



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

DAVI ALVES DOS SANTOS

**REGULADOR DE TEMPERATURA DE UMA PLANTA DIDÁTICA
UTILIZANDO PLACAS DE PELTIER E UM MINI-RADIADOR VEICULAR**

ARAXÁ/MG

2023

DAVI ALVES DOS SANTOS

**REGULADOR DE TEMPERATURA DE UMA PLANTA DIDÁTICA UTILIZANDO PLACAS
DE PELTIER E UM MINI RADIADOR VEICULAR**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar

ARAXÁ/MG

2023



ATA Nº 95 / 2023 - DELMAX (11.57.05)

Nº do Protocolo: 23062.060879/2023-14

Araxá-MG, 11 de dezembro de 2023.

Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Automação Industrial do Aluno Davi Alves dos Santos

Às dezenove horas do dia onze de dezembro de dois mil e vinte e três, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG/ Campus Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **REGULADOR DE TEMPERATURA DE UMA PLANTA DIDÁTICA UTILIZANDO PLACAS DE PELTIER E UM MINI-RADIADOR VEICULAR**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Henrique José Avelar, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, concedeu a palavra ao candidato, **Davi Alves dos Santos**, para a exposição de seu trabalho. Após a apresentação, seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Ultimada a arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Após a reunião da Comissão Examinadora, o candidato foi considerado: **APROVADO**, obtendo nota final de: **85/100** (oitenta e cinco). O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno, abaixo assinado, declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que devidamente identificada a fonte original. Declara ainda, neste âmbito, não violar direitos de terceiros. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos. O Prof. Leandro Resende Mattioli, responsável pela disciplina "Trabalho de Conclusão de Curso II", lavrou a presente ATA, que, após lida e aprovada, será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e pelo candidato.

Araxá, 11 de dezembro de 2023.

Assinado eletronicamente por:

- Presidente e Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar
- Membro Titular: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende
- Membro Titular: Prof. Me. Alexandre Dias Linhares
- Professor da Disciplina TCC 2: Prof. Dr. Leandro Resende Mattioli
- Aluno: Davi Alves dos Santos

(Assinado digitalmente em 12/12/2023 18:43)
ALEXANDRE DIAS LINHARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTMECAX (11.50.19)
Matricula: 1164526

(Assinado digitalmente em 13/12/2023 13:37)
DOMINGOS SAVIO DE RESENDE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
CTETAX (11.50.18)
Matricula: 4194738

(Assinado digitalmente em 12/12/2023 12:22)
HENRIQUE JOSE AVELAR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matricula: 392234

(Assinado digitalmente em 14/12/2023 15:27)
LEANDRO RESENDE MATTIOLI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matricula: 2973183

(Assinado digitalmente em 14/12/2023 16:39)
DAVI ALVES DOS SANTOS
DISCENTE
Matricula: 201714550087

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número:
95, ano: **2023**, tipo: **ATA**, data de emissão: **11/12/2023** e o código de verificação: **0c976c53d6**

RESUMO

O aprendizado prático desempenha um papel crucial na formação de profissionais que frequentam cursos voltados para a área industrial, seja em nível técnico ou superior. Nesse contexto, este trabalho foi motivado a conceber melhorias em uma planta didática de controle de temperatura (CRT), especialmente para viabilizar a execução de dois experimentos consecutivos com a mesma temperatura inicial, sem a influência de um possível aumento na temperatura da água do reservatório. Ao propor um regulador auxiliar e independente da malha de controle existente, o foco é manter a temperatura da água do reservatório constante, igualando-a à temperatura ambiente. Como ponto de partida, foi realizado um experimento em malha fechada para evidenciar e quantificar o problema, ao mesmo tempo em que forneceu um direcionamento sobre qual seria a melhor posição da instrumentação utilizada para a aquisição de dados. Com o intuito de alcançar os objetivos desta pesquisa, diversos testes foram conduzidos, envolvendo montagens com a utilização de sensores do tipo NTC, um radiador veicular, ventoinhas e pastilhas de Peltier. O controlador PID não foi desenvolvido porque todos os elementos finais de controle tiveram de ser ajustados em malha aberta com máxima carga.

Palavras-chave: Controle. Sensores NTC. Peltier. Temperatura. Planta Didática.

ABSTRACT

Practical learning plays a crucial role in the training of professionals enrolled in courses focused on the industrial sector, whether at the technical or higher education level. In this context, this work was motivated to devise improvements in a didactic temperature control plant (CRT), specifically to enable the execution of two consecutive experiments with the same initial temperature, without the influence of a potential increase in the reservoir water temperature. By proposing an auxiliary regulator independent of the existing control loop, the focus is on maintaining a constant water temperature in the reservoir, equalizing it with the ambient temperature. As a starting point, a closed-loop experiment was conducted to highlight and quantify the issue, simultaneously providing guidance on the optimal positioning of the instrumentation used for data acquisition. In order to achieve the objectives of this research, various tests were conducted, involving setups with the use of NTC sensors, a vehicular radiator, fans, and Peltier modules. The PID controller was not developed because all final control elements had to be set in open loop at maximum load.

Keywords: Control. NTC Sensors. Peltier. Temperature. Didactic Plant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de processo controlado	13
Figura 2 – Curva da esposta em S.....	14
Figura 3 – Sintonia PID proposta por Ziegler-Nichols	15
Figura 4 – Teste em malha aberta na planta de temperatura - CRT	17
Figura 5 – Sensor NTC 10K	18
Figura 6 – Mini radiador veicular	19
Figura 7 – Pastilha de Peltier TEC1-1270	20
Figura 8 – Gráfico de performance TEC1-1270	21
Figura 9 – Vistas superior e inferior da placa Arduino Nano	22
Figura 10 – Diagrama P&ID da planta CRT com mini radiador veicular.....	23
Figura 11 – Diagrama P&ID da planta CRT com mini radiador veicular e placas Peltier	24
Figura 12 – Diagrama de blocos do controlador PID.....	25
Figura 13 – Primeira montagem (radiador e termopares)	27
Figura 14 - NTC B3950 100K.....	29
Figura 15 - Circuito para leitura de 5 sensores NTC	29
Figura 16 - NTC 10KΩ.....	31
Figura 17 - Tanque de Água Gelada com Placa de Peltier	34

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Teste inicial para mensurar o aumento de temperatura no reservatório .	16
Tabela 2 - Dados de temperatura do primeiro teste	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET/MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CRT	Controle Regulatório de Temperatura
PID	Proporcional Integral Derivativo
SP	<i>Setpoint</i>
PV	Variável do processo
MV	Variável Manipulada
KP	Ganho Proporcional
KI	Ganho Integral
KD	Ganho Derivativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Controladores de temperatura	11
2.2	Trocadores de calor	12
2.3	Controladores PID	13
2.3.1	Método de sintonia do controlador PID	14
3	METODOLOGIA	15
3.1	Sensor de temperatura	17
3.2	Mini radiador veicular	19
3.3	Placa de Peltier	20
3.4	Microcontrolador Arduino	21
3.5	Teste do regulador com o radiador	22
3.6	Teste do controlador com o radiador e pastilhas de Peltier	24
3.7	Projeto e discretização do controlador PID para implementação no microcontrolador	25
4	ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	Primeiro teste para verificar a eficiência do radiador	26
4.2	Calibração dos sensores do tipo NTC	28
4.3	Teste com radiador e ventoinhas	31
4.4	Primeiro teste utilizando placas de Peltier	33
4.5	Estudo do tipo de ligação para placas de Peltier	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
6	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

Dada a importância do aprendizado prático em cursos de engenharia e técnicos voltados para elétrica, instrumentação e controle, dentre outras áreas aplicáveis ao ambiente industrial, muito se tem discutido a respeito da qualidade do ferramental e dos dispositivos dedicados ao ensino presentes nos laboratórios das universidades e escolas técnicas.

A interação com uma planta didática tem por objetivo fazer com que o aluno tenha contato com um sistema que se aproxime, em escala representativa, do ambiente real através de ensaios e experimentos que, quando bem executados, conseguem mostrar a relação entre as variáveis presentes no processo a ser estudado. Entretanto, existem alguns problemas embarcados em certas plantas didáticas que as distanciam da sua finalidade.

“No curso de engenharia de controle e automação as análises de modo geral são realizadas com embasamento em malhas de controle comumente tratadas como modelos ideais, apesar de satisfatórias, certas aproximações diferem-se da realidade vista em campo.” OLIVEIRA (2012)

Outro problema associado a determinadas plantas pode ser observado em um exemplar da DIDACTA presente no laboratório do CEFET-MG – Campus Araxá, cuja finalidade é a demonstração de uma malha de controle de temperatura. Acontece que, uma vez que a água é aquecida durante a realização de um experimento, deve-se esperar um tempo consideravelmente alto até que a temperatura da água retorne ao seu valor inicial para a realização de um novo experimento, inviabilizando assim a execução de dois ensaios consecutivos com as mesmas condições iniciais. Com o intuito de resolver este problema, o presente trabalho propõe a criação de um controlador de temperatura, independente da malha de aquecimento existente, que irá realizar o resfriamento da água antes de retornar ao reservatório. Para alcançar este feito, foram utilizadas placas de Peltier e um mini radiador veicular, assim como sensores de temperatura instalados em pontos estratégicos, de forma que através da comparação dos valores de temperatura da água do reservatório e da saída do recipiente de água aquecida, o controlador possa determinar o sinal de controle e obter o resfriamento da água que retorna ao reservatório.

