

PLATAFORMA DIDÁTICA TÉRMICA MULTIDISCIPLINAR PARA CONTROLE, AUTOMAÇÃO E REDES DE SENSORES

MAXSUEL FERREIRA CUNHA*, THAIS CHRISTINE BORGES DA SILVA†, CARLOS ALBERTO DE SOUZA FILHO†

**Departamento de Engenharia Elétrica - DEE, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Rua Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário, 58429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil*

†*Departamento de Engenharia Elétrica - DEE, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Cidade Universitária, s/n - Castelo Branco III, 58051-085, João Pessoa, Paraíba, Brasil*

Emails: maxsuel@ieee.org, thais.silva@cear.ufpb.br, calberto@cear.ufpb.br

Abstract— The aim of this article is to present the development and application of a didactic platform to the control and automation teaching. This proposed instrument is multidisciplinary and versatile, and it is able to help students to perform tests with subjects in this field. It has been implemented a structure consisting of a thermal process, which is composed for a Peltier module, temperature sensors and electronic circuits. The platform provides a compatibility with Data Acquisition Systems (DAQ), Programmable Logic Controllers (PLC) or microcontrollers. Besides that, signal conditioning circuits are integrated to platform to enable using with the sensors: NTC, PT-100 or LM35. Systems identification, controllers tuning, supervisory control and characterization of temperature sensors are potential topics to address with the structure presented in this paper. Experimental tests were performed with these topics, where the procedures and results are discussed in detail aim to verify the multidisciplinary of the proposed platform.

Keywords— Didactic Platform, Control and Automation, Thermal System.

Resumo— Este artigo tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento e aplicação de uma plataforma didática para o ensino de controle e automação. O instrumento de estudo proposto é multidisciplinar e versátil, com capacidade de auxiliar estudantes na realização de experimentos com temas nesse campo. Foi implementada uma estrutura formada por um processo térmico, a qual contém um módulo Peltier, sensores de temperatura e circuitos eletrônicos. A plataforma proporciona compatibilidade necessária para controlar o sistema dinâmico com placas de aquisição de dados (DAQ), controladores lógicos programáveis (CLP) ou microcontroladores. Além disso, circuitos de condicionamento de sinais estão integrados à plataforma para possibilitar o uso de sensores do tipo: NTC, PT-100 ou LM35. Identificação de sistemas, sintonia de controladores, controle supervisorio e caracterização de sensores de temperatura, são potenciais conteúdos que podem ser abordados com a estrutura apresentada neste trabalho. Experimentos com esses temas foram realizados, onde são discutidos os procedimentos e resultados em detalhe a fim de validar a multidisciplinaridade da plataforma proposta.

Palavras-chave— Plataforma didática, Controle e Automação, Sistema Térmico.

1 Introdução

Modelos didáticos são uma importante ferramenta de auxílio em cursos de engenharia, que eleva o aprendizado possibilitando aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula (Kolb, 2014). Uma das vantagens de experimentos em modelos didáticos é familiarizar o aluno com situações mais recorrentes durante a atuação profissional. Atualmente, um dos maiores problemas encontrados para oferecer experiência prática a estudantes de engenharia tem sido o aumento da complexidade e do custo dos equipamentos de laboratório (Feisel and Rosa, 2005).

Alguns modelos de plataformas didáticas já foram propostos, como em Astrom and Ostberg (1986) que propôs um simples sistema de controle de nível com o objetivo de ensinar conceitos básicos de realimentação, modelagem de sistemas e técnicas simples de controle. Estes mesmos objetivos foram propostos em Chen and Naughton (2000) com o controle de um servo-motor por meio do software MATLAB[®]. Zilouchian (2003) desenvolveu experimentos para ensinar controle in-

teligente de forma introdutória em laboratório. Araújo et al. (2005) propuseram outro tipo de sistema para o ensino de controle e automação consistindo de um secador de grão, onde a temperatura do fluxo de ar é controlada utilizando microcontrolador.

