



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



EMANUEL HESPANHOL COSTA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE
UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR A VÁCUO PARA UMA
RESIDÊNCIA**

**OURO PRETO - MG
2020**

EMANUEL HESPANHOL COSTA
emanuelhmc@gmail.com

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE
UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR A VÁCUO PARA UMA
RESIDÊNCIA**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C837e Costa, Emanuel Hespanhol .
Estudo de viabilidade econômica para implantação de um sistema de aquecimento solar a vácuo em uma residência. [manuscrito] / Emanuel Hespanhol Costa. - 2020.
62 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Coletores solares - Vácuo. 2. Água - Aquecimento solar. 3. Análise dimensional . 4. Estudos de viabilidade . I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB - 1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Emanuel Hespanhol Costa

Estudo de viabilidade econômica para implantação de um sistema de aquecimento solar a vácuo em uma residência

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 17 de Dezembro de 2020

Membros da banca

DSc. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Savio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. Edson Alves Figueira Junior (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/02/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luís Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2021, às 20:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0132125** e o código CRC **3A3D1B1B**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.001085/2021-73

SEI nº 0132125

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

AGRADECIMENTO

A todos os mestres que contribuíram com a minha formação acadêmica e profissional durante a minha vida.

À UFOP e todos os seus professores que sempre proporcionaram um ensino de alta qualidade.

Ao meu orientador Bortolaia pela sua dedicação e paciência durante o projeto. Seus conhecimentos fizeram grande diferença no resultado final deste trabalho.

À minha família da República Oito & Oitenta pela irmandade e todos os aprendizados ao longo dos anos em Ouro Preto.

A minha irmã Juliana por estar ao meu lado e por me fazer ter confiança nas minhas decisões.

Por último, mas não menos importante aos meus pais Dico e Edna que sempre me incentivaram e apoiaram em todas as áreas da minha vida.

“Executa cada ação da tua vida como se fosse a última. Mantendo toda tua atenção naquilo que elegeste como prioridade, neste momento, e ficarás livre de todas as outras preocupações.”

Princípio do Estoicismo

RESUMO

O Brasil é um país com grande incidência de radiação solar, e uma ótima alternativa para diminuir os custos com energia elétrica é investir em uma fonte renovável de energia, como o uso de coletores solares. Com este objetivo, o presente trabalho realiza um estudo de viabilidade econômica sobre o sistema de aquecimento de água para uma residência de 15 pessoas através de coletores solares de tubo à vácuo. A partir de uma pesquisa exploratória do sistema de aquecimento de água residencial por meio de coletores solares, foi feito o dimensionamento deste, que com um caráter quantitativo e qualitativo, utilizou-se de pesquisas bibliográficas para realizar o estudo de caso de uma residência republicana típica da cidade de Ouro Preto – MG. Com isso, dimensionou-se e fez-se a seleção dos equipamentos do sistema solar dados pelo INMETRO (2018), que para o caso estudado, a área coletora deve ser de 7,11 m² e o reservatório térmico de 600 litros. Afim de estudar também a viabilidade econômica do projeto, cálculos de engenharia econômica foram executados e concluiu-se que o projeto é totalmente viável, além de ter um curto *payback* de 2 anos.

Palavras-chave: coletor solar à vácuo, aquecimento de água, dimensionamento, seleção, custos.

ABSTRACT

Brazil is a country with a high incidence of solar radiation, a great alternative to reduce electricity costs and invest in a renewable source of energy, such as the use of solar collectors. With this objective in mind, the present project carries out an economic feasibility study on the water heating system for a residence of 15 people using vacuum tube solar collectors. From an exploratory research of the residential water heating system using solar collectors, it was dimensioned, which with a quantitative and qualitative character, used bibliographic research to carry out the case study of a typical republican residence from the city of Ouro Preto - MG, where 15 residents live. With that, it was dimensioned and made the selection of the equipment of the solar system given by INMETRO (2018), that for the studied area, a collecting area must be 7.11 m² and the thermal reservoir of 600 liters. In order to also study the economic viability of the project, economic engineering calculations were compensated and expected if the project is totally viable, in addition to having a short payback of 2 years.

Key-words: vacuum solar collector, water heating, sizing, selection, costs

LISTA DE SIMBOLOS

E	poder emissivo da superfície (W/m ²)
ε	emissividade (adimensional)
T_s	temperatura absoluta da superfície (K)
σ	constante de Stefan – Boltzmann (W/m ² K ⁴)
G_{abs}	irradiação absorvida pela superfície (W/m ²)
α	propriedade radiante da superfície denominada absortividade (-)
G	radiação incidente total (W/m ²)
q''_{rad}	fluxo de radiação (W/m ²)
q_{rad}	taxa líquida de transferência de calor por radiação (W)
h_r	coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m ² K)
q''_{conv}	fluxo de calor convectivo (W/m ²)
T_s	temperatura da superfície (°C, K)
T_∞	temperatura do fluido (°C, K)
h_c	coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² K)
R_t	resistência térmica (°C/W, K/W)
$R_{t,cond}$	resistência térmica condutiva (°C/W, K/W)
$R_{t,conv}$	resistência térmica convectiva (°C/W, K/W)
$R_{t,rad}$	resistência térmica radiante (°C/W, K/W)
Q	quantidade de calor sensível (J)
m	massa do corpo (kg)
C_p	calor específico da substância (J/kg°C)
ΔT	variação da temperatura (°C ou K)
$V_{consumo}$	volume de consumo (l, m ³)
V_{armaz}	volume de armazenamento (m ³)
V_{quente}	volume de consumo de água quente (m ³)

$T_{consumo}$	temperatura de consumo de utilização (°C)
T_{armaz}	temperatura de armazenamento (°C)
$T_{ambiente}$	temperatura média anual do local da instalação (°C)
$D_{mês}$	demanda energética ($kWh/mês$)
Q_{dia}	consumo diário de água quente ($litros/dia$)
N	número de dias do mês considerado (-)
T_{acs}	temperatura do consumo de água quente (°C)
T_{af}	temperatura de água fria da rede (°C)
$Q_{mês}$	irradiação solar média mensal ($kWh/m^2 \cdot mês$)
Q_{dia}	irradiação solar diária média mensal ($kWh/m^2 \cdot dia$)
A	área mínima do painel (m^2)
TMA	Taxa mínima de Atratividade (%)
FC_0	investimento inicial (R\$)
FC_j	fluxo de caixa no tempo j (R\$)
TIR	taxa interna de retorno (%)
VPL	valor presente líquido (R\$)
FC_k	fluxo de caixa descapitalizado no período k (R\$)
IBC	Índice Benefício/Custo (-)
$ROIA$	retorno sobre investimento adicional (%)
N_r	horizonte de planejamento (-)
$\dot{W}_{eletrica}$	potência elétrica (W)
\dot{m}_{fluido}	vazão mássica do fluido (kg/s)
Δh	variação da entalpia do fluido (kJ/kg)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de transferência de calor por convecção	6
Figura 2 - Condução de calor através de uma grande parede plana.	7
Figura 3 - Plano Elíptico.....	10
Figura 4 – Balanço energético da Terra.....	11
Figura 5 - Incidência Solar	12
Figura 6 - Altura Solar.....	12
Figura 7 - Orientação geográfica dos coletores.	13
Figura 8 - Ângulo de inclinação dos coletores	13
Figura 9 - Principais equipamentos utilizados nas etapas do processo	14
Figura 10 - Componentes do coletor de placa plana	15
Figura 11 - Esquema de um tubo coletor.....	16
Figura 12 - Em (a), coletor tubo de vácuo instalado no telhado. Em (b), ilustração esquemática mostrando o fluxo da água e as partes externas de um tubo de vácuo	17
Figura 13 - Funcionamento esquematizado de um aquecedor solar à vácuo	17
Figura 14 - Ligação em série	18
Figura 15 - Ligação em paralelo.....	19
Figura 16 - Ligação em Paralelo de Canais.....	20
Figura 17 - Sistema de Circulação Forçada.....	21
Figura 18 - Sistema de circulação natural	22
Figura 19 - Medidas de referência para a instalação de termossifões	23
Figura 20 - Fluxograma da metodologia do trabalho	31
Figura 21 - Fluxograma da metodologia do trabalho	35
Figura 22 - Em (a), características técnicas do chuveiro. Em (b), energia consumida média. .	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Inclinação de coletores solares	13
Tabela 2 - Prós e contras da ligação em série.....	18
Tabela 3 - Prós e Contras da Ligação em paralelo	19
Tabela 4 - Prós e contras da ligação em paralelo de canais.....	20
Tabela 5 - Prós e Contras da Circulação Forçada.....	21
Tabela 6 - Sistema de Termossifão.....	23
Tabela 7 - Classificação dos Sistemas de Aquecimento Solar.	24
Tabela 8 - Consumos, ciclo diário e temperatura de consumo das peças de utilização	25
Tabela 9 - Variáveis e indicadores	32
Tabela 10 - Irradiação solar diária média de Ouro Preto.....	34
Tabela 11 - Tabela de Consumo / Eficiência Energética	36
Tabela 12 - Estimativa de valores para implementação do sistema de aquecimento solar	38
Tabela 13 - Tarifas cobradas pela CEMIG em 2020.....	39
Tabela 14 - Resultados dos indicadores	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Calor	4
2.1.1	Mecanismos de Transferência de Calor	4
2.1.1.1	Radiação	4
2.1.1.2	Convecção	5
2.1.1.3	Condução.....	7
2.1.1.4	Resistência térmica.....	8
2.1.2	Calorimetria	8
2.1.2.1	Calor Sensível	9
2.1.3	Análise da energia em sistemas sob regime permanente.....	9
2.1.3.1	Potência elétrica	9
2.2	Noções de Radiação e geometria Solar	10
2.2.1	Movimento da Terra	10
2.2.2	Geometria Solar.....	10
2.2.2.1	Orientação geográfica segundo a NBR 15569 (ABNT, 2008).....	13
2.2.2.2	Ângulo de inclinação segundo a NBR 15569 (ABNT, 2008).....	13
2.3	Coletores Solares	14
2.3.1	Coletor Solar Plano.....	14
2.3.2	Coletor Solar à Vácuo.....	16
2.3.2.1	Estrutura	16
2.3.2.2	Funcionamento	17
2.3.3	Modo de Ligação	18
2.3.3.1	Ligação em Série.....	18
2.3.3.2	Ligação em Paralelo	19
2.3.3.3	Ligação em Paralelo de Canais	19
2.3.4	Sistemas de Circulação	20

2.3.4.1	Sistema de Circulação Forçada	20
2.3.4.2	Sistema de Circulação Natural	22
2.3.5	Dimensionamento do Sistema	23
2.3.5.1	Classificação dos sistemas de aquecimento solar (SAS)	23
2.3.5.2	Cálculo do consumo médio de água.....	24
2.3.5.3	Cálculo do reservatório térmico	25
2.3.5.4	Cálculo da demanda energética e irradiação mensal máxima no SAS	25
2.3.5.5	Cálculo da área dos painéis	27
2.4	Análise de viabilidade econômica	27
2.4.1	Taxa mínima de atratividade (TMA).....	27
2.4.2	Valor presente líquido (VPL)	27
2.4.3	Taxa interna de retorno (TIR).....	28
2.4.4	Período de recuperação do Investimento (<i>Payback</i>)	28
2.4.5	Índice Benefício/Custo (IBC).....	29
2.4.6	Retorno sobre investimento adicional (ROIA).....	29
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Tipos de pesquisa.....	30
3.2	Materiais e métodos.....	30
3.3	Variáveis e Indicadores	31
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	32
3.5	Tabulação dos dados.....	32
3.6	Considerações Finais	32
4	RESULTADOS	33
4.1	Descrição da aplicação	33
4.2	Dimensionamento dos Painéis Solares	33
4.2.1	Cálculo do consumo médio de água	33
4.2.2	Cálculo do reservatório térmico	34
4.2.3	Cálculo da demanda energética e irradiação mensal máxima no SAS.....	34
4.2.4	Cálculo da área dos painéis	36
4.3	Seleção do sistema de aquecimento solar.....	37
4.4	Custo estimado para implantação do sistema de aquecimento solar	37
4.5	Consumo de energia da residência de 15 pessoas	38
4.6	Análise de viabilidade econômica	40
4.6.1	VPL, TIR, Payback, IBC e ROIA	40

5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	42
5.1	Conclusão	42
5.2	Recomendações	43
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

De acordo com Cavalcante (2019) a energia solar é a forma de energia limpa mais abundante na natureza. Conseqüentemente, os aquecedores solares estão invadindo residências, hotéis, indústrias, edifícios, propriedades rurais e demais lugares onde são necessários.

O território brasileiro possui alto potencial para captação solar. Comparativamente, a região que apresenta a maior disponibilidade energética é a Nordeste, em função de sua localização mais próxima à linha do Equador, seguidas pelo Centro-Oeste e Sudeste. A região Norte, também é bem posicionada nesse sentido, recebe menos incidência solar, por ter características climáticas e geográficas que reduzem o alcance da radiação (Boreal Solar, 2019).

De acordo com a organização não governamental (ONG) Sociedade do Sol, em 2012, existiam 36 milhões de residências em todo país. Caso considerarmos hipoteticamente que em cada residência haja quatro pessoas e cada uma mantenha o chuveiro ligado 15 minutos em média e a potência do chuveiro seja de 5000W, teríamos um gasto de 18 milhões de kWh por dia, só com chuveiros elétricos no país. Na medida em que os cidadãos tomarem consciência da importância da substituição do chuveiro elétrico pelo aquecedor solar estaríamos fazendo uma grande economia de energia elétrica.

A demanda por água quente, aliada à economia de energia e maior atenção ao meio ambiente, tem afetado muitas pessoas que buscam sistemas de aquecimento solar. Neste modelo, a água é aquecida pela energia do sol por meio de coletores e armazenada em boilers para uso em chuveiros, torneiras ou piscina, por exemplo. Atualmente, os coletores solares de tubo evacuado possuem um sistema que absorve energia através de "tubos" de vidro evacuados, e tem se mostrado uma das melhores tecnologias para aquecer água de forma eficiente. (Komeco, 2015)

Então, a proposição deste estudo é analisar uma possível implantação de um sistema de aquecimento solar em uma república com 15 moradores. Diante do contexto, tem-se a seguinte problemática:

É viável economicamente a implantação de um sistema de aquecimento solar à vácuo em uma residência de 15 pessoas?

1.2 Justificativa

Considerando o alto potencial solar do Brasil, em qualquer uma das regiões brasileiras a exploração da energia solar por meio de aquecedores solares pode ser realizada em áreas de diferentes perfis.