1.1 Objetivos

Diante da proposta elucidada, o presente trabalho foi guiado pelo seguinte objetivo geral: desenvolver um regulador de temperatura de uma planta didática (CRT) utilizando placas de Peltier e um mini radiador veicular, de forma a manter a temperatura da água do reservatório constante e igual à temperatura ambiente. A partir desse objetivo geral, o trabalho contou com o direcionamento dos seguintes objetivos específicos:

- Realizar testes em malha aberta para levantamento das características do sistema;
- Realizar testes em malha aberta para determinar a capacidade de resfriamento das pastilhas Peltier e do mini radiador veicular;
- Projetar e montar o sistema de controle das pastilhas Peltier e mini radiador veicular para manter constante a temperatura da água do reservatório da planta;
- Realizar testes comparativos sobre o desempenho do sistema antes e após a instalação do controlador auxiliar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentadas as principais teorias e pesquisas que serviram como embasamento bibliográfico para a construção deste trabalho.

2.1 Controladores de temperatura

O controle de temperatura é um processo essencial em diversas áreas, desde a indústria até a medicina. Com o objetivo de manter um ambiente ou sistema em uma faixa de temperatura desejada, esse processo envolve o monitoramento contínuo da temperatura e a aplicação de ações corretivas para manter as condições adequadas. Segundo o estudo de Smith e Corripio (2006), o controle de temperatura pode ser alcançado por meio do uso de sensores de temperatura que medem o valor atual da temperatura e fornecem informações para um controlador. Esse controlador, por sua

vez, compara o valor medido com o valor de referência desejado e toma decisões para ajustar a temperatura através de dispositivos de controle, como aquecedores, resfriadores ou válvulas.

Uma das técnicas amplamente utilizadas para o controle de temperatura é o controle por realimentação, também conhecido como controle de retroalimentação. De acordo com Ogata (2010), nesse tipo de controle, o sistema é projetado para comparar a temperatura real com o valor desejado e ajustar continuamente as ações de controle para minimizar o erro. O controlador recebe o sinal de erro, que é a diferença entre a temperatura desejada e a temperatura real, e toma decisões com base nesse sinal para ajustar os dispositivos de controle. Essa abordagem permite que o sistema seja adaptativo, respondendo de forma dinâmica às variações de temperatura e minimizando as oscilações em torno do valor desejado.

Contudo, o controle de temperatura enfrenta alguns desafios que dificultam a ação do controlador. Um dos desafios ocorre quando o sistema é iniciado com uma temperatura muito distante do valor desejado, sendo necessário um tempo consideravelmente longo para que o controlador consiga compensar o erro, além de exigir uma resposta agressiva que pode levar à instabilidade do sistema.

2.2 Trocadores de calor

Os trocadores de calor desempenham um papel fundamental na transferência de calor em diversos processos industriais. Segundo Lemos (2016), esses dispositivos possibilitam a troca térmica entre dois fluidos, permitindo o aquecimento ou resfriamento de um deles. Os trocadores de calor podem ser projetados em diferentes configurações, como trocadores de calor de placas, de tubos concêntricos ou casco e tubos, visando maximizar a área de superfície disponível para a transferência de calor. A eficiência desses equipamentos depende de fatores como a geometria, o coeficiente de transferência de calor e a resistência térmica dos materiais utilizados.

Conforme destacado por Carvalho e Braga (2013), é fundamental considerar fatores como a taxa de transferência de calor, a perda de carga dos fluidos e a compatibilidade dos materiais com os fluidos em contato. Dentre os vários tipos de trocadores de calor encontrados no mercado, destaca-se o radiador veicular, que é largamente utilizado no resfriamento de motores automotivos.

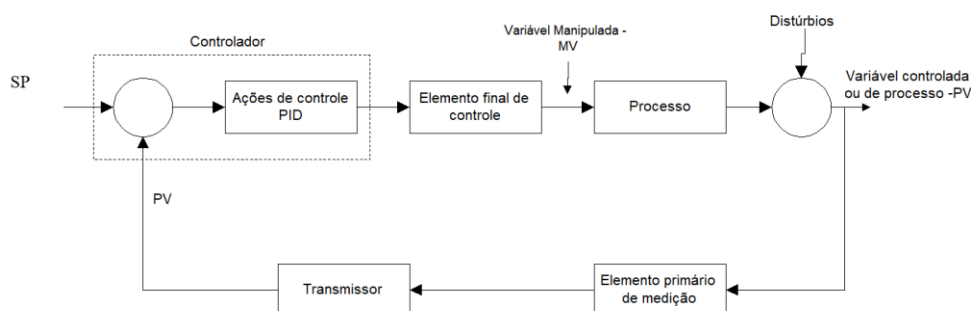
O radiador é visto como um dos principais componentes do sistema de arrefecimento veicular. Sua função quando instalado em um veículo é a de resfriar o fluido refrigerante (água), que irá passar por algumas regiões do motor e sair com uma temperatura elevada após absorver parte do calor presente no sistema. Este processo tem como objetivo manter a temperatura do motor em uma determinada faixa de valores (PABÓN, 2014).

2.3 Controladores PID

Segundo Ogata (2011), um controlador automático é um dispositivo utilizado para regular o comportamento dinâmico de um sistema, com o objetivo de atingir um desempenho desejado. Ele opera com base em informações fornecidas por sensores e compara essas informações com um valor de referência predefinido. Com base nessa comparação, o controlador toma decisões e emite comandos para os atuadores, que ajustam os parâmetros do sistema de acordo com as necessidades.

Dentre os tipos de controladores automáticos, destaca-se o PID que é amplamente utilizado na indústria. A sigla PID remete às três ações executadas pelo controlador: Proporcional, Integral e Derivativa. A ação proporcional irá produzir uma saída proporcional ao erro do sistema (diferença entre o valor atual e o valor desejado). A ação integral, por sua vez, irá acumular o erro ao longo do tempo com o intuito de corrigir pequenos desvios presentes. Já o termo derivativo, possui a função de reagir às mudanças rápidas e abruptas no erro (denominadas de distúrbio), antecipando-se e corrigindo o sistema antes que o erro aumente (OGATA 2011).

Figura 1 – Exemplo de processo controlado



Fonte: Elaborado pelo autor

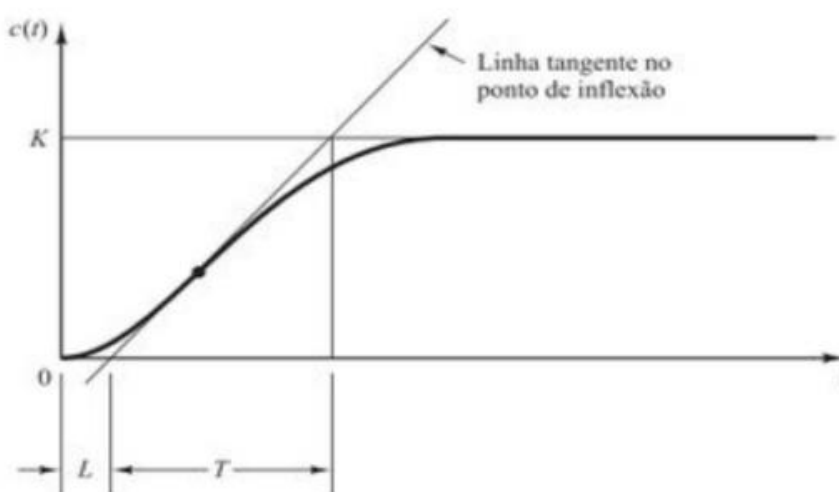
2.3.1 Método de sintonia do controlador PID

De acordo com Ogata (2011), a sintonia de um controlador envolve a seleção ou ajuste de determinados parâmetros para atender a especificações de desempenho do sistema. No contexto do controlador PID, os parâmetros a serem ajustados são K_p , K_i e K_d , que representam os ganhos de cada ação de controle.

Um dos primeiros passos para definir os parâmetros de um controlador digital é o modelamento matemático do processo a ser controlado. Porém, muitas das vezes é bastante complexo determinar este modelamento devido as características de certos sistemas. Um método muito utilizado para estes casos, é o “Método da Curva de Reação” proposto por Ziegler-Nichols. Esse método consiste em um procedimento prático para definir os parâmetros do controlador PID, concebido de maneira experimental.

Para implementar a sintonia proposta por Ziegler-Nichols, inicialmente deverá ser aplicado ao sistema um degrau unitário e, para que o “Método da Curva de Reação” possa ser aplicado, a resposta do sistema deverá ter um formato semelhante a um “s”, conforme exposto na Figura 2, sendo uma resposta característica de sistemas de temperatura.

Figura 2 – Curva da esposta em S



Fonte: OGATA (2011)

A Figura 2, L é o tempo transcorrido entre o início do evento e o encontro da linha tangente ao ponto de inflexão com o eixo do tempo, considerando nula a resposta até este ponto (alguns consideram como “tempo morto”) e T o tempo transcorrido entre o os pontos de encontro da linha tangente com o eixo do tempo e com a linha de prolongamento do valor final da resposta.

