outro lado, ainda é importante ressaltar que o sistema de termossifão ocupa a 21ª posição entre os 227 coletores avaliados no mercado.

Ainda assim, de acordo com os valores obtidos para a PMMEe, os protótipos desenvolvidos confirmam a validade de sua utilização para água de banho e, conforme os valores de PMMEe dos coletores avaliados no mercado para aquecimento de piscinas, os

protótipos desenvolvidos também podem ser utilizado para este fim, visto que possuem um alto valor para a PMMEe.

No entanto, através de testes realizados na serpentina, verificou-se que, para períodos de circulação maiores que 25 minutos, a temperatura da água aquecida pode chegar a 90 ° C; dessa forma, a serpentina proposta também poderia ser utilizada para uso industrial, como aquecimento de água para caldeiras.

Dessa maneira, pode-se concluir que, para os sistemas de termossifão e serpentina, a reciclagem e a utilização das calhas e lâmpadas fluorescentes são viáveis financeiramente e termodinamicamente, obtendo-se resultados acima dos esperados.

Como indicações para pesquisa futuras têm-se: criação de um processo mecanizado para reciclagem das lâmpadas fluorescentes, a fim de permitir sua utilização como matéria prima, visto que o processo atual tritura a lâmpada fluorescente, inviabilizando sua utilização neste trabalho; melhorias no projeto apresentado; utilização de outros materiais reciclados em conjunto com os materiais utilizados neste projeto; etc.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569: sistema** de aquecimento solar de água em circuito direto. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ARAÚJO, A. J. et al. Eficiência energética a partir de SAS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., 2012, Goiás. **Anais eletrônicos** [...]. Rio de Janeiro: SWGE, 2012. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/pdfs/artigos/97015.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2017.

BOAS PRÁTICAS. **Qualidade em instalações de aquecimento solar:** boas práticas. São Paulo: Boas Práticas, 2009. 84 p. Disponível em: <http://www.ufpa.br/inct-ereea/Aquecimento%20Solar.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2017.

BP GROUP. **Statistical review of world energy**. 65th ed. London: BP P.L.C, 2016. 48 p. Disponível em: https://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_ch/PDF/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf. Acesso em: 20 fev. 2017.

BP GROUP. **Renewable energy**. London: BP P.L.C, 2015. 4 p. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy.html>. Acesso em: 20 fev. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional 2016:** relatório síntese. Brasília: MME, 2016. 62 p. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

ENERGIAS DE PORTUGAL. **Chuveiro pode ser o vilão da conta de luz no inverno 2013**. São Paulo: EDP, 2 p. Disponível em: <http://905fm.com.br/estado/979-chuveiro-eletrico-pode-ser-o-vilao-da-conta-de-luz-no-inverno>. Acesso em: 20 fev. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Programa Brasileiro de Etiquetagem:** coletor solar aplicação banho e piscina. Rio de Janeiro: INMETRO, 2016. 21 p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014:** synthesis report. 5th ed Switzerland: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 12 jun. 2017.

KOMECO. **Manual do usuário:** sistema de aquecimento solar popular. São José: Komeco, 2015. 20 p. Disponível em: <http://www.komeco.com.br/docs/manual-instalacao-kopcs-ps-02-04-2015.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2017.

OLIVEIRA, N. M. B.; DAMASCENO, J. J. R; VIEIRA, L. G. M. **Aprimoramento de aquecedores solares**. Uberlândia: UFU, 2009. 24 p. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4482/11859>. Acesso em 01 mar. 2017.

PEREIRA, E. B; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p. Disponível em: http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf. Acesso em: 04 maio 2017.

SISTEMA INTEGRADO DE DADOS AMBIENTAIS. **Dados observacionais-PCD-nº32524** : estação: Guaratinguetá/SP. São José dos Campos: INPE, 2017. 18 p. Disponível em: <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/passo2.php>. Acesso em: 10 jun. 2017.

UNIVERSIDADE DO SOL. **100 dicas técnicas**: aquecedores solares de água. São José dos Campos: Universidade do Sol, 2005. 120 p. Disponível em: <http://www.universidadedosol.org.br/wp-content/themes/esntv2016/publicacoes-tecnicas/Livro-100-Dicas-Tecnicas.pdf> . Acesso em: 02 mar. 2017.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASCURRA, R. E.; RAMOS, L. F. M. D. Utilização de energia solar para o aquecimento de água em habitações com área construída entre 36 e 42 metros quadrados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., 2012, GOIÁS. **Anais eletrônicos** [...]. Rio de Janeiro: SWGE, 2012. p. 1-7. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/96806.PDF>. Acesso em: 12 jun. 2017.

