



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SAÚDE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Erick Izidoro Caetano

**Um Controlador Inteligente para Otimização de Sistemas de Aquecimento de  
Água com Coletores Solares**

Araranguá  
2023

Erick Izidoro Caetano

**Um Controlador Inteligente para Otimização de Sistemas de Aquecimento de  
Água com Coletores Solares**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Centro de Ciência, Tecnologia e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.  
Orientador: Prof. Jim Lau, Dr.

Araranguá  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Caetano, Erick Izidoro

Um controlador inteligente para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares / Erick Izidoro Caetano ; orientador, Jim Lau, 2023.

34 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Lógica Fuzzy. 3. Inteligencia Artificial. 4. IoT. 5. Otimização de sistemas de aquecimento de água. I. Lau, Jim. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Computação. III. Título.

Erick Izidoro Caetano

## Um Controlador Inteligente para Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água com Coletores Solares

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Computação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, 16 de Junho de 2023.



Documento assinado digitalmente  
Jim Lau  
Data: 19/06/2023 13:55:00-0300  
CPF: \*\*\*.464.702-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Jim Lau, Dr.  
Coordenador do curso

### Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente  
Jim Lau  
Data: 19/06/2023 13:55:11-0300  
CPF: \*\*\*.464.702-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Jim Lau, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC



Documento assinado digitalmente  
Fabio Rodrigues de La Rocha  
Data: 19/06/2023 14:40:14-0300  
CPF: \*\*\*.007.520-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Fábio Rodrigues de La Rocha, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC



Documento assinado digitalmente  
Alison Roberto Panisson  
Data: 19/06/2023 15:36:45-0300  
CPF: \*\*\*.887.420-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Alison Roberto Panisson, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC

# Um Controlador Inteligente para Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água com Coletores Solares

Erick Izidoro Caetano

16 de Junho de 2023

## RESUMO

A utilização da energia solar no Brasil tem crescido nos últimos anos, especialmente como meio de aquecimento da água nos chuveiros. Isso ocorre devido ao constante aumento do custo da energia elétrica decorrente das crises econômicas de 2019 e 2020. Embora seja uma fonte renovável e econômica em longo prazo, ela não substitui completamente o uso de outras fontes de energia em dias com baixa radiação, com o intuito de garantir uma temperatura agradável durante o banho. A utilização da energia solar é realizada por meio de controladores programados pelo usuário para fornecer uma temperatura específica em um intervalo de tempo determinado. Caso a temperatura não seja alcançada nesse período, o sistema aciona a energia elétrica ou a gás como suporte. No entanto, o sistema não considera a água quente já presente no boiler, resultando na adição de água fria e na redução da temperatura, o que requer o acionamento de outra fonte de energia. Este trabalho propõe a aplicação da Internet das Coisas (IoT) para implementar um controlador inteligente, visando gerenciar a entrada de água fria no reservatório, aprimorando o desempenho do sistema e reduzindo o uso de outras fontes de energia. Ao combinar o algoritmo Fuzzy a microcontroladores e sensores, além de utilizar um banco de dados de série temporal para armazenar os dados, torna-se viável minimizar o consumo excessivo de fontes alternativas para aquecer a água do chuveiro em momentos de baixa radiação solar.

**Palavras-chaves:** Aquecimento solar; Fuzzy; IoT.

# Um Controlador Inteligente para Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água com Coletores Solares

Erick Izidoro Gaetano

16 de Junho de 2023

## ABSTRACT

The use of solar energy in Brazil has grown in recent years, especially as a means of heating water in showers. This is due to the constant increase in the cost of electricity resulting from the economic crises of 2019 and 2020. Although it is a renewable and economical source in the long term, it does not completely replace the use of other energy sources on days with low radiation, with the aim of to ensure a pleasant temperature during the bath. The use of solar energy is carried out through controllers programmed by the user to provide a specific temperature in a determined time interval. If the temperature is not reached within this period, the system activates electricity or gas as support. However, the system does not consider the hot water already present in the boiler, resulting in the addition of cold water and a reduction in temperature, which requires the activation of another source of energy. This work proposes the application of the Internet of Things (IoT) to implement an intelligent controller, aiming to manage the cold water input in the reservoir, improving the system performance and reducing the use of other energy sources. By combining the Fuzzy algorithm with microcontrollers and sensors, in addition to using a time series database to store the data, it becomes feasible to minimize the excessive consumption of alternative sources to heat shower water in times of low solar radiation.

**Keywords:** solar heating; Fuzzy; IoT.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as tarifas de energia elétrica têm sofrido reajustes anuais significativos, tornando-se uma preocupação para as famílias brasileiras. Em 2015, por exemplo, o aumento tarifário foi duas vezes superior à taxa de inflação, o que se repetiu nos anos seguintes. No período de 2015 à 2021, a fatura de energia elétrica registrou um aumento acumulado de 114%, em comparação com os 48% de inflação (CORSINI, 2022). Em junho de 2022, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou um ajuste tarifário anual para a empresa de distribuição de energia elétrica ENEL (Distribuição São Paulo - Enel-SP), que atende aproximadamente 7,6 milhões de unidades consumidoras no estado de São Paulo. Esse ajuste resultou em um acréscimo de 10,15% na conta de luz para baixa tensão e 18,03% para alta tensão, conforme publicado pela (ANEEL, 2022).

Conforme (ENETEC, 2022), o aumento das tarifas, juntamente com o aumento do consumo de energia elétrica nas residências ao longo dos últimos anos, configura um desafio para o orçamento familiar. Entre os 5 principais responsáveis pelo alto valor das contas de luz, destacam-se o ar-condicionado, amplamente utilizado no Brasil devido ao clima tropical. Seu consumo varia de 129 a 679 kWh. Em segundo lugar, encontra-se o chuveiro elétrico, que pode consumir até 88 kWh em apenas 30 minutos de uso. Em seguida, temos o fogão elétrico, o qual apresenta elevado consumo, chegando a cerca de 68 kWh. A geladeira, um eletrodoméstico indispensável, pode consumir até 57 kWh, considerando que permanece em funcionamento 24 horas por dia. Em quinto lugar, temos a lava-louças, que, com um tempo médio de utilização de aproximadamente 40 minutos por dia durante 1 mês, pode consumir cerca de 31 kWh. A tabela 1 apresenta o ranking dos equipamentos e seus respectivos consumos.

Tabela 1 – Consumo por equipamento. Produzido pelo autor com base na (ENETEC, 2022)

Equipamento	Consumo
Ar condicionado	129 kWh
Chuveiro elétrico	88 kWh
Fogão Cooktop	68 kWh
Freezer	54 kWh
Lava-louças	31 kWh

Conforme apontado por (REIS, O. A. d. O. *et al.*, 2021), um chuveiro elétrico operando em sua potência máxima pode consumir entre 5500 W a 7500 W, dependendo da voltagem, a qual pode variar entre 127 volts e 220 volts. Considerando que a população brasileira toma em média três banhos diários, o consumo de energia resultante torna-se considerável. Com o intuito de minimizar o impacto financeiro ocasionado pelos chuveiros elétricos na fatura de energia, o aquecedor de água solar tem se mostrado uma excelente alternativa. Conforme mencionado por (DIAS *et al.*, 2017), o

Brasil apresenta um vasto potencial de radiação solar, o que indica que a energia solar é a melhor opção para geração de energia no país. Por sua vez, (OLIVEIRA, 2019) destaca que a energia solar é a alternativa mais recomendada para uso residencial, porém ressalta a necessidade de estudos futuros para avaliar a eficácia de seu uso no aquecimento de água, uma vez que os modelos atuais ainda dependem parcialmente e constantemente da energia elétrica.

Os aquecedores solares, embora já estejam presentes no Brasil desde a década de 70, só se tornaram mais acessíveis na década de 90. Foi nesse período que houve melhorias na qualidade do produto e redução de seu preço. Com o aumento da adoção desse sistema, surgiram novos modelos e tecnologias distintas (SEBRAER, 2012).

O princípio de funcionamento do sistema convencional de aquecimento solar baseia-se na utilização da radiação solar como fonte de energia para aquecer a água. No entanto, em dias de baixa radiação ou durante a noite, é necessário recorrer a uma fonte auxiliar de aquecimento, podendo ser elétrica ou a gás. Mesmo com o uso dessas fontes adicionais, de acordo com (TAVARES; SOUSA, 2019), esse sistema consegue reduzir a tarifa de energia em aproximadamente 50%, o que é considerável e, portanto, sustentável.

Devido às frequentes variações nas tarifas de energia ocorridas nos últimos anos, (IHLE, 2019) realizou um estudo sobre a implementação de um sistema de aquecimento solar de água, aliado a duas fontes auxiliares, energia elétrica e gás. O objetivo dessa análise é utilizar a fonte auxiliar para reduzir o consumo de energia. Para realizar as análises, o autor utiliza um microcontrolador que realiza tomadas de decisão em tempo real, permitindo, dessa forma, a redução do consumo de energia, o que se reflete em uma conta de luz menos onerosa.

Segundo a pesquisa de (ORMENESE, 2009), a autora busca diminuir a fatura de energia em seu trabalho, com o intuito de otimizar o desempenho do sistema de aquecimento solar, especialmente em dias de baixa radiação, quando o sistema convencional requer o auxílio de energia adicional. A proposta apresentada pela autora envolve o uso de um controlador inteligente baseado na lógica fuzzy, que emprega técnicas de inteligência artificial.

A utilização da lógica Fuzzy possibilita que os sistemas computacionais processem informações que não são facilmente mensuráveis, como emoções, opiniões ou condições ambíguas. Essa abordagem lógica utiliza conjuntos Fuzzy para representar informações que são imprecisas ou incertas, permitindo que os sistemas tomem decisões com base em regras que consideram tais conjuntos (BEZDEK; HATHAWAY, 1974).

Deste modo, o presente trabalho propõe uma técnica de inteligência artificial, que tem o objetivo de reduzir o consumo de energia empregado no aquecimento de água em um reservatório térmico, visando minimizar a utilização excessiva de fontes



auxiliares, especialmente em dias de baixa radiação solar.