Em regiões urbanas, a possibilidade de instalação de boilers a vácuo no alto dos prédios e casas permite que consumidores e comerciantes adotem a energia solar em suas residências e comércios, reduzindo significativamente sua conta de luz.

Em muitas cidades universitárias existem residências com grande número de moradores, conhecidas também como repúblicas, chegando a residir até 20 pessoas em apenas uma casa.

Devido à grande demanda energética nesses tipos de lugares, a utilização de um aquecedor a vácuo entra em vigor devido sua maior eficiência, maior alcance de temperatura, menor necessidade de armazenamento, alta durabilidade, fácil manutenção e facilidade na instalação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Averiguar a viabilidade econômica para a implantação de um sistema de aquecimento solar a vácuo para uma residência onde moram 15 pessoas.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os mecanismos de Transferência de Calor e aquecedores solares a vácuo para aquecimento de água;
- Realizar o dimensionamento do projeto do aquecedor solar;
- Analisar a viabilidade econômica da implantação do aquecedor em um caso prático;
- Calcular em quanto tempo será o retorno do dinheiro investido.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos. O segundo capítulo, apresentará a revisão bibliográfica sobre os mecanismos de

Transferência de Calor e um estudo sobre os coletores solares a vácuo que contará com conceitos e teorias a respeito dos assuntos, bem como trata sobre a construção e aplicação da modelagem matemática a ser utilizada na análise do coletor, bem como o estudo teórico da viabilidade econômica. No terceiro capítulo, será apresentada a metodologia da pesquisa. No quarto capítulo, serão analisados os resultados obtidos e no último será apresentada a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão abordados os três mecanismos de transferência de calor, sendo eles, radiação, convecção e condução, uma explicação do funcionamento do coletor solar à vácuo e de sua seleção e a apresentação dos métodos de análise de viabilidade econômica.

2.1 Calor

Para Helerbrock (2020), calor é energia térmica no transporte. Quando dois objetos estão em contato térmico, a transferência de calor ocorre entre eles até que o equilíbrio seja estabelecido. O equilíbrio térmico é a situação em que dois objetos atingem a mesma temperatura. Além disso, o calor sempre flui do corpo com a temperatura mais alta para o corpo com a temperatura mais baixa.

2.1.1 Mecanismos de Transferência de Calor

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), “calor é a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles. A ciência que estuda as taxas de transferência do calor é chamada transferência de calor”. Existem três tipos de mecanismos de transferência de calor: radiação, convecção e condução.

2.1.1.1 Radiação

Para o caso, a radiação que convém é a radiação térmica e segundo Çengel e Ghajar (2012), a radiação térmica é a forma de radiação emitida pelos corpos por causa de sua temperatura. Ela difere de outras formas de radiação eletromagnéticas, que não estão relacionadas com a temperatura. Todos os corpos a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação térmica.

Para Incropera et al. (2008), o fluxo de calor emitido por uma superfície real é dado por:

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (1)$$

Sendo:

E - poder emissivo da superfície (W/m^2);

ε - emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$). A emissividade depende do material da superfície e do seu acabamento;

T_s - temperatura absoluta da superfície (K);

σ - Constante de Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

Segundo Incropera et al. (2008), a radiação incidente (G) pode incidir sobre uma superfície a partir de sua vizinhança. A taxa em que todas as radiações incidem sobre uma área unitária da superfície é designada por irradiação. Ela é classificada como absorvida, refletida ou transmitida e depende da superfície. A irradiação absorvida pode ser calculada por:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2)$$

Sendo:

G_{abs} - irradiação absorvida pela superfície (W/m^2);

α - propriedade radiante da superfície denominada absorvidade. $0 \leq \alpha \leq 1$;

G - radiação incidente total (W/m^2).

Em muitas aplicações é conveniente expressar a transferência de radiação líquida entre uma superfície e a vizinhança através da equação (Incropera et al., 2008):

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (3)$$

Sendo:

q''_{rad} - fluxo de radiação (W/m^2).

Ou,

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{viz}) \quad (4)$$

E q_{rad} é a taxa líquida de transferência de calor por radiação (W).

Sendo h_r o coeficiente de transferência de calor por radiação ($\text{W/m}^2 \text{ K}$) dado por:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s - T_{viz}) (T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (5)$$

2.1.1.2 Convecção

Conforme Çengel e Ghajar (2012), convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência por convecção.

De acordo com Incropera et al. (2008), a convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Podendo ser forçada, onde o escoamento do fluido é causado por meios externos, como ventilador, bomba ou ventos atmosféricos (Figura 1) e convecção natural ou livre, onde o escoamento do fluido é causado por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade devido às variações de temperatura no fluido. Há processos de convecção nos quais existe a troca de calor latente, que está associada a uma mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido. Por exemplo, a ebulição e a condensação.

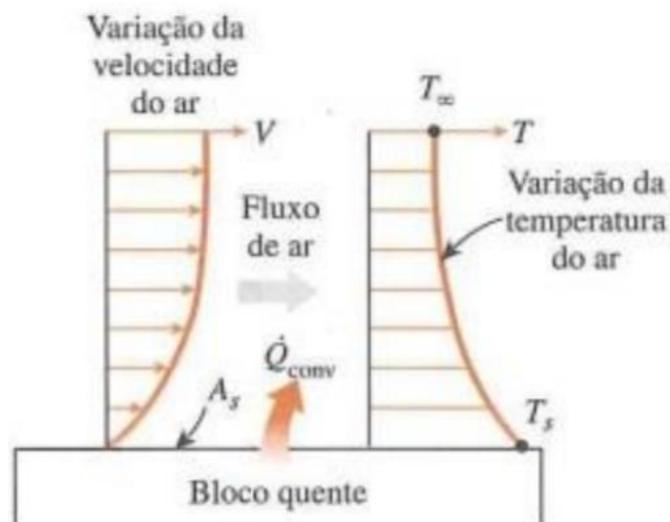


Figura 1 - Mecanismo de transferência de calor por convecção
Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Çengel e Ghajar (2012) mostram que pode se observar que a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, sendo expressa pela Lei de Newton como:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

Sendo:

q'' - fluxo de calor convectivo (W/m^2);

T_s - temperatura da superfície ($^\circ\text{C}$, K);

T_∞ - temperatura do fluido ($^\circ\text{C}$, K);

h - coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). De acordo com Çengel e Ghajar (2012), ele depende de:

- Propriedades do fluido;

- Velocidade da massa do fluido;
- Geometria da superfície;
- Natureza do escoamento do fluido.

Para Incropera et al. (2008), quando o fluxo de calor é maior que zero, o calor é transferido a partir da superfície e quando o fluxo de calor for menor que zero, o calor é transferido para a superfície.

2.1.1.3 Condução

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas (Figura 2).

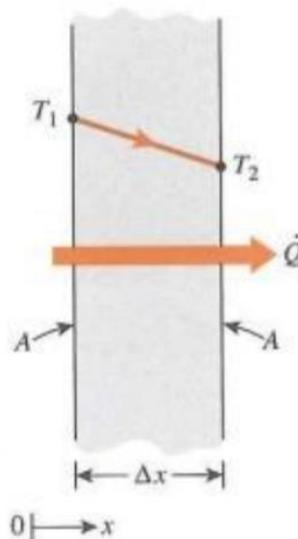


Figura 2 - Condução de calor através de uma grande parede plana.
Fonte: Çengel e Ghajar (2012)

Para Çengel e Ghajar (2012), pode-se determinar a transferência de calor por condução através da lei de Fourier. Para uma parede plana unidimensional o fluxo de calor é apresentado pela seguinte equação:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

Sendo:

- q_x'' - fluxo de calor (W/m²);
- k - condutividade térmica do material da parede (W/m.K);

- dT/dx - gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$; K/m).

Para Incropera et al. (2008), em condições de estado estacionário, onde as propriedades não variam com o tempo, e distribuição de temperaturas linear, o fluxo de calor é representado por:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (8)$$

2.1.1.4 Resistência térmica

De acordo com Incropera et al. (2008), a resistência térmica (R_t) está associada à transferência de calor pela seguinte equação:

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} \quad (9)$$

A resistência térmica condutiva é expressa por:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (10)$$

A resistência térmica convectiva será:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_{\infty}}{q} = \frac{1}{hA} \quad (11)$$

A resistência térmica radiante é expressa por:

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{viz}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (12)$$

2.1.2 Calorimetria

De acordo com Helerbrock (2020), a calorimetria é o campo da física responsável por estudar a troca de energia térmica entre dois ou mais objetos e seu ambiente específico. Por meio da calorimetria, podemos saber qual é a temperatura de equilíbrio do sistema dos corpos e a energia térmica necessária para observar a mudança de temperatura ou a mudança do estado físico do sistema.

2.1.2.1 Calor Sensível

Dizemos que quando a temperatura de um objeto muda, e seu tamanho também pode mudar, ele só recebe calor sensível. Assim, o calor sensível altera a temperatura do corpo, modificando ou não suas dimensões, por meio da dilatação térmica. (HELERBROCK, 2020).

Temos a fórmula do Calor Sensível:

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (13)$$

- Q : quantidade de calor sensível (J);
- m : massa do corpo (kg);
- C_p : calor específico da substância (J/kg°C);
- ΔT : variação da temperatura (°C ou K).

2.1.3 Análise da energia em sistemas sob regime permanente

De acordo com Çengel e Boles (2013), diversos equipamentos de engenharia trabalham por longos períodos sob as mesmas condições, tão logo um transiente inicial seja vencido e seja estabelecido um regime de operação estável. Estes equipamentos são classificados como dispositivos de escoamento em regime permanente.

O processo de regime permanente é definido como, “*um processo onde as propriedades do fluido não variam com o tempo, em um determinado ponto. As propriedades mantêm-se inalteradas ao longo do tempo, embora possam variar de uma posição para outra*” (ÇENGEL; BOLES, 2013).

2.1.3.1 Potência elétrica

Segundo Çengel e Boles (2013), em um regime permanente o trabalho de eixo e o trabalho elétrico são as únicas formas de trabalho que podem estar envolvidas em um sistema simples. Se a superfície de controle for atravessada por fios elétricos, a potência (\dot{W}), representará o trabalho elétrico por unidade de tempo.

Para o cálculo da potência elétrica para elevar a temperatura de um fluido, é utilizada a equação:

$$\dot{W}_{elétrica} = \dot{m}_{fluido}(\Delta h) \quad (14)$$

- $\dot{W}_{elétrica}$: potência elétrica (W);

- \dot{m}_{fluido} : vazão mássica do fluido (kg/s);
- Δh : variação da entalpia do fluido (kJ/kg).

2.2 Noções de Radiação e geometria Solar

2.2.1 Movimento da Terra

O movimento da Terra, refere-se à rotação e translação em torno do Sol. Nosso planeta percorre uma órbita elíptica ao redor do Sol, chamado, plano elíptico (Figura 3). O eixo terrestre gira sobre si próprio denominando-se de eixo polar e se localiza inclinado em relação ao plano da órbita próximo a $23^{\circ}45''$. As estações do ano são causadas por esta declinação. Quando a declinação é nula, ocorrem os equinócios de primavera (21 de março) e de Outono (21 de setembro), onde os dias são iguais a noite. Já quando a declinação é de $23^{\circ}45''$, acontece o solstício de verão (21 de junho), onde o período diurno é maior que o noturno. Por outro lado, no solstício de Inverno (21 de dezembro) a declinação solar é de $-23^{\circ}45''$ e o período diurno é menor que o noturno.

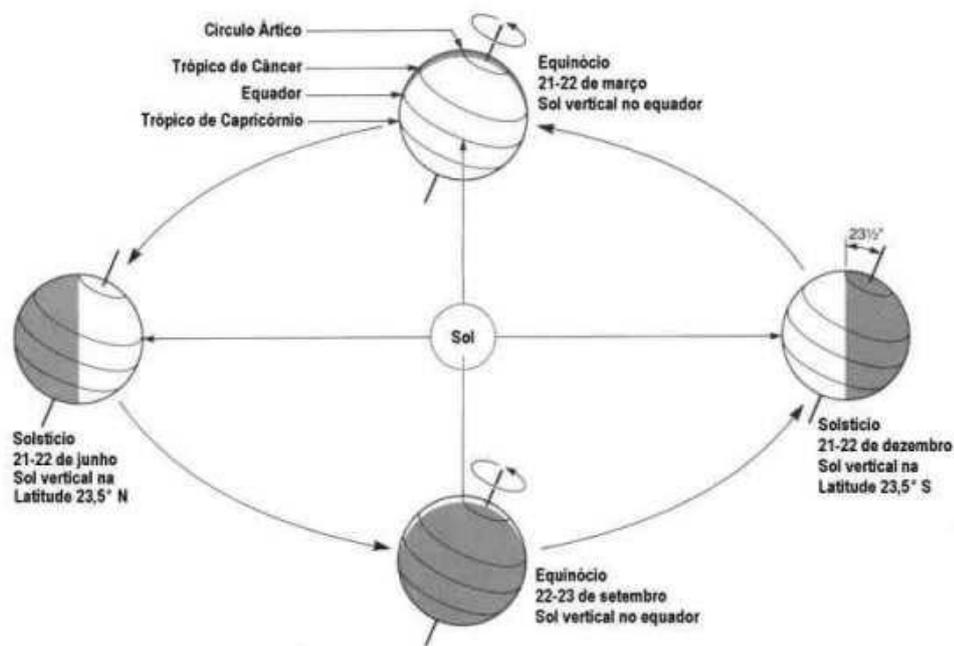


Figura 3 - Plano Elíptico
Fonte: Grimm (1999)

2.2.2 Geometria Solar

A radiação solar no espaço possui uma intensidade, dada por unidade de tempo e por unidade de área, um fluxo de energia próximo a 1400 W/m^2 , que varia ao longo do ano e pela

questão do nosso planeta girar ao redor do Sol em um percurso elíptico (Duffie e Beckman, 1991).

A radiação emitida num plano terrestre depende do ângulo solar, da massa atmosférica que a radiação deve enfrentar, da altitude, da concentração de vapor, nuvens e aerossóis na atmosfera. A Figura 4 exemplifica a reflexão e a absorção da radiação.