BP GROUP. **BP energy outlook: focus on North America 2016 edition**. London: BP P.L.C, 2017. 64 p. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2016-focus-on-north-america.pdf> . Acesso em: 20 fev. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Energia solar no Brasil e mundo: ano de referência - 2015**. Brasília: MME, 2016. 4 p. Disponível em: <http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/mme68.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Projeção da demanda de energia elétrica: para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Brasília: MME, 2017. 83 p. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf) . Acesso em: 20 fev. 2017.

CREDER, H. **Instalações hidráulicas e sanitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: S.A, 1981. 439 p.

HUBACK, V.B. S. et al. Oferta e demanda de energia: o papel da tecnologia da informação na integração dos recursos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 10., 2016, Gramado. **Anais eletrônicos** [...]. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/07_xcbpe0244.pdf. Acesso em: 20 fev. 2017.

NAGAOKA, A. et al. Development of a solar collector using recycled fluorescent lamps. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.4, n.2, apr. 2005. Disponível em: <http://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/viewFile/5413/3615>. Acesso em: 04 maio 2016.

SOCIEDADE DO SOL. **Manual de manufatura e instalação experimental do ASBC: aquecedor solar de baixo custo**. Guarulhos: Sociedade do Sol, 2013. 40 p. Disponível em: <http://www.sociedadedosol.org.br/wp-content/uploads/2013/07/manual-do-asbc-maio2010-v3-0.pdf> . Acesso em: 20 mar. 2017.

APÊNDICE A – Dimensionamento do termossifão para uma família de quatro pessoas

• Dados iniciais

Numero de pessoas atendidas = 4;

$I_{G-annual} = 5 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP;

$\overline{PMDEE} = 3,08 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ (característica intrínseca do coletor utilizado);

$T_{armaz} = 45^\circ \text{ C}$. Obs: $T_{armaz} \geq T_{consumo}$;

$T_{ambiente} = 23^\circ \text{ C}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP ;

$T_{consumos} = 40^\circ \text{ C}$;

$Q_p = 5 \frac{l}{min} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/s$;

$T = 600s = 10 \text{ min}$ (tempo médio de um banho);

$frequência \text{ de uso} = 4$ (um banho por pessoa e por dia);

$\beta = 30^\circ$ (inclinação de instalação);

$\beta_{ótimo} = 32,81638889^\circ$, para a cidade de Guaratinguetá – SP (latitude + 10°) ;

$\gamma = 5^\circ$ desvio de instalação em relação ao norte geográfico;

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (massa específica da água);

$c_p = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$ (calor específico da água);

• Cálculo do volume de consumo $V_{consumo}$

Pela equação (6):

$$V_{consumo} = Q_p \cdot T \cdot frequência \text{ de uso}$$

$$V_{consumo} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 4$$

$$V_{consumo} = 0,2 \text{ m}^3$$

• Cálculo do Volume de armazenamento V_{armaz}

Pela equação (7):

$$V_{armaz} = \frac{V_{consumo} \cdot (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz} - T_{ambiente}}$$

$$V_{armaz} = \frac{0,2 \cdot (40 - 23)}{45 - 23}$$

$$V_{armaz} = 0,154 \, m^3$$

Obs: $V_{armaz} \geq 0,75 \, V_{consumo}$

Adotando o volume comercial, temos:

$$V_{armaz} = 0,180 \, m^3$$

- Cálculo do FC_{instal}

Pela equação (3):

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2]}$$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (30 - 32,81638889)^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 5^2]}$$

$$FC_{instal} = 1,0017$$

- Cálculo do E_{util}

Pela equação (2):

$$E_{util} = \frac{V_{armaz} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{armaz} - T_{amb})}{3600}$$

$$E_{util} = \frac{0,18 \cdot 1000 \cdot 4,18 \cdot (45 - 23)}{3600}$$

$$E_{util} = 4,598 \text{ kWh/dia}$$

- Cálculo da área coletora $A_{coletora}$

Pela equação (8):

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot E_{util}) \cdot FC_{instal} \cdot 4,901}{PMDEE \cdot I_G\text{-anual}}$$

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot 4,598) \cdot 1,0017 \cdot 4,901}{3,08 \cdot 5}$$

$$A_{coletora} = 1,6857 \text{ m}^2$$

- Cálculo do numero de placas/calhas de $0,3 \text{ m}^2$

$$n^{\circ} \text{ placas} = \frac{A_{coletora}}{0,3}$$

$$n^{\circ} \text{ placas} = \frac{1,6857}{0,3}$$

$$n^{\circ} \text{ placas} = 6 \text{ placas}$$

APÊNDICE B – Dimensionamento da serpentina para uma família de quatro pessoas

• Dados iniciais

Numero de pessoas atendidas = 4;