Nesta trabalho, será apresentada uma estrutura organizada em seções. Na seção 2, serão discutidos os fundamentos teóricos, com a descrição dos conceitos relacionados ao projeto. Em seguida, na seção 3, serão apresentados estudos relacionados ao controle de sistemas de aquecimento de água com coletores solares. A metodologia de desenvolvimento será detalhada na seção 4, com a descrição das etapas que compuseram a elaboração deste trabalho. A implementação do sistema será minuciosamente descrita na seção 5, seguida pela discussão dos resultados obtidos na seção 6. Na última seção 7, serão apresentadas as conclusões dos resultados, sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, são apresentados alguns conceitos relacionados ao tema proposto, que abrangem o sistema de aquecimento solar de água, sua fonte auxiliar de aquecimento, o conceito de Internet das Coisas (IoT), bem como a lógica fuzzy.

### 2.1 Aquecimento Solar de Água

O sistema de aquecimento solar pode ser aplicado em uma ampla variedade de empreendimentos, desde pequenas residências até hotéis e hospitais, com o objetivo principal de produzir água quente.

O aquecimento da água se dá por meio da energia solar, que é convertida em energia térmica pelos coletores solares. Esses equipamentos têm a responsabilidade de absorver e armazenar a radiação solar de diferentes naturezas, tais como a radiação direta, difusa e refletida (PINTO, 2020).

Os coletores solares apresentam diversas vantagens, tais como a considerável economia financeira proporcionada em seu uso diário, permitindo o retorno do investimento em até 7 anos; o benefício ecológico de ser uma fonte renovável de energia; e o conforto térmico que proporcionam (NEVES, 2013).

Para se obter uma boa absorção da radiação solar, é fundamental realizar o dimensionamento adequado dos coletores solares. Quando instalados no Brasil, a fim de garantir o máximo tempo de radiação solar, é recomendável que os coletores sejam direcionados para o norte geográfico. Caso essa orientação não seja viável, é necessário efetuar o cálculo das perdas a fim de otimizar o desempenho do sistema (ORMENESE, 2009).

O sistema de aquecimento solar de água reduz significativamente o consumo de outras fontes de energia, embora não as elimine por completo. Em dias com baixa radiação solar, quando a temperatura da água para banho não está adequada, é preciso acionar uma fonte auxiliar que normalmente fica desativada para complementar

o aquecimento (IHLE, 2019).

### 2.1.1 Elementos que compõem o aquecedor solar

O sistema de aquecimento solar é composto por três componentes principais: o reservatório de água fria, o reservatório térmico e os coletores solares. Na Figura 1, são apresentados os componentes de um sistema de aquecimento solar.

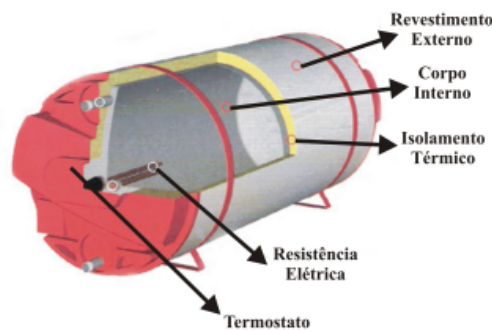
- **Reservatório Frio (Caixa d'Água Fria)**

O reservatório de água fria é empregado para abastecer o boiler, o qual é mantido cheio em um sistema convencional.

- **Reservatório Térmico (Boiler)**

O reservatório térmico tem como finalidade armazenar a água aquecida pelos coletores solares, sendo denominado de "boiler". Normalmente, esse reservatório apresenta um isolante térmico e um mecanismo suplementar para o aquecimento de água, que pode ser constituído por uma resistência elétrica ou um aquecedor movido a gás. Esse sistema complementar é ativado sobretudo em dias de baixa incidência de radiação solar (IHLE, 2019).

Figura 1 – Reservatório Térmico (Boiler)



Fonte: (ORMENESE, 2009)

- **Coletores Solares**

Os coletores solares são responsáveis pela absorção da radiação solar. A água percorre o interior das tubulações, recebendo o calor transferido pelas placas. Em geral, as tubulações são feitas de cobre, devido à sua alta condutividade térmica. De acordo com Neves (NEVES, 2013), a absorção de calor ocorre nas aletas feitas de cobre ou alumínio, que devem ser alinhadas às tubulações para transferir o calor. Para maximizar a absorção da energia solar pelas aletas, uma das faces das placas deve ser pintada em uma cor fosca preta, próxima ao negro, a fim de absorver uma grande porcentagem da energia.

Para proteger as aletas, tubulações e o isolamento, é construída uma caixa externa de alumínio, aço inoxidável, galvalume ou material termoplástico. Na parte superior, pode-se utilizar vidro ou polímero transparente, permitindo a passagem de radiação e produzindo um efeito estufa que protege contra as perdas de calor por convecção (PINTO, 2020). Na Figura 2, é apresentado um modelo de coletor solar.

Figura 2 – Coletor solar



Fonte: Autor

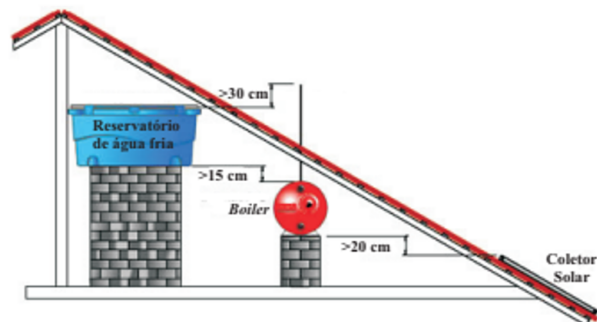
### 2.1.2 Funcionamento do aquecimento solar

O Sistema de aquecimento solar está dividido em dois tipos de circulação: natural e bombeada (ativa). Ambos os modelos têm como finalidade promover a circulação de água entre o boiler e os coletores, visando alcançar a homogeneização da temperatura em todo o sistema.

A circulação natural, ilustrada na Figura 3, ocorre por meio de um termosifão, no qual a água é aquecida nos coletores solares, tornando-se menos densa do que a água do boiler, que está mais fria. Isso, por sua vez, impulsiona a água quente a se movimentar, permitindo que retorne ao boiler e que a água fria seja direcionada para o coletor (PINTO, 2020).

No sistema de circulação natural, os coletores devem ficar um pouco abaixo da altura do boiler. Segundo Bezerra (BEZERRA, 1981), é recomendado que o coletor esteja em um ângulo de inclinação equivalente ao da latitude local mais 10°, para permitir um melhor aproveitamento da radiação solar em virtude da variação anual.

Figura 3 – Sistema circulação natural

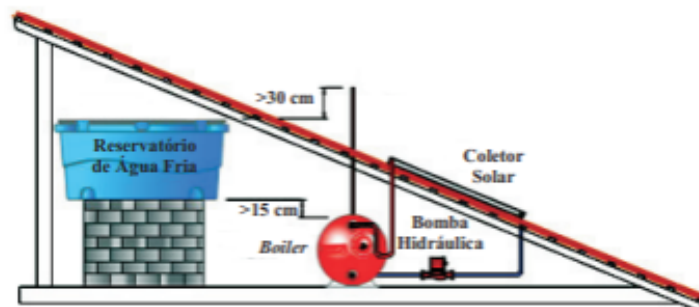


Fonte: (ORMENESE, 2009)

Normalmente, o sistema termo-sifão consegue cobrir entre 60% e 70% da necessidade de energia (ORMENESE, 2009).

No sistema de circulação forçada, representado na Figura 4, a circulação é feita por meio de uma bomba, e nesse caso, o coletor fica acima do boiler. Este sistema é mais eficiente do que o termo-sifão, mesmo em dias de baixa incidência solar, cobrindo mais de 80% da demanda energética (ORMENESE, 2009).

Figura 4 – Sistema circulação por bomba



Fonte: (ORMENESE, 2009)

## 2.2 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) pode ser compreendida como um ecossistema de objetos tecnológicos interconectados por meio da internet. Essa conexão é realizada por sensores conectados a objetos físicos, com o objetivo de relacionar-se e trocar dados com outros dispositivos por meio de uma rede (MAGRANI, 2018).

O termo “coisas” refere-se a objetos físicos que, ao serem conectados eletronicamente por meio de softwares e sensores, adquirem a capacidade de se relacionar com outros dispositivos sem a necessidade da intervenção humana para a conexão. Alguns exemplos incluem máquinas de lavar monitoradas remotamente via Wi-Fi ou um carro que se comunica com a internet para informar sobre o tráfego, ou qualquer outro objeto que possa ser atribuído um endereço de IP e adquirir a habilidade de trocar dados por meio da rede (SANTOS, S., 2018).

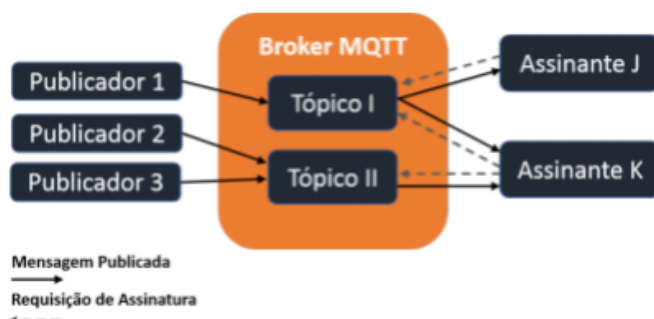
Os recursos presentes nos dispositivos de IoT são limitados, tornando a arquitetura TCP/IP impraticável sem adaptações. Para solucionar esse desafio e atender às demandas da IoT, foram criados dois protocolos da camada de aplicação, especialmente para coletar informações de dispositivos com baixo poder de processamento: CoAP e MQTT (SANTOS, B. P. *et al.*, 2016).

### 2.2.1 Protocolo MQTT

O protocolo MQTT, cuja sigla em inglês significa *Message Queue Telemetry Transport*, foi criado em 1999 por Andy Stanford-Clark e Arlen Nipper. Ao contrário da internet convencional, que utiliza o modelo de comunicação Cliente-Servidor, o MQTT faz o uso do paradigma *Publish/Subscribe* (GENERO, 2022).

No MQTT, os publicadores (*Publishers*) são dispositivos inteligentes que enviam informações aos *Brokers*. Já os clientes (*Subscribers*), que desejam receber os dados, inscrevem-se em um tópico específico do Broker, conforme apresentado na Figura 5. Neste caso, o *Broker* transmite a informação para qualquer dispositivo que tenha se inscrito. Esse formato de comunicação é capaz de suportar mecanismos de roteamento *one-to-one*, *one-to-many* e *many-to-many* (GENERO, 2022).

