

# Estudo comparativo de desempenho entre um sistema de aquecimento solar por circulação forçada e por termossifão

Gustavo Eraldo da Silva



CENTRO DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2022

Gustavo Eraldo da Silva



# Estudo comparativo de desempenho entre um sistema de aquecimento solar por circulação forçada e por termossifão

Monografia apresentada ao curso Engenharia da Computação do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação

Orientador: Mardson Freitas de Amorim  
Co-orientador: Ruy Alberto Corrêa Altafim

Abril de 2022

Ficha catalográfica: elaborada pela biblioteca do CI.

Será impressa no verso da folha de rosto e não deverá ser contada.

Se não houver biblioteca, deixar em branco.





CENTRO DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia da Computação intitulado ***Estudo comparativo de desempenho entre um sistema de aquecimento solar por circulação forçada e por termossifão*** de autoria de Gustavo Eraldo da Silva, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Mardson Freitas de Amorim  
CI/UFPB

---

Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim  
Universidade de São Paulo

---

Prof. Dr. Ewerton Monteiro Salvador  
CI/UFPB

---

Coordenador(a) do Departamento Centro de Informática  
Verônica Maria Lima Silva  
CI/UFPB

João Pessoa, 28 de abril de 2022

”You never fail until you stop trying.”

- Albert Einstein -

## RESUMO

Neste trabalho é realizado um estudo comparativo entre a eficiência de um sistema solar para aquecimento de água utilizando termossifão (ou circulação natural) e circulação forçada. No intuito de verificar a eficiência de cada sistema, são analisadas três métricas de avaliação: velocidade de aquecimento, recarga térmica e energia total absorvida pelo sistema. A relação construída a partir de cada uma das métricas permitiu observar diferenças relevantes entre os métodos de circulação. Também foi desenvolvido um sistema de controle, aplicado no método de circulação forçada, e uma interface gráfica para o monitoramento e aquisição de dados.

**Palavras-chave:** Sistema de aquecimento solar, Termossifão, Circulação forçada, Desempenho térmico.

## ABSTRACT

This work presents an efficiency comparative study between a water solar heating system using thermosyphon (or natural circulation) and forced circulation. In order to verify each system efficiency, three evaluation metrics are analyzed: heating speed, thermal recharge and total absorbed energy by the system. The relation built from each one of the metrics allowed to visualize the differences between the circulation methods. A control system was developed as well, applied to forced circulation method, and a graphical interface for monitoring and data acquisition.

**Key-words:** Solar heating system, Thermosyphon, Forced circulation, Thermal performance.

## LISTA DE FIGURAS

1	Componentes de um coletor plano. . . . .	18
2	Coletor concentrador. . . . .	19
3	Coletor tubo de vácuo. . . . .	20
4	Componentes de um reservatório térmico. . . . .	21
5	Esquemático de um sistema com circulação natural. . . . .	23
6	Sistema de aquecimento solar com circulação forçada. . . . .	24
7	Pinagem do PIC12F675. . . . .	26
8	Pinagem do ESP-01. . . . .	26
9	Topologia do protocolo I2C. . . . .	30
10	Método de transmissão por I2C. . . . .	30
11	Formato do pacote via L3. . . . .	31
12	Esquemático do sistema solar para aquecimento de água. . . . .	34
13	Sistema estudado. . . . .	35
14	Diagrama de funcionamento. . . . .	35
15	Circuito final. . . . .	36
16	Modelagem do banco de dados. . . . .	37
17	Interface gráfica de monitoramento. . . . .	38
18	Algoritmo de controle. . . . .	39
19	Esquemático do sistema solar para aquecimento de água. . . . .	40
20	Curva de temperatura utilizando termossifão. . . . .	42
21	Curva de temperatura utilizando circulação forçada. . . . .	43
22	Curva de temperatura com interferência de fatores externos. . . . .	44
23	Recarga térmica para ambos métodos de circulação. . . . .	46

## LISTA DE TABELAS

1	Tipos de termopar. . . . .	27
2	Termopares nobres. . . . .	28
3	Definições e tamanhos dos campos do pacote. . . . .	32
4	Características dos sensores. . . . .	36
5	Interpolação linear da temperatura. . . . .	43
6	Média dos coeficientes angular. . . . .	44
7	Energia absorvida pelo sistema. . . . .	45
8	Média da energia gerada a partir do sistema solar. . . . .	45

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

LMI – Laboratório de Medição e Instrumentação

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

NTC – Negative Temperature Coefficient

PIC – Peripheral Interface Controller

ISO – International Organization for Standardization

RDBMS – Relational Database Management Systems

IOT – Internet Of Things

## Sumário

<b>1</b>	<b>Escopo do trabalho</b>	<b>15</b>
1.1	Definição do Problema . . . . .	15
1.1.1	Objetivo geral . . . . .	15
1.1.2	Objetivos específicos . . . . .	15
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>16</b>
2.1	Energia solar . . . . .	16
2.2	Componentes de um sistema de aquecimento solar . . . . .	17
2.2.1	Coletor solar . . . . .	17
2.2.2	Coletor plano . . . . .	17
2.2.3	Coletor concentrador . . . . .	19
2.2.4	Coletor tubo de vácuo . . . . .	20
2.2.5	Reservatório . . . . .	21
2.3	Sistemas para aquecimento de água por energia solar . . . . .	22
2.3.1	Circulação natural . . . . .	22
2.3.2	Circulação forçada . . . . .	23
2.4	Avaliação para sistema de aquecimento solar . . . . .	24
2.5	Microcontrolador . . . . .	25
2.5.1	PIC12F675 . . . . .	25
2.5.2	ESP-01 . . . . .	26
2.6	Sensores de temperatura . . . . .	27
2.6.1	Termopar . . . . .	27
2.6.2	Termistor . . . . .	28
2.6.3	LM35 . . . . .	28
2.6.4	DS18B20 . . . . .	28
2.7	Meios de comunicação . . . . .	29
2.7.1	Rede Wireless . . . . .	29
2.7.2	I2C . . . . .	29



2.7.3	Zigbee . . . . .	31
2.7.4	Protocolo L3 . . . . .	31
2.8	Armazenamento de dados . . . . .	32
2.8.1	MySQL . . . . .	32
2.8.2	PostgreSQL . . . . .	33
2.8.3	MongoDB . . . . .	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
3.1	Sensores . . . . .	36
3.2	Hardware e Instrumentação . . . . .	36
3.3	Softwares e ambientes de desenvolvimento . . . . .	37
3.4	Modelagem para banco de dados . . . . .	37
3.5	Interface gráfica . . . . .	38
3.6	Algoritmo de controle . . . . .	38
3.7	Comunicação entre módulos . . . . .	39
3.8	Aquisição de dados . . . . .	39
3.9	Avaliação de dados . . . . .	40
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>42</b>
4.1	Regressão linear dos dados . . . . .	42
4.2	Energia total do sistema . . . . .	45
4.3	Recarga térmica . . . . .	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>

## INTRODUÇÃO

O sol é a fonte de energia mais importante do sistema terrestre, pois a energia solar interfere indiretamente, em todas as outras formas de energia, seja ela renovável ou não (MATAVELLI, 2013). Por esta fonte de energia ser abundante e renovável, Kalogirou (2014a) comenta que o aproveitamento energético por ela fornecida é a melhor maneira de suprir o aumento constante do consumo elétrico no mundo.

A energia solar vem sendo amplamente estudadas. Kabir et al. (2018) conta que as principais aplicações deste tipo de energia são: sistemas de aquecimento de água e geração de energia elétrica por materiais fotovoltaicos ou termoeletricos. Embora o custo dos materiais seja uma desvantagem inicial, a longo prazo torna-se economicamente viável, por esta razão o uso do sistema solar está em alta (ROSA; GASPARIN, 2016).

Sistema solar para aquecimento de água, está cada vez mais comum no Brasil, já que o país apresenta boas condições climáticas, por ter índice alto de radiação solar por todo território, e proporciona economia elétrica (BRASIL, 2008). Estes sistemas podem ser projetados de duas formas: por circulação natural ou termossifão e circulação forçada.

Axaopoulos et al. (1998) comprova a diferença do desempenho num sistema com circulação forçada, em relação ao termossifão por meio do COP (*Coefficient of Performance* – Coeficiente de Performance). Porém, diferentemente deste tipo de análise o objetivo deste trabalho é demonstrar o ganho de um sistema por circulação forçada em relação ao termossifão, levando em consideração outra métrica de comparação.

# **1 Escopo do trabalho**

## **1.1 Definição do Problema**

Sistemas de aquecimento solar têm sido amplamente utilizados por ser uma fonte de energia limpa e uma maneira eficaz na economia de energia e dinheiro (UGREEN, 2019). No dimensionamento de um sistema de aquecimento solar podem ser utilizadas duas configurações para transporte da água, são elas: termossifão ou circulação natural e circulação forçada. Sistemas por termossifão sejam mais utilizados em países como o Brasil, que possui grande incidência de radiação solar por todo território. Diferentemente de países no hemisfério norte, que possuem o problema de congelamento nas tubulações, sendo assim, usam sistemas por circulação forçada (LIMA, 2003, p. 7). Ainda assim, mesmo com a vantagem meteorológica presente no Brasil, é possível melhorar o desempenho destes sistemas de aquecimento. Logo, a proposta deste trabalho é mostrar o ganho ou diferença percentual entre um sistema com circulação natural e forçada de maneira simples.

### **1.1.1 Objetivo geral**

Efetuar a análise comparativa da eficiência na utilização de circulação forçada de água em relação ao modo de circulação natural em um sistema para o aquecimento de água por radiação solar.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver circuito para controle de uma eletrobomba e envio de dados que auxiliem o monitoramento do sistema.
- Modelar um banco de dados para o armazenamento.
- Desenvolver interface gráfica para visualização das aquisições.
- Desenvolver método do controle do fluxo da água no intuito de melhorar o ganho de aquecimento.

Este trabalho tem ênfase no aproveitamento de energia solar, mais especificadamente aplicado ao ambiente residencial e voltado para o aquecimento de água. Assim sendo, dentre os conceitos abordados na revisão literária, tem-se a concepção sobre: energia solar, a composição de um sistema solar, os tipos de sistemas para aquecimento e algumas métricas de avaliação geralmente utilizados. E em complemento à estes conceitos, comenta-se também sobre a tecnologia utilizada para realizar a construção de um sistema para controle e aquisição de dados.

## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Energia solar

O sol é a fonte de energia que sustenta todas as formas de vida e condições climáticas do planeta Terra e é a energia que implica direta ou indiretamente em todas as outras fontes de energia, seja hidráulica, eólica, térmica entre outros (KALOGIROU, 2014a). É uma fonte de energia limpa, ilimitada e viável principalmente em regiões com alto índice de insolação (MATAVELLI, 2013). A energia solar pode ser utilizada para aquecimento de água ou gás, e em geração de energia elétrica (ARVIZU et al., 2011).

O sol é a estrela mais próxima do planeta e a mais conhecida, os raios eletromagnéticos provenientes do sol se propagam a mesma forma de onda utilizada nas transmissões de rádio e televisão. Porém, diferentemente das propagação ondas de radiofrequência, as ondas solares têm menor comprimento e consequentemente possuem mais energia (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Segundo Duffie e Beckman (1980) a energia recebida, por unidade de tempo, em uma área unitária perpendicular à direção da propagação da luz e medida à metade da distância entre o sol e a terra é chamada de constante solar e esta energia é em média  $1367W/m^2$ . Porém uma parte da energia é absorvida na camada de ozônio e a radiação remanescente que atinge o interior da terra é responsável pela luz, gerada pela reflexão na superfície, e o calor quando os raios são absorvidos. Para o aproveitamento e desempenho de um sistema solar, é importante ter em mente as condições ou adversidades que interferem na energia das ondas solares como (KALOGIROU, 2014c):

- Latitude : A proporção que a latitude aumenta, a área da superfície terrestre que a mesma radiação atinge é maior, resultando em uma menor concentração de radiação;
- Estação do ano: O movimento de translação da terra em torno do sol, responsável pelas estações do ano, descreve uma órbita elíptica plana. O eixo de rotação da terra em volta de si mesmo não coincide com o eixo da elipse. Deste modo, num intervalo do ano o planeta expõe mais o hemisfério Sul à luz solar por um período e por outro o hemisfério Norte;
- Hora do dia : o ângulo de incidência da radiação solar varia para cada horário, então é importante definir o melhor posicionamento dos painéis solares;
- Condições meteorológicas e atmosféricas : A quantidade de nuvens influencia na quantidade de energia que chega aos coletores, assim com ambientes como alto índice de poluição.