$I_{G-annual} = 5 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP;

$\overline{PMDEE} = 3,31 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ (característica intrínseca do coletor utilizado);

$T_{armaz} = 45^\circ \text{ C}$. Obs: $T_{armaz} \geq T_{consumo}$;

$T_{ambientes} = 23^\circ \text{ C}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP ;

$T_{consumos} = 40^\circ \text{ C}$;

$Q_p = 5 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$;

$T = 600\text{s} = 10 \text{ min}$ (tempo médio de um banho);

$frequência \text{ de uso} = 4$ (um banho por pessoa e por dia);

$\beta = 30^\circ$ (inclinação de instalação) ;

$\beta_{ótimo} = 32,81638889^\circ$ para a cidade de Guaratinguetá – SP (latitude + 10°) ;

$\gamma = 5^\circ$ desvio de instalação em relação ao norte geográfico;

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (massa específica da água);

$c_p = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ (calor específico da água);

• Cálculo do volume de consumo $V_{consumo}$

Pela equação (6):

$$V_{consumo} = Q_p \cdot T \cdot frequência \text{ de uso}$$

$$V_{consumo} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 4$$

$$V_{consumo} = 0,2 \text{ m}^3$$

• Cálculo do Volume de armazenamento V_{armaz}

Pela equação (7):

$$V_{armaz} = \frac{V_{consumo} \cdot (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz} - T_{ambiente}}$$

$$V_{armaz} = \frac{0,2 \cdot (40 - 23)}{45 - 23}$$

$$V_{armaz} = 0,154 \, m^3$$

Obs: $V_{armaz} \geq 0,75 \, V_{consumo}$

Adotando o volume comercial, temos:

$$V_{armaz} = 0,180 \, m^3$$

- Cálculo do FC_{instal}

Pela equação (3):

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2]}$$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (30 - 32,81638889)^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 5^2]}$$

$$FC_{instal} = 1,0017$$

- Cálculo do E_{util}

Pela equação (2):

$$E_{util} = \frac{V_{armaz} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{armaz} - T_{amb})}{3600}$$

$$E_{util} = \frac{0,18 \cdot 1000 \cdot 4,18 \cdot (45 - 23)}{3600}$$

$$E_{util} = 4,598 \text{ kWh/dia}$$

- Cálculo da área coletora $A_{coletora}$

Pela equação (8):

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot E_{util}) \cdot FC_{instal} \cdot 4,901}{PMDEE \cdot I_G\text{-anual}}$$

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot 4,598) \cdot 1,0017 \cdot 4,901}{3,31 \cdot 5}$$

$$A_{coletora} = 1,5685 \text{ m}^2$$

- Cálculo do numero de placas/calhas de $0,3 \text{ m}^2$

$$n^\circ \text{ placas} = \frac{A_{coletora}}{0,3}$$

$$n^\circ \text{ placas} = \frac{1,5685}{0,3}$$

$$n^\circ \text{ placas} = 6 \text{ placas}$$

APÊNDICE C – Dimensionamento do termossifão para aplicação na moradia da FEG

• Dados iniciais

Numero de pessoas atendidas = 54;

$I_{G-annual} = 5 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP;

$\overline{PMDEE} = 3,08 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ (característica intrínseca do coletor utilizado);

$T_{armaz} = 45^\circ \text{ C}$. Obs: $T_{armaz} \geq T_{consumo}$;

$T_{ambiente} = 23^\circ \text{ C}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP ;

$T_{consumos} = 40^\circ \text{ C}$;

$Q_p = 5 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$;

$T = 600\text{s} = 10 \text{ min}$ (tempo médio de um banho);

$\text{frequência de uso} = 54$ (um banho por pessoa e por dia);

$\beta = 30^\circ$ (inclinação de instalação) ;

$\beta_{ótimo} = 32,81638889^\circ$ para a cidade de Guaratinguetá – SP (latitude + 10°) ;

$\gamma = 5^\circ$ desvio de instalação em relação ao norte geográfico;

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (massa específica da água);

$c_p = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ (calor específico da água);

• Cálculo do volume de consumo $V_{consumo}$

Pela equação (6)