Figura 5 – Funcionamento do protocolo MQTT



Fonte: (GENERO, 2022)

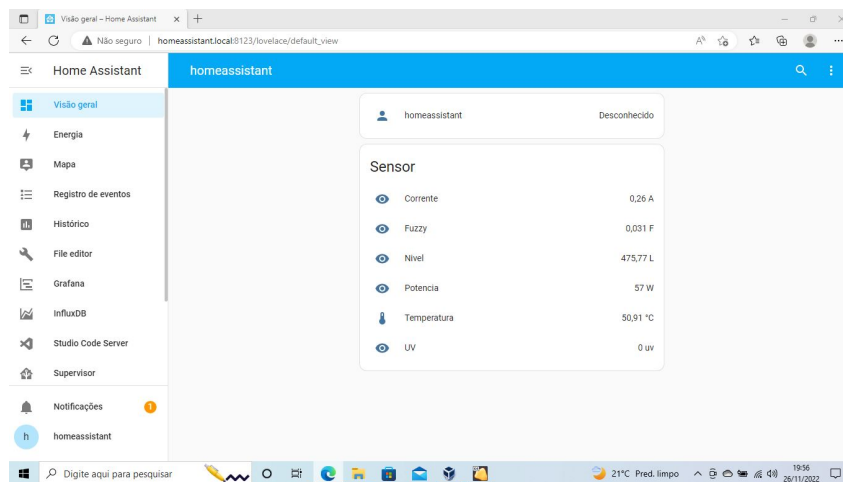
## 2.3 Home Assistant

O Home Assistant é uma aplicação desenvolvida para sistema de automação residencial, que se destaca por ser de código aberto e gratuito, que permite integrar, controlar e gerenciar atuadores, sensores e outros periféricos de forma simples e eficiente. Com suporte para instalação em computadores ou máquinas virtuais, oferecendo uma maior flexibilidade para atender às necessidades específicas de cada aplicação.

Esta ferramenta permite a instalação de componentes e módulos como banco de dados, protocolo de comunicação e ferramentas gráficas de forma fácil e rápida. Com isso, podemos controlar e configurar tudo em uma única ferramenta, tornando sua utilização vantajosa. Esses pacotes são encontrados na *add-on* dentro do Home

Assistant, como, por exemplo, o *ESPHome*, *Grafana*, Protocolo MQTT, *Home Broker*, *MariaDb* e *InfluxDb*, como pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Home Assistant



Fonte: Autor

### 2.3.1 InfluxDb

O banco de dados *InfluxDb* é uma ferramenta de código aberto para séries temporais, com uma sintaxe de consulta semelhante à SQL, o que permite realizar consultas de maneira rápida e eficiente. Embora a sintaxe seja semelhante à do SQL, ao contrário dos bancos relacionais, ele tem uma linha de protocolo composta por medições, séries e pontos de dados. O protocolo é informado por um conjunto de tags, com campos da medição, de data e hora no formato de chave e valor (SILVA, 2022).

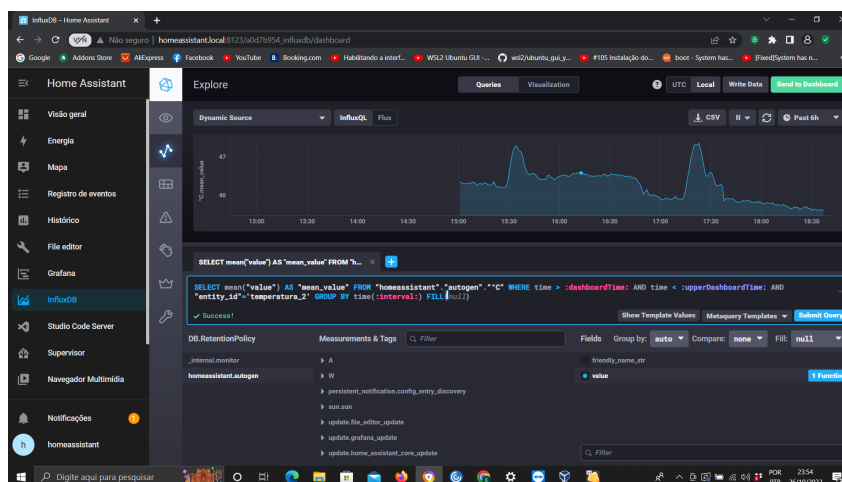
Um dos principais usos deste modelo de banco de dados consiste em aplicações de monitoramento em tempo real, tendo em vista a sua habilidade para suportar grandes volumes de leitura e escrita. Devido ao seu desempenho, é possível gerar gráficos em tempo real, manter dados de anos de histórico sem problemas (BITENCOURT, 2020).

Com o *InfluxDb*, é possível gerar gráficos e análises dos dados, pois já possui uma interface gráfica, conforme a Figura 7. No entanto, é comum utilizá-lo em conjunto com o *Grafana*, como será detalhado na seção seguinte.

### 2.3.2 Grafana

O Grafana é uma ferramenta também de código aberto destinada à visualização e análise de dados por meio de dashboards. É compatível com diversos tipos de bancos de dados, incluindo MySQL, PostgreSQL e Microsoft SQL, mas é mais frequentemente empregada em bancos de dados de séries temporais.

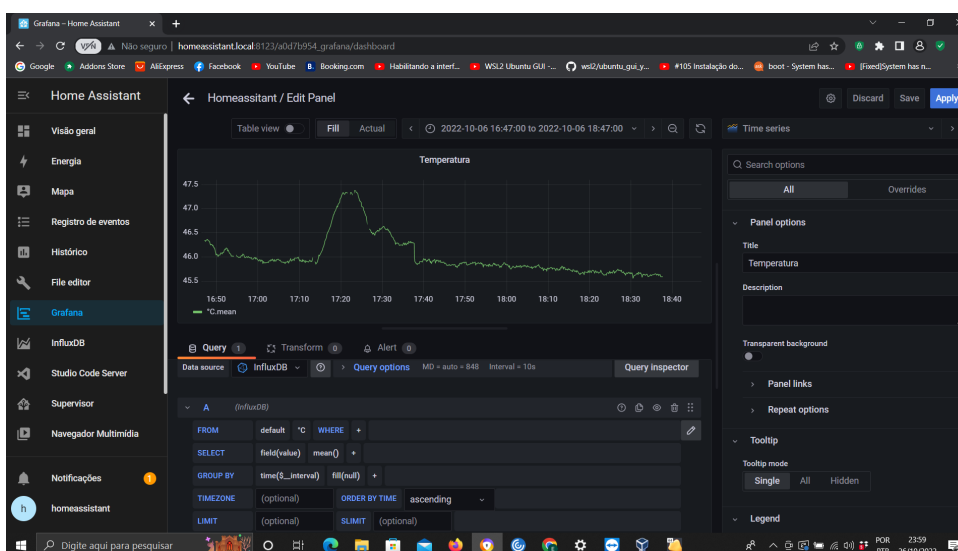
Figura 7 – Banco de dados InfluxDb



Fonte: Autor

Esta aplicação tem como finalidade gerenciar e monitorar sistemas em tempo real, viabilizando a criação e compartilhamento de dashboards de forma dinâmica que facilita a análise dos dados por meio deles. Além disso, é possível criar alarmes de monitoramento e notificações para auxiliar a tomada de decisões. A Figura 8, é possível observar um exemplo de gráfico desenvolvido no Grafana para análise da temperatura do boiler. Segundo a (INSIGHTS, 2022), aproximadamente 26.000 empresas utilizam o Grafana, incluindo companhias renomadas, como Cisco, SpaceX, Intel, Boeing, Target e Edward Jones.

Figura 8 – Modelos de energia nos sensores



Fonte: Autor

## 2.4 Fuzzy

A lógica fuzzy é uma técnica que simula a forma como o ser humano lida com os processos para resolver problemas, pensar, comunicar-se e reproduzir ações. Essa técnica é aprimorada pelo conhecimento humano e pode ser considerada uma linguagem de programação sofisticada (MORENO; MONTEIRO, M. R.; MONTEIRO, J. R., 2018).

Ao contrário da lógica clássica, que opera com valores binários de verdadeiro e falso, a lógica fuzzy permite uma ampla gama de valores de verdade que variam entre os níveis estabelecidos para verdade e falso. Isso possibilita uma abordagem mais flexível e adaptável, capaz de lidar com a complexidade e a incerteza inerentes aos problemas do mundo real (BEZDEK; HATHAWAY, 1974)

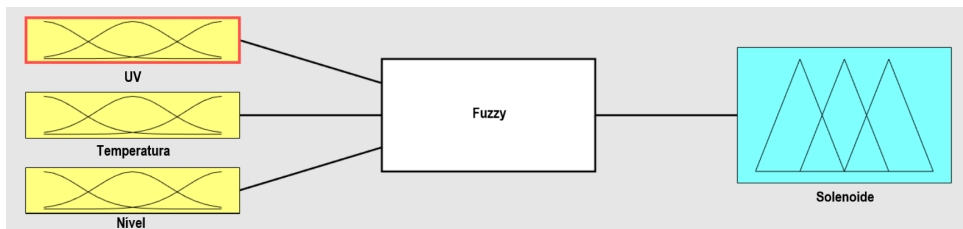
A lógica fuzzy é uma ferramenta matemática que permite processar informações imprecisas e não numéricas, semelhante à forma como os seres humanos tomam decisões. A lógica fuzzy é uma forma de lógica de muitos valores que pode lidar com a verdade parcial, onde o valor da verdade pode variar entre completamente verdadeiro e completamente falso. Os modelos ou conjuntos fuzzy são técnicas matemáticas sofisticadas que possibilitam a representação precisa e sistemática de informações imprecisas e incertas. Esses modelos têm a capacidade de reconhecer e processar dados, mesmo que sejam imprecisos ou vagos, e chegar a resultados relevantes e precisos, mesmo em situações com históricos limitados de dados semelhantes. A lógica fuzzy tem sido aplicada em vários campos, incluindo sistemas de controle, medicina e controle de aprendizado (MARRO *et al.*, 2000).

Um sistema de inteligência artificial consegue interpolar e extrapolar dados, enquanto os seres humanos são capazes de chegar a conclusões mesmo quando não dispõem de informações suficientes. Por exemplo, ao observar o nível de água em um reservatório, uma pessoa pode expressar se esse nível está baixo, médio ou alto, independentemente de saber a capacidade do reservatório ou a taxa de entrada e saída de fluidos. Esses rótulos de “baixo”, “médio” e “alto” representam conceitos que aproximam as informações do sistema de uma linguagem natural, ao mesmo tempo, em que oferecem uma forma para o computador entender e processar essas informações (MORENO; MONTEIRO, M. R.; MONTEIRO, J. R., 2018).