## **2.2 Componentes de um sistema de aquecimento solar**

O aquecimento da água é uma das principais aplicações no uso de energia solar e, assim como todo sistema, é necessário ser bem modelado em conjunto com materiais que permitam o funcionamento de forma adequada. Em seguida serão descritos componentes fundamentais em sistemas solares para aquecimento de água.

### **2.2.1 Coletor solar**

No âmbito relacionado ao aproveitamento da energia solar para aquecimento, as placas solares atualmente são utilizadas em dois tipos de aplicação : absorção e concentração ou redirecionamento da onda eletromagnética (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2017). Coletores de absorção ou estacionários são utilizados em aplicações com temperatura máxima de 150°C, dependendo da estrutura interna do coletor, sendo comumente utilizados em sistemas de aquecimento solar em residências, estabelecimentos, hospitais, entre outros (BRASIL, 2008). Já coletores de concentração, geralmente caracterizados por um formato curvo ou parabólico, são empregados em grandes áreas de irradiação e faz o redirecionamento da energia para uma região ou ponto central obtendo assim temperaturas elevadas. Estes sistemas são utilizados em usinas termoelétricas ou indústrias (ANEEL, 2012).

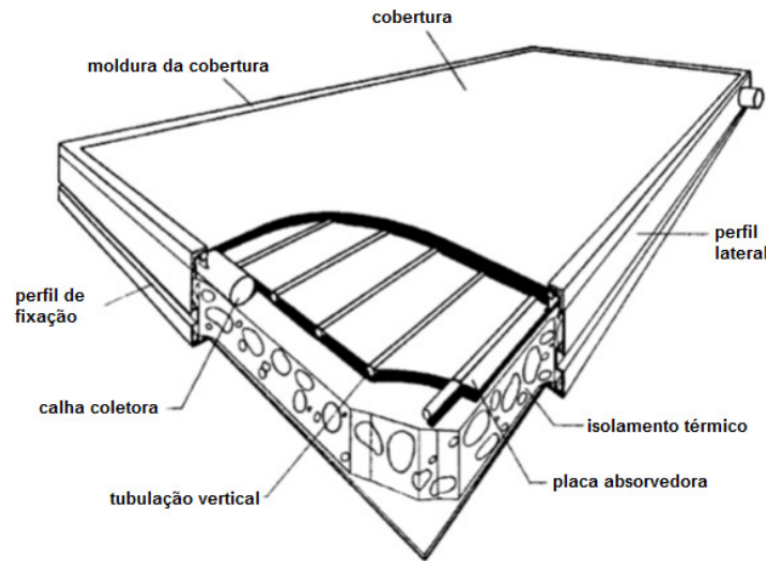
O coletor solar é considerado o principal componente num sistema de aquecimento solar, portanto, é importante para o consumidor e projetista co-relacionar o custo ao benefício do painel. A eficiência da placa solar depende das condições climáticas, do tipo da aplicação e de parâmetros intrínsecos (BRASIL, 2008).

### **2.2.2 Coletor plano**

Coletores planos geralmente são feitos para aplicações que requerem temperaturas moderadas, em torno de 100°C acima da temperatura ambiente. Este tipo de placa solar absorve tanto radiação direta como difusa, não necessita de rastreamento solar e com manutenção menos frequente. Normalmente é utilizado em aplicação para aquecimento de água em residências, edifícios, refrigeração e em processos industriais (DUFFIE; BECKMAN, 1980, p. 236).

O funcionamento dos coletores planos consiste na absorção dos raios solares quando incidem sobre a placa. Então é feita a conversão em energia térmica que será transmitida para as flautas ou serpentinas que são tubos de cobre por onde passa o fluido, por sua vez este será aquecido. Pode-se observar na Figura 1 os seguintes componentes presentes no coletor.

**Figura 1: Componentes de um coletor plano.**



Fonte : Adaptado de (ARA et al., 2018)

Os coletores planos podem apresentar pequenas variações em seu interior, porém os componentes terão funções semelhantes, sendo estas (BRASIL, 2008, p. 5):

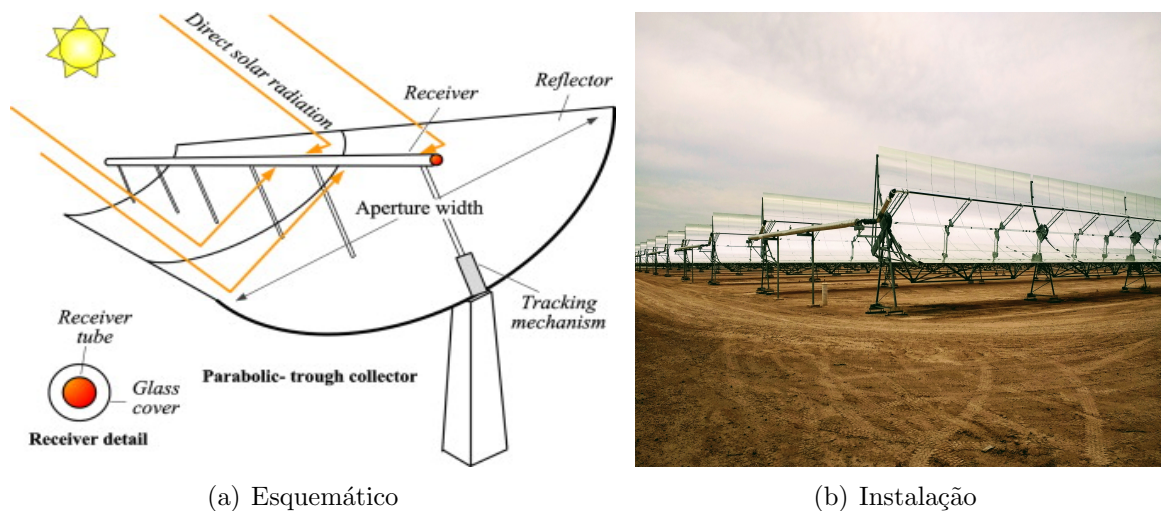
- Moldura da cobertura : é o envoltório metálico, geralmente de alumínio, que comporta todas as parcelas cruciais do coletor;
- Cobertura : é a tela transparente da placa que permite a entrada de luz e comumente utiliza-se vidro ou acrílico;
- Placa absorvedora (aleta) : componente responsável pela captação dos raios eletromagnéticos seguido da conversão em energia térmica. Tipicamente a aleta é constituída por alumínio ou cobre e pintura preta para evitar reflexo dos raios além de aumentar a absorção;
- Tubulação vertical : é onde ocorre a troca de calor entre a placa absorvedora e o fluido que passa pela tubulação. Esses tubos, assim como a aleta, são metais termicamente condutores. Um exemplo de amplo uso é o cobre;
- Calha coletora (inferior e superior) : assim como a tubulação vertical, a calha coletora é composta por um material metálico e sua função é o transporte do fluido para entrada e saída do coletor;
- Isolamento térmico : é a camada responsável pela atenuação de perda térmica para o ambiente, é composto geralmente por lã de vidro ou de rocha e espuma de poliuretano.

### 2.2.3 Coletor concentrador

Na geração de eletricidade em larga escala proveniente da energia solar, é necessária a produção de temperaturas mais elevadas do que se obtém por coletores planos (AR-VIZU et al., 2011). Para isto, se utiliza coletores concentradores, parabólicos ou de foco, que geralmente são placas curvas, necessárias para concentração e redirecionamento da radiação solar. A temperatura gerada pela concentração dos raios solar, pode variar entre 800 a 1000°C (KALOGIROU, 2014b).

Coletores de concentração apresentam alto índice de reflexão, pois toda energia incidente sob a superfície será refletida para o centro desta, onde encontra-se um tubo que absorverá a energia térmica ou a radiação solar. Essa energia pode ser redirecionada para uma torre central para captar a energia (TIAN; ZHAO, 2013). Geralmente esse tipo de coletor tem sua posição modificada durante o dia com objetivo de aumentar a eficiência, e também é comum apresentar sensores de monitoramento dos raios solares para atingir temperaturas ainda maiores, como pode ser observado no esquemático da Figura 3(a). Um dos grandes exemplos de uso dessa tecnologia, é o caso da Estação de geração Solana no Arizona (Figura 3(b)) (WEINSTEIN et al., 2015).

**Figura 2: Coletor concentrador.**



Fonte: Adaptado de (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2017)

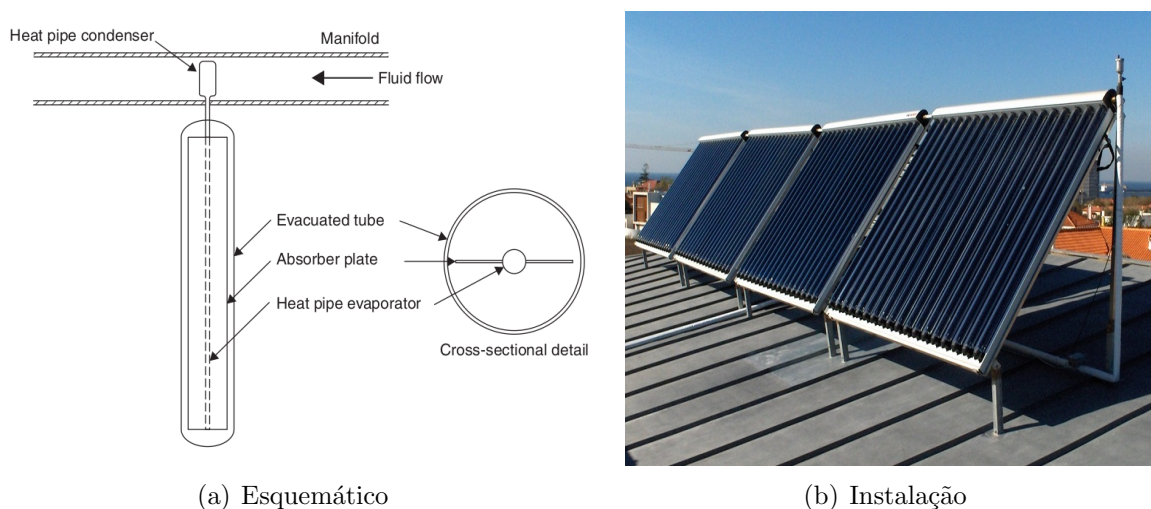
Embora este tipo coletor seja muito eficiente para as aplicações de grande porte, como em usinas solares, também apresenta desvantagens, sendo a principal dentre elas a manutenção. Visto que placas solares deste tipo dependem das condições ópticas, então situações adversas como clima, impurezas no ambiente, compostos oxidativos e corrosivos irão influenciar no desempenho e consequentemente maior preocupação com manutenções (DUFFIE; BECKMAN, 1980, p. 323).

### 2.2.4 Coletor tubo de vácuo

Assim como as placas solares planas, os coletores tubo a vácuo também são aplicados em sistemas solar para aquecimento de água. Seu funcionamento consiste num ciclo por mudança de fase do líquido presente nos tubos de cobre ou *heat pipes* presentes no encapsulamento a vácuo, como pode-se observar na figura 4(a) (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2017).

A radiação solar é absorvida pela aleta ou placa metálica que aquecerá o tubo de cobre onde reside o líquido em seu interior. O líquido deve apresentar baixo ponto de ebulição como o etanol, pois quando aquecido, irá evaporar até que o vapor se concentre no condensador, havendo assim a troca de calor com a água ou fluido que deseja-se aquecer (PLANAS, 2015). A água aquecida então percorrerá até o reservatório térmico. Na figura 4(b), ilustra-se um modelo comumente instalado, porém há variações no mercado, como modelos em que o boiler está em conjunto com o coletor.

**Figura 3: Coletor tubo de vácuo.**



Fonte: Adaptado de (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2017)

Mesmo havendo semelhança no campo de aplicação entre as placas solares planas, os coletores tubo a vácuo apresentam maior eficiência térmica já que a perda térmica no vácuo é menor que no ar. Além disso os tubos de aquecimento possibilitam uma proteção inerente a superaquecimento ou congelamento, já que a mudança de fase do líquido tem limites de temperatura (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2017). Apesar de ter desempenho melhor, esse tipo de coletor também apresenta custo elevado, então deve ser feita a relação custo x benefício antes da aquisição (BRASIL, 2008).

