

Ivo Zatti Lima Meyer  
Daniel Augusto Souza Pereira  
Daniel de Oliveira Nogueira  
Hélio Augusto Goulart Diniz  
Sara Isabel de Melo Resende

# **PLATAFORMA DIDÁTICA PARA PRÁTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

Ivo Zatti Lima Meyer  
Daniel Augusto Souza Pereira  
Daniel de Oliveira Nogueira  
Hélio Augusto Goulart Diniz  
Sara Isabel de Melo Resende

# **PLATAFORMA DIDÁTICA PARA PRÁTICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

1ª edição

**Editora Itacaiúnas**  
Ananindeua – PA  
2022

©2022 por Ivo Zatti Lima Meyer, Daniel Augusto Souza Pereira, Daniel de Oliveira Nogueira, Hélio Augusto Goulart Diniz e Sara Isabel de Melo Resende

*Todos os direitos reservados.*

1ª edição

**Conselho editorial / Colaboradores**

Márcia Aparecida da Silva Pimentel – Universidade Federal do Pará, Brasil  
José Antônio Herrera – Universidade Federal do Pará, Brasil  
Márcio Júnior Benassuly Barros – Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil  
Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil  
Wildoberto Batista Gurgel – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil  
André Luiz de Oliveira Brum – Universidade Federal de Rondônia, Brasil  
Mário Silva Uacane – Universidade Licungo, Moçambique  
Francisco da Silva Costa – Universidade do Minho, Portugal  
Ofélia Pérez Montero - Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba

Editora-chefe: Viviane Corrêa Santos – Universidade do Estado do Pará, Brasil  
Editor e web designer: Walter Luiz Jardim Rodrigues – Editora Itacaiúnas, Brasil  
Editor e diagramador: Deivid Edson Corrêa Barbosa - Editora Itacaiúnas, Brasil

Edição eletrônica/ diagramação: Walter Rodrigues  
Projeto de capa: Editora Itacaiúnas

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

P716	Plataforma didática para práticas de transferência de calor [recurso eletrônico] / Ivo Zatti Lima Meyer, Daniel Augusto Souza Pereira, Daniel de Oliveira Nogueira, Hélio Augusto Goulart Diniz e Sara Isabel de Melo Resende. – 1. ed. – Ananindeua, PA : Itacaiúnas, 2022. 67 p. ; PDF ; 2,45 MB  ISBN: 978-85-9535-180-6 (e-book) DOI: 10.36599/itac-plaprtc  1. Engenharia. 2. Plataforma didática. 3. Controle. 4. Transferência de calor. I. Título.	CDD 620 CDU 62
------	--	-------------------

**Índice para catálogo sistemático:**

1. Engenharia: 620
2. Engenharia: 62

E-book publicado no formato PDF (*Portable Document Format*). Utilize software [Adobe Reader](#) para uma melhor experiência de navegabilidade nessa obra.

---

O conteúdo desta obra, inclusive sua revisão ortográfica e gramatical, bem como os dados apresentados, é de responsabilidade de seus participantes, detentores dos Direitos Autorais.

Esta obra foi publicada pela **Editora Itacaiúnas** em maio de 2022.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial desta obra, por qualquer meio e para qualquer fim, sem autorização prévia, por escrito, dos autores. Obra protegida pela Lei n 5610/98, Direitos Autorais.

## SOBRE OS AUTORES

Ivo Zatti Lima Meyer <sup>1,2</sup> (ivozatti@hotmail.com)

Daniel Augusto Souza Pereira <sup>1</sup> (danielaugusto21@gmail.com)

Daniel de Oliveira Nogueira <sup>1</sup> (nogueirabh@hotmail.com)

Hélio Augusto Goulart Diniz <sup>2,3</sup> (helioufmg@gmail.com)

Sara Isabel de Melo Resende <sup>2</sup> (sara\_sidmr@yahoo.com.br)

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais; Departamento de Engenharia Mecânica

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais; Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

<sup>3</sup> Centro Universitário Estácio de Sá de Belo Horizonte; Engenharias

## RESUMO

As plataformas didáticas têm grande contribuição para a formação acadêmica, pois com elas os alunos podem aplicar o estudo teórico através de práticas laboratoriais. Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma plataforma de controle de temperatura voltada para a área didática. Nela será possível a aplicação de práticas de ensino nas áreas de análise e controle de sistemas térmicos. Este ambiente de controle será equipado com cinco sensores de temperatura, um driver foto acoplador e uma resistência elétrica, que terá a função de aquecer. Um microcontrolador fará a aquisição dos dados dos sensores e o enviará para uma interface computacional programada no MATLAB, no qual serão implementados o monitoramento e o controle do sistema, que enviará um sinal de comando a um atuador para a estabilização do sistema térmico. A plataforma poderá ser utilizada para o modelamento e análise de controle de um sistema térmico para aquecimento do ambiente. Ela também poderá ser utilizada para o estudo de eficiência de controladores e do sistema térmico.

Palavras-chave: Plataforma didática. Controle. Transferência de calor.

## **ABSTRACT**

The didactic platforms have great contribution to academic formation, because with them the students can apply the theoretical study by laboratorial practices. This work describes the development of a platform for temperature control toward didactic area. With this device it will be possible to implement teaching practices in the areas of analysis and control of thermal systems. This control environment is equipped with five temperature sensors, one photo coupler driver and an electrical resistance, which has the function of heat. A microcontroller acquires the sensor data and sends it to a computer interface programmed in MATLAB, in which is implemented the monitoring and control system that sends a command signal to an actuator to stabilize the thermal system. The platform can be used for modeling and control's analysis of a thermal system for heating a room. It can also be used to study the efficiency of the thermal system and controllers.

**Keywords:** Didactic Platform. Control. Heat Transfer.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PLATAFORMA DIDÁTICA.....	10
FIGURA 2 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO .....	11
FIGURA 3 - TIPOS DE TERMOPARES .....	14
FIGURA 4 - LIMITES DE ERROS DO TERMOPAR .....	14
FIGURA 5 - SISTEMA CONTROLADO .....	17
FIGURA 6 - SISTEMA DE MALHA ABERTA .....	17
FIGURA 7 - SISTEMA DE MALHA FECHADA .....	18
FIGURA 8 - PLACA DE DESENVOLVIMENTO ARDUINO UNO.....	20
FIGURA 9 - PLACA DE DESENVOLVIMENTO E-PX MINI .....	21
FIGURA 10 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR UNIDIMENSIONAL POR CONDUÇÃO	24
FIGURA 11 - .. TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO ENTRE UM FLUIDO E UMA SUPERFÍCIE .....	25
FIGURA 12 - RESFRIAMENTO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS POR CONVECÇÃO FORÇADA .....	26
FIGURA 13 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO ENTRE UMA SUPERFÍCIE E UMA VIZINHANÇA.....	27
FIGURA 14 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLATAFORMA DIDÁTICA.....	29
FIGURA 15 - DETALHAMENTO DA PLATAFORMA CONSTRUÍDA .....	30
FIGURA 16 - DIAGRAMA EM MALHA FECHADA DO CONTROLE DE TEMPERATURA.....	31
FIGURA 17 - CIRCUITO CONDICIONADOR DO SENSOR .....	34
FIGURA 18 - CIRCUITO DO MÓDULO DE POTÊNCIA.....	35
FIGURA 19 - SINAL PWM.....	36
FIGURA 20 - PARTE INTERNA DA UNIDADE DE CALOR.....	37
FIGURA 21 - PROGRAMA SUPERVISÓRIO.....	38
FIGURA 22 - CONFIGURAÇÃO DA PORTA DE COMUNICAÇÃO.....	39
FIGURA 23 - TEMPERATURA DO AMBIENTE.....	39
FIGURA 24 - DIAGRAMA EM MALHA FECHADA .....	40
FIGURA 25 - TEMPERATURA DO CORPO DE PROVA .....	40
FIGURA 26 - COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DA PLATAFORMA COM DEGRAU DE 15V .....	41
FIGURA 27 - RESPOSTA TEMPORAL DO SISTEMA EM MALHA ABERTA.....	43
FIGURA 28 - LUGAR DAS RAÍZES DO CONTROLADOR P.....	44
FIGURA 29 - RESPOSTA TEMPORAL DO SISTEMA EM MALHA FECHADA COM CONTROLADOR P.....	44
FIGURA 30 - LUGAR DAS RAÍZES DO CONTROLADOR PI.....	45
FIGURA 31 - RESPOSTA TEMPORAL DO SISTEMA EM MALHA FECHADA COM CONTROLADOR PI .....	45
FIGURA 32 - LUGAR DAS RAÍZES DO CONTROLADOR PID.....	46
FIGURA 33 - RESPOSTA TEMPORAL DO SISTEMA EM MALHA FECHADA COM CONTROLADOR PID.....	46
FIGURA 34 - CORPO DE PROVA COM ISOLAMENTO TÉRMICO.....	48
FIGURA 35 - TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO NA ALETA DE ALUMÍNIO 50	
FIGURA 36 - TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO NA ALETA DE AÇO .....	50
FIGURA 37 - TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO NA ALETA DE ALUMÍNIO 53	
FIGURA 38 - TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO NA ALETA DE AÇO .....	53

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivos do trabalho	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Estrutura do documento	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>13</b>
2.1	Sensores de temperatura	13
2.1.1	<i>Termopar</i>	13
2.1.2	<i>Sensores resistivos</i>	14
2.1.3	<i>Sensor do tipo circuito integrado</i>	16
2.1.3	<i>Sensor digital de temperatura</i>	16
2.2	Sistemas de controle	16
2.2.1	<i>Sistemas de malha aberta</i>	17
2.2.2	<i>Sistemas de malha fechada</i>	18
2.2.3	<i>Sistemas controlados por computador</i>	18
2.2.4	<i>Controladores PID</i>	18
2.3	Microcontroladores	19
2.3.1	<i>Arduino</i>	20
2.3.2	<i>E-PX-Mini</i>	21
2.3.3	<i>HC08, S08 e RS08</i>	21
2.5	Semicondutores de potência e acionamento	22
2.5.1	<i>MOSFET's</i>	22
2.6	Efeito Joule	23
2.6	Transferência de calor	23
2.6.1	<i>Condução</i>	24
2.6.2	<i>Convecção</i>	25
2.6.2.1	<i>Convecção forçada</i>	26
2.6.3	<i>Radiação</i>	26
2.7	Isolamento térmico	27
2.9	MATLAB	28
2.10	LabVIEW	28
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>29</b>
3.1	Descrição Detalhada da Plataforma Didática	29
3.2	Fundamentação Teórica Aplicada	31

<b>3.3</b>	<b>Desenvolvimento das partes construtivas .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.1</b>	<b><i>Projeto eletrônico.....</i></b>	<b>33</b>
<b>3.3.1.1</b>	<b>Condicionamento de sinais dos sensores.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.1.2</b>	<b>Interface microcontrolada .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1.3</b>	<b>Módulo de potência CC .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2</b>	<b><i>Projeto eletromecânico .....</i></b>	<b>36</b>
<b>3.3.3</b>	<b><i>Projeto do sistema de controle e supervisor.....</i></b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTOS PRÁTICOS .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Identificação de 1ª Ordem.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Projeto de controladores .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Condutividade térmica .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1.1</b>	<b><i>Aplicação do teste de condutividade térmica .....</i></b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>Aletas.....</b>	<b>51</b>
<b>5.2.1</b>	<b><i>Aplicação do teste de aletas .....</i></b>	<b>52</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Modelo teórico .....</i></b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE A – ROTINAS UTILIZADAS E IMPLEMENTADAS NO MATLAB .....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE B – GUIAS PRÁTICOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE C – LISTA DE MATERIAIS.....</b>	<b>65</b>
	<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

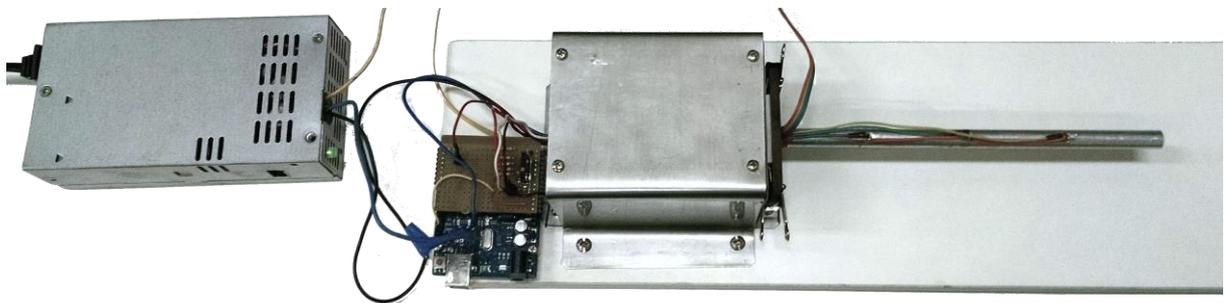
Com o avanço tecnológico, a demanda por processos industriais mais precisos vem aumentando a cada dia. Para isso é necessária a evolução dos sensores, atuadores, processadores e técnicas de controle. Como entidades que cooperam para esse crescimento, as universidades buscam formar profissionais qualificados com sólido conhecimento teórico e prático.

As plataformas didáticas são importantes ferramentas que contribuem nas aulas práticas, uma vez que são desenvolvidas com o propósito de auxiliar os alunos no entendimento da teoria. Quanto mais plataformas diferentes em um laboratório, maior será a quantidade de fenômenos da engenharia observados que irão contribuir para um maior enriquecimento do conhecimento.

Este trabalho se volta a desenvolver uma plataforma didática que ajudará os alunos a aplicar o conhecimento teórico em práticas nas áreas de transferência de calor e controle de processos. Além da aplicação direta na área de transferência de calor, a plataforma desenvolvida se mostra extremamente útil e aplicável a práticas das disciplinas de instrumentação e controle de sistemas mecânicos do curso de Engenharia Mecânica (linha de formação em Mecatrônica).

O projeto possui código aberto de programação e o seu hardware será disponibilizado à comunidade acadêmica. A figura 1 exibe a plataforma didática construída.

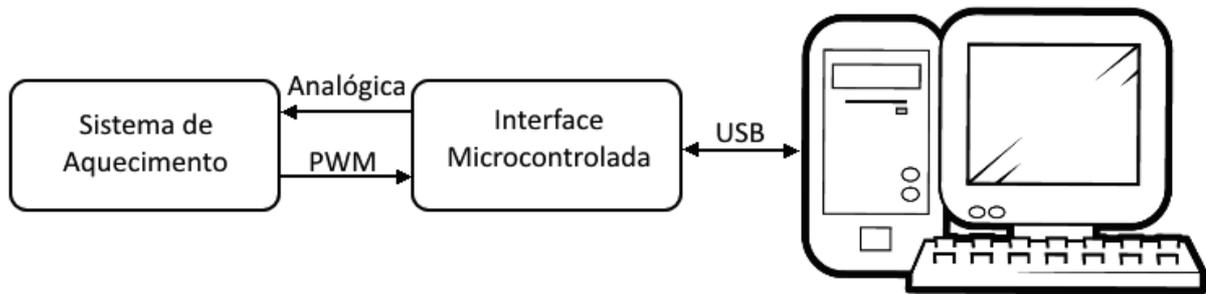
**FIGURA 1 - Plataforma didática**



**Fonte: Elaborado pelos autores**

A figura 2 exibe um diagrama simplificado das comunicações existentes na plataforma.

FIGURA 2 - Diagrama Simplificado



Fonte: Elaborado pelos autores

### 1.1 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem por objetivo principal desenvolver uma plataforma didática para o uso em laboratórios de transferência de calor e controle de processos. Serão desenvolvidos experimentos práticos envolvendo transferência de calor por condução e convecção, tendo um controle de temperatura para aquecimento de corpos de prova.

Serão elaboradas guias de práticas relativas à transferência de calor. Também será disponibilizado o projeto aberto da plataforma com diagramas eletrônicos e de montagem mecânica, além dos códigos fonte implementados. Acredita-se que estas informações poderão ser de grande valia à comunidade acadêmica e servir de base para futuros projetos correlatos.

### 1.2 Justificativa

No estudo de temas da área de controle de sistemas e transferência de calor, fica muito difícil para o aluno compreender a aplicação prática dos modelos matemáticos ensinados pelos professores. As plataformas possuem grande importância para um melhor aprendizado, pois permitem que os estudantes apliquem os conceitos teóricos vistos em sala nas práticas laboratoriais.

Apesar de sua reconhecida importância para o curso, a universidade PUC Minas não dispõe de muitos módulos didáticos para práticas na área de transferência de calor e controle de processos. Dentre os fatores que dificultam a aquisição das plataformas didáticas é listada a restrição do uso em apenas uma disciplina e o alto custo do equipamento.

Com este trabalho, teve-se o objetivo de criar uma plataforma que contribua com os laboratório das disciplinas de Transferência de Calor no estudo de condução, convecção e



para a disciplina de Controle de Processos, no estudo de técnicas de modelagem e controle de sistemas.

### **1.3 Estrutura do documento**

Este documento é constituído de seis capítulos.

Este primeiro capítulo apresentou a proposta do projeto, aplicações e as razões que motivaram a realização deste trabalho.

O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica sobre os assuntos que envolvem este projeto.

O terceiro capítulo apresenta o desenvolvimento do trabalho detalhando a plataforma em suas funcionalidades e especificações construtivas. O desenvolvimento foi realizado tendo como base a revisão bibliográfica.

O quarto capítulo descreve os procedimentos de modelamento, controle da plataforma e os experimentos práticos que validam o funcionamento da plataforma.