Na Figura 9, é apresentado o uso da lógica fuzzy para processar três variáveis de entrada: radiação UV, temperatura e nível de água. Para cada variável, são definidos intervalos de valores linguísticos, também conhecidos como rótulos. Esses valores são então coletados e processados pela lógica fuzzy, por meio de regras e conjuntos fuzzy, resultando em um valor entre 0 e 1 que representa a influência de cada variável no resultado final. Desse modo, a lógica fuzzy possibilita uma análise mais precisa e minuciosa das variáveis de entrada, permitindo a tomada de decisões mais inteligentes e precisas no controle do sistema de aquecimento de água com coletores solares.



Figura 9 – Variáveis de entrada e saída lógica fuzzy



Fonte: Autor

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, apresentaremos alguns estudos relacionados ao tema proposto, abordando tanto o sistema de aquecimento de água com coletores solar convencional quanto suas possíveis fontes auxiliares, além de sistemas de controle, incluindo aqueles que usam inteligência artificial. Com isso, identificar um modelo e uma metodologia adequados para o desenvolvimento deste trabalho de forma eficaz.

No estudo conduzido por Neves (2013) (NEVES, 2013), foi analisado o uso de aquecedor solar em conjunto com uma fonte auxiliar elétrica acionada por um controlador. Foram empregados sensores de temperatura e radiação UV para envio de dados ao controle, que foi programado de duas formas distintas. A primeira considerava somente a temperatura da água, enquanto a segunda considerava a temperatura e o horário. Em nosso trabalho, assim como Neves, controlamos a temperatura e o horário, porém acrescentamos um sistema de controle inteligente, a fim de minimizar a utilização da resistência elétrica.

No estudo realizado por (IHLE, 2019), foram empregadas duas fontes auxiliares, uma resistência elétrica imersa e um aquecedor a gás, em conjunto com o sistema de aquecimento solar de água. O objetivo do trabalho foi reduzir os gastos com a fonte auxiliar, avaliando qual das duas seria mais econômica. Para tanto, utilizou-se um microcontrolador ESP8266, sensores de temperatura e um sistema de controle no servidor. Já em nosso sistema, optamos pelo uso de um microcontrolador ESP32, sensores de temperatura, radiação uv, corrente, nível e sistema de inteligência artificial.

O estudo realizado por (PINTO, 2020) investiga a utilização de dois tipos distintos de controle no sistema de aquecimento solar por circulação natural, visando determinar qual deles é mais eficaz no acionamento da fonte auxiliar e alcançar a temperatura desejada de forma mais rápida. Para isso, o autor utilizou o microcontrolador Arduino Atmega2560 e implementou o controlador PI e o controlador On-Off. Em contrapartida, neste artigo, nosso objetivo é reduzir o uso da fonte auxiliar, razão pela qual empregamos o controlador inteligente com lógica fuzzy.

No trabalho desenvolvido por (ORMENESE, 2009), a autora empregou primeiramente o sistema convencional e, posteriormente, propôs o uso de um sistema controlado por lógica fuzzy visando minimizar a utilização de fontes auxiliares. Embora tenha

obtido resultados satisfatórios, a implementação do sistema físico não foi concretizada, sendo sugerida em seus trabalhos futuros. Em nosso trabalho é proposta uma abordagem semelhante à da autora, contudo, com a implementação física do sistema com o propósito de avaliar sua eficiência.

Outro estudo que adota a lógica fuzzy no sistema de aquecimento solar de água é o trabalho de (SCHIASSI *et al.*, 2018), onde os autores pesquisam a aplicação da lógica fuzzy para o controle da temperatura adequada de aquecimento residencial e em ambientes. Apesar da semelhança na utilização da lógica fuzzy, o objetivo principal da nossa proposta consiste em empregar a lógica para minimizar o consumo da fonte auxiliar elétrica.

## 4 DESENVOLVIMENTO

A seguir, apresentaremos a arquitetura do sistema proposto, o diagrama de blocos e de comunicação, a implementação do sistema e a implementação da inteligência artificial utilizada no sistema.

### 4.1 Arquitetura

Segundo (AL-FUQAHA *et al.*, 2015), a IoT requer uma arquitetura flexível em camadas para interconectar objetos heterogêneos pela Internet. Embora não haja um modelo de referência único, o modelo básico mais utilizado é a arquitetura de 3 camadas, com as camadas de aplicação, processamento e percepção, conforme ilustrado na Figura 10. O sistema proposto adota a arquitetura de três camadas. A primeira camada, denominada de "camada de percepção", é encarregada de adquirir informações por meio de sensores. Na segunda camada, conhecida como "camada de processamento", as informações coletadas na primeira camada são processadas pelo sistema fuzzy e encaminhadas para a terceira camada, chamada de "camada de aplicação". Nesta etapa, as informações são analisadas e as decisões pelo controlador inteligente. Posteriormente, as informações são enviadas de volta para a primeira camada, para que a ação necessária possa ser executada.

Figura 10 – Arquitetura de três camadas



Fonte: Autor

A coleta de informações dos sensores proposta neste trabalho representa a camada de percepção, a primeira etapa do processo. Essa camada é responsável por coletar informações sobre a variação de temperatura, nível de água, corrente elétrica do boiler e radiação UV. Em seguida, essas informações são transmitidas para a segunda camada, que atua como uma etapa intermediária, processando e encaminhando os dados para a terceira camada de aplicação, utilizando o protocolo de comunicação MQTT. A terceira camada tem a função de armazenar as informações recebidas.

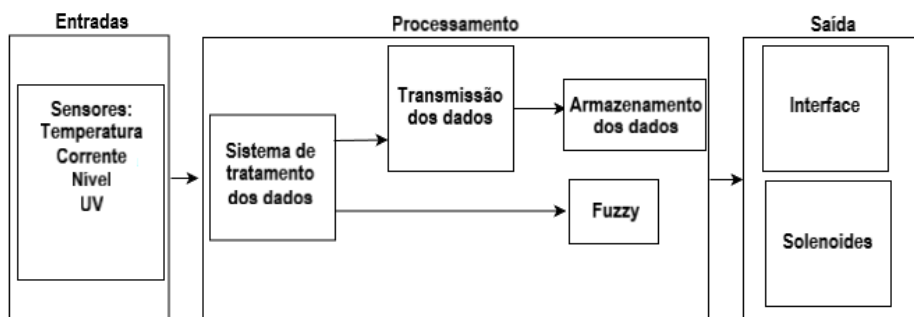
Após a coleta e processamento das informações, um sistema fuzzy determina qual ação deve ser tomada, considerando as informações coletadas na primeira etapa.

## 4.2 Diagrama de blocos

Com base no conceito de IoT de três camadas, foi elaborado um diagrama de blocos que engloba três macroprocessos: entrada, processamento e saída. A escolha desse diagrama foi feita para destacar as etapas do processo e garantir clareza na visualização dos passos seguidos, permitindo assim um melhor monitoramento e controle do sistema.

Na Figura 11, é possível notar a existência de uma entradas, sendo ela quatro sensores. Eles enviam os dados para o sistema de processamento onde se encontra o mecanismo de tratamento e transmissão dos dados, para que eles sejam manipulados e processados. Posteriormente, esses dados são enviados tanto para o sistema de armazenamento de dados quanto para a lógica fuzzy. O sistema de armazenamento de dados armazenará as informações para utilização futura e as enviará para a interface, enquanto a lógica fuzzy processará os dados e os encaminhará para o sistema de atuação.

Figura 11 – Diagrama de Blocos



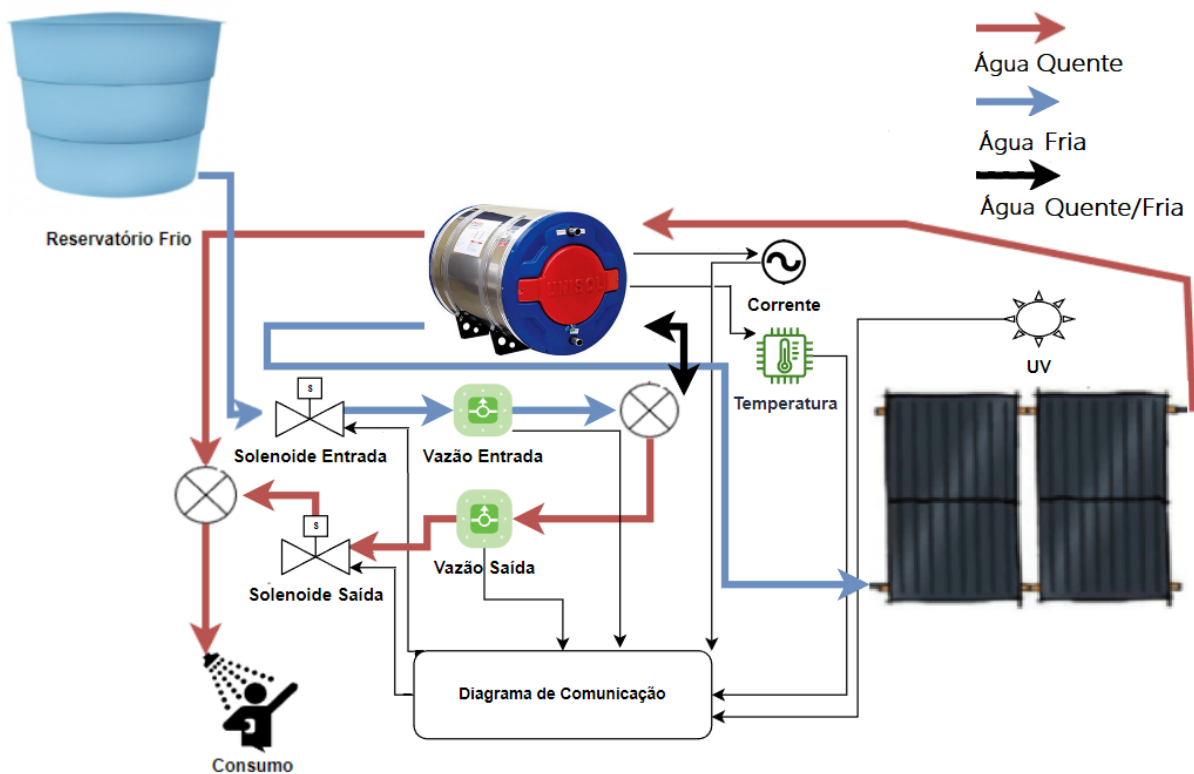
Fonte: Autor

### 4.3 Diagrama de comunicação

Visando facilitar a compreensão sobre a comunicação entre os sensores, o sistema de processamento e aquisição de dados, o banco de dados e a interface do usuário, foram elaborados dois diagramas: um diagrama de fluxo e um diagrama de comunicação para o sistema de aquecimento de água inteligente com coletores solares.