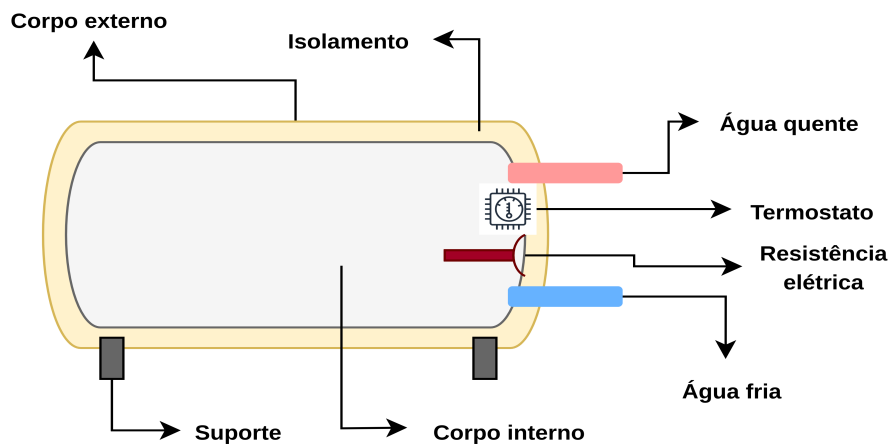


### 2.2.5 Reservatório

O reservatório ou *boiler* é um dos elementos fundamentais para o sistema de aquecimento solar, pois é responsável pelo armazenamento da energia térmica captada pelos coletores além de promover a redução de perda térmica para o ambiente (KALOGIROU, 2014d, p. 281).

Quanto à composição de um *boiler* comercial, pode-se observar os principais elementos característicos na Figura 4. O tanque tem a estrutura protegida pela camada externa, geralmente composta de cobre, inox ou polipropileno devido à resistência contra corrosão em meio externo.

**Figura 4: Componentes de um reservatório térmico.**



Fonte : Autoria própria

A camada de isolamento térmico é o intermediário entre o corpo externo e interno, sendo esta responsável por evitar transferência de calor para o exterior. Geralmente é composta por poliuretano expandido, lã de vidro e lã de rocha (SIQUEIRA et al., 2009). Por fim tem-se a camada ou corpo interno, região que entra diretamente em contato com a água aquecida, portanto, este componente deve ser formado por elementos resistentes a corrosão como cobre, aço inoxidável e aço com tratamento vitrificado ou esmaltado, além de suportar variações de pressão e expansão da água em temperaturas mais elevadas (BRASIL, 2008, p. 112). No interior do reservatório, reside um termostato ou outro tipo de monitoramento de temperatura em adjacência com aquecimento auxiliar, que é comumente utilizado em dias desfavorecidos da energia solar.

A escolha do reservatório depende não apenas das características físicas, mas também do dimensionamento do sistema para aquecimento. De acordo com Morrison e Braun (1985), fatores como orientação vertical e horizontal implicam na performance geral do sistema. Estes autores perceberam que é obtido um desempenho melhor em tanques posicionados verticalmente. Além disso existem outros aspectos que influenciam

no desempenho do reservatório, como :

- Posicionamento em relação aos coletores : pois em sistemas baseados em termossifão pode ocorrer a circulação reversa;
- Localização : dentro ou fora da residência, implica em melhor conservação estando no interior da habitação, no exterior, está suscetível a todos os tipos de intempéries;

## **2.3 Sistemas para aquecimento de água por energia solar**

Sistemas para aquecimento de água são comumente aplicados para uso doméstico (KALOGIROU, 2014d). São relativamente simples e apresentam a viabilização de utilizar energia solar. Esses sistemas para aquecimento possuem coletores solar, e um reservatório térmico como componentes principais. Em relação ao modo de aquecimento, podem ser:

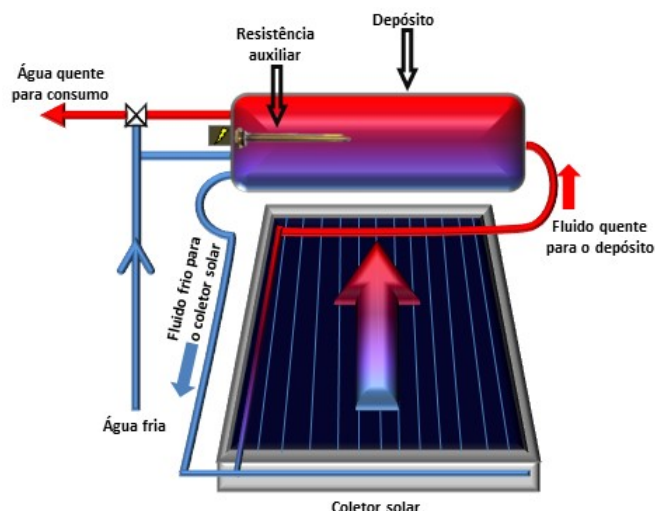
- Aquecimento direto ou malha aberta: a água é aquecida diretamente pelo coletor ao passar por tubos metálicos em contato com a placa solar;
- Aquecimento indireto ou malha fechada: a água é aquecida pela transferência de calor por algum outro fluido. Geralmente utiliza-se o etileno glicol (KALOGIROU, 2014d, p. 273).

Além disso, tais sistemas também apresentam diferentes formas de transporte do fluido. Sendo estas, o transporte por circulação natural e circulação forçada.

### **2.3.1 Circulação natural**

Em um método passivo para aquecimento de água por radiação solar não é necessária a intervenção de bombas ou mecanismos auxiliares para produzir o fluxo da água pelo sistema, a movimentação da água ocorre de maneira natural, também conhecido como efeito termossifão, sendo comumente utilizado no Brasil (BRASIL, 2008, p. 197). Esse efeito ocorre devido a diferença de temperatura entre os níveis da água no coletor, proporcionando diferença de densidade. A água é aquecida ao passar pelos tubos dos coletores responsáveis pela transferência de calor. Uma vez que a água quente é mais leve que a fria, cria-se uma pressão que gera a movimentação do fluido (DUFFIE; BECKMAN, 1980, p. 479). Logo, a água fria passa pelo sistema de aquecimento e a água quente segue para o topo do *boiler*, este ciclo ocorre enquanto o sol estiver presente ou até que seja atingido o equilíbrio térmico. O esquemático de um sistema por termossifão pode ser observado na figura 5.

Figura 5: Esquemático de um sistema com circulação natural.



Fonte : <http://www.electrotools.pt>

O termosifão apresenta algumas vantagens por ser um processo natural já que não necessita de nenhum outro recurso mecânico ou elétrico, como: fontes de alimentação elétrica; fontes de aquecimento auxiliar e bombas d'água. Desta forma, um sistema por termosifão necessita de manutenção apenas nos coletores para o prolongamento da vida útil (BRASIL, 2008).

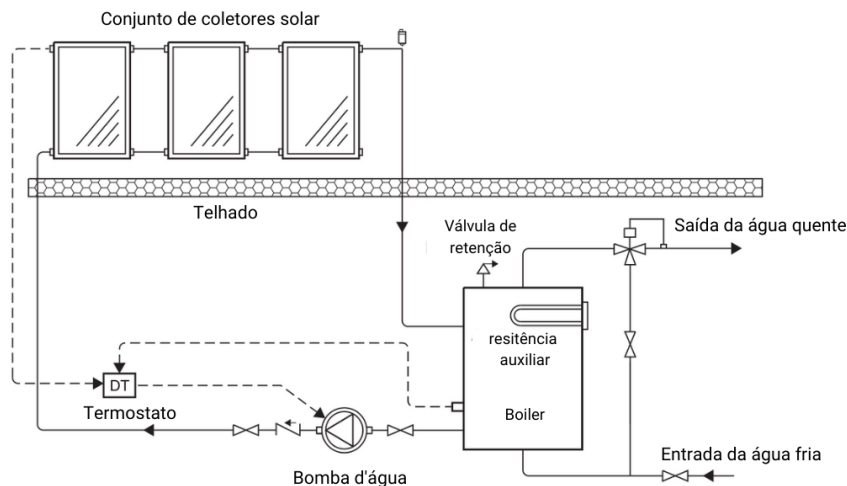
Em relação às desvantagens, o termosifão possui limitações físicas que implicam no funcionamento do sistema para aquecimento, como nível do reservatório e distância no eixo horizontal em relação aos coletores. Caso o dimensionamento do sistema solar não tenham sido bem projetado, pode ocorrer o problema de circulação reversa, que acaba por resfriar a água do boiler no período noturno. É recomendado que o reservatório térmico esteja pelo menos 30 cm acima do nível dos coletores para evitar a circulação reversa durante a queda de temperatura à noite ou em estações frias para o funcionamento adequado por termosifão (NORTON; PROBERT, 1983).

### 2.3.2 Circulação forçada

A circulação forçada consiste na presença de um intermediador para auxiliar na movimentação do fluido no interior do coletor, como é possível observar na Figura 6. O fluido que será transportado pode ser água, gás ou algum outro líquido específico, a composição da substância irá influenciar na forma do bombeamento, como o uso de bomba pressurizada para gás e eletrobomba para água (ARVIZU et al., 2011). Em sistemas de controle mais simples, a bomba é acionada quando registrada uma diferença de temperatura, geralmente entre 5°C e 10°C, da água em relação à entrada e saída do coletor. Por fim, a bomba é desligada se a variação for menor que 2°C, significando que o *boiler* se

encontra em equilíbrio térmico (BRASIL, 2008, p. 219).

**Figura 6: Sistema de aquecimento solar com circulação forçada.**



Fonte : (KALOGIROU, 2014d)

O uso deste tipo de configuração auxilia em problemas como anti-congelamento gerado por circulação reversa. Baixas temperaturas danificam o coletor, porém, ao controlar a movimentação do fluido com uma bomba, por exemplo, evita-se este cenário (AXAOPOULOS et al., 1998).

## 2.4 Avaliação para sistema de aquecimento solar

Muitas formas de procedimentos para experimentos foram propostas por várias organizações para determinar a performance térmica de um sistema de aquecimento solar. A realização de testes pode servir para diferentes propósitos como previsão do sistema, performance a longo prazo, comparação entre sistemas domésticos e também previsão de possíveis problemas no sistema. A Organização Internacional para Padronização (ISO - *International Organization for Standardization*) publica uma série de padrões, partindo de métodos para medições e correlação de dados até identificação de parâmetros mais complexos. A ISO 9459 foi desenvolvida pelo Comitê Técnico, ISO/TC 180 – *Solar Energy*, para facilitar a comparação entre sistemas de aquecimento solar doméstico internacionalmente. Devido ao fato de que um padrão genérico ainda não foi desenvolvido, não existe um consenso internacional para método de teste e definição de padrão para condições de teste (KALOGIROU, 2014d).

A avaliação para um sistema de aquecimento solar vai depender do objetivo do trabalho que será realizado, e resulta em várias formas e métricas de análise, porém existem dois modos de avaliação interessantes para performance geral do sistema: a fração solar e o coeficiente de performance.

Para caracterizar o desempenho de um sistema de aquecimento solar, é importante estabelecer qual demanda está sendo suprida. A eficiência de um sistema de aquecimento solar é uma característica variável (BORGES et al., 2000). Um índice geralmente utilizado para o desempenho anual ou mensal é

$$F = \frac{\text{energia fornecida pelo sol}}{\text{energia total demandada para aquecimento}} \quad (1)$$

Onde F representa a Fração Solar.

Esta fração é expressa na forma decimal. A obtenção de uma fração solar elevada permite concluir que o sistema solar para aquecimento, está devidamente dimensionado e atende a demanda com pouco uso de energia auxiliar, até mesmo em dias com condições climáticas adversas.

Outro parâmetro de desempenho semelhante ao  $F$ , comumente utilizado (AXAO-POULOS et al., 1998), é o conceito de COP (*Coefficient of Performance*) é expresso pela razão do calor útil obtido pela energia elétrica de entrada, ou auxiliar:

$$COP = \frac{\text{calor útil obtido}}{\text{energia auxiliar de entrada}} \quad (2)$$

Sistemas para aquecimento de água têm COP entre 3 e 5, isto significa que o sistema de aquecimento fornece 3-5 vezes mais energia térmica do que é a energia elétrica de entrada (DINCER; ROSEN, 2015, p. 133).

## 2.5 Microcontrolador

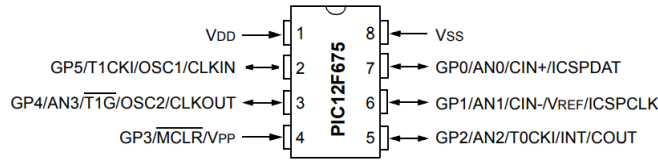
Para aplicações que requerem controle e automação é ideal o uso de microcontroladores devido às funcionalidades presentes, facilidade de uso e conexão entre outros componentes eletrônicos ou circuitos. Segue em sequência a descrição de microcontroladores comerciais comumente utilizados.

### 2.5.1 PIC12F675

O PIC12F675 é um microcontrolador da família "PIC12F" de 8 bits. Este dispositivo possui 8 pinos, como é representado na figura 7 (MICROCHIP, 2010). Embora este microcontrolador apresente poucas portas em relação a outros modelos, as funções e portas presentes permitem desenvolver inúmeras soluções.