O quinto capítulo apresenta a plataforma didática em uma aplicação ilustrativa na área de transferência de calor.

O sexto e último capítulo apresenta uma conclusão sobre o projeto realizado e propõe sugestões para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta um estudo sobre os temas necessários para o desenvolvimento da plataforma didática.

Para atingir o objetivo proposto necessita-se de estudo direcionado nas áreas de eletrônica, de térmica, de controle e de informática. A área de eletrônica tratará da parte de sensoriamento e acionamento de potência. A parte térmica tratará dos efeitos transferência de calor. A área de controle abrange um estudo dos sistemas de controle e sua forma de atuar em uma plataforma. Por último um estudo de softwares que para supervisão e controle da plataforma didática que será apresentada.

### 2.1 Sensores de temperatura

A temperatura influencia diretamente na qualidade de fabricação de alguns produtos como: cerâmica, placas de circuitos eletrônicos, chapas de aço. Portanto, é necessário um controle térmico para a produção e bom funcionamento do produto final.

Existem vários tipos de sensores de temperatura, sendo que os modelos mais presentes são do tipo resistivo, termopar, circuito integrado e digitais. (WANG, 2012).

#### 2.1.1 Termopar

Segundo Salcas (2014), define-se termopar como um sensor de medição de temperatura que em sua constituição se têm dois condutores metálicos e distintos, puros ou homogêneos. Quando as extremidades do termopar são submetidas a diferentes temperaturas, sua composição química gera uma força eletromotriz da ordem de mV.

O sinal de tensão gerado pelo termopar passa por um tratamento que o associa a um valor de temperatura, seja por consulta a uma tabela ou por uma equação. Também se pode utilizar um amplificador operacional para conseguir distinguir baixos valores, resultando em uma otimização da leitura do sinal. (ZHANG, 2010).

A figura 3 mostra os tipos de termopares fabricados, os materiais constituintes, temperatura de trabalho e algumas de suas características. As faixas de temperatura de trabalho para cada tipo de termopar e os limites de erros de acordo com as normas ASTM E230 são exibidas na figura 4.



**FIGURA 3 - Tipos de termopares**

TIPO	COMPOSIÇÃO	ESCALA	CARACTERÍSTICAS
<b>T</b>	Cobre (+) Cobre-Níquel(-)	-200 a 370°C	Podem ser usados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Adequados para medições abaixo de zero grau. Apresenta boa precisão na sua faixa de utilização.
<b>J</b>	Ferro / Cobre (+) Cobre-Níquel(-)	-40 a 760°C	Utilizados em atmosferas oxidantes, redutoras, inertes e no vácuo. Não deve ser usado em atmosferas sulfurosas e não se recomenda o uso em temperaturas abaixo de zero grau. Apresenta baixo custo.
<b>E</b>	Níquel-Cromo/Cobre (+) Cobre-Níquel(-)	-200 a 870°C	Próprios para atmosferas oxidantes e inertes. Em ambientes redutores ou vácuo perdem suas características termoelétricas. Adequado para uso em temperaturas abaixo de zero grau.

Fonte: SALCAS, 2014

**FIGURA 4 - Limites de erros do termopar**

TIPOS DE TERMOPARES	FAIXA DE TEMPERATURA	LIMITES DE ERRO	
		STANDARD (escolher o maior)	ESPECIAL (escolher o maior)
T	0 a 370°C	± 1°C ou ± 0,75%	± 0,5°C ou ± 0,4%
J	0 a 760°C	± 2,2°C ou ± 0,75%	± 1,1°C ou ± 0,4%
E	0 a 870°C	± 1,7°C ou ± 0,5%	± 1°C ou ± 0,4%

Baseados na Norma ASTM E230, segundo a I.T.S.-90 e ( IEC 584).

Fonte: SALCAS, 2014

### 2.1.2 Sensores resistivos

Os sensores de temperatura resistivos funcionam por meio de uma variação do valor nominal da sua resistência sob a influência da temperatura. A tensão gerada pela passagem de corrente é associada a um valor de temperatura por meio da equação presente no datasheet do sensor. (TEXAS INSTRUMENT, 2013a).

Um exemplo de sensores resistivos são os termistores, que são semicondutores termicamente sensíveis, em que sua resistência varia com a temperatura de forma não linear.



Eles são fabricados com material semicondutor de óxido metálico encapsulado em uma base de vidro ou epóxi.

Os termistores podem ter coeficientes de temperatura positivos (PTC) ou negativos (NTC). O termistor do tipo PTC apresenta aumento da resistência com o aumento da temperatura. São comumente utilizados como dispositivos limitadores de corrente para a proteção do circuito, em substituição aos fusíveis, e como sensores em sistemas de aquecimento em pequenos fornos de temperatura controlado. O NTC apresenta uma queda de resistência com o aumento da temperatura, sendo principalmente utilizado na medição de temperatura. São muito comuns de serem encontrados em termostatos digitais e na monitoração da temperatura de automóveis.

Uma das vantagens de seu uso é sua alta sensibilidade, podendo variar em média aproximadamente  $200 \Omega/^{\circ}\text{C}$ . Os termistores podem ser parametrizados pelo método de Steinhart-Hart e pelo método do Fator Beta, que é uma derivação do método de Steinhart-Hart. (TEXAS INSTRUMENTS, 2013).

Pelo método de Steinhart-Hart se tem:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3 \quad (1)$$

Onde:

- T – é a temperatura em Kelvin;
- R – é a resistência medida na temperatura T;
- A, B e C – são coeficientes que dependem do fabricante.

Pelo método do Fator Beta se tem:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (2)$$

Onde:

- T – é a temperatura em Kelvin;
- R – é a resistência medida na temperatura T;
- $T_0$  – é a temperatura ambiente em Kelvin;
- $R_0$  – é a resistência medida em temperatura ambiente;



- $\beta$  – é um coeficiente fornecido pelo fabricante do termistor.

### 2.1.3 *Sensor do tipo circuito integrado*

Os sensores do tipo circuito integrado possuem internamente um sensor e um circuito condicionador de sinal. Isto aumenta a facilidade do seu uso, uma vez que não se faz necessária a construção de um circuito com filtros e amplificadores.

O LM35 é um exemplo de sensor do tipo circuito integrado. Seu sinal de saída varia linearmente com a temperatura. Sua faixa de trabalho varia de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , fornecendo uma precisão de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Por necessitar de apenas  $60\ \mu\text{A}$ , a passagem de corrente elétrica que provoca aquecimento do componente influencia muito pouco na sua leitura (no máximo  $0,1^{\circ}\text{C}$ ). É um sensor simples e barato. (TEXAS INSTRUMENT, 2013).

### 2.1.3 *Sensor digital de temperatura*

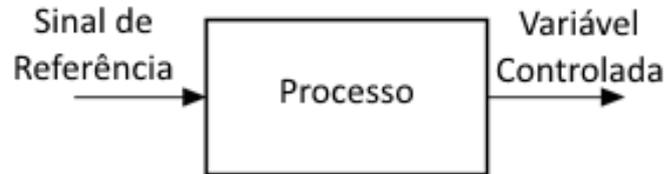
Os sensores de temperatura digital oferecem maior precisão. Eles funcionam por meio de comunicação com outros dispositivos para o controle do sistema, seja a comunicação feita por protocolo I2C ou SPI. Eles podem oferecer funções de alerta caso a temperatura esteja fora da faixa desejada. (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

O TMP 75 é um exemplo de sensor de temperatura digital. Por ser também um transdutor, não é necessário um algoritmo para tratar o sinal. Este modelo possui a característica de conectar até 8 dispositivos na mesma rede. Sua resolução é de  $0,0625\ ^{\circ}\text{C}$  e precisão de  $0,5\ ^{\circ}\text{C}$ . Sua faixa de temperatura varia de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ . (TEXAS INSTRUMENTS, 2007).

## 2.2 **Sistemas de controle**

Segundo Nise (2002), “os sistemas de controle são parte integrante da sociedade moderna”. Graças a estes sistemas, numerosas aplicações foram possíveis como a usinagem automática de peças metálicas até o lançamento de ônibus espaciais. O sistema de controle tem a função de controlar os sinais de saída de um processo, como representado na figura 5. Um conjunto de subsistemas e processos são utilizados para que se tenha uma determinada variável controlada para um sinal de referência fornecido. (NISE, 2002).



**FIGURA 5 - Sistema controlado**

**Fonte: Elaborada pelos autores**

O sistema controlado oferece uma precisão que antes seria impossível de ser alcançada por conta das limitações humanas, além de uma abrangência de tarefas simultâneas e decisões instantâneas. (GOLNARAGHI; KUO, 2010).

O controle de sistemas pode ser feito por meio de malhas abertas ou fechadas.

### 2.2.1 *Sistemas de malha aberta*

Um sistema de malha aberta consiste em um controlador, sob o comando exclusivo de um sinal de referência, que age sobre um processo. Este sistema pode ter a presença de distúrbios, que por meio de uma junção de adição, afetarão a variável controlada, como representado na figura 6.

**FIGURA 6 - Sistema de malha aberta**

**Fonte: Elaborada pelos autores**

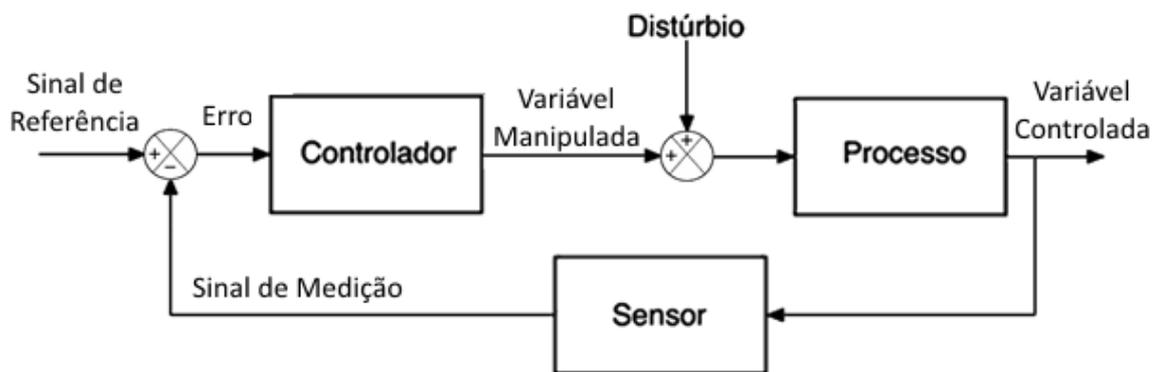
Os sistemas de malha aberta se distinguem pelo fato de não possuírem uma ação compensadora para a compensação de um distúrbio, isto é, caso um distúrbio ocorra após o controle, a variável controlada será diretamente afetada. (NISE, 2002).



### 2.2.2 Sistemas de malha fechada

O sistema de malha fechada tem a capacidade de corrigir a sensibilidade a distúrbios. Pela medição da variável controlada por meio de um sensor, é feita uma comparação utilizando uma junção de adição dos sinais de entrada e da saída do sensor, como mostrado na figura 7. Caso apresente uma diferença, também conhecido como sinal de erro, o controlador age sobre o processo. (GOLNARAGHI; KUO, 2010).

**FIGURA 7 - Sistema de malha fechada**



Fonte: Elaborada pelos autores

### 2.2.3 Sistemas controlados por computador

O computador vem sendo utilizado como o controlador em sistemas modernos. Sua capacidade de realizar diversas tarefas de forma simultânea acentua sua vantagem de monitoramento, além de ser possível o agendamento de processos periódicos a serem feitos caso necessário. Também é de extrema facilidade a mudança dos parâmetros do próprio controlador através de software. (NISE, 2002).

### 2.2.4 Controladores PID

Os controladores PID (proporcional-integral-derivativo) são os algoritmos mais utilizados no sistema de controle industrial.

De acordo com Golnaraghi (2010), em um controlador proporcional a variável manipulada na saída é simplesmente o sinal de referência amplificado por um ganho de constante K. O controlador PD é essencialmente um controle antecipatório, em que a parte



derivativa mede a ascensão instantânea da curva de resposta, prevê o overshoot e realiza a devida correção antes que ele realmente ocorra. Este controlador têm como características:

- Melhorar o amortecimento e reduzir o overshoot máximo;
- Reduzir o tempo de ascensão e acomodação;
- Possivelmente acentua o erro em frequências altas;

Em um controlador PI, a parte I é proporcional à integral do erro em função do tempo. Este controlador têm como características:

- Ser capaz de zerar o erro em regime permanente em sistemas não integradores;
- Aumentar o tempo de ascensão;
- Filtrar ruído de alta frequência;

O controlador PID combina as partes P, I e D para aproveitar as vantagens que cada uma pode oferecer.

É importante observar que as vantagens de cada tipo de controlador só podem ser obtidas se eles estiverem bem sintonizados, podendo-se também minimizar as suas desvantagens.

### 2.3 Microcontroladores

Os microcontroladores são muito utilizados como controladores de sistemas automatizados e para aquisição de dados. Eles também são conhecidos como microcomputadores devido à sua semelhança ao computador, pois em sua construção eles possuem unidade de processamento, memórias RAM (Memória de acesso randômico) e ROM (memória apenas de leitura), além de interface com entradas e saídas, nas quais ocorre o processamento de dados. (CADY, 2010).

A unidade de processamento faz todo o controle das atividades microcontroladas e contém registros, uma unidade aritmética e uma unidade lógica. A memória é dividida em duas partes: a memória ROM (memória apenas de leitura) que funciona para armazenamento de programas e valores de constante e a memória RAM (memória de acesso randômico) para armazenamento dos valores de variáveis. (CADY, 2010).

Serão estudados os microcontroladores ATmega328 presente na plataforma Arduino Uno, PIC18F4550 presente na plataforma E-PX-Mini e o HC08.

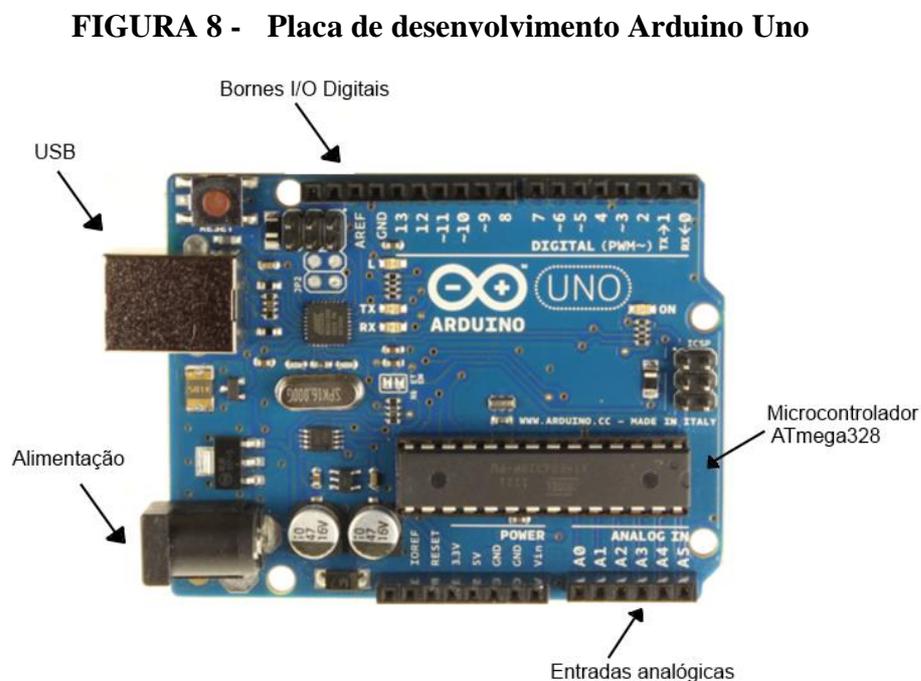


### 2.3.1 Arduino

Segundo Al-Busaidi (2012), a placa de desenvolvimento Arduino é amplamente utilizada por estudantes por ser economicamente viável, de ampla aplicação e de fácil programação. Ela é baseada em linguagem C/C++ e contém funções de comunicação serial, de conversão A/D, comunicação I2C, entre outras em sua biblioteca.

O Arduino Uno, ilustrado na figura 8, é uma placa de desenvolvimento baseada no microcontrolador ATmega328. Este microcontrolador oferece 14 entradas/saídas digitais, 6 entradas analógicas, tem um cristal gerador de clock de 16 Mhz, sua memória ROM para gravação de programas é de 32KB e possui um conversor A/D de 10 bits. Um dos diferenciais da placa de desenvolvimento Arduino Uno é a presença do chip ATmega16U2, que é programado para uma conversão USB para serial, para maior facilidade de comunicação serial. (ATMEL, 2009).

A plataforma para programação criada pela Arduino oferece suporte para Windows, Linux e Mac. Por meio de um bootloader pré-gravado no microcontrolador ATmega328, o usuário pode efetuar o upload de um novo código sem a utilização de um programador de hardware externo. (ARDUINO, 2014).