Na Figura 12 são apresentados componentes como o boiler, reservatório de água fria, os coletores solares, o fluxo de água quente e fria, onde estão posicionados as solenoides e os sensores, e como eles interagem com o diagrama de comunicação que controlará todo o sistema.

Figura 12 – Diagrama de Fluxo

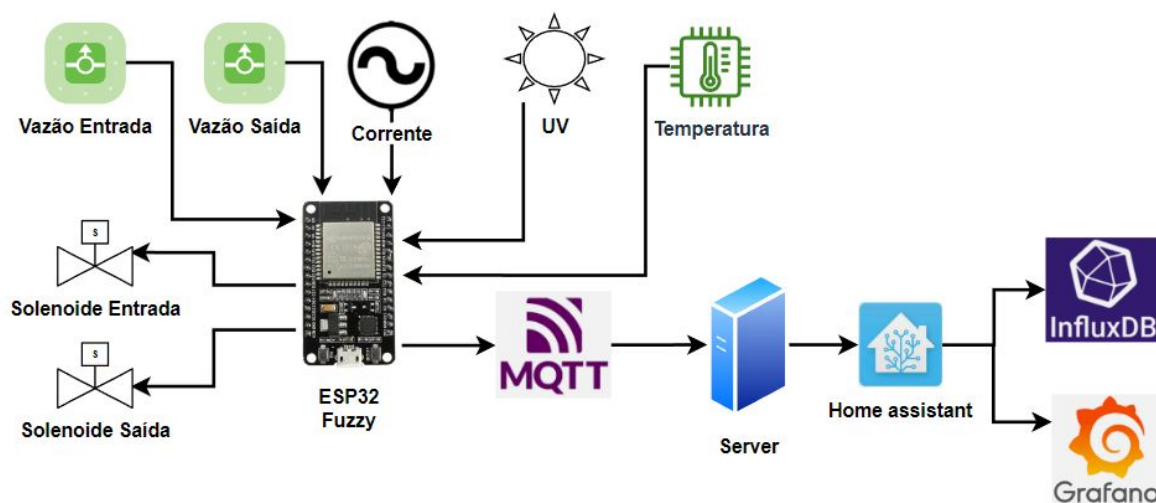


Fonte: Autor

A Figura 13 ilustra a presença de elementos sensores e atuadores, justamente com o sistema de gerenciamento e controle, situado no Home Assistant. A partir dessa estrutura, serão detalhados o processo de aquisição dos dados e controle por meio do sistema de controle inteligente para a otimização do sistema de aquecimento solar de água, bem como as ferramentas e dispositivos empregados e todo o desenvolvimento da lógica fuzzy.

O processo teve início com a instalação dos sensores de temperatura, sensor de radiação ultravioleta, sensor de corrente e sensor de fluxo de água. Esses dispositivos

Figura 13 – Diagrama de Comunicação



Fonte: Autor

foram conectados ao microcontrolador ESP32 possibilitando a obtenção de leituras em tempo real para aprimorar a coleta de dados.

Após receber os dados pelo microcontrolador ESP32, estes passam por tratamento e processamento antes de serem submetidos a uma lógica fuzzy, previamente programada no próprio dispositivo. Em seguida, os dados seguem dois caminhos distintos: o primeiro, destinado aos atuadores, e o segundo, direcionado ao envio para o banco de dados.

A primeira etapa do processo consiste no envio de dados para os atuadores, realizado por meio de uma conexão por cabo que se estende até as solenoides de entrada e saída. Conforme o comando enviado pela inteligência artificial fuzzy, a solenoide de entrada de água é acionada e a de saída é fechada. Em caso de inversão do comando, a solenoide de entrada é fechada e a de saída é aberta, operando independente e nunca simultaneamente.

A segunda etapa do processo consiste no envio de dados para o banco de dados, que ocorre por meio da comunicação do protocolo MQTT presente no servidor. Essa comunicação interliga o ESP32 ao Home Assistant, também localizado no servidor, por meio do Wi-Fi. O Home Assistant possui uma interface gráfica que permite ao usuário visualizar, em tempo real, todos os dados enviados pelo ESP32. Além disso, possui uma infraestrutura adequada para suportar o banco de dados InfluxDb, onde os dados são armazenados para análises futuras.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO

Nesta seção, será descrito todo o processo de implementação do controlador inteligente para a otimização do sistema de aquecimento solar de água, bem como

Figura 14 – ESP32, sensor de corrente e tensão



(a) Fonte autor

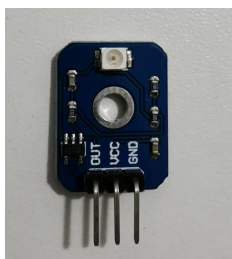


(b) Fonte autor

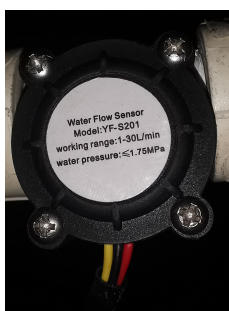


(c) Fonte (REIS, G. dos *et al.*, 2019)

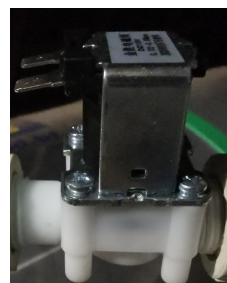
Figura 15 – Sensor UV, vazão e válvula solenoide



(a) Fonte autor



(b) Fonte autor



(c) Fonte autor

as ferramentas e dispositivos necessários, além de toda modelagem do controle inteligente através da lógica fuzzy.

### - Hardware

Para a execução deste projeto, foi necessário utilizar um notebook como servidor, um microcontrolador ESP32, um sensor de temperatura modelo termopar, um sensor de corrente do tipo transformação de corrente, modelo não invasivo, um sensor de radiação ultravioleta, dois sensores de vazão de água do modelo efeito hall e duas solenoides. Todos esses dispositivos podem ser verificados na Figura 14 e Figura 15. Na Figura 16, é apresentada a integração desses sensores no sistema de aquecimento solar de água.

A instalação dos dispositivos é uma etapa crucial do projeto por ser responsável pela coleta de todos os dados do sistema. A escolha dos sensores, sua calibração e a posição em que serão instalados pode interferir significativamente na qualidade dos dados coletados. Após coletados os dados são submetidos a um tratamento e processamento. Ao término do processamento, eles são transmitidos para o Home Assistant por meio do protocolo MQTT, que assegura a comunicação entre os dispositivos, mesmo com a grande quantidade de sensores e diferentes tipos de dados.

### - Controle Inteligente

Figura 16 – Implementação dos dispositivos



Fonte: Autor

Além da coleta e envio de dados para o Home Assistant, o projeto inclui um sistema de controle inteligente que utiliza a lógica fuzzy. O controle consegue otimizar a entrada de água fria no boiler, sem que ocorra mistura com a água quente. Isso permite que a água quente seja mantida em sua temperatura ideal, sem sofrer perda de temperatura pela troca de calor. Após análise do sistema em funcionamento antes da implementação do sistema de controle inteligente e com base no projeto de (ORMENESE, 2009), foram definidas as variáveis de entrada e saída do sistema. As variáveis de entrada são temperaturas, radiação UV e nível de água no reservatório térmico, enquanto a variável de saída é a solenoide de entrada de água fria.

Após definir as variáveis de entrada do sistema de controle, é necessário atribuir rótulos a elas. Os rótulos representam conjuntos fuzzy que abrangem intervalos específicos da variável, permitindo uma compreensão intuitiva das diferentes possibilidades de estado da variável. Isso nos auxilia a interpretar e analisar os resultados de forma mais clara e compreensível. Para a temperatura e radiação UV, foram estipulados valores baixo, médio e alto, enquanto para o nível de água no reservatório térmico foram definidos os rótulos mínimo, baixo, médio, alto e máximo. Para a variável de saída, foram definidos intervalos de fechada e aberta.

Com os rótulos definidos para as variáveis de entrada e saída, tornou-se necessário criar as regras e conjuntos fuzzy para o sistema de controle. Foram requeridas um total de 45 regras para abranger todos os cenários possíveis. As Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, nomeadas como Tabela Mínima, Tabela Média e Tabela Máxima, exibem

as regras correspondentes à quantidade mínima, média e máxima de água no boiler, respectivamente. Por meio da lógica fuzzy, as variáveis de entrada são processadas e as regras e conjuntos são empregados para gerar um valor de saída, variando entre 0 e 1, o qual indica o grau de abertura da solenoide de entrada de água fria.

Tabela 2 – Quantidade mínima de água no boiler

<b>Temperatura\ Radiação</b>	<b>Baixa (0 - 11)</b>	<b>Média (10 - 40)</b>	<b>Alta (35 - 100)</b>
<b>Baixa (0 - 35)</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>
<b>Média (30 - 60)</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>
<b>Alta (55 - 100)</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>

Fonte: Autor

Tabela 3 – Quantidade média de água no boiler

<b>Temperatura\ Radiação</b>	<b>Baixa (0 - 11)</b>	<b>Média (10 - 40)</b>	<b>Alta (35 - 100)</b>
<b>Baixa (0 - 35)</b>	<b>Fechada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>
<b>Média (30 - 60)</b>	<b>Fechada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>
<b>Alta (55 - 100)</b>	<b>Fechada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>

Fonte: Autor

Tabela 4 – Quantidade máxima de água no boiler

<b>Temperatura\ Radiação</b>	<b>Baixa (0 - 11)</b>	<b>Média (10 - 40)</b>	<b>Alta (35 - 100)</b>
<b>Baixa (0 - 35)</b>	<b>Fechada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>
<b>Média (30 - 60)</b>	<b>Fechada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>
<b>Alta (55 - 100)</b>	<b>Fechada</b>	<b>Abrir</b>	<b>Abrir</b>

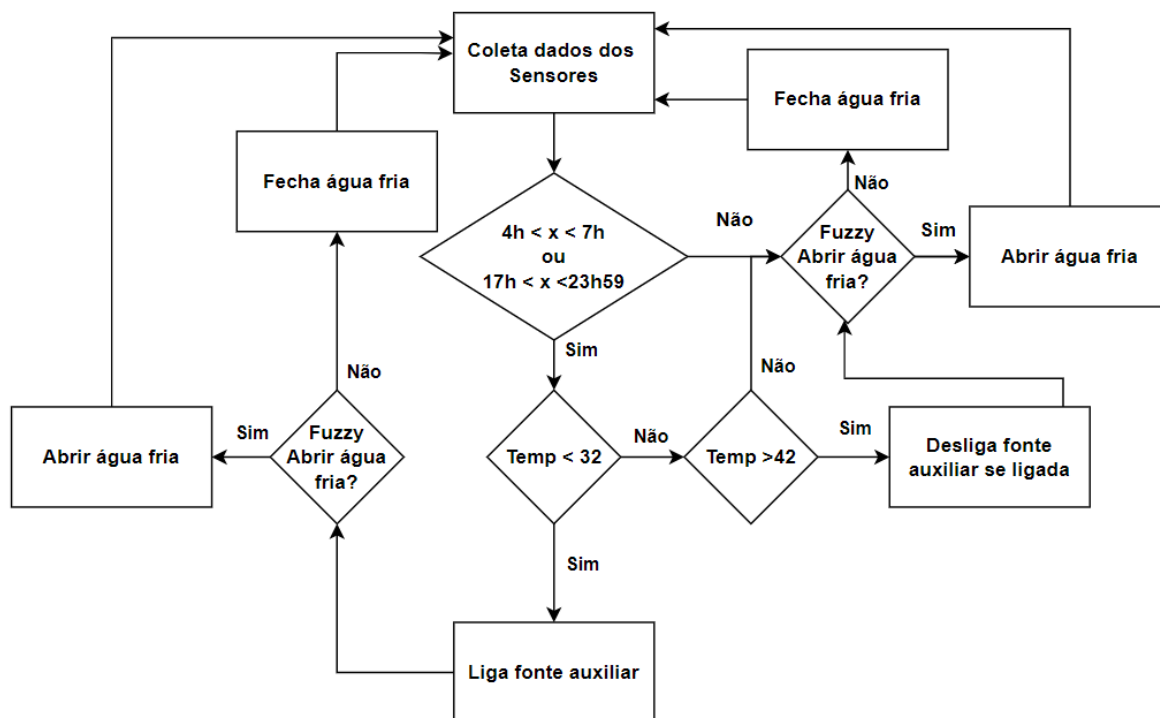
Fonte: Autor

Considerando os conceitos da lógica fuzzy, estabeleceu-se o conjunto de regras, entradas e saídas do sistema de controle inteligente com o intuito de aprimorar a eficiência térmica do sistema de aquecimento de água por meio de coletores solares. Com base nisso, procedeu-se à implementação da lógica de controle no microcontrolador ESP32. Na Figura 17, é possível observar o fluxograma do código implementado.

O microcontrolador dá início à coleta dos dados provenientes dos sensores e verifica se é o momento determinado para acionar a fonte auxiliar, além de analisar se a temperatura encontra-se abaixo de 32 graus Celsius. Caso as condições sejam atendidas, o microcontrolador aciona a fonte auxiliar e, em seguida, realiza a aplicação da lógica fuzzy para determinar a abertura ou o fechamento da válvula de água fria. No caso em que a temperatura está acima dos 32 graus Celsius e abaixo de 42 graus Celsius, ele mantém a fonte auxiliar no estado em que se encontra e verifica a lógica fuzzy para decidir sobre a necessidade de abrir a válvula de água fria. Se a temperatura exceder os 42 graus Celsius, o microcontrolador desativa a resistência, caso esteja ativada, e executa a lógica fuzzy para decidir sobre a abertura ou o fechamento da válvula de água fria.



Figura 17 – Fluxograma ESP32 - Fuzzy



Fonte: Autor

Após serem submetidos à lógica fuzzy, tanto a decisão de abrir ou fechar a válvula de água fria quanto os dados coletados dos sensores são enviados ao Home Assistant por meio do protocolo MQTT, com o intuito de serem armazenados no banco de dados InfluxDB. Esse processo garante uma comunicação confiável entre o micro-controlador e o sistema central de automação residencial.

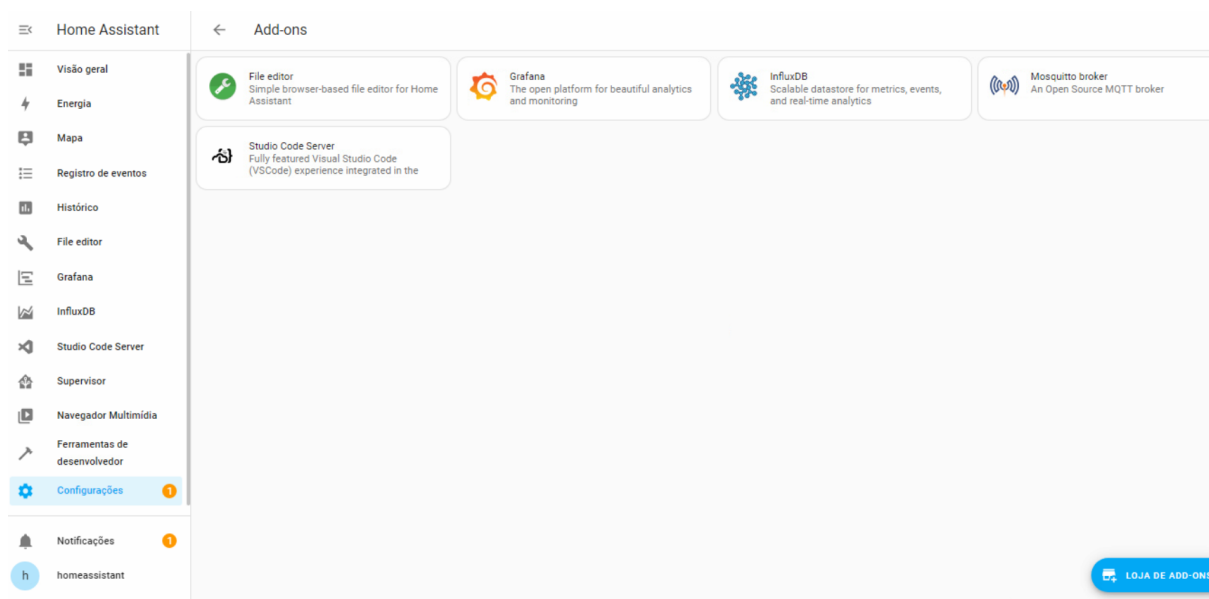
### - Software Instalados

Durante a instalação do Home Assistant, foram configurados alguns módulos essenciais para o sistema, tais como o Mosquitto Broker, o Grafana e o InfluxDB. Esses recursos estão disponíveis para instalação na loja de Add-ons do Home Assistant, conforme ilustrado na Figura 18.

O Mosquitto Broker é o encarregado de realizar a comunicação entre o ESP32 e o Home Assistant, utilizando o protocolo MQTT. Para assegurar uma comunicação bem-sucedida, o Mosquitto Broker oferece a opção de configurar um *subscribe* temporária para fins de teste. Na Figura 19, pode-se constatar que a mensagem enviada pelo ESP32 foi recebida com êxito pelo Mosquitto Broker, confirmando, assim, o funcionamento adequado da comunicação.

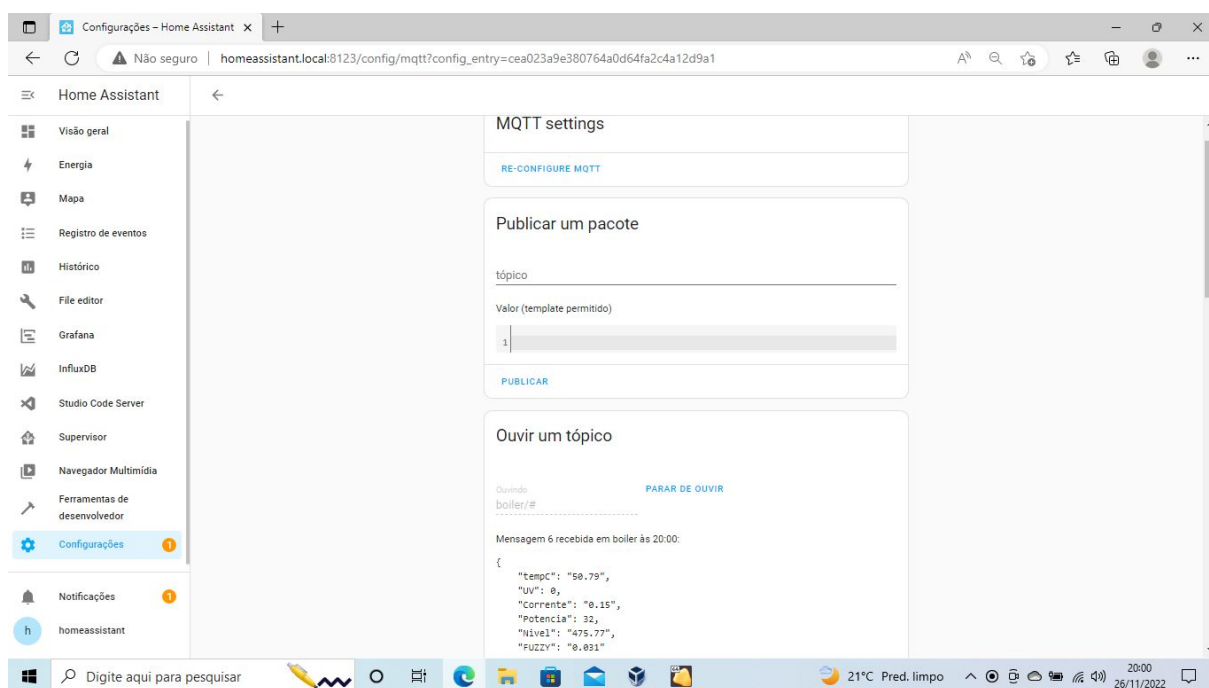
Após a instalação dos módulos e a realização dos testes de comunicação, estabeleceram-se as diretrizes para o envio e o armazenamento dos dados recebidos no banco de dados do InfluxDB. O InfluxDB apresenta-se como um banco de

Figura 18 – Loja Add-ons



Fonte: Autor

Figura 19 – Teste comunicação MQTT



Fonte: Autor

dados de séries temporais ideais para armazenar dados provenientes de sensores, tais como os utilizados no presente projeto.