Dentre as funções e características deste microcontrolador podem ser destacadas: o clock de 4MHz; módulo de comparador analógico; conversor analógico-digital com re-

**Figura 7: Pinagem do PIC12F675.**



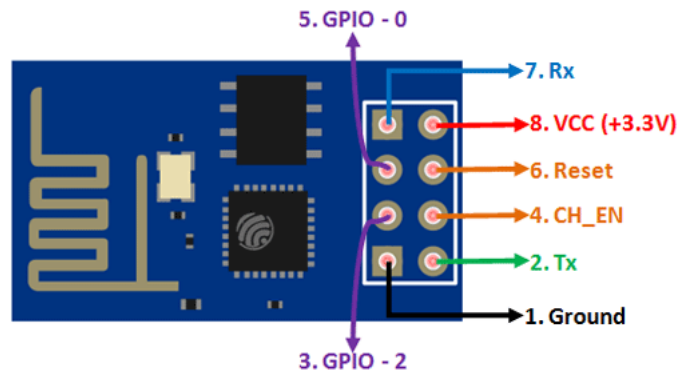
Fonte : (MICROCHIP, 2010)

solução de 10bits; 6 pinos de entrada, das quais 5 servem também como saída (MICROCHIP, 2010). Também pode ser programado pela linguagem *Assembly* ou em C.

### 2.5.2 ESP-01

O ESP-01 é um microchip de baixo custo que vem sendo amplamente utilizado em protótipos de projetos de IoT (*Internet of Things*) e pode ser programável pela plataforma Arduino. Desenvolvido pela Espressif Systems em Shanghai, na China (AI-THINKER, 2015). O módulo ESP-01 suporta o padrão IEEE 802.11 b/g/n, protocolo TCP/IP, modo estação e ponto de acesso. Isto permite que seja utilizado para conexão WiFi, controle e criação de redes e comunicação entre aplicações e dispositivos.

**Figura 8: Pinagem do ESP-01.**



Fonte : (AI-THINKER, 2015)

## 2.6 Sensores de temperatura

Sensores são dispositivos capazes de medir grandezas físicas. São utilizados em diversas aplicações e auxiliam para o monitoramento de eventos e o controle de sistemas. Como este trabalho aborda medições de temperatura, são apresentados em sequência alguns sensores de temperatura comerciais.

### 2.6.1 Termopar

Um termopar é um sensor de temperatura formado pela junção de dois metais diferentes. Esta junção é obtida ao soldar ou torcer os metais ou condutores. Tal ferramenta é resultado do trabalho de Thomas Seebeck em 1822, ao observar a existência do pequeno fluxo de corrente quando aplicada a diferença de temperatura sob a junção de dois metais (POLLOCK, 1991).

A resposta do termopar é caracterizada pela diferença de potencial entre os terminais que compõem o sensor, representando um efeito termoelétrico ou também chamado de efeito Seebeck (KASAP, 2001). Cada valor medido de tensão corresponde à temperatura submetida, deste modo é possível estabelecer uma equação que represente o comportamento da resposta do sensor.

Termopares podem ser aplicados a vários tipos de ambientes, são muito utilizados por suportarem altas temperaturas, possuem baixo custo, não necessitam de alimentação, são robustos e facilmente aplicáveis. Em sequência são apresentados os termopares básicos (termo que define termopares comumente usados na indústria) na tabela 1.

**Tabela 1: Tipos de termopar.**

Tipo	Composição	termoelemento positivo	termoelemento negativo
K	Cromel e Alumel	Ni90%Cr10%	Ni95%Mn2%Si1%A12%
J	Ferro e Constantan	Fe99,5%	Cu55%Ni45%
T	Cobre e Constantan	Cu100%	Cu55%Ni45%
E	Cromel e Constantan	Ni90%Cr10%	Cu55%Ni45%
N	Nicrosil e Nisil	Ni84,4%Cr14,2%Si1,4%	Ni95,45%Si4,40%Mg0,15%

Por fim, existem os termopares nobres. São aqueles cujos pares são constituídos de platina. Embora possuam custo elevado e exijam instrumentos receptores de alta sensibilidade, devido à baixa potência termoelétrica, apresentam uma alta precisão, dada a homogeneidade e pureza dos fios dos termopares (ALUTAL, 2021). Na tabela 2 são apresentados os termopares nobres:

Onde Pt = Platina e Rh = Ródio.

**Tabela 2: Termopares nobres.**

Tipo	termoelemento positivo	termoelemento negativo	Faixa de utilização
S	Pt90%Rh10%	Pt100%	-50°C a 1768°C
R	Pt87%Rh13%	Pt100%	-50°C a 1768°C
B	Pt70,4%Rh29,6%	Pt93,9%Rh6,1%	0°C a 1820°C

### 2.6.2 Termistor

Termistores são componentes elétricos cuja resistência varia com a temperatura. A conversão é obtida pela aquisição da tensão do termistor, bastando utilizar o circuito com configuração divisor de tensão. Além da praticidade apresentam boa acurácia e suportam até 150°C. Os termistores podem ser de dois tipos (LIOHM, 2017) :

- NTC (*Negative Temperature Coefficient*) : é um tipo de termistor que ao ser aquecido produz uma diminuição no valor de resistência. São fabricados pela mistura de óxidos de metais de transição, manganês, cobre, cobalto e níquel. Geralmente utiliza-se esse sensor no monitoramento de temperatura ambiente e de componentes eletrônicos;
- PTC (*Positive Temperature Coefficient*): diferentemente do NTC, este termistor é diretamente proporcional em relação variação da resistência e temperatura. Este sensor é composto de silício e são ideais para aplicações onde é desejada ótima estabilidade térmica.

### 2.6.3 LM35

O LM35 é um sensor de temperatura de precisão, cuja a resposta é um sinal analógico e caracterizado por uma escala linear de 10mV por centigrado (INSTRUMENTS, 1999). Na Equação 3 observa-se a saída do LM35:

$$V_{out} = 10mV \times T \quad (3)$$

Este sensor é popularmente utilizado devido ao baixo custo, boa acurácia (em torno de 0,5°C), intervalo operação relativamente amplo (de -55°C a 150°C) e não necessita de calibração externa. Sendo assim, este sensor é uma boa opção para aplicações com temperaturas inferiores a 150°C e de custo acessível.

### 2.6.4 DS18B20

Diferentemente dos sensores previamente citados, o DS18B20 é um sensor de temperatura que apresenta uma saída digital de 9 a 12 bits. Além disso, este sensor necessita



de um único barramento para realizar a transmissão de dados. O fato de usar a comunicação de um fio auxilia na quantidade de portas necessárias na escolha de um microcontrolador para o sistema. E em conjunto, este mesmo barramento poder servir como barramento de alimentação (INTEGRATED, 2019).

Outra vantagem deste sensor é que cada DS18B20 possui um código serial único de 64 bits, desta forma é possível utilizar vários sensores que estão ligados em apenas um barramento. Assim, estes sensores são bem aplicados em sistemas para controle e monitoramento de temperaturas em pontos simultâneos da aplicação (INTEGRATED, 2019).

## **2.7 Meios de comunicação**

A comunicação é primordial quando se trata na transmissão de informação. Já a maneira como a comunicação é realizada depende do problema que deseja-se solucionar e as limitações adjacentes a este.

No sistema desenvolvido neste trabalho, são apresentados módulos com responsabilidades distintas. Portanto, serão explanados exemplos de meios e tipos de comunicação em sequência, dos quais alguns deles são utilizados neste trabalho.

### **2.7.1 Rede Wireless**

O surgimento das redes wireless, ou sem fio, revolucionou a forma de transmissão de dados, utilizando o ar como meio físico para realizar a comunicação, por diminuir a quantidade de cabos necessários para a criação de uma rede. As redes wireless funcionam através de equipamentos que usam radiofrequência com a comunicação via ondas de rádio e satélite. Este tipo de comunicação é comumente utilizada para fornecer conexão à Internet para aparelhos móveis como smartphone e notebook (KUROSE; ROSS, 2012, p. 513).

As redes WiFi são utilizadas por produtos certificados que pertencem à classe de dispositivos de rede local sem fios (WLAN - *Wireless Local Access Point*) baseados no padrão IEEE 802.11 (KUROSE; ROSS, 2012, p. 514)<sup>1</sup>. Embora o uso do WiFi apresente praticidade, também apresenta desvantagens como limite de alcance e interferência do sinal por outros objetos .

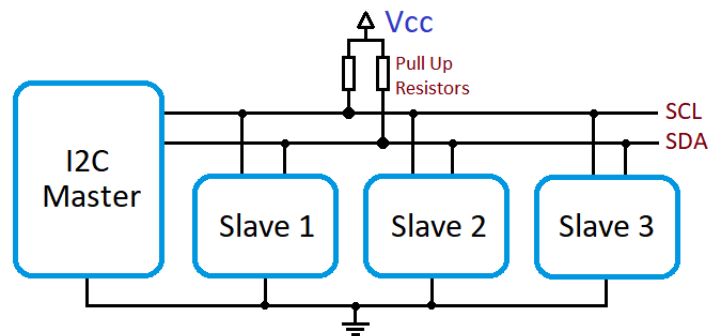
### **2.7.2 I2C**

O protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*) foi desenvolvido pela Philips sendo comum sua utilização na comunicação de baixa velocidade entre microcontroladores e placas-mãe (IRAZABAL; BLOZIS, 2003). A comunicação via protocolo I2C é síncrona, baseia-se

no envio de dados de modo serial e utiliza dois barramentos de conexão, como é ilustrado na figura 9. Este protocolo utiliza a topologia Master/Slave, de modo que :

- Master : é responsável pela geração dos pulsos no barramento do SCL (*Serial Clock Line*) e envia dados na conexão SDA (*Serial Data Line*) com endereçamento de 8 bits em que 7 são dados e o último corresponde á leitura/escrita;
- Slave : dispositivo ou periférico percebe se o endereço indexado na memória corresponde ao que o *master* está solicitando no meio, em caso positivo o *slave* envia um bit de confirmação (ACK);

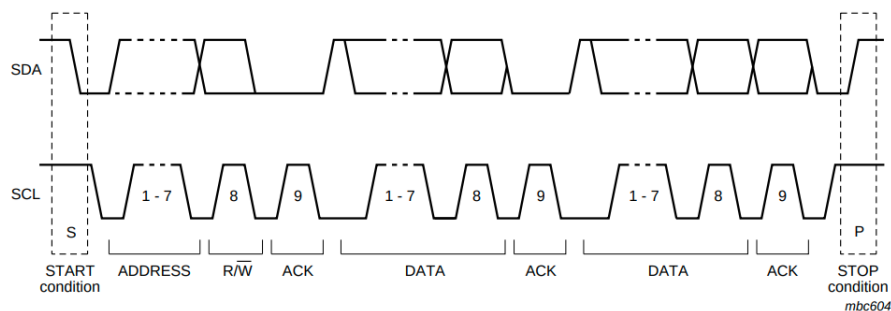
**Figura 9: Topologia do protocolo I2C.**



Fonte : (<https://electrosome.com/i2c/>)

Os dados são enviados começando pelo bit mais significativo (MSB) e a transmissão começa quando o *start bit* for sinalizado. Uma vez que todos os bits são enviados, a transmissão é encerrada pelo stop bit, como é possível observar no esquema da Figura 10. O *start bit* é caracterizado pela transição no SDA em borda de descida e o *clock* está em nível alto, já *stop bit* é representado pela transição em borda de subida e o *clock* em alto (NXP, 2014).

**Figura 10: Método de transmissão por I2C.**



Fonte : (NXP, 2014)

### 2.7.3 Zigbee

O protocolo zigbee foi criado pelo IEEE ( *Institute of Electrical and Electronics Engineers*)em conjunto com a ZigBee Alliance com objetivo de disponibilizar uma rede com extrema baixa potência de operação, ocasionando um baixo consumo de energia nos dispositivos, baixo custo e redução na taxa de transferência de dados (VASQUES et al., 2010). Inicialmente o Zigbee se popularizou no meio industrial pois suas principais finalidades eram concentradas em automação e controle remoto. Este que vem sofrendo alterações e recentemente tem atingido o campo residencial, já que o investimento em *Smart Home* (Casa inteligente) com uso de IoT (*Internet of Things*) está crescendo (SMART... , 2019).

O uso do Zigbee é interessante em aplicações que possuem vários dispositivos que trocam informações entre si. Além disso, o protocolo fornece maior segurança na transmissão de dados, tornando assim um sistema mais confiável (DIGI, 2021).

### 2.7.4 Protocolo L3

O L3 é um protocolo de empacotamento de dados elaborado por Amorim (2017), com objetivo de padronizar o envio de dados nos projetos desenvolvido no LMI (Laboratório de Medição e Instrumentação). Este protocolo pode ser utilizado para transferência de dados, controle de periféricos e, oferece uma especificação direta e intuitiva para o usuário. O pacote é composto por 7 campos de informação, como ilustrado na figura 11, e a soma de todos os campos formam um pacote com 12 bytes.