Uma vez que as variáveis foram obtidas a partir da curva em “S”, os ganhos poderão ser calculados o quadro mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Sintonia PID proposta por Ziegler-Nichols

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2 L$	$0,5 L$

Fonte: DEMITI (2018)

3 METODOLOGIA

Com o intuito de evidenciar e quantificar o problema de aumento da temperatura no interior reservatório da planta didática CRT, realizou-se um teste em malha fechada, aplicando-se um *setpoint* de 5 °C acima da temperatura ambiente. Os resultados deste experimento podem ser observados Tabela 1.

Tabela 1 – Teste inicial para mensurar o aumento de temperatura no reservatório

Tempo (minutos)	Temperatura do Bulbo (°C)	Temperatura do Reservatório (°C)
0	24	24
5	27	24
10	28	25
15	28	25
20	28	25
25	29	26
30	29	26
35	30	27
40	30	27
45	30	27

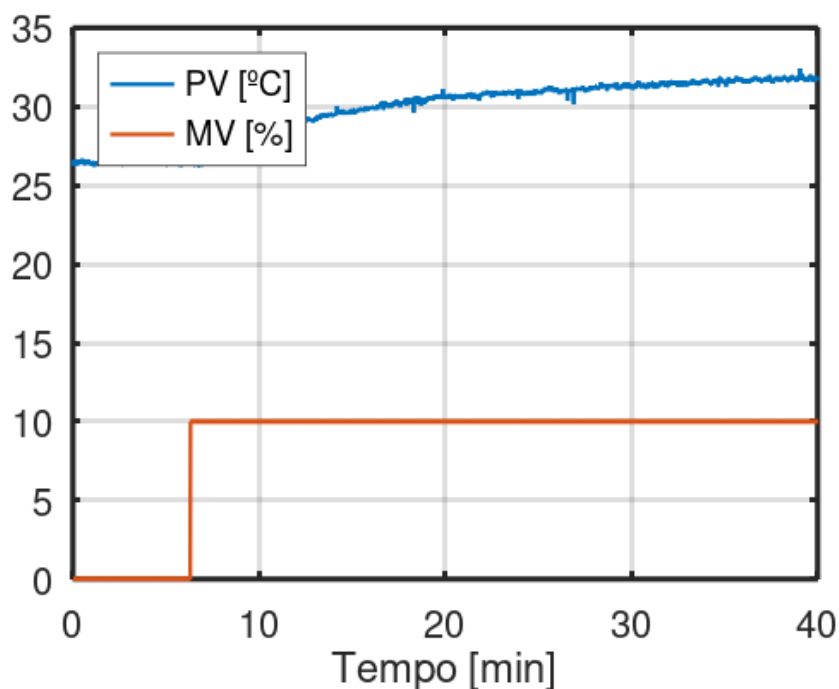
Fonte: Elaborado pelo autor

Para medir a temperatura da água nos pontos de interesse, foram utilizados dois termopares, sendo um instalado no bulbo de aquecimento da planta (região de controle) e o outro posicionado para captar a temperatura da água no interior do reservatório.

Nota-se na Tabela 1 que, após 45 minutos (que seria o tempo aproximado gasto em uma aula para realização de um experimento) a água do reservatório aumentou sua temperatura em, aproximadamente, três graus, com uma tendência de se igualar a temperatura do bulbo de aquecimento ao longo do tempo. Dessa forma, não seria possível a realização de um novo experimento em sequência com as mesmas condições iniciais.

A Figura 4 apresenta um teste em malha aberta na planta de temperatura, onde é notório que a temperatura volta a aumentar após o transitório inicial, indicando que a temperatura da água que está entrando na região de controle, ou seja, a água do reservatório, está cada vez maior.

Figura 4 – Teste em malha aberta na planta de temperatura - CRT



Fonte: Elaborado pelo autor

Dado que se trata de um sistema fechado com recirculação, a água aquecida na região de controle da planta entrará em contato com a água do reservatório, transferindo calor para esta última. Embora essa troca térmica possa ser desprezada em um curto intervalo de tempo, devido à grande diferença de volume entre os dois reservatórios, ela torna-se significativa ao longo do tempo, como durante a realização de uma aula, por exemplo.

3.1 Sensor de temperatura

Para se obter a temperatura nos pontos desejados, foi necessário escolher um sensor de temperatura, cuja leitura possa ser realizada a partir de um microcontrolador. Dentre a vasta gama de sensores de temperatura encontrados no mercado, destacam-se quatro grupos principais, que são classificados como: termopares, transdutores termoresistivos (termoresistências), sensores de circuito integrado e os termistores (GRALIK e BIAVA, 2019).

Tanto os termistores quanto as termoresistências, são instrumentos nos quais o princípio de medição se dá a partir da variação do valor de resistência que ocorre quando estes são submetidos a uma variação de temperatura. Porém, a diferença entre os dois tipos está, basicamente, no material utilizado em sua composição. Sendo assim, as termoresistências utilizam em sua composição materiais condutores como a platina, o cobre ou o níquel. Já os termistores são compostos por óxidos de metais semicondutores ou material cerâmico (PINTO, DE OLIVEIRA MURO e DE FARIA, 2020).

Considerando uma opção de baixo custo e que atenda as demandas do trabalho, dentre elas a velocidade de resposta do instrumento, optou-se por um termistor do tipo NTC, sigla que significa Coeficiente Negativo de Temperatura, ou seja, o valor de resistência diminui com um aumento de temperatura percebida pelo sensor (GRALIK e BIAVA, 2019).

O modelo a ser utilizado para o trabalho em questão é o NTC 10K, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Sensor NTC 10K



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Mini radiador veicular

Para o projeto desta pesquisa, optou-se por um mini radiador do tipo colmeia tubular, comumente utilizado em sistemas de ar-condicionado veicular, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Mini radiador veicular



Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista que uma das particularidades da planta didática CRT é possuir um espaço de layout limitado para a adição de novos componentes em seu arranjo físico, o radiador em questão foi escolhido por apresentar-se como uma solução mais compacta em relação aos radiadores veiculares convencionais, que por sua vez, possuem dimensões maiores. Além disto, o dispositivo em questão¹ encontra-se disponível no laboratório do CEFET-MG para ser utilizado com fins didáticos, tornando-o uma opção de baixo custo que atenda perfeitamente as necessidades do projeto.

¹ O mini-radiador foi doado pelo aluno do curso de Eng. de Aut. Industrial, José Maria de Melo, ao qual agradecemos.

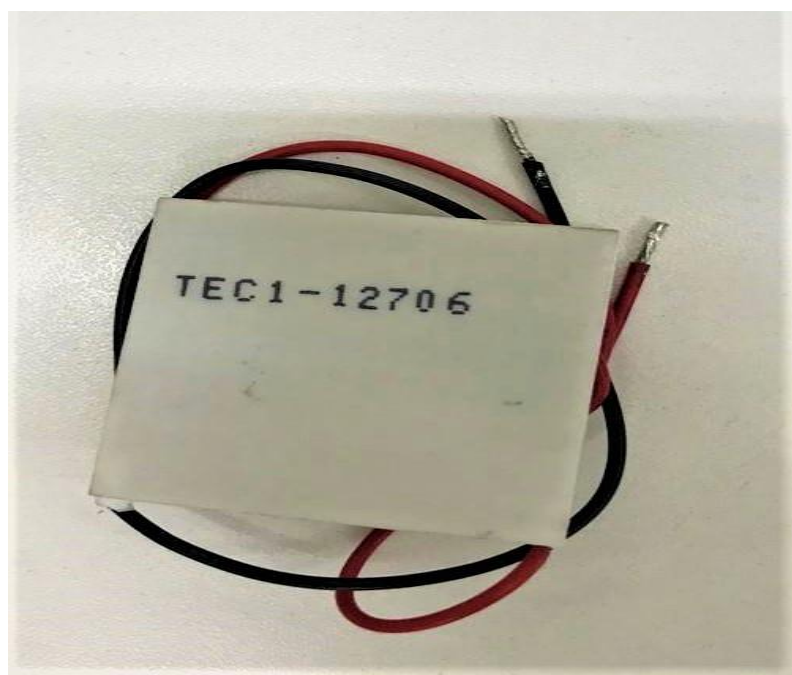
3.3 Placa de Peltier

As placas de efeito Peltier ou pastilhas termoeletricas como também são chamadas, apresentam um princípio de funcionamento descoberto pelo físico francês Jean Charles Athanase Peltier, cujo trabalho experimental consistiu em unir dois metais distintos, sendo o primeiro muito condutor (cobre) e o segundo com baixa condutividade (bismuto), e fazer percorrer uma corrente elétrica contínua entre os dois materiais. O físico pôde observar que determinada superfície se tornava mais quente quando a corrente fluía no sentido do bismuto para o cobre e se tornava mais fria, quando este sentido era invertido (FERNANDES, DE FREITAS BRAZ, et al., 2010).

Devido a sua versatilidade, por apresentar um tamanho relativamente pequeno e por realizar a conversão de energia sem vibrações e de forma totalmente silenciosa, as placas de Peltier são amplamente utilizadas em sistemas de refrigeração de componentes eletrônicos e até mesmo filtros de água residenciais (FERNANDES, DE FREITAS BRAZ, et al., 2010).

Neste trabalho empregou-se as pastilhas termoeletricas do modelo TEC1-1270, exposta na Figura 7.

