



# Desenvolvimento de um Módulo Didático para Estudo Experimental da Transferência de Calor em Aletas

## Development of a Didactic Module for Experimental Study of Heat Transfer in Fins

Eduardo Vinicius Botega <sup>1</sup>, Rafael Micael Balduino <sup>2</sup>, Jonas Joacir Radkte <sup>3</sup>

### RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvido o projeto e a construção de um módulo didático para estudo da transferência de calor em aletas. O Arduino foi utilizado para controlar o funcionamento do equipamento e realizar a leitura das temperaturas ao longo do tempo. A programação do microcontrolador foi realizada usando a linguagem C++ e o controle PID foi utilizado para manter a temperatura da base no valor ajustado pelo usuário. Uma investigação experimental do processo de transferência de calor por meio de aletas circulares de alumínio foi realizada para testar o funcionamento do módulo. Nestes experimento, o módulo realizou o aquecimento controlado da base do equipamento e os sensores de temperatura foram estrategicamente posicionados ao longo da aleta, para a aferição da temperatura em diferentes pontos desse objeto. Os dados coletados foram analisados e apresentados por meio de gráficos, permitindo a visualização clara das mudanças de temperatura ao longo do tempo e da extensão do cilindro. Os resultados quantitativos apresentaram-se condizentes com o modelo teórico proposto, evidenciando uma variação de temperatura nas extremidades do cilindro. Os estudos realizados no presente projeto serviram de embasamento teórico e prático para a realização de cursos e oficinas ministrados pelos autores. Aproximadamente 50 alunos do campus e de colégios públicos da região foram atendidos ao longo do projeto. Nestas atividades foram repassados conhecimentos sobre programação do Arduino, eletrônica básica e robótica, permitindo aos alunos inscritos explorarem e experimentarem conteúdos diversos e diferenciados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arduino; Educação; Robótica; Temperatura.

### ABSTRACT

In the present work, the design and construction of a didactic module to study heat transfer in fins was developed. The Arduino was used to control the operation of the equipment and read temperatures over time. The microcontroller was programmed using the C++ language and PID control was used to maintain the base temperature at the value set by the user. An experimental investigation of the heat transfer process through circular aluminum fins was carried out to test the module's operation. In this experiment, the module performed controlled heating of the base of the equipment and the temperature sensors were strategically positioned along the fin, to measure the temperature at different points of the object. The collected data was analyzed and presented using graphs, allowing clear visualization of temperature changes over time and the length of the cylinder. The quantitative results were consistent with the proposed theoretical model, showing a temperature variation at the ends of the cylinder. The studies carried out in this project served as a theoretical and practical basis for carrying out courses and workshops taught by the authors. Approximately 50 students from the campus and public schools in the region were served throughout the project. In these activities, knowledge about Arduino programming, basic electronics and robotics was passed on, allowing registered students to explore and experiment with diverse and differentiated content.

**KEYWORDS:** Arduino; Education; Robotics; Temperature.

<sup>1</sup> Bolsista de extensão. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: edubot.2003@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6056829003611454 .

<sup>2</sup> Aluno de extensão. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: rbalduino@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6582093904245111 .

<sup>3</sup> Docente do Departamento Acadêmico de Física, Estatística e Matemática. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná, Brasil. E-mail: jonas@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7202527344656915 .



## INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos utilizados em processo de transferência de calor entre dois fluidos ou sólidos podendo ser feita por radiação, convecção e o caso em pauta, condução, estando em diferentes temperaturas. Esses equipamentos são largamente utilizados na indústria química e o seu principal objetivo é promover a mudança de temperatura de um fluido. Tendo em vista que, há variadas configurações desse equipamento, ao qual o seu tamanho e suas estruturas geométricas são desenhadas para cada necessidade conforme requeridos no processo tecnológico. Além disso, há uma gama de aplicações de trocadores de calor em vários setores industriais, tais como: usinas de geração de energia, plantas químicas, frigoríficos, refinarias de petróleo, processamento de gás natural e tratamento de águas residuais. Dentre os tipos de trocadores de calor temos o que é chamado de aleta, que consiste em uma superfície estendida para maximizar a transferência de calor. O termo superfície estendida normalmente diz respeito à transferência de calor por condução no interior de um sólido e à transferência de calor por convecção entre as fronteiras do sólido e a vizinhança (SOUSA JÚNIOR, 2011). Na superfície estendida, a direção da transferência de calor das fronteiras é perpendicular à direção da principal transferência de calor no sólido.