**Figura 11: Formato do pacote via L3.**



Fonte : (AMORIM, 2017)

Este protocolo possibilita uso e criação de 255 códigos de instruções, sendo que atualmente apresenta pouco menos que 10% de sua capacidade. A tabela 3 apresenta a descrição dos campos que compõem um pacote L3 :

**Tabela 3: Definições e tamanhos dos campos do pacote.**

Campo	Número de bytes	Descrição
SOH	1	Início de Pacote
IDS	1	Identificador de Origem
IDD	1	Identificador de Destino
COD	1	Código de Instrução
DATA / PADDING	6	Informação / enchimento
PAD	1	Enchimento ou identificador de fragmentação
CRC-8	1	Código de checagem de redundância cíclica

## 2.8 Armazenamento de dados

O surgimento de sistemas DBMS (*Data Base Management System*), auxiliaram no gerenciamento e manipulação de dados. Atualmente os sistemas de gerenciamentos de dados são divididos em duas categorias: bancos de dados relacionais e não relacionais (SHARMA; DAVE, 2012, pag. 3).

Um banco de dados relacional armazena e fornece acesso a pontos de dados relacionados entre si. A base de um modelo relacional apresenta uma maneira intuitiva e direta de representar dados em tabelas, cada linha na tabela é um registro com a identificação do dado. Já as colunas, contêm atributos dos dados e cada registro geralmente tem um valor para cada atributo (SHARMA; DAVE, 2012, pag. 5).

Já banco de dados não relacionais não armazenam os dados em forma de tabelas como os bancos relacionais. Isto permite que sejam mais flexíveis que bancos com base SQL (*Structure Query Language* – Linguagem de Consulta Estruturada) (SHARMA; DAVE, 2012, pag. 16). Em sequência serão descritos alguns sistemas de banco de dados mais utilizados.

### 2.8.1 MySQL

O MySQL é um sistema gerenciador de banco de dados relacional (RDBMS – *Relational Database Management Systems*) *open source*, usado por empresas como o Facebook, Tesla e YouTube. Utiliza a linguagem SQL (*Structure Query Language* – Linguagem de Consulta Estruturada) onde os dados são registrados em tabelas, as quais se relacionam entre si, que é a linguagem mais popular para inserir, acessar e gerenciar o conteúdo armazenado num banco de dados (ROUSE, 2018).

Além disso, o MySQL apresenta vantagens como segurança, permite controle de acesso e integridade do banco de dados. Isto evita que os dados sejam corrompidos, e oferece boa performance mesmo com grande volume de dados.

### 2.8.2 PostgreSQL

PostgreSQL é um sistema *open source* de banco de dados relacional que suporta pesquisas em SQL (relacionais) e JSON (não-relacionais). Tem funcionalidades que oferecem um armazenamento seguro e escalabilidade para dados complexos. Além disso, permite portabilidade para várias linguagens de programação. O uso deste banco de dados é interessante para sistemas ou aplicações mais robustas e complexas (POSTGRES, 2020).

### 2.8.3 MongoDB

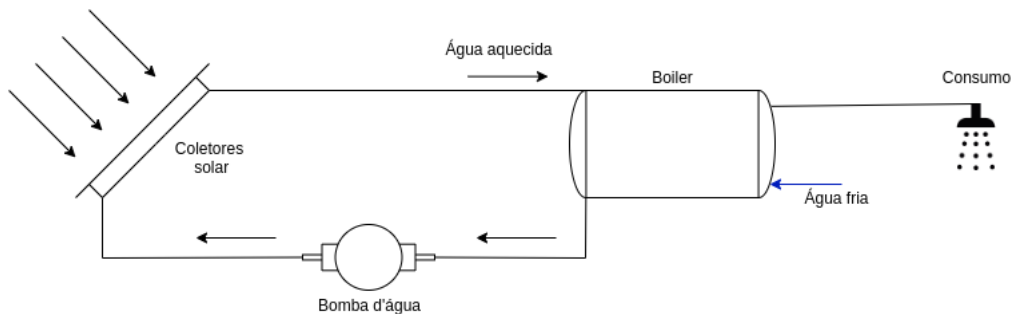
MongoDB é um software de banco de dados NoSQL (*Not Only SQL*) orientado a documentos livre, de código aberto e multiplataforma. Ao invés de utilizar linhas e colunas como banco de dados relacionais tradicionais, o MongoDB utiliza coleções de documentos. Suas características permitem com que as aplicações modelem informações de modo mais intuitivo, pois os dados podem ser alocados em hierarquias complexas e continuar a ser indexáveis e de fácil busca (TUTORIALSPPOINT, 2020).

### 3 METODOLOGIA

O estudo do presente trabalho foi desenvolvido a partir de um sistema solar voltado para o ambiente doméstico. Então, a escolha dos componentes presentes no sistema, foi realizada com base no planejamento da residência, para suprir demandas domésticas. O sistema solar utilizado, é composto por duas placas solares, um reservatório térmico (*boiler*) de 300 Litros e uma bomba d'água como pode-se observar no esquema na Figura 12. O esquemático ilustrado, aplica-se tanto para uso de circulação forçada, como para termossifão. De modo que, por termossifão a circulação da água ocorre mesmo com o intermédio da bomba no caminho. O aquecimento é proveniente de duas placas solares comerciais, denominados coletores. Estas placas são do tipo plana, possuem (cada uma) as dimensões de 1,40m por 1,00m e estão arranjadas em paralelo. Os coletores estão orientados para o norte com uma inclinação angular de  $25^\circ$  e localizados na latitude  $7^\circ 09' 44.2''$  Sul e longitude  $34^\circ 49' 02.5''$  Oeste.

Para o armazenamento da água aquecida foi utilizado um boiler com capacidade de 300 Litros, posicionado horizontalmente e sem a presença de sistema auxiliar para aquecimento. Já a bomba d'água responsável pela circulação forçada é do modelo eletrobomba periférica de 0,5CV com alimentação de 220V. A escolha desta bomba é devido a vazão é satisfatória para o controle do fluxo da água para a aplicação.

**Figura 12: Esquemático do sistema solar para aquecimento de água.**



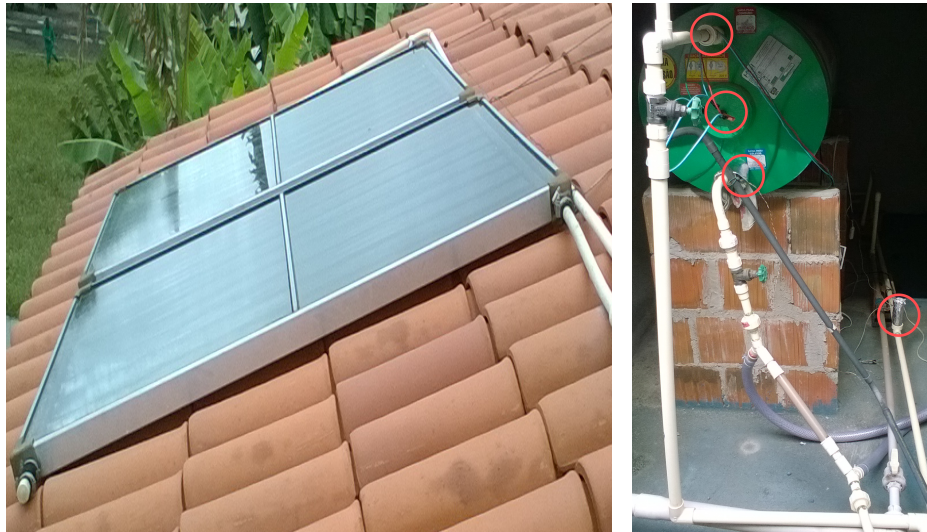
Fonte: Autoria própria

Na imagem 14(a), é ilustrado os coletores utilizados, e na Figura 14(b) nota-se as conexões entre os componentes, e é destacado em vermelho os pontos de aplicação dos sensores.

Para a coleta das grandezas físicas necessárias para avaliar a resposta do sistema, optou-se por utilizar os sensores LM35 e DS18B20 para medição da temperatura da água. Também foi desenvolvido uma aplicação web para análise e visualização dos dados em conjunto com um banco de dados para armazenamento.

Já que o sistema do estudo não apresenta nenhuma outra fonte auxiliar de aqueci-

**Figura 13: Sistema estudado.**

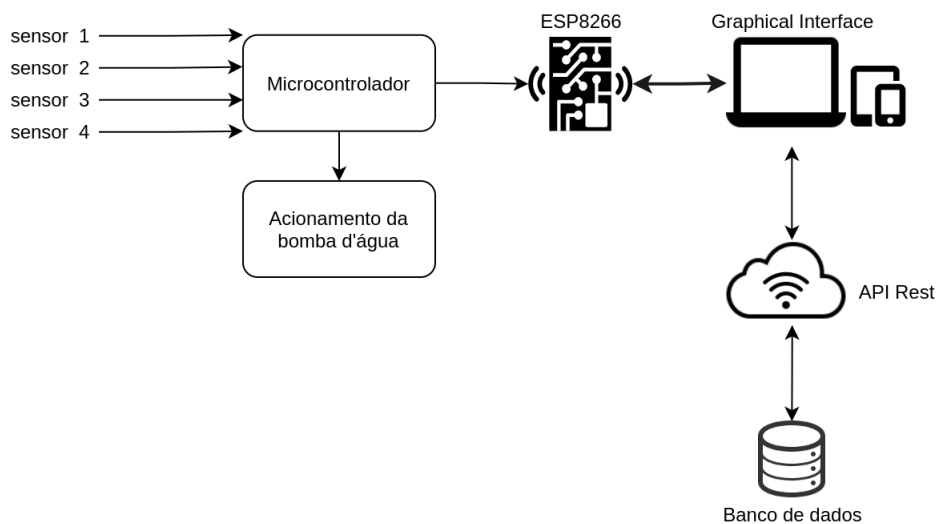


(a) Coletores solar.

(b) Sistema de aquecimento.

mento, foi desenvolvido um sistema para controle da bomba d'água visando o aumento no desempenho da circulação forçada. Portanto, foi feito o uso de microcontroladores como PIC e ESP para efetuar a comunicação entre outros dispositivos, o controle de periféricos à distância, tratamento e envio de dados. O diagrama de blocos de etapas que serão executadas para concretização do estudo é apresentado na figura 14.

**Figura 14: Diagrama de funcionamento.**



Fonte : Autoria própria

### 3.1 Sensores

Inicialmente cogiou-se utilizar o termopar tipo K, porém optou-se por aplicar neste trabalho os sensores LM35 e DS18B20 para o monitoramento da temperatura da água. A mudança dos sensores ocorreu devido à praticidade em trabalhar com sensores digitais e integrar no circuito desenvolvido. Ambos sensores apresentam boa acurácia para a aplicação proposta, são altamente sensíveis promovendo assim um rápido tempo de resposta. Além disso, o circuito no qual estes sensores são inseridos é simples, facilitando a integração e o desenvolvimento do sistema.

Na tabela 4 são apresentadas características relevantes de cada sensor utilizado neste trabalho.

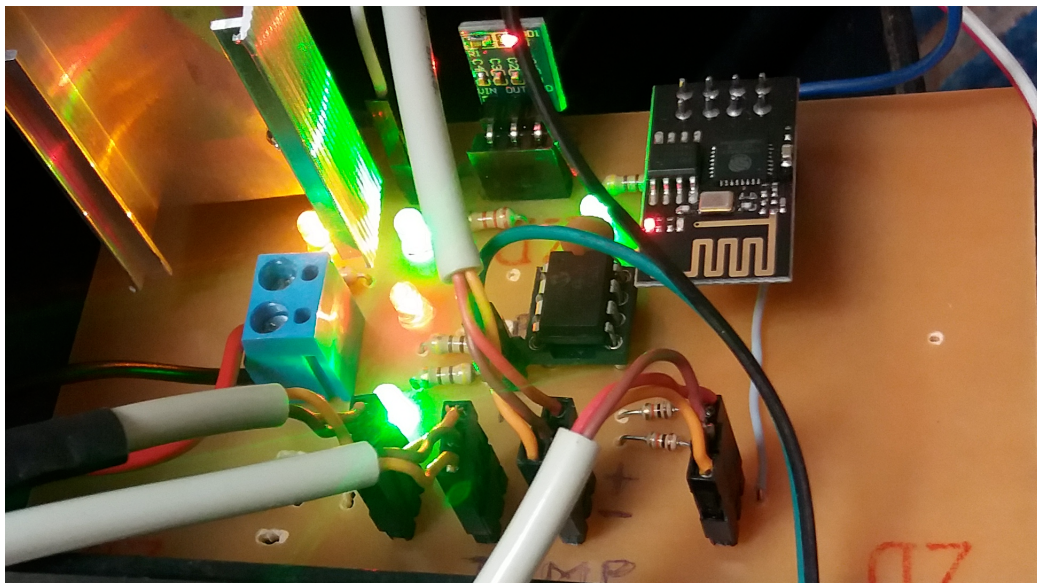
**Tabela 4: Características dos sensores.**

Sensores	Acurácia	temperatura de operação	alimentação
LM35	0.5 (à 25°C)	-55°C a 150°C	4V a 30V
DS18B20	+/-0.5 (entre -10°C e +85°C)	-55°C a 125°C	3.3V a 5.5V

### 3.2 Hardware e Instrumentação

Foi utilizado o PIC12F675 para o tratamento da resposta dos sensores de temperatura assim como o controle da bomba. Este por sua vez conectado ao ESP-01 que irá enviar os dados para uma interface gráfica, que, por sua vez, enviará os dados para a API. Na Figura 15, é ilustrado o circuito desenvolvido para o trabalho.