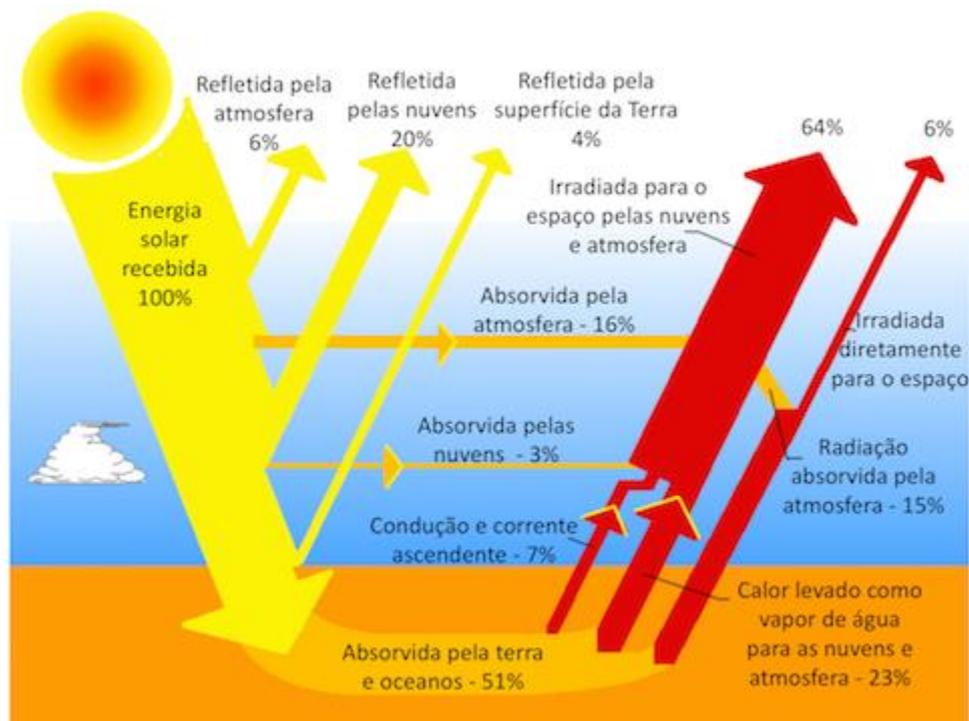


Figura 4 – Balanço energético da Terra
Fonte: Souto (2019)

Considerando um dia com o céu sem nuvens, às 12:00, com uma radiação de 1000 W/m^2 e a altura solar for de 90° na vertical, têm-se uma radiação média de 1000 W por 1 m^2 de solo, logo, a área em que a energia se distribui é mínima e a insolação é máxima. Caso ocorra qualquer variação na angulação de incidência, a mesma radiação se distribuirá por uma área maior, sendo assim, tendo uma menor insolação (Figura 5).

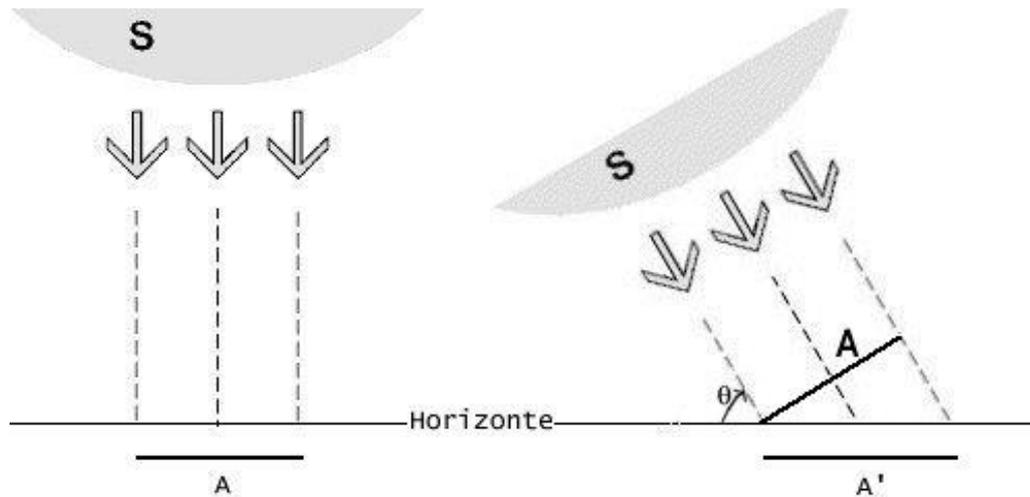


Figura 5 - Incidência Solar
 Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2003)

No verão a altura solar é aproximadamente perpendicular ao horizonte, já no inverno a inclinação dos raios são maiores, sendo assim, possui uma menor altura solar (Figura 6).

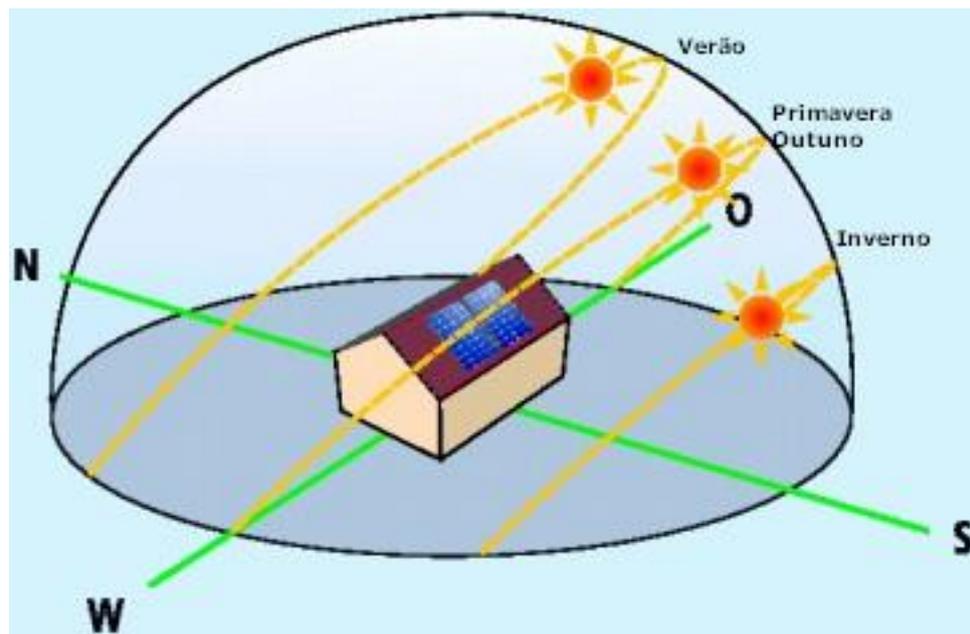


Figura 6 - Altura Solar
 Fonte: Pereira (2011)

Para se obter um ângulo ideal, é necessário que os painéis solares se movam constantemente, mas como isto não é possível em todas as situações, é necessário encontrar um ponto de equilíbrio de acordo com o local, clima e o tipo de sistema solar. A Tabela 1 apresenta as inclinações indicadas para cada caso.

Tabela 1 - Inclinação de coletores solares

Utilização	Inclinação
Verão (casa de férias, hotéis de praia, etc)	Latitude - 15°
Inverno (aquecimento do ambiente, etc)	Latitude + 15°
Anual (águas quentes sanitárias, etc)	Latitude - 5°

Fonte: IP-AQSpP (2004)

2.2.2.1 Orientação geográfica segundo a NBR 15569 (ABNT, 2008)

A orientação dos coletores solares deve estar de acordo com as especificações, manual de instalação e projeto. Caso não existam esses documentos, sugere-se pela NBR 15569 (ABNT, 2008), que os coletores sejam instalados voltados para o Norte Geográfico (Figura 7), com desvio máximo de até 30° desta direção.

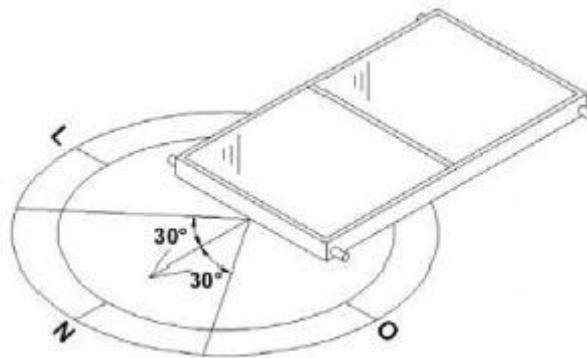


Figura 7 - Orientação geográfica dos coletores.
Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2008, p.18)

2.2.2.2 Ângulo de inclinação segundo a NBR 15569 (ABNT, 2008)

A norma vigente sugere que o ângulo de inclinação seja igual ao ângulo da latitude do local somado de 10°, nunca inferior a 15°, como mostra a figura 8 a seguir.

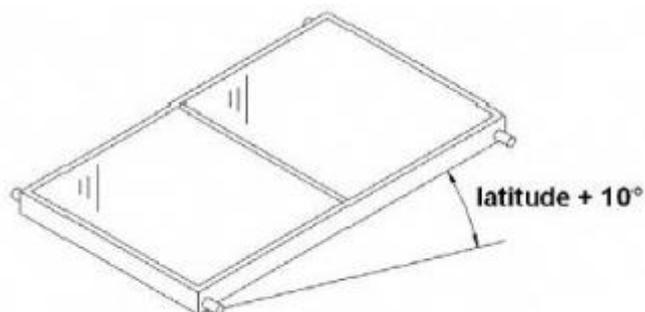


Figura 8 - Ângulo de inclinação dos coletores
Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2008, p.18)

2.3 Coletores Solares

Segundo Lourenço (2012), um coletor solar é um dispositivo que absorve energia solar e converte em calor, aquecendo um fluido de trabalho. Este fluido pode ser ar, água ou outro fluido de transferência de calor.

Para Duffie e Beckman (1991), os coletores solares devem ter alta transmitância e absorver a radiação solar. Eles perdem energia por convecção e radiação, e espera-se que a emissão da superfície seja a mais baixa possível para reduzir as perdas de radiação.

Um fato relevante para se projetar e instalar sistemas solares térmicos, é conhecer os mais variados equipamentos e acessórios que constituem estes sistemas, de forma que se aproveite o máximo de desempenho do coletor solar. Na figura 9 observa-se os principais equipamentos e as etapas do processo: subsistema de captação (coletor solar), subsistema de armazenamento (reservatório térmico) e subsistema de consumo (chuveiro, torneira). Com isto, faz-se necessário uma análise criteriosa dos tipos de painéis solares térmicos existentes.

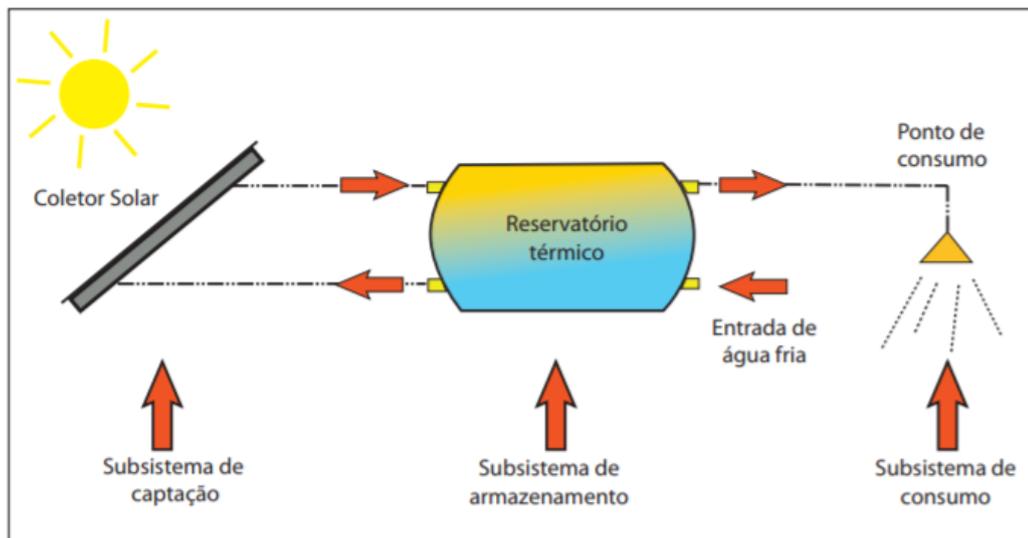


Figura 9 - Principais equipamentos utilizados nas etapas do processo
Fonte: Coelho (2012)

2.3.1 Coletor Solar Plano

Segundo Lima (2003) o coletor solar plano recebe e utiliza a radiação solar na mesma superfície. Comparado com o coletor concentrado, ele opera em baixas temperaturas, geralmente abaixo de 93 °C. Também alerta que a eficiência diminui rapidamente acima de 71°C. Em comparação com outros tipos, as vantagens do coletor plano são: a simplicidade de construção, relativo baixo custo, nenhuma parte móvel, sem dificuldade de operar em dias nublados, relativa facilidade de reparo e durabilidade.

Os absorvedores podem ser feitos de materiais diferentes, mas cobre e alumínio são os mais comumente usados, devido às suas propriedades térmicas. O absorvedor está localizado no centro do coletor e é protegido por uma caixa de resistência. Na parte posterior e nas laterais existe o isolamento, que evita ao máximo as perdas de calor para o ambiente. Na parte superior fica a cobertura transparente e na lateral existem dois tubos para alimentação e retorno do fluido circulante (LOURENÇO, 2009).

Geralmente, o coletor solar plano é formado por:

- Vidro: Uma ou mais folhas de vidro ou outro material diatérmico (é um material que conduz facilmente o calor, radiação-transmissão);
- Tubos, aletas ou passagens: Para direcionar ou conduzir o fluido da entrada até a saída;
- Placa absorvedora: a qual os tubos, aletas ou passagens estão conectadas;
- Tubo de alimentação: Para a admissão e descarga do fluido;
- Isolamento: para minimizar a perda de calor pela parte inferior e pelas laterais do coletor;
- Caixa: Armazenar e manter os componentes citados acima longe da poeira, umidade, etc., conforme mostrados na Figura 10.

A Figura 10 ilustra os componentes do coletor de placa plana.