Este estudo científico concentra-se no desenvolvimento e construção de um módulo didático para realizar a análise experimental da transferência de calor em aletas, utilizando uma abordagem prática que combina conceitos teóricos com aplicações práticas. Para isso, foi utilizada a estrutura de uma cafeteria em conjunto com um Arduino, onde a temperatura é controlada por um sistema de controle PID (controle Proporcional Integral Derivativo).

A construção do módulo didático tem por objetivo fornecer aos alunos de engenharia do campus um aparato capaz de gerar resultados experimentais que possam ser utilizados em atividades práticas das disciplinas de fenômenos da transporte. Além disso, o conhecimento desenvolvido pelos integrantes do projeto foi utilizado para a realização de cursos e oficinas para alunos do ensino médio e superior. Nessas atividades, os estudantes tiveram a oportunidade de desenvolver projetos práticos que envolveram a montagem de circuitos eletrônicos, programação do Arduino e testes desses circuitos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A transferência de calor ocorre devido ao princípio fundamental da condução térmica. No módulo construído, dentre todos os componentes a resistência elétrica presente no sistema é o que gera o calor ao passar uma corrente elétrica através dela, esse calor é transferido para uma chapa, essa transfere o calor para a aleta de alumínio. A força motriz de qualquer forma de transferência de calor é a diferença de temperatura, e, quanto maior essa diferença, maior a taxa de transferência de calor (ÇENGEL YUNUS A.; GHAJAR, 2012).

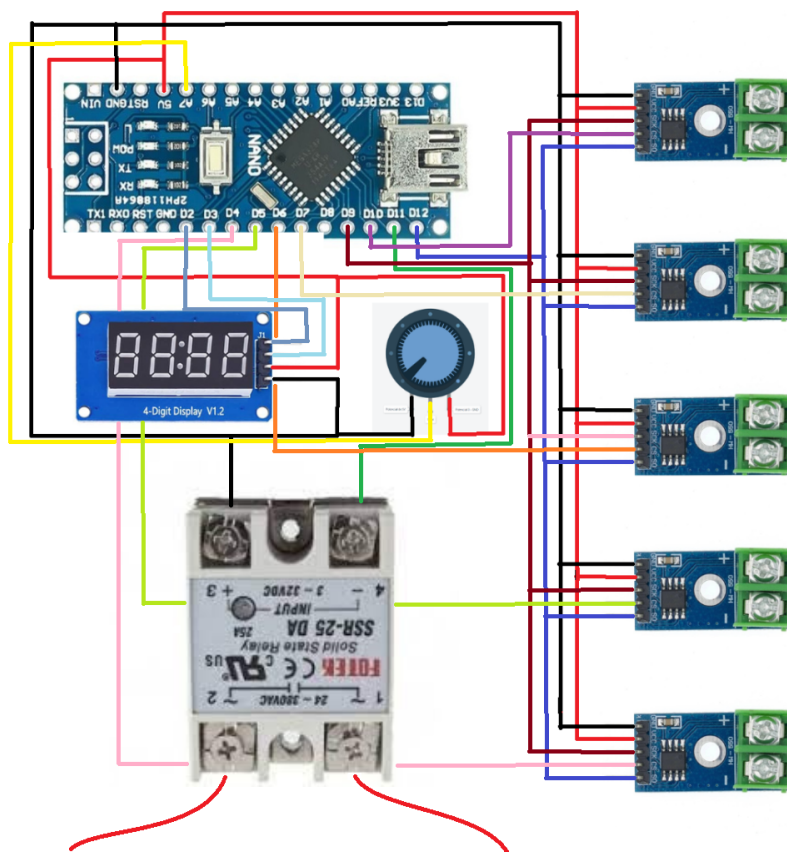
Para a montagem do módulo didático, foram utilizados componentes estruturais e circuitos eletrônicos básicos provenientes de uma cafeteira. Entre esses elementos, destaca-se a resistência elétrica, que é responsável por aquecer a base do módulo, criando uma diferença de temperatura que impulsiona o processo de transferência de calor nas aletas de alumínio.