Pela equação (6):

$$V_{consumo} = Q_p \cdot T \cdot \text{frequência de uso}$$

$$V_{consumo} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 54$$

$$V_{consumo} = 2,7 \text{ m}^3$$

• Cálculo do Volume de armazenamento V_{armaz}

Pela equação (7):

$$V_{armaz} = \frac{V_{consumo} \cdot (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz} - T_{ambiente}}$$

$$V_{armaz} = \frac{2,7 \cdot (40 - 23)}{45 - 23}$$

$$V_{armaz} = 2,08636 \text{ m}^3$$

Obs: $V_{armaz} \geq 0,75 V_{consumo}$

Adotando o volume comercial, temos:

$$V_{armaz} = 2,070 \text{ m}^3$$

- Cálculo do FC_{instal}

Pela equação (3):

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2]}$$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (30 - 32,81638889)^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 5^2]}$$

$$FC_{instal} = 1,0017$$

- Cálculo do E_{util}

Pela equação (3):

$$E_{util} = \frac{V_{armaz} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{armaz} - T_{amb})}{3600}$$

$$E_{util} = \frac{2,070 \cdot 1000 \cdot 4,18 \cdot (45-23)}{3600}$$

$$E_{util} = 52,88 \text{ kWh/dia}$$

- Cálculo da área coletora $A_{coletora}$

Pela equação (8):

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot E_{util}) \cdot FC_{instal} \cdot 4,901}{PMDEE \cdot I_G\text{-anual}}$$

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot 52,88) \cdot 1,0017 \cdot 4,901}{3,08 \cdot 5}$$

$$A_{coletora} = 19,3860 \text{ m}^2$$

- Cálculo do numero de placas/calhas de $0,3 \text{ m}^2$

$$n^{\circ} \text{ placas} = \frac{A_{coletora}}{0,3}$$

$$n^{\circ} \text{ placas} = \frac{19,3860}{0,3}$$

$$n^{\circ} \text{ placas} = 65 \text{ placas}$$

APÊNDICE D – Dimensionamento da serpentina para aplicação na moradia da FEG

- **Dados iniciais**

Numero de pessoas atendidas = 54;

$I_{G-annual} = 5 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP;

$\overline{PMDEE} = 3,31 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia}$ (característica intrínseca do coletor utilizado);

$T_{armaz} = 45^\circ \text{ C}$. Obs: $T_{armaz} \geq T_{consumo}$;

$T_{ambientes} = 23^\circ \text{ C}$ para a cidade de Guaratinguetá – SP ;

$T_{consumos} = 40^\circ \text{ C}$;

$Q_p = 5 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}.$;

$T = 600\text{s} = 10 \text{ min}$ (tempo médio de um banho);

$frequência \text{ de uso} = 54$ (um banho por pessoa e por dia);

$\beta = 30^\circ$ (inclinação de instalação) ;

$\beta_{ótimo} = 32,81638889^\circ$ para a cidade de Guaratinguetá – SP (latitude + 10°) ;

$\gamma = 5^\circ$ desvio de instalação em relação ao norte geográfico;

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (massa específica da água);

$c_p = 4,18 \text{ kJ/kgK}$ (calor específico da água);

- **Cálculo do volume de consumo $V_{consumo}$**

Pela equação (6):

$$V_{consumo} = Q_p \cdot T \cdot frequência \text{ de uso}$$

$$V_{consumo} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 54$$

$$V_{consumo} = 2,7 \text{ m}^3$$

- **Cálculo do Volume de armazenamento V_{armaz}**

Pela equação (7):

$$V_{armaz} = \frac{V_{consumo} \cdot (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz} - T_{ambiente}}$$

$$V_{armaz} = \frac{2,7 \cdot (40 - 23)}{45 - 23}$$

$$V_{armaz} = 2,08636 \text{ m}^3$$

Obs: $V_{armaz} \geq 0,75 V_{consumo}$

Adotando o volume comercial, temos:

$$V_{armaz} = 2,070 \text{ m}^3$$

- Cálculo do FC_{instal}

Pela equação (3):

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2]}$$

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,1 \cdot 10^{-4} \cdot (30 - 32,81638889)^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 5^2]}$$

$$FC_{instal} = 1,0017$$

- Cálculo do E_{util}

Pela equação (2):

$$E_{util} = \frac{V_{armaz} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{armaz} - T_{amb})}{3600}$$

$$E_{util} = \frac{2,070 \cdot 1000 \cdot 4,18 \cdot (45 - 23)}{3600}$$

$$E_{util} = 52,88 \text{ kWh/dia}$$

- Cálculo da área coletora $A_{coletora}$

Pela equação (8):