**Figura 15: Circuito final.**





### 3.3 Softwares e ambientes de desenvolvimento

Para o desenvolvimento e simulação de componentes ou circuitos apresentados no projeto foi necessário fazer uso de algumas ferramentas como:

- MPLab: ambiente de programação para o PIC12F675;
- Arduino: foi utilizado para programação do ESP8266.

### 3.4 Modelagem para banco de dados

Foi utilizado o banco de dados MySQL devido à flexibilidade, facilidade de uso, segurança e alto desempenho. Em acréscimo, o tipo de aplicação não apresenta composição complexa.

Este banco foi desenvolvido tanto para o armazenamento das medições realizadas neste trabalho quanto para estudos futuros a serem realizados no Laboratório de Medição e Instrumentação (LMI). A modelagem criada pode ser observada na figura 16, que consiste em:

- Medições : neste campo se concentra o valor das medições que serão realizadas em conjunto com a data e horário de aquisição dos dados.
- Tipos de valores: esta tabela é referente à classificação da unidade das medições, além de referenciar os usuários que tem relação com algum tipo de medida. Isto permite a distinção de trabalhos futuros que utilizem a mesma base de dados.
- Usuários: esta tabela é responsável pela identificação dos usuários e suas respectivas medições.

**Figura 16: Modelagem do banco de dados.**



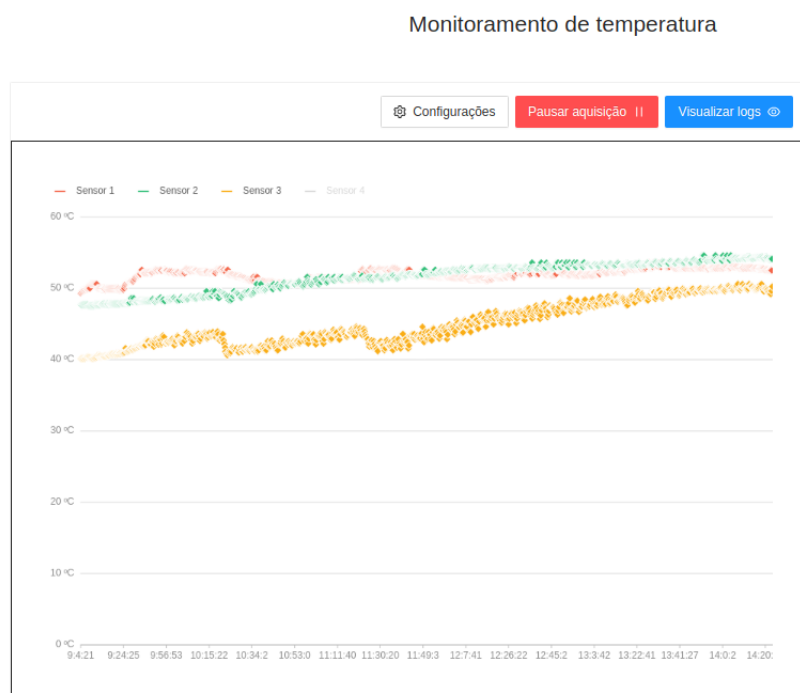
Fonte : Autoria própria

### 3.5 Interface gráfica

A página de monitoramento, estilo *Dashboard* mostra métricas e indicadores importantes para facilitar a compreensão das informações geradas de forma visual. A interface ilustra graficamente a leitura de todos os sensores presentes no sistema, possibilita um modo de depuração dos dados lidos e contém um simples formulário de configuração.

Esta interface foi desenvolvida em React, que é uma biblioteca do JavaScript que aumenta a performance da aplicação web, especializada em auxiliar na construção de interfaces gráficas para usuários (UDACITY, 2018).

**Figura 17: Interface gráfica de monitoramento.**

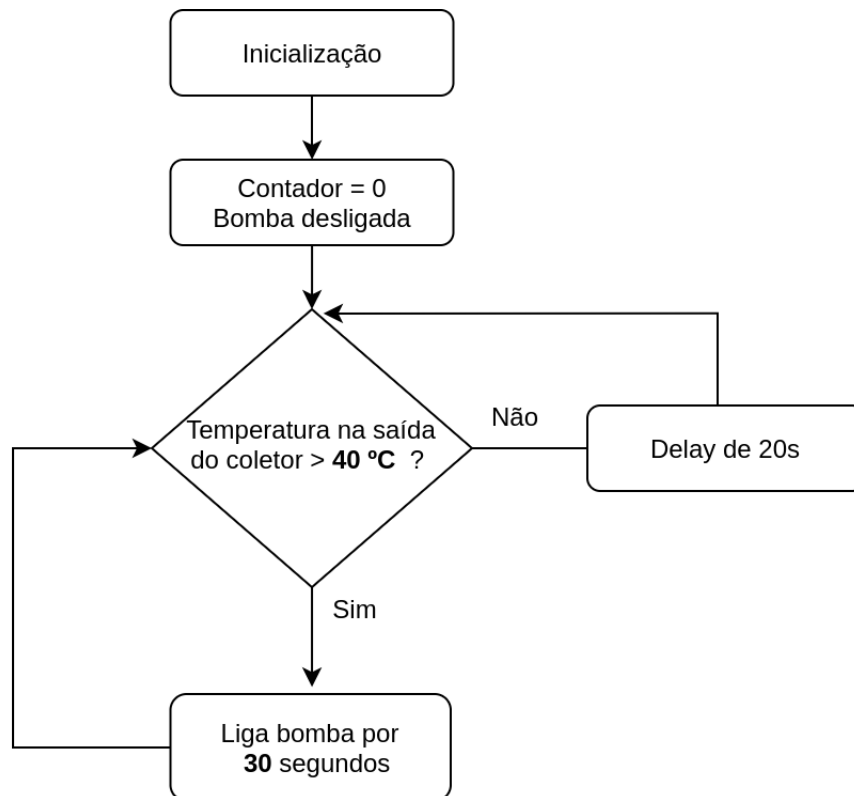


Fonte : Autoria própria

### 3.6 Algoritmo de controle

O controle da bomba d'água no sistema com circulação forçada foi realizado pelo PIC12F675. O fluxograma de controle, representado pela figura 18, consiste em verificar constantemente a temperatura na saída do coletor e, o *loop* permanece até que a temperatura da água ultrapasse o *setpoint* predefinido. Então foi efetuado o acionamento da bomba durante um intervalo de tempo, também pré-definido. No momento de execução do *delay* os dados serão enviados para a plataforma web de visualização. Este delay é o tempo necessário para que a bomba transporte a carga de água aquecida para o boiler. Este tempo não pode ser muito longo, pois ocorreria o transporte de água fria para o topo do boiler.

Figura 18: Algoritmo de controle.



Fonte : Autoria própria

É importante destacar que o firmware utilizado foi desenvolvido com auxílio da equipe do laboratório.

### 3.7 Comunicação entre módulos

O ESP-01 é responsável pelo envio e recepção de dados via protocolo L3, e a interface gráfica (Figura 17) é responsável pelo intercâmbio de informações com a API e o banco de dados. O ESP-01 é conectado fisicamente com o PIC12F675, sendo este o dispositivo *slave*, e envia comandos, ou solicita pacotes de dados via protocolo de comunicação I2C.

A API foi desenvolvida em Python e apresenta o modelo CRUD (*Create Read Update Delete*). Este acrônimo é geralmente utilizado para definir as quatro operações básicas usadas em banco de dados relacionais.

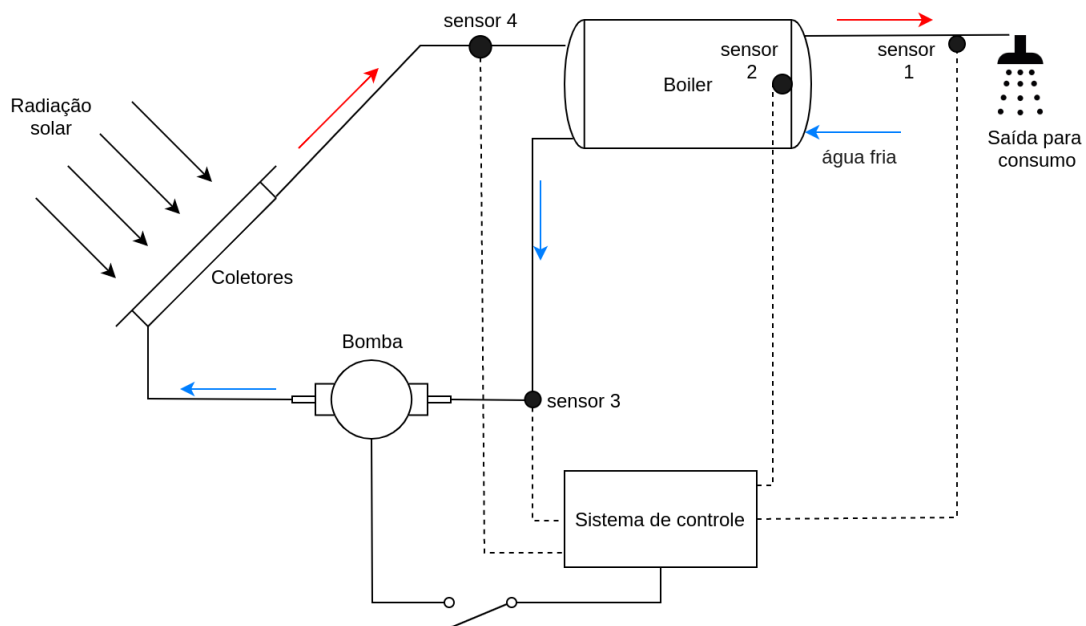
### 3.8 Aquisição de dados

A análise da resposta dos modos de configuração para aquecimento como circulação forçada e termossifão foi obtida entre 10 e 14 horas, pois de acordo com Duffie e Beckman

(1980, p. 57) é o intervalo em que a radiação solar apresenta maior intensidade, nos períodos correspondentes ao verão e inverno, com taxa de aquisições a cada 20 segundos. Serão utilizados quatro sensores, sendo três unidades do LM35 e uma unidade do DS18B20 para medição da temperatura da água.

É ilustrado na figura 19 o esquema de posicionamento dos sensores no sistema para aquecimento de água, em que haverá: um sensor na saída dos coletores (sensor 4), na tubulação correspondente a água de consumo (sensor 1), no interior do reservatório térmico (sensor 2) e na saída do reservatório (sensor 3). O equilíbrio térmico no reservatório pode ser observado quando a temperatura da água na entrada em relação a saída dos coletores registrar uma diferença pequena diferença e confirmado pelo DS18B20 presente em seu interior. A uso de quatro sensores para este estudo, foi motivado pelo monitoramento, controle e análise do sistema. O sensor 4 foi utilizado para controle da ativação da bomba d'água e utilizado em umas das métricas de análise, os sensores 1 e 2 serviram para complementar o monitoramento do comportamento do sistema. Por fim, o sensor 3, cuja resposta foi utilizada em todas as análises desenvolvidas.

**Figura 19: Esquemático do sistema solar para aquecimento de água.**



Fonte: Autoria própria

### 3.9 Avaliação de dados

Uma vez que o trabalho tem como objetivo comparar a performance entre circulação forçada e termossifão, a análise comparativa entre os resultados obtidos foi realizada por meio da regressão linear e recarga térmica. A regressão linear é obtida pela relação temperatura por minuto e utilizando o software Libreoffice Calc para encontrar

a equação. Da equação obtida para cada uma das amostras utilizadas, foi calculada a média de todos os coeficientes angular e então realizar a relação:  $\frac{m_{forçada}}{m_{termossifão}}$ . Sendo assim, o resultado dessa divisão irá informar o ganho que se obtém utilizando o sistema com circulação forçada.