O fornecimento de energia a resistência elétrica é realizado por um microcontrolador Arduino,

que é responsável pelo funcionamento do módulo, para fazer isso, realiza a leitura da temperatura da base do equipamento, processa tais informações e libera a tensão adequada para a resistência elétrica. Os cálculos para fazer esses ajustes são realizados com base na temperatura configurada pelo usuário.

O Arduino trabalha inicialmente em conjunto com três termopares, podendo suportar mais como mostrado no esquemático, um deles posicionado na base do equipamento e os outros distribuídos na superfície da aleta de alumínio. Para a conversão do sinal analógico do termopar é utilizado um conversor analógico digital modelo MAX6675. Além disso, para possibilitar o controle e ajuste da temperatura, foi incorporado um potenciômetro e um display modelo TM1637, que permitem ao operador configurar a temperatura da base. O esquemático do circuito eletrônico do módulo é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Esquemático do circuito eletrônico do módulo didático.



Fonte: Elaborado por autores (2023).

Um relé de estado sólido, modelo SSR-25DA, foi utilizado para realizar o acionamento da resistência elétrica. O relé atua como um interruptor controlado eletronicamente, permitindo o ajuste da quantidade de energia que é fornecida para a resistência. Isso possibilita que o sistema de aquecimento seja ativado ou desativado de forma controlada, influenciando diretamente na temperatura do sistema.

Para a programação do Arduino foi utilizada a linguagem C++ e um conjunto de bibliotecas. Também foi utilizada uma biblioteca para calcular o ajuste que deve ser feito no sinal PWM que



controla a tensão na resistência elétrica. Tal biblioteca utiliza como base o controle PID. Para que tal controle funcione de forma adequada é necessário determinar o valor dos parâmetros  $k_P$ ,  $k_I$  e  $k_D$ , os quais contribuem para ajustar os efeitos proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

O efeito proporcional gera um valor proporcional ao erro, o efeito integral (ou de restauração) atua reduzindo os erros residuais, e o derivativo tem como intuito fazer uma ação previa deixando o sistema mais preciso. Para determinar os parâmetros utilizados no PID foi utilizado o método de Ziegler-Nichols (ZIEGLER; NICHOLS; ROCHESTER, 1942).