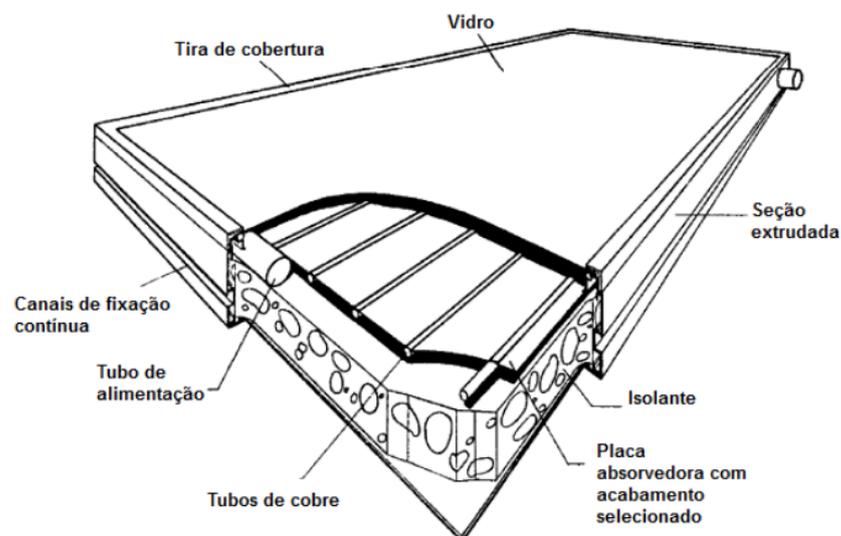


Figura 10 - Componentes do coletor de placa plana
Fonte: Adaptado de Kalogirou (2004)

2.3.2 Coletor Solar à Vácuo

Este sistema pode ser utilizado no aquecimento das águas sanitárias e no aquecimento do gerador dos sistemas frigoríficos de absorção, chegando em temperaturas perto dos 100°C. Uma das vantagens destes coletores em relação ao sistema plano, é o fato de poderem ser sujeitos a temperaturas muito inferiores, próximas dos -3°C, sem que ocorra formação de gelo nos tubos (Roriz, Rosendo, Lorenço, & Calhau, 2010).

2.3.2.1 Estrutura

O coletor de tubo de vácuo é composto por tubo concêntrico por onde circula o fluido térmico. Estes são de cor escura no interior para maior absorção da radiação solar e a parte externa é feita de vidro para serem transparentes à radiação solar, e ao mesmo tempo que são opacos à sua radiação.

O coletor solar a vácuo consiste em três partes: estrutura, cabeça e tubo. Esses tubos são feitos de vidro e composto por dois tubos concêntricos onde no interno está o fluido de trabalho e o mesmo está coberto na parte externa com uma camada seletiva. Entre o interior e o exterior existe uma camada de isolamento a vácuo, e segundo Rosa (2012), a camada de isolamento a vácuo reduz principalmente a perda de calor por convecção e condução. Portanto, o fluido (água) não absorve a temperatura externa, protegendo o sistema, evitando o uso de sistemas anticongelantes no coletor, como válvulas mecânicas, elétricas ou sistemas de circulação de água, métodos que podem gerar perda de água ou energia.

A figura a seguir mostra o esquema de um tubo coletor:

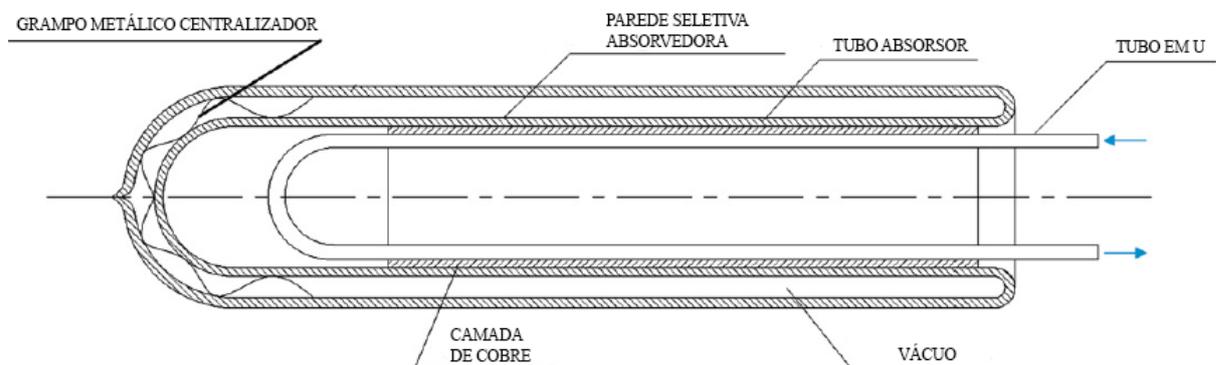


Figura 11 - Esquema de um tubo coletor
Fonte: Adaptado de Ma et al. (2010)

O sistema é formado por um conjunto de tubos verticais ligados entre si na parte superior do coletor. A água ou o fluido circulam por esse conjunto de tubos e transferem o calor à água que circula na parte superior do coletor, conforme a Figura 12.

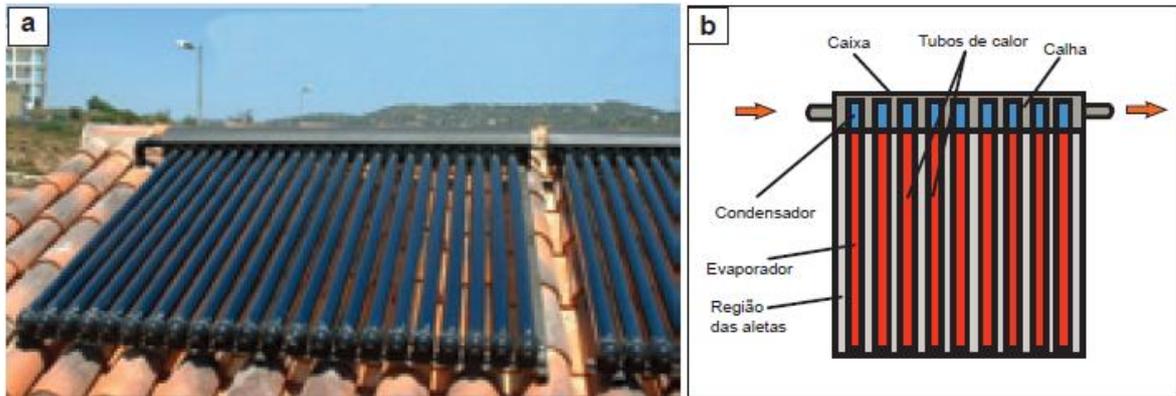


Figura 12 - Em (a), coletor tubo de vácuo instalado no telhado. Em (b), ilustração esquemática mostrando o fluxo da água e as partes externas de um tubo de vácuo
Fonte: Rodrigues (2010)

2.3.2.2 Funcionamento

O aquecedor solar entra em funcionamento (Figura 13) quando as energias solares radiantes ou irradiantes, luz visível e infravermelho, incidem sobre a superfície preta dos coletores. A energia absorvida pela placa transforma-se em calor e aquece a água que está no interior dos coletores. A água aquecida diminui sua densidade e começa a se movimentar em direção ao reservatório, dando início a um processo natural de circulação da água, chamado termossifão. Esse processo mantém o sistema em operação, enquanto houver radiação solar incidente sobre as placas ou até toda água do circuito atingir o equilíbrio térmico.

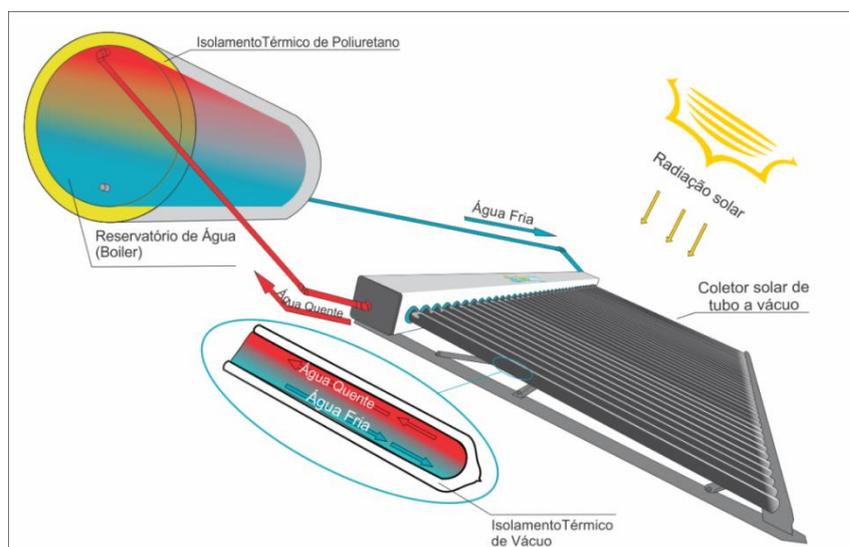


Figura 13 - Funcionamento esquematizado de um aquecedor solar à vácuo
Fonte: Franca (2017)

2.3.3 Modo de Ligação

Em algumas situações, após o dimensionamento do sistema solar, é necessário o uso de um ou mais painéis. A ligação entre os coletores deve então ser feita de forma que propicie um equilíbrio hidráulico natural e aumente ou favoreça o rendimento do coletor (RORIZ et al., 2010). Existem apenas três tipos de ligações entre os coletores, sendo elas: em série, paralelo e paralelo em canais.

2.3.3.1 Ligação em Série

A ligação em série pode ser observada na Figura 14 onde o fluido atravessa todos os coletores, o que acarreta melhor rendimento no primeiro painel do que no último painel da série. Neste tipo de ligação, a perda de carga total é a soma da perda de carga de cada painel mais a perda de carga nos tubos de ligação (RORIZ et al., 2010). A Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens desta ligação.

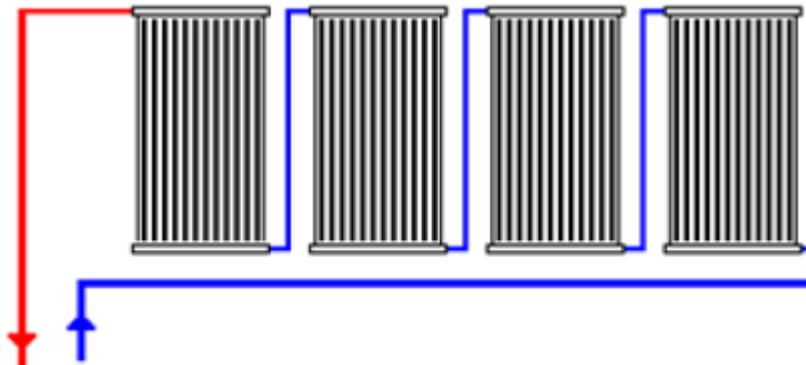


Figura 14 - Ligação em série
Fonte: Solaris (2017)

Tabela 2 - Prós e contras da ligação em série

Ligação em Série	
Prós	Contras
Adaptação a qualquer coletor	Baixo Rendimento
Instalação Simples	Custos elevados com energia de apoio
Baixo custo de instalação e operação	Ligação com número limitado de coletores
Menor comprimento de tubulações	

Fonte: Fernandes (2014)

2.3.3.2 Ligação em Paralelo

A ligação em paralelo é vista na Figura 15, os painéis se posicionam entre dois tubos principais, sendo um encarregado da distribuição do fluido e outro com a função de recolher esse mesmo fluido. Neste tipo de ligação, todos os painéis apresentam o mesmo rendimento e variação de temperatura, já que trabalham de forma independente. Quanto à perda de carga total, é igual a soma da perda de carga de um painel mais a perda de carga nos tubos de ligação opostos aos tubos de origem (RORIZ et al., 2010). A Tabela 3 apresenta os prós e contras desta ligação.

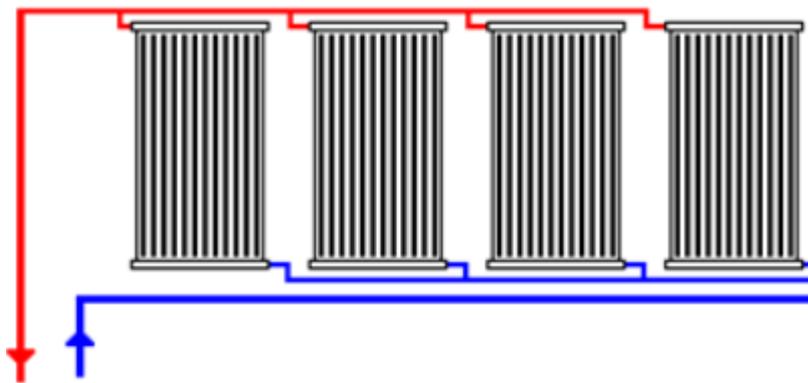


Figura 15 - Ligação em paralelo
Fonte: Solaris (2017)

Tabela 3 - Prós e Contras da Ligação em paralelo

Ligação em Série	
Prós	Contras
Adaptação a qualquer coletor	Maior comprimento das tubulações
Perda de carga baixa	Instalação complexa
Bom rendimento térmico	Custo de instalação mais elevados
Ligação com número ilimitado de coletores	Maior número de acessórios

Fonte: Fernandes (2014)

2.3.3.3 Ligação em Paralelo de Canais

Conforme apresentado na Figura 16, esta ligação se parece com o método em paralelo, com isso, existe menor perda de carga e um maior rendimento (RORIZ et al., 2010). A Tabela 4 apresenta os prós e contras desta ligação.

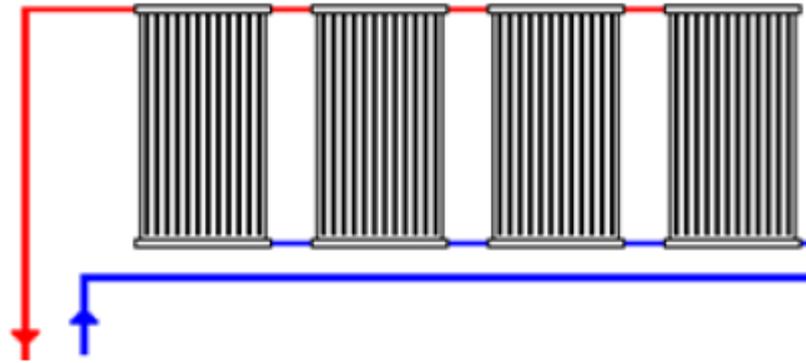


Figura 16 - Ligação em Paralelo de Canais
Fonte: Solaris (2017)

Tabela 4 - Prós e contras da ligação em paralelo de canais

Ligação em Paralelo de Canais	
Prós	Contras
Perda de carga reduzida	Não é adaptável a todos os painéis
Bom rendimento térmico	Ligação limitada a no máximo 4 painéis
Instalação simples	
Menor comprimento de tubulações	

Fonte: Fernandes (2014)

2.3.4 Sistemas de Circulação

No dia a dia precisa-se de um sistema solar adaptado para cada tipo de situação. Para isto, são necessários tipos de circulação diferentes, sendo eles de forma forçada ou natural.

2.3.4.1 Sistema de Circulação Forçada

Como o próprio nome diz, esse tipo de circulação ocorre devido a uma força externa, no caso algum tipo de bomba (Figura 17). Esta pode ser ligada em uma rede elétrica e programada para que seu funcionamento ocorra quando a temperatura do fluido abaixar em uma quantidade determinada. Normalmente, ela é acionada quando a diferença é maior que 5°C entre o topo do coletor e o fundo do depósito, e é desligada quando a diferença de temperatura é menor que 2°C (Komeco, 2008).

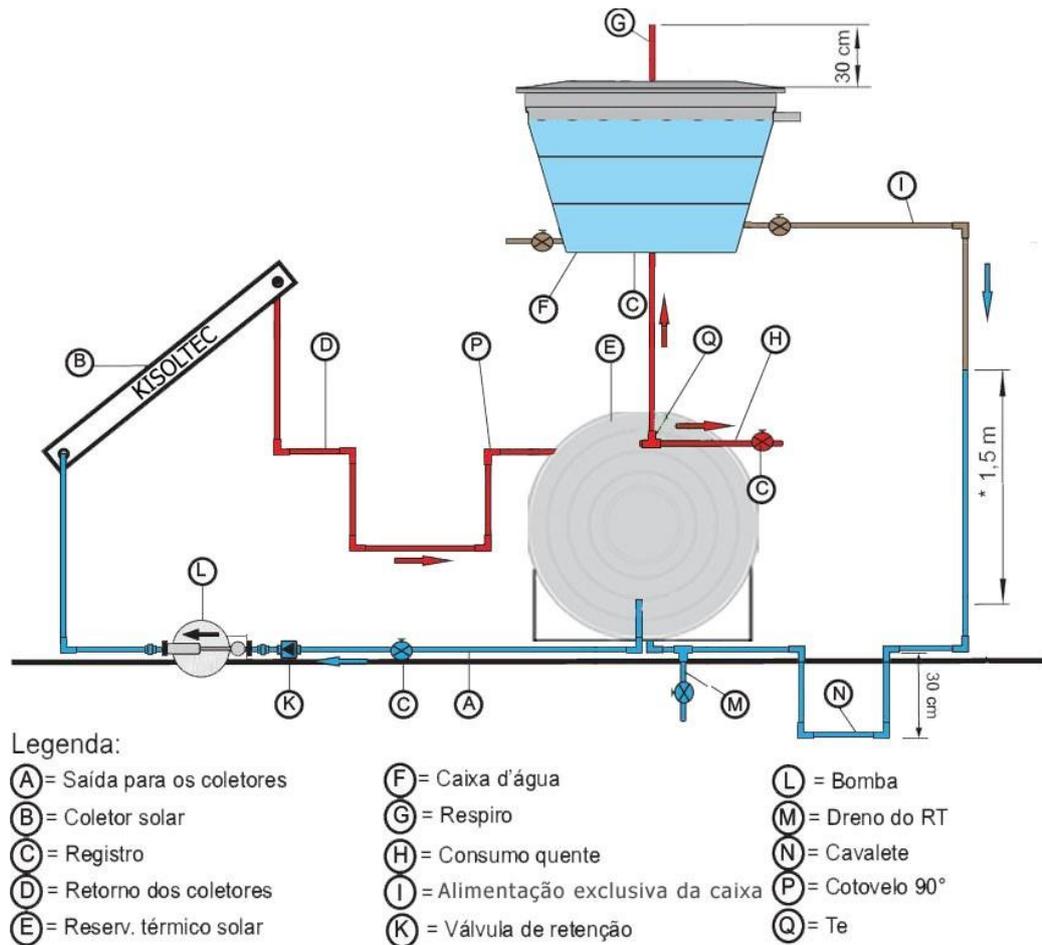


Figura 17 - Sistema de Circulação Forçada
Fonte: Kisoltec (2017)

A circulação forçada normalmente é aplicada quando a perda de carga no sistema é muito grande ou existe muito atrito pelos coletores estarem instalados acima ou ao mesmo nível do depósito térmico.

A Tabela 5 mostra os prós e contras deste sistema.

Tabela 5 - Prós e Contras da Circulação Forçada

Sistema de Circulação Forçada	
Prós	Contras
Elevada capacidade de AQS	Maior necessidade de controle
Maior eficiência	Preço
Melhor integração em edifícios	Projeto mais exigente
Configurável	

Fonte: Fernandes (2014)

2.3.4.2 Sistema de Circulação Natural

Também conhecido como Sistema de Termossifão (Figura 18), é constituído por um depósito de acumulação acoplado logo acima dos coletores solares. Para explicar o funcionamento deste sistema cabe considerar que não há o consumo de fluido. Assim, a radiação que incide no painel é absorvida por estes e transmitida para o fluido no seu interior. Em seguida, quando o fluido atinge altas temperaturas, por convecção, este tende a subir no interior do sistema e a parte mais fria tende a descer (RORIZ et al., 2010).

Ainda assim, durante a noite a circulação do fluido no circuito poderia se inverter, já que não há radiação solar neste período. Uma forma de resolver essa questão é colocar um desnível de no mínimo 300 mm entre o topo do painel e o depósito de acumulação, como na Figura 19. Outra importante medida é a distância em perfil transversal entre o reservatório térmico e o coletor solar (H_{dc}) que deve ser menor que dez vezes a distância H_{cd} (Komeco, 2008).

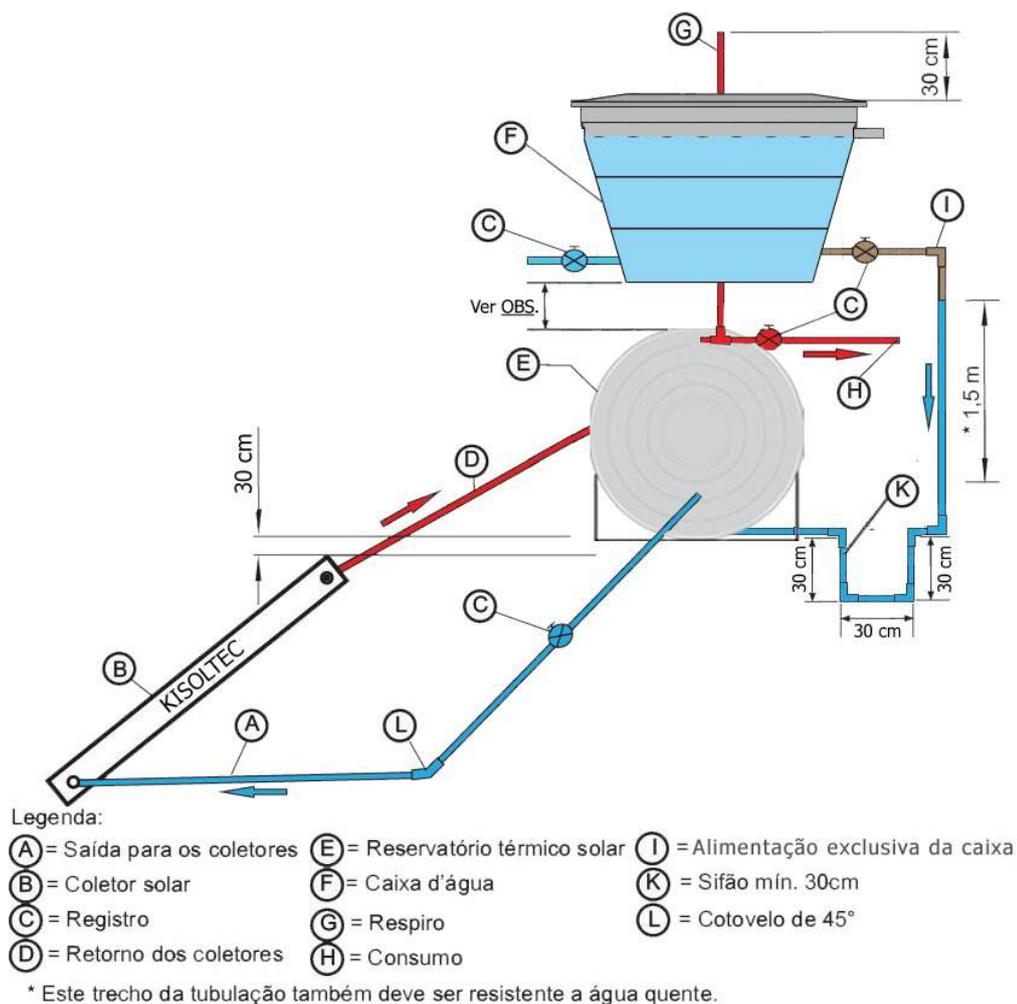


Figura 18 - Sistema de circulação natural
Fonte: Kisoltec (2017)

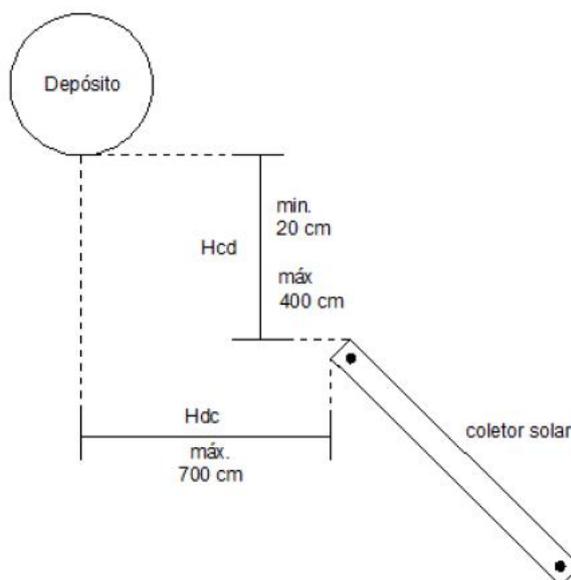


Figura 19 - Medidas de referência para a instalação de termosifões
Fonte: Komeco (2008)

A Tabela 6 mostra os prós e contras deste sistema.

Tabela 6 - Sistema de Termossifão

Sistema de Termossifão	
Prós	Contras
Menor preço	Inestético
Facilidade de instalação	Baixo volume de AQS
Fácil controle	Menor rendimento

Fonte: Fernandes (2014)

2.3.5 Dimensionamento do Sistema

O dimensionamento do sistema de aquecimento solar foi fundamentado no método *F-chart*, dado pela NBR 15569 (ABNT, 2008) que trabalha com sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) a metodologia *F-chart* possibilita calcular a cobertura de um sistema solar, isto é, a contribuição necessária de calor total para cobrir as cargas térmicas e o desempenho térmico por um período extenso.

2.3.5.1 Classificação dos sistemas de aquecimento solar (SAS)

A Tabela 7 apresenta a classificação do SAS, de acordo com a presente norma.

Tabela 7 - Classificação dos Sistemas de Aquecimento Solar.

Atributo	Categorias		
	I	II	III
Arranjo	Solar mais auxiliar	Somente solar	Preaquecimento solar
Circulação	Natural ou termossifão	Forçada	-
Regime	Acumulação	Passagem	-
Armazenamento	Convencional	Acoplado	Integrado
Alimentação	Exclusiva	Não exclusiva	-
Alívio pressão	Respiro	Conjunto de válvulas	-

Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2008, p.9).

2.3.5.2 Cálculo do consumo médio de água

Para dimensionar painéis solares deve-se primeiramente determinar a quantidade de água quente que se deseja armazenar no reservatório térmico.

Para o dimensionamento do projeto, foi utilizado o método 2 de cálculo presente na NBR 15569 (ABNT, 2008). Esta metodologia considera uma fração solar de 70% e que não exista sombreamento sobre os coletores.

A Equação 15, mostra como o cálculo do volume de consumo, $V_{consumo}$, pode ser realizado:

$$V_{consumo} = \sum (Q_{pu} \times T_u \times \text{frequência de uso}) \quad (15)$$

A norma apresenta (Tabela 8) também os valores que são referências de consumo considerados pelo uso racional de água.

Tabela 8 - Consumos, ciclo diário e temperatura de consumo das peças de utilização

Peças	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minuto/pessoa)	Temperatura de consumo °C
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39 – 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Banheira	80 L	440 L	banho	39 – 40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39 – 40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	ciclo de lavagem	39 – 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	ciclo de lavagem	39 – 40

Fonte: NBR 15569 (ABNT, 2008, p. 33)

2.3.5.3 Cálculo do reservatório térmico

O cálculo do volume do sistema de armazenamento é feito seguindo também a metodologia *F-chart* da NBR 15569 (ABNT, 2008) e é dado pela seguinte equação:

$$V_{armaz} = \frac{V_{volume} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{(T_{armaz} - T_{ambiente})} \quad (16)$$

- V_{armaz} : volume de armazenamento em m^3 ;
- V_{volume} : volume de consumo de água quente (m^3);
- $T_{consumo}$: temperatura de consumo de utilização (°C). De acordo com a NBR 7198 (ABNT, 1993) a água fornecida ao ponto de utilização para humano não deve passar de 40°C;
- T_{armaz} : temperatura de armazenamento da água, que segundo a NBR 15569 (ABNT, 2008) é sugerido para melhor eficiência do coletor, armazenar a água acima de 60 °C;
- $T_{ambiente}$: temperatura média anual do local da instalação (°C).

2.3.5.4 Cálculo da demanda energética e irradiação mensal máxima no SAS

Diferentemente dos tradicionais dimensionamentos de equipamentos, os sistemas de aquecimento solar não são calculados para condições extremas, como pouca radiação solar ou

inverno, mas sim para as necessidades energéticas médias anuais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO, 2010).

O cálculo da energia útil para o aquecimento da quantidade de água quente consumida é dado pela equação 17:

$$D_{mês} = Q_{dia} \times N \times (T_{acs} - T_{af}) \times 1,16 \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

- $D_{mês}$: demanda energética ($kWh/mês$);
- Q_{dia} : consumo diário de água quente ($litros/dia$);
- N : número de dias do mês considerado;
- T_{acs} : temperatura utilizada para a quantificação do consumo de água quente ($^{\circ}C$);
- T_{af} : temperatura de água fria da rede ($^{\circ}C$).

Após calculada a demanda energética, o próximo passo é calcular a irradiação mensal que o SAS receberá, para isto é necessário verificar a tabela do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2018), onde estão disponibilizados todos os fabricantes de sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água credenciados no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), incluindo a produção média mensal de energia dos painéis de coletores por metro quadrado e sua eficiência energética.

Para selecionar o coletor solar deve-se optar para o que tenha a melhor eficiência energética média e que cumpra com a demanda de produção média mensal de energia.

Assim que selecionado o melhor coletor, pode-se consultar o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (2018) para descobrir a melhor orientação para os painéis solares e a irradiação solar diária média mensal da localização do sistema.

Em seguida, fornece-se a equação para o cálculo da irradiação mensal:

$$Q_{mês} = Q_{dia} \times N \times \text{eficiência do coletor selecionado} \quad (18)$$

- $Q_{mês}$: irradiação solar média mensal ($kWh/m^2 \cdot mês$);
- Q_{dia} : irradiação solar diária média mensal ($kWh/m^2 \cdot dia$);
- N : número de dias do mês considerado

2.3.5.5 Cálculo da área dos painéis

Para o dimensionamento da área coletora é necessário que se calcule primeiramente a demanda energética do sistema e quanto de radiação o sistema irá absorver. Assim, tem-se a equação para o cálculo da área mínima do painel de instalação, dada por:

$$A = \frac{D_{mês}}{Q_{mês}} \quad (19)$$

- A : área mínima do painel (m^2);
- $D_{mês}$: demanda energética ($kWh/mês$);
- $Q_{mês}$: irradiação solar média mensal ($kWh/m^2 \cdot mês$).

2.4 Análise de viabilidade econômica

Uma forma de mensurar a viabilidade econômica de projetos, é a partir da análise de investimentos de capital, que é uma técnica econômico-financeira que serve para se ter subsídios para tomar decisões (PEDRAZZI; VIEIRA, 2009; ZANATA, 2012).

Os indicadores mais utilizados para este tipo de avaliação são: método do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Período de *Payback*, Índice Benefício/Custo (IBC), Retorno Adicional Sobre o Investimento (ROIA). Dentre esses, o VPL é apontado como mais refinado, pois considera o valor do dinheiro no tempo (PEDRAZZI; VIEIRA, 2009; ZANATA, 2012).

2.4.1 Taxa mínima de atratividade (TMA)

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA), de acordo com Galesne (1999), é uma escolha política feita pelos dirigentes da empresa ou por uma pessoa, para representar o mínimo de retorno aceito para a alocação de capital em um empreendimento, aceitando assim o risco empregado.

2.4.2 Valor presente líquido (VPL)

Segundo Souza e Clemente (2004), o VPL é a metodologia de análise mais completa e mais conhecida. Este método é a concentração de todos os fluxos de caixa esperados na data zero. Para os juros, é mais comum se utilizar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

O VPL é encontrado ao se subtrair o investimento inicial de um projeto de valor presente dos seus fluxos de entrada de caixa, sendo um projeto aceito quando esse valor for maior do que zero e rejeitado quando for menor do que zero (PEDRAZZI; VIEIRA, 2009; ZANATA, 2012).

O cálculo do VPL é dado por:

$$VPL = \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} - |FC_0| \quad (20)$$

- TMA : é a Taxa mínima de Atratividade;
- FC_0 : é o investimento inicial;
- FC_j : representa o fluxo de caixa no tempo j .

2.4.3 Taxa interna de retorno (TIR)

A Taxa interna de retorno, segundo a Suno Research (2018), “é um indicador que quando aplicado ao fluxo de caixa, torna os valores de retorno iguais às despesas trazidas ao valor presente”. Com este indicador pode-se demonstrar o tempo, em anos, que o investimento do sistema de aquecimento solar precisa para se pagar. Assim, é dada a equação:

$$VPL = 0 = Investimento + \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} \quad (21)$$

Onde:

- VPL : é o valor presente líquido;
- FC_j : representa o fluxo de caixa no tempo j ;
- TIR : é a taxa interna de retorno.

2.4.4 Período de recuperação do Investimento (*Payback*)

Segundo Souza e Clemente (2008), o *Payback* representa o tempo necessário para que os benefícios do projeto recuperem o valor investido. Também é interpretado como uma forma de medir o risco do projeto. Projetos onde o *Payback* se aproxime do final de sua vida econômica, apresentam alto grau de risco.

O *payback* é representado pela Equação 22:

$$Payback = \min\{j\} \text{ tal que } \left\{ \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1+TMA)^j} \geq |FC_0| \text{ e } FC_k > 0, \text{ para } j+1 \leq k \leq N \right\} \quad (22)$$

- FC_0 : é o investimento inicial;
- FC_j : representa o fluxo de caixa no tempo j ;
- FC_k : é o fluxo de caixa descapitalizado no período k ;
- TMA : é a Taxa Mínima de Retorno.

2.4.5 Índice Benefício/Custo (IBC)

O Índice Benefício/Custo reproduz, para todo o planejamento, as expectativas de ganho por unidade de capital investido no projeto, além do ganho se essa unidade tivesse sido aplicada à TMA. O IBC é comumente utilizado e possui uma fácil interpretação (LIMA e SOUTHER, 2016).

De acordo com Souza e Clemente (2008), “Genericamente, o IBC é uma razão entre o Fluxo Esperado de Benefícios de um projeto e o Fluxo Esperado de Investimentos necessários para realizá-lo”.

Assim, o IBC pode ser dado pela Equação 23:

$$IBC = \frac{\text{Valor presente do fluxo de benefícios}}{\text{Valor presente do fluxo de investimentos}} \quad (23)$$

2.4.6 Retorno sobre investimento adicional (ROIA)

O Retorno sobre investimento adicional (ROIA) é o melhor indicador de rentabilidade, pois representa o ganho extra resultante do investimento feito. Este indicador é similar ao conceito do EVA (*Economic Value Added*) medido na forma percentual (SOUZA e CLEMENTE, 2008). Assim, o retorno resultante além da TMA é mensurado pela ROIA, e é calculado pela Equação 24:

$$ROIA = \sqrt[N]{IBC} - 1 \quad (24)$$

- N_r : é o horizonte de planejamento;
- IBC : é o Índice Benefício/Custo.

3 METODOLOGIA

No capítulo 3 é definido o tipo de pesquisa, assim como os materiais e métodos utilizados no trabalho. A partir dos materiais e métodos utilizados foi traçado um fluxograma com as etapas do trabalho e em seguida definem-se as variáveis e indicadores. Por fim, os instrumentos de coleta e tabulação de dados do trabalho.

3.1 Tipos de pesquisa

A pesquisa pode ser classificada de acordo com os seus objetivos, a sua forma de abordagem, e quanto aos procedimentos técnicos utilizados.

Segundo Denzin & Lincoln (2006), a pesquisa qualitativa envolve o estudo do uso e a coleta de uma variedade de materiais empíricos – estudo de casos; experiência pessoal, introspecção, entre outros. Pesquisadores nessa área utilizam uma ampla variedade de práticas interpretativas interligadas na esperança de sempre conseguirem compreender melhor o assunto que está ao seu alcance.

Para Fonseca (2002), a pesquisa quantitativa é centrada na objetividade. Ela busca traduzir toda informação em números, utilizando a linguagem matemática. O melhor seria utilizar a pesquisa quantitativa e qualitativa de forma conjunta, pois apresenta melhores resultados e maiores informações.

Segundo Silva e Menezes (2001), o estudo de caso trata do detalhamento para avaliação dos objetivos, enquanto Gil (2002), aborda que o estudo de caso é caracterizado quando a pesquisa envolve o estudo aprofundado e exaustivo de alguns poucos objetivos de forma que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.

Compreendido a proposição do problema e objetivos específicos, cabe definir a natureza dessa pesquisa como qualitativa, quantitativa e estudo de caso. Esse trabalho tem o objetivo classificado como exploratório, em que será analisada a viabilidade de instalação de um aquecedor solar à vácuo em uma residência de quinze pessoas.

3.2 Materiais e métodos

De acordo com a figura 20, a partir da revisão bibliográfica, os dados e as equações serão implementados no *Software Excel* para o dimensionamento de cada etapa do sistema de aquecimento solar.

Os cálculos serão realizados em uma localização específica na cidade de Ouro Preto e a partir de dados locais da necessidade do estudo de caso.

Após a realização de todas as etapas espera-se ser possível averiguar a viabilidade econômica e em quanto tempo o investimento do aquecedor solar a vácuo trará o retorno esperado.

Na figura 20, o fluxograma descreve a metodologia a ser utilizada.

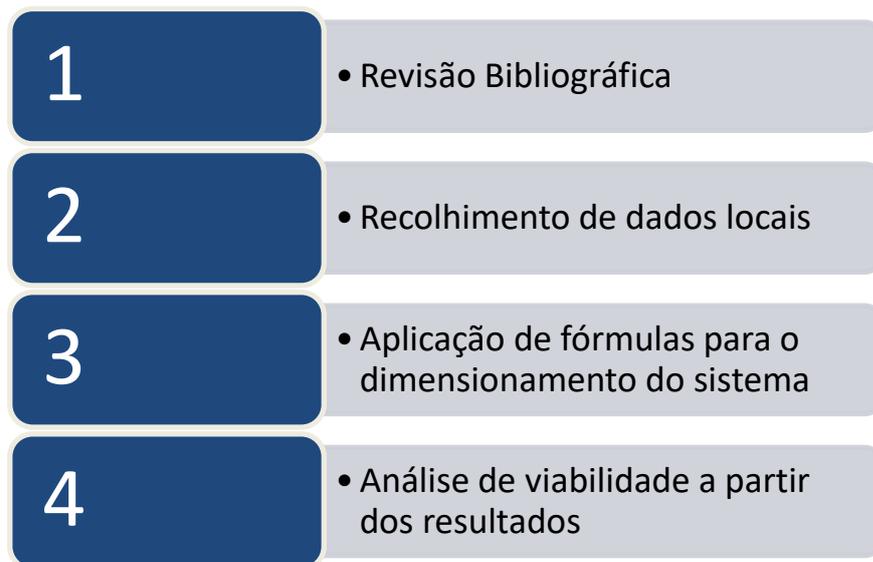


Figura 20 - Fluxograma da metodologia do trabalho
Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Lakatos & Marconi (2004), “Uma variável pode ser considerada como uma classificação ou medida; uma quantidade que varia; um processo operacional, que contém ou apresenta valores; aspecto, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração”.

A Tabela 9 ilustra as variáveis com seus respectivos indicadores, que serão utilizados nesse trabalho:

Tabela 9 - Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Coletor solar	Radiação solar incidente
	Demanda de água quente
	Eficiência do coletor solar
	Área do coletor solar
Engenharia econômica	Valor presente líquido
	Taxa interna de retorno
	<i>Payback</i>
	Índice Benefício/Custo
	Retorno sobre investimento adicional

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Este momento consiste em selecionar as ferramentas utilizadas para a coleta de dados em cima do assunto proposto para a pesquisa.

Como dito no início deste capítulo, o trabalho terá natureza bibliográfica, quantitativa, descritiva e estudo de caso. Logo, os principais dados serão retirados de livros, obras acadêmicas, dissertações catálogos, entre outros. É considerada uma técnica de custo baixo e com baixo tempo de captação.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados obtidos serão tabulados no Software Microsoft Excel, onde será utilizado para os cálculos e a construção de gráficos e tabelas. O Software Microsoft Word será utilizado para processar os resultados obtidos através de textos.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo teve o objetivo de apresentar a metodologia que será utilizada, descrevendo o tipo de pesquisa, os materiais e métodos empregados, as variáveis e seus respectivos indicadores, as formas de coleta de dados e como estes são registrados e analisados.

A metodologia apresentada terá o objetivo de nortear a busca da solução do problema proposto.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os dados obtidos a partir da coleta de informações locais da cidade de Ouro Preto e de uma residência de 15 pessoas, e também os resultados alcançados do cálculo do equacionamento matemático do coletor solar, com objetivo de analisar sua viabilidade econômica.

4.1 Descrição da aplicação

Para a implantação de um sistema solar de aquecimento residencial exige-se o estudo de alguns fatores que identificam tanto a construção quanto os moradores, sendo elas: condições geográficas, como a latitude, construtivas, como a inclinação do telhado, e do cotidiano dos residentes, como o consumo diário de água. Esses são elementos determinantes para a escolha da metodologia ideal para a instalação do aquecedor.

O funcionamento do sistema de aquecimento solar de água se dará com circulação termossifão, em regime de acumulação, no qual se tem uma alimentação exclusiva, utiliza o respiro para alívio de pressão e a residência já possui a instalação de tubulação quente.

A república está localizada no ponto de latitude 20°24'13.7" sul e de longitude 43°30'50.4" oeste, 1169m acima do nível do mar, em Ouro Preto, Minas Gerais. E a cidade possui uma temperatura média anual de 18,3°C (CLIMATE-DATA, 2015).

4.2 Dimensionamento dos Painéis Solares

4.2.1 Cálculo do consumo médio de água

Seguindo a Equação 15 e os dados da Tabela 8 calcula-se o consumo do sistema, para uma vazão do chuveiro de 5 litros por minuto, e o ciclo diário de 10 minutos por pessoa, com frequência de 1 banho diário por pessoa, à uma temperatura de 40 graus Celsius. Sendo que são 15 moradores na casa, tem-se:

$$V_{consumo} = 5 \times 10 \times 15 = 750 \text{ litros/dia}$$

4.2.2 Cálculo do reservatório térmico

Considerando a recomendação da NBR 7198 (ABNT, 1993) de utilizar uma temperatura máxima de 40°C, temos a temperatura média anual de Ouro Preto de 18,3°C, volume de consumo de 750 litros diários e uma temperatura de armazenamento de 60 °C podemos calcular o volume de armazenamento do Boiler de acordo com a equação 16:

$$V_{armaz} = \frac{750 \times (40 - 18,3)}{(60 - 18,3)} = 390,3 \text{ litros}$$

4.2.3 Cálculo da demanda energética e irradiação mensal máxima no SAS

Para o cálculo da demanda energética mensal para o aquecimento do total de água quente, adotou-se a necessidade diária de 750 litros, mês equivalente a 30 dias, a temperatura máxima de aquecimento de 40°C, e a temperatura média da cidade de Ouro Preto de 18,3 °C. Assim temos a equação 17:

$$D_{mês} = 750 \times 30 \times (40 - 18,3) \times 1,16 \cdot 10^{-3}$$

$$D_{mês} = 781,2 \text{ kWh/mês}$$

Com base no Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (2018), a melhor orientação dos painéis solares para alcançar a maior média anual de incidência solar é 20° Norte, como mostrado na tabela 10.