Posteriormente, por meio do Grafana, foram conectados dashboards para a coleta dos dados armazenados no InfluxDB. Isso viabilizou a análise dos dados coletados e a validação dos testes, além de permitir a verificação do funcionamento da inteligência artificial implementada. O Grafana é uma plataforma de visualização de dados de código aberto, que permite a criação e a manutenção de dashboards personalizados

contendo gráficos e métricas, facilitando a interpretação dos dados coletados.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A proposta deste trabalho visa implementar um sistema de controle inteligente com o objetivo de otimizar o desempenho do sistema de aquecimento de água, utilizando lógica fuzzy. O sistema atual é baseado em circulação natural sendo aprimorado com a adição de uma fonte auxiliar composta por duas resistências internas no boiler. No entanto, a fonte auxiliar possui limitações e não considera fatores externos, como o índice de radiação UV.

Para solucionar essa questão, será utilizado um sistema de controle baseado em lógica fuzzy para regular a entrada de água fria no sistema de aquecimento, mantendo a temperatura entre 32°C e 42°C. O sistema será programado para acionar a fonte auxiliar somente se a temperatura cair abaixo de 32°C e se o horário estiver compreendido entre 17h e 23h59, ou entre 4h30 e 7h30, desligando-a quando a temperatura atingir 42°C.

Com o intuito de avaliar a eficácia do novo sistema, foram coletados dados durante os meses de outubro e novembro de 2022, analisando o comportamento do sistema original em dias com alto e baixo índice de radiação UV. Posteriormente, a lógica fuzzy foi aplicada em novembro de 2022, analisando o uso do sistema ao controlar a entrada de água fria. Os resultados serão apresentados por meio de uma comparação entre os dois modelos.

### 6.1 Análise do sistema original

Para uma melhor entendimento do comportamento do sistema, foram estabelecidos dois cenários distintos: dias com baixo índice de radiação UV e dias com alta radiação UV.

#### ***- Dias com baixo índice de radiação UV***

No primeiro cenário, foram analisados os dados referentes ao dia 10 de Outubro, em que a temperatura inicial situava-se em torno de 39°C, decaindo gradualmente até atingir 35°C. Após a utilização de água em dois banhos, a temperatura reduziu-se para 26°C. Nesse momento, o controlador ativou a resistência pelo período de aproximadamente 2 horas, com o propósito de elevar a temperatura até os 42°C estabelecidos na programação. Para uma melhor visualização desses dados, o gráfico presente na Figura 20 representa a oscilação da temperatura ao longo do tempo.

#### ***- Dias com alta índice de radiação UV***

No segundo cenário, ao analisar os registros do dia 08 de novembro até o dia 10 de novembro, é possível constatar, conforme observado na Figura 21, que o sistema de controle original acionou a resistência no início do primeiro dia, quando a temperatura da água estava abaixo do limite inferior de 32°C, e desligou-a quando a temperatura alcançou o limite superior de 42°C. Após o processo de aquecimento, por exemplo, a temperatura atingiu 25,2°C após dois banhos. Posteriormente, com a incidência de radiação UV, a temperatura da água aproximou-se de 47°C, não sendo necessário, portanto, acionar a fonte auxiliar durante o período noturno.

Figura 20 – Dias sem radiação UV



Fonte: Autor

No segundo dia, em 09 de novembro, a temperatura inicial ficou em 36°C, sendo realizados dois banhos e utilização regular da água quente na residência. A temperatura caiu para 32°C, mas com a incidência de radiação UV, ela elevou-se novamente para 37°C ao final da tarde. Em razão do aumento do consumo de água e das perdas térmicas naturais do boiler, foi necessário acionar a resistência durante a noite, a fim de aquecer a água novamente. O desligamento ocorreu próximo da meia-noite, ao atingir a temperatura de 42°C.

No terceiro dia, 10 de novembro, a resistência foi ativada no início do dia, elevando a temperatura da água até os 42°C. Em seguida, ocorreram dois banhos matinais, resultando em uma queda da temperatura para 34°C. Com a incidência de radiação UV, a temperatura aumentou para aproximadamente 47°C, dessa forma não houve necessidade de acionar a fonte auxiliar elétrica.

Ao analisar os dois cenários anteriores, tornou-se possível concluir que a incor-

Figura 21 – Dias com radiação UV



Fonte: Autor

poração de água fria no sistema apresenta um impacto significativo em seu desempenho. Em dias com baixa radiação UV, essa questão é ainda mais agravada, uma vez que o sistema não consegue aquecer a água unicamente por meio da energia solar, resultando em um acionamento mais frequente da fonte auxiliar. Tal fato aumenta o consumo energético e compromete a eficácia do sistema. Portanto, é fundamental considerar medidas para minimizar a entrada de água fria, como a aplicação adequada de isolamento térmico e o controle de vazão da água de reposição. Adicionalmente, é imprescindível avaliar a necessidade de realizar outros ajustes no sistema com o intuito de aprimorar sua eficiência energética.

## 6.2 Análise do sistema com lógica fuzzy

Nesta seção, será realizada uma análise do comportamento do sistema com o controle da lógica fuzzy. Portanto, a análise foi separada em duas partes: uma verificação do funcionamento desejado da lógica e uma análise gráfica da temperatura em relação à saída de água para consumo, sem a adição de água fria.

A primeira análise abordou a relação entre a radiação UV e a lógica fuzzy. Foi programada a lógica fuzzy para controlar a entrada de água fria, considerando o índice UV. Dessa forma, quando a radiação UV é baixa, ou seja, menor que 10 em uma escala de 0 a 100, o sistema impede a entrada de água fria. Por outro lado, se o sistema detecta um índice UV igual ou superior a 10, a entrada de água fria é aberta. Esse comportamento pode ser observado na Figura 22, na qual foram coletados dados

nos dias 24 e 25 de novembro de 2022.

Figura 22 – Radiação UV e Lógica fuzzy



Fonte: Autor

Se a radiação UV estiver abaixo de 10, a fuzzy apresentará valores menores que 0.4. Se os valores de UV forem iguais ou superiores a 10, ela retornará valores acima de 0.6, podendo chegar a 1. Quando o valor for superior a 0.6, o sistema abre a solenoide de água fria; caso seja inferior a 0.4, a entrada de água fria é fechada.

Após validar o funcionamento da fuzzy, foi analisado o resultado do boiler sem a entrada de água fria. Para isso, sensores de vazão foram instalados na entrada de água fria e na saída para consumo, conforme mostrado na Figura 12. Dessa forma, quando a entrada de água fria está fechada, o consumo ocorre através da solenoide de consumo, por baixo.

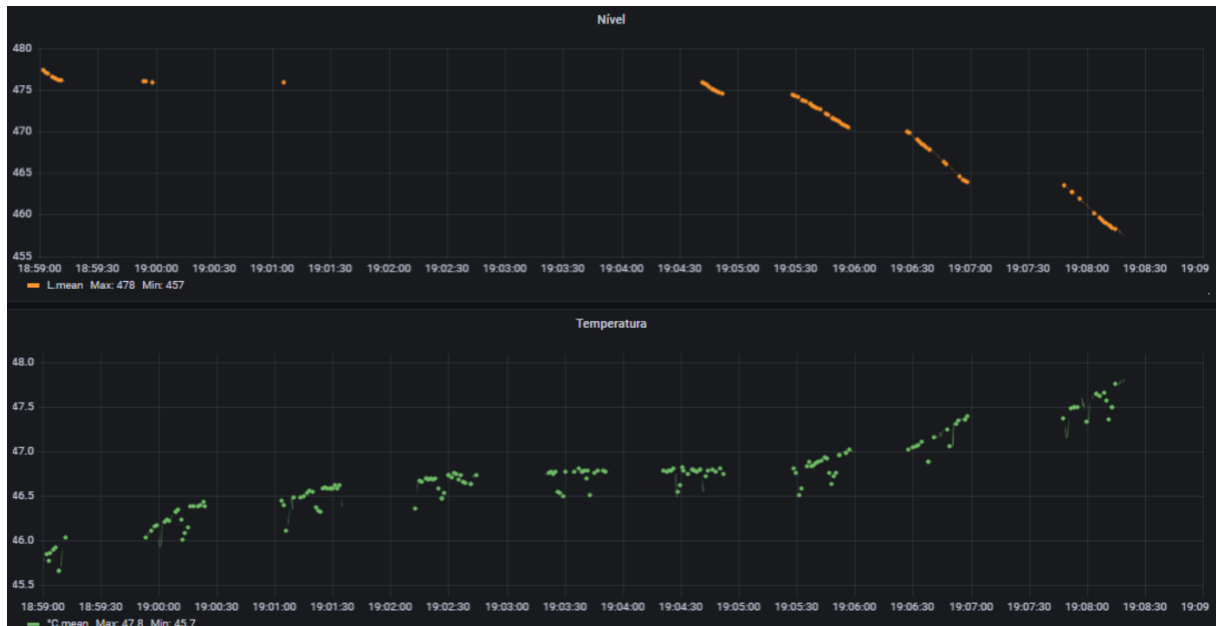
O objetivo dessa alteração é evitar a entrada de água fria, a fim de evitar a redução da temperatura, como verificado na seção anterior. Com isso, é possível utilizar a água quente interna do reservatório térmico por mais tempo e aumentar o rendimento do sistema.

Os dados a seguir foram verificados no dia 25 de novembro, o mesmo dia em que foi analisado o funcionamento da fuzzy em relação à radiação UV. Nesse dia, foi registrado um índice máximo de 67. Na Figura 23, analisamos o nível de água do boiler em relação à temperatura. O gráfico inicial mostra que havia 478 litros de água no reservatório de água quente e, após o uso durante um banho, observamos que o nível baixou para aproximadamente 455 litros. Quanto à temperatura, no mesmo período analisado, ela começou em 45.7 e chegou a 47.8. Esse aumento ocorreu porque a água mais quente do boiler está na parte superior e a água menos quente está na

parte inferior. Como não há entrada de água fria, ao invés de a temperatura diminuir, ela aumentou.

Como a temperatura excede os 40°C estabelecidos no ESP32, a resistência não seria ativada. Além disso, devido à ausência de entrada de água fria, o declínio da temperatura ocorreria apenas devido à perda natural do boiler.