**Figura 2 – Ganho das Variáveis.**

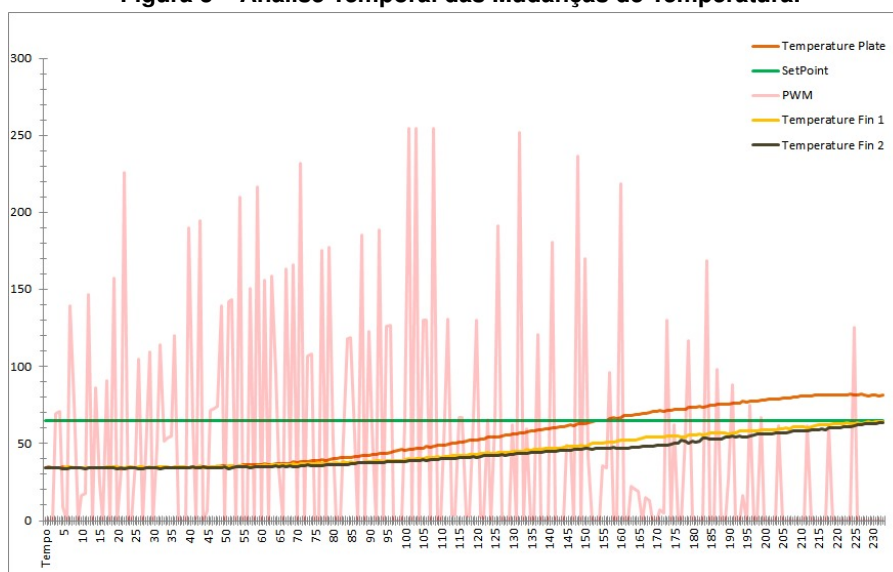
Efeitos do aumento de cada Parâmetro individualmente					
Parâmetro	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error	Stability
Kp	Diminui	Aumenta	Pouca Mudança	Diminui	Piora
Ki	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina	Piora
Kd	Pouca Mudança	Diminui	Diminui	Sem Efeito	Melhora

**Fonte: Controle PID de Potência em Corrente Alternada - Arduino e TRIAC – Parte V - automatobr.blogspot.com (Tempo de Subida - Ultrapassar - Tempo de Ajuste - Erro de Estado Estacionário - Estabilidade)**

## RESULTADOS

Para verificar o funcionamento do módulo, foi necessário realizar um acompanhamento gráfico durante o experimento. Observou-se que, ao ajustar o potenciômetro para 65°C (SetPoint), a temperatura desejada, o comportamento foi conforme o esperado. A temperatura da chapa (Temperature Plate) foi a primeira a atingir os 65°C, uma vez que estava mais próxima à resistência, resultando em um aquecimento mais rápido em comparação às demais temperaturas (Temperature Fin 1 e 2), as quais foram registradas em locais mais distantes da fonte de calor. Entretanto pode-se observar que as temperaturas continuaram a subir, registrando assim um de estado estacionário.

**Figura 3 – Análise Temporal das Mudanças de Temperatura.**



**Fonte: Elaborado por autores (2023).**



## CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido necessita de correções nos parâmetros que regem o PID, sendo que os valores usados atualmente elevam a uma temperatura superior da desejada. Esse é um erro de calibração dos mesmos, mostrando a necessidade de mais testes para que controle precisamente o aquecimento da resistência. A utilização de termopares distribuídos na aleta permite o monitoramento contínuo da temperatura, o que pode ser utilizado para estudos de fenômenos de transportes. O equipamento construído possui uma estrutura simples e barata e contribuirá futuramente em atividades práticas dos cursos de engenharia.

O conhecimento teórico e prático desenvolvido pelos alunos envolvidos no projeto foram repassados a mais de 50 estudantes do ensino médio e superior. Os cursos e oficinas ministrados pelos integrantes do projeto possibilitaram o acesso aos componentes eletrônicos e ao conhecimento necessário para a construção de equipamentos e robôs baseados em Arduino. Desta forma, os estudantes foram encorajados a buscar mais conhecimento tanto em programação e eletrônica básica como em disciplinas básicas como matemática e física.

## Agradecimentos

Agradecimento à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná pela bolsa de extensão ao primeiro autor deste trabalho.

## Disponibilidade de Código

O código está disponível em <https://github.com/EduardoBotega/Modulo-Did-tico/tree/main>.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

- ÇENGEL YUNUS A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. ISBN, 4. ed., p. 83–154, 2012.
- SOUSA JÚNIOR, Ruy de. **Experimentos Didáticos em Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias para a Engenharia Ambiental**. São Carlos: EdUFSCar, 2011.
- ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B.; ROCHESTER, N. Y. Optimum Settings for Automatic Controllers. **TRANSACTIONS**, ASME, v. 760, p. 759–765, 1942.