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot E_{util}) \cdot FC_{instal} \cdot 4,901}{PMDEE \cdot I_G\text{-anual}}$$

$$A_{coletora} = \frac{(1,15 \cdot 52,88) \cdot 1,0017 \cdot 4,901}{3,31 \cdot 5}$$

$$A_{coletora} = 18,0390 \text{ m}^2$$

- Cálculo do numero de placas/calhas de $0,3 \text{ m}^2$

$$n^{\circ} \text{ placas} = \frac{A_{coletora}}{0,3}$$

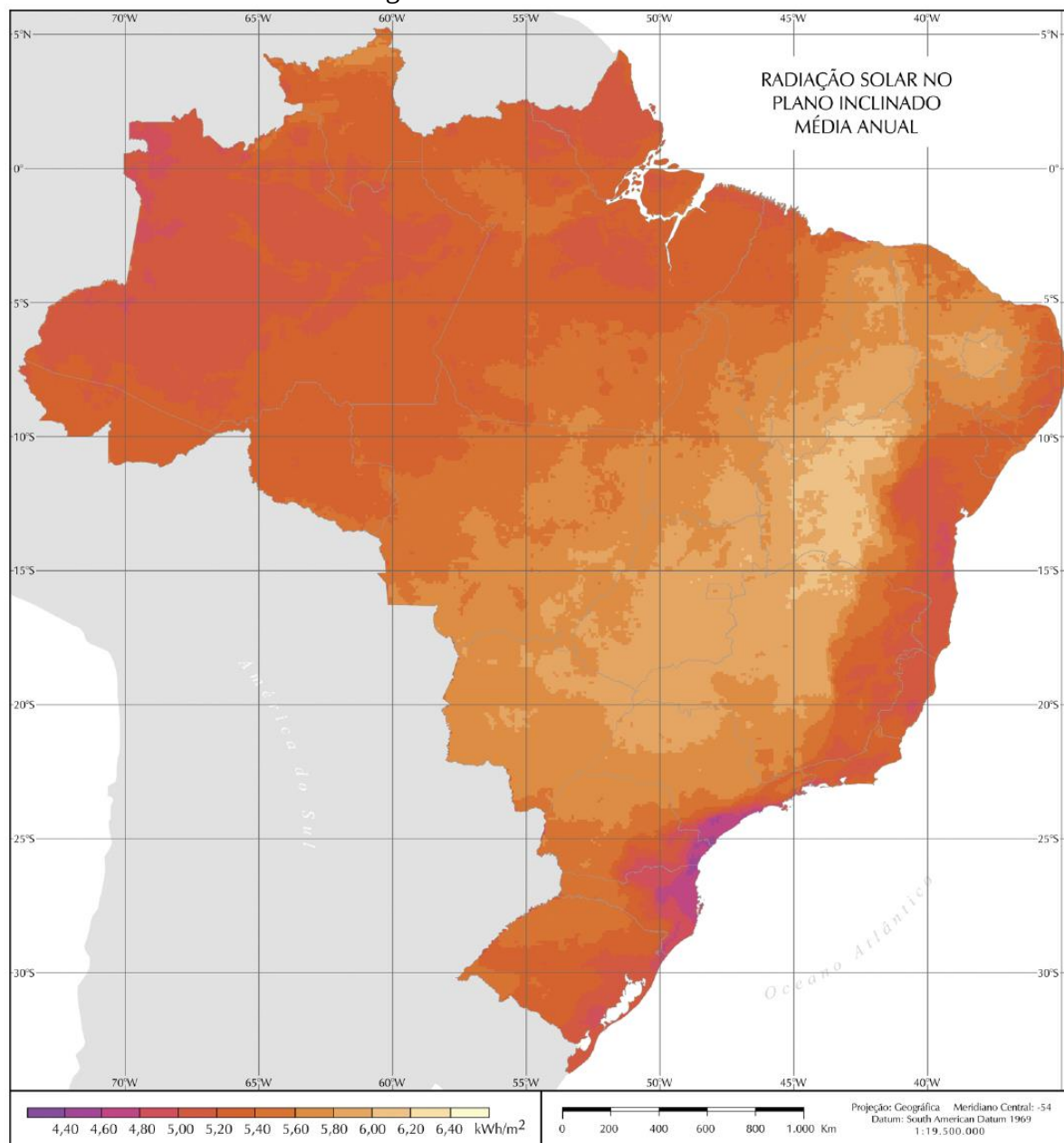
$$n^{\circ} \text{ placas} = \frac{18,0390}{0,3}$$

$$n^{\circ} \text{ placas} = 61 \text{ placas}$$

ANEXO A – Irradiação global

A Figura 23 ilustra os valores de $I_{G-anoal}$ para o território brasileiro.

Figura 23 – Valores de $I_{G-anoal}$



Fonte: (PEREIRA et al., 2006)