Sistemas de controle de temperatura encontram aplicações em inúmeros setores da indústria e da pesquisa. São exemplos da aplicação de dispositivos de controle de temperatura: indústria de alimentos, processos químicos, usinas de geração de energia, indústria automobilística ou fabricação de circuitos eletrônicos (Lugão, 2016). Por essas razões, a aplicação de controle em sistemas térmicos torna-se um problema interessante do ponto de vista didático, tanto para experimentos em laboratório quanto para demonstrações em sala de aula.

Neste contexto o presente artigo apresenta o desenvolvimento de uma plataforma didática (PFD) composta por uma planta térmica. O objetivo desta plataforma é auxiliar na realização de experimentos em disciplinas de cursos de engenharia, na área de controle e automação. A PFD foi

projetada com intuito de ser flexível o suficiente para operar com sistemas variados. Esta versatilidade permite que a aquisição do sinal de temperatura e respectivo controle do atuador, sejam feitos através de computadores pessoal (PC) associados a sistemas de aquisição de dados, controladores lógicos programáveis (CLP), microcontroladores ou através de circuitos analógicos montados em *protoboard*. Desta forma, é possível abordar conteúdos distintos e multidisciplinares.

Dentre os possíveis conteúdos que podem ser explorados com esta plataforma, os seguintes experimentos são apresentados neste artigo: caracterização de sensores de temperatura, identificação de sistemas, controle de sistemas dinâmicos e supervisor. Os quais podem ser aplicados em diversas disciplinas na área de controle e automação.

2 Descrição da Plataforma

O processo físico abordado neste trabalho é uma planta térmica. Para isto o atuador escolhido foi uma célula de efeito Peltier (ou módulo de Peltier, MP), o qual converte energia elétrica em térmica. A plataforma contém: circuitos de condicionamento para o sinal dos sensores de temperatura, circuito de potência para acionamento e para o sistema de arrefecimento do atuador, circuitos auxiliares e uma estrutura mecânica de acrílico. Os circuitos auxiliares foram implementados a fim de torná-la versátil, sendo compatível com vários tipos de sensores de temperatura e diferentes sistemas digitais para operação da PFD. Dessa forma, pode-se utilizar: CLP (Controlador Lógico Programável), microcontroladores (e.g. TIVA TM4C1294), ou dispositivos de aquisição de dados (e.g. NI USB-6009). A PFD desenvolvida está ilustrada na Figura 1.

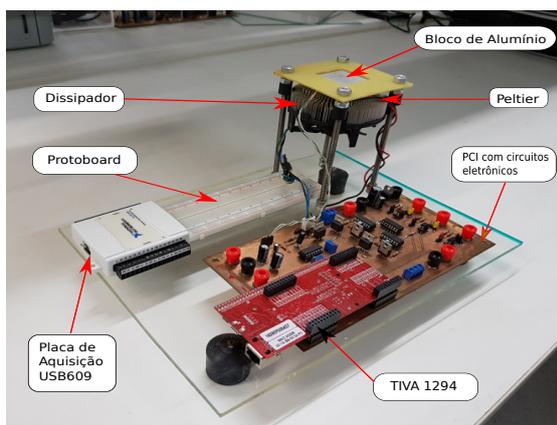


Figura 1: Plataforma desenvolvida.

A arquitetura de *hardware* da PFD desenvolvida pode ser representada pelo diagrama de blocos da Figura 2. Os índices de cada bloco correspondem aos seguintes componentes: [1] PC (*per-*

sonal computer), [2] sistema digital (e.g. microcontrolador), [3] circuito de potência, [4] célula Peltier, [5] sensor de temperatura e [6] circuito de condicionamento para o sinal do sensor. A região destacada em pontilhado designa os elementos que constituem a plataforma, e os que estão na parte externa são componentes que podem ser escolhidos pelo operador para interagir com a plataforma, desde que os padrões estabelecidos pela PFD sejam atendidos. É possível utilizar a PFