



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Projeto e Implementação de um Sistema de Controle de Temperatura em Chuveiros com Aquecimento Solar

Nekson da Paixão de Araújo

João Monlevade, MG
2026

Nekson da Paixão de Araújo

Projeto e Implementação de um Sistema de Controle de Temperatura em Chuveiros com Aquecimento Solar

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Igor Dias Neto de Souza

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A663p Araújo, Nekson da Paixão de.

Projeto e implementação de um sistema de controle de temperatura em chuveiros com aquecimento solar. [manuscrito] / Nekson da Paixão de Araújo. - 2026.

67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Igor Dias Neto de Souza.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Aquecimento solar - Água. 2. Automação. 3. Controladores Pl. 4. Controle automático - Temperatura. 5. Controle de temperatura - Água. 6. Sistemas de controle por realimentação. I. Souza, Igor Dias Neto de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nekson da Paixão de Araújo

Projeto e Implementação de um Sistema de Controle de Temperatura em Chuveiros com Aquecimento Solar

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 20 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. Igor Dias Neto de Souza - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Marcelo Moreira Tiago - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Welbert Alves Rodrigues - Universidade Federal de Ouro Preto

Igor Dias Neto de Souza, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Igor Dias Neto de Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2026, às 13:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1067794** e o código CRC **4763EDB6**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.004957/2025-89

SEI nº 1067794

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3808-0818 - www.ufop.br

“Toda pequena realização do presente, no passado, foi um grande sonho.”
Autor

Resumo

Este trabalho apresenta as etapas de projeto e desenvolvimento de um sistema para controle automático de temperatura da água em um chuveiro equipado com sistema de aquecimento solar, com o objetivo de proporcionar maior conforto térmico ao usuário e buscando reduzir o desperdício de recursos hídricos diante de ajustes manuais nos sistemas convencionais. A proposta baseia-se na utilização de sensores de temperatura, atuadores e no desenvolvimento de um sistema de controle capaz de ajustar a vazão de água quente para uma vazão fria constante, mantendo a temperatura próxima a um valor de referência previamente definido. A metodologia adotada compreende a modelagem do sistema, a implementação do controlador e a realização de testes experimentais em um protótipo. O desempenho do sistema foi avaliado por meio de métricas como o tempo de estabilização da temperatura, erro em regime permanente, estabilidade térmica em regime permanente, capacidade de rastreamento, consumo de água em relação ao valor teórico estimado por meio da calorimetria, e a redução do consumo de água em comparação com métodos convencionais de controle manual. Os resultados obtidos evidenciam a regulação estável da temperatura da água em torno do valor de referência, mantendo as vazões necessárias para o funcionamento, o que foi capaz de proporcionar redução no consumo de água, demonstrando a eficiência e viabilidade do sistema implementado, bem como capacidade de melhorar a qualidade de vida dos usuários durante o banho.

Palavras-chave: Aquecimento solar de água. Modelagem de sistemas. Controle de temperatura. Controlador PI.

Abstract

This work presents the design and development stages of a system for automatic water temperature control in a shower equipped with a solar water heating system, aiming to provide greater thermal comfort to the user while reducing water waste caused by manual adjustments in conventional systems. The proposed approach is based on the use of temperature sensors, actuators, and the development of a control system capable of adjusting the hot water flow rate while maintaining a constant cold water flow rate, keeping the temperature close to a previously defined reference value. The adopted methodology includes system modeling, controller implementation, and experimental testing using a prototype. The system performance was evaluated through metrics such as temperature settling time, steady-state error, steady-state thermal stability, tracking capability, water consumption compared to the theoretical value estimated through calorimetry, and the reduction of water consumption in comparison with conventional manual control methods. The obtained results demonstrate stable regulation of the water temperature around the reference value while maintaining the flow rates required for proper operation. This led to a reduction in water consumption, demonstrating the efficiency and feasibility of the implemented system, as well as its potential to improve users' quality of life during bathing.

Keywords: Solar water heating. System modeling. Temperature control. PI controller.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama do protótipo do sistema proposto.	9
Figura 2 – Esquema do Protótipo.	10
Figura 3 – Aquecedor solar de tubo a vácuo modelo AK-180.	11
Figura 4 – Componentes da válvula motorizada.	12
Figura 5 – Módulo de Controle Transistor de efeito de campo semiconductor de óxido metálico (do inglês, <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Tran-</i> <i>sistor</i>) (MOSFET).	13
Figura 6 – Termômetro Digital.	14
Figura 7 – Esquemático do termistor.	15
Figura 8 – Sensor de vazão YF-S201.	16
Figura 9 – Relé de estado sólido.	16
Figura 10 – Esquema de ligação - Arduino UNO.	18
Figura 11 – Imagem do protótipo.	19
Figura 12 – Instalação do sensor de vazão.	23
Figura 13 – Gráfico comparativo de vazão das válvulas para dada abertura.	25
Figura 14 – Comparação entre o volume medido pelo sensor e a massa medida pela balança para a válvula de água fria.	25
Figura 15 – Comparação entre o volume medido pelo sensor e a massa medida pela balança para a válvula de água quente.	26
Figura 16 – Fluxograma da modelagem da temperatura de mistura.	27
Figura 17 – Ensaio da temperatura de mistura.	27
Figura 18 – Modelagem da temperatura de mistura - Comparação das curvas - En- saio 01.	28
Figura 19 – Sistema de controle em malha fechada.	29
Figura 20 – Diagrama de blocos esquemático do sistema de controle em malha fe- chada com controlador PID.	30
Figura 21 – Diagrama de margens de estabilidade.	33
Figura 22 – Fluxograma das etapas de operação.	34
Figura 23 – Etapas do processo com a transferência de água.	37
Figura 24 – Ensaio do controlador com a transferência de água.	38
Figura 25 – Etapas do processo sem a transferência de água.	40
Figura 26 – Ensaio do controlador sem a transferência de água.	41
Figura 27 – Etapas do processo sem água quente.	42
Figura 28 – Etapas do processo sem água fria.	43
Figura 29 – Ensaio do controlador com mudança positiva da temperatura desejada.	44
Figura 30 – Ensaio do controlador com mudança negativa da temperatura desejada.	45

Figura 31 – Comparação entre a temperatura de mistura em regime permanente e a estimativa pelo modelo de balanço térmico.	46
--	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações das válvulas motorizadas.	12
Tabela 2 – Especificações do termômetro digital.	14
Tabela 3 – Características do Sensor de fluxo YF-S201.	16
Tabela 4 – Especificações do relé de estado sólido.	17
Tabela 5 – Ensaio da válvula de esfera motorizada.	24
Tabela 6 – Constantes do modelo aproximado.	28
Tabela 7 – Ganhos do controlador.	32
Tabela 8 – Resumo para os ensaios com transferência de água quente.	40
Tabela 9 – Resumo para os ensaios sem transferência de água quente	42
Tabela 10 – Erro entre a temperatura de mistura em regime permanente e a estimativa obtida pelo modelo de balanço térmico.	47

Lista de siglas e abreviaturas

CPVC	Policloreto de Vinila Clorado (do inglês, <i>Chlorinated Polyvinyl Chloride</i>)
D	Termo Derivativo
I	Termo Integral
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MOSFET	Transistor de efeito de campo semicondutor de óxido metálico (do inglês, <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
NTC	Coefficiente de Temperatura Negativo (do inglês, <i>Negative Temperature Coefficient</i>)
P	Termo Proporcional
P&ID	Diagrama de Tubulação e Instrumentação (do inglês, <i>Piping and Instrumentation Diagram</i>)
PCD	Pessoas com Deficiência
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PVC	Policloreto de Vinila (do inglês, <i>Polyvinyl Chloride</i>)
PVC-U	Policloreto de Vinila não Plastificado (do inglês, <i>Unplasticised Polyvinyl Chloride</i>)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (do inglês, <i>Pulse Width Modulation</i>)
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio (do inglês, <i>Root Mean Square Error</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação e Justificativas	3
1.3	Estado da arte	4
1.4	Objetivos	6
1.4.1	Objetivos específicos	6
1.5	Justificativa	6
1.6	Estrutura do trabalho	7
2	REVISÃO TEÓRICA	8
2.1	Sistema Proposto	8
2.1.1	Aquecedores Solares de Tubo a Vácuo.	11
2.1.2	Atuador	12
2.1.3	Medição de temperatura	13
2.1.4	Sensor de vazão	15
2.1.5	Relé de Estado Sólido	16
2.1.6	Microcontrolador	17
2.2	Protótipo	18
2.3	Considerações parciais	19
3	MODELAGEM E PROJETO DO CONTROLADOR	20
3.1	Identificação do sistema	20
3.2	Modelagem da válvula	22
3.3	Modelagem da temperatura de mistura	26
3.4	Sistema de Controle	29
3.5	Compensador	30
3.6	Operação do Sistema	34
3.7	Considerações parciais	36
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	37
4.1	Caso 1	37
4.2	Caso 2	40
4.3	Caso 3 e Caso 4	42
4.4	Resultados com alteração da temperatura desejada	43
4.5	Observações relevantes nos resultados	46
4.6	Considerações parciais	49

5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	51
5.1	Sugestões de trabalhos futuros e melhorias	51
	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

O consumo de energia elétrica associado ao aquecimento de água para banho representa parcela significativa da demanda energética residencial, especialmente em sistemas que utilizam chuveiros elétricos. Além disso, o ajuste manual da temperatura em chuveiros com aquecimento solar resulta em desperdício de água durante o período de estabilização térmica, contribuindo para o aumento do consumo hídrico.

Nesse contexto, a busca por soluções que promovam maior eficiência energética e racionalização do uso da água impulsiona o desenvolvimento de sistemas automatizados de controle térmico. A aplicação de técnicas de controle permite reduzir o tempo de regime transitório, minimizar o erro em regime permanente e garantir maior estabilidade da temperatura, melhorando o desempenho do sistema e reduzindo desperdícios.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar um sistema automatizado de controle de temperatura para aquecimento de água destinado ao banho, visando maior eficiência no consumo de água e proporcionando automatização do ajuste térmico e redução da necessidade de intervenção manual durante o uso do sistema. A metodologia adotada envolve a modelagem do sistema térmico, implementação do controlador, instrumentação com sensores de temperatura e vazão, e análise experimental do desempenho por meio de métricas como tempo de estabilização, erro em regime permanente, estabilidade térmica e consumo hídrico comparado ao método convencional de controle manual.

1.1 Contextualização

Aquecedores solares de água são equipamentos consagrados para o aquecimento d'água e têm se tornado cada vez mais presentes no cenário nacional. Dados do Atlas da Eficiência Energética Brasil 2024 indicam que a participação de domicílios brasileiros que utilizam energia solar térmica para aquecimento de água alcançou aproximadamente 4,1% em 2023 ([Empresa de Pesquisa Energética, 2024](#)).

Em levantamento anterior, a participação estimada era de 0,96% em 2019 ([ELETRÓBRAS/PROCEL, 2019](#)). Embora as metodologias empregadas nas diferentes pesquisas não sejam idênticas, os indicadores sugerem tendência de expansão da tecnologia no setor residencial brasileiro. Paralelamente, informações setoriais apontam expansão contínua do mercado nacional de aquecedores solares, com aumento na produção e comercialização de coletores solares térmicos nos últimos anos ([Associação Brasileira de Energia Solar Térmica, 2023](#)). Esses elementos reforçam a consolidação da energia solar térmica como alternativa eficiente para redução do consumo de energia elétrica no aquecimento de água, especialmente em substituição aos chuveiros elétricos.

Com a capacidade de mitigar o uso de chuveiros elétricos convencionais e proporcionar conforto térmico aos usuários, inclusive em períodos de baixas temperaturas, os aquecedores solares de água destacam-se quanto à promoção do uso racional da energia elétrica, uma vez que os chuveiros elétricos representaram cerca de 13% do consumo total de eletricidade residencial no Brasil ([Empresa de Pesquisa Energética, 2024](#)).

Em contrapartida, sistemas de aquecimento solar de água podem proporcionar redução significativa no consumo de energia elétrica, atingindo economia de até 6,5 vezes em comparação ao chuveiro elétrico tradicional ([NEVES, 2013](#)). Esses resultados evidenciam o potencial da tecnologia para mitigação da demanda elétrica no setor residencial.

Aquecedores solares de água são sistemas capazes de aproveitar a irradiância solar para promover o aquecimento da água automaticamente, sem necessidade recorrente de intervenção humana, diferentemente dos sistemas tradicionais, como as antigas serpentinas, que demandavam aquecimento por meio da queima de combustível para elevar previamente a temperatura da água.

Em sua configuração convencional, mais comum em residências unifamiliares, o sistema é composto por coletores solares e reservatório térmico instalados sobre o telhado, interligados por tubulações destinadas à condução de água fria e água quente. Essas tubulações, geralmente dispostas em paralelo e conduzidas até os pontos de consumo no interior da edificação, podem contribuir para o desperdício de água em determinadas situações operacionais.

No início do banho, é comum a abertura exclusiva do registro de água quente, resultando na liberação do volume de água fria armazenado na tubulação compreendida entre o reservatório térmico e o ponto de consumo. Esse volume, frequentemente denominado volume morto da tubulação, é descartado até que a água aquecida atinja o chuveiro, configurando desperdício hídrico.

Outro fator associado ao desperdício ocorre durante o processo de ajuste da temperatura. Em sistemas convencionais com registros independentes de água quente e fria, o usuário necessita realizar a mistura manual para atingir uma condição de conforto térmico. Esse procedimento pode demandar sucessivos ajustes de vazão e temperatura, prolongando o tempo até a estabilização térmica e resultando em descarte adicional de água.

Um estudo apresentado por [Scardovelli e Zamperin \(2017\)](#), considerando 500 residências com quatro moradores, estima um desperdício anual de 3768,48 m³ de água, indicando um desperdício individual de 5,23 l por usuário por banho.

Atualmente, estão disponíveis no mercado soluções que buscam minimizar o desperdício de água durante o acionamento do chuveiro, especialmente no período de escoamento da água fria antes do aquecimento efetivo. Uma alternativa simples consiste na utilização de recipientes ou dispositivos coletores posicionados no início do banho para armazenar essa água inicial, podendo também captar parte da água utilizada durante o

banho. A água armazenada pode ser destinada a usos não potáveis, como irrigação de jardins e descargas sanitárias, caracterizando uma prática de reúso doméstico que contribui para a redução da demanda por água potável no ambiente residencial ([CicloVivo, 2021](#)).

Para o caso do chuveiro elétrico, existem sistemas híbridos que utilizam acionamento automático, nos quais, na ausência de água aquecida na tubulação, o chuveiro permanece energizado eletricamente. Quando o sistema detecta a chegada de água previamente aquecida, o fornecimento de energia elétrica é interrompido automaticamente, permitindo que o usuário realize apenas o ajuste fino da temperatura por meio dos registros disponíveis ([Lorenzetti S.A., 2026](#)).

Outra solução usual consiste na adoção de sistemas de recirculação de água quente, instalados de modo a manter a tubulação permanentemente aquecida, reduzindo o tempo de espera e o desperdício de água ([NBR5626, 2020](#)).

1.2 Motivação e Justificativas

Atualmente, é comum encontrar em residências com sistemas de aquecimento solar de água a presença de chuveiros elétricos operando em configuração híbrida. Nesse arranjo, o equipamento atua como sistema complementar ao aquecimento solar, sendo acionado quando a temperatura da água proveniente do sistema principal é insuficiente.

A necessidade de utilização do chuveiro elétrico como apoio justifica-se em situações nas quais o aquecedor, submetido a condições de baixa irradiância solar, como em períodos nublados ou chuvosos, não consegue fornecer água à temperatura adequada. Nessas circunstâncias, torna-se necessário o acionamento manual pelo usuário, a fim de complementar o aquecimento e garantir o conforto térmico.

Como os chuveiros elétricos convencionais são normalmente dotados apenas de dois estágios de potência, alternando entre inverno e verão para dissipar maior ou menor potência elétrica, dificilmente o usuário terá uma temperatura satisfatória considerando que a água fornecida já possui uma determinada temperatura. Em alguns casos, isso acaba forçando o usuário a fechar o fornecimento de água levemente aquecida, proveniente do aquecedor solar, e utilizar apenas a água fria com o chuveiro elétrico operando tradicionalmente.

Uma melhoria para esse sistema é a utilização de um chuveiro eletrônico, dotado de um circuito recortador de tensão, utilizado para controlar a potência a ser dissipada. Deste modo, considerando a temperatura da água inferior ao desejado, mas levemente aquecida no reservatório, o usuário pode realizar um ajuste para consumir uma potência elétrica significativamente inferior ao chuveiro convencional.

A combinação de um sistema composto por chuveiro eletrônico e aquecimento solar apresenta complexidade para oferecer o melhor desempenho energético, onde o usuário pode realizar ajustes na vazão de água fria, na vazão de água quente, além do ajuste de potência disponível no chuveiro eletrônico.

Outro desafio que contribui significativamente para o desperdício de água é a incapacidade de manter a vazão de água necessária para a operação do chuveiro utilizado sem haver excesso de vazão durante o banho, principalmente quando o processo é realizado por pessoas idosas ou jovens com mobilidade reduzida nas mãos ou pessoas que utilizam cadeiras para banho. Esse processo pode ser um fator limitante na qualidade de vida destas pessoas na hora do banho, pois a seleção do estágio de potência do chuveiro elétrico ou eletrônico pode ser difícil ou até mesmo inviável para um cadeirante. Além disso, pessoas com as suas capacidades motoras reduzidas seriam incapazes de realizar um controle nos registros para um balanço de temperatura e vazão de água ideal para um banho confortável, amplificando o desperdício de água por excesso ou falta de temperatura ou de vazão de água.

1.3 Estado da arte

Nesta seção, serão apresentados trabalhos de referência relacionados ao tema de desenvolvimento deste trabalho.

[Barbosa e Pinheiro \(2017\)](#) apresentam um controlador para a temperatura da água com a capacidade de acionar um sistema de aquecimento a gás para situações em que deseja-se um valor de temperatura superior ao medido. No trabalho, foi desenvolvida uma tabela com várias proporções de água quente a 50 °C e água fria a 20 °C a ser misturada para o alcance de uma temperatura final desejada. A mistura permanece em um tanque isolado para não ocorrer troca de calor com o ambiente externo, mantendo a mistura na temperatura desejada estável por mais tempo. Assim, esta mistura é disponibilizada imediatamente para utilização no chuveiro. Um *software* de simulação foi utilizado para permitir ao usuário criar, modificar e monitorar ações de controle, verificação das saídas e possíveis resultados.

[Pontes e Menech \(2019\)](#) desenvolveram um sistema, com o objetivo de manter a água aquecida de um reservatório em valores admissíveis para emprego direto em tubulações convencionais, isso é validado mediante um protótipo que realiza a manutenção da temperatura no interior de um reservatório em 38 °C, o que é admitido como seguro mediante as informações apresentadas pelos autores. O sistema foi ajustado para permitir o fluxo de água para o aquecimento apenas quando a temperatura estiver abaixo do valor desejado, mantendo essa grandeza em limites aceitáveis para utilização na tubulação de Policloreto de Vinila (do inglês, *Polyvinyl Chloride*) (PVC) material utilizado na fabricação dos canos presentes em residências, onde fabricantes indicam que a temperatura máxima para operação contínua é de 60 °C.

Scardovelli e Zamperin (2017) evidenciam o desperdício de água proveniente de chuveiros aquecidos a energia solar. No trabalho, os autores analisaram dados provenientes de um conjunto habitacional com número limitado de pessoas, avalia-se o volume d'água estacionada nas tubulações entre o *boiler* e o ponto de consumo num total de 500 residências com 4 indivíduos cada. Os resultados indicam que 7,5369 m³ de água são perdidos anualmente em cada uma das residências e, se estendido a todo conjunto, o desperdício é de 3768,48 m³ anualmente. Para mitigar esse problema, Santos e Zamperin (2017) apresentam como proposta um sistema que aplica uma tubulação de retorno entre o ponto de utilização e o reservatório. Nessa abordagem, deve-se instalar uma bomba para forçar a circulação de água na tubulação de água quente. Essa bomba é parametrizada para um dado tempo de funcionamento suficiente para que toda a água estacionada na tubulação retorne diretamente ao reservatório, assim, haverá água aquecida imediatamente disponível no registro de utilização.

Bento (2016) descreve uma série de equipamentos e soluções voltadas à economia de recursos hídricos. O autor propõe dois tipos de sistemas embarcados aplicados a chuveiros, com o objetivo de reduzir o consumo de água durante o uso. O primeiro sistema utiliza informações provenientes de um sensor de presença como variável de controle, permitindo a modulação da vazão conforme a detecção do usuário sob o fluxo, podendo aumentá-la, reduzi-la ou interrompê-la.

Adicionalmente, o trabalho aborda o conceito de chuveiros inteligentes, capazes de monitorar o consumo e operar com parâmetros programáveis de potência, temperatura e tempo de banho. Integrados a sensores e atuadores, esses sistemas realizam o controle automatizado do fluxo de água, ajustando-o aos níveis mínimo ou máximo de acordo com a presença do usuário diretamente abaixo do fluxo de água.

Filho (2016) apresenta uma proposta de aplicativo para smartphone que utiliza comunicação *bluetooth* para acessar as configurações de um controlador de temperatura embarcado em microcontrolador, para controlar a mistura da água de um sistema de aquecimento solar. Por meio da interface do aplicativo, o usuário define parâmetros operacionais, como temperatura e vazão desejadas. Com base nas equações de balanço energético do sistema, o controlador determina os ângulos de abertura das válvulas de mistura, ajustando automaticamente a proporção entre água quente e fria para atingir a condição térmica estabelecida. O presente trabalho aproxima-se da proposta mencionada, diferenciando-se, contudo, pela adoção de um controlador local e físico. A solução aqui proposta visa promover a mistura imediata da água, buscando evitar ou, ao menos, reduzir desperdícios tanto no período inicial quanto durante o banho, além de garantir a manutenção do conforto térmico ao longo do regime permanente de operação.

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é implementar um sistema capaz de controlar automaticamente a temperatura da água em chuveiros aquecidos por energia solar. O método proposto considera vazão fixa para a linha de água fria, temperatura de banho inferior à temperatura do reservatório térmico e vazão de água quente como variável de controle.

Espera-se obter um desempenho caracterizado por tempo de resposta transitório inferior a 60 s e variação admissível de temperatura em regime permanente de ± 1 °C.

1.4.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser cumpridos:

- Revisão bibliográfica de sistemas similares;
- Montagem de um protótipo para desenvolvimento da modelagem e ensaio do sistema;
- Realizar adequações dos sensores de temperatura para instalação na tubulação disponível;
- Modelar a curva de vazão em relação ao tempo de abertura das válvulas eletromecânicas empregadas;
- Modelar a curva da temperatura de mistura em função da abertura da válvula quente;
- Medir as temperaturas durante o funcionamento para a coleta e avaliação de resultados.

1.5 Justificativa

Para a maioria das pessoas, pode ser trivial o processo de utilização dos chuveiros tradicionais. No entanto, idosos, crianças e Pessoas com Deficiência (PCD), diante da vasta gama de ajustes envolvendo chuveiros com utilização de energia solar, deixam de ser simples, o que pode comprometer a qualidade do banho.

O dispositivo proposto tem como objetivo automatizar e controlar o processo de ajuste térmico da água para o banho, proporcionando economia financeira, preservação de recursos ambientais e principalmente acessibilidade, entregando temperatura ajustada, vazão ideal, conforto e praticidade na hora do banho.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos. O [Capítulo 1](#) é composto inicialmente pela contextualização ao tema de estudo deste trabalho, relatando sobre os aspectos de desperdício e economia de recursos elétricos e hídricos diante dos cenários tratados. Em seguida, foram abordados os problemas identificados na utilização de chuveiros e seus usuários, seguidos do estado da arte e das justificativas e objetivos a serem alcançados neste projeto.

No [Capítulo 2](#), é apresentada a revisão teórica referente ao sistema proposto, bem como os fundamentos necessários ao desenvolvimento do protótipo e aos estudos a serem realizados. Além disso, são descritos os conceitos teóricos e o princípio de funcionamento de cada parte e componente a ser utilizado para a montagem do sistema.

O [Capítulo 3](#) apresenta a metodologia utilizada até a obtenção do controlador, abordando os tipos de modelagem adotados para orientar a obtenção do modelo do sistema. São apresentados os resultados da modelagem das válvulas em função de sua abertura, bem como da temperatura de saída em função da vazão de entrada. Por fim, descreve-se o modo de operação estabelecido para o controle do sistema.

O [Capítulo 4](#) apresenta os modos de operação definidos para o funcionamento do controlador. São abordados o fluxograma de obtenção de dados e a apresentação dos resultados, incluindo uma subseção que demonstra a rastreabilidade do controlador. Por fim, é realizada uma análise específica de alguns resultados obtidos.

O [Capítulo 5](#) apresenta as considerações finais do trabalho, incluindo um relato sobre os desafios enfrentados ao longo de seu desenvolvimento. Por fim, são descritas metas e propostas para trabalhos futuros a serem desenvolvidos na etapa final do projeto.

2 Revisão teórica

Há no mercado uma enorme gama de chuveiros tradicionais para uso residencial. Com o objetivo de fornecer um banho agradável, cada fabricante busca uma maneira de inovar e entregar tecnologias associadas ao funcionamento de seus produtos. Sabendo que o consumo de energia elétrica tem se tornado um peso nas contas das famílias, e que esse eletrodoméstico é um dos responsáveis por isso, a busca por economia energética vem se tornando pauta para melhorias e aprimoramentos.

A temperatura da água considerada agradável para o banho varia de acordo com as preferências individuais do usuário. Entretanto, conforme indicado por [Borges \(2017\)](#), temperaturas superiores a 38 °C podem ser classificadas como elevadas, podendo causar desconforto térmico e, em exposições prolongadas, provocar sensação de queimadura na pele. Para banhos rápidos com maior sensação de aquecimento, valores próximos a 41 °C podem ser admissíveis, embora temperaturas superiores tendam a aumentar o risco de desconforto e possíveis lesões térmicas.

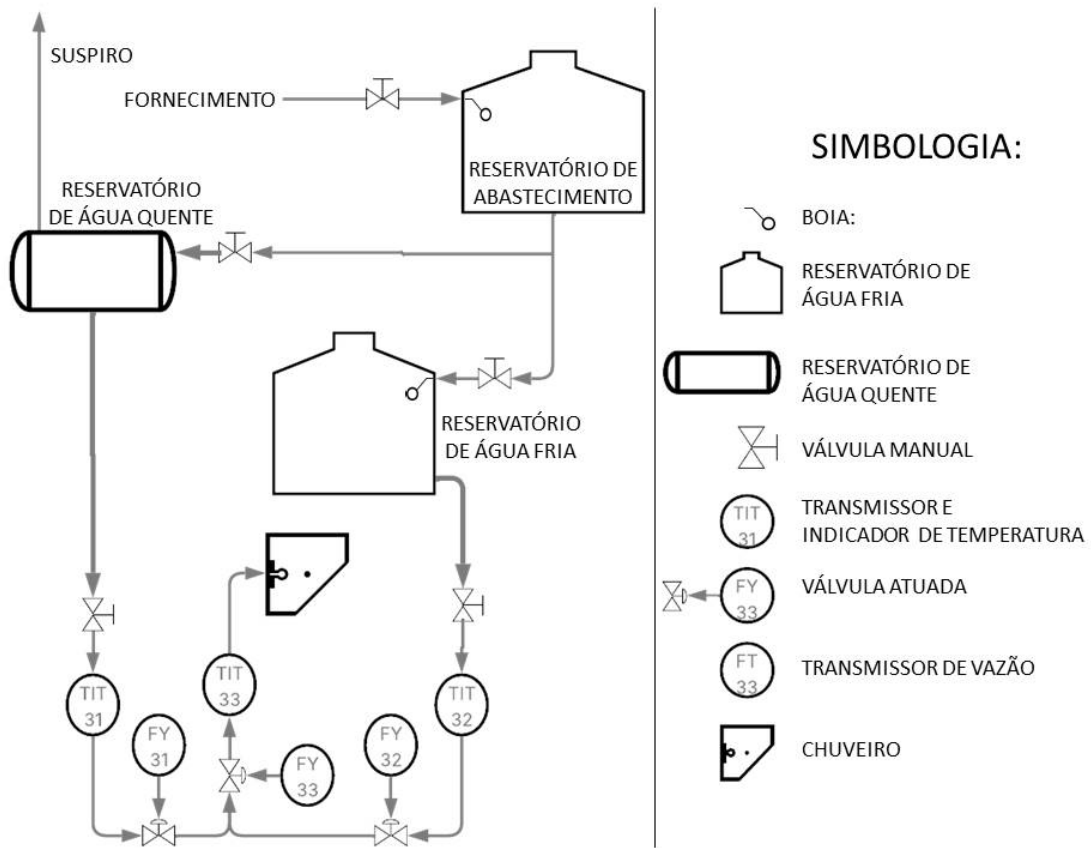
Chuveiros elétricos convencionais funcionam com o elevado consumo de potência. Nesses dispositivos, para reduzir a temperatura da água em dias quentes, aumenta-se a vazão final, ocasionando desperdício hídrico; em contrapartida, há redução extrema da vazão para a água fornecida ser aquecida o suficiente em dias muito frios. Chuveiros eletrônicos possuem controle eletrônico de chaveamento da tensão, no qual o usuário define a sua temperatura de banho, e assim, a potência consumida é ajustada em função da temperatura da água que flui pelo equipamento.

De acordo com [Neves \(2013\)](#) e [Santos e Zamperin \(2017\)](#), o chuveiro aquecido com energia solar apresenta vantagens promissoras no que se refere à economia de energia. Assim, ao longo deste capítulo, serão apresentadas as principais características construtivas, teóricas e definições para o desenvolvimento do projeto.

2.1 Sistema Proposto

A [Figura 1](#) ilustra Diagrama de Tubulação e Instrumentação (do inglês, *Piping and Instrumentation Diagram*) (P&ID) do sistema, mostrando, além dos elementos principais, válvulas manuais, boias de nível e um reservatório de abastecimento alimentado pelo fornecimento da companhia de água, garantindo alimentação constante e mantendo o sistema operando ao nível máximo.

Figura 1 – Diagrama do protótipo do sistema proposto.



Fonte: Do autor.

No sistema, há três medições distintas de temperatura. A tubulação de água quente tem sua temperatura monitorada pelo transmissor e indicador de temperatura denominado $TIT31$. O transmissor e indicador de temperatura $TIT32$ é responsável por medir e indicar a temperatura da água fria e, por fim, $TIT33$ realiza a medição da temperatura da água de mistura.

Ressalta-se, contudo, que o sistema possui apenas uma malha de controle. Nessa malha, a variável controlada é a temperatura da água de mistura, enquanto a variável manipulada corresponde à vazão da válvula de água quente, ajustada pelo controlador com o objetivo de manter a temperatura de saída no valor de referência estabelecido.

O controle de fluxo será feito pela válvula atuada, $FY31$ controla o fluxo de água quente, $FY32$ controla o fluxo de água fria e $FY33$ controla o fluxo de água de mistura.

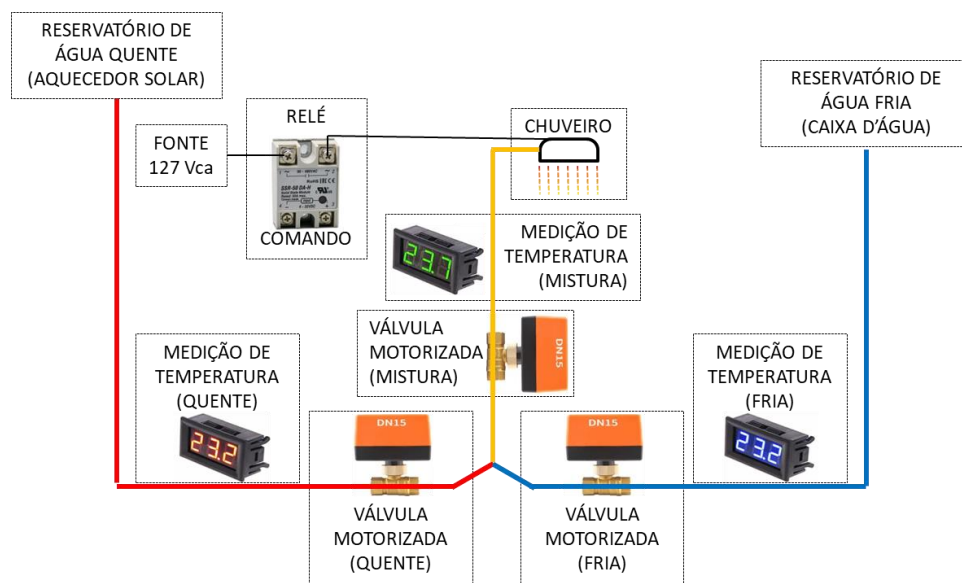
O transmissor de vazão $FT33$ foi utilizado durante a etapa de modelagem experimental do sistema, com a finalidade de caracterizar a relação entre abertura das válvulas e vazão resultante nas linhas de água quente e fria. As medições obtidas permitiram estimar a capacidade de vazão do conjunto e auxiliar na parametrização do modelo matemático adotado.

Ressalta-se que o *FT33* não integra a arquitetura final do sistema de controle. Na versão definitiva, o controle é realizado exclusivamente com base na temperatura da água de mistura, medida pelo sensor *TIT33*, configurando uma malha fechada de temperatura. A vazão, por sua vez, não é controlada por realimentação, operando em malha aberta a partir da posição imposta pelas válvulas.

Assim, o transmissor de vazão foi empregado apenas como instrumento de caracterização e validação experimental, não permanecendo na configuração final do sistema.

A Figura 2 representa uma estrutura esquemática do protótipo a ser utilizado para o desenvolvimento do projeto. Nela estão representados os reservatórios de água quente e fria, os termômetros, as válvulas motorizadas e o chuveiro.

Figura 2 – Esquema do Protótipo.



Fonte: Do autor.

Para este desenvolvimento, o reservatório de água quente está posicionado aproximadamente um metro acima do nível do reservatório de água fria. Essa diferença de nível contribui para o escoamento da água fria estagnada na tubulação em direção ao reservatório de água fria, dispensando a necessidade de uma bomba para promover esse deslocamento.

2.1.1 Aquecedores Solares de Tubo a Vácuo.

A eficiência dos aquecedores solares de água está diretamente relacionada às suas características construtivas e às condições de instalação. No mercado, encontram-se desde equipamentos de baixo custo até sistemas mais sofisticados, com maior nível tecnológico e custo elevado.

Soluções de caráter amador, como coletores desenvolvidos com mangueiras ou garrafas plásticas, apresentam baixo custo e conseguem aquecer a água a temperaturas adequadas para o banho. Entretanto, equipamentos industrializados incorporam tecnologias que aumentam a eficiência do processo de aquecimento, além de possuírem reservatórios termicamente isolados, capazes de manter a água aquecida por períodos prolongados, reduzindo as perdas térmicas.

Neste trabalho, foi utilizado um aquecedor solar de tubos a vácuo do tipo acoplado, ilustrado na [Figura 3](#). Esse tipo de equipamento possui tubos coletores responsáveis pelo aquecimento da água, diretamente conectados ao boiler, que atua como reservatório de água aquecida.

O equipamento utilizado neste trabalho apresenta classificação C no nível de desempenho, conforme a classificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia ([INMETRO](#)), com capacidade de produção mensal de energia de 140,1 kWh/mês, conforme apresentado em [AQUAKENT \(2024\)](#).

Figura 3 – Aquecedor solar de tubo a vácuo modelo AK-180.



Fonte: Adaptado de [AQUAKENT \(2024\)](#)

As tubulações hidráulicas residenciais podem ser fabricadas com diferentes tipos de materiais. A norma [NBR5648 \(2018\)](#) aborda as características construtivas para tubulações de água fria, normalmente utilizadas nas residências, cujo componente principal na sua construção é o Policloreto de Vinila não Plastificado (do inglês, *Unplasticised Polyvinyl Chloride*) ([PVC-U](#)). A norma exige que suas características permitam temperaturas de trabalho de até 60 °C e que a temperatura do ponto de amolecimento do composto construtivo seja igual ou superior a 80 °C.

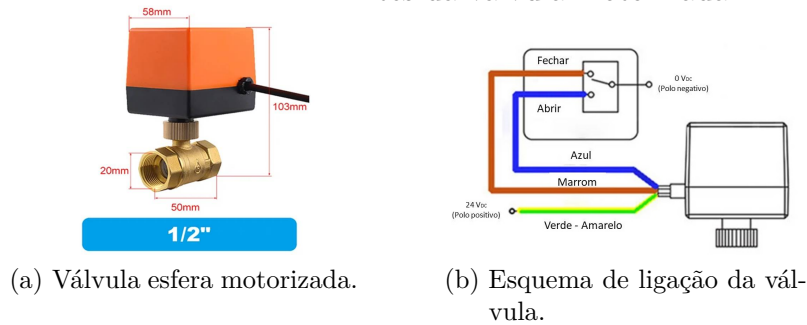
Para a condução de água aquecida, pode-se utilizar tubulações metálicas, fabricadas em cobre, bronze ou latão. Entretanto, por questões econômicas, em geral utiliza-se o Policloreto de Vinila Clorado (do inglês, *Chlorinated Polyvinyl Chloride*) (CPVC), que possui características construtivas regidas definidas pela norma NBR15884 (2011). Nesta norma, define-se que a temperatura mínima suportada para regime operacional seja de 70 °C e a temperatura máxima suportada seja de pelo menos 80 °C.

2.1.2 Atuador

Neste trabalho, válvulas motorizadas foram utilizadas como atuadores hidráulicos para regular o fluxo de água no sistema. Essas válvulas são do tipo esfera, permitindo a abertura e o fechamento do escoamento de forma parcial ou total. O acionamento é realizado por um motor de corrente contínua com três condutores: um destinado à alimentação elétrica e os demais responsáveis pelo comando de abertura e fechamento. Internamente, as válvulas possuem sensores de fim de curso, responsáveis por interromper a alimentação do motor quando os limites máximos de abertura ou fechamento são atingidos, evitando sobrecarga e garantindo a integridade do mecanismo.

A Figura 4 apresenta sua construção, dimensões físicas e o esquema de ligação para controle de abertura e fechamento. Na Tabela 1, apresentam-se informações elétricas pertinentes para as conexões de operação e controle de uma válvula motorizada.

Figura 4 – Componentes da válvula motorizada.



Fonte: Adaptado de JP Fluid Control (2025).

Tabela 1 – Especificações das válvulas motorizadas.

Componente	Especificação
Material	Latão
Tipo de conexão	Controle de dois fios.
Tensão	12 – 24 V_{DC}
Consumo	6 W
Temperatura de operação	0 – 120 °C
Tempo de resposta	5 – 15 s
Pressão Nominal	1,6 MPa

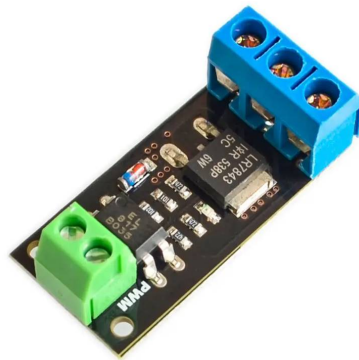
Fonte: Adaptado de JP Fluid Control (2025)

A interface de controle entre o microcontrolador e as válvulas empregadas neste projeto requer um esquema de isolamento entre a parte lógica e a parte de controle de potência associada aos atuadores. Para as válvulas, por serem dotadas de três fios, o emprego de uma ponte H não será adequado, pois a inversão de sentido entre abertura e fechamento não é feita com a inversão da polarização de alimentação entre dois terminais.

Neste projeto, o acionamento das válvulas eletromecânicas foi feito usando o módulo de controle Transistor de efeito de campo semiconductor de óxido metálico (do inglês, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ([MOSFET](#)) LR7843. Onde há um optoacoplador PC817 para isolar a interface de potência da interface de controle.

O controle da válvula eletromecânica foi feito pela aplicação de um sinal lógico de nível alto oriundo do microcontrolador. Este sinal também pode ser do tipo Modulação por Largura de Pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*) ([PWM](#)), a depender da aplicação. Cada unidade deste dispositivo, cuja ilustração encontra-se na [Figura 5](#), é responsável por acionar a abertura ou fechamento das válvulas de controle de fluxo.

Figura 5 – Módulo de Controle [MOSFET](#).



Fonte: Adaptado de [ProtoSupplies \(2024\)](#)

2.1.3 Medição de temperatura

A medição de temperatura utiliza sensores que normalmente são fabricados em platina, níquel ou cobre. A resistência ôhmica desses componentes pode variar de modo previsível em função da temperatura a que estão sujeitos no ambiente.

A redução da resistência dada por um aumento da temperatura é identificada por um Coeficiente de Temperatura Negativo (do inglês, *Negative Temperature Coefficient*) ([NTC](#)). Um conhecido sensor para esta finalidade é o [NTC](#) de $10\text{k}\Omega$, uma termorresistência que apresenta resistência típica de $10\text{k}\Omega$ quando exposta a uma temperatura de vinte e cinco graus Celsius.

Esse tipo de sensor apresenta características de resistência não lineares, resultando em uma variação de tensão em seus terminais que também ocorre de forma não linear, conforme a temperatura à qual está submetido. A relação entre a tensão nos terminais e a temperatura segue as características construtivas do sensor.

A equação (2.1) apresenta uma maneira de mensurar a temperatura de modo mais simples, obedecendo a uma equação empírica baseada no parâmetro β , que é uma informação técnica da sonda disponibilizada pelo fabricante. Essa relação é derivada da equação de Steinhart-Hart, sendo:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{25^{\circ}C}} + \frac{1}{\beta} \times \ln \left(\frac{R_t}{R_{25^{\circ}C}} \right), \quad (2.1)$$

em que, T é a temperatura a ser medida em Kelvin; $T_{25^{\circ}C} = 298,15$ K é a temperatura de referência; R_t é a resistência ômica medida no termistor, expressa em Ω ; $R_{25^{\circ}C}$ é a resistência ômica medida no termistor em $T_{25^{\circ}C}$, expressa em Ω .

Serão empregados no projeto três termômetros digitais. Esses dispositivos serão utilizados para apresentar ao usuário as temperaturas envolvidas no processo.

A Figura 6 apresenta um termômetro digital e seus componentes, tais como o display numérico e o termistor NTC de 10 k Ω , responsável pela medição da temperatura. Nala, também é mostrada uma adaptação realizada nos termistores utilizados devido às suas características físicas, eles foram incorporados a um poço termométrico de latão, com características adequadas para instalação direta no protótipo. As principais informações técnicas desse dispositivo estão detalhadas na Tabela 2.

Figura 6 – Termômetro Digital.



Fonte: Do autor.

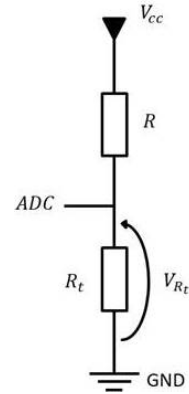
Tabela 2 – Especificações do termômetro digital.

Componente	Especificação
Sonda	Sensor NTC
Resistência típica	10 k Ω
Parâmetro β	3380 K
Temperatura típica	25 °C
Temperatura	-50 – 105 °C
Display	Especificação
Tensão de Alimentação	5 – 12 V _{DC}
Corrente	18 mA

Fonte: Retirado de (Techsul Eletrônicos, 2024)

Para a utilização dos termômetros mostrados na [Figura 6](#), é pertinente identificar como serão tomadas as medidas para o microcontrolador. Para isso, a [Figura 7](#) apresenta um esquema de ligação do termistor do termômetro, onde a resistência variável NTC de $10k\Omega$ é representada por R_t .

Figura 7 – Esquemático do termistor.



Fonte: Do autor.

Deste modo, pelo divisor de tensão, temos:

$$R_t = \frac{V_{R_t} \times R}{V_{cc} - V_{R_t}}. \quad (2.2)$$

Sabendo que a tensão V_{cc} é empregada na alimentação do termômetro e que R é a resistência associada em série com o termistor, a queda de tensão de cada uma das sondas, V_{R_t} , é a tensão medida por uma entrada analógica utilizada no Arduino. Logo, R_t é calculado por (2.2). Assim, pelo inverso de (2.1) a temperatura medida pode ser calculada pelo Arduino.

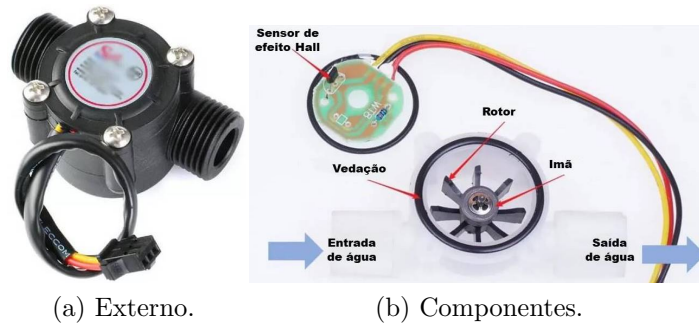
2.1.4 Sensor de vazão

O sensor de vazão mostrado na [Figura 8](#) é um dispositivo capaz de monitorar e medir a vazão de um determinado fluido que escoar e movimentar seu rotor. Também é vista sua parte interna, o que comprova características construtivas simples. Composto por uma carcaça de material plástico, aloja internamente um ímã associado a um rotor e um sensor de efeito Hall.

Utilizado para medição da vazão de água, possui apenas uma entrada e uma saída de água. Toda água passa pelo rotor, assim, a taxa de vazão varia conforme ele gira, isto é, maior velocidade, maior vazão. O sensor de efeito Hall capta os sinais de pulso correspondentes à sua rotação que são coletados e tratados para identificar o fluxo a cada instante desejado.

Esse dispositivo é empregado no projeto para estimar uma modelagem das válvulas associadas ao protótipo no que tange à capacidade de vazão para cada uma das tubulações, água quente e água fria. Suas características relevantes podem ser vistas na [Tabela 3](#).

Figura 8 – Sensor de vazão YF-S201.



Fonte: Retirado de [Seeed Studio \(2020\)](#)

Tabela 3 – Características do Sensor de fluxo YF-S201.

Componente	Especificação
Modelo	YF-S201
Tensão de trabalho	$5 - 18 V_{DC}$
Faixa de Fluxo	$1 - 30 l/m$
Pulsos por L	$450 \pm 10\%$
Pulsos por mL	$2,25 \pm 10\%$
Temperatura	$-25 - 80 ^\circ C$
Pressão máxima	$2 MPa$

Fonte: Retirado de [ALTRONICS \(2024\)](#)

2.1.5 Relé de Estado Sólido

Na [Figura 9](#) é apresentado um dispositivo capaz de bloquear a tensão alternada em sua saída mediante a aplicação de um sinal de *on/off*. Nesse modelo, a aplicação de uma tensão contínua em seus terminais de controle, por meio de um módulo [MOSFET](#) acionado pelo microcontrolador, permite habilitar ou interromper o fornecimento de tensão de $127 V$ para o chuveiro. Esse dispositivo, portanto, será responsável por ativar o funcionamento elétrico do chuveiro na ausência de água quente. Suas características de operação são descritas na [Tabela 4](#).

Figura 9 – Relé de estado sólido.



Fonte: Retirado de [Manuals.plus \(2025\)](#)

Tabela 4 – Especificações do relé de estado sólido.

Componente	Especificação
Modelo	SSR-50DA-H
Tensão de controle	3 – 32 V_{DC}
Tensão de operação	24 – 380 V_{CA}
Corrente máxima	50 A

Fonte: Retirado de [Manuals.plus](#) (2025)

2.1.6 Microcontrolador

Os microcontroladores, de maneira geral, são componentes que possibilitam o desenvolvimento de projetos de sistemas embarcados. Em especial, a utilização de um microcontrolador permite desenvolver controladores digitais e específicos para determinada aplicação, possibilitando que o projeto do controlador seja modificado e ajustado para cada necessidade.

Popularmente conhecido, o Arduino apresenta no mercado uma grande variedade de modelos de placas microcontroladoras. Para o desenvolvimento do protótipo, será empregada uma placa Arduino UNO, vista na [Figura 10](#). Disponibilizada como uma placa de desenvolvimento de código aberto, possui baixo custo e é equipada com o microcontrolador *ATmega328P*. Essa placa oferece entradas digitais e analógicas suficientes para a elaboração e desenvolvimento de um bom projeto.

Operando com uma tensão contínua que pode variar de 5 V a 12 V, dependendo do modo de alimentação, o Arduino UNO possui 14 pinos de entrada e saída digitais, dos quais 6 podem ser operados por modulação de largura de pulso, além de 6 pinos de entrada analógica.

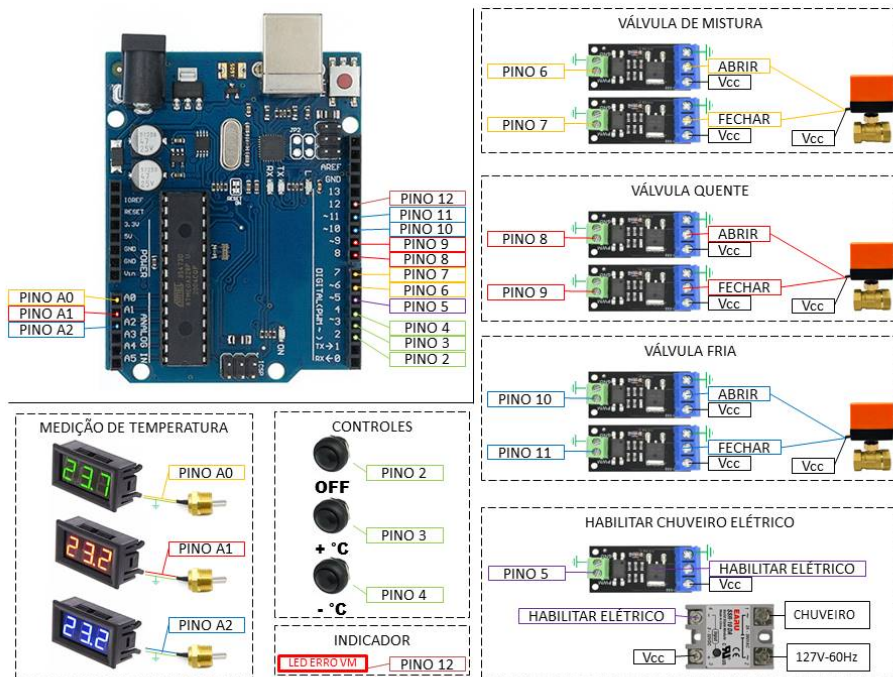
A [Figura 10](#) apresenta o esquema de ligação entre os pinos e os componentes utilizados. Dos pinos digitais empregados, os pinos 6 e 7 correspondem, respectivamente à abertura e ao fechamento da válvula de mistura, denominação da válvula atuada *FY33*; os pinos 8 e 9 correspondem, respectivamente, à abertura e ao fechamento da válvula de água quente, denominação da válvula atuada *FY31*; e os pinos 10 e 11 correspondem, respectivamente, à abertura e ao fechamento da válvula de água fria, denominação da válvula atuada *FY32*.

O terminal digital número 5 será responsável por habilitar o funcionamento do chuveiro elétrico convencional quando não houver água quente disponível. Enquanto, o terminal 12 será responsável por habilitar o funcionamento de um LED vermelho indicador de erro. Esse LED acenderá quando a temperatura fria estiver acima da temperatura desejada, o que representa uma situação anormal. Essa medida serve como uma forma de restringir ou sinalizar situações inesperadas.

Os terminais digitais 2, 3 e 4 são os únicos destinados ao controle direto do usuário. O acionamento do *pushbutton* associado ao terminal 2 provoca imediatamente o fechamento de todas as válvulas, encerrando o banho. Os *pushbuttons* conectados aos pinos 3 e 4 são responsáveis pelo aumento e pela redução da temperatura desejada, respectivamente. A cada pulso, o valor atual da temperatura é alterado em um grau Celsius, para mais ou para menos do valor atual.

As entradas analógicas A0, A1 e A2 são utilizadas para a medição de temperatura, pois estão associadas à queda de tensão nas respectivas sondas, como ilustrado na Figura 7. Assim, a entrada A0 mede a temperatura da mistura, identificada no diagrama como *TIT33*, A1 mede a temperatura da água quente, identificada no diagrama como *TIT31* e A2 mede a temperatura da água fria, identificada no diagrama como *TIT32*.

Figura 10 – Esquema de ligação - Arduino UNO.

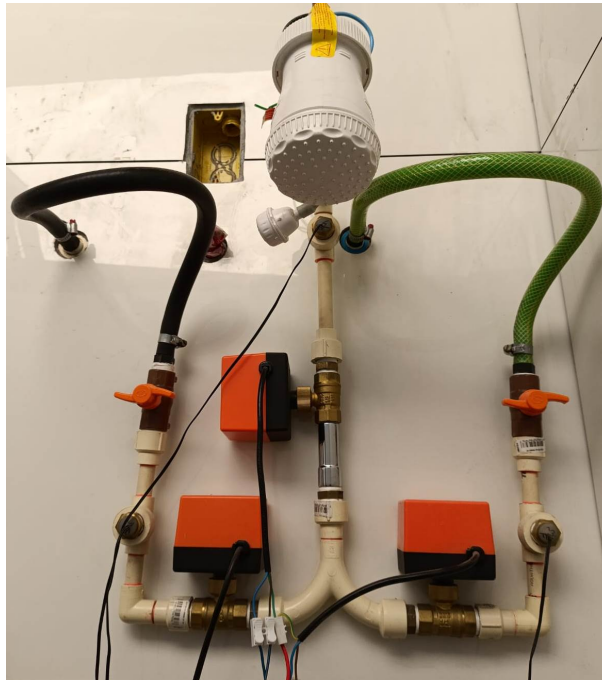


Fonte: Do autor.

2.2 Protótipo

A Figura 11 apresenta a montagem completa do sistema, baseada no arranjo esquemático mostrado na Figura 1. Considerando que o fornecimento de água quente ocorre pelo lado esquerdo do protótipo, que a água fria está conectada ao lado direito e que a região central corresponde à alimentação direta do chuveiro com a água de mistura, são exibidas as três válvulas motorizadas e as três sondas de temperatura, componentes dos respectivos indicadores e transmissores de temperatura, conforme os rótulos definidos na seção 2.1.

Figura 11 – Imagem do protótipo.



Fonte: Do autor.

2.3 Considerações parciais

O [Capítulo 2](#) teve como objetivo apresentar as principais características construtivas e funcionais do protótipo, bem como os fundamentos teóricos que embasam sua concepção e as conexões empregadas em seu desenvolvimento.

Inicialmente, foi apresentado o diagrama geral do sistema, destacando-se os elementos responsáveis pelo controle e monitoramento das variáveis hidráulicas e térmicas, especialmente as válvulas motorizadas e os termômetros, que constituem os principais atuadores e sensores do protótipo.

Na sequência, foram descritos os componentes periféricos essenciais ao funcionamento do sistema, tais como o aquecedor solar, os tubos utilizados nas redes hidráulicas, os reservatórios, o relé de estado sólido e o sensor de fluxo. Para cada componente, foram apresentados seu princípio de funcionamento, suas configurações e suas principais características físicas e elétricas.

Além da descrição técnica, foram discutidos os critérios que fundamentaram a escolha desses elementos, considerando aspectos como custo-benefício, disponibilidade comercial, compatibilidade hidráulica e elétrica com o sistema proposto. Tais critérios foram determinantes para garantir viabilidade técnica, confiabilidade operacional e coerência com os objetivos do trabalho.

3 Modelagem e projeto do controlador

Sistemas de controle consistem em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada, com o desempenho esperado, dada uma entrada especificada (NISE, 2013). A compreensão de um sistema de controle requer a identificação de todo o seu contexto, incluindo as variáveis de processo, entradas, saídas, valor estimado para a saída e dispositivos atuadores.

A representação de um sistema e de seu comportamento físico requer a aplicação de técnicas capazes de transformá-lo em um modelo matemático que reproduza as mesmas respostas para um determinado conjunto de entradas, descrevendo com fidelidade o comportamento do sistema real. A essa ação dá-se o nome de modelagem matemática, na qual o conhecimento prévio do contexto de um sistema de controle pode facilitar o seu desenvolvimento.

3.1 Identificação do sistema

A modelagem caixa branca é aquela que se embasa no profundo conhecimento do sistema, conhecendo todos os parâmetros, equações matemáticas, assim como variáveis de entrada e saída, tornando esse tipo de modelagem restrito a casos em que todos os parâmetros são determinados.

Uma abordagem caixa branca conhecida para esta situação pode ser desenvolvida a partir da calorimetria da água. De certa forma, ela seria capaz de realizar um envolvimento matemático esperado para o funcionamento do sistema, uma vez que a temperatura adequada para o banho depende da proporção entre as vazões de água quente e fria a serem misturadas.

Para simplificar esse tipo de sistema, considera-se que ambas as temperaturas da água quente e fria permanecem constantes durante o banho. A água fria, por estar próxima da temperatura ambiente, tende a não apresentar variações significativas e, por isso, é assumida como constante. Já a água quente pode ser tratada como proveniente de um sistema adiabático, ou seja, sem trocas de calor com o ambiente, mantendo sua temperatura estável durante o curto período de uso.

Com essas suposições, a razão de mistura entre as vazões de água quente e fria pode ser determinada com base na calorimetria, uma vez que a temperatura desejada da água de banho é definida previamente pelo usuário e considerada como constante.

Partindo da Equação Fundamental da Calorimetria para a água, que é descrita em (3.1).

$$Q = m.c.\Delta\Theta, \quad (3.1)$$

em que Q é a quantidade de calor (J), m é a massa (kg), c é o calor específico da água ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e $\Delta\Theta$ é a variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Considerando que as temperaturas iniciais são conhecidas e que o processo de mistura ocorre em regime adiabático, isto é, sem trocas de calor com o meio externo, aplica-se o princípio da conservação de energia. Assim, o somatório das quantidades de calor trocadas pelas massas de água envolvidas na mistura é nulo, ou seja:

$$m_q.c.(\Delta T) + m_f.c.(\Delta T) = 0, \quad (3.2)$$

em que m_q e m_f correspondem às massas de água quente e de água fria, respectivamente, expressas em quilogramas (kg).

Como a temperatura desejada corresponde à temperatura final da mistura entre a vazão de água fria e a vazão adicionada de água quente, que juntas formam a vazão total da mistura, e considerando que o chuveiro é o único ponto de escoamento desses fluxos combinados, (3.2) pode ser reescrita em função da variação de temperatura de cada componente da mistura,

$$m_q.c.(T_m - T_q) + m_f.c.(T_m - T_f) = 0, \quad (3.3)$$

em que T_q , T_f e T_m são as temperaturas quente, fria e de mistura expressas em ($^{\circ}\text{C}$), respectivamente.

Logo, a saída será a mistura no chuveiro, que pode ser vista como $m_m \times T_m$, e pela conservação de massa, $m_m = m_f + m_q$. Assim, tem-se que:

$$T_m = \frac{m_q.T_q + m_f.T_f}{m_q + m_f}. \quad (3.4)$$

Embora se mostre pertinente, uma modelagem caixa branca baseada em (3.4) implica na necessidade de controle direto de todas as vazões envolvidas, em especial na vazão resultante que sofre interferência direta de duas possibilidades de controle, dada mudança da vazão quente e vazão fria, e para isso, o conhecimento de equações fidedignas para o modelo de cada uma das válvulas seria muito importante.

Ainda que seja possível realizar tal modelagem das válvulas, essas não seriam plenas e o controle final poderia apresentar uma maior complexidade. Logo, outro direcionamento será tratado para uma modelagem baseada na temperatura quente disponível, que, por sua vez, é a grandeza mais preponderante.

A modelagem em caixa preta é utilizada quando não se dispõe de conhecimento sobre as equações e parâmetros que melhor representam o sistema, ou de informações capazes de relacionar uma dada entrada a uma dada saída. Nesse caso, a construção do modelo baseia-se em dados experimentais, obtidos por meio de ensaios realizados em condições pré-estabelecidas. Posteriormente, após o processamento das informações de entrada e saída, é possível determinar uma modelagem matemática que caracteriza a dinâmica do sistema.

Modelagem em caixa cinza é vista como um híbrido das duas técnicas citadas anteriormente, pois utiliza dados experimentais juntamente com algumas informações do sistema, tais como equações matemáticas ou informações construtivas do sistema, que levam ao perfeito conhecimento da dinâmica do sistema, possibilitando então a sua modelagem matemática.

Tendo como fator determinante a ausência de uma equação que melhor representa os componentes atuadores do projeto e do sistema como um todo, será empregado neste trabalho o método de modelagem caixa preta. Este método será aplicado nas válvulas motorizadas, primeiramente permitindo a obtenção da sua resposta de vazão em função do tempo de abertura do seu obturador e, posteriormente, uma modelagem da resposta de temperatura de saída quando há determinada vazão de entrada em função do tempo de abertura da válvula de água aquecida, para uma única vazão de água fria.

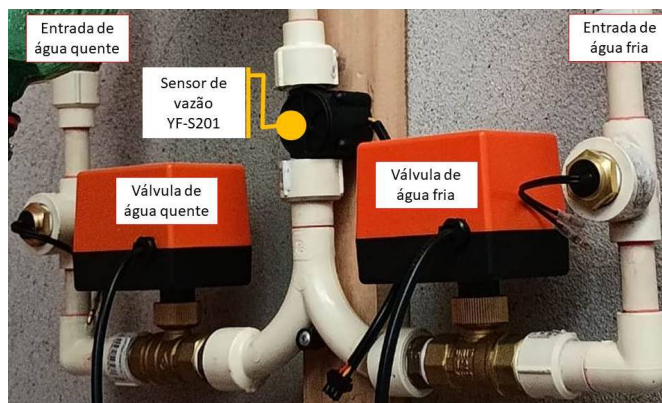
3.2 Modelagem da válvula

A operação de uma válvula de esfera resulta no controle de vazão de água que flui pelo seu orifício; a vazão resultante, no entanto, está associada ao quanto de abertura foi definido na válvula. Desta forma, pode-se estimar uma curva de calibração para relacionar o percentual de abertura da válvula com a vazão fornecida; logo, esta informação passaria a fazer parte do sistema que deve ser modelado. Sabendo que o mecanismo de operação da válvula é operado eletricamente, a válvula deve ser modelada em função do tempo ao qual está energizada para abrir ou fechar seu canal.

Esses ensaios foram realizados diretamente na planta em desenvolvimento. Para sua execução, utilizaram-se as válvulas eletromecânicas de água quente (FY-31) e de água fria (FY-32). O sensor de vazão (FT-33) foi o principal componente empregado nesta etapa, sendo responsável por medir a vazão de água que circula por cada válvula. Além disso, utilizou-se uma balança digital de gancho, de uso doméstico, para fins de comparação entre o peso e o volume de água medido nos ensaios.

A [Figura 12](#) apresenta o sensor de vazão (FT-33), ele foi instalado no lugar da válvula de mistura, onde é a saída da água para o chuveiro. Deste modo, será utilizado para medir a vazão de água quente e a vazão de água fria, em cada uma das válvulas separadamente.

Figura 12 – Instalação do sensor de vazão.



Fonte: Do autor.

As válvulas de esfera levaram aproximadamente 12 s para abrir completamente, passando do estado de obstrução total para a liberação integral do fluxo pelo orifício. Diversos ensaios foram realizados para medir, entre outros fatores, a vazão fornecida pela válvula no contexto de operação do sistema.

Esse teste considerou a presença de duas válvulas responsáveis pelo controle direto do fluxo de saída: uma para a água quente e outra para a água fria. No caso da válvula de mistura (FY-33), o teste não foi executado, uma vez que sua função se limita à liberação do fluxo para o chuveiro.

Operando as válvulas de água fria e de água quente individualmente, foi possível realizar a medição de vazão em ambos os lados da tubulação separadamente. Para isso, manteve-se uma das válvulas fechadas e realizou-se o ensaio de abertura e medição de vazão na outra.

O microcontrolador foi usado para contar os pulsos gerados pelo medidor de vazão do tipo turbina. Em seguida, com o processamento foram registrados a vazão média e o volume total da válvula analisada. Em um segundo momento, a válvula já caracterizada foi fechada, e o experimento foi realizado na válvula que estava obstruída anteriormente. Após esse procedimento, o sensor de vazão foi substituído pela válvula de mistura.

Por fim, o microcontrolador foi programado para manipular as válvulas e obter dados tanto da linha de água fria quanto da linha de água quente de forma independente.

O ensaio foi realizado a partir do fechamento completo da válvula a ser caracterizada. Para cada etapa, a válvula era aberta durante um intervalo de tempo previamente definido e, em seguida, retornava à posição totalmente fechada antes da próxima medição. Inicialmente, a válvula foi aberta por 1 s, efetuando-se as medições correspondentes e, posteriormente, fechada. Na sequência, o procedimento foi repetido com abertura de 2 s, seguida novamente do fechamento da válvula. Esse processo foi realizado de forma incremental até o tempo de 13 s, garantindo a caracterização completa da faixa de operação, desde a condição totalmente fechada até a totalmente aberta.

Foram realizados vinte e seis ensaios para cada válvula. Cada passo de abertura permaneceu ativo por aproximadamente 45 s, durante os quais os dados foram monitorados e registrados em um documento. Posteriormente, essas informações foram processadas no *software* MATLAB e apresentadas na [Tabela 5](#), que mostra os valores de vazão média correspondentes a cada *step*. Observa-se uma diferença notória entre as vazões de água quente e água fria, especialmente nos primeiros ensaios, possivelmente decorrente de fatores como a diferença de nível dos reservatórios e o distinto diâmetro das tubulações empregadas em cada circuito hidráulico até a válvula ensaiada.

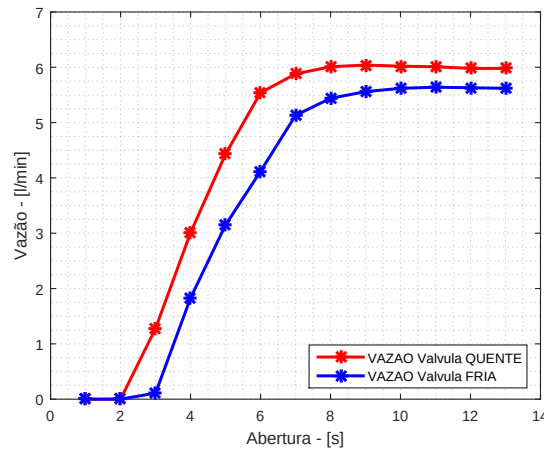
Tabela 5 – Ensaios da válvula de esfera motorizada.

Tempo de abertura [s]	Vazão Fria [l/min]	Vazão Quente [l/min]
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,11	1,28
4	1,83	3,01
5	3,15	4,43
6	4,12	5,54
7	5,13	5,88
8	5,44	6,01
9	5,56	6,04
10	5,62	6,02
11	5,64	6,01
12	5,63	5,98
13	5,62	5,98

Fonte: Do autor.

Na [Figura 13](#), é apresentado um gráfico ilustrando os resultados mostrados na [Tabela 5](#), em que é possível notar uma tendência de estabilização da vazão, $5,6l/min$ para vazão de água fria e $6,0l/min$ para vazão de água quente; desta forma, pode-se dizer que a vazão máxima para cada uma delas está associada aos valores indicados. Pode ser observado também que as válvulas apresentam um comportamento linear de vazão entre a abertura mínima e máxima em aproximadamente 7 s.

Figura 13 – Gráfico comparativo de vazão das válvulas para dada abertura.

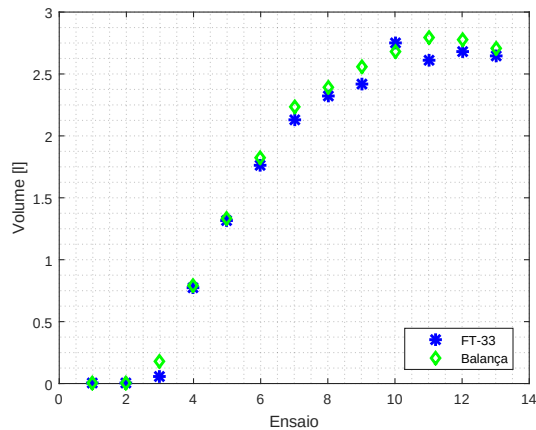


Fonte: Do autor.

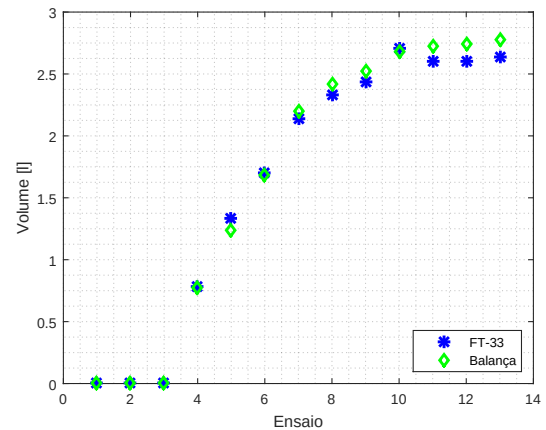
Como forma alternativa para garantir que a medição de vazão fosse realizada corretamente, utilizou-se uma balança digital para comparar o volume escoado registrado pelo sensor de vazão com o volume efetivamente armazenado em um balde e posteriormente pesado. O volume foi registrado pelo *software* em litros (*l*) e conferido por meio de uma balança de mão em quilogramas (*kg*). Deste modo, foi considerado que a densidade de 997 kg/m^3 da água é aproximadamente 1 kg/L .

Os resultados apresentados na Figura 14 são da análise para a válvula de água fria, para o primeiro e o segundo conjunto de ensaio. Para a válvula de água quente, os resultados são destacados na Figura 15, também para dois conjuntos. Nota-se que, embora haja pequenas diferenças em alguns momentos dos ensaios, para ambos os cenários pode-se considerar uma boa aproximação dos resultados para os fins deste projeto.

Figura 14 – Comparação entre o volume medido pelo sensor e a massa medida pela balança para a válvula de água fria.



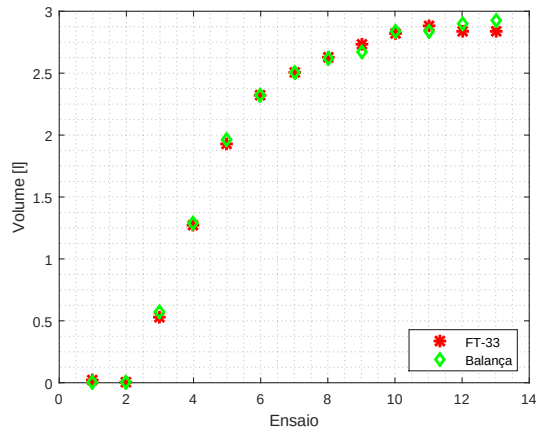
(a) Primeiro conjunto de teste.



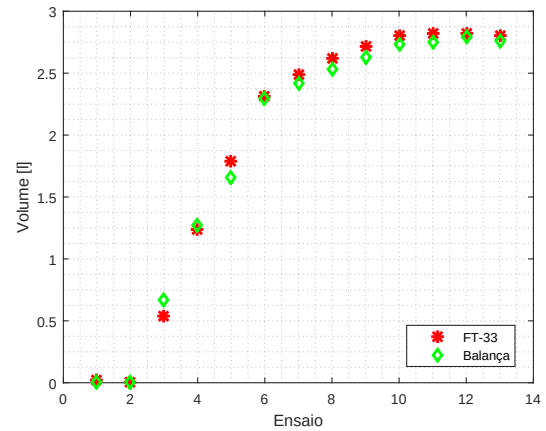
(b) Segundo conjunto de teste.

Fonte: Do autor.

Figura 15 – Comparação entre o volume medido pelo sensor e a massa medida pela balança para a válvula de água quente.



(a) Primeiro conjunto de teste.



(b) Segundo conjunto de teste.

Fonte: Do autor.

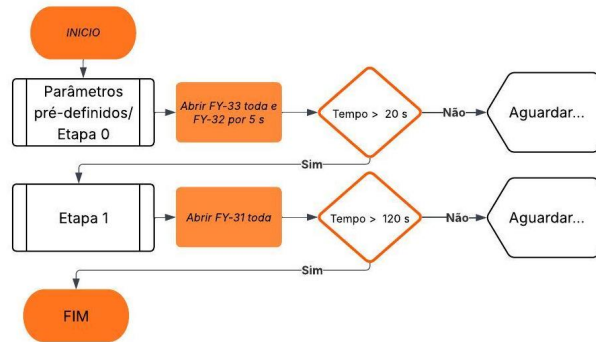
3.3 Modelagem da temperatura de mistura

Na [seção 3.2](#), foram apresentados resultados para mensurar a capacidade de vazão de água em função do tempo de abertura das válvulas. Nesta seção, é estudada uma maneira de modelar a temperatura de saída diante de uma vazão constante de água fria e, assim, disponibilizar uma mistura térmica com vários cenários, variando a vazão de água quente até o máximo.

Para isso, novas instruções foram configuradas no Arduino, baseando-se na vazão de água em relação ao tempo de abertura. De acordo com a [Tabela 5](#), estimou-se que um acionamento de abertura na válvula fria por cinco segundos disponibilizava um fluxo de aproximadamente $3,15 \text{ l/m}$. Esse arranjo de fluxo proporcionaria uma relação de mistura entre as entradas, permitindo a coleta de dados com base na vazão de operação, considerando a vazão mínima de água fria combinada com todo o intervalo possível de vazão de água quente. Neste instante, mapeou-se o tempo máximo para a abertura da válvula quente, que, baseado no comportamento linear identificado na [Figura 13](#), foi de aproximadamente 7 s.

Com a montagem do protótipo já definida, a [Figura 16](#) ilustra um fluxograma básico das ações do ensaio realizado. A válvula de mistura foi totalmente aberta, a válvula de água fria abriu por 5 s, fornecendo uma vazão constante da água, aguardou-se 20 s para que a válvula de água quente recebesse o comando para iniciar sua abertura. O monitoramento das temperaturas foi concomitantemente realizado neste processo.

Figura 16 – Fluxograma da modelagem da temperatura de mistura.

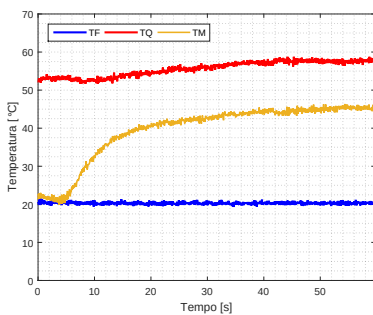


Fonte: Do autor.

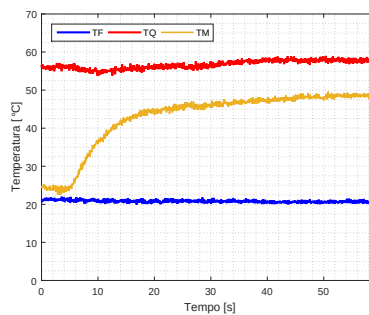
O gráfico apresentado na [Figura 17](#) mostra as temperaturas coletadas ao longo de 60 s, intervalo considerado adequado para a análise da resposta do sistema à abertura da válvula de água quente. Os dados apresentados compreendem o período desde o instante inicial de abertura da válvula até o momento em que as temperaturas atingem uma região de estabilização.

A figura também apresenta a repetição de ensaios sob a mesma condição experimental, na qual a temperatura da água fria (TF) em regime permanente é de aproximadamente 20 °C, enquanto a temperatura da água quente (TQ) em regime permanente é de aproximadamente 57 °C. Nessas condições, a temperatura média de mistura na saída (TM) foi de aproximadamente 45 °C.

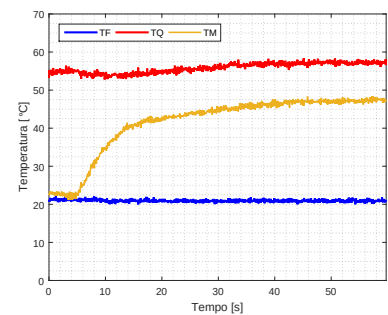
Figura 17 – Ensaios da temperatura de mistura.



(a) Ensaio 1.



(b) Ensaio 2.



(c) Ensaio 3.

Fonte: Do autor.

Uma análise relevante consiste na comparação entre a temperatura obtida em regime permanente e aquela estimada pela relação de calorimetria da água apresentada em (3.4), considerando as respectivas aberturas das válvulas.

A vazão de água fria estimada para uma abertura de 5 s é de 3,15 l/min. Sabe-se que a válvula de água quente entra em saturação ao atingir 8 s de abertura, sendo sua vazão máxima estimada em 6,01 l/min. Com base nessas grandezas, a temperatura de mistura calculada por meio de (3.4) é de 44,28 °C, valor coerente com aquele observado na região de regime permanente para os ensaios realizados.

Observando o comportamento dinâmico do sistema na [Figura 17](#) e analisando os dados de temperatura obtidos para as repetições apresentadas, foi possível identificar a função de transferência que representa a variação da temperatura de mistura em relação à vazão da válvula de água quente. Essa identificação foi realizada por meio da função *Nonlinear Least-Squares Solver* ([DENNIS; SCHNABEL, 1983](#)), disponível no *software* MATLAB.

Assim, utilizando os dados do ensaio 01 como base, foi definida uma aproximação para essas curvas, na qual o processo apresenta dinâmica lenta e comportamento estável, características típicas de sistemas térmicos. Os valores das constantes do modelo identificado, descrito em (3.5), são computados e apresentados na [Tabela 6](#).

$$G(s) = K \frac{e^{-Ls}}{\tau s + 1}. \quad (3.5)$$

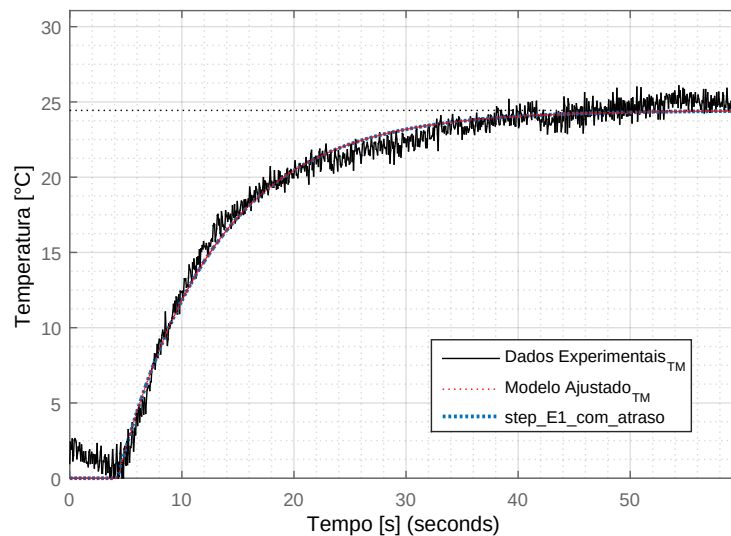
Tabela 6 – Constantes do modelo aproximado.

Parâmetros	Ensaio 01
K	24,43
τ	8,67
L	4,26

Fonte: Do autor.

Por fim, a [Figura 18](#) apresenta um comparativo entre a curva obtida experimentalmente no ensaio, a resposta ao degrau do modelo aproximado e a resposta ao degrau unitário da função apresentada na equação (3.5), utilizando os dados da [Tabela 6](#). Esse comparativo evidencia a boa aderência do modelo identificado em relação ao comportamento experimental do processo.

Figura 18 – Modelagem da temperatura de mistura - Comparação das curvas - Ensaio 01.



Fonte: Do autor.

Para avaliar a qualidade do modelo obtido, é possível utilizar a equação (3.6), denominada Raiz do Erro Quadrático Médio (do inglês, *Root Mean Square Error*) (RMSE). Basicamente, ela mede a diferença média entre os valores previstos pelo modelo e os valores reais, dando mais peso a erros maiores.

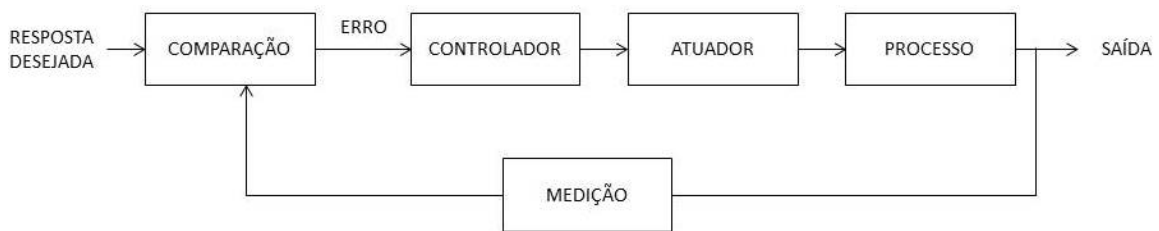
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (3.6)$$

Deste modo, o valor RMSE identificado para o modelo ajustado da Figura 18 é de 3,25 %. Esse percentual pode ser considerado baixo para o sistema em questão, modelando a temperatura da mistura, operando exclusivamente na vazão de água quente do sistema.

3.4 Sistema de Controle

Existem pelo menos dois tipos de sistemas de controle. O primeiro, denominado malha aberta, não possui um sistema de realimentação da variável de saída, o que impossibilita um controle minucioso baseado na comparação entre a resposta desejada e a saída. O segundo tipo é denominado malha fechada. Conforme ilustrado na Figura 19, o sistema de malha fechada apresenta um ramo de realimentação, identificado pelo bloco de medição. Esse ramo possibilita, pelo menos, duas características de suma importância para um bom desempenho do controle: a primeira é uma melhor rejeição a perturbações, e a segunda é a redução do erro em regime permanente do sistema.

Figura 19 – Sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Adaptado de Nise (2013).

Para o sistema de controle térmico proposto, a temperatura de mistura obtida no processo terá seu valor realimentado para comparação no ramo de malha fechada.

No contexto do controle de temperatura, o atuador será diretamente responsável por regular a vazão de água quente, de modo que um aumento ou redução dessa vazão resulte em maior ou menor temperatura da água de mistura na saída. Assim, a válvula eletromecânica empregada na alimentação de água quente atuará como o atuador do processo.

No contexto de vazão fornecida pelo sistema, não será empregado um controle específico. Dessa forma, a vazão total do sistema terá um valor mínimo garantido pela vazão de água fria, sendo que a vazão total operará em malha aberta e dependerá exclusivamente da vazão de água quente.

3.5 Compensador

Baseado na modelagem do sistema apresentada na [seção 3.3](#) e no modelo matemático da planta, cuja representação dinâmica no domínio da frequência foi obtida por (3.5), é possível projetar um compensador com o auxílio do MATLAB.

Os controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) possuem ampla aplicabilidade na maioria dos sistemas de controle. Embora, em alguns casos, não sejam capazes de fornecer um desempenho ótimo, esses controladores geralmente são suficientes para garantir um comportamento satisfatório do sistema ([OGATA, 2010](#)).

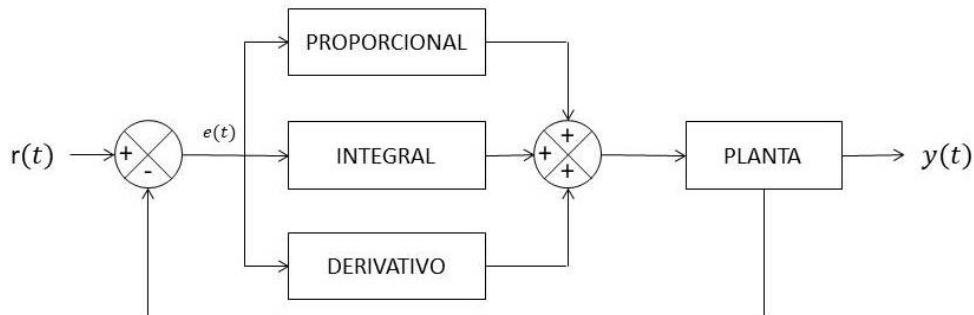
A estrutura proporcional-integral-derivativo caracteriza-se pelas três ações fundamentais do controlador. A ação do Termo Proporcional (P) tem ação direta no erro do sistema, por meio do ganho K_p , no qual o erro é mitigado. O termo Termo Integral (I) acumula o erro ao longo do tempo e oferece, por intermédio do ganho K_i , uma ação mais assertiva no erro, sendo capaz de reduzi-lo a zero em regime permanente. Por fim, a ação do Termo Derivativo (D) é representada pelo ganho K_d , que também atua na redução do erro por meio da derivada e atua diretamente na resposta transitória.

Um esquemático do controlador PID para uma malha de controle com realimentação negativa é apresentado na [Figura 20](#), sendo

$$C(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (3.7)$$

em que $C(t)$ é o sinal do controlador no domínio do tempo; $e(t)$ é o sinal de erro no domínio do tempo; τ_i e τ_d são, respectivamente, os tempos relacionados à ação integral e derivativa.

Figura 20 – Diagrama de blocos esquemático do sistema de controle em malha fechada com controlador PID.



Fonte: Adaptado de [Ogata \(2010\)](#).

Segundo Ogata (2010), a implementação de um controlador do tipo PID inicia-se pela estimativa de parâmetros sugeridas pelo método de sintonia de Ziegler – Nichols em malha fechada; K_p , K_i e K_d são parâmetros que são estimados baseados nas respostas ao degrau e indicados para a modelagem de sistemas em que a planta é desconhecida e podem ser descritos como:

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i}. \quad (3.8)$$

e,

$$K_d = K_p \tau_d. \quad (3.9)$$

Logo, (3.7) pode ser descrita através das constantes K_p , K_i e K_d , isto é

$$C(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.10)$$

Por fim, (3.10) pode ser representada no domínio da frequência:

$$C(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s). \quad (3.11)$$

Logo, colocando $E(s)$ em evidência, (3.11) pode ser reescrita como:

$$\frac{C(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (3.12)$$

A ação derivativa de um controlador PID calcula a taxa de variação do erro ao longo do tempo, respondendo de forma proporcional à rapidez com que o erro se altera. Embora esse mecanismo possa melhorar a resposta transitória em sistemas ideais, seu desempenho em plantas reais é frequentemente comprometido pela presença de ruídos de medição. Como o termo derivativo naturalmente enfatiza componentes de alta frequência, mesmo pequenos ruídos podem ser interpretados como variações rápidas e significativas do erro. Essa amplificação não desejada leva o controlador a reagir de maneira excessiva, produzindo comandos bruscos ao atuador e introduzindo oscilações na resposta do sistema.

Assim, a ação derivativa pode comprometer a estabilidade do sistema, gerando oscilações sustentadas que impedem a convergência ao valor de referência. Diante dessa característica, em sistemas com ruídos, o uso da ação derivativa tende a ser desfavorável ou até inviável.

Nessas situações, a adoção de um controlador proporcional-integral (PI) apresenta-se como uma alternativa mais apropriada, pois elimina a sensibilidade excessiva às variações de alta frequência, preservando a estabilidade e garantindo um desempenho consistente. Logo, a função do controlador $Gc(s)$ do tipo PI pode ser reescrita como:

$$Gc(s) = K_p + \frac{K_i}{s}. \quad (3.13)$$

Para a planta em desenvolvimento, há a presença de um tempo de atraso puro na função. Esse atraso não altera a resposta em regime permanente, mas é um dos elementos que dificultam o controle, pois adiciona fase negativa sem modificar o módulo, tornando o sistema mais difícil de estabilizar.

A inclusão do tempo de atraso resulta em um aumento numérico da margem de fase, além de reduzir significativamente a margem de ganho, evidenciando que o sistema torna-se mais sensível a variações de ganho. Esse comportamento é característico de sistemas com atraso puro, nos quais a fase é degradada continuamente com o aumento da frequência, limitando a robustez do sistema e dificultando o projeto do controlador.

Com base no modelo matemático identificado, e considerando a análise em frequência apresentada anteriormente, foi desenvolvido um controlador proporcional-integral (PI) para o sistema. O desenvolvimento do controlador foi realizado no ambiente MATLAB, utilizando a ferramenta *SISOtool*, a partir do modelo da planta.

A sintonia do controlador foi obtida por meio do recurso de ajuste automatizado da ferramenta. Considerando as constantes apresentadas na [Tabela 6](#), aplicadas à (3.5), o controlador obtido para o Ensaio 01 é descrito pela seguinte função de transferência:

$$C(s) = 0,426 \times \frac{s + 0,346}{s}, \quad (3.14)$$

O controlador proporcional-integral obtido para o Ensaio 01 é descrito pela função de transferência apresentada em (3.14). A partir dessa expressão, identificam-se um ganho proporcional K_p e o ganho integral K_i , que são apresentados na [Tabela 7](#).

Tabela 7 – Ganhos do controlador.

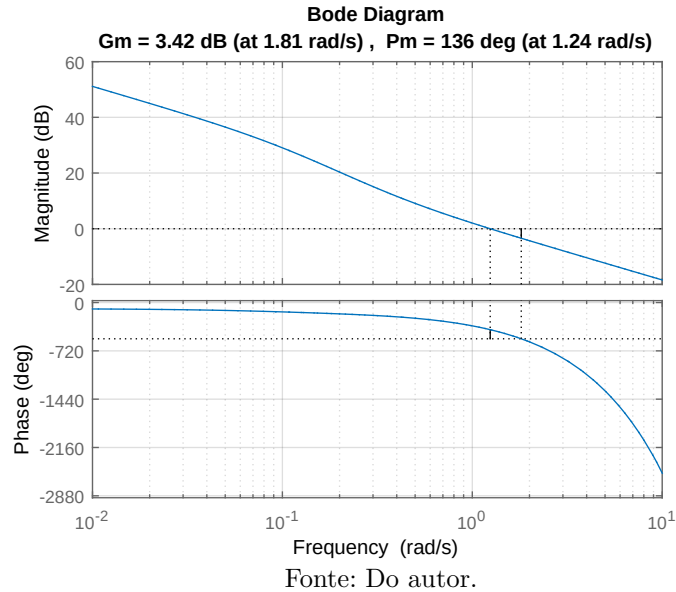
	Ensaio 01
K_p	0,426
K_i	0,147

Fonte: Do autor.

O termo proporcional atua diretamente na correção do erro instantâneo, contribuindo para a melhoria da resposta dinâmica do sistema, enquanto o termo integral é responsável pela eliminação do erro em regime permanente, característica desejável para o controle da temperatura da água no sistema proposto.

A [Figura 21](#) apresenta o diagrama de margens de estabilidade do sistema em malha aberta, obtido por meio da função *margin* do MATLAB, considerando a planta descrita em 3.5 e o controlador PI projetado em 3.14. Por se tratar de um sistema experimental, diversas características contribuem para sua complexidade, especialmente as dificuldades associadas à repetibilidade exata de determinadas condições de operação. Ainda assim, os resultados obtidos evidenciam que o controlador PI apresenta margens compatíveis com a dinâmica típica de sistemas térmicos, mesmo considerando que tais margens já refletem os efeitos do atraso presente na planta.

Figura 21 – Diagrama de margens de estabilidade.



A margem de fase obtida pode ser considerada elevada; entretanto, essa é uma característica esperada em sistemas fortemente amortecidos, cujo projeto visa uma resposta transitória suave. Nesse contexto, a elevada margem de fase indica uma maior capacidade do sistema em lidar com incertezas associadas à constante de tempo estimada, bem como em absorver variações no ganho e possíveis alterações no tempo de atraso do modelo da planta.

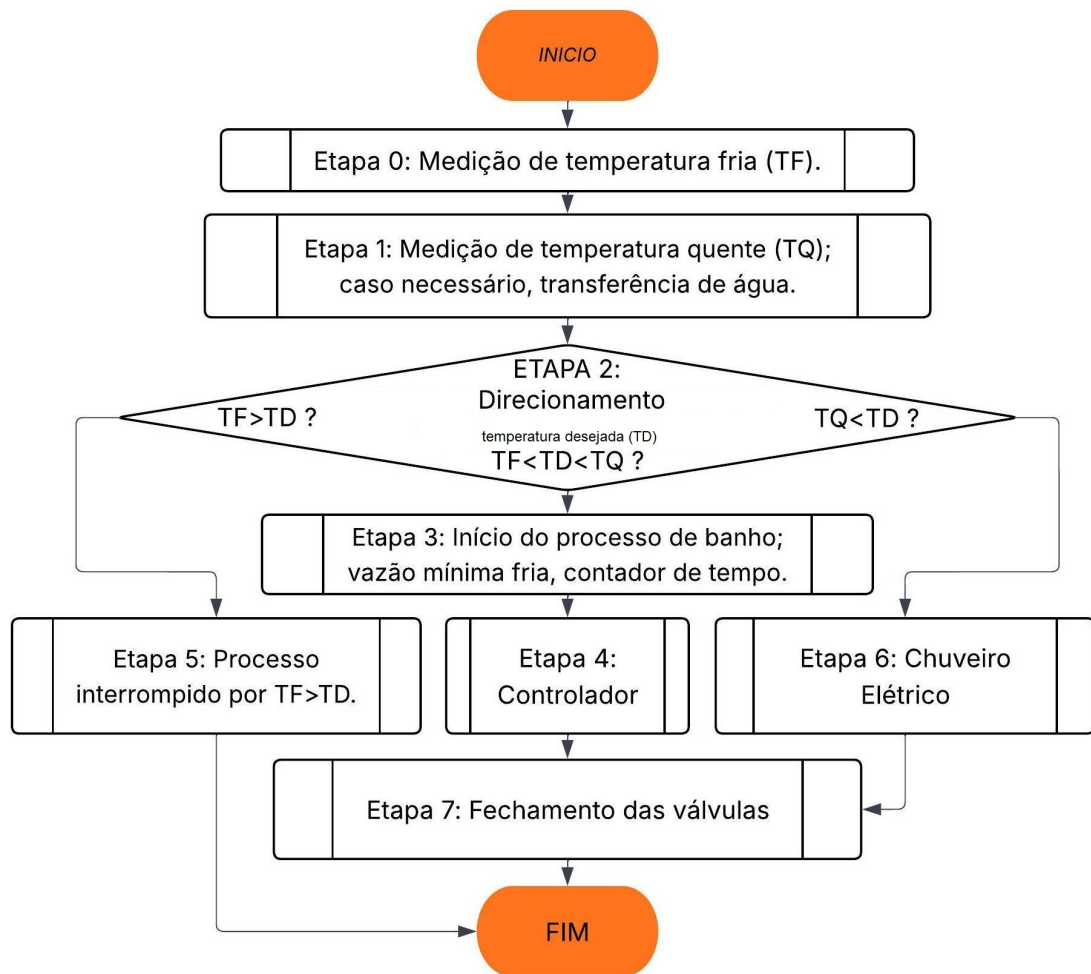
A margem de ganho, embora moderada, mostra-se aceitável e coerente para sistemas de dinâmica lenta, sendo compatível com a utilização de um controlador PI. Dessa forma, a margem de ganho obtida representa um compromisso adequado para um desempenho.

De acordo com [Åström e Wittenmark \(2011\)](#), quando a dinâmica do processo é lenta em relação ao período de amostragem, os efeitos da discretização e do retentor de ordem zero podem ser aproximados por um atraso equivalente, cujo impacto sobre a estabilidade e o desempenho do sistema é reduzido. Nessas condições, o projeto do controlador no domínio do tempo contínuo é uma abordagem válida e amplamente utilizada. Assim, neste trabalho, o controlador PI foi projetado a partir da função de transferência do sistema no domínio da frequência, e sua lei de controle contínua foi implementada em plataforma digital por meio de integração numérica. Considerando a dinâmica lenta do sistema, os efeitos da discretização implícita associada ao processo de amostragem não comprometem a estabilidade nem o desempenho do sistema de controle.

3.6 Operação do Sistema

Após idealizado o funcionamento do sistema, as etapas de operação foram identificadas e suas ações definidas para execução no Arduino. A [Figura 22](#) ilustra um fluxograma macro com os rótulos especificados.

Figura 22 – Fluxograma das etapas de operação.



Fonte: Do autor.

Quando o sistema é energizado, inicia-se automaticamente a operação, seguindo os passos programados até o encerramento. O usuário dispõe de apenas três botões, que podem ser acionados a qualquer momento. Como a temperatura de referência, aqui denominada de temperatura desejada (TD), foi pré-definida em 40 °C, existe um botão de pulso que aumenta a temperatura desejada em 1 °C a cada acionamento; de forma análoga, outro botão reduz esse valor em 1 °C. O terceiro botão de pulso permite finalizar imediatamente o processo a qualquer momento. Está definido como padrão um tempo máximo de 5 min para a duração do banho, o qual é temporizado a partir do início do processo de banho.

Etapa 0: Esta é a etapa inicial, na qual é realizada a leitura da temperatura da água fria (TF). Essa temperatura é considerada satisfatória caso o valor medido seja inferior à temperatura desejada (inicialmente 40 °C).

Etapa 1: Esta etapa é responsável pela leitura da temperatura da água quente (TQ) e, se necessário, pela transferência da água fria parada na tubulação para o lado da água fria. Para isso, caso a temperatura da água quente seja inferior à temperatura desejada, as válvulas de água fria e quente são abertas simultaneamente. A diferença de altura entre os reservatórios permite que a água proveniente do aquecedor empurre o volume de água parada nas tubulações em direção ao reservatório de água fria. A transferência prossegue até que uma das condições de parada seja atingida, que são:

1 - A temperatura da água quente ultrapassa a temperatura desejada, indicando que uma quantidade de água quente suficiente já alcançou a válvula correspondente;

2 - Um tempo pré-estabelecido de 45 s seja excedido. Tempo suficiente para garantir que todo o volume da tubulação tenha sido transferido. Se esse limite for ultrapassado, o sistema compreende que não há água quente com a temperatura adequada disponível e finaliza o processo de transferência.

Etapa 2: Esta etapa é decisiva para o direcionamento do processo. Caso as duas etapas anteriores apresentem resultados positivos, o sistema avança para o início do processo de banho (*Etapa 3*). No entanto, se a avaliação condicional da temperatura fria for maior que a temperatura desejada, o fluxo é conduzido diretamente para a interrupção do processo (*Etapa 5*). Uma vez que essa condição indica que o processo não pode prosseguir, pois a temperatura da água fria é superior à temperatura desejada e não é possível fazer o resfriamento da água.

De forma semelhante, se o resultado da avaliação da temperatura quente for inferior à temperatura desejada, o processo é direcionado ao uso do chuveiro elétrico de modo convencional (*Etapa 6*), o qual configura o sistema para o uso do chuveiro elétrico e realiza a contagem do tempo máximo pré-estabelecido.

Etapa 3: Esta etapa inicia efetivamente o processo do banho. A válvula de mistura é aberta totalmente, e a válvula de água fria é aberta por 5 s, o mesmo intervalo utilizado durante a modelagem do sistema, garantindo a vazão mínima de operação. Em seguida, os valores dos parâmetros do controlador são configurados e o tempo de início do banho é registrado.

Etapa 4: Nesta etapa estão definidas as ações de controle. A partir do cômputo do erro, diferença entre a temperatura medida e a temperatura desejada, são realizados os cálculos necessários para determinar o tempo de abertura ou fechamento da válvula de água quente. A ação do controlador (*Etapa 4*) permanece em repetição, atualizando continuamente o erro e fornecendo novas instruções para abertura ou fechamento da válvula de água quente, até que o tempo máximo de banho seja excedido ou o botão de finalização seja acionado.

Etapa 5: Esta etapa indica que o processo não foi realizado, sendo acionada em resposta ao teste de temperatura da água fria em relação à temperatura desejada, durante a verificação conduzida no direcionamento (*Etapa 2*).

Etapa 6: Esta etapa é consequência de uma resposta em que a temperatura desejada é superior à temperatura quente, durante o direcionamento (*Etapa 2*). Ela habilita o funcionamento do chuveiro elétrico e configura a abertura da válvula de água fria por 5 s, fazendo com que o sistema opere como um chuveiro convencional energizado durante o tempo máximo de banho ou até que o botão de finalizar seja acionado. Quando qualquer uma dessas condições é atingida, o sistema é direcionado para o fechamento das válvulas (*Etapa 7*), concluindo assim o seu funcionamento.

Etapa 7: Esta é a última etapa a ser executada. Ela contém as configurações responsáveis pelo fechamento de todas as válvulas e pela finalização do processo. Essa etapa é acionada diretamente após o término da ação do controlador (*Etapa 4*) devido à extrapolação do tempo máximo de banho, ou, após o término da utilização do chuveiro elétrico (*Etapa 6*) ou também, após o acionamento do botão de finalização.

3.7 Considerações parciais

O [Capítulo 3](#) foi elaborado com o objetivo de discorrer sobre a modelagem matemática do protótipo, apresentando conceitos teóricos sobre as técnicas de identificação do sistema, sistema de controle e o compensador final.

Apresenta uma abordagem contextual em que o projeto está caracterizado com o tipo caixa preta, em que não há conhecimento prévio de equações que regem sua dinâmica. Seguindo para uma modelagem da vazão das válvulas para que seja possível parametrizar uma vazão mínima e suficiente para o funcionamento do protótipo quando operando pelo controlador ou de modo chuveiro elétrico convencional. Apresenta uma modelagem da temperatura de mistura obtida na saída do sistema, como seu fluxograma de ações para a coleta de dados. Esses resultados foram obtidos por um sistema em malha aberta, no qual os dados foram coletados, dadas as aberturas das válvulas no cenário atual do sistema.

Ao apresentar o compensador, justifica-se a escolha pelo PI, e as manipulações da equação final do controlador, pelo auxílio do MATLAB, foram apresentadas características do sistema as quais permitem uma boa aproximação dos resultados mesmo em sistemas que não foram discretizados e implementados por uma integração numérica.

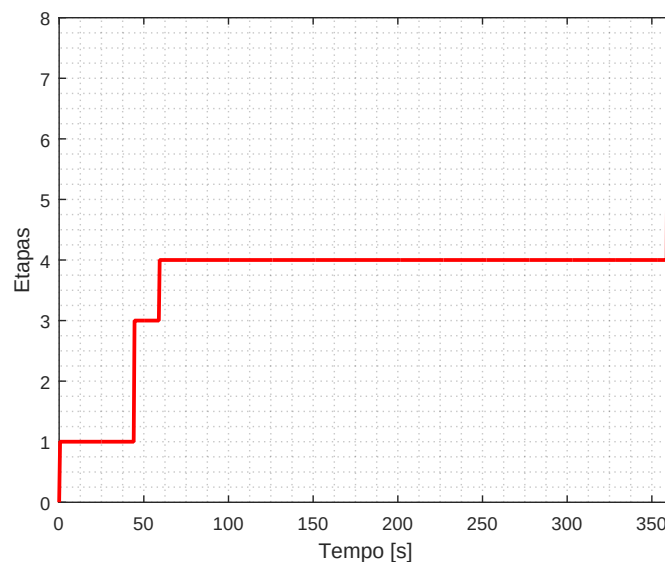
4 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos em condições que seguem o fluxograma descrito na [seção 3.6](#). Para isso, os reservatórios permanecem cheios, alimentados pelo reservatório de abastecimento, de modo a manter as considerações iniciais constantes com nível de água máximo. Há 4 casos possíveis diante do fluxograma apresentado em [Figura 22](#). Os rótulos empregados para cada etapa serão avaliados, com o objetivo de ilustrar como o processo está sendo desenvolvido.

4.1 Caso 1

A [Figura 23](#) apresenta a evolução das etapas para o caso 1, este é o processo desenvolvido quando não há água aquecida imediatamente para uso. Desta forma, a *etapa 1* permanece ativa por mais tempo, isso ocorre diante da necessidade do deslocamento da água quente pela tubulação até alcançar a válvula quente do protótipo, pelo processo de transferência de água propício pelo desnível entre os reservatórios. Uma vez que o sensor de temperatura identifica que a temperatura quente é superior à temperatura desejada, o fluxo de operações segue para etapas posteriores.

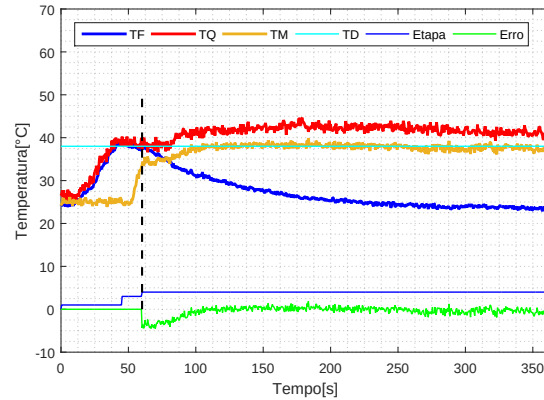
Figura 23 – Etapas do processo com a transferência de água.



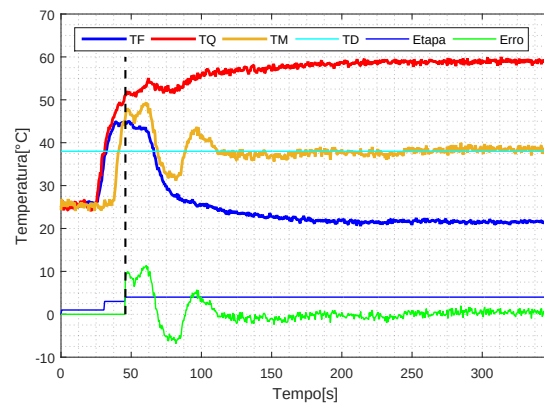
Fonte: Do autor.

Nos resultados apresentados na Figura 24, observa-se a dinâmica completa do processo durante um banho. O tempo máximo considerado após o início das ações de controle é de 5 *min* (300 s).

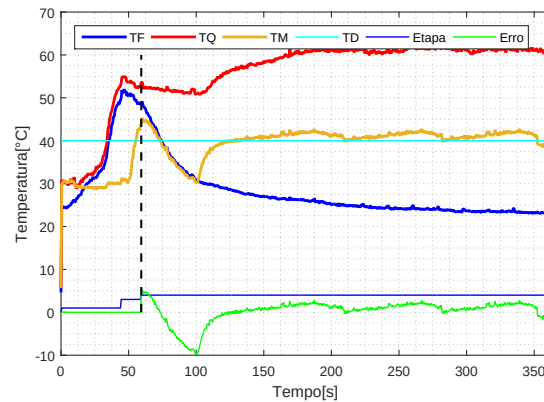
Figura 24 – Ensaaios do controlador com a transferência de água.



(a) Resultado 01.



(b) Resultado 02.



(c) Resultado 03.

Fonte: Do autor.

Na [Figura 24\(a\)](#), a água é aberta para o usuário imediatamente quando o programa alcança a inicialização do banho (*etapa 3*), isso ocorre em 45,35 s, de modo necessário, com o objetivo de eliminar água com baixa ou alta temperatura na tubulação próxima ao chuveiro. O controlador (*etapa 4*) tem seu início indicado em 60,14 s. Observando-se o gráfico que apresenta a temperatura de mistura (TM), verifica-se que a saída do sistema atinge regime permanente em torno da temperatura desejada após aproximadamente 91,55 s. Neste resultado em particular, a temperatura quente media é relativamente próxima do valor desejado de 38 °C. Assim, há uma diferença de aproximadamente 31,41 s para que o controlador alcance a rastreabilidade do valor de referência.

Na [Figura 24\(b\)](#), seguindo a mesma lógica, a inicialização do banho (*etapa 3*) ocorre em 31,07 s, de modo necessário, com o objetivo de eliminar água com baixa ou alta temperatura na tubulação próxima ao chuveiro. O controlador (*etapa 4*) tem seu início indicado em 45,87 s. Observando-se o gráfico que apresenta a temperatura de mistura (TM), verifica-se que a saída do sistema atinge regime permanente em torno da temperatura desejada após aproximadamente 108,50 s. Neste resultado em particular, a temperatura quente não é tão próxima do valor desejado de 38 °C. Assim, há uma diferença de aproximadamente 62,63 s para que o controlador se estabeleça em torno do valor de referência.

Na [Figura 24\(c\)](#), seguindo a mesma lógica, a inicialização do banho (*etapa 3*) ocorre em 44,53 s, de modo necessário, com o objetivo de eliminar água com baixa ou alta temperatura na tubulação próxima ao chuveiro. O controlador (*etapa 4*) tem seu início indicado em 59,37 s. Observando-se o gráfico que apresenta a temperatura de mistura (TM), verifica-se que a saída do sistema atinge regime permanente em torno da temperatura desejada após aproximadamente 115,20 s. Neste resultado em particular, a temperatura quente se assemelha ao resultado apresentado anteriormente, o que não é tão próximo do valor desejado, como no primeiro. Para esse caso, 40 °C como temperatura de referência, levemente maior, há uma diferença de aproximadamente 57,33 s para que o controlador alcance a rastreabilidade do valor de referência, um tempo menor se comparado ao segundo resultado apresentado.

A [Tabela 8](#) apresenta um resumo sobre principais parâmetros observados para os resultados da [Figura 24](#).

Tabela 8 – Resumo para os ensaios com transferência de água quente.