Fonte: ARDUINO, 2014

### 2.3.2 E-PX-Mini

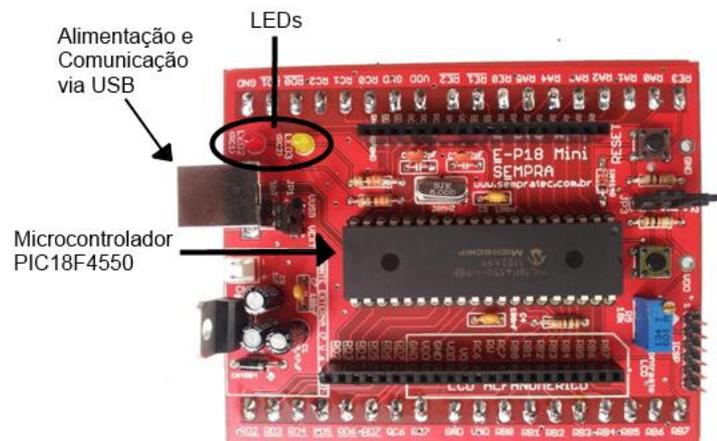
A SEMPRA produz kits de desenvolvimento utilizando o microcontrolador PIC18F4550, sendo um exemplo o E-PX Mini representado na figura 9. Ele é voltado para utilização didática para estudantes, professores e interessados na implementação de projetos microcontrolados. (SEMPRA, 2014).

O microcontrolador PIC18F4550 pode-se comunicar por diversos protocolos, sejam eles por SPI, I2C, PWM, entre outras. Com isto é possível se conectar diversos periféricos, como USB, LCD e Ethernet. Sendo assim, o PIC oferece um amplo ramo de aplicações devido à sua flexibilidade.

O PIC18F4550 funciona com frequência máxima de 48 MHz e oferece encapsulamentos de 40 ou 44 pinos e conversores A/D de 10 bits. (MICROCHIP, 2006).

A Microchip oferece uma plataforma gratuita para a programação e compilação de códigos em linguagem C, chamada de MPLAB Tool Suite. Nela se tem disponível uma extensa biblioteca de funções para facilitar a programação e também oferece a opção de gravação no microcontrolador. (MICROCHIP, 2013).

**FIGURA 9 - Placa de desenvolvimento E-PX Mini**



Fonte: SEMPRA, 2014

### 2.3.3 HC08, S08 e RS08

Os atuais microcontroladores de 8 bits produzidos pela Freescale são divididos em três grupos: o S08, o RS08 e o HC 08.



O S08 é um grupo de microcontroladores de alta performance e baixa tensão, que pode variar de 1,8V até 5,5V dependendo do modelo. Seu núcleo consegue operar com uma frequência máxima de até 48 MHz nos modelos de maior desempenho. Os encapsulamentos oferecem de 8 até 100 pinos. Alguns modelos oferecem conversor A/D de 8 até 16 bits.

O RS08 é um grupo de microcontroladores com núcleos reduzidos da versão S08. Sua tensão varia de 1,8V até 5,5V, assim como nos modelos S08. Seu núcleo opera com máxima frequência de 20 MHz. Alguns modelos oferecem conversor A/D 10 bits.

O HC08 é o grupo que apresenta microcontroladores de baixo custo. Dependendo do modelo sua tensão varia de 2,7V até 5,5V. São oferecidos encapsulamentos de 8 até 64 pinos. Seu núcleo pode operar com máxima frequência de 32 Mhz, dependendo do modelo. Alguns modelos oferecem conversor A/D, podendo ser de 8 ou 10 bits.

Para a programação de códigos para os microcontroladores de 8 bits, a Freescale sugere o uso do CodeWarrior Development Studio que oferece ferramentas para desenvolvimento com maior facilidade e rapidez. O programa também disponibiliza a opção de simulação total do chip e gravação do código programado para o microcontrolador. (FREESCALE, 2014).

## 2.5 Semicondutores de potência e acionamento

O primeiro tiristor foi desenvolvido no final de 1957 e se chamava retificador controlado de silício (SCR). Desde então houve grandes avanços nos dispositivos semicondutores de potência. Até 1970 os tiristores convencionais eram usados exclusivamente para o controle de potência em aplicações industriais. Desde 1970, vários tipos de dispositivos semicondutores de potência foram desenvolvidos e tornaram-se comercialmente disponíveis. Estes em geral podem ser divididos em cinco tipos: diodos de potência, tiristores, transistores de junção bipolares (BJTs), MOSFETs de potência e transistores bipolares de porta isolada (IGBTs). (RASHID, 1999).

### 2.5.1 MOSFET's

Um MOSFET de potência é um dispositivo controlado por tensão e requer apenas uma pequena corrente de entrada. A velocidade de chaveamento é muito alta e os tempos de chaveamento são da ordem de nanosegundos. Eles estão encontrando aplicações crescentes em conversores de alta frequência e baixa potência. Os MOSFETs não possuem o problema



do fenômeno de ruptura secundária como os BJTs. Entretanto, os MOSFETs têm os problemas de descarga eletrostática e necessitam de cuidados especiais no manuseio. Além disso, é relativamente difícil protegê-los sob condições de falta em curto-circuito.

## 2.6 Efeito Joule

De acordo com Nilsson (2009), cada material possui uma resistência que é a sua capacidade de impedir o fluxo de corrente ou, mais especificamente, o fluxo de carga elétrica. Para modelar esse comportamento em um circuito, o elemento utilizado é o resistor.

Para entender este fenômeno de resistência, basta imaginar os elétrons que compõem a corrente elétrica interagindo com a estrutura atômica do material no qual estão se movimentando, a qual, por sua vez, resiste a eles. A partir dessas interações, uma parte da energia elétrica é convertida em energia térmica e dissipada sob a forma de calor, caracterizando o efeito Joule. Em algumas aplicações esta perda pode ser considerada ruim, já outros dispositivos são projetados levando isto em mente, como: torradeiras, ferros de passar roupa e ferros de solda (que será utilizado neste trabalho).

O calor gerado é expresso pela equação:

$$P = R \cdot I^2 \quad (3)$$

Sendo:

- P – potência dissipada em Watts (W);
- R – resistência elétrica em Ohms (V);
- I – a corrente elétrica que percorre a resistência (A).

## 2.6 Transferência de calor

Segundo Incropera e outros (2008), “a transferência de calor é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço”. Quando se tem uma diferença de temperatura em um sistema ou meio, a temperatura tende a se equilibrar por meio da transferência de calor.

Componentes eletrônicos dependem da passagem de corrente elétrica para realização de alguma tarefa. Por efeito Joule ocorre um aumento de temperatura no mesmo que pode



resultar em erros de leitura ou mesmo falha. Com isto é necessária a presença de um sistema para a retirada deste calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2010).

### 2.6.1 Condução

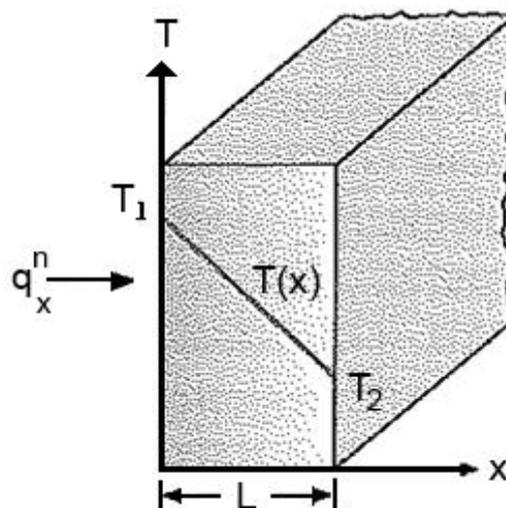
Segundo Incropera e outros (2008), “a condução pode ser vista como transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas”.

O processo de transferência de calor pode ser quantificado por meio da Lei de Fourier, que é utilizada para o cálculo da quantidade de energia que está sendo transferida por unidade de tempo. No caso da condução térmica, para uma parede plana unidimensional, como mostrado pela figura 10, com uma distribuição de temperaturas  $T(x)$ , a equação é dada por:

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

A equação 4 representa o fluxo térmico  $q''$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) proporcional ao gradiente de temperatura  $dT/dx$ , por meio do parâmetro de condutividade térmica  $k$  ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) que é uma característica do material. O sinal de menos é necessário, pois o calor é transferido no sentido em que a temperatura diminui.

**FIGURA 10 - Transferência de calor unidimensional por condução**



Fonte: INCROPERA, et al, 2008

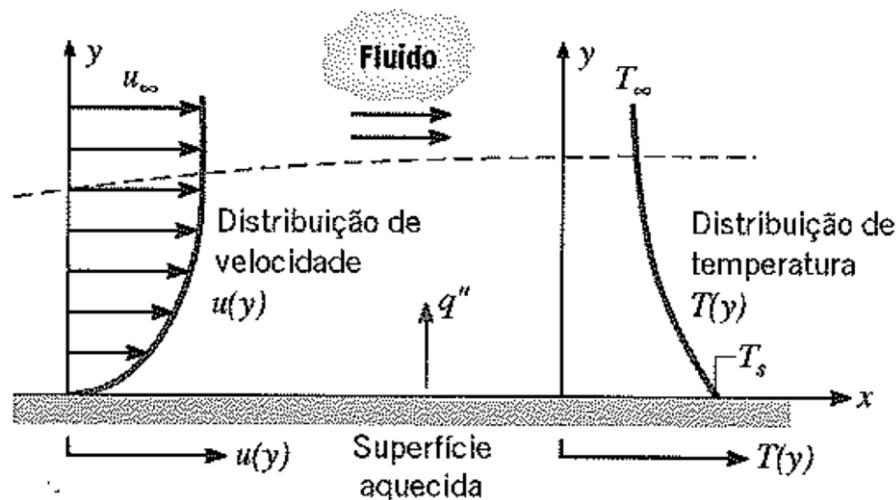


### 2.6.2 Convecção

Segundo Incropera e outros (2008), “o modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além de transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico do fluido”.

Considerando o escoamento de um fluido sobre uma superfície aquecida, como mostrado pela figura 11, a interação entre o fluido e a superfície gera uma região onde a velocidade do fluido em contato com a superfície ( $y=0$ ) é nula, conforme se encontra a uma certa altura  $y$ , terá uma velocidade finita  $u_\infty$ . Esta região é conhecida como camada limite de velocidade.

**FIGURA 11 - Transferência de calor por convecção entre um fluido e uma superfície**



Fonte: INCROPERA, et al, 2008

O cálculo do fluxo térmico de uma transferência de calor por convecção é dada pela equação 5.

$$q^n = h_{conv}(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

Onde a equação 5 representa o fluxo de calor por convecção  $q^n$  ( $W/m^2$ ) que é diretamente proporcional à diferença de temperatura da superfície ( $T_s$ ) e do fluido ( $T_\infty$ ). Esta

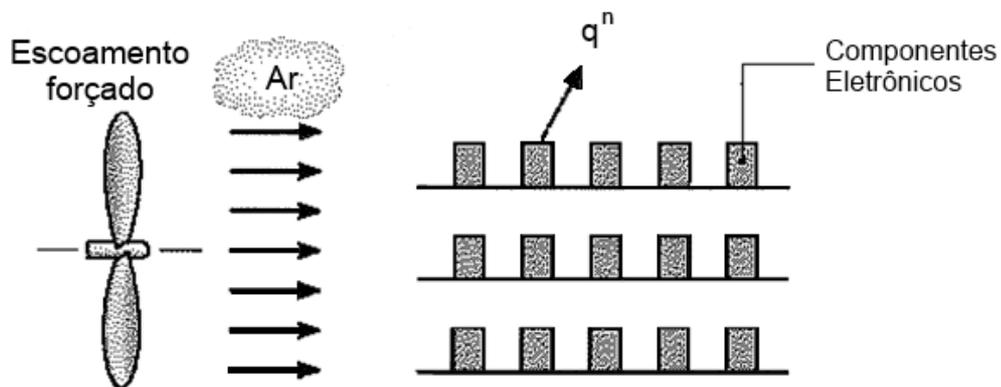


equação é conhecida como lei do resfriamento de Newton, e  $h_{conv}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção dado em  $W/(m^2.K)$ .

### 2.6.2.1 Convecção forçada

Segundo Incropera e outros (2008), a transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. É referido à convecção forçada quando o escoamento é causado por meios externos, tais como um ventilador. O ventilador pode gerar um resfriamento com ar, por convecção forçada, para que se tenha uma melhor transferência de calor de componentes eletrônicos, como mostrado na figura 12.

FIGURA 12 - Resfriamento de componentes eletrônicos por convecção forçada



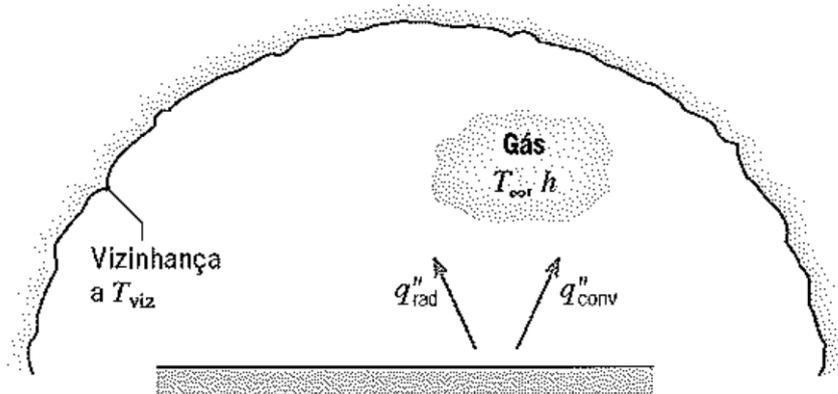
Fonte: INCROPERA, et al, 2008

### 2.6.3 Radiação

Segundo Incropera e outros (2008), a “radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula... a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria”.



FIGURA 13 - Transferência de calor por radiação entre uma superfície e uma vizinhança



Fonte: INCROPERA, et al, 2008

Como mostrado na figura 13, a transferência de calor por radiação tem origem na energia térmica da superfície da matéria e sua taxa líquida de transferência de calor por radiação, expressada por unidade de área é:

$$q^n = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (6)$$

A equação 6 representa o fluxo de calor por radiação  $q^n$  ( $W/m^2$ ). Ele é diretamente proporcional à diferença de temperatura da superfície ( $T_s$ ) e da vizinhança ( $T_{viz}$ ). A emissividade é dada por ( $\varepsilon$ ) e a constante de Stefan-Boltzmann é ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ ).

## 2.7 Isolamento térmico

Segundo Çengel e Ghajar (2010), o isolamento térmico de um material consiste em sua resistência à condução de calor, em outras palavras, quanto menor for o seu coeficiente de condução térmica, mais isolante o material será.

Na tabela 1 é mostra a condutividade térmica de alguns materiais. Estes dados foram obtidos segundo Çengel e Ghajar (2010).

TABELA 1 - Condutividade térmica de materiais isolantes

Material	Condutividade Térmica k (W/m.K) para 24 °C
Fibra de Vidro	0,038 - 0,039
Poliestireno expandido (Isopor)	0,040
Poliuretano	0,023

Fonte: Elaborada pelos autores



## 2.9 MATLAB

Segundo Chapman (2006), “MATLAB é um programa de computador de uso específico, otimizado para executar cálculos científicos e de engenharia”. Ele implementa a linguagem MATLAB, uma linguagem de alto nível em um ambiente gráfico interativo, no qual se podem realizar cálculos numéricos computacionais, visualização e programação. Sua ampla biblioteca de funções predefinidas torna a programação muito mais fácil e eficiente.

O MATLAB tem uma aplicação extremamente ampla, alguns exemplos são: processo de sinais digitais, comunicação entre dispositivos, controle de sistemas, testes, entre outros. (MATHWORKS, 2014).

Com a popularidade e vasta presença nas universidades de todo o mundo, este software é uma boa escolha para projetos desenvolvidos por alunos destas instituições. E pela linguagem simples, facilmente pode-se entender o código, alterar ou até mesmo melhorar. (AL-BUSAIDID, 2012).

Segundo Ubaidullah (2011), o MATLAB possui como características: interface amigável para o programador, tanto para alterar o código, quanto para ver o resultado; ferramentas interativas para processos iterativos; biblioteca de funções; possibilidade de integração com softwares externos.

## 2.10 LabVIEW

Segundo a National Instruments (2014), “o LabVIEW é uma plataforma de programação gráfica que ajuda os engenheiros do projeto ao teste de sistemas de pequeno e grande porte”.

O software é versátil para aplicação de técnicas de controle. Alguns exemplos são:

- Aquisição de dados e processamento de sinais;
- Controle de instrumentos;
- Automatização de sistemas de teste e validação;
- Sistemas embarcados de monitoramento e controle.

Além de o LabVIEW ser uma boa ferramenta de aquisição de dados, ele é baseado em uma linguagem gráfica bastante intuitiva. Com ele pode-se analisar os dados obtidos, fazer cálculos e realizar os ajustes necessários. (MALLIK; GUPTA, 2009).



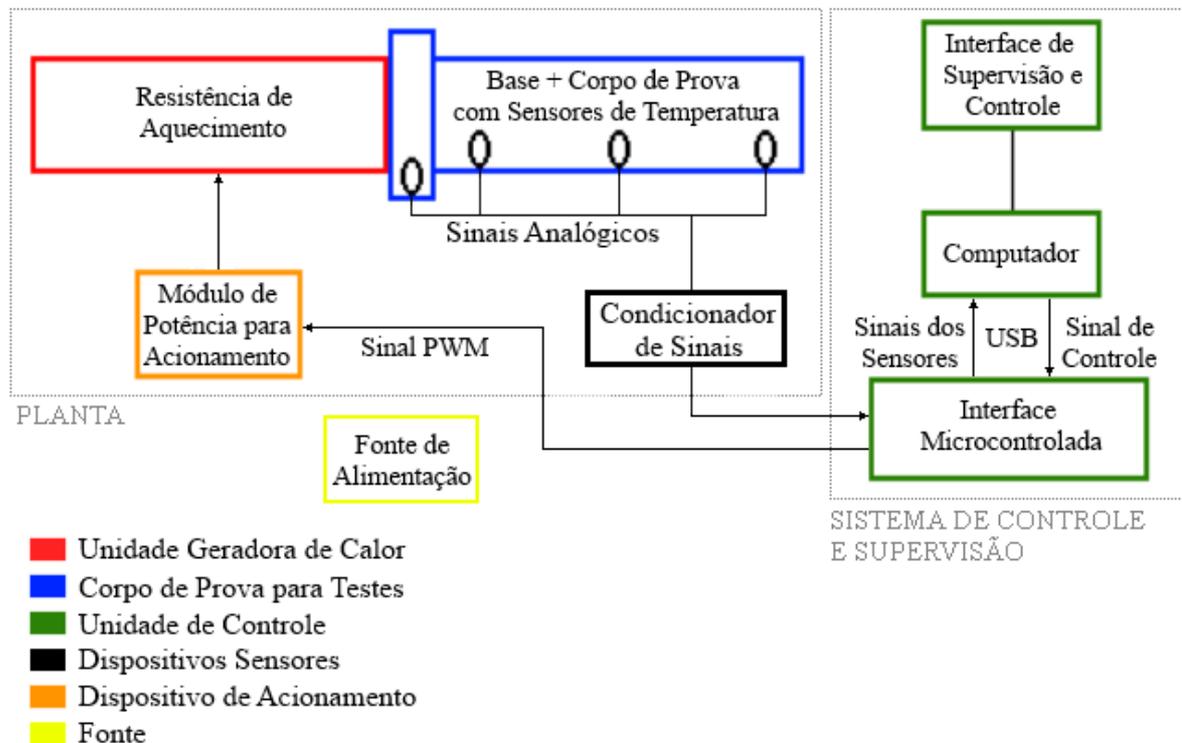
### 3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve as unidades construtivas que compõem a Plataforma Didática desenvolvida e o seu princípio de funcionamento.

#### 3.1 Descrição Detalhada da Plataforma Didática

A plataforma didática é composta por uma unidade geradora de calor, um dispositivo de acionamento elétrico, sensores de temperatura, interfaceamento USB entre o computador e o processo e uma fonte de alimentação, como mostrado na figura 14.

**FIGURA 14 - Diagrama de blocos da plataforma didática**

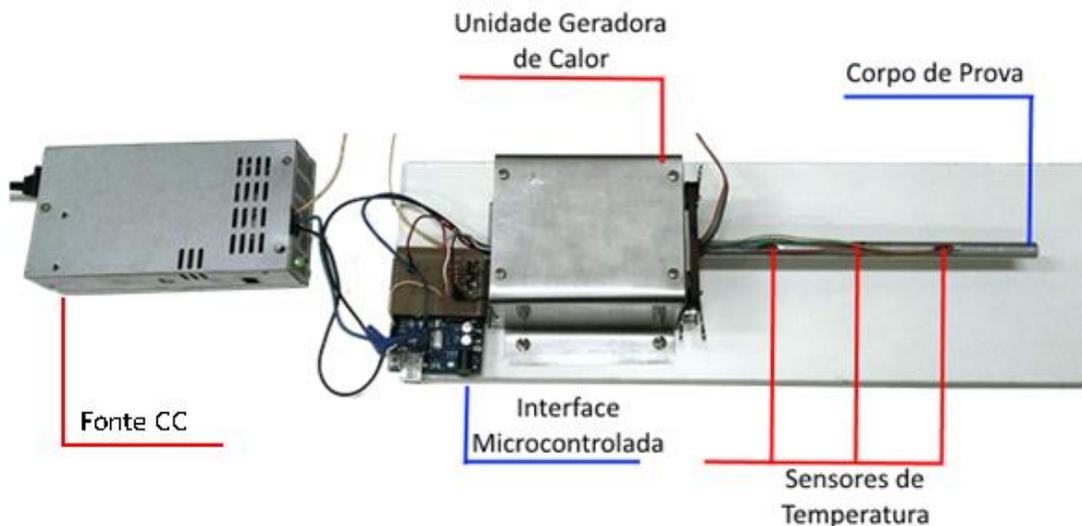


**Fonte: Elaborada pelos autores**

A estrutura física da plataforma didática exibida na figurá 15 compreende uma caixa com o dispositivo de acionamento e com a unidade geradora de calor isolada termicamente e acoplada ao interior da caixa. Nesta caixa é acoplada uma base metálica para servir como superfície com temperatura controlada. O corpo de prova é acoplado à superfície da base para a realização de experimentos e práticas de transferência de calor. No corpo de prova foram dispostos sensores de temperatura que monitoram a temperatura local do material ao longo do

tempo. Os sinais dos sensores de temperatura foram condicionados e interligados à interface microcontrolada que dispõe de conversores internos analógicos/digitais (A/D) de 10 bits de resolução. As aquisições dos sinais de temperatura são realizadas periodicamente através de uma taxa de amostragem ajustável via software de controle.

**FIGURA 15 - Detalhamento da plataforma construída**



**Fonte: Elaborada pelos autores**

A atuação no sistema é realizada em malha fechada. O sistema estabelece uma medida de erro entre o valor de referência e a temperatura medida, sendo assim um sistema realimentado. A comparação do sinal realimentado e o sinal de referência gera um sinal de erro que é introduzido em um sistema de controle. Este último possui a função de corrigir o comportamento do sistema, minimizando o erro ao longo do tempo, ou seja, garantindo que o sistema atinja o valor desejado de temperatura controlada. A atuação em malha fechada é realizada por um controlador digital implementado na interface de supervisão e controle que gerencia a interface microcontrolada. A realimentação deste controlador é realizada por um dos sensores de temperatura localizados na planta, podendo o usuário escolher qual dos sensores ele usará como referência. O controle da variável manipulada será realizado através da interface microcontrolada via módulo de potência de acionamento.

O dispositivo de acionamento atua na unidade geradora de calor.

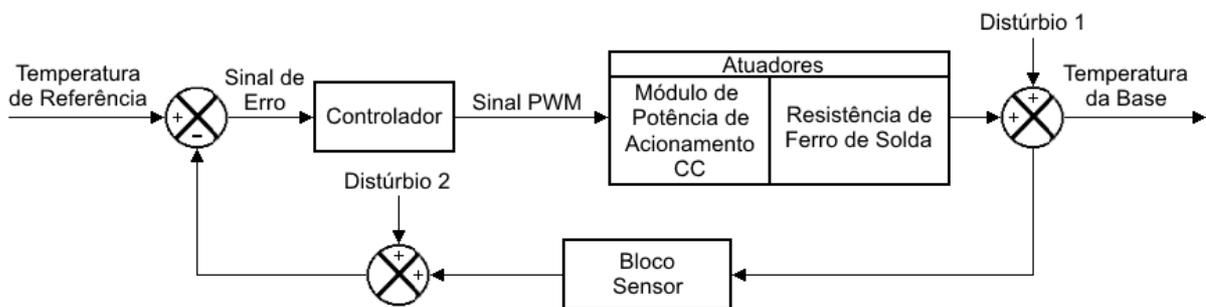
Para a alimentação dos dispositivos que compõem a plataforma didática, foi adotada uma fonte de alimentação contínua. Esta escolha foi tomada para que a variação da tensão aplicada à resistência elétrica seja linear e diretamente proporcional ao comando de

acionamento efetuado pelo sinal PWM. No caso de uma alimentação com corrente alternada seria necessária uma correção do sinal controle para linearizar o atuador. A razão para isto é que não existe uma relação linear entre o ângulo de disparo de um semicondutor de potência e a tensão eficaz na carga, o que dificultaria a implementação do algoritmo de controle.

### 3.2 Fundamentação Teórica Aplicada

Nesta seção serão introduzidos os conceitos utilizados neste trabalho de forma aplicada. As definições destes conceitos ajudarão no entendimento deste trabalho. A figura 16 ilustra o diagrama de blocos do controle de temperatura, um dos processos da Plataforma Didática.

**FIGURA 16 - Diagrama em malha fechada do controle de temperatura**



**Fonte: Elaborada pelos autores**

Processo: Segundo Ogata (1993), “Processo é definido como sendo uma operação artificial ou voluntária, que evolui progressivamente e que consiste em uma série de ações controladas ou movimentos sistematicamente dirigidos objetivando um resultado ou finalidade particular”. Na plataforma didática o processo é o aquecimento da base e do corpo de prova pela resistência de ferro de solda.

Planta: “Uma planta é uma parte do equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos, cuja finalidade é desempenhar uma dada operação” (OGATA, 1993). A planta é o conjunto formado pela resistência de ferro de solda, a base, o corpo de prova e o dispositivo de acionamento.

Sistema: “Um sistema é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam certo objetivo” (OGATA, 1993). A plataforma didática, como um todo, representa o sistema.

Variável manipulada: Segundo DiStefano (1972), a variável manipulada é a quantidade ou condição que os elementos de controle aplicam à planta. Ela é proveniente do controlador e tem a função de controlar o módulo de potência CC, que por sua vez atua no módulo de aquecimento.

Variável controlada: “A variável controlada é a grandeza ou condição que é medida e controlada” (OGATA, 1993). A variável controlada na plataforma didática é a temperatura. Por dispor de sensores de temperatura em diferentes pontos de medição, se tem uma flexibilidade de qual ponto se deseja controlar.

Distúrbios: “Uma perturbação é um sinal que tende a afetar adversamente o valor da saída do sistema. O distúrbio é uma perturbação externa gerada fora do sistema e constitui uma entrada.” (OGATA, 1993). Na figura 19 foram apresentados dois tipos de distúrbios que podem afetar o sistema. O distúrbio 1 pode ser a causado pela variação de temperatura no ambiente. O distúrbio 2 pode ser um ruído eletromagnético afetando a medição da temperatura, por se tratar de um sinal de baixa amplitude.

Estabilidade: “A estabilidade de um sistema é determinada pela sua resposta às entradas ou perturbações. Intuitivamente, um sistema estável é aquele que permanecerá em repouso a não ser quando excitado por fonte externa e retornará ao repouso se todas as excitações forem removidas.” (DISTEFANO, 1972). Para a plataforma didática, a estabilidade está ligada à capacidade de se manter com um determinado comportamento mesmo que ocorram perturbações e distúrbios.

### 3.3 Desenvolvimento das partes construtivas

No desenvolvimento das partes construtivas será detalhada cada unidade que compõe a plataforma didática. Nesse capítulo serão utilizados conceitos e dados previamente mostrados no capítulo 2 deste trabalho.

O projeto tem como características de funcionamento uma faixa de atuação da temperatura de controle de 35°C a 100°C, sendo que a medida deve oferecer uma precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Em termos de construção física a plataforma deve ter um tamanho de no máximo 450x150x150mm (LxCxA) de forma que seja de fácil seu transporte. A lista dos materiais utilizados para construção pode ser encontrada no Apêndice C.



### 3.3.1 Projeto eletrônico

O projeto eletrônico está relacionado ao desenvolvimento da placa de circuito impresso que acomoda o condicionamento de sinais dos sensores e do módulo de potência para acionamento.

Este projeto prevê ainda o intercambiamento dos sensores de temperatura para que o usuário possa escolher o ponto que se deseja utilizar como base para o controle da temperatura. Para que essas conexões sejam possíveis, a placa é dotada de conectores padrões com o objetivo de facilitar a troca de posição dos sensores e reposição de peças avariadas.

O circuito de condicionamento de sinais dos sensores é composto de um divisor de tensão utilizando um resistor de 10 k $\Omega$ .

O módulo de potência de acionamento de corrente contínua (CC) controla a potência da resistência que atuará no sistema térmico. O dispositivo utilizado é um MOSFET que tem seu acionamento controlado por um opto acoplador.

#### 3.3.1.1 Condicionamento de sinais dos sensores

Para estar de acordo com as necessidades do projeto, os sensores de temperatura deveriam atender alguns requisitos mínimos. Eles deveriam ter precisão mínima de 1°C. Ter baixo custo para não acarretar grandes gastos se houver necessidade de reposição. E disponibilidade no mercado para facilitar a aquisição de um novo sensor quando for necessária sua compra.

Foram estudados alguns modelos de sensores comerciais e compararam-se as suas características. Pela necessidade de utilização de vários sensores no projeto, o menor custo e a menor inércia térmica do termistor comparado ao LM35 tornaram-no mais viável.

Pelo fato do termistor ter uma grande variação em seu sinal  $\sim 200\Omega/^\circ\text{C}$ , o mesmo não necessita de um driver amplificador de sinal, tornando-o mais fácil de implementar quando comparado aos termopares.

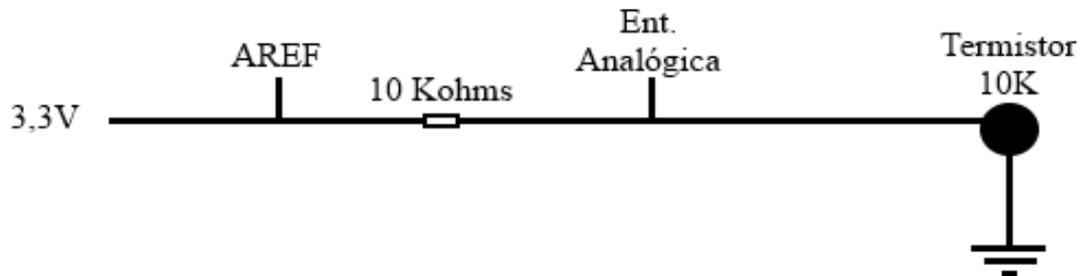
Pela comparação feita, os sensores de temperatura utilizados na Plataforma Didática são do tipo termistor. Este componente é composto por um resistor que é sensível à temperatura, podendo-se obter a temperatura de acordo com o valor de sua resistência.

Para condicionar os sinais dos sensores de temperatura foi necessária a utilização de um divisor de tensão. Com isso, a temperatura é obtida através da medição da tensão sobre o



resistor, adequando o sinal que é recebido pela entrada analógica do microcontrolador. O circuito do condicionamento é mostrado na figura 17.

**FIGURA 17 - Circuito condicionador do sensor**



**Fonte: Elaborada pelos autores**

### **3.3.1.2 Interface microcontrolada**

O Arduino Uno é o responsável pelo interfaceamento da Plataforma Didática, tanto com o computador quanto com os módulos de condicionamento de sinais e de potência CC. O microcontrolador exerce uma função muito importante no projeto, pois através dele é feita a comunicação entre a interface de supervisão e controle e a plataforma didática.

Para escolha da plataforma microcontrolada que serve como interface para a aquisição e envio de dados, pensou-se nas necessidades que o hardware deveria possuir: ao menos 5 entradas analógicas, para a utilização de vários C; 1 saída PWM para o comando de controle; comunicação via USB.

Os modelos estudados foram as plataformas: PIC, HC08 e Arduino. Tanto a plataforma PIC quanto a Arduino atendem todos os requisitos do projeto, porém o Arduino apresenta uma curva de aprendizagem de menor tempo em relação às outras, justificando a sua escolha. Outra grande vantagem é que a plataforma Arduino possui uma biblioteca própria para utilização no MATLAB, tornando a comunicação microcontrolador-MATLAB simples.

O HC08 não possui um modelo de plataforma didática no Brasil, sendo necessário importa-la. Sem esta plataforma é preciso criar um circuito para que seja feita a implementação da comunicação USB, que seria adicionada externamente.

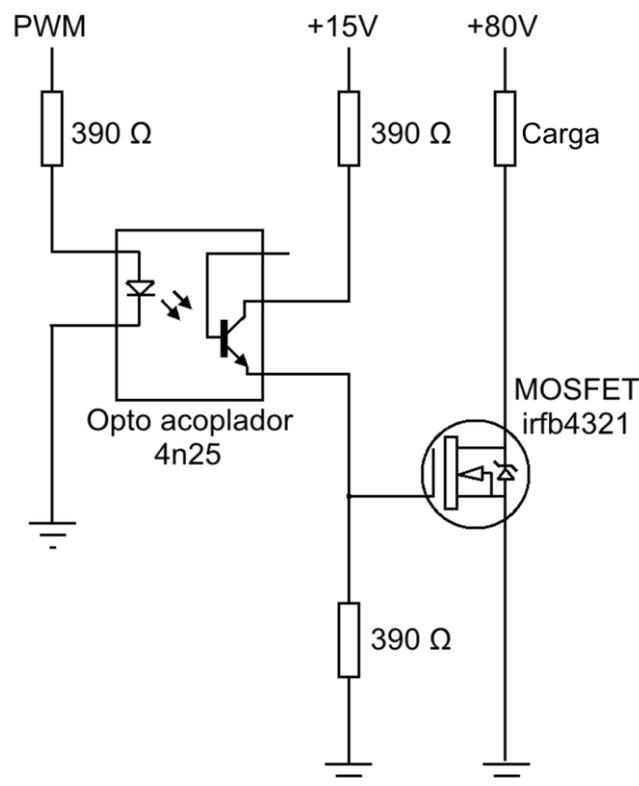


### 3.3.1.3 Módulo de potência CC

Para o acionamento da resistência do ferro de solda foi utilizado um circuito driver de potência implementado conforme o circuito na figura 18. Este driver de potência é composto basicamente de um opto acoplador e de um MOSFET, onde o opto acoplador modelo 4n25 tem a função de promover o isolamento elétrico entre o microcontrolador e a etapa de potência, protegendo-o de correntes e tensões elevadas. O MOSFET modelo irfb4321 foi utilizado para evitar a queda de tensão Vce no transistor. Nesse quesito o MOSFET é melhor que o transistor bipolar, já que quando em condução apresenta resistência elétrica de milésimos de Ohms.

Para o acionamento do módulo de potência em corrente contínua foi utilizada uma técnica de modulação de potência por largura de pulso (PWM), onde a tensão média aplicada à resistência de aquecimento é controlada diretamente proporcional ao sinal PWM. O sinal PWM gerado pelo Arduino possui um período aproximado de 2,0ms como exibido na figura 19.

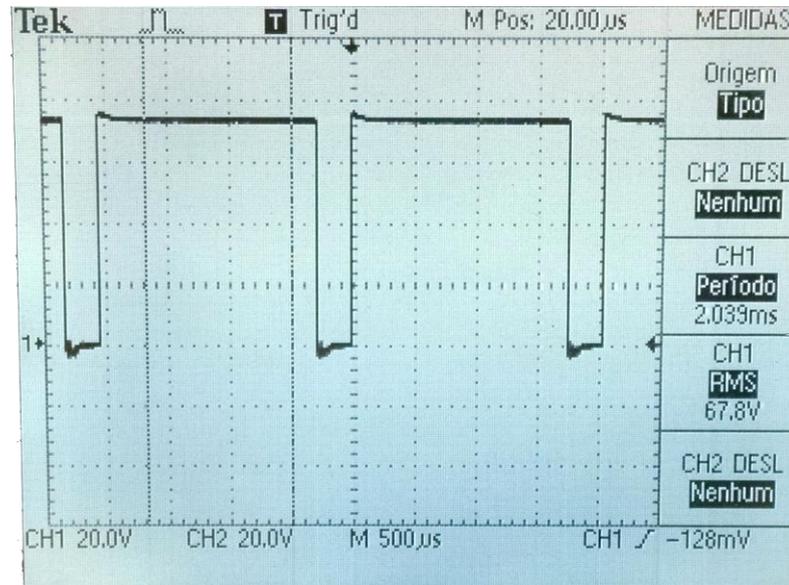
**FIGURA 18 - Circuito do módulo de potência**



**Fonte: Elaborada pelos autores**



FIGURA 19 - Sinal PWM



Fonte: Elaborada pelos autores

### 3.3.2 Projeto eletromecânico

O projeto eletromecânico está relacionado à parte construtiva das unidades que compõem a plataforma didática.

A estrutura da plataforma deve ser robusta para ter uma longa vida útil. Deve ser leve e compacta para facilitar seu transporte e para se guardar em pequenos armários. Também é visado o baixo custo, podendo-se facilmente repor alguma peça caso haja avaria. Um projeto com estas características facilita e incentiva seu uso, sendo possível levar a plataforma didática para experiências e estudos além dos laboratórios.

A plataforma construída tem uma dimensão de 450x150x100mm (LxCxA) e é dividida em três blocos. O primeiro bloco acomoda o projeto eletrônico e funciona como uma caixa, assim os circuitos não ficam expostos, oferecendo maior proteção para seu funcionamento e para seus usuários, podendo ser visto através da figura 20. O acesso ao projeto eletrônico é simples, sendo feito a partir da retirada de sua tampa. O segundo bloco é onde se acomoda a resistência do ferro de solda e o acoplamento da base e do corpo de prova. O terceiro bloco é a fonte de alimentação da plataforma, que é externa à planta de construção onde estão abrigados os outros dois blocos, facilitando assim a manutenção ou a troca da mesma.

FIGURA 20 - Parte interna da unidade de calor



Fonte: Elaborada pelos autores

### 3.3.3 Projeto do sistema de controle e supervisão

O projeto do sistema de controle e supervisão conta com programação de blocos pela toolbox Simulink do MATLAB. A linguagem de programação em blocos possibilita um desenvolvimento bem estruturado e de fácil entendimento para o usuário.

O sistema desenvolvido é projetado para realizar comunicação entre a interface microcontrolada e o computador via USB. No Simulink foi adicionada a biblioteca ArduinoIO para que essa comunicação possa ser estabelecida com o Arduino. O sistema desenvolvido têm as funções de:

- Receber os parâmetros de entradas do sistema, como setpoint de temperatura e valores do controlador;
- Interpretar os sinais dos sensores e armazená-los em uma variável que será salva em um arquivo do MATLAB;
- Efetuar periodicamente o cálculo de controle de acordo com o valor da temperatura;
- Gerar um gráfico temporal da temperatura de todos os sensores da plataforma em tempo real;



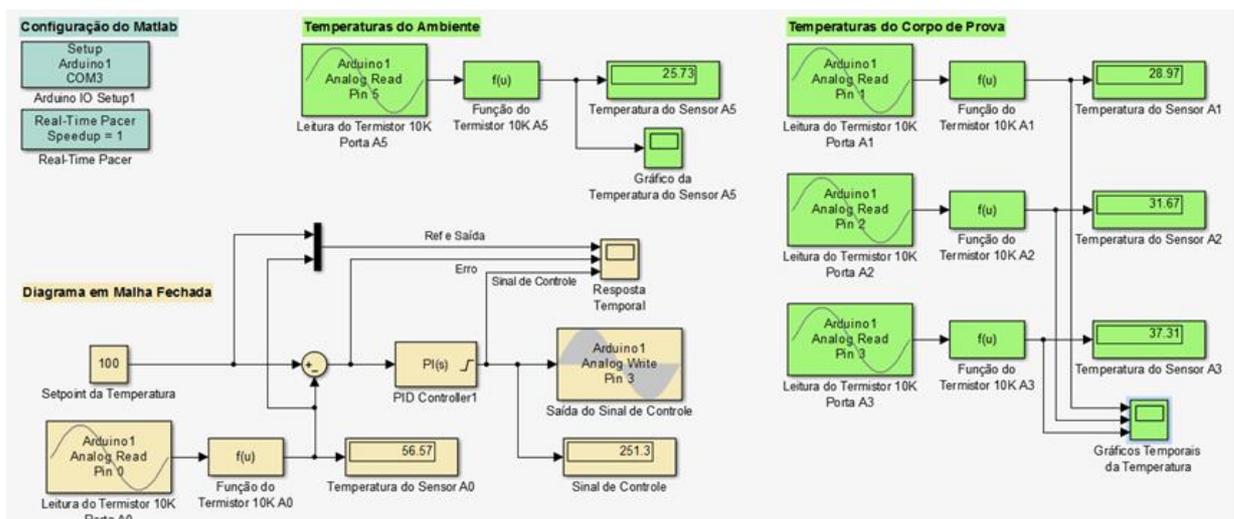
- Enviar o sinal de controle ao atuador através do Arduino.

A escolha foi tomada devido a estudos previamente realizados sobre ambientes de desenvolvimento. Partindo das necessidades de comunicação USB e interface gráfica, os softwares MATLAB e LabVIEW atenderiam aos requisitos do projeto.

Porém alguns outros pontos também foram considerados, justificando a escolha da utilização do MATLAB. Ele é um software mais presente no meio acadêmico, sendo que o segundo é mais utilizado para desenvolvimento de produtos comerciais. O MATLAB conta com uma grande quantidade de bibliotecas e toolbox disponíveis para uma variedade de aplicações. Além de sua curva de aprendizagem ser mais rápida em relação ao LabVIEW.

A figura 21 exibe uma tela geral do supervisor, em que as suas subdivisões serão explicadas posteriormente.

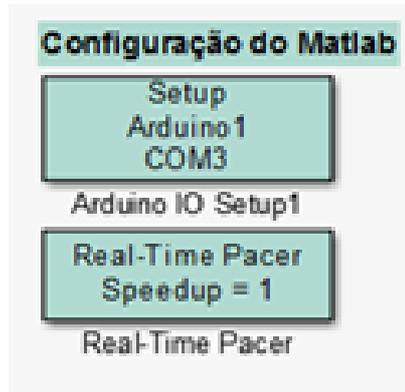
**FIGURA 21 - Programa supervisorio**



**Fonte: Elaborada pelos autores**

A figura 22 exibe a configuração da porta que o Arduino irá utilizar para se comunicar com o Matlab, nela é incorporada a biblioteca Arduino IO ao Simulink.

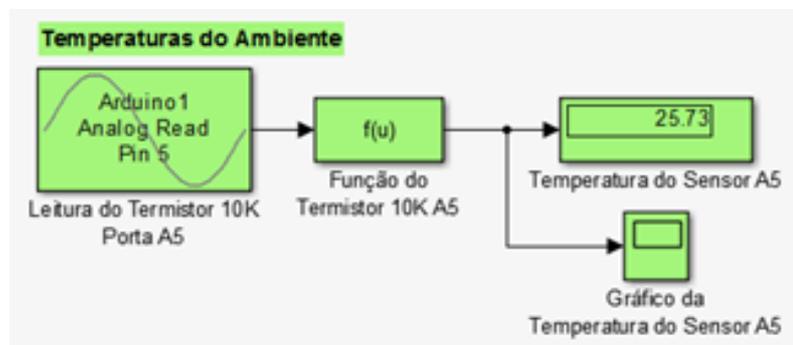
FIGURA 22 - Configuração da porta de comunicação



Fonte: Elaborada pelos autores

A figura 23 exibe a função de leitura do sensor de temperatura ambiente no sistema. Neste bloco é adquirido o sinal do termistor, existe uma função que fará o seu tratamento para poder interpretá-lo e o valor de temperatura pode ser visto tanto através do bloco de temperatura e em um gráfico.

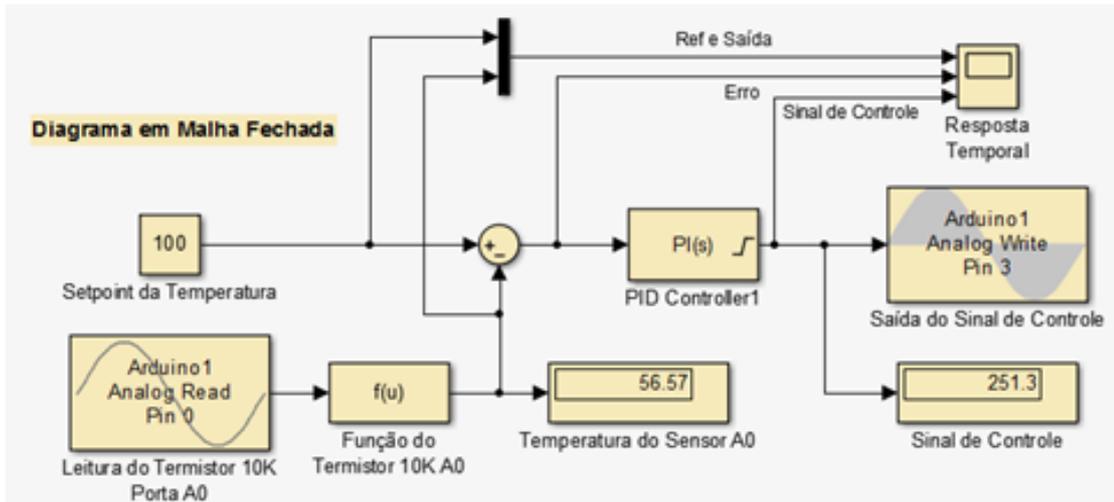
FIGURA 23 - Temperatura do ambiente



Fonte: Elaborada pelos autores

A figura 24 exibe o diagrama em malha fechada do sistema. O setpoint de temperatura é a entrada do sistema que será comparado com o valor lido pelo sensor para que se possa saber o erro entre os dois. O controlador irá calcular um sinal para diminuir este valor e é enviado ao Arduino. O sinal de controle pode ser visto no respectivo bloco e também é possível ver o gráfico da resposta temporal.

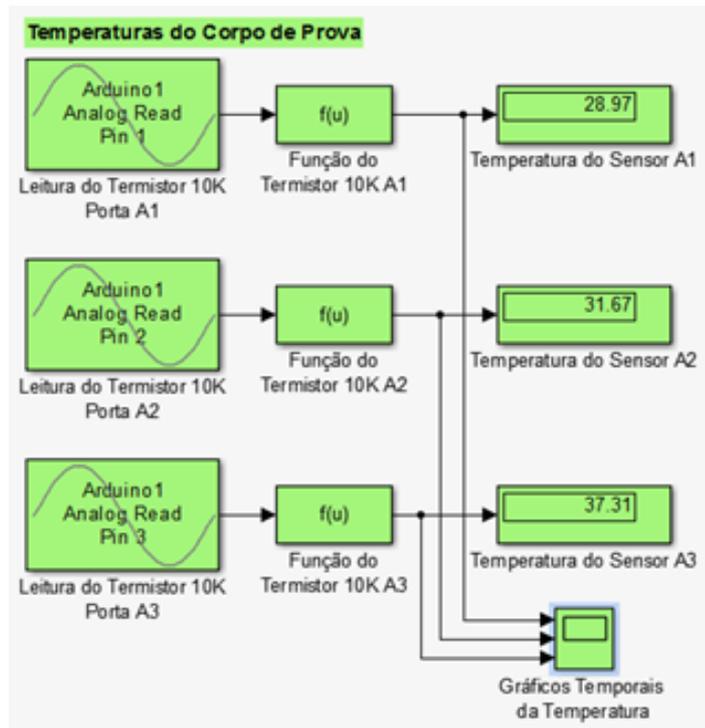
**FIGURA 24 - Diagrama em malha fechada**



**Fonte: Elaborada pelos autores**

A figura 25 exibe as temperatura ao longo do corpo de prova. Assim como na subdivisão da temperatura ambiente, neste bloco é adquirido o sinal dos termistores, existe uma função que fará os seus tratamentos para poder interpretá-los e os valores de temperatura podem ser vistos através dos blocos de temperatura e em um gráfico com todos os valores.

**FIGURA 25 - Temperatura do corpo de prova**



**Fonte: Elaborada pelos autores**

## 4 EXPERIMENTOS PRÁTICOS

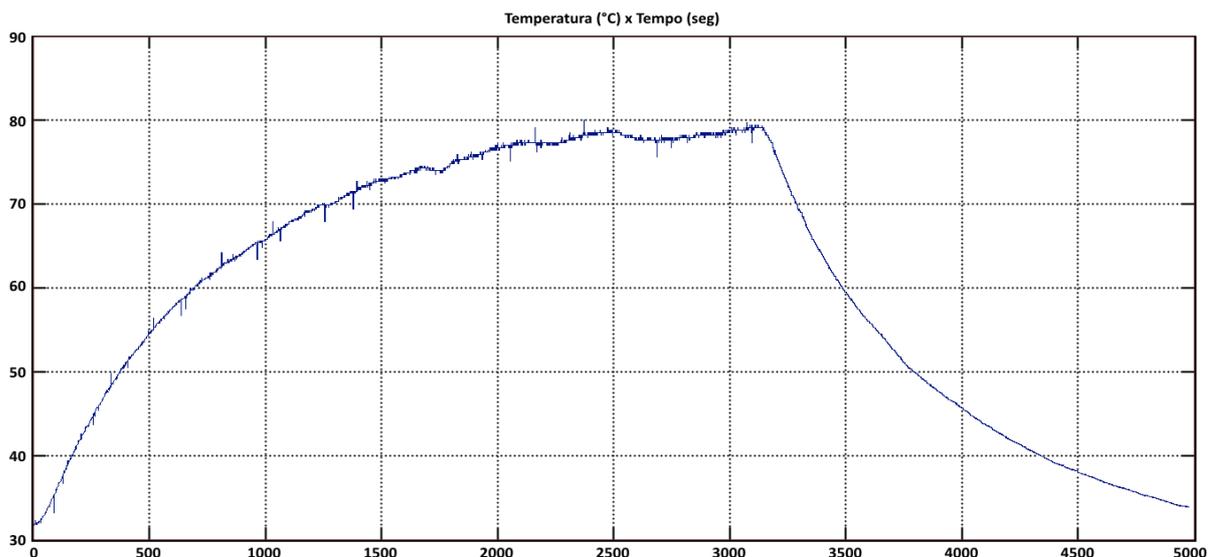
Serão apresentados neste capítulo os experimentos práticos realizados utilizando a plataforma didática. Estes experimentos foram feitos de forma a gerar dados que permitam identificar os modelos matemáticos da plataforma em diferentes modos de operação. Os modelos obtidos foram fundamentais na etapa subsequente que aborda o projeto do controlador dinâmico do sistema.

No desenvolvimento dos experimentos foi necessário o auxílio do sistema de supervisão desenvolvido pelo grupo para que a aquisição dos dados do sistema fosse realizada.

Quando foi realizado o teste, a condição inicial do ambiente era estável a 30°C e não possuía corpo de prova acoplado. A plataforma foi configurada para que a potência dissipada na resistência de aquecimento fosse de 13,6% da potência total de 50 W. Foi mantido este valor até que a temperatura da base se estabilizasse. Quando a temperatura chegou a um ponto estável, a resistência foi desligada, esperou-se que a temperatura ambiente fosse atingida e depois encerrou-se a aquisição de dados.

A partir dos dados obtidos e com o auxílio do MATLAB, observa-se o gráfico do comportamento do sistema ilustrado na figura 26.

**FIGURA 26 - Comportamento da temperatura da plataforma com degrau de 15V**



Fonte: Elaborada pelos autores



#### 4.1 Identificação de 1ª Ordem

Com a finalidade de se obter a função de transferência do sistema utilizou-se o método matemático de identificação em base de um sistema de primeira ordem.

$$F.T. = \frac{k}{\tau \cdot s + 1} \quad (7)$$

Pela massa de dados obtida no experimento do degrau unitário mostrado na figura 21, foi calculada a função de transferência partindo dos seguintes dados:

$$T_0 = 31,0^\circ\text{C} \text{ (Temperatura inicial)}$$

$$T_F = 79,5^\circ\text{C} \text{ (Temperatura final)}$$

$$t_a = 2540\text{s} \text{ (Tempo de acomodação ou estabilização)}$$

O degrau de 15V equivale a um sinal de controle analógico PWM de 35. Este sinal de 10 bits varia de 0 a 255 que é equivalente a 0 a 5V.

Cálculo da função de transferência:

$$\tau = \frac{t_a}{4} = \frac{2540}{4} = 635\text{s}$$

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \left( \frac{k}{635 \cdot s + 1} \cdot \frac{35}{s} \right) = 79,5^\circ\text{C} - 31,0^\circ\text{C}$$

$$k = 1,386$$

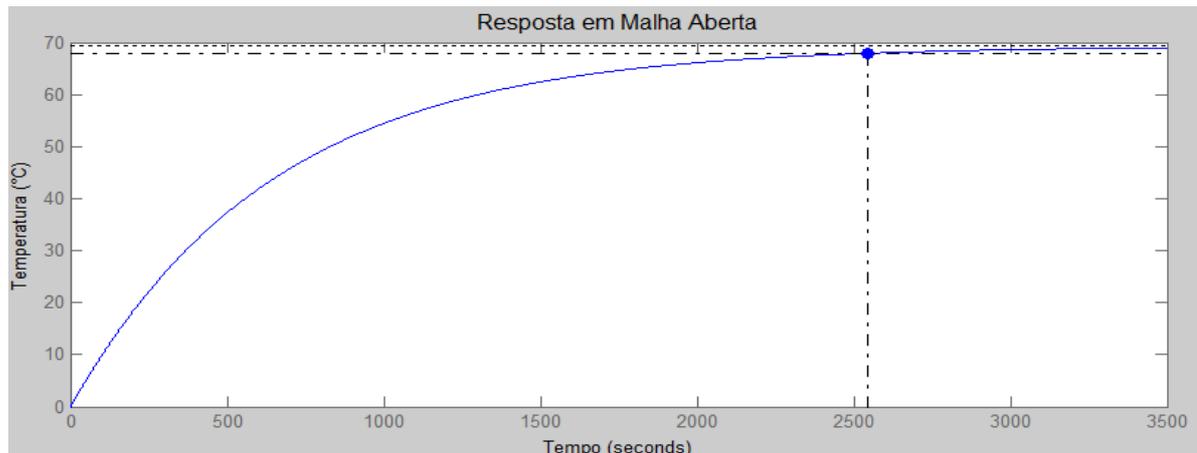
$$F.T. = \frac{1,386}{635 \cdot s + 1}$$

#### 4.2 Projeto de controladores

Utilizando a função de transferência obtida pelo método matemático de modelagem de sistemas de 1ª ordem, foi criada uma rotina no MATLAB para obter a resposta do sistema em malha aberta. Também foi implementado uma rotina no MATLAB por meio da função “sisotool” para obter a resposta do sistema em malha fechada para diversos controladores. Ambas as rotinas podem ser encontradas no Apêndice A.

A figura 27 exhibe a resposta temporal do sistema em malha aberta a um degrau de variação de 50°C. O tempo de assentamento  $t_a = 2540\text{s}$  e houve uma variação de temperatura de 70 °C.



**FIGURA 27 - Resposta temporal do sistema em malha aberta**

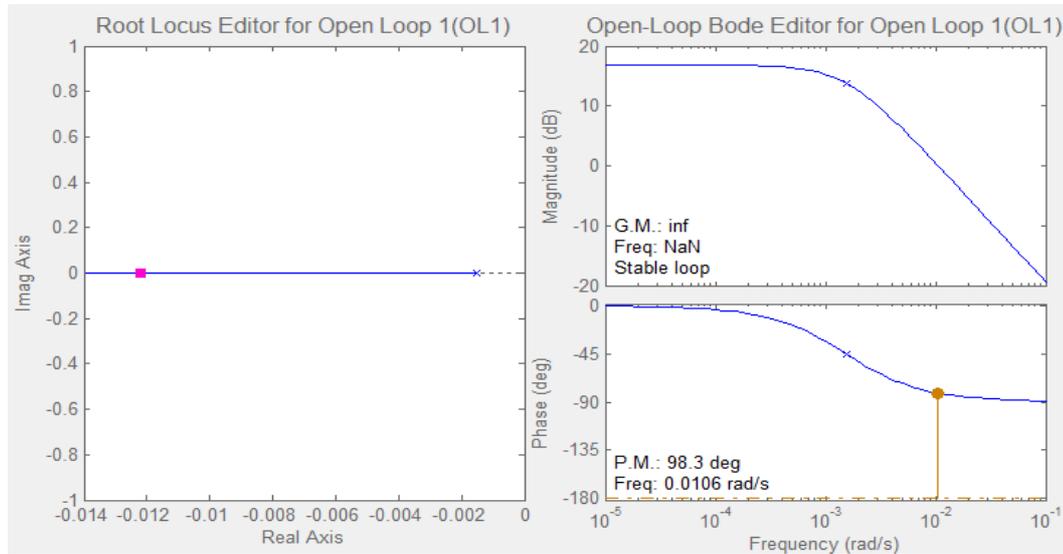
**Fonte: Elaborada pelos autores**

A rotina implementada para o projeto de controladores para um sistema em malha fechada permite que ajustando o gráfico do local das raízes se encontre um controlador que permita atingir um comportamento desejado, considerando a função de transferência obtida para sistema de 1ª ordem. Foram realizados ajustes para controladores P, PI e PID querendo se obter um menor tempo de estabilização sem que ocorra overshoot causando uma grande demora para estabilização por se tratar de um sistema térmico.

Para o projeto do controlador P foi aumentado o ganho, como mostrado na figura 28, de forma que ele consiga o menor tempo de estabilização sem que o sinal de controle ultrapasse o valor de saturação de 255, uma vez que a saída analógica do Arduino varia de 0-5V com uma resolução de 256 bits (0-255). A figura 29 exhibe a resposta temporal do sistema em malha fechada a um degrau. O tempo de assentamento  $t_a = 320s$  e houve uma variação de temperatura de  $43,7\text{ }^\circ\text{C}$ , apresentando um erro a regime permanente de  $6,3\text{ }^\circ\text{C}$ .

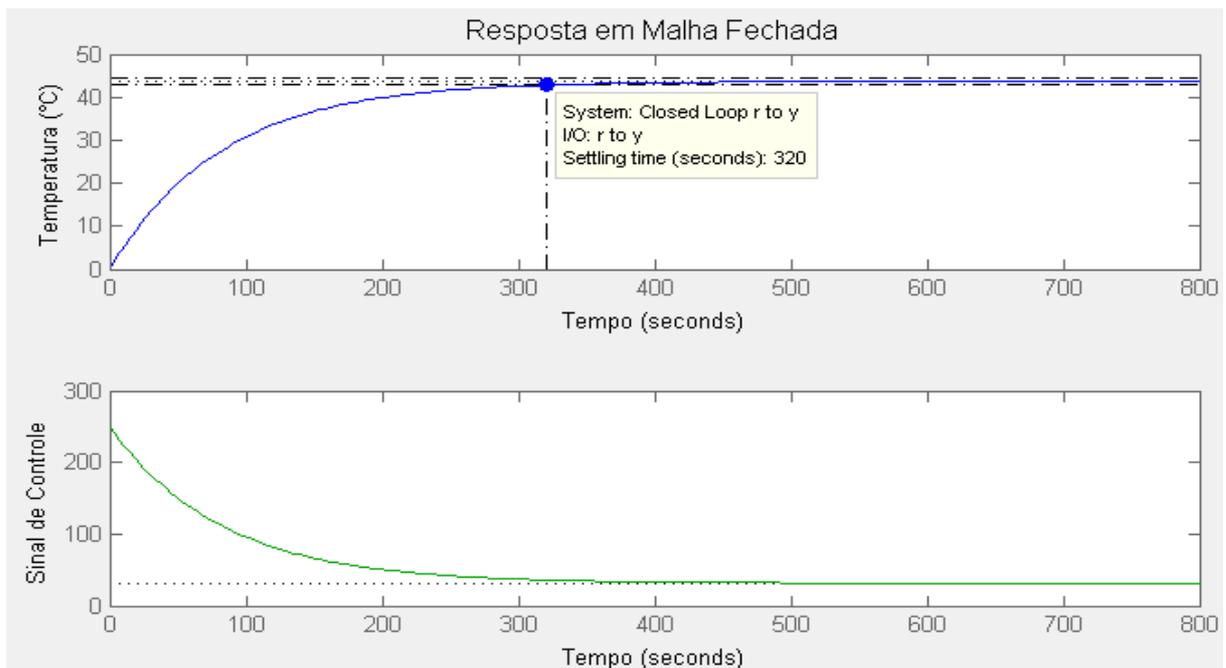


**FIGURA 28 - Lugar das raízes do controlador P**



Fonte: Elaborada pelos autores

**FIGURA 29 - Resposta temporal do sistema em malha fechada com controlador P**

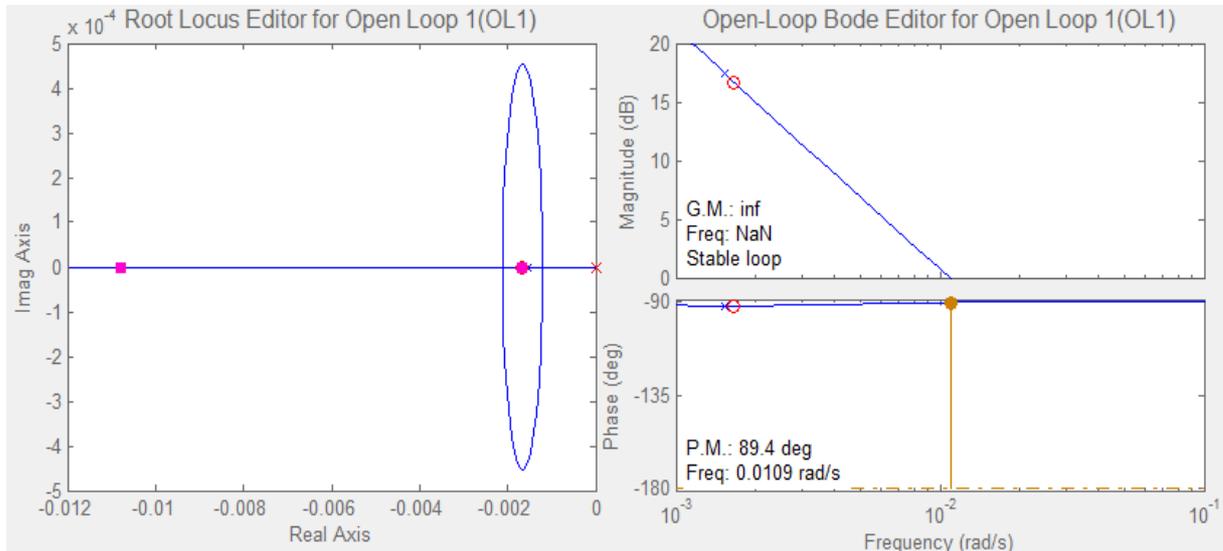


Fonte: Elaborada pelos autores

Para o projeto do controlador PI o zero da parte integrativa foi aproximado do polo para que ele o anule, então foi aumentado o ganho de forma que ele consiga o menor tempo de estabilização sem que o sinal de controle ultrapasse o valor de saturação de 255, como mostrado na figura 30. A figura 31 exibe a resposta temporal do sistema em malha aberta a

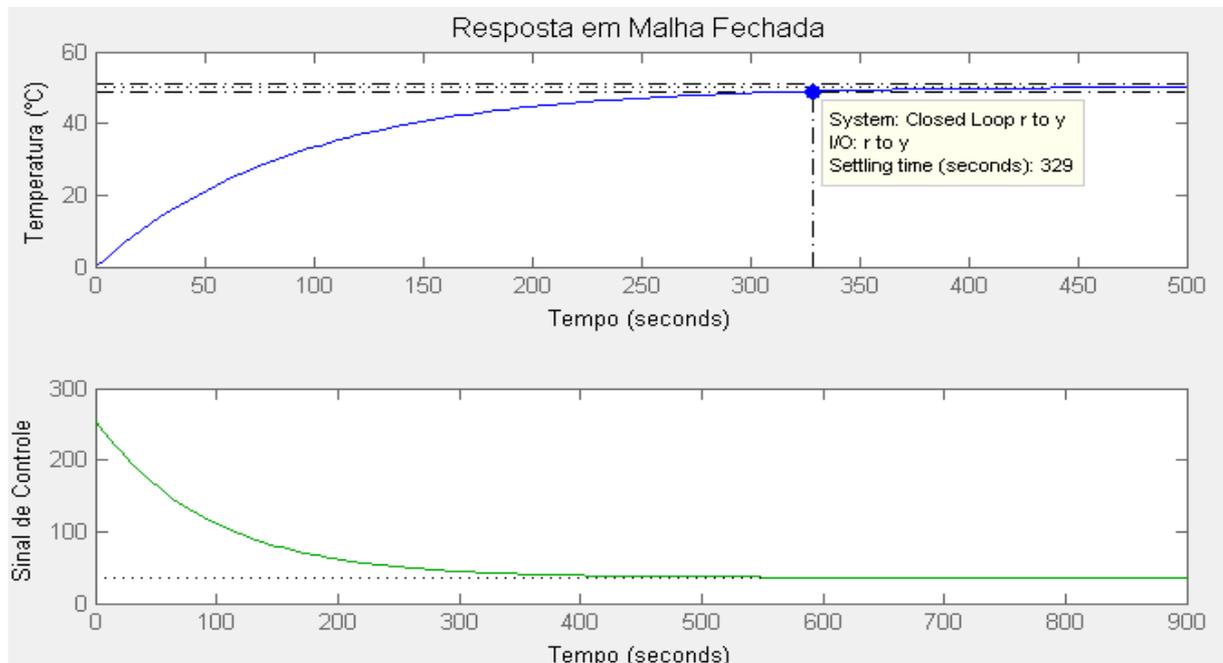
um degrau. O tempo de assentamento  $t_a$  foi de 329s e houve uma variação de temperatura de 50 °C e seu erro tendendo zero.

**FIGURA 30 - Lugar das raízes do controlador PI**



Fonte: Elaborada pelos autores

**FIGURA 31 - Resposta temporal do sistema em malha fechada com controlador PI**

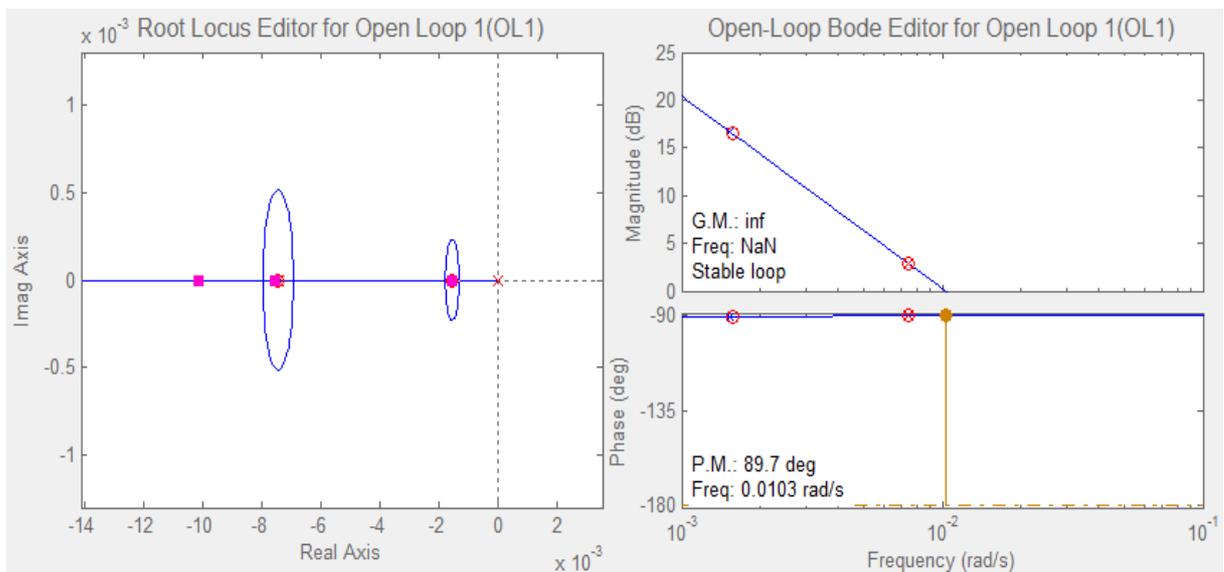


Fonte: Elaborada pelos autores

Para o projeto do controlador PID foram aproximados os zeros dos polos para que os anulem, então foi aumentado o ganho de forma que ele consiga o menor tempo de

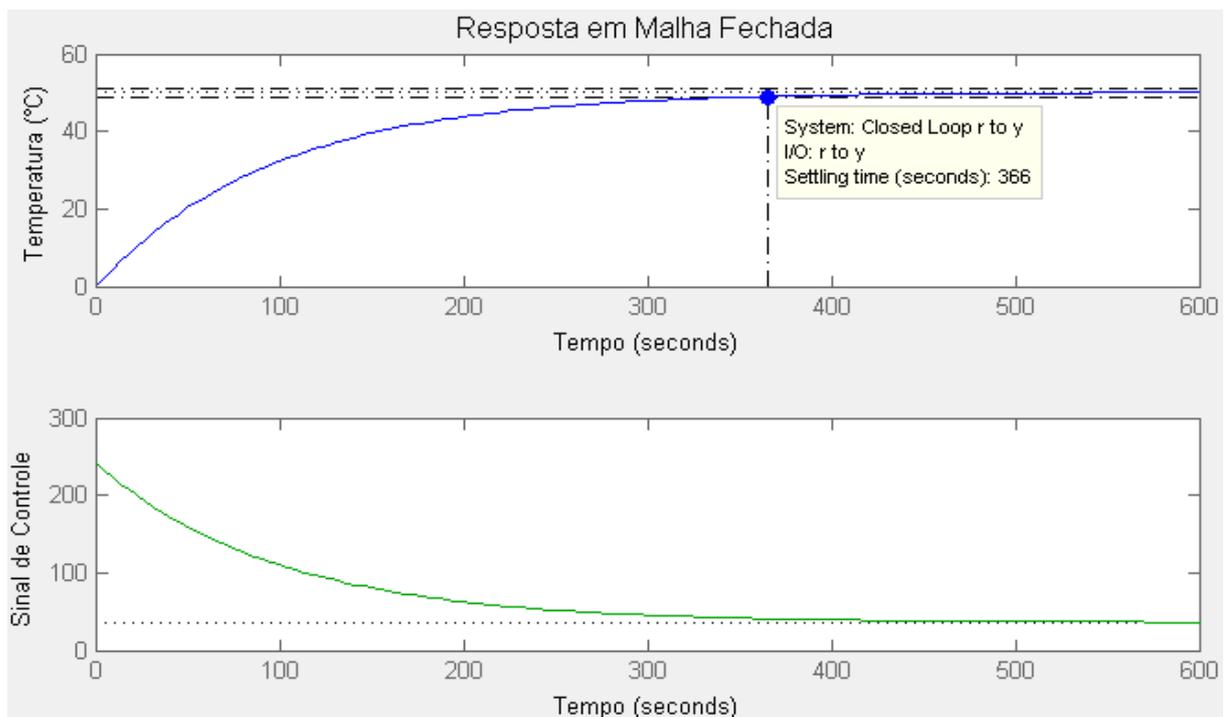
estabilização sem que o sinal de controle ultrapasse o valor de saturação de 255, como mostrado na figura 32. A figura 33 exibe a resposta temporal do sistema em malha aberta a um degrau. O tempo de assentamento  $t_a$  foi de 366s e houve um aumento de temperatura de 50 °C e seu erro tendendo zero.