O outro método utilizado é a recarga térmica, este termo é representado em porcentagem e informar o quantitativo de aquecimento do sistema ao longo do período de funcionamento, ou seja, o quanto é possível aquecer em relação a energia fornecida ao sistema. Este método foi desenvolvido a partir de amostras de teste. O cálculo da recarga térmica é expresso por:

$$RT = \frac{T_{final} - T_{inicial}}{T_{média} - T_{inicial}} \times 100 \quad (4)$$

De modo que :

- RT é a recarga térmica que representa o percentual do aumento de temperatura no determinado intervalo;
- $T_{final}$  e  $T_{inicial}$  representam a temperatura final e inicial determinadas na parte inferior do boiler, na saída para o coletor solar;
- $T_{média}$  é temperatura média medida na entrada superior do reservatório térmico, que corresponde ao retorno do coletor solar, ou seja, representa a maior temperatura no sistema.

Esta fórmula foi desenvolvida após alguns experimentos comparativos entre ambas configurações de aquecimento e evidencia de maneira direta o ganho de um sistema em relação ao outro. Além disso, independentemente, a expressão já realiza a normalização dos dados.

Por fim, foi feita a análise da energia absorvida pelo sistema para ambos os métodos de circulação. Calcula-se média móvel da potência e então aplica-se a integral na curva obtida para obter a energia absorvida.

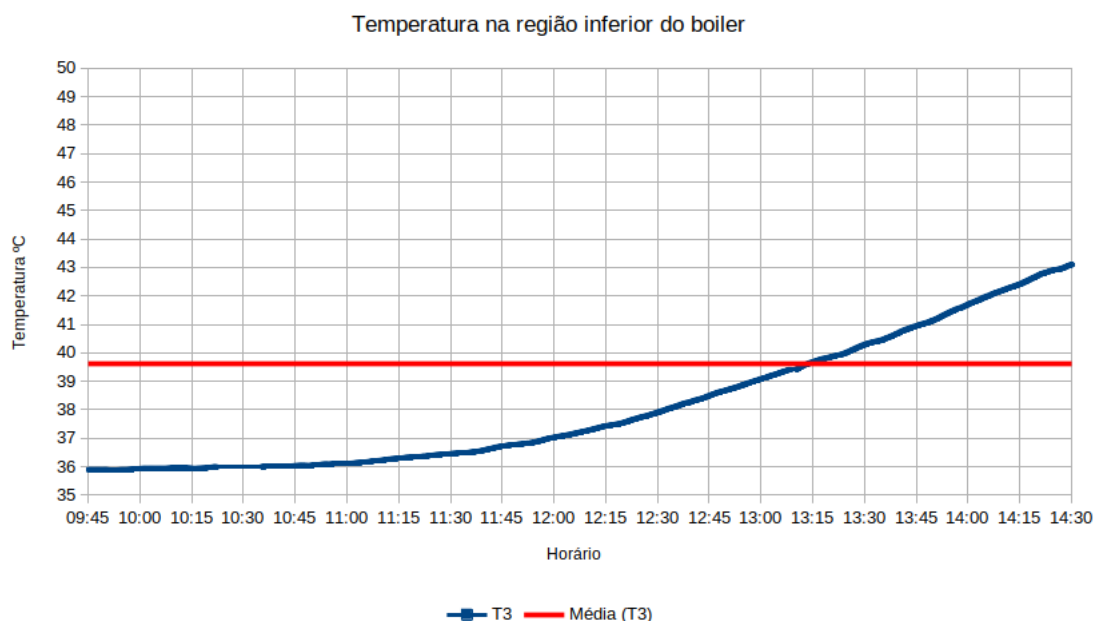
## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos a partir da metodologia proposta. Em sequência são apresentadas as análises e correlações obtidas a partir das retas de regressão dos dados, recarga térmica e energia absorvida pelo sistema.

### 4.1 Regressão linear dos dados

Para realizar a análise dos dados foi preciso finalizar o desenvolvimento do sistema web, pois este permite controlar e armazenar as aquisições. Uma vez que esta etapa foi concluída, é possível observar nas figuras 20 e 21 exemplo das amostras obtidas.

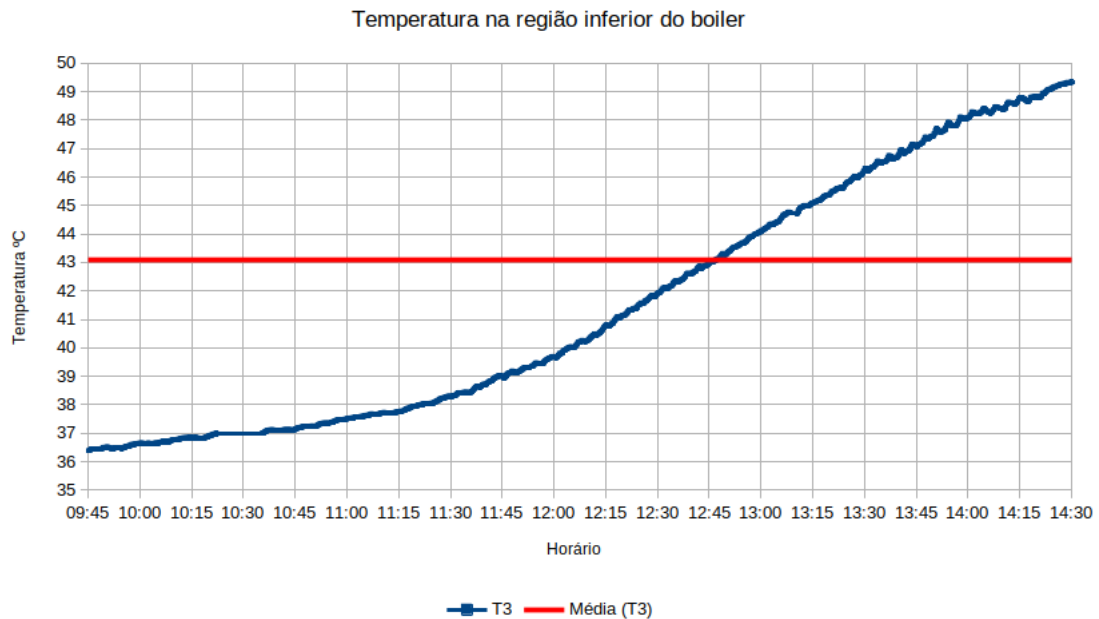
**Figura 20: Curva de temperatura utilizando termossifão.**



**Fonte: Autoria própria**

Os gráficos ilustrados representam a temperatura na região inferior do boiler. O ponto de aquisição remete às leituras do sensor 3, sendo este ilustrado pela figura 19. Ao observar ambos os gráficos, é notória a diferença entre a inclinação das curvas, de modo que o aquecimento realizado por circulação forçada é mais eficiente, já a temperatura da água é mais elevada dado um intervalo de tempo. Para melhor compreensão dos resultados obtidos, foi gerada uma regressão linear para cada uma das amostras com o auxílio do software Libreoffice Calc. É importante destacar que a regressão foi realizada entre o intervalo das 11 às 13 horas, pois foi observado que neste intervalo não houve presença de distorções, como ilustrado na figura 22. Na figura mencionada, nota-se que no intervalo das 11:15 às 11:30 houve um declínio na temperatura, caracterizando possivelmente um consumo no sistema e levando a reposição da água com temperatura mais baixa no boiler.

**Figura 21: Curva de temperatura utilizando circulação forçada.**



**Fonte: Autoria própria**

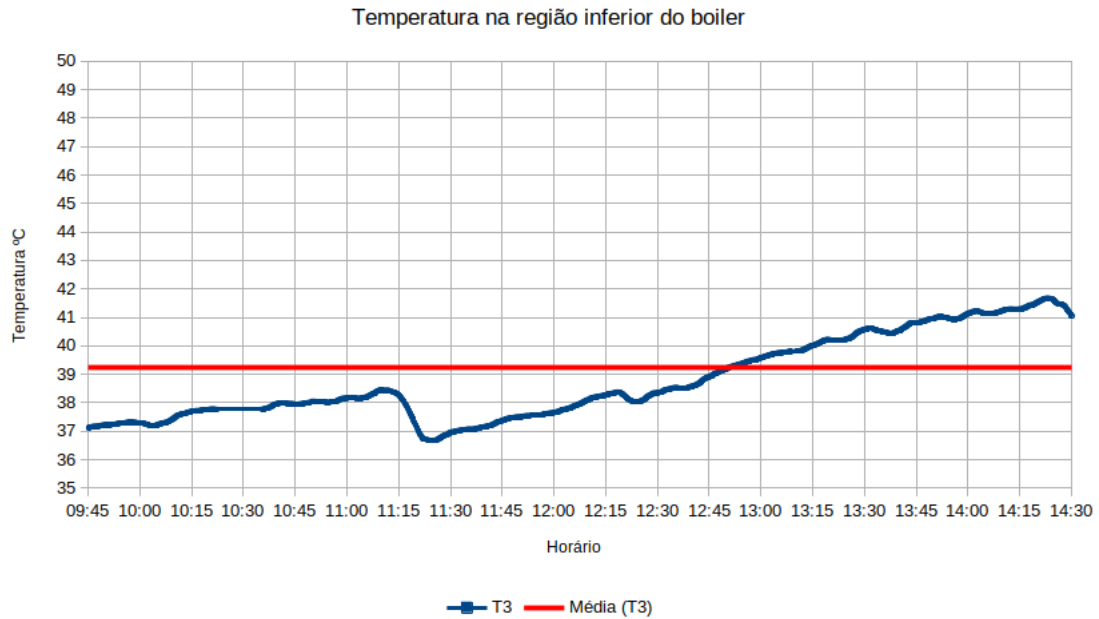
Como foi abordado na seção 3.9, a análise do coeficiente linear apresenta um alto grau de relevância na comparação entre os métodos de circulação. Para obter uma melhor consistência nos dados apresentados, foram selecionadas amostras que apresentaram sutis sinais de interferências, como consumo e presença de nuvens sob a placa no período especificado. Então a partir disso, na tabela 5 são apresentados o coeficiente angular obtido por regressão linear para os dois métodos de circulação, e juntamente com o coeficiente de determinação.

**Tabela 5: Interpolação linear da temperatura.**

Nº Amostra	Circulação	Coef. angular	$R^2$
1	Forçada	0,041	0,889
2	Forçada	0,059	0,979
3	Forçada	0,066	0,976
4	Forçada	0,057	0,973
5	Forçada	0,050	0,992
6	Natural	0,036	0,977
7	Natural	0,032	0,997
8	Natural	0,024	0,953
9	Natural	0,027	0,974
10	Natural	0,024	0,954

Em um primeiro momento, ao se observar a tabela 5, nota-se que os coeficientes apresentam ordem escalar relativamente pequena, porém bastante significativo quando

**Figura 22: Curva de temperatura com interferência de fatores externos.**



**Fonte: Autoria própria**

comparados entre si, como é possível observar na tabela 6.

**Tabela 6: Média dos coeficientes angular.**

Circulação	Média	desvio padrão
Forçada	0,0546	0,0095
Natural	0,0286	0,0053

Com base na tabela 6, torna-se mais evidente a diferença entre os métodos de circulação para o tipo de sistema abordado neste trabalho. Fazendo a relação entre as médias dos coeficientes lineares obtidas a partir da interpolação das curvas de temperatura, é obtido então a seguinte expressão:

$$\frac{m_{forçada}}{m_{termossifão}} = \frac{0,0546}{0,0286} = 1,909 \quad (5)$$

De modo que,  $m_{forçada}$  e  $m_{termossifão}$  representam a média dos coeficientes angular obtidos a partir das regressões circulação forçada e termossifão respectivamente. Desta forma, a equação 5 representa o ganho na velocidade de aquecimento.

A partir desta perspectiva, observa-se que a taxa de aquecimento com circulação forçada é aproximadamente duas vezes superior ao método de circulação natural. Ou seja, dada condições semelhantes, o método de circulação forçada permite que a água seja aquecida numa taxa aproximada duas vezes mais rápida se comparada a circulação por



termossifão.

## 4.2 Energia total do sistema

Outro aspecto que solidifica a diferença entre os métodos de circulação para sistema de aquecimento solar, é o quantitativo da energia total absorvida. A partir das amostras mencionadas na seção 4.1, calculou-se então a energia absorvida pelo sistema e gerando a tabela 7.

**Tabela 7: Energia absorvida pelo sistema.**

Nº Amostra	Circulação	Energia (J)
1	Forçada	28302,60
2	Forçada	33640,90
3	Forçada	36046,60
4	Forçada	31364,10
5	Forçada	28866,96
6	Natural	24051,49
7	Natural	19420,39
8	Natural	13741,50
9	Natural	13870,59
10	Natural	13698,05

A partir da tabela 7, obteve-se a tabela 8, e a partir dela, nota-se que o sistema com circulação forçada apresenta uma energia total próxima ao dobro da energia gerada por termossifão.