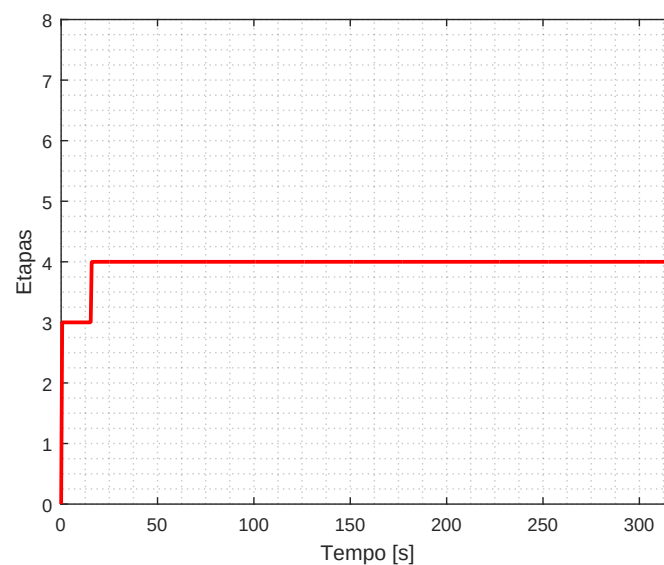
Parâmetros \ Resultado	01	02	03
Temperatura quente média em regime [°C]	41,7	58,7	61,52
Temperatura fria média em regime [°C]	24,1	21,2	23,94
Temperatura mistura média em regime [°C]	37,7	38,02	41,19
TM desejada [°C]	38,0	38,0	40,0
Início do controle [s]	60,14	45,87	59,37
Estabilização [s]	91,55	108,5	115,2
Transitório [s]	31,41	62,63	57,33
Tempo útil do banho [s]	268,25	236,8	242,0

Fonte: Do autor.

4.2 Caso 2

O segundo caso apresenta uma situação similar à anterior, ilustrada na [Figura 25](#), mostra um tempo de duração da *etapa 1* inferior, praticamente instantâneo, se comparado ao caso anterior quando há transferência de água da tubulação, visto que a água aquecida está imediatamente disponível para uso. Consequentemente, esses ensaios não apresentam transferência de água na tubulação.

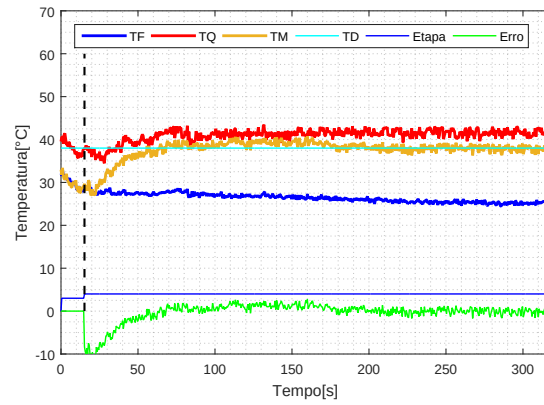
Figura 25 – Etapas do processo sem a transferência de água.



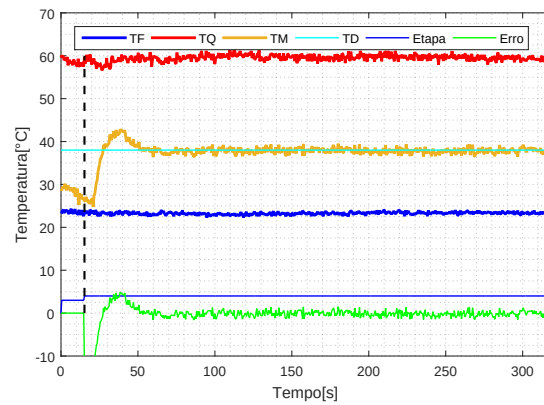
Fonte: Do autor.

Resultados para este caso serão apresentados na [Figura 26](#) e a [Tabela 9](#) apresenta um resumo dos pontos a serem destacados e comentados posteriormente.

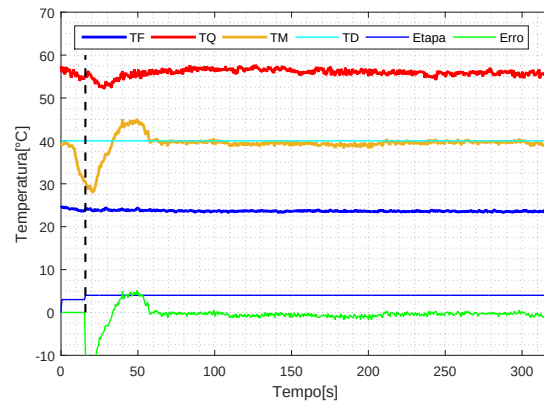
Figura 26 – Ensaio do controlador sem a transferência de água.



(a) Resultado 04.



(b) Resultado 05.



(c) Resultado 06.

Fonte: Do autor.

Tabela 9 – Resumo para os ensaios sem transferência de água quente

Parâmetros \ Resultados	04	05	06
TQ média em regime [°C]	41,7	59,6	55,9
TF média em regime [°C]	25,6	23,4	23,4
TM média em regime [°C]	38,1	37,8	39,5
TM desejada [°C]	38,0	38,0	40,0
Início do controle [s]	15,25	15,25	15,87
Estabilização [s]	56,44	49,15	57,08
Transitório [s]	41,19	33,9	41,21
Tempo útil do banho [s]	258,16	265,65	258,12

Fonte: Do autor.

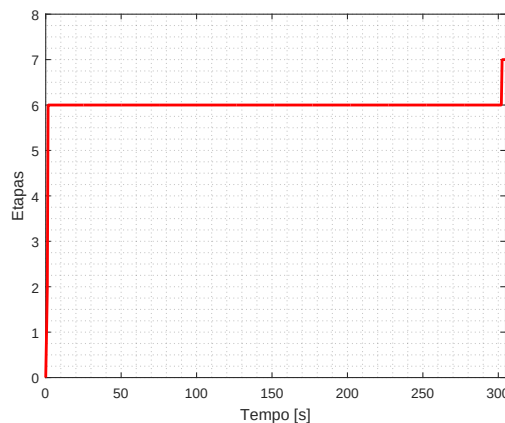
São apresentados três ensaios, realizados sob diferentes temperaturas, variando entre 41,7 °C e 59,6 °C, faixa típica de operação em sistemas de chuveiros com aquecimento solar. No entanto, temperaturas superiores ao valor máximo considerado no projeto do controlador podem resultar em comportamentos indesejados, como oscilações persistentes, uma vez que o cenário adotado para sua sintonia considerou uma temperatura média da água quente de 57 °C.

É pertinente observar que a temperatura média em regime permanente manteve-se próxima ao valor de referência em decorrência das ações do controlador ao longo da maior parte do intervalo analisado. Considerando o período total de atuação de 300 s, o sistema permaneceu, em média, na faixa de operação por 87% do tempo.

4.3 Caso 3 e Caso 4

O terceiro caso ocorre após o fim da *etapa* 1 pelo tempo limite. Isto é, uma situação onde o processo de transferência de água foi realizado por completo e finalizado sem êxito, portanto a temperatura da água disponível no lado da água aquecida é inferior à temperatura desejada. Para este caso, o chuveiro elétrico é habilitado, e o sistema funciona no modo convencional. A evolução das etapas para o caso 3 é apresentada na [Figura 27](#).

Figura 27 – Etapas do processo sem água quente.

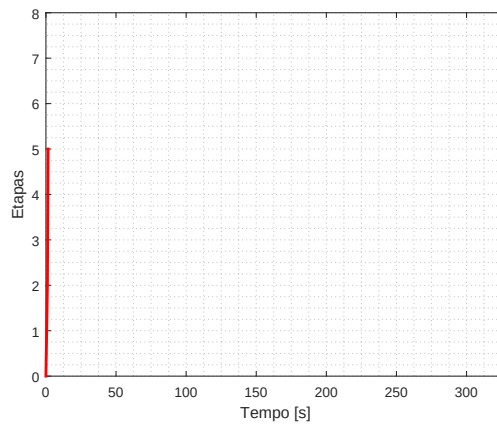


Fonte: Do autor.

O monitoramento da temperatura para esse caso não foi realizado, visto que o sensor de temperatura de mistura está posicionado na tubulação de alimentação do chuveiro, após o misturador. Assim, essa medição não estaria retratando a temperatura de saída, e sim a temperatura de entrada.

Por fim, o último caso é ilustrado na [Figura 28](#), ela mostra uma situação tecnicamente inviável, pois, se a temperatura desejada for inferior à da água fria disponível, o sistema não será executado.

Figura 28 – Etapas do processo sem água fria.



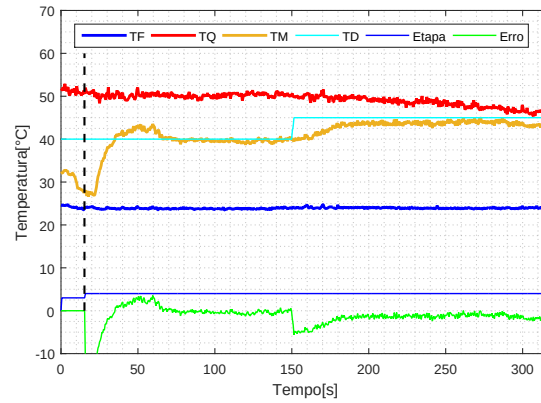
Fonte: Do autor.

4.4 Resultados com alteração da temperatura desejada

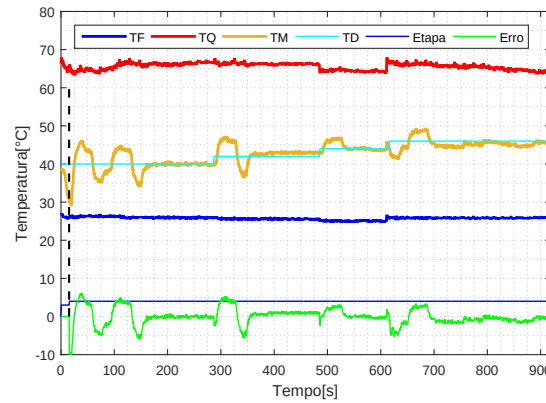
Um controlador adequado deve conseguir rastrear o valor de referência imposto à saída do sistema. Nesse contexto, foram obtidos resultados considerando variações na temperatura de referência. Ressalta-se que os resultados apresentados correspondem ao *caso 2*, no qual não há transferência de água ao longo da tubulação. Contudo, situações em que a condição inicial seja caracterizada pelo *caso 1* também podem ocorrer.

Partindo de uma temperatura pré-estabelecida, é esperado que o usuário deseje ajustá-la, seja por meio do acréscimo ou do decréscimo do valor de referência. Os resultados detalhados de ensaios equivalentes, considerando essas possíveis variações de temperatura, são apresentados a seguir nas [Figura 29](#) e [Figura 30](#).

Figura 29 – Ensaio do controlador com mudança positiva da temperatura desejada.



(a) Resultado 7.



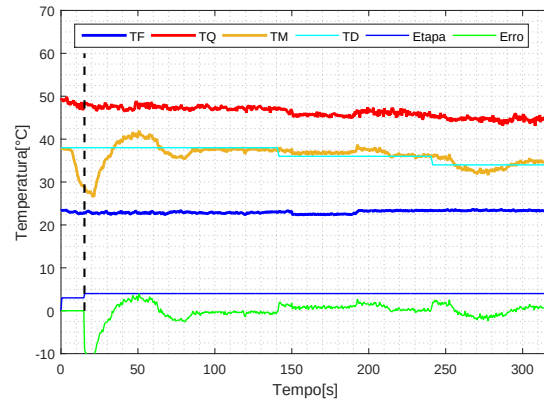
(b) Resultado 8.

Fonte: Do autor.

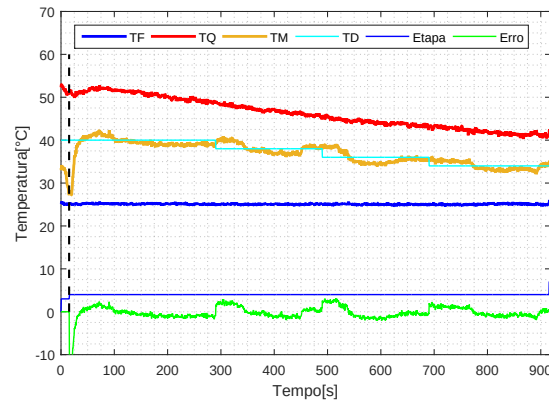
O resultado mostrado na [Figura 29\(a\)](#) foi realizado com duração de 300 s como tempo máximo de banho, o mostrado na [Figura 29\(b\)](#) foi realizado com duração de 900 s como tempo máximo de banho, ambos apresentam situações em que a temperatura de referência é elevada. Em [29\(a\)](#), o acréscimo de temperatura de 40 °C para 45 °C é realizado no tempo de 151,4 s. A primeira estabilização, após o início das ações do controlador, demora aproximadamente 48,4 s, o segundo transiente acontece após a mudança da temperatura de referência, o que demora aproximadamente 31 s. Ambos os tempos transitórios são familiares para os apresentados na [Tabela 9](#).

Em [29\(b\)](#), há mais de uma mudança de temperatura, a primeira de 40 °C para 42 °C, em 287,3 s; a segunda de 42 °C para 44 °C, em 485,9 s; por fim, um terceiro aumento, de 44 °C para 46 °C, em 616,4 s. Todos eles apresentam um comportamento transitório um pouco mais longo. Acredita-se que essa situação seja justificada pela temperatura quente mais elevada durante a execução deste ensaio, uma vez que foi observado que diferenças excessivas entre a temperatura quente disponível e a temperatura desejada apresentaram um tempo transitório maior em resultados anteriores.

Figura 30 – Ensaio do controlador com mudança negativa da temperatura desejada.



(a) Resultado 9.



(b) Resultado 10.

Fonte: Do autor.

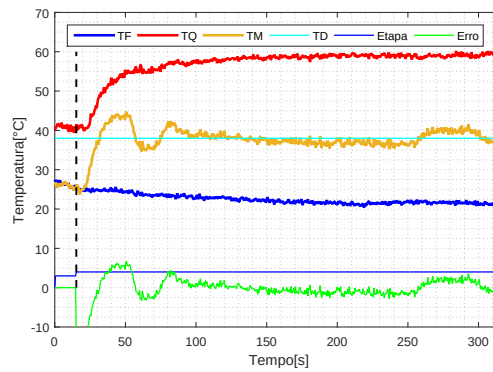
O resultado mostrado na Figura 30(a) foi realizado com duração de 300 s como tempo máximo de banho, o mostrado na Figura 30(b) foi realizado com duração de 900 s como tempo máximo de banho, ambos correspondem a situações em que a temperatura de referência é reduzida. Em 30(a), a primeira estabilização ocorre após a inicialização das ações do controlador com aproximadamente 70,03 s, seguida por uma transição suave na primeira redução de temperatura, que é a redução de 38 °C para 36 °C, em 141,6 s. Um transitório menor acontece na redução da temperatura de referência de 36 °C para 34 °C, feita em 246,1 s, e teve duração aproximada de 47,9 s.

Os transitórios observados apresentam tempos de acomodação elevados, sem ocorrência de picos de temperatura ao longo do processo. O comportamento da saída evidencia rastreamento contínuo da referência durante esses intervalos. As reduções de temperatura apresentadas em 30(b) foram de 40 °C para 38 °C, em 290,5 s; de 38 °C para 36 °C, em 490,3 s, e por fim, redução de 36 °C para 34 °C feita em 690,7 s. Para as três modificações, é possível observar transitórios prolongados; entretanto, estes podem igualmente ser caracterizados como satisfatórios, em função das transições suaves observadas.

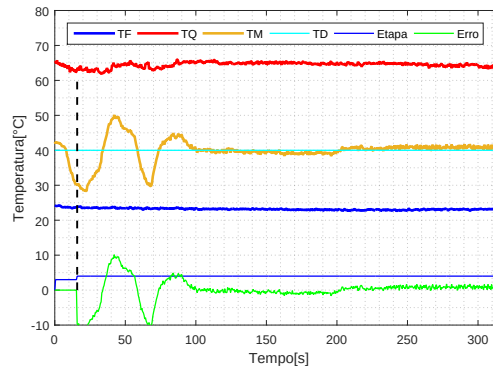
4.5 Observações relevantes nos resultados

Nesta [seção 4.5](#), são apresentados três ensaios realizados sob cenários distintos, considerando variações na temperatura desejada e, principalmente, na temperatura da água quente disponível. Para o relacionamento entre a calorimetria da água e o controlador desenvolvido, os resultados apresentados na [Figura 31](#) serão observados. Posteriormente resumidos na [Tabela 10](#), estes mesmos resultados também farão contribuição para uma análise do consumo de água.

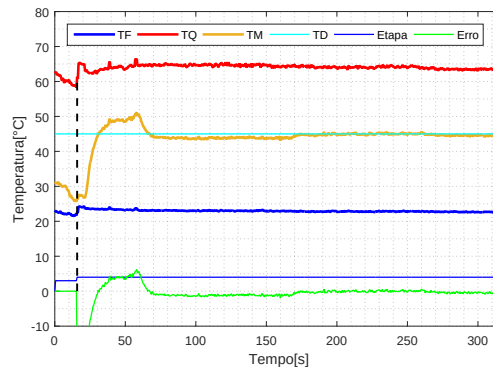
Figura 31 – Comparação entre a temperatura de mistura em regime permanente e a estimativa pelo modelo de balanço térmico.



(a) Resultado 11.



(b) Resultado 12.



(c) Resultado 13.

Fonte: Do autor.

Com base em (3.4), referente à calorimetria da água apresentada na seção 3.1, é possível realizar um estudo que relaciona as grandezas envolvidas no sistema às estimativas de vazão e às temperaturas monitoradas. Sabe-se que, ao misturar determinadas quantidades de água quente e água fria, a massa total resultante é aproximadamente igual à soma das massas individuais. A temperatura final da mistura assume, portanto, um valor intermediário entre as temperaturas iniciais, dependendo da proporção entre os volumes (ou massas) de cada parcela de água.

Diante disso, nos ensaios realizados, as vazões podem ser estimadas a partir da abertura acumulada da válvula de água quente em cada condição de operação, tornando necessária uma análise das ações do controlador. Observando-se as curvas de temperatura de mistura apresentadas na Figura 31, verifica-se que os perfis de estabilização ocorrem, respectivamente, em aproximadamente 90,30 s para a Figura 31(a), 95,74 s para a Figura 31(b) e 64,78 s para a Figura 31(c). Serão desconsideradas, portanto, as pequenas modificações na abertura da válvula após este tempo, uma vez que o perfil da temperatura de mistura permaneceu constante até o término de cada ensaio.