**FIGURA 32 - Lugar das raízes do controlador PID**



Fonte: Elaborada pelos autores

**FIGURA 33 - Resposta temporal do sistema em malha fechada com controlador PID**



Fonte: Elaborada pelos autores

Observando as curvas dos controladores P, PI e PID é possível concluir que em termos de tempo de assentamento, todos são mais rápidos ao comparar com o sistema em malha aberta. Os sistemas controlados variam de 320 a 366 segundos para estabilizarem, contra os 2540 segundos do sistema em malha aberta. O controlador P não atingiu o valor de temperatura desejado por não ter uma parte integrativa que poderia corrigir o sinal de erro do sistema. O controlador PI e PID tiveram respostas satisfatórias, porém o controlador PID apresenta uma maior dificuldade de obtenção dos coeficientes de controle. Sendo assim, foi implementado o uso do controlador PI.



## 5 APLICAÇÃO EM TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Este capítulo tem a finalidade de comprovar a funcionalidade da plataforma didática para os experimentos propostos.

Para a aplicação dos conhecimentos teóricos em práticos, foram preparados dois roteiros de práticas para o estudo de transferência de calor: um sobre condutividade térmica e outro sobre aletas, sendo que eles podem ser encontrados no Apêndice B.

Nessas práticas são aplicados conceitos muito importantes para o estudo de transferência de calor:

- O conceito de condutividade térmica é a base para o estudo de transferência de calor, como: aquecimento de componentes, resfriamento e isolamento;
- Estudo de dissipadores de calor que são amplamente utilizados pela indústria, estando presente desde pequenos componentes eletrônicos até grandes máquinas;

### 5.1 Condutividade térmica

Nesta prática utiliza-se de uma barra de alumínio e outra de aço 1020 de mesmo comprimento e diâmetro, em que serão medidos os perfis de temperatura em regime permanente ao longo da sua superfície. As barras terão isolamento térmico para minimizar o efeito de convecção, que é exibido pela figura 34.

**FIGURA 34 - Corpo de prova com isolamento térmico**



**Fonte: Elaborada pelos autores**



Com os dados obtidos, será possível obter os valores dos coeficientes médios de condução.

Como as barras são removíveis, pode-se também utilizar a plataforma para que o aluno possa testar diferentes materiais, desde modelos comerciais até algum que tenha sido desenvolvido por ele.

### 5.1.1 Aplicação do teste de condutividade térmica

Neste tópico será demonstrado a aplicação da plataforma didática para o teste de condutividade térmica proposto no Apêndice B.

A plataforma didática foi ajustada em malha aberta para fornecer um fluxo de calor constante, sendo a ação de 80/255\*75 volts igual a 23,5 volts. Essa tensão é aplicada a resistência de aquecimento da plataforma de 350 ohms, onde se tem a produção de um fluxo de calor de 1,58 Watts.

Após o sistema estar em equilíbrio, as medições foram tomadas e completadas as tabelas 2 e 3.

**TABELA 2 – Temperatura na barra de alumínio (D =9,5 mm, L = 0,2 m)**

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)
0	61,94
50	52,86
100	49,83
150	47,21

**Fonte: Elaborada pelos autores**

**TABELA 3 – Temperatura na barra de aço (D =9,5 mm, L = 0,2 m)**

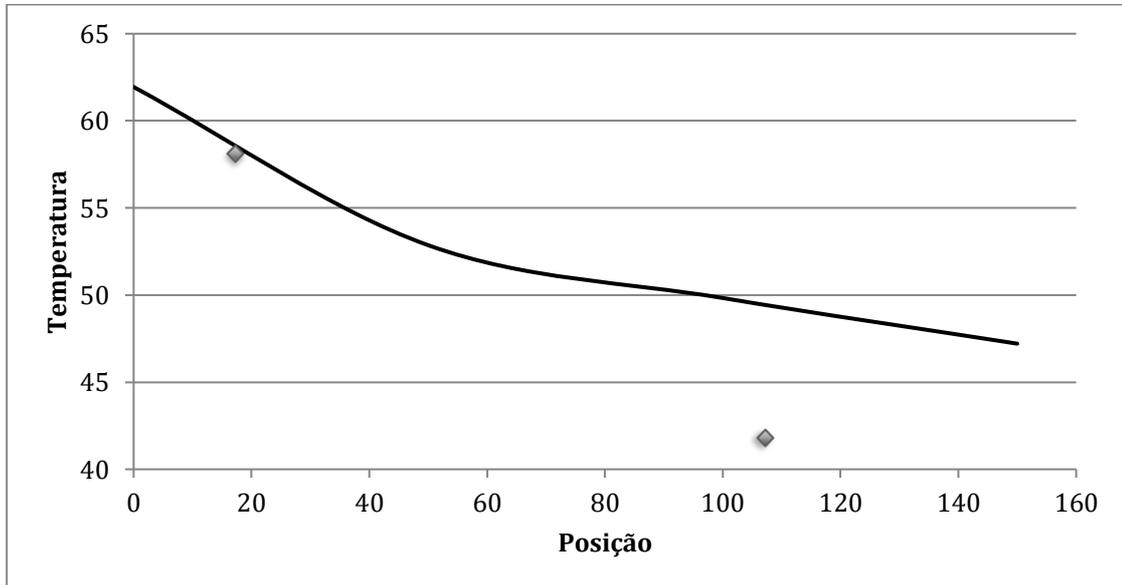
Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)
0	81,7
50	44,6
100	38,6
150	34,9

**Fonte: Elaborada pelos autores**



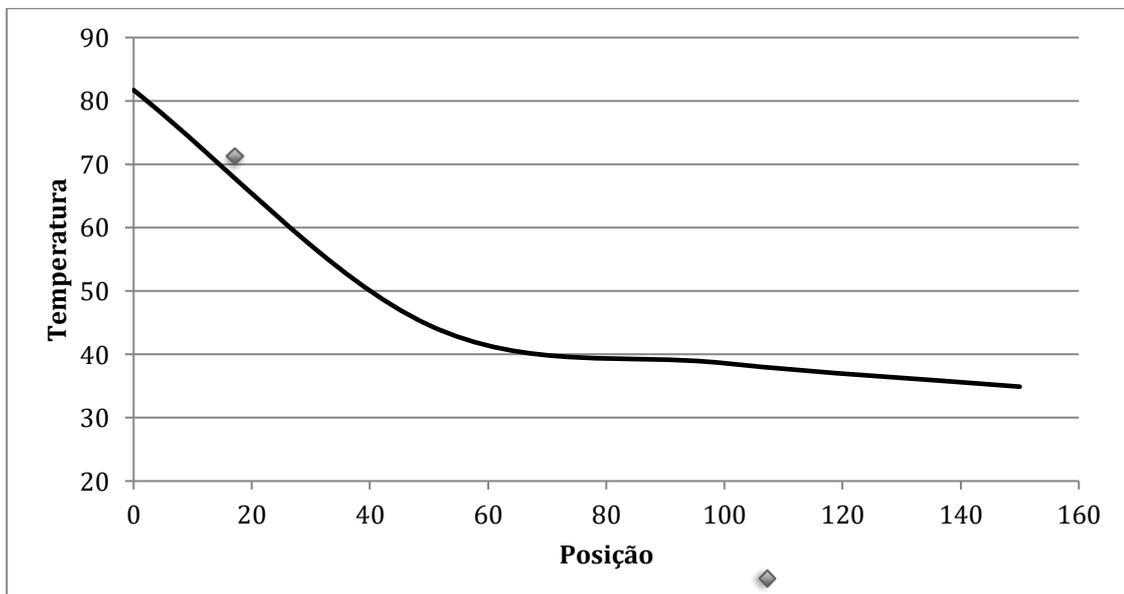
A partir destes valores foram traçadas as retas da temperatura em função da posição ao longo das aletas, exibidas nas figuras 35 e 36.

**FIGURA 35 - Temperatura em função da posição na aleta de alumínio**



Elaborada pelos autores

**FIGURA 36 - Temperatura em função da posição na aleta de aço**



Fonte: Elaborada pelos autores

Através da Lei de Fourier foram calculadas as condutividades térmicas de cada material.

Considerando que parte do calor fornecido pelo sistema térmico será perdido nos isolamentos térmicos e na própria resistência de aquecimento, foi utilizado o fluxo de calor considerando uma eficiência de 80%.

$$q'' = \frac{q}{A} = \frac{1,58.0,80}{\frac{\pi.0,0095^2}{4}} = 17832 \text{ W/m}^2$$

$$q'' = k \cdot \frac{\Delta T}{L} \rightarrow k = q'' \cdot \frac{L}{\Delta T}$$

Para o alumínio tem se  $L = 0,15\text{m}$  e  $\Delta T = 14,7^\circ\text{C}$ :

$$k = q'' \cdot \frac{L}{\Delta T} = 17832 \cdot \frac{0,15}{14,7} = 182 \text{ W/m.K}$$

Para o alumínio tem se  $L = 0,15\text{m}$  e  $\Delta T = 46,8^\circ\text{C}$ :

$$k = q'' \cdot \frac{L}{\Delta T} = 17832 \cdot \frac{0,15}{46,8} = 57 \text{ W/m.K}$$

Os valores calculados pelos dados fornecidos pela plataforma didática foram maiores que os valores tabelados. Sendo de 182 para 180 W/m.k para o alumínio e de 57 para 49 W/m.K para o aço.

As condutividades térmicas apresentaram valores próximos aos tabelados, mas a diferença pode ser causada devido a incapacidade de prever o quanto do calor fornecido a resistência será entregue ao sistema.

## 5.2 Aletas

Nesta prática utiliza-se de uma barra de alumínio e outra de aço 1020 de mesmo comprimento e diâmetro, em que serão medidos os perfis de temperatura em regime permanente ao longo da sua superfície. Elas serão aquecidas por meio de uma resistência elétrica em uma extremidade e terão isolamento térmico na outra.

Com os dados obtidos será possível obter os valores dos coeficientes médios de convecção e eficiência térmica das aletas.



Como as barras são removíveis, pode-se também utilizar a plataforma para que o aluno possa testar diferentes aletas, desde modelos comerciais até alguma que tenha sido desenvolvida por ele.

### 5.2.1 Aplicação do teste de aletas

Neste tópico será demonstrado a aplicação da plataforma didática para o teste de aletas proposto no Apêndice B.

A plataforma didática foi ajustada para uma temperatura da base de 80°C.

Após o sistema estar em equilíbrio, foram tomadas as medições da temperatura do ambiente de 25,5°C e das aletas ao longo de seu comprimento exibidas nas tabelas 4 e 5.

**TABELA 4 – Temperatura na barra de alumínio (D =9,5 mm, L = 0,2 m)**

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)	Excesso de temperatura $\theta(x) = T(x) - T_{\infty}$ (°C)
0	80,9	55,4
50	65,1	39,6
100	60,0	34,5
150	56,3	30,8

Fonte: Elaborada pelos autores

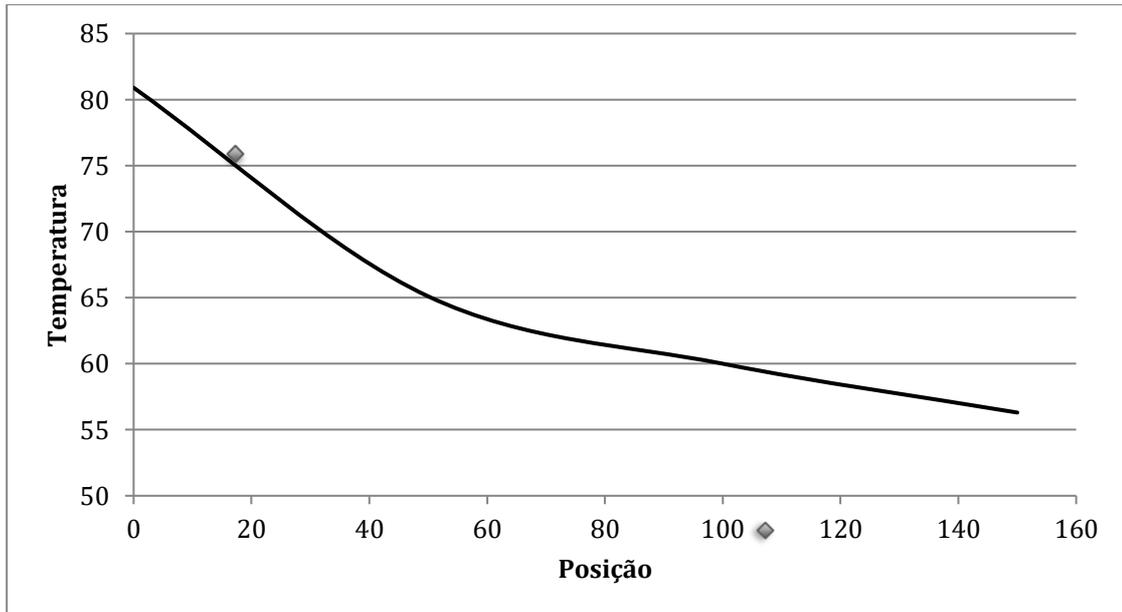
**TABELA 5 – Temperatura na barra de aço (D =9,5 mm, L = 0,2 m)**

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)	Excesso de temperatura $\theta(x) = T(x) - T_{\infty}$ (°C)
0	81,0	55,5
50	51,5	26,0
100	41,8	16,3
150	37,1	11,6

Fonte: Elaborada pelos autores

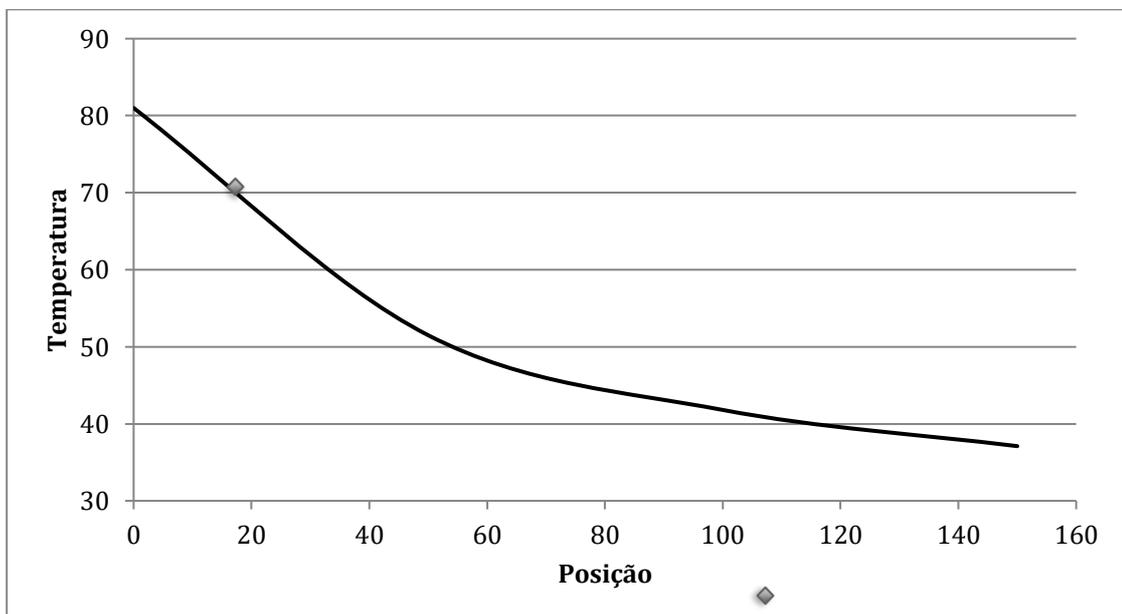
A partir destes valores foram traçadas as retas da temperatura em função da posição ao longo das aletas, exibidas nas figuras 37 e 38.