Figura 23 – Nível de água e temperatura



Fonte: Autor

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi realizada uma análise da implementação de um sistema de controle inteligente visando otimizar os sistemas de aquecimento de água utilizando coletores solares. Foram avaliados os dados do sistema original, que consiste em um sistema convencional de circulação natural, com um controlador para a fonte auxiliar elétrica, e posteriormente, do mesmo sistema com o controlador fuzzy. Este último recebe dados de sensores como radiação UV, nível do reservatório térmico e temperatura. Os dados coletados são processados pela lógica fuzzy, que envia comandos para as duas solenoides responsáveis pelo controle do fluxo de entrada e consumo de água do sistema.

Inicialmente, os dados do sistema original foram analisados durante dois períodos, com o objetivo de compreender seu comportamento e identificar possíveis melhorias. Durante essa análise, observou-se que os dias com baixa radiação UV e entrada de água fria eram os mais críticos, resultando em uma considerável queda de temperatura.

Após identificar os pontos críticos, foram implementadas as modificações necessárias para a lógica fuzzy no sistema. Embora os dados tenham sido coletados apenas em dias com índice UV alto durante o período de análise, constatou-se que a lógica estava operando conforme o esperado. Os sensores registraram dados dos banhos, indicando que o nível de água dentro do boiler diminuiu e a temperatura aumentou, comportamento diferente do sistema original, que levaria à redução da temperatura.

Apesar de terem sido coletados poucos dias de dados com a lógica fuzzy, o sistema proposto demonstrou ser eficiente na otimização e melhoria do desempenho do aquecedor solar. Esses resultados estão em consonância com o trabalho de (ORMESE, 2009), no qual, por meio de simulações, também foi identificada uma melhoria na eficiência do sistema.

Com base nesses resultados, pode-se concluir que o trabalho proposto obteve sucesso em aprimorar o desempenho do sistema de aquecimento de água com coletores solares, superando as opções disponíveis no mercado em termos de eficiência.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, identificamos alguns pontos no qual o sistema ainda pode ser aprimorado:

- Substituir o sensor de vazão por um sensor de pressão, que permitiria medir a coluna de água e calcular o nível. Isso eliminaria a necessidade de interrupções para coleta de dados e reduziria o risco de resets no ESP32, especialmente em testes com grandes volumes de água.
- Substituir a solenoide de consumo por solenoides que operem com pressão negativa e não sejam de diafragma. Essa modificação possibilitaria o fechamento da solenoide por meio da criação de um vácuo quando a entrada de água fria é fechada.
- Ampliar o tempo de coleta de dados utilizando a lógica fuzzy, a fim de observar seu comportamento em dias de baixa radiação UV. Isso permitiria uma análise mais abrangente e uma compreensão mais precisa do desempenho do sistema nessas condições.
- Implementar outros modelos de inteligência artificial, como redes neurais e outros, para realizar comparações e avaliar qual modelo é mais eficiente para o controle e otimização do sistema. Isso abriria possibilidades de explorar diferentes abordagens e identificar a mais adequada para alcançar os melhores resultados.

Essas sugestões de trabalhos futuros visam aprimorar ainda mais o sistema de aquecimento de água com coletores solares, explorando alternativas de sensores, solenoides e técnicas de inteligência artificial, a fim de otimizar o desempenho, a eficiência energética e a confiabilidade do sistema.



## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **ANEEL aprova reajuste nas tarifas da Enel SP**. [S.l.: s.n.], jun. 2022. Ministério de Minas e Energias. [Online; accessed 30. Jul. 2022]. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/aneel-aprova-reajuste-nas-tarifas-da-enel-sp>.
- BEZDEK, James C.; HATHAWAY, Ronald J. **Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes**. [S.l.]: Academic Press, jul. 1974.
- BEZERRA, Arnaldo Moura. **Energia solar**. [S.l.]: Do Autor, 1981.
- BITENCOURT, João Pedro. **InfluxDB: Opção de banco de dados para um alto volume de consultas e escritas**. [S.l.: s.n.], nov. 2020. serverdo.in. [Online; accessed 27. Out. 2022]. Disponível em: <https://serverdo.in/influxdb>.
- CORSINI, Iuri. **Energia elétrica aumentou mais do que o dobro da inflação nos últimos anos**. [S.l.: s.n.], jan. 2022. CNN Brasil. [Online; accessed 20. Out. 2022]. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/energia-eletrica-aumentou-mais-do-que-o-dobro-da-inflacao-nos-ultimos-anos/#:~:text=Segundo%5C%20a%5C%20entidade%5C%2C%5C%20a%5C%20energia,da%5C%20infla%5C%C3%5C%A7%5C%C3%5C%A3o%5C%20no%5C%20per%5C%C3%5C%ADodo%5C%20observado..>
- DIAS, Camila; SILVA, Wallysson Klebson; FREITAS, Graziela; NASCIMENTO, Jessica Felipe do. Energia solar no Brasil. **Revista InterScientia**, v. 5, n. 1, p. 153–165, 2017. Disponível em: <https://45.227.6.12/index.php/interscientia/article/view/463>.
- ENETEC. **Os 10 equipamentos que mais consomem energia na sua casa**. [S.l.: s.n.], jul. 2022. Universidade de Brasília. [Online; accessed 30. Jul. 2022]. Disponível em: <https://enetec.unb.br/blog/os-10-equipamentos-que-mais-consomem-energia-na-sua-casa/>.
- AL-FUQAHA, Ala; GUIZANI, Mohsen; MOHAMMADI, Mehdi; ALEDHARI, Mohammed; AYYASH, Moussa. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- GENERO, Willian Bordignon. **Avaliação dos protocolos MQTT e MQTT-SN no contexto da internet das coisas**. [S.l.: s.n.], abr. 2022. Universidade Federal da Fronteira Sul.
- IHLE, Fábio Sanson. **Controle energético inteligente de um sistema de aquecimento solar**. [S.l.: s.n.], jun. 2019. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9851>.

INSIGHTS, HG. **Companies Currently Using Grafana**. [Online; accessed 27. Out. 2022]. 2022. Disponível em: <https://discovery.hgdata.com/product/grafana>.

MAGRANI, Eduardo. **A internet das coisas**. [S.l.]: Editora FGV, mar. 2018. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/23898>.

MARRO, Alessandro; MATHEUS, Alyson; SOUZA, Carvalho; DE, Everton; CAVALCANTE, Sousa; SILVA, Giuliana; BEZERRA, Rômulo; DE, Oliveira; NUNES. Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações. **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, jan. 2000.

MORENO, Wallace Soares; MONTEIRO, Maíra Ribas; MONTEIRO, Juliana Ribas. Estudo e aplicação da lógica fuzzy para estacionamento automático de veículos. **15º Simpósio de excelência em gestão e tecnologia**, 2018. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/28326325.pdf>.

NEVES, João Carlos Munhoz Das. **Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo na cidade de cascavel – PR**. [S.l.: s.n.], 2013. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em: [https://www5.unioeste.br/portalunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao\\_Joao\\_C\\_Neves.pdf](https://www5.unioeste.br/portalunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao_Joao_C_Neves.pdf).

OLIVEIRA, Larissa Pena de. **Estudo de viabilidade da implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica em uma residência**. [S.l.: s.n.], 2019. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1833>.

ORMENESE, Marcela. **Controlador fuzzy para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares**. 2009. Diss. (Mestrado) – Universidade de Campinas. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/469096>.

PINTO, Gabriel Fabiani. **Controle aplicado a um sistema de aquecimento solar de água**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <http://repositorio.uricer.edu.br/handle/35974/372>.

REIS, Gemírson dos; RÊGO SEGUNDO, Alan Kardek; LEAL, Elisangela; MATOS, Saulo; FIGUEIREDO, Robson. **Instrumentação de uma célula eletrolítica**. [S.l.: s.n.], jan. 2019. ISBN 9788570421906. DOI: 10.36229/978-85-7042-190-6.CAP.03.

REIS, Olavo Antonio de Oliveira; PIRES, Ricardo Amaral; REIS, Alan Kardec Candido dos; SILVA, Ezequiel Garcia. Protótipo de um sistema de iluminação e tomada inteligente com o uso da plataforma arduino e internet das coisas Prototype of an intelligent lighting and outlet system using the arduino platform and the internet of things. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6,

p. 60103–60118, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/31502>.

SANTOS, Bruno P; SILVA, Lucas AM; CELES, Clayson SFS; BORGES NETO, João B; PERES, Bruna S; VIEIRA, Marcos Augusto M; VIEIRA, Luiz Filipe M; GOUSSEVSKAIA, Olga N; LOUREIRO, Antonio AF. **Internet das coisas: da teoria à prática**. [S.l.: s.n.], 2016. Universidade Federal de Minas Gerais.

SANTOS, Sandro. **Introdução à IoT: Desvendando a internet das Coisas**. [S.l.]: SS trader Editor, 2018.

SCHIASSI, Leonardo; MOREIRA, Gabriel; DAMASCENO, Flavio; OLIVEIRA, Carlos. Modelagem fuzzy para predição da eficiência de aquecedores solares. **Universidade Federal de Lavras**, jun. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Damasceno-2/publication/326044968\\_Modelagem\\_fuzzy\\_para\\_predicao\\_da\\_eficiencia\\_de\\_aquecedores\\_solares/links/5b3541a2aca2720785f47d39/Modelagem-fuzzy-para-predicao-da-eficiencia-de-aquecedores-solares.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Damasceno-2/publication/326044968_Modelagem_fuzzy_para_predicao_da_eficiencia_de_aquecedores_solares/links/5b3541a2aca2720785f47d39/Modelagem-fuzzy-para-predicao-da-eficiencia-de-aquecedores-solares.pdf).

SEBRAER. **Fábrica de aquecedor solar**. [Online; accessed 30. Jul. 2022]. 2012. Disponível em: [https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS\\_CHRONUS/IDEIAS\\_DE\\_NEGOCIO/PDFS/209.pdf](https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/IDEIAS_DE_NEGOCIO/PDFS/209.pdf).

SILVA, Lucas Ferreira da. **QA Metrics: integração das métricas de qualidade de software, em ambiente Docker, para exibição de dashboards Grafana alimentado pelo banco de dados temporal InfluxDB via Newman**. [S.l.: s.n.], jul. 2022. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/3167>.

TAVARES, Stella Ramos; SOUSA, Nádia Guimarães. Sistema de aquecimento solar de água: simulação e análise. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 1, p. 15–31, maio 2019. DOI: 10.18554/rbcti.v4i1.3360. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/rbcti/article/view/3360>.