Tabela 10 - Irradiação solar diária média de Ouro Preto

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	5,59	5,83	4,91	4,43	3,94	3,83	4,02	4,95	5,11	5,16	4,79	5,35	4,82
Ângulo igual a latitude	20° N	5,11	5,57	5,01	4,90	4,71	4,80	4,95	5,74	5,39	5,04	4,45	4,84	5,04
Maior média anual	20° N	5,11	5,57	5,01	4,90	4,71	4,80	4,95	5,74	5,39	5,04	4,45	4,84	5,04
Maior mínimo mensal	15° N	5,27	5,68	5,02	4,82	4,55	4,60	4,76	5,59	5,37	5,11	4,57	5,00	5,03

Fonte: Centro de referência para as energias solar e eólica (2018)

A Figura 21, mostra um comparativo de incidência solar entre uma inclinação de 0° e 20°:

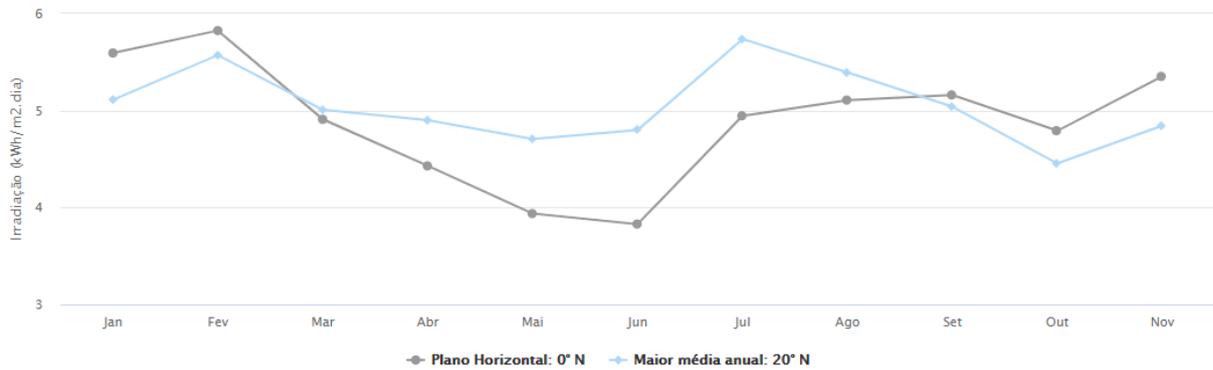


Figura 21 - Fluxograma da metodologia do trabalho
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A irradiação diária média mensal dada pela tabela 10 é de $5,04 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$.

Para o cálculo da irradiação real absorvida é necessário selecionar algum coletor para utilizar sua eficiência, então foi consultado a tabela PBE – Coletor Solar aplicação Banho e Piscina do INMETRO (2016), e selecionado o coletor à vácuo da empresa *Sultherm* modelo *BP-30*, devido a sua maior eficiência e produção média mensal de energia em relação aos concorrentes do mercado.

Tabela 11 - Tabela de Consumo / Eficiência Energética

Empresa	Marca	Modelo	Aplicação	Pressão de Funcionamento		Área Externa do Coletor m ²	Produção Média mensal de Energia		Eficiência Energética Média(%)	Classificação
				(kPa)	(mca)		Por Coletor (kWh/mês)	Por m2 (Específica kWh/mês.m2)		
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	KOCS TV 20BP G2	Banho	50	5,00	2,99	227,7	76,15	70,1	B
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	KOCS TV 15BP G2	Banho	50	5,00	2,27	172,9	76,15	70,1	B
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	10 TUBOS AP	Banho	600	61,00	1,57	119,7	76,26	68,6	B
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	15 TUBOS AP	Banho	600	61,00	2,30	175,4	76,26	68,6	B
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	20 TUBOS AP	Banho	600	61,00	3,04	231,8	76,26	68,9	B
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	30 TUBOS EP	Banho	50	5,00	4,45	296,9	66,73	74	C
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	40 TUBOS EP	Banho	50	5,00	5,83	389,0	66,73	74	C
STANGE & CIA LTDA	SolarVac	50 TUBOS EP	Banho	50	5,00	7,22	481,8	66,73	74	C
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-10	Banho	50	5,10	1,56	118,9	76,07	69,8	B
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-15	Banho	50	5,10	2,27	172,8	76,07	69,8	B
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-20	Banho	50	5,10	2,99	227,5	76,07	69,8	B
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-30	Banho	50	5,10	4,45	360,9	81,16	68,3	A
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-20	Banho	50	5,00	2,99	227,7	76,15	70,1	B
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-10	Banho	50	5,00	1,57	119,6	76,15	70,1	B
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-15	Banho	50	5,00	2,27	172,9	76,15	70,1	B
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-30	Banho	50	5,00	4,65	390,4	83,96	72,7	A
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-25	Banho	50	5,00	3,69	309,6	83,90	72,7	A
SULTHERM SOLUCOES EM ENERGIAS RENOVAVEIS LTDA	SULTHERM	BP-30	Banho	50	5,00	4,65	390,1	83,90	72,7	A
SUNSHORE SOLAR ENERGY Co., Ltd.	SUNSHORE	Q-B-J-1-30/1.30/0-WGS-BxPr-10	Banho	50	5,00	1,85	119,9	64,80	71,4	D
SUNSHORE SOLAR ENERGY Co., Ltd.	SUNSHORE	Q-B-J-1-60/2.60/0-WGS-BxPr-20	Banho	50	5,00	3,41	221,0	64,80	71,4	D
SUNSHORE SOLAR ENERGY Co., Ltd.	SUNSHORE	Q-B-J-1-45/6.48/0-WGS-BxPr-H-50	Banho	50	5,00	4,92	356,2	72,40	71,5	C
SUNSHORE SOLAR ENERGY Co., Ltd.	SUNSHORE	Q-B-J-1-90/3.90/0-WGS-BxPr-30	Banho	50	5,00	8,07	584,3	72,40	71,5	C
TEMPERSOL INDUSTRIA E COMÉRCIO DE AQUECEDORES LTDA EPP	Tempersol	1,50x1,00	Banho	392	40,00	1,50	140,3	93,50	67,5	A
TEMPERSOL INDUSTRIA E COMÉRCIO DE AQUECEDORES LTDA EPP	Tempersol	1,70x1,00	Banho	392	40,00	1,70	159,0	93,50	67,5	A

Fonte: INMETRO (2018)

Logo, para calcular a irradiação mensal que incide no SAS adotou-se a irradiação diária média mensal de $5,04 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$, a eficiência de 72,7% dada pelo coletor selecionado da Sultherm e um mês com 30 dias, assim temos:

$$Q_{\text{mês}} = 5,04 \times 0,727 \times 30 = 109,92 \text{ kWh/mês} \cdot \text{m}^2$$

4.2.4 Cálculo da área dos painéis

Com base nos resultados da demanda energética e irradiação solar média mensal, a área necessária do sistema será:

$$A = \frac{781,2}{109,92} = 7,11 \text{ m}^2$$

4.3 Seleção do sistema de aquecimento solar

Após todos os dimensionamentos necessários, a próxima etapa é verificar a tabela do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2018), no qual disponibiliza todos os fabricantes de sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água credenciados no Programa Brasileiro de Etiquetagem.

Para o cálculo da área coletora, foi utilizado, no estudo de caso, os coletores da empresa Sultherm, modelo BP-30 de $4,65 \text{ m}^2$, com a pressão de funcionamento 50 kPa , e produção média mensal de energia por coletor é de $390,4 \text{ kWh/mês}$, e por metro quadrado de $83,96 \text{ kWh/mês.m}^2$. Posto isto, para a necessidade energética de $781,2 \text{ kWh/mês}$ do estudo de caso, será necessária uma área de $7,11 \text{ m}^2$ de painéis, que é atendida por 2 placas de coletores de 30 tubos cada.

Quanto ao tanque de reservatório de água quente, pela necessidade do sistema, tem-se a necessidade de 390,29 litros. Porém o recomendado pela norma ABNT (2008), é que se utilize um reservatório com um valor maior ou igual a 75% do volume do total gasto de água, que é de 750 litros. Sendo assim, o Boiler terá no mínimo 562,5 litros. Selecionou-se então o Reservatório Térmico *Hydroluxe* da *Sultherm*, com volume comercial de 600 litros.

4.4 Custo estimado para implantação do sistema de aquecimento solar

De acordo com os resultados obtidos, determinou-se o modelo disponível no mercado que atende aos requisitos do estudo de caso.

A Tabela 12, demonstra valores estimados para implantação do sistema de aquecimento solar de água na residência. Todos os orçamentos foram realizados com base que a residência já possui instalação pronta de água quente. Os valores utilizados para cálculo estimado de implantação, será um valor médio dos equipamentos pesquisados.

Para fins comparativos, vale ressaltar que os orçamentos foram feitos em novembro de 2020 com o valor do real em relação ao dólar de R\$ 5,40.

Tabela 12 - Estimativa de valores para implementação do sistema de aquecimento solar

CUSTO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR				
Descrição	Dimensão	Quantidade	Preço médio	
			Unitário	Parcial
Reservatório Térmico	600 litros	1	R\$ 2.137,00	R\$ 2.137,00
Coletor Solar à vácuo de 30 tubos	4,65 m ²	2	R\$ 2.658,67	R\$ 5.317,33
Mão de Obra			R\$ 400,00	R\$ 400,00
Total				R\$ 7.854,33

Fonte: Elaborado pelo autor 2020

4.5 Consumo de energia da residência de 15 pessoas

O watt-hora é comumente conhecido com unidade de energia. A hora do watt é uma unidade prática de energia equivalente à energia produzida por uma potência de um watt por uma hora.

Para analisar o consumo mensal da residência em aquecimento de água, calculou-se primeiramente a potência elétrica necessária para elevar a temperatura de 20 °C ($h_1 = 83,96 \text{ kJ/kg}$) para 40 °C ($h_2 = 167,56 \text{ kJ/kg}$), sendo esses os valores da variação média de temperatura para o aquecimento da água durante o ano.

Para uma vazão média de 5 litros por minuto do chuveiro elétrico, tem-se:

$$Q = 5 \frac{l}{min} \times \frac{10^{-3}}{60} = 8,33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{8,33 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{0,001005 \frac{m^3}{kg}} = 0,0829 \frac{kg}{s}$$

Substituindo na equação 13:

$$\dot{W}_{\text{elétrica}} = 0,0829 (167,56 - 83,96) = 6,93 \text{ kW} = 6930 \text{ W}$$

Assim, pode-se calcular o consumo de energia elétrica utilizando como parâmetros, banho de 10 minutos, 15 banhos por dia, mês com 30 dias e uma vazão de 5 l/min. Adotou-se também para o cálculo a eficiência do chuveiro dada pelo fabricante de 95%, como ilustrado na figura 22.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Marca	Hydra
Modelo	Ducha Eletrônica Star Turbo
Tensão Nominal	220 V~
Potência	7700 W
Fiação Mínima*	6 mm ²
Disjuntor	40 A
Pressão de	min. 10 kPa (1 m.c.a.)
Funcionamento	máx. 400 kPa (40 m.c.a.)
Nº. IP (Grau de Proteção)	IP 24
Distância Máxima do Disjuntor ao Aparelho	30 m
Importante para sua segurança:	
Para evitar riscos de choques elétricos o fio terra deste produto deve ser conectado a um sistema de aterramento conforme norma NBR 5410. A instalação elétrica e o sistema de aterramento para este produto deve ser executado por pessoa qualificada. A resistividade da água a 22°C não deve ser inferior a 1300Ωcm.	
O fabricante se reserva o direito de modificar o produto sem aviso prévio.	
* Fiação mínima recomendada até 30metros do disjuntor, para valor acima do mencionado verificar fiação.	

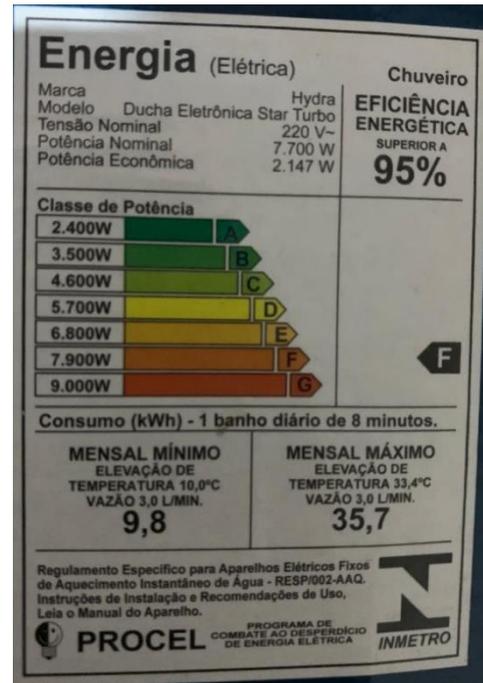


Figura 22 - Em (a), características técnicas do chuveiro. Em (b), energia consumida média.
Fonte: Pesquisa direta (2019)

Logo temos:

$$Q = \frac{6,93 \text{ kW} \times 2,5 \text{ h} \times 30 \text{ dias}}{0,95} = 547,1 \text{ kWh}$$

Para o cálculo do gasto em reais de energia, foi utilizada a tabela de tarifas cobradas a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Tabela 13 - Tarifas cobradas pela CEMIG em 2020

TARIFAS CEMIG (2020) - Bandeira Tarifária VERDE	
Grupo B - Baixa Tensão	
Tarifa Convencional	
Subgrupo Tarifário	Preço (R\$/kWh)
B1 - Residencial	0,62833
B2 - Rural	0,47753
B3 - Demais classes	0,62833
B4 - Iluminação pública	0,34559

Fonte: CEMIG (2020)

Logo, o montante total gasto sem impostos por mês e por ano será:

$$M = 547,1 \times 0,62833 = R\$ 343,76/\text{mês}$$

$$M = 343,76 \times 12 = R\$ 4125,15/\text{ano}$$

4.6 Análise de viabilidade econômica

Para a análise de viabilidade econômica deste projeto, foi utilizado o software Excel® e adotou-se como melhor taxa de rentabilidade e com pequeno grau de risco para a aplicação de capital, o valor da taxa de juros Selic no 3º trimestre de 2020, de 2% a.a. (Copom, 2020).

De acordo com informações dadas pelo fabricante de sistemas de aquecimento solar de água, a vida útil do equipamento varia entre 15 e 20 anos. Logo, considerou-se um prazo de 15 anos para o planejamento da análise financeira deste projeto.

4.6.1 VPL, TIR, Payback, IBC e ROIA

O valor presente líquido (VPL) é derivado dos gastos e receitas no ciclo de vida do projeto, sempre levando em consideração uma determinada taxa de juros. A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de juros com que o investimento foi pago ao longo do projeto. O período de retorno (Payback) significa o tempo para recuperar o investimento e não considera os juros (Oliveira, 2011).