**FIGURA 37 - Temperatura em função da posição na aleta de alumínio**



Fonte: Elaborada pelos autores

**FIGURA 38 - Temperatura em função da posição na aleta de aço**



Fonte: Elaborada pelos autores

### 5.2.2 Modelo teórico

O modelo teórico tem as seguintes características: aleta cilíndrica de liga de alumínio, 9,5 mm de diâmetro, 200 mm de comprimento, temperatura constante estabilizada na base de

80°C, superfície exposta ao ar ambiente a 25,5 °C com coeficiente de transferência de calor por convecção de 20 W/(m<sup>2</sup>·K).

Para o alumínio se tem:

$$k = 180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$h = 20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Cálculo de m:

$$A = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,00007088 \text{ m}^2$$

$$P = \pi \cdot D = 0,0298 \text{ m}$$

$$m = \sqrt{(hP/kA)} = 6,84$$

Para o aço se tem:

$$k = 49 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$h = 20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Cálculo de m:

$$A = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,00007088 \text{ m}^2$$

$$P = \pi \cdot D = 0,0298 \text{ m}$$

$$m = \sqrt{(hP/kA)} = 13,12$$

Para uma aleta isolada em uma das extremidades (ponta adiabática) se tem:

$$T = T_a + \left[ \frac{(T_b - T_a) \cdot \cosh m(L - x)}{\cosh mL} \right] \quad (8)$$

Sendo:

- T – temperatura na distância x;
- T<sub>a</sub> – temperatura do ambiente;



- $T_b$  – temperatura da base;
- $L$  – comprimento.

Para os dados citados no início do tópico calcula-se a temperatura pela fórmula 8 para as distâncias de 50, 100 e 150mm para ambos os materiais e exibidos nas tabelas 6 e 7.

**TABELA 6 – Valores do modelo teórico de aleta de alumínio**

Temperatura (°C)	$T_b$	$x = 50\text{mm}$	$x = 100\text{mm}$	$x = 150\text{mm}$
Teórico	80,0	66,5	57,9	53,8

**Fonte: Elaborada pelos autores**

**TABELA 7 – Valores do modelo teórico de aleta de aço**

Temperatura (°C)	$T_b$	$x = 50\text{mm}$	$x = 100\text{mm}$	$x = 150\text{mm}$
Teórico	80,0	54,1	41,2	35,1

**Fonte: Elaborada pelos autores**

Ao se comparar os valores de temperatura obtidos pelo experimento prático e modelo teórico, pode-se observar que foram relativamente próximos. Os erros apresentados podem ser decorrentes de imprecisão do coeficiente de convecção natural do ar adotado, do valor da condutividade térmica da liga de alumínio utilizado por motivo do desconhecimento da correta composição química desta. E o erro também pode ter sido causado devido ao contato não perfeito dos sensores de temperatura com a superfície da aleta.

Observou-se uma boa repetibilidade dos ensaios realizados, apresentando valores muito próximos em todas as medições realizadas.



## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma plataforma didática para ensino nas áreas de transferência de calor e de sistemas de controle. A utilização desta plataforma permite realizar uma análise do comportamento térmico de corpos de prova de diferentes materiais, além de o controle de temperatura do sistema.

Com relação aos objetivos propostos, a plataforma didática desenvolvida disponibiliza para a comunidade acadêmica uma ferramenta que contribui para a prática de conhecimentos relacionados às áreas de transferência de calor e de análise de sistema de controle. Além da plataforma são disponibilizados roteiros práticos laboratoriais, explorando as práticas de condutividade térmica e de aletas.

No desenvolvimento deste projeto buscou-se elaborar uma documentação de forma estruturada e bem definida. Esse cuidado foi exigido por tratar-se de uma ferramenta de cunho acadêmico, sendo necessárias clareza e objetividade para o entendimento e utilização da Plataforma Didática. Além das habilidades técnicas e conhecimentos específicos essenciais para a execução deste projeto, também foi exigido do grupo habilidades de gerência de planejamento e controle de equipes, assemelhando-se com a rotina de uma empresa de projetos.

Pode-se concluir que o projeto da Plataforma Didática cumpriu o principal objetivo proposto que é deixar para a comunidade acadêmica uma ferramenta portátil e flexível para utilização nos laboratórios, ou até mesmo em sala, nas disciplinas de transferência de calor e de sistema de controle da PUC Minas. Acredita-se que essa ferramenta cumprirá seu papel de contribuir na formação teórico-prática dos alunos da universidade.

Em trabalhos futuros poderá ser estudada a criação de guias práticos na área de sistemas de controle e até propostas de novas práticas possíveis na área de transferência de calor utilizando a plataforma. Também pode ser estudado futuramente a possibilidade de se obter uma função de transferência para cada prática que possa ser realizada e então implementar um controlador individual às práticas, assim obtendo melhor desempenho da plataforma para cada aplicação.



## REFERÊNCIAS

AL-BUSAIDID, Asiya M. Development of an educational environment for online control of a biped robot using MATLAB and Arduino. In: RESEARCH AND EDUCATION IN MECHATRONICS, 9, 2012, Paris. **Anais...** Paris: Mecatronics, 2012. p. 337 – 344. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6451030>>. Acesso em: 28 mar. 2014.

ARDUINO. Arduino Board Uno. **Arduino Uno**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 28 mar. 2014.

ATMEL. **8-bit AVR microcontroller with 4/8/16/32K bytes in-system programmable flash**. 2009. Disponível em: <<http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2014.

CADY, Fredrick M. **Microcontrollers and microcomputers: principles of software and hardware engineering**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2010.

CHAPMAN, Stephen J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. 1. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

ÇENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

DISTEFANO, Joseph J. **Sistemas de retroação e controle** – São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1972.

FREESCALE. 8-bit microcontrollers. **HC08**. Disponível em: <<http://www.freescale.com/webapp/sps/site/taxonomy.jsp?code=HC08FAMILY>>. Acesso em: 30 mar. 2014.

GOLNARAGHI, Farid; KUO, Benjamin C. **Automatic Control System**. 9th ed. Danvers: John Wiley & Sons, INC, 2010.

INCROPERA, Frank P et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

MALLIK, Abhishek; GUPTA, Sauvik Das. Modelling of MEMS based temperature sensor and temperature control in a petrochemical industry using LabVIEW. In: COMPUTER AND AUTOMATION ENGINEERING, 1, 2009, Bangkok. **Anais...** Bangkok: ICCAE, 2009. p. 287 – 292. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4804534>>. Acesso em: 18 mar. 2014.

MATHWORKS. Products & services. **MATLAB**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html>>. Acesso em: 30 mar. 2014.



MICROCHIP. **8-bit PIC Microcontrollers**. 2013. Disponível em:

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30009630j.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

MICROCHIP. **PIC18F2455/2550/4455/4550 datasheet**. 2006. Disponível em:

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. Produtos. **NI labVIEW**. Disponível em:

<<http://www.ni.com/labview/pt/>>. Acesso em: 3 abr. 2014.

NILSSON, James W; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 2. ed. Rio de Janeiro: Pearson Prentice Hall, 1993.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

SALCAS. Catálogos. **Termopares convencionais**. Disponível em:

<[http://www.salcas.com.br/downloads/termopares\\_convencionais\\_Salcas.pdf](http://www.salcas.com.br/downloads/termopares_convencionais_Salcas.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2014.

SEMPRA. Kits didáticos. **E-PX mini**. Disponível em:

<[http://www.sempratec.com.br/store/index.php?id\\_product=20&controller=product](http://www.sempratec.com.br/store/index.php?id_product=20&controller=product)>. Acesso em: 5 abr. 2014.

TEXAS INSTRUMENTS. **Digital temperature sensor with two-wire interface**. 2007.

Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp75.pdf>>. Acesso em: 4 abr. 2014.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35 precision centigrade temperature sensors**. 2013.

Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2014.

TEXAS INSTRUMENTS. **Medições de temperatura com termistores: Guia prático**. 2013.

Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/7112/pt/>>. Acesso em: 9 set. 2014.

TEXAS INSTRUMENTS. Sensors products. **Products for digital output**. Disponível em:

<<http://www.ti.com/llds/ti/sensors/digital-output-products.page>>. Acesso em: 7 abr. 2014.

UBAIDULLAH, Shoab Ahmed Khan. Accelerating MATLAB slow loop execution with CUDA. In: EMERGING TECHNOLOGIES, 7, 2011, Islamabad. **Anais...** Islamabad: ICET, 2011. p. 1 – 4. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6048447>>. Acesso em: 18 mar. 2014.



WANG, Jiaqi; TANG, Zhenan. A CMOS-compatible temperature sensor based on the gaseous thermal conduction dependent on temperature. **Sensors and actuators a**, Dalian, v. 176, p. 72-77, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect-com.ez93.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0924424712000477>>. Acesso em: 16 mar. 2014.

ZHANG, Ming. Research and Implement of Thermocoupe Sensor and Microcontroller Interface. In: MULTIMEDIA TECHNOLOGY, 1, 2010, Ningbo. **Anais...** Ningbo: ICMT, 2010. p. 1 – 3. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5630931>>. Acesso em: 30 mar. 2014.



## APÊNDICE A – ROTINAS UTILIZADAS E IMPLEMENTADAS NO MATLAB

## % ROTINA PARA RESPOSTA DO SISTEMA EM MALHA ABERTA

```
clc, clear all, close all
```

```
t=0:1:2500;           %Período de resposta
s=tf('s');
G=1.386/(650*s+1);   %Sistema
Entrada = 50;        %Entrada degrau
FT = G * Entrada;    %Função de transferência
step(FT,t)           %Gráfico
```

% ROTINA PARA MODELAR CONTROLADORES  
% E RESPOSTA DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

```
clc, clear all, close all
```

## % DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS DO MODELO

```
kp = 1;              %Proporcional
ki = 1;              %Integrador
kd = 1;              %Derivativo
```

## % PARAMETROS DO CONTROLADOR, SISTEMA, SENSOR E ENTRADA

```
s = tf('s');
C = kp + ki/s + kd*s; %Controlador
G = 1.386/(650*s+1); %Sistema
H = 1;               %Sensor
Entrada = 50;        %Entrada degrau
```

```
sisotool(G,C,H,Entrada)
```



## APÊNDICE B – GUIAS PRÁTICOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### Guia prático 1 – Condutividade térmica

1. Fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do experimento:  
 Transferência de calor em superfícies expandidas: análise geral, aletas com a área da seção reta uniforme, eficiência térmica da aleta.

2. Objetivos:  
 Determinar experimentalmente a condutividade térmica do alumínio e do aço inoxidável.

3. Metodologia:  
 Materiais:  
 Barras cilíndricas de alumínio e aço 1020, isoladas em todo seu comprimento e em uma extremidade, aquecidas na extremidade oposta por contato com uma superfície com temperatura controlada e com a superfície cilíndrica ( $\pi DL$ ) exposta ao ar ambiente.  
 Termistores fixados ao longo do comprimento das barras.  
 Sistema de aquecimento elétrico.

4. Procedimento Experimental:  
 Verificar se o sistema se encontra em regime permanente e efetuar as medidas constantes nas tabelas 1 e 2.

Resultados:

Tabela 1 – Perfil de temperatura na barra de alumínio ( $D = 9,5\text{mm}$ ,  $L=0,2\text{ m}$ )

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)
0	
50	
100	
150	

Tabela 2 – Perfil de temperatura na barra de aço 1020 ( $D = 9,5\text{mm}$ ,  $L=0,2\text{ m}$ )

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)
0	
50	
100	
150	

Fazer o desenho esquemático do dispositivo experimental.

- Traçar a reta de temperatura em função da posição e determine a sua inclinação.
- Calcular a condutividade térmica do cobre através da Lei de Fourier.
- Comparar o valor da condutividade térmica do alumínio e do aço 1020 obtida neste experimento com o valor tabelado e discuta o resultado.

5. Análise de Resultados.

6. Conclusões.

7. Referências Bibliográficas, de acordo com a norma.



## Guia prático 2 - Aletas

## 1. Fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do experimento:

Transferência de calor em superfícies expandidas: análise geral, aletas com a área da seção reta uniforme, eficiência térmica da aleta.

## 2. Objetivos:

Medir os perfis de temperatura em regime permanente, em duas barras metálicas cilíndricas de mesmo diâmetro e de materiais diferentes.

Ajustar equações propostas na literatura aos dados experimentais e obter os valores dos coeficientes médios de transferência de calor entre cada barra e o ar.

Determinar a eficiência térmica de cada barra (aleta).

## 3. Metodologia:

## Materiais:

Barras cilíndricas de alumínio e aço 1020, isoladas numa extremidade, aquecidas na extremidade oposta por contato com uma superfície com temperatura controlada e com a superfície cilíndrica ( $\pi DL$ ) exposta ao ar ambiente.

Termistores fixados ao longo do comprimento das barras.

Sistema de aquecimento elétrico.

## 4. Procedimento Experimental:

Verificar se o sistema se encontra em regime permanente e efetuar as medidas constantes nas tabelas 1 e 2.

Medir a temperatura do ar ambiente:  $T_\infty = T_{\text{amb}} = \text{_____ } ^\circ\text{C}$



Resultados:

Tabela 1 – Perfil de temperatura na barra de alumínio ( $D = 9,5\text{mm}$ ,  $L = 0,2\text{ m}$ )

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)	Excesso de temperatura $\theta(x) = T(x) - T_{\infty}$ (°C)
0		
50		
100		
150		

Tabela 2 – Perfil de temperatura na barra de aço 1020 ( $D = 9,5\text{mm}$ ,  $L = 0,2\text{ m}$ )

Coordenada espacial x (mm)	Temperatura T(x) (°C)	Excesso de temperatura $\theta(x) = T(x) - T_{\infty}$ (°C)
0		
50		
100		
150		

Fazer o desenho esquemático do dispositivo experimental.

- d) Para cada aleta, traçar a curva  $\theta(x)$  versus x e determinar a sua inclinação em  $x = 0$ .
- e) Calcular a taxa de condução do calor em cada aleta, através da Lei de Fourier.
- f) Para cada aleta, calcular a área sob a curva  $\theta(x)$  versus x.
- g) Através do balanço de energia na aleta, calcular o coeficiente de transferência convectiva de calor entre cada aleta e o ar ambiente.
- h) Calcular a eficiência de cada aleta.

5. Análise dos Resultados.

6. Conclusões.

7. Referências Bibliográficas, de acordo com a norma.

### APÊNDICE C – LISTA DE MATERIAIS

Para a construção da plataforma foram utilizados os seguintes materiais:

- Placa para base da plataforma de madeira MDF com dimensões 400x130x1,50mm (LxCxA);
- Caixa metálica em chapa de aço inox 0,7mm com dimensões 100x80x80mm (LxCxA);
- Resistência elétrica de ferro de solda da marca Hikari 60 watts de 350 $\Omega$ ;
- Ponta de ferro de solda da marca Hikari (cilindro de cobre diâmetro 7mm);
- Placa quadrada de cobre com dimensões 30x30x3mm. (LxLxE);
- Lã de vidro para isolamento térmico;
- Circuito driver de potência construído com MOSFET irfb4321, um opto acoplador 4n26 e 3 resistores de 390  $\Omega$ ;
- 5 termistores de 10k $\Omega$ ;
- 1 Arduino Uno;
- 1 Fonte de tensão contínua de 85V.



## ÍNDICE REMISSIVO

### A

aplicação, 5, 10, 11, 12, 20, 28, 48, 49, 52, 56  
 Arduino, 7, 8, 19, 20, 34, 35, 37, 38, 39, 43, 57, 65

### C

calor, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30,  
 37, 48, 49, 51, 54, 56, 57, 61, 63, 64  
 Condução, 8, 24  
 controlador, 7, 17, 18, 19, 30, 32, 37, 39, 41, 43, 44, 45,  
 46, 47, 56  
 convecção, 7, 11, 25, 26, 48, 51, 54, 55

### D

didática, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 21, 29, 30, 31, 32, 34, 36,  
 41, 48, 49, 51, 52, 56

### E

energia, 23, 24, 25, 26, 27, 64  
 engenharia, 10, 28

### M

MATLAB, 5, 6, 8, 28, 34, 37, 38, 41, 42, 57, 58

### P

Plataforma didática, 2, 5, 7, 10

### R

Radiação, 8, 26

### S

sensores, 5, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 29, 30, 32, 33, 34, 37,  
 55  
 Sistema, 60

### T

temperatura, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 23, 24, 25, 26,  
 27, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46,  
 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 61, 62, 63, 64  
 térmico, 5, 7, 8, 13, 24, 25, 27, 33, 43, 48, 51, 56, 65  
 Transferência de calor, 5, 7, 8, 23, 24, 25, 27, 61, 63



ISBN 978-85-9535-180-6



9 788595 351806 >

 editora  
**itacaiúna**