**Tabela 8: Média da energia gerada a partir do sistema solar.**

Circulação	Média (J)	desvio padrão (J)
Forçada	31644,23	3252,91
Natural	16956,40	4660,64

Analogamente ao ganho obtido na seção 4.1, realizando um comparação entre as médias da energia para sistema com circulação forçada e termossifão resulta em:

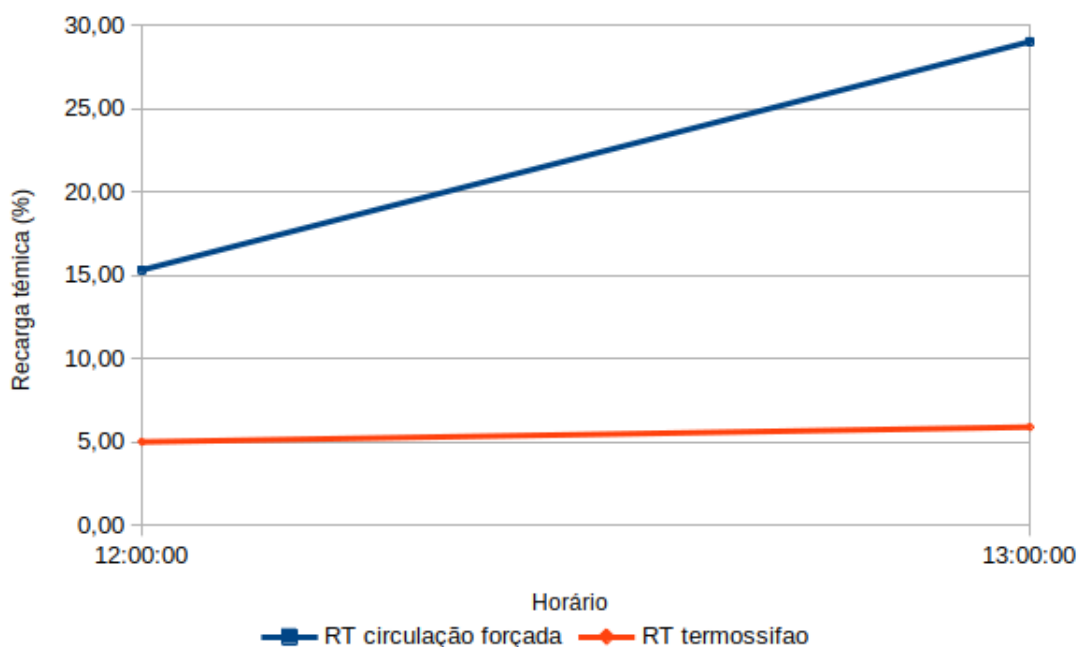
$$\frac{31644,23J}{16956,40J} = 1,87 \quad (6)$$

A partir disso, percebe-se também que a relação é semelhante a apresentada no tópico anterior.

### 4.3 Recarga térmica

A partir da análise da recarga térmica, é possível observar como se comporta o aproveitamento da energia fornecida pelo sol para os métodos de circulação forçada e termossifão. Na figura 23 é ilustrada a média da recarga térmica para os dois métodos de circulação. É importante ressaltar que a porcentagem de recarga foi calculada apenas das 12 às 13 horas, pois o intervalo de tempo foi reduzido devido a menor presença de interferências, como foi mencionado na seção 4.1. A partir do resultado do termo calculado dessa seção, é notório graficamente que a capacidade de aquecimento do sistema de circulação forçada é significativamente superior à circulação por termossifão.

**Figura 23: Recarga térmica para ambos métodos de circulação.**



**Fonte: Autoria própria**

O uso de componentes elétricos que auxiliam a movimentação da água num sistema de aquecimento solar, é considerada uma desvantagem, como foi mencionado na seção 2.3.2. Porém, no sistema de controle desenvolvido, o consumo energético proveniente da bomba d'água é muito baixo, o aparelho tem 35W de potência, além de ser ativado numa baixa frequência por um curto período de tempo. Sendo assim, o uso de circulação forçada apresentou ser mais vantajoso em relação a circulação natural, pela eficiência e sem impactos significativos no consumo energético.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma análise comparativa entre dois métodos: circulação forçada e termossifão, utilizados em sistemas solar para aquecimento de água. Dadas as condições climáticas da região em que o estudo foi realizado e os resultados explorados, é possível concluir que o sistema com circulação forçada apresenta eficiência superior em relação ao método termossifão. O ganho da eficiência foi significativo, já que dado um intervalo de tempo, o sistema para aquecimento com circulação forçada elevará a temperatura aproximadamente duas vezes mais. Devido à pandemia do COVID-19, não foi possível utilizar componentes para enriquecer o estudo da caracterização do ambiente, como o piranômetro, inicialmente proposto para ser desenvolvido em laboratório.

Para trabalhos futuros, a presença de um piranômetro é importante para caracterizar os níveis de incidência solar e com isso demonstrar o padrão dos dias analisados. Outro ponto a ser trabalhado é o quantitativo de amostras, a fim de melhorar estatisticamente o resultado encontrado e realizar um controle mais refinado com ajuste do fluxo da água.

## REFERÊNCIAS

- AI-THINKER. *ESP-01 WiFi Module*. 2015. Disponível em: <http://www.microchip.ua/wireless/esp01.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2020.
- ALUTAL. *Tipos de Termopares*. 2021. Disponível em: <https://www.alutal.com.br/br/wiki/termopares/03-tipos-de-termopares>. Acesso em: 04 abr. 2021.
- AMORIM, M. F. de. *L3: Protocolo de Comunicação Para Telemetria*. 2017. Disponível em: <Documentointernodolaboratrio>.
- ANEEL. *Energia Solar*. 2012. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\Solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia\Solar(3).pdf). Acesso em: 7 ago. 2020.
- ARA, P. J. S.; SOWMY, D. S.; PRADO, R. T. A. Influência de variações da espessura da placa e da quantidade de tubos no fator de eficiência de coletores solares planos para aquecimento de água. In : *Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- ARVIZU, D. et al. *Direct Solar Energy*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], 2011.
- AXAOPOULOS, P.; PANAGAKIS, P.; KYRITSIS, S. Experimental comparison of a solar-assisted heat pump vs. a conventional thermosyphon solar system. *International Journal of Energy Research*, v. 22, n. 13, p. 1107–1120, 1998. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/\\%28SICI\\%291099-114X\\%2819981025\\%2922\\%3A13\\%3C1107\\%3A\\%3AAID-ER426\\%3E3.0.CO\\%3B2-E>.
- BORGES, T. P. d. F. et al. Síntese otimizada de sistemas de aquecimento solar de água. [sn], 2000.
- BRASIL, R. Noções iniciais sobre o aquecimento solar. *Rede Brasil de Capacitação em Aquecimento Solar*, 2008.
- DIGI. *Zigbee Wireless Mesh Networking*. 2021. Disponível em: <https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>. Acesso em: 06 abr. 2021.
- DINCER, I.; ROSEN, M. A. Chapter 4 - heat pump systems. In: DINCER, I.; ROSEN, M. A. (Ed.). *Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning*. Boston: Elsevier, 2015. p. 131–168. ISBN 978-0-12-417203-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124172036000041>.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. [S.l.]: Wiley New York, 1980.
- INSTRUMENTS, T. *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. 1999. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2021.
- INTEGRATED, M. *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. 2019. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2021.

IRAZABAL, J.-M.; BLOZIS, S. *I<sup>2</sup>C Manual*. 2003. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10216.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2021.

KABIR, E. et al. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 894–900, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313485>.

KALOGIROU, S. A. Chapter 1 - introduction. In: KALOGIROU, S. A. (Ed.). *Solar Energy Engineering (Second Edition)*. Second edition. Boston: Academic Press, 2014. p. 1–49. ISBN 978-0-12-397270-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123972705000017>.

KALOGIROU, S. A. Chapter 10 - solar thermal power systems. In: KALOGIROU, S. A. (Ed.). *Solar Energy Engineering (Second Edition)*. Second edition. Boston: Academic Press, 2014. p. 541–581. ISBN 978-0-12-397270-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123972705000108>.

KALOGIROU, S. A. Chapter 2 - environmental characteristics. In: KALOGIROU, S. A. (Ed.). *Solar Energy Engineering (Second Edition)*. Second edition. Boston: Academic Press, 2014. p. 51 – 123. ISBN 978-0-12-397270-5. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123972705000029>.

KALOGIROU, S. A. Chapter 5 - solar water-heating systems. In: KALOGIROU, S. A. (Ed.). *Solar Energy Engineering (Second Edition)*. Second edition. Boston: Academic Press, 2014. p. 257 – 321. ISBN 978-0-12-397270-5. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123972705000054>.

KASAP, S. Thermoelectric effects in metals: thermocouples. *Canada: Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan*, 2001.

KUROSE, J.; ROSS, K. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 6. ed. [S.l.]: Pearson Education Limited, 2012.

LIMA, J. B. A. *Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.

LIOHM. *Características dos sensores de temperatura NTC e PTC*. 2017. Disponível em: <http://www.addtherm.com.br/sensores-de-temperatura-ntc-e-ptc/>. Acesso em: 1 ago. 2020.

MATAVELLI, A. C. Energia solar: geração de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas. *Monografia apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo*. Lorena: EEL USP, 2013.

MICROCHIP. *PIC12F675 Data Sheet*. 2010. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41190c.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2021.

MORRISON, G.; BRAUN, J. System modeling and operation characteristics of thermosyphon solar water heaters. *Solar Energy*, v. 34, n. 4, p. 389 – 405, 1985. ISSN 0038-092X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X85900519>.

NORTON, B.; PROBERT, S. Achieving thermal rectification in natural-circulation solar-energy water heaters. *Applied Energy*, v. 14, n. 3, p. 211 – 225, 1983. ISSN 0306-2619. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261983900648>.

NXP. *I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual*. 2014. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2020.

PLANAS, O. *COLETORES SOLARES TÉRMICOS*. 2015. Energia Solar. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/solar-termica/componentes/coletores-solares-termicos>. Acesso em: 24 jul. 2020.

POLLOCK, D. D. *Thermocouples: theory and properties*. [S.l.]: CRC press, 1991.

POSTGRES. *What is PostgreSQL?* 2020. Disponível em: <https://www.postgresqltutorial.com/what-is-postgresql/>. Acesso em: 8 ago. 2020.

ROSA, A. R. O. da; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no brasil. *Revista brasileira de energia solar*, v. 7, n. 2, p. 140–147, 2016.

ROUSE, M. *MySQL*. 2018. Disponível em: <https://searchoracle.techtarget.com/definition/MySQL>. Acesso em: 8 ago. 2020.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. Chapter 3 - solar collectors. In: SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. (Ed.). *Solar Heating and Cooling Systems*. Academic Press, 2017. p. 29 – 97. ISBN 978-0-12-811662-3. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128116623000037>.

SHARMA, V.; DAVE, M. Sql and nosql databases. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, v. 2, n. 8, 2012.

SIQUEIRA, D. A. et al. Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

SMART home, um novo mercado em crescimento. 2019. TI Inside. Disponível em: <https://tiinside.com.br/06/11/2019/smart-home-um-novo-mercado-em-crescimento/>. Acesso em: 31 jul. 2020.

TIAN, Y.; ZHAO, C. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, v. 104, p. 538 – 553, 2013. ISSN 0306-2619. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008549>.

TUTORIALSPPOINT. *MongoDB - Overview*. 2020. Disponível em: [https://www.tutorialspoint.com/mongodb/mongodb\\\_overview.htm](https://www.tutorialspoint.com/mongodb/mongodb\_overview.htm). Acesso em: 8 ago. 2020.

UDACITY. *POR QUE UM DESENVOLVEDOR FRONT-END DEVE SABER REACT*. 2018. Disponível em: <http://tutano.trampos.co/16866-desenvolvedor-front-end-react/>. Acesso em: 6 ago. 2020.

UGREEN. *Aquecimento Solar, economia e benefícios*. 2019. Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/aquecimento-solar-economia-e-beneficios/>. Acesso em: 09 abr. 2021.

VASQUES, B. L. R. P. et al. *Protocolo Zigbee*. 2010. Engenharia Eletrônica e de Computação Redes de Computadores I. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/grad/10\\\_1/zigbee/index.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/10\_1/zigbee/index.html). Acesso em: 1 Agosto 2020.

WEINSTEIN, L. A. et al. Concentrating solar power. *Chemical Reviews*, v. 115, n. 23, p. 12797–12838, 2015. PMID: 26511904. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00397>.