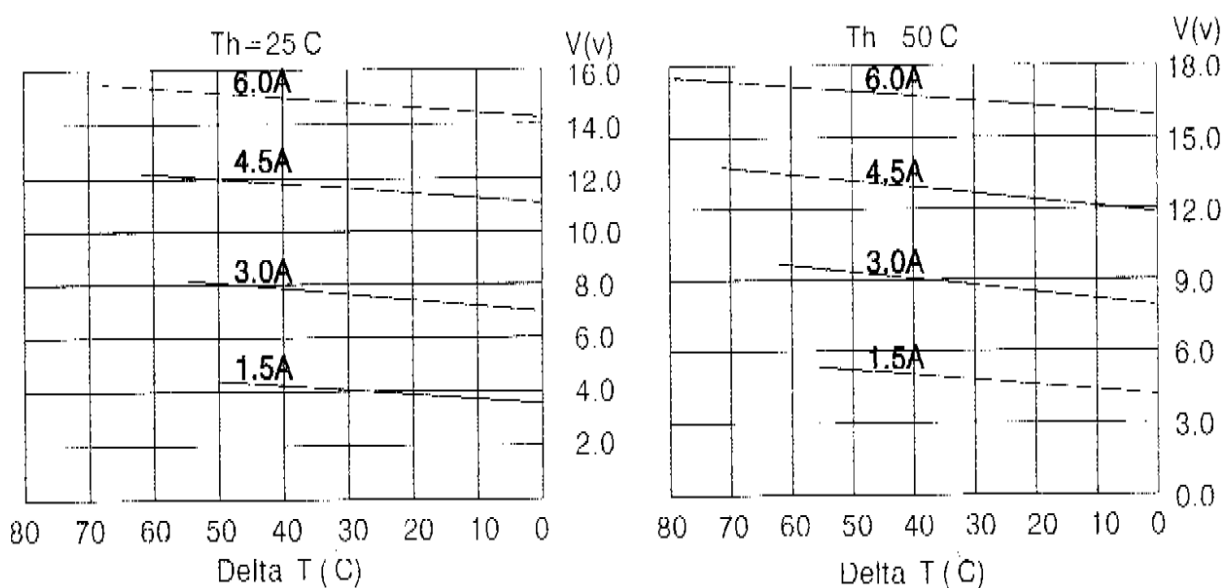
Figura 7 – Pastilha de Peltier TEC1-1270



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos dados de performance disponibilizados no *datasheet* do fabricante HB Eletronic Components (Figura 8), podemos observar uma tensão de operação variando entre 3 e 15V, aproximadamente, obtendo um delta de temperatura de até 66°C, se considerarmos uma temperatura ambiente de 25°C. Com isto, a placa escolhida mostra um potencial interessante para ser utilizada no resfriamento da água que irá para o reservatório de acordo com os objetivos deste trabalho.

Figura 8 – Gráfico de performance TEC1-1270



Fonte: HB Electronic Components (S.D., rev. 2.03)

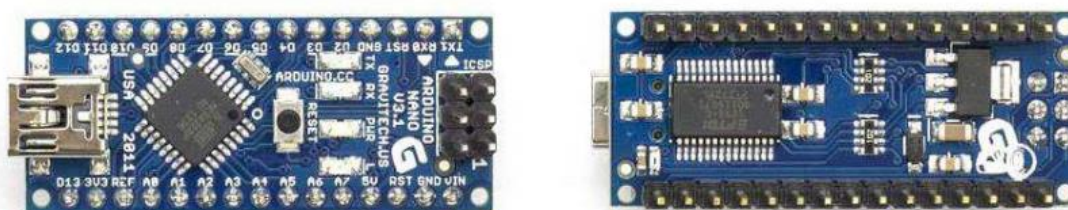
3.4 Microcontrolador Arduino

Desde a sua criação em 2005, o Arduino tem sido a placa de prototipagem mais comercializada em todo o mundo. O principal motivo em atingir esta popularidade, deve-se à facilidade encontrada por seus usuários na elaboração de seus projetos, demandando uma curva de aprendizado relativamente baixa em relação às outras plataformas de desenvolvimento encontradas no mercado (MCROBERTS, 2018).

Neste trabalho, ficou definida a utilização da placa microcontroladora Arduino modelo Nano V3, representado na Figura 9. No contexto deste trabalho, o dispositivo é responsável por realizar a leitura dos sinais enviados pelos sensores de temperatura, bem como comportaria o sistema de controle que seria programado para acionar os atuadores: placas de Peltier e ventoinhas.

Neri (2014) apresenta as principais características técnicas do Arduino Nano e mostra que seu processador principal é um ATmega328, com velocidade de clock de 16 MHz e uma tensão de entrada que varia entre 7 e 12V. Além disto, o microcontrolador conta com 14 pinos de entradas e saídas digitais, das quais 6 podem ser utilizadas como controle PWM, disponibilizando também 8 pinos de entradas analógicas.

Figura 9 – Vistas superior e inferior da placa Arduino Nano



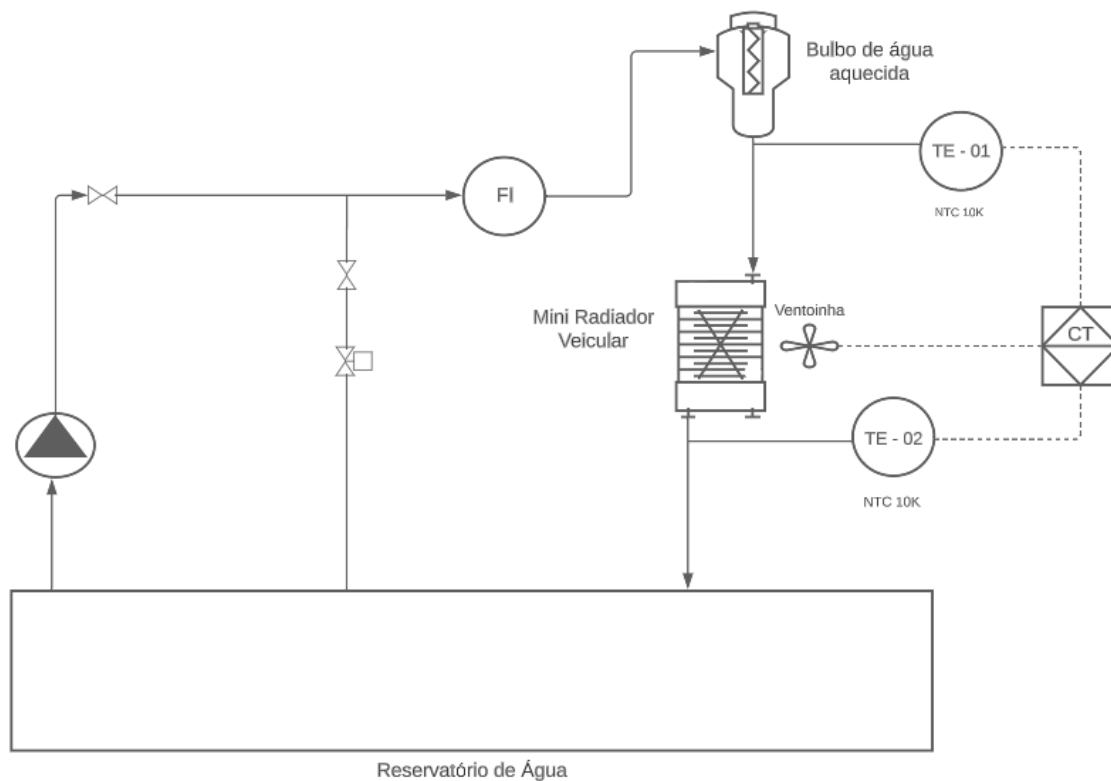
Fonte: Neri (2014)

3.5 Teste do regulador com o radiador

Tendo em vista que foi realizado um teste inicial para mensurar o aumento de temperatura no interior do reservatório de água, faz-se necessário verificar a performance do regulador após a inserção do radiador veicular no sistema. A ideia é verificar o quanto o trocador de calor consegue abaixar a temperatura, sem o auxílio dos demais dispositivos que serão incorporados nos testes seguintes. Cabe ressaltar, que nesta etapa não existe uma lógica de controle atuando sobre a variável manipulada.

Um diagrama simplificado que representa a montagem necessária para a realização do teste está disposto na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama P&ID da planta CRT com mini radiador veicular



Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se que o radiador foi inserido no sistema, recebendo a água quente que sairá do bulbo de aquecimento, antes de voltar para o reservatório. Outro ponto a ser destacado, é que este teste foi realizado com a planta CRT nas mesmas condições do experimento inicial (com exceção de alguma variação na temperatura ambiente), ou seja, controle em malha fechada com *setpoint* 5 °C acima da temperatura ambiente.

Em um segundo momento, foi instalada uma ventoinha nas aletas do radiador, com o intuito de aumentar o fluxo de ar que passa por ele e, conseqüentemente, ampliar a troca de calor.