Para esses instantes de estabilização, as aberturas estimadas da válvula de água quente foram de aproximadamente 3,95 s, 3,83 s e 4,69 s, respectivamente, relacionando este tempo de abertura à vazão estimada através de uma interpolação linear da curva apresentada na Figura 13 para a vazão quente e a abertura atual, esses valores serão calculados e apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Erro entre a temperatura de mistura em regime permanente e a estimativa obtida pelo modelo de balanço térmico.

Parâmetros \ Resultado	11	12	13
Tempo de abertura fria [s]	5,0	5,0	5,0
Vazão fria estimada [kg/min]	3,15	3,15	3,15
Tempo de abertura quente (Acumulado) [s]	3,95	3,83	4,69
Vazão quente estimada [kg/min]	2,92	2,71	3,99
TQ média em regime [°C]	59,0	64,6	64,2
TF média em regime [°C]	21,5	23,0	22,8
TM média em regime [°C]	37,6	40,5	44,9
TM desejada [°C]	38,0	40,0	45,0
TM calculada por 3.4 [°C]	39,6	42,3	45,9
TM média em regime - TM calculada por 3.4 [°C]	2,0	-1,8	-1,0

Fonte: Do autor.

A obtenção do erro entre a temperatura calculada pela (3.4) e a temperatura média obtida pelo sensor, embora apresente até 2,0 °C de diferença. Pode comprovar um bom comportamento do controlador, uma vez que é certo a existência de incertezas nas grandezas mensuradas, principalmente as relacionadas à abertura das válvulas.

Mesmo diante destas incertezas, é pertinente e necessário um estudo sobre o consumo de água. Para isso, vale ressaltar que o controle da vazão total de saída, concomitante ao controle de temperatura de saída, amplia significativamente a complexidade do controlador com o envolvimento de múltiplas variáveis a serem consideradas na entrada e múltiplas variáveis a serem monitoradas na saída.

O cenário apresentado na [Figura 31\(b\)](#) ilustra uma condição de limite superior de operação para a temperatura do modelo desenvolvido, uma vez que a temperatura da água quente disponível é ligeiramente superior à utilizada no processo de identificação do modelo.

Nesse contexto, observa-se na [Figura 31\(b\)](#) que a temperatura de mistura atinge o valor de referência de 40 °C com menor vazão de água quente quando comparada às demais condições analisadas. O regime permanente é alcançado após aproximadamente 79,90 s, caracterizando o tempo de acomodação do sistema nessa condição.

Por outro lado, o cenário ilustrado na [Figura 31\(c\)](#) considera a temperatura de referência definida em 45 °C e apresenta um tempo de aproximadamente 48,99 s para que a saída atinja seu valor médio em regime permanente. Esse comportamento está associado a uma vazão de água quente aproximadamente 1,2 vezes superior à observada na [Figura 31\(b\)](#).

No que se refere ao consumo de água, estima-se que, em cenários nos quais a temperatura da água quente disponível seja próxima ou levemente superior ao valor considerado no desenvolvimento do controlador, ou ainda em situações nas quais a temperatura desejada não seja significativamente inferior à temperatura disponível, o tempo necessário para que o controlador atinja a referência térmica seja reduzido de forma expressiva. Nessas condições, observa-se melhora no desempenho dinâmico do sistema, associada à redução do volume escoado durante o período transitório e, conseqüentemente, à diminuição do consumo e do desperdício de água.

O ensaio ilustrado na [Figura 24\(c\)](#) apresenta um tempo de acomodação de 57,33 s para a temperatura de mistura, cuja média em regime permanente foi de 41,19 °C, para uma temperatura de referência de 40,0 °C.

Nesse ensaio, a vazão estimada de água quente foi de 2,12 l/min, somada a 3,15 l/min de vazão de água fria, resultando em um fluxo total de 5,27 l/min. Considerando o intervalo transitório de 57,33 s, o volume total escoado nesse período foi de aproximadamente 5,03 l, correspondendo a uma redução de aproximadamente 4% em relação ao desperdício apresentado por [Scardovelli e Zamperin \(2017\)](#).

Para o ensaio apresentado na [Figura 26\(b\)](#), a temperatura de referência foi atingida em 33,9 s, com média em regime permanente de 37,8 °C para uma referência de 38,0 °C.

Nesse caso, a vazão estimada de água quente foi de 2,02 l/min, combinada com 3,15 l/min de vazão fria, resultando em um fluxo total de 5,17 l/min. Durante o intervalo transitório de 33,9 s, o volume total escoado foi de aproximadamente 2,92 l, representando

uma redução de aproximadamente 45% em relação ao desperdício apresentado por [Scardovelli e Zamperin \(2017\)](#).

Por sua vez, o ensaio apresentado na [Figura 26\(c\)](#) atingiu a temperatura de referência em 41,21 s, com média em regime permanente de 39,5 °C para uma referência de 40,0 °C.

Nesse cenário, a vazão estimada de água quente foi de 3,22 l/min, combinada com 3,15 l/min de vazão fria, resultando em um fluxo total de 6,37 l/min. Durante o intervalo transitório de 41,21 s, o volume total escoado foi de aproximadamente 4,37 l, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 16% em relação ao desperdício apresentado por [Scardovelli e Zamperin \(2017\)](#).

Dessa forma, os resultados evidenciam que a redução do tempo transitório está diretamente associada à diminuição do volume escoado, reforçando a importância do adequado ajuste do controlador para a otimização do desempenho térmico e a minimização do consumo de água.

4.6 Considerações parciais

A partir dos resultados experimentais apresentados neste capítulo, é possível realizar uma avaliação quantitativa do desempenho do sistema de controle proposto, bem como de sua robustez frente às diferentes condições operacionais analisadas. Os ensaios contemplaram cenários com e sem transferência de água quente, além de variações na temperatura de referência, permitindo a comparação de métricas como tempo de acomodação, erro em regime permanente e volume escoado durante o transitório.

Nos ensaios com transferência de água entre as tubulações, observou-se um tempo adicional antes do início efetivo da ação de controle. Ainda assim, após a atuação do compensador, a temperatura de mistura convergiu para valores médios de 41,19 °C para uma referência de 40,0 °C, com tempo de acomodação de 57,33 s e volume escoado de aproximadamente 5,03 l durante o período transitório.

Nos cenários sem necessidade de transferência, os tempos de acomodação foram reduzidos para 33,9 s e 41,21 s, dependendo da condição analisada, com volumes escoados de aproximadamente 2,92 l e 4,37 l, respectivamente. Comparativamente ao cenário com transferência, observa-se redução de até 45% no volume escoado durante o transitório, evidenciando melhoria objetiva no desempenho hidráulico do sistema.

Os ensaios com variação da temperatura de referência demonstraram capacidade de rastreamento do controlador, com erros em regime permanente inferiores a 1,2 °C nos casos avaliados e ausência de oscilações sustentadas. As diferenças nos tempos de acomodação estiveram associadas principalmente às condições térmicas iniciais e à disponibilidade imediata de água aquecida.

A comparação entre os valores experimentais e aqueles estimados por meio da calorimetria indicou boa concordância entre temperaturas medidas e calculadas, com discrepâncias atribuídas a incertezas nas estimativas de vazão, atrasos de medição e variações térmicas inerentes ao sistema físico.

De forma geral, os resultados quantitativos obtidos indicam que o controlador proposto atende aos objetivos estabelecidos, apresentando tempos de resposta nas proximidades de 60 s nas condições analisadas, erro reduzido em regime permanente e redução significativa do volume escoado em cenários favoráveis de operação. Esses indicadores servem como base para as análises finais e conclusões apresentadas nos capítulos subsequentes.

5 Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho, foi desenvolvido e validado experimentalmente um controlador automático de temperatura para chuveiros solares, com o objetivo de reduzir o desperdício de água no período transitório e melhorar a estabilidade térmica na saída do sistema.

A modelagem do sistema foi realizada por identificação em caixa preta, permitindo representar a dinâmica da temperatura de mistura em função da abertura da válvula de água quente, mantendo-se a vazão de água fria constante. A caracterização experimental das válvulas evidenciou comportamento aproximadamente linear em determinada faixa de operação, viabilizando a parametrização da vazão mínima de funcionamento e a construção do modelo matemático do sistema.

A validação do modelo apresentou boa concordância com os dados experimentais, confirmada por erro médio quadrático reduzido, indicando adequada representação da dinâmica térmica real. A partir desse modelo, foi projetado um controlador proporcional-integral (PI), cuja implementação garantiu estabilidade e capacidade de rastreamento do sinal de referência.

Os ensaios experimentais demonstraram tempos de acomodação variando entre 33,9 s e 57,33 s, dependendo das condições iniciais e da disponibilidade imediata de água aquecida. Nos cenários sem necessidade de transferência térmica, observou-se redução média de até 21% no volume escoado durante o período transitório, diante de múltiplos cenários. Os volumes totais escoados durante o transitório variaram entre 2,92 l e 5,03 l, evidenciando impacto direto das condições operacionais sobre o consumo hídrico.

Os erros em regime permanente permaneceram inferiores a aproximadamente 1,2 °C nos ensaios analisados, sem ocorrência de oscilações sustentadas, demonstrando estabilidade do sistema mesmo sob variações na temperatura de referência. A comparação entre os valores medidos e aqueles estimados pelo modelo de balanço térmico indicou boa concordância, com discrepâncias atribuídas a incertezas nas estimativas de vazão e atrasos de medição.

Com base nas métricas de desempenho obtidas, tempo de resposta inferior a 60 s, erro reduzido em regime permanente e redução mensurável do volume escoado durante o transitório, conclui-se que o sistema projetado atende aos objetivos estabelecidos, apresentando viabilidade técnica e desempenho consistente dentro da faixa de operação analisada.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros e melhorias

Mesmo que os objetivos propostos tenham sido atingidos, há diversas melhorias que, aplicadas ao sistema desenvolvido, podem proporcionar aprimoramento para disponibilizar maior robustez e aplicabilidade do sistema e expandi-lo em trabalhos futuros.

Embora o trabalho possua uma situação para a transferência de água, o tempo de resposta dos termômetros empregados afeta a transferência, permitindo que a água aquecida modifique inicialmente a temperatura também do lado da água fria. O emprego de válvulas e termômetros mais rápidos, ou até mesmo circuitos de recirculação para a disponibilidade imediata de água quente, pode mitigar esse problema.

Uma melhoria capaz de proporcionar maior economia de água consiste na implementação de um controle em malha fechada também para a vazão total do sistema, permitindo maior precisão na entrega do fluxo desejado independentemente de variações de pressão ou nível dos reservatórios; isso entregaria uma maior empregabilidade do projeto em vários cenários.

Outra melhoria relevante seria a inclusão de estratégias mais avançadas de controle, como controladores adaptativos ou preditivos, capazes de lidar de forma mais eficiente com variações térmicas do reservatório solar ao longo do dia e com diferentes perfis de uso.

O desenvolvimento de um controlador que considera explicitamente o tempo morto da planta no projeto também pode contribuir para um desempenho dinâmico ainda mais robusto.

O emprego do controle de vazão da água fria em paralelo ao da vazão da água quente também seria um importante passo para controle da vazão final, em especial quando a temperatura quente está bem próxima da temperatura desejada.

Do ponto de vista construtivo, sugere-se a miniaturização do sistema e o desenvolvimento de uma placa eletrônica dedicada, reduzindo o volume físico e aumentando a confiabilidade do conjunto. A integração de interfaces de usuário mais intuitivas, como displays gráficos ou comunicação sem fio com dispositivos móveis, pode ampliar a usabilidade e facilitar a configuração dos parâmetros de operação.

A economia de energia também pode ser ampliada; com a incorporação de circuitos recortadores de tensão utilizados em chuveiros eletrônicos, se empregados, pode requerer uma potência mínima e menor da rede em situações em que a água quente demanda um degrau de temperatura inferior ao degrau necessário para aquecer a água fria até a temperatura desejada.

Por fim, recomenda-se a realização de ensaios prolongados em ambiente real de uso residencial, com diferentes perfis de usuários e condições climáticas, de modo a avaliar o desempenho do sistema em longo prazo, em que pode ser empregada mais de uma opção de controlador a ser utilizado de acordo com condições iniciais da temperatura quente disponível naquele momento, propiciando uma melhor avaliação do seu impacto efetivo na redução do consumo de água e energia. Essas extensões podem consolidar a aplicação prática da proposta e ampliar sua contribuição tecnológica e social.

Referências

- ALTRONICS. *YF-S201 Hall Effect Water Sensor Manual*. 2024. Disponível em: <<https://pt.manuals.plus/altronics/yf-s201-hall-effect-water-sensor-manual>>. Acesso em: 04 set. 2024.
- AQUAKENT. *Aquecedor Solar de Tubo a Vácuo AK-180*. 2024. Disponível em: <<https://www.aquakent.com.br/produtos/linha-solar/aquecedores-acoplados/aquecedor-solar-de-tubo-a-vacuio-ak-180>>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- Associação Brasileira de Energia Solar Térmica. *Relatório Anual do Setor de Aquecimento Solar 2023*. São Paulo: [s.n.], 2023. Acesso em: 24 fev. 2026. Disponível em: <<https://abrasol.org.br>>.
- ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design*. 3. ed. Mineola, NY: Dover Publications, 2011.
- BARBOSA, M. R. M.; PINHEIRO, O. R. Controle de temperatura de água para edifícios através de sistemas alternativos de aquecimento. *IV WORKSHOP DE PESQUISA TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO*, 2017. Disponível em: <<http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/handle/fieb/1616>>. Acesso em: 2024-05-19.
- BENTO, B. R. *Automação aplicada à redução do desperdício de água em instalações prediais*. 2016. Monografia (GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO), UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1025>>. Acesso em: 2024-05-19.
- BORGES, C. de B. *Qual é a temperatura ideal para o banho?* 2017. Dermatologista do HC-UFG fala sobre os benefícios dos banhos frio e quente. Disponível em: <<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-centro-oeste/hc-ufg/comunicacao/noticias/qual-e-a-temperatura-ideal-para-o-banho#:~:text=Segundo%20Camilla%20de%20Barros%20Borges,de%20dores%20musculares%20e%20articulares.>> Acesso em: 2024-07-24.
- CicloVivo. *Dispositivo reaproveita a água do banho*. 2021. <<https://ciclovivo.com.br/vida-sustentavel/detox/dispositivo-reaproveita-a-agua-do-banho/>>. Acesso em: 24 fev. 2026.
- DENNIS, J.; SCHNABEL, R. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. Prentice-Hall, 1983. (Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Se). Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=4fFQAAAAMAAJ>>.
- ELETROBRAS/PROCEL. *Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial*. 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/SiteAssets/Paginas/PPH-2019/RESUMO_EXECUTIVO_BRASIL_BR.pdf>. Acesso em: 2024-05-19.
- Empresa de Pesquisa Energética. *Atlas da Eficiência Energética Brasil 2024*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024. Acesso em: 24 fev. 2026. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>.

- FILHO, D. C. de O. G. *Sistema de aquecimento solar de água: uma proposta para edificações já construídas*. 2016. Monografia (GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO), UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1027>>. Acesso em: 2024-05-19.
- JP Fluid Control. *BW Series Electric Ball Valves: Installation and Operation Manual*. [S.l.], 2025. Disponível em: <<https://storage.tameson.com/asset/Products/Manuals/EN/manual-bw-en.pdf>>. Acesso em: 20 de jun. 2024.
- Lorenzetti S.A. *Acqua Duo Flex – chuveiro híbrido com funcionamento automático e compatível com aquecimento solar*. 2026. <<https://www.lorenzetti.com.br/produto/acqua-duo-flex>>. Acesso em: 24 fev. 2026.
- Manuals.plus. *Artshu SSR-50DA-H Single Phase Solid State Relay*. 2025. Disponível em: <<https://manuals.plus/asin/B07JZHJXPB>>. Acesso em: 16 de ago. 2025.
- NBR15884. *Sistemas de tubulações plásticas para instalações prediais de água quente e fria - Policloreto de vinila clorado (CPVC)*. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- NBR5626. *Sistemas prediais de água fria e água quente*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020. <<https://normadedesempenho.com.br/wp-content/uploads/2022/10/NBR-5626-2020.pdf>>. Acesso em: 24 fev. 2026.
- NBR5648. *Tubos e conexões de PVC-U com junta soldável para sistemas prediais de água fria - requisitos*. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- NEVES, J. C. M. das. *Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo, na cidade de Cascavel – PR*. 2013. Dissertação (Pós-Graduação em Energia na Agricultura), UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em: <https://www5.unioeste.br/portalunioeste/arq/files/PPGEA/Dissertacao_Joao_C_Neves.pdf>.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. 6^a. ed. Rio de Janeiro, RJ, BR: LTC, Inc., 2013.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a. ed. São Paulo, SP, BR: Pearson Prentice Hall, 2010.
- PONTES, A. dos S.; MENECH, E. L. de. *Criação de protótipo com sistema supervi-sório para controle de temperatura da água em canos de PVC*. 2019. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica), UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9841>>. Acesso em: 2024-05-19.
- ProtoSupplies. *LR7843 MOSFET Control Module*. 2024. Disponível em: <<https://protosupplies.com/product/lr7843-mosfet-control-module/>>. Acesso em: 20 de jun. 2024.
- SANTOS, M. A. C. dos; ZAMPERIN, J. L. B. Estudo do desperdício de água em sistemas de aquecedores solares e uma solução para o caso. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, v. 2, n. 1, p. 32–44, 2017.

SCARDOVELLI, B. G. F.; ZAMPERIN, J. L. B. Análise do desperdício de água não aquecida que fica entre o boiler e o ponto de consumo em aquecedores solares. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, v. 2, n. 1, p. 109–118, 2017.

Seeed Studio. *How Does a Water Flow Sensor Work*. 2020. Disponível em: <https://blog.seeedstudio.com/wp-content/uploads/2020/05/how-does-water-flow-sensor-work-1030x599.jpg>. Acesso em: 11 abr. 2025.

Techsul Eletrônicos. *Sensor de Temperatura Digital NTC 10k Encapsulado MF58*. 2024. Disponível em: <https://techsuleletronicos.com.br/product/sensor-de-temperatura-digital-ntc-10k-encapsulado-mf58/>. Acesso em: 28 de ago. 2024.