Após a aplicação dos dados nas fórmulas no *software* Excel®, temos a Tabela 14:

Tabela 14 - Resultados dos indicadores

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado
0	-R\$ 7.854,33	-R\$ 7.854,33	-R\$ 7.854,33
1	R\$ 4.125,15	R\$ 4.044,26	-R\$ 3.810,07
2	R\$ 4.125,15	R\$ 3.964,97	R\$ 154,90
3	R\$ 4.125,15	R\$ 3.887,22	R\$ 4.042,12
4	R\$ 4.125,15	R\$ 3.811,00	R\$ 7.853,12
5	R\$ 4.125,15	R\$ 3.736,28	R\$ 11.589,40
6	R\$ 4.125,15	R\$ 3.663,02	R\$ 15.252,41
7	R\$ 4.125,15	R\$ 3.591,19	R\$ 18.843,60
8	R\$ 4.125,15	R\$ 3.520,78	R\$ 22.364,38
9	R\$ 4.125,15	R\$ 3.451,74	R\$ 25.816,12
10	R\$ 4.125,15	R\$ 3.384,06	R\$ 29.200,18
11	R\$ 4.125,15	R\$ 3.317,71	R\$ 32.517,89
12	R\$ 4.125,15	R\$ 3.252,65	R\$ 35.770,54
13	R\$ 4.125,15	R\$ 3.188,88	R\$ 38.959,41
14	R\$ 4.125,15	R\$ 3.126,35	R\$ 42.085,76
15	R\$ 4.125,15	R\$ 3.065,05	R\$ 45.150,81
VPL			R\$ 45.150,81
TIR			52%
Índice Benefício/Custo			6,75
Tempo de Payback			2 anos
ROIA			14%

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados obtidos pela aplicação dos cálculos de engenharia econômica, é possível analisá-los relacionando-os com as condições sugeridas.

De acordo com Knuth (2010), o critério do método do VPL para o projeto ser viável é o valor presente ($T=0$) das entradas do fluxo de caixa previsto ser maior que o valor presente das saídas (investimento inicial) calculado com a taxa de juros utilizada em questão.

Para a Suno Research (2018), ao analisar a TIR para uma pessoa física, o investimento se torna atrativo apenas se esta for maior que a TMA adotada no projeto.

O cálculo do IBC deve ter como resultado um índice maior que 1, isso indica que o investimento é bom e está gerando retorno. Quanto maior o valor, mais rentável a aplicação (SYNERHGON, 2019).

O tempo de *Payback* quanto maior, maior o risco do investimento e quanto menor o valor, menor o risco. E quanto a liquidez, quanto menor o prazo de recuperação, maior a liquidez, sendo assim, o ideal é se pagar o mais rápido possível (KNUTH, 2010).

O ROIA mede a performance operacional do empreendimento, quer dizer, qual será o ganho adicional que o investimento em questão vai gerar (SILVA, 2011). Sendo assim, o projeto se torna viável se o ROIA for maior que 0.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

Este estudo de caso teve como objetivo analisar a viabilidade econômica de implantação de um sistema de aquecimentos solar. Para isto, considerou-se o foco no sistema baseado em coletores solares à vácuo, devido sua grande eficiência em comparação aos outros tipos de coletores. Partindo de um estudo teórico de mecanismos de calor, dimensionamento de sistemas de aquecimento (SAS) e taxas de retorno, utilizou-se uma residência de 15 pessoas em Ouro Preto, Minas Gerais, como base para realizar os cálculos necessários.

Foi necessária uma coleta de dados, tanto internamente na residência quanto externamente pela internet e ligações para que, em seguida, fosse feito o dimensionamento propriamente dito do reservatório e dos coletores que compõem o sistema de aquecimento solar. Todos os cálculos foram embasados nas normas brasileiras, afim de trazer ao projeto valores reais de implementação.

Após todas as etapas de dimensionamento, chegou-se nos valores necessários para selecionar o sistema de aquecimento que melhor se adaptava ao projeto. Sendo eles, um reservatório térmico de 600 litros, modelo *Hydroluxe*, e 2 painéis de coletores solares à vácuo, modelo *BP-30*, ambos sendo da fabricante *Sultherm*.

Com todas essas informações foi possível realizar orçamentos para chegar em um preço médio de custo de implantação do SAS e calcular sua viabilidade econômica. Este apresentou um Valor Presente Líquido positivo (VPL) de R\$ 45.150,81, com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 52%, um Índice de Benefício/Custo de 6,75, Tempo de *Payback* de 2 anos e o último indicador de Retorno Sobre Investimento Adicional (ROIA) de 14%.

Analisando esses resultados pode-se verificar que o projeto é viável economicamente, pois todos os critérios econômicos com relação aos indicadores financeiros foram congruentes. Tais como, o VPL positivo dentro do planejamento estudado. A TIR sendo superior à TMA, indicando que o projeto proposto geraria lucro ao investidor. Um *Payback* de curto prazo. O IBC tem seu valor maior que 1 e o ROIA também positivo.

Tendo em vista que este investimento leva benefícios para a natureza, para a economia financeira do investidor e para o imóvel quanto a sua valorização imediata no mercado, é possível considerar que a viabilidade econômica de implantação do sistema, apresenta muito mais pontos positivos que negativos.

Os objetivos apontados foram alcançados, pois foi possível analisar a tecnologia de coletores solares que o mercado oferece, comparando sua economia em relação a energia elétrica.

5.2 Recomendações

Para trabalhos futuros, seguem algumas sugestões:

- Estudar a influência da inclinação do coletor solar levando em consideração a variação da incidência solar e da área necessária para os meses e estações do ano, no lugar dos valores médios anuais;
- Efetuar um equacionamento matemático com um modelo transiente e analisá-lo.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – projeto e instalação**. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15747-1: Sistemas solares térmicos e seus componentes – coletores solares - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7198: Projeto e execução de instalações de água quente**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO AR CONDICINADO VENTILAÇÃO E AQUECEDOR. **Apresentação: O Sistema de Aquecimento Solar e a Realidade Energética (Fatos e Oportunidade)**. Marcelo Mesquita, 2010.

BOREAL SOLAR. "**Potencial de energia solar: Quais as melhores regiões brasileiras para captação da luz solar**". Disponível em: <<http://borealsolar.com.br/blog/2016/10/26/potencial-de-energia-solar-quais-as-melhores-regioes-brasileiras-para-captacao-da-luz-solar/>>. Acesso em 04 de setembro de 2019.

CAVALCANTE, Kleber G. "**Aquecimento da Água por Energia Solar**"; **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/aquecimento-agua-por-energia-solar.htm>>. Acesso em 04 de setembro de 2019.

CEMIG. **Tarifas CEMIG 2020 – Bandeira Tarifária VERDE**. Disponível em: <http://jrubens.eng.br/download/tarifas_cemig.pdf>. Acesso em 5 de setembro de 2020.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4.ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CLIMATE DATA. **Temperatura média de Ouro Preto - 2015**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/ouro-preto-765135/>>. Acesso em 1 de setembro de 2020.

COMPOM. **Copom reduz a taxa Selic para 2,00% a.a.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/detalhenoticia/17148/nota/>>. Acesso em 8 de setembro de 2020.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Radiação Solar.** Disponível em: <<http://cresesb.cepel.br/>>. Acesso em 28 de agosto de 2020.

DENZIN, N. K. e LINCOLN, Y. S. Introdução: a disciplina e a prática da pesquisa qualitativa. In: DENZIN, N. K. e LINCOLN, Y. S. (Orgs.). **O planejamento da pesquisa qualitativa: teorias e abordagens.** 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DOMUS SOLARIS. **Ligação de coletores em paralelo de canais.** Disponível em: <http://www.domus-solaris.com/imagens/ligacao_pararelo.png>. Acesso em 8 de setembro de 2020.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Energy Engineering Processes and Systems.** New York: John Wiley & Sons, 1991.

FERNANDES, Verónica Marisa Martins. **Avaliação de ciclo de vida de sistemas solares térmicos em edifícios.** 2014. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2014.

FONSECA, João José Saraiva da. **Curso de especialização em comunidades virtuais de aprendizagem – informática educativa.** Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2002.

FRANCA, Savio. **5 dicas de instalação de aquecedor solar com o abastecimento de água.** 2017. Disponível em: <https://blog.brassolar.com.br/5-dicas-de-instalacao-de-aquecedor-solar/>. Acesso em: 23 dez. 2019.

GALESNE, Alain; FENSTERSEIFER, Jaime E.; LAMB, Roberto **Decisões de investimentos da empresa.** São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 2002.

GRIMM, Alice Marlene. **Movimentos da Terra, Estações**. 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html>>. Acesso em: 20 dez. 2019.

HELERBROCK, Rafael. "**Calorimetria**"; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/calorimetria-i.htm>>. Acesso em 30 de agosto de 2020.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE; Adrienne S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Tabela de consumo e eficiência energética: Coletor solar aplicação banho e piscina**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>>. Acesso em 2 de setembro de 2020.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar thermal collectors and applications**. Elsevier: Progress in Energy and Combustion Science, Nicósia, 2004.

KISOLTEC. **Manual de instalação do aquecedor solar: Sistemas com circulação forçada**. Disponível em: <<https://kisoltec.com.br/instalacao-aquecedor-solar/5#>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

KNUTH, Valdecir. **Engenharia Econômica e Finanças**. Santa Catarina: Centro Universitário Leonardo da Vinci, 2010.

KOMECO (2008). **Coletor solar tubo a vácuo: alta eficiência para aquecimento de água**. Disponível em: <<https://www.komeco.com.br/coletor-solar-tubo-a-vacuio-alta-eficiencia-para-aquecimento-de-agua/>>. Acesso em 26 de novembro de 2020.

KOMECO (2008). **Komeco - Manual de Instalação**. Disponível em: <http://www.solarforte.com.br/manuais/manual_solar_komeco.pdf>. Acesso em 2 de setembro de 2020.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2004 – 4ª ed.

LIMA, J. B. A. **Otimização de Sistema de Aquecimento Solar de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares Utilizando o Programa Trnsys**. 142 f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LOURENÇO, Pedro Miguel da Silva. **Modelação de Coletores Solares Planos**. [s.l.]: Universidade de Lisboa, 2012.

MA, Liangdong *et al.* **Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube**. Building And Environment, Dalian, v. 1, n. 3, p. 1-9, jan. 2010.

KISOLTEC. **Manual de instalação do aquecedor solar: Sistemas com circulação forçada. Sistemas com circulação forçada**. 2017. Disponível em: <<https://kisoltec.com.br/instalacao-aquecedor-solar/5#>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

OLIVEIRA, Therence Ulisses Medeiros de. **Análise da viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar de água para uma empresa do setor hoteleiro**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2011.

PEDRAZZI, Diogo R.; VIEIRA, Saulo F. A. **O processo de tomada de decisão de investimentos de capital nas micro, pequenas e médias empresas: um estudo de caso do setor metalúrgico de Londrina-PR**. Revista Fasesi, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2009.

PEREIRA, Antônio Roberto Mendes. **O sol e as instalações rurais - A posição relativa na busca da eficiência e do conforto térmico**. 2011. Disponível em: <<http://permaculturapedagogica.blogspot.com/2011/12/o-sol-e-as-instalacoes-rurais-posicao.html>>. Acesso em: 22 dez. 2019.

RODRIGUES, D. **Introdução ao sistema de aquecimento solar**. São Paulo, 2010. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/60551/mod_resource/content/1/Apostila_Aquecimento_Solar.pdf> Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

Roriz, L., Rosendo, J., Lorenço, F., & Calhau, K. (2010). *Energia Solar em Edifícios*. Alfragide: Edições Orion, 2010.

ROSA, F. N. da. **Aplicabilidade dos Coletores Solares à Vácuo no Brasil**, 2012. 65 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2012.

SILVA, Emerson O. V. da. **Análise de investimento na indústria de instrumentos musicais de cordas: o caso do Luthier Elifas Santana**. 2011. Monografia (Graduação) – Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <<http://obscom.com.br/musica/wp-content/uploads/2013/07/ANALISE-DE-INVESTIMENTO-NA-INDUSTRIA-DE-INSTRUMENTOS-MUSICAIS-DE-CORDAS-O-CASO-DO-LUTHIER-ELIFAS-SANTANA1.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

SILVA, L. S.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Manual de orientação. Florianópolis, 2001. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/2367267/DA-SILVA-MENEZES-2001-Metodologia-da-pesquisa-e-elaboracao-de-dissertacao>> Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

SOUTHIER, L.F.P.; LIMA, J.D. de; BATISTUS; D.R.; OLIVEIRA, G.A.; TRENTIN, M.G. **Proposta de um sistema para auxiliar o processo de análise da viabilidade econômica de projetos de investimentos**. In: XXXVI ENEGEP, 2016, João Pessoa - PB. Contribuições da Engenharia de Produção para Melhores Práticas de Gestão e Modernização do Brasil. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2016. v. 1. Acesso em 9 de novembro de 2020.

SOUTO, Ana Lucia. **O papel da atmosfera no equilíbrio térmico do planeta**. 2019. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/6-ano/terra-e-universo-6-ano/a-atmosfera-terrestre/a/o-papel-da-atmosfera-no-equilibrio-termico-do-planeta>. Acesso em: 21 dez. 2019.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir; **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações** 5ª Ed. São Paulo: Atlas, 2004.

SULTHER ENERGIA SOLAR. **Coletores Solares Modelos BP**. Disponível em: <<https://dac8d3ad-4391-4dc4-8cf3->

6b44bfbe3516.filesusr.com/ugd/1304be_ad8b328415314d77bc8cf52d53cdef44.pdf>. Acesso em 3 de setembro de 2020.

SULTHER ENERGIA SOLAR. **Reservatórios Térmicos Hydroluxe**. Disponível em: <https://dac8d3ad-4391-4dc4-8cf3-6b44bfbe3516.filesusr.com/ugd/1304be_cf9a1d9751ad4d8e9e7ee69916ce2f0c.pdf>. Acesso em 3 de setembro de 2020.

SUNO RESEARCH. **TIR: aprenda a analisar investimentos utilizando a Taxa Interna de Retorno**. Disponível em: <<https://www.sunoresearch.com.br/artigos/taxa-interna-de-retorno/>>. Acesso em 04 de setembro de 2020.

SYNERHGON. "**Análise a rentabilidade do seu investimento usando o Índice Benefício/Custo**"; Synerhgon. Disponível em: <<http://synerhgon.com.br/analise-a-rentabilidade-do-seu-investimento-usando-o-indice-beneficio-custo/>>. Acesso em 30 de novembro de 2020.