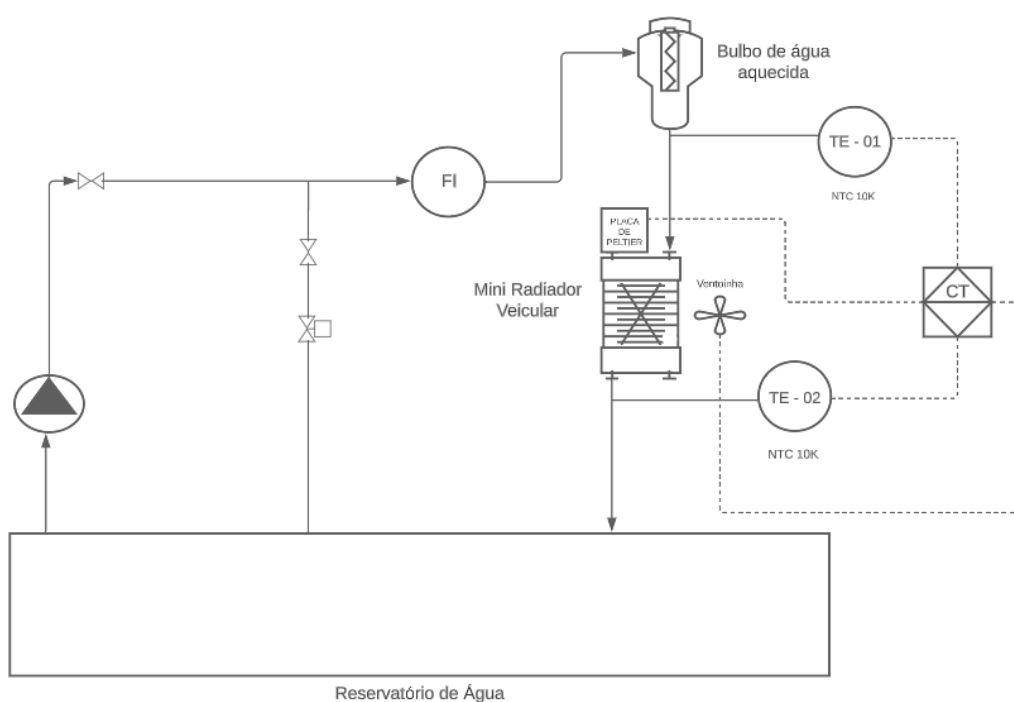
Os dados obtidos nas duas situações foram analisados e comparados, servindo de base para definir as ações que foram adotadas nas etapas seguintes.

3.6 Teste do controlador com o radiador e pastilhas de Peltier

Com o objetivo de amplificar ainda mais a troca térmica, bem como a velocidade de redução da temperatura da água, efetuou-se a instalação das placas termoelétricas, de maneira a estarem acopladas ao radiador. Ao serem fixadas no radiador, espera-se que as placas de Peltier ajudem a dissipar a energia térmica da água aquecida, gerando maior eficiência ao conjunto resfriador.

Uma representação da planta após a inserção das placas está indicada no diagrama P&ID da Figura 11.

Figura 11 – Diagrama P&ID da planta CRT com mini radiador veicular e placas Peltier



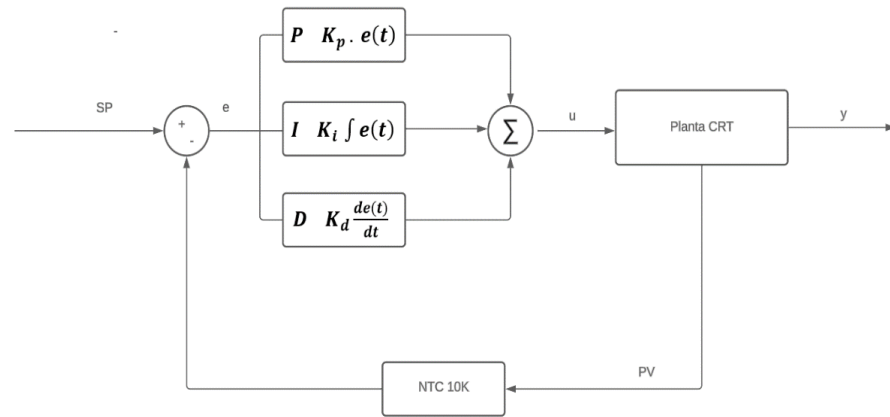
Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto às condições da planta CRT nesta etapa, mantiveram-se as configurações dos testes anteriores: malha fechada com *setpoint* de 5°C acima da temperatura ambiente.

3.7 Projeto e discretização do controlador PID para implementação no microcontrolador

A ideia inicial era desenvolver um sistema de controle PID que iria atuar sobre a corrente das placas de Peltier, a fim de manter a temperatura dentro de um valor de referência. Para a sintonia do controlador, os ganhos podem ajustado a partir do método de Ziegler-Nichols, detalhado na seção 2.3.1. A Figura 12 exibe um diagrama de blocos que representa um controlador a ser projetado.

Figura 12 – Diagrama de blocos do controlador PID



Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista a necessidade de discretizar o sinal de controle do controlador digital, faz-se necessário o uso das seguintes equações:

$$P = k_p \cdot e \quad (1)$$

$$I = Int + k_i(e + e_{anterior}) \cdot \frac{T}{2} \quad (2)$$

$$D = K_d \cdot \frac{(e - e_{anterior})}{T} \quad (3)$$

$$PID = P + I + D \quad (4)$$

Onde:

e = Erro

T = Período de amostragem

Int = Integral do erro

4 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem a finalidade de apresentar as análises e as discussões acerca dos resultados obtidos em laboratório durante o desenvolvimento desta pesquisa.

4.1 Primeiro teste para verificar a eficiência do radiador

Conforme previsto na metodologia, inicialmente foi realizada a montagem do radiador na planta didática com o objetivo de verificar a performance individual deste dispositivo no resfriamento da água. Para obter os valores de temperatura antes e após o radiador, foram instalados dois termopares. O primeiro foi posicionado no interior do bulbo de aquecimento, sugerindo a temperatura da água na entrada do radiador. O segundo foi alocado simulando a temperatura da água na saída do radiador. Foi introduzido um termopar no tubo de saída da água que vai para o reservatório da planta, conforme disposto na Figura 13.

A Figura 13 representa o momento inicial após a montagem, ou seja, nesta etapa o atuador térmico da planta (resistência de aquecimento) estava desligado. Dessa forma, a temperatura esperada para a água nos três pontos deveria ser a mesma e próxima a temperatura ambiente. Contudo, verifica-se que existe uma diferença de 1 °C entre os medidores TE-02 (temperatura da água no interior do bulbo de aquecimento) e TE-03 (temperatura da água na saída do radiador).

A diferença de medição percebida entre os dois termopares pode ser explicada a partir da possível falha de calibração dos instrumentos utilizados. Conforme cita Kojima et al. (2020) é imprescindível que haja uma rotina de calibração periódica para instrumentos de medição de temperatura em sistemas industriais, o que não ocorre com os termopares utilizados, devido a sua finalidade didática.

Figura 13 – Primeira montagem (radiador e termopares)



Fonte: Elaborado pelo autor

Não obstante, foi avaliado e constatou-se que a instrumentação empregada seria suficiente para atender aos objetivos iniciais como primeiro teste. Os valores adquiridos estão refletidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de temperatura do primeiro teste

<i>Timestamp</i>	TE-01 (°C)	TE-02 (°C)	TE-03 (°C)
20:24	28.7	30	30
20:31	36.6	42	45
20:34	34.7	36	39
20:37	33.6	34	36
20:40	34.2	36	39
20:44	34.4	35	39
20:49	34.3	35	39
20:52	33.2	35	39
20:54	34.1	36	40

Fonte: Elaborado pelo autor

É relevante salientar que todos os testes foram conduzidos utilizando os mesmos parâmetros da planta didática, conforme configurados durante o teste realizado na seção 3, ou seja, com um *setpoint* de 5°C acima da temperatura ambiente.

Com base nos valores obtidos e considerando a diferença de 1 °C existente entre os dois termopares, o primeiro teste evidenciou baixa eficiência do radiador isolado, tendo em vista que a temperatura medida no interior do bulbo de aquecimento apresentou um valor inferior à temperatura na saída do radiador. Acredita-se que outro fator que contribuiu para um aumento de temperatura após o radiador pode ser justificado pela posição do termopar responsável pela leitura da temperatura no interior do bulbo (TE-02). Após uma análise, percebeu-se que o instrumento estava captando a temperatura do primeiro fluxo de água que vem do reservatório, e consequentemente mais fria em comparação com o fluxo de água que efetivamente sai do bulbo, devido ao tempo de contato com o atuador térmico.

Ao final do teste, o medidor da planta (TE-01) registra um valor 2 °C menor que o TE-02. Considerando que ambos os dispositivos estão medindo a temperatura da água no interior do bulbo, a disparidade entre os dois valores está associada à diferença no princípio de funcionamento de cada um. Além disso, o PT-100 utilizado pela planta CRT possui um invólucro destinado a proteger o elemento sensor do ambiente. Esse invólucro pode influenciar diretamente no tempo de resposta do instrumento, pois o calor precisa ser dissipado primeiro nessa camada antes de atingir o elemento sensor, resultando na detecção do aumento de temperatura pelo instrumento.

Contudo, este teste inicial, além de fornecer uma visão geral sobre o comportamento da planta após a inserção de novos elementos, contribuiu para mapear a melhor posição dos sensores, revelando os pontos que pudessem interferir nas medições.

4.2 Calibração dos sensores do tipo NTC

Inicialmente, foram adquiridos sensores do modelo NTC B3950 100K para o projeto, conforme exposto na Figura 14. Além de apresentar um conector prático para conexão com a placa de prototipagem, o sensor possui um cabo de 1m e uma parte

compacta do elemento sensor, o que facilita a montagem em locais de difícil acesso, como é o caso do interior das mangueiras de água.

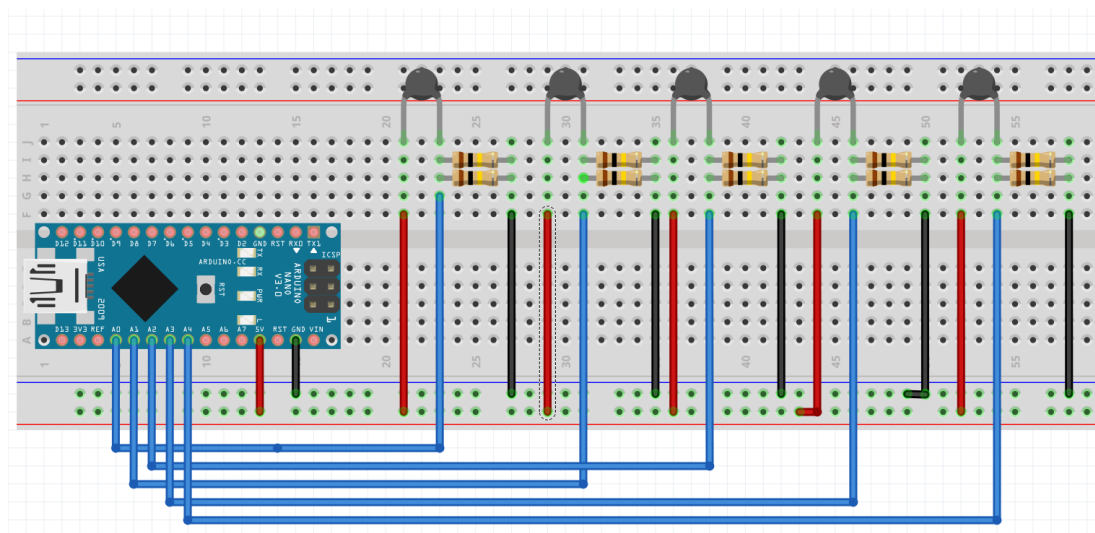
Figura 14 - NTC B3950 100K



Fonte: Adaptado de www.eletrogate.com

Para a calibração dos sensores, foi necessário realizar a montagem de um circuito que possibilitasse a leitura dos NTCs através do arduino. Na Figura 15 está exposto o esquemático do circuito projetado para realizar a leitura e posterior calibração.

Figura 15 - Circuito para leitura de 5 sensores NTC



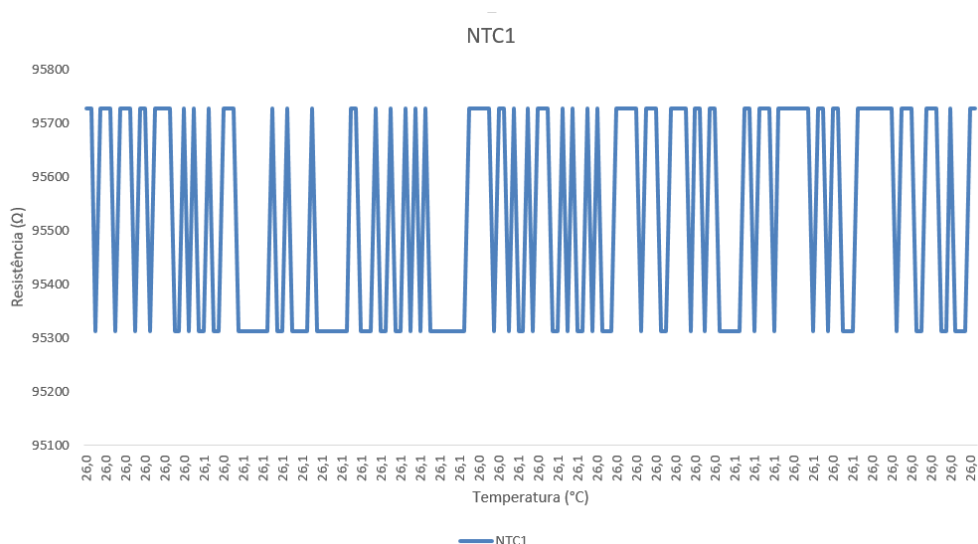
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do circuito apresentado, podemos observar que para cada NTC foram utilizados dois resistores de 100K Ω em paralelo, resultando em uma resistência

equivalente de 50K Ω . A entrada analógica do microcontrolador está captando o valor no ponto do divisor de tensão formado nesta configuração.

A abordagem utilizada para calibrar os sensores envolveu a medição da resposta de cada sensor em relação ao valor de resistência em dois pontos de temperatura conhecidos. Em seguida, seria realizada a linearização para obter a curva característica de cada instrumento do conjunto. O primeiro ponto avaliado foi o da resposta para temperatura ambiente, que no dia da calibração estava em aproximadamente 26°C, conforme indicado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resposta do NTC1 à temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista que o valor de resistência nominal para este NTC deveria estar em torno de 100k Ω à temperatura ambiente (que é 25°C), considera-se aceitável a faixa de valores obtida. A oscilação percebida no gráfico para os valores de resistência também é aceitável, visto que os 400 Ω de amplitude dessa oscilação representam apenas 0,4% em relação ao topo da escala de 100k Ω do sensor.

No entanto, ao calibrar os demais pontos de temperatura, que seria feito com imersão em água aquecida, observou-se que a medição do sensor em questão era impactada pela presença de água, tornando-o inviável para o trabalho.

Assim, tornou-se necessário adquirir um sensor com proteção contra água que atendesse aos requisitos do projeto. O modelo adquirido está representado na figura abaixo.

Figura 16 - NTC 10K Ω

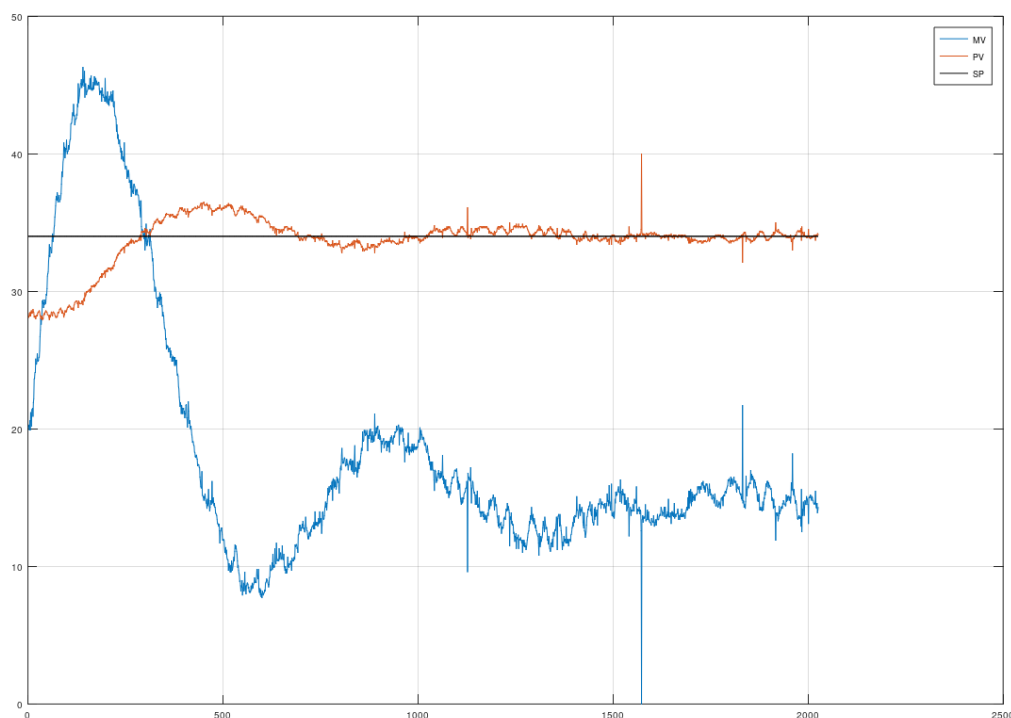


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Teste com radiador e ventoinhas

Dado que o inicial teste realizado com o radiador, como explicado na seção 4.1, revelou uma eficácia limitada do trocador de calor no processo de resfriamento da água na planta, uma nova configuração foi implementada, incluindo duas ventoinhas. O propósito dessa alteração é aprimorar a eficiência térmica ao aumentar a circulação de ar nas aletas do radiador, conforme especificado na metodologia. Os resultados obtidos estão representados nos gráficos 2 e 3.

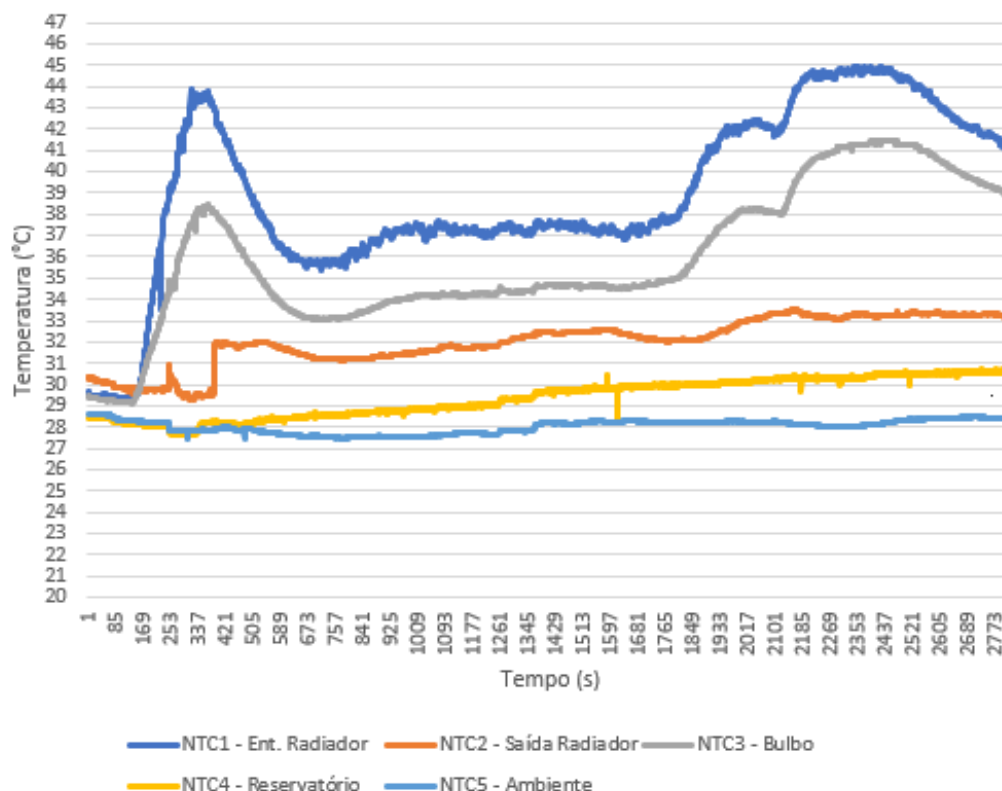
Gráfico 2 – Dados Planta CRT com Radiador e Ventoinhas



Fonte: Elaborado pelo autor

O *setpoint* adotado para este experimento foi de 34°C, mantendo o requisito dos testes anteriores de 5°C acima da temperatura ambiente, que era de 29°C no dia. Cabe ressaltar também que a parametrização do controle PID da planta CRT em malha fechada foi a mesma em todos os testes, sendo a banda proporcional igual a 60, o tempo do integrador fixado em 1 min e o ganho derivativo igual a 5. Cabe ressaltar que neste gráfico o eixo das ordenadas representa as temperaturas (medidas em °C) e o eixo das abscissas refere-se ao tempo decorrido, medido em segundos.

Gráfico 3 – Temperatura dos NTCs – Radiador e Ventoinhas



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os dados adquiridos pelo microcontrolador Arduino presentes no Gráfico 3, nota-se que, embora a temperatura na saída do radiador (NTC2) tenha aumentado em cerca de 4°C, ao decorrer do teste o valor da temperatura nesse ponto foi significativamente menor em relação às temperatura registradas nos sensores posicionados a montante do radiador, ou seja, NTC1 e NTC3.

No entanto, ficou evidenciado que o problema de aumento de temperaturas no interior do reservatório persiste, conforme indicado no gráfico pelos NTCs 4 e 5 que ao final do experimento apresentaram um delta de aproximadamente 2°C.

4.4 Primeiro teste utilizando placas de Peltier

Com o intuito de amplificar o resfriamento da água e assim estabelecer um regulador mais eficiente, iniciou-se a etapa de testes com as pastilhas de Peltier, bem como previsto na metodologia desta pesquisa. Como ponto de partida inicial, fez-se o uso de um dispositivo que se encontrava disponível para fins didáticos no laboratório da escola. Muito empregado em sistemas de purificadores de água e bebedouros

industriais, o equipamento é denominado Conjunto Tanque de Água Gelada, do fabricante FUXIN.

Figura 17 - Tanque de Água Gelada com Placa de Peltier

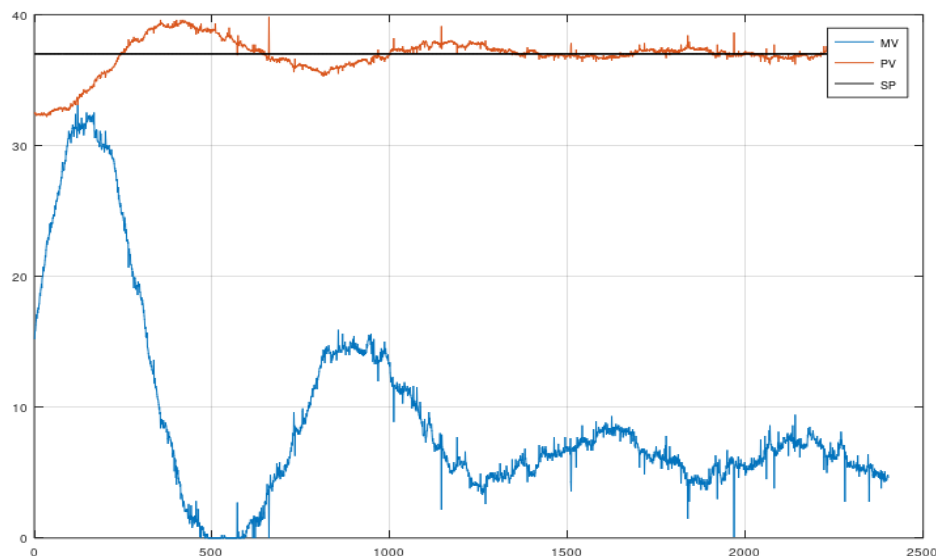


Fonte: Elaborado pelo autor

Devido à ausência de folha de dados ou documentação que contivesse as especificações técnicas do produto, foi necessário desmontá-lo para um estudo de engenharia reversa. Basicamente, o dispositivo consiste em um reservatório cúbico que contém uma célula de Peltier, modelo TEC1-1270, fixada entre dois dissipadores de alumínio, um externo para dissipar a temperatura da parte quente da placa Peltier, e outro em contato com a parte fria da placa Peltier, interno ao recipiente e em contato direto com a água. No dissipador de calor externo foi necessário realizar a adaptação de uma ventoinha, a fim de auxiliar a dissipação de calor.

O conjunto apresentado foi instalado na planta, posicionando-o em série entre o radiador e o reservatório de água da planta CRT. Os dados obtidos após o teste realizado com esta montagem estão refletidos nos gráficos abaixo.

Gráfico 4- Dados Planta CRT com Radiador e placa de peltier



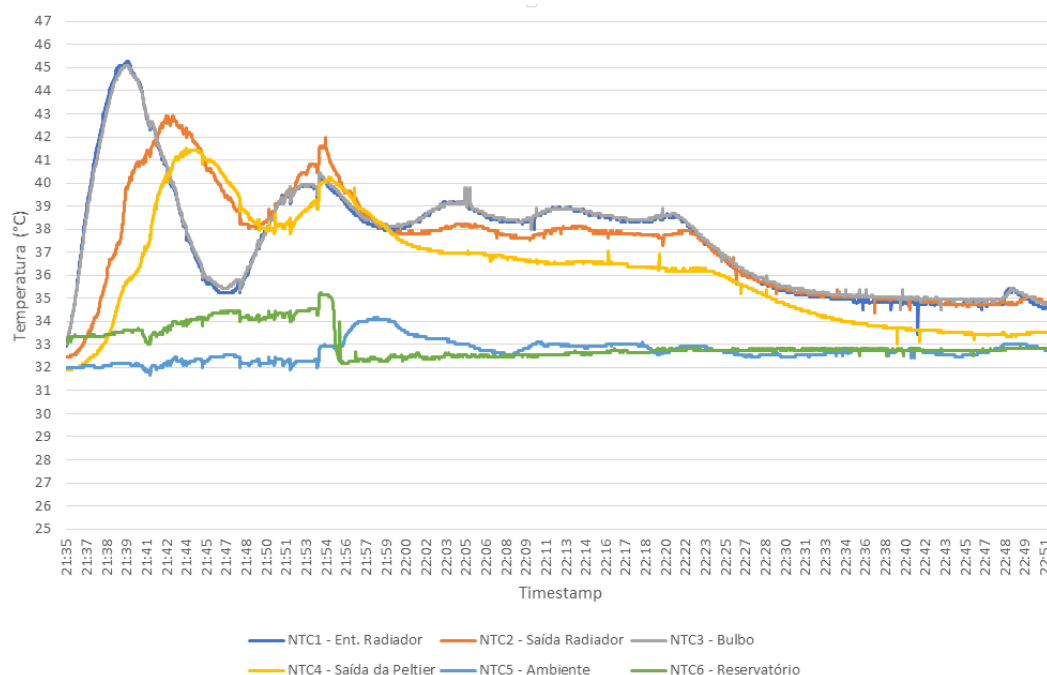
Fonte: Elaborado pelo autor

O *setpoint* adotado para este experimento foi de 37 °C, seguindo a premissa dos testes anteriores de 5 °C acima da temperatura ambiente. É notável que a estabilização do sistema ocorre em torno de 1400 segundos, ou seja, 23 minutos após o início do teste. Tendo este conhecimento, adotou-se como critério ativar o novo componente somente após a estabilização da temperatura de controle. As temperaturas coletadas pelos sensores NTC são apresentadas no Gráfico 5.

Considerando que as regiões pertencentes às extremidades do Gráfico 5 apresentam significativas oscilações por representar os períodos transitórios da planta, é coerente concentrar a análise na região central.

Observando o gráfico, é possível notar a forte correlação entre os valores de temperatura na entrada do radiador (NTC1) e no interior do bulbo de aquecimento (NTC3). Esta correlação fornece um indicativo de que os sensores estão bem posicionados e apresentam bom desempenho. Dentro desta perspectiva, a temperatura na saída do dispositivo que contém a placa de Peltier permaneceu abaixo da temperatura no bulbo de aquecimento, atingindo um delta de aproximadamente 2,2 °C para menos, na maior parte do tempo.

Gráfico 5 - Dados Planta CRT com Radiador e placa de peltier



Fonte: Elaborado pelo autor

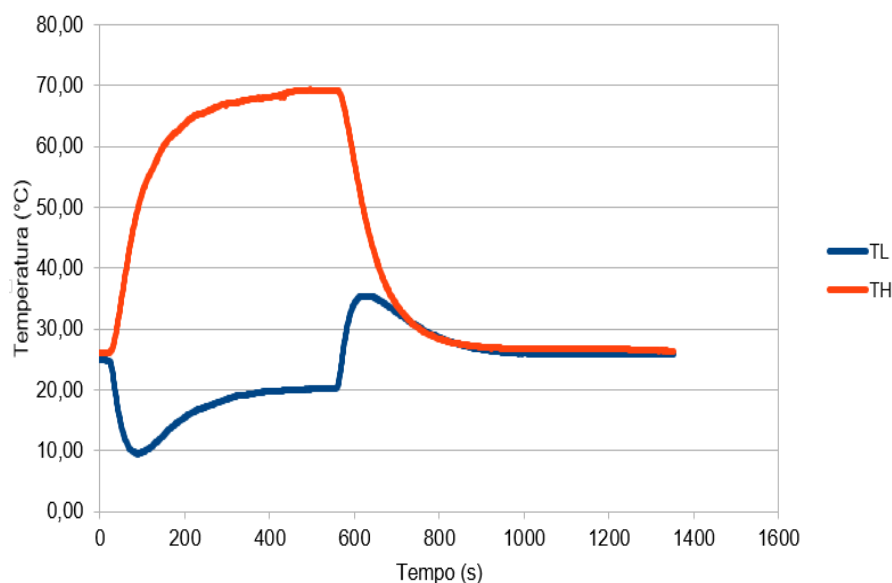
Pensando em aprimorar a redução de temperatura devido ao dispositivo com a placa Peltier, algumas configurações de associação de placas Peltier foram analisadas, sendo apresentadas na próxima seção.

4.5 Estudo do tipo de ligação para placas de Peltier

Dentre os tipos de ligações possíveis para arranjos envolvendo mais de uma placa de Peltier, destacam-se a ligação em série e paralelo. Com o objetivo de verificar qual a melhor configuração, visando melhor eficiência, conduziu-se dois testes de desempenho para os dois tipos de ligação.

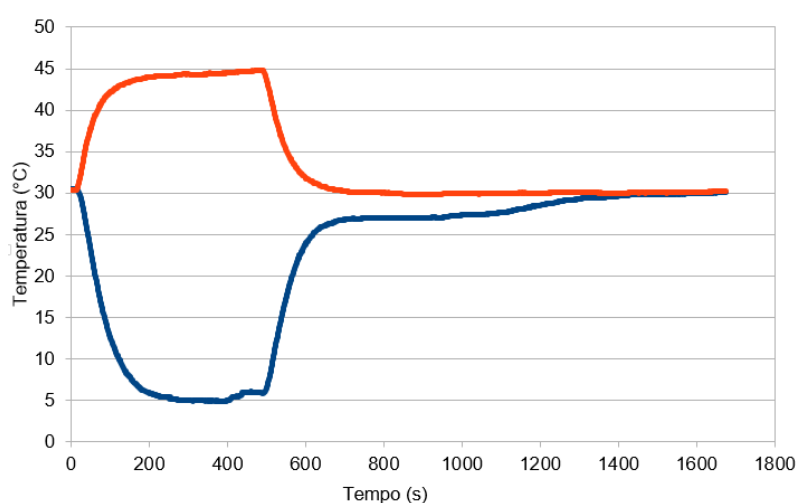
A montagem para o experimento em questão, consistiu em unir a face quente de uma placa de Peltier com a face fria da outra e realizar a ligação elétrica delas, primeiramente em paralelo e depois em série. Os sensores foram instalados para captar a temperatura na região de aquecimento e resfriamento das pastilhas. Os valores podem ser avaliados nos gráficos a seguir.

Gráfico 6 - Teste - 2 pastilhas Peltier TEC1-127-06 conectadas em paralelo



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 - Teste - 2 pastilhas Peltier TEC1-127-06 conectadas em série



Fonte: Elaborado pelo autor

Sabendo que a curva em azul (TL) representa a parte fria da pastilha inferior e a curva vermelha (TH) reflete a temperatura na parte quente da pastilha superior, ao comparar os gráficos 6 e 7 é possível verificar que no arranjo em série atinge-se uma temperatura significativamente mais baixa. Além de conseguir resfriar 15 °C a mais em relação à ligação em paralelo, a conexão em série possui a capacidade de manter temperaturas mais baixas por mais tempo, demonstrando ser a melhor configuração a ser utilizada para o projeto com a finalidade de refrigerar o sistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo central que motivou a realização desta pesquisa foi desenvolver um regulador de temperatura de uma planta didática (CRT), fazendo uso de placas de Peltier e um mini radiador veicular. O intuito era manter a temperatura da água do reservatório constante, igualando-a à temperatura ambiente. Para atingir esta meta, uma série de experimentos foram realizados, explorando diversas combinações de atuadores, visando obter resultados satisfatórios.

Ao concluir este estudo, pode-se afirmar, com base nos resultados obtidos nos experimentos, que, apesar de não se conseguir manter a temperatura constante e igual à ambiente em duas configurações distintas, houve uma redução significativa na temperatura da água de retorno ao reservatório, redução esta que impede o aquecimento excessivo da temperatura da água do reservatório.

No entanto, destaca-se que não houve a necessidade de desenvolver um controlador PID, uma vez que os atuadores demonstraram, na prática, um desempenho abaixo das expectativas inicialmente concebidas no estágio teórico do projeto. Um balanço térmico entre o calor oferecido à água pela resistência elétrica e o calor dissipado pelos trocadores de calor não foi devidamente elaborado. Como sugestão para futuras investigações, recomenda-se uma análise mais aprofundada do dimensionamento dos equipamentos, incorporando um estudo mais detalhado dos princípios termodinâmicos, analisando o comportamento do sistema sob diferentes fluxos de água, por exemplo, além de diferentes associações de conjuntos de placas Peltier. Essa abordagem mais rigorosa pode proporcionar variáveis valiosas para otimizar o desempenho do sistema, superando os desafios identificados durante este estudo. Novos testes devem ser executados com diferentes vazões na água de alimentação dos trocadores de calor.

É importante salientar que esse trabalho tem um valor significativo a partir da ousadia de implantação de novos instrumentos e equipamentos nas plantas existentes no laboratório o que instiga melhorias nos procedimentos das aulas práticas.

6 REFERÊNCIAS

FERNANDES, Jaine D. F. S. et al. Refrigeração utilizando pastilhas de efeito peltier. **HOLOS**, v. 2, p. 25–31, 2010.

GRALIK, Guilherme; BIAVA, Giovany. Caracterização de termistores automotivos do tipo NTC. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 24, 2019.

PABÓN, N. Y. L. **Projeto e fabricação de um túnel de vento e caracterização térmica de um radiador automotivo**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2011.

NERI, H. G. F. **Utilização da plataforma Arduino para controle de experimentos remotos de física**. Trabalho de Conclusão de Curso - Licenciatura em Física. Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

PINTO, Gabriel H. S. G.; DE OLIVEIRA MURO, Pablo G.; DE FARIA, Rodolfo C. **Estudo Sobre Sensores de Temperatura PTC e NTC**. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnólogo em Automação Industrial. Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, 2020.

DEMITI, Felipe Tozim. **Sintonia de controlador PID por meio de algoritmos evolutivos para sistemas realimentados com e sem atraso**. 2018. 110 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, 2018, Maringá, PR.

SMITH, Robert B.; CORRIPIO, Arnaldo. **Introduction to Instrumentation and Measurements**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

CARVALHO, C. S.; BRAGA, S. L. **Trocadores de Calor**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2013.



Emitido em 16/12/2023

CÓPIA DO TRABALHO Nº 227/2023 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 16:53)

HENRIQUE JOSE AVELAR
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DELMAX (11.57.05)
Matrícula: ###22#4

(Assinado digitalmente em 18/12/2023 13:31)

DAVI ALVES DOS SANTOS
DISCENTE
Matrícula: 2017#####7

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **227**, ano: **2023**, tipo:
CÓPIA DO TRABALHO, data de emissão: **18/12/2023** e o código de verificação: **fac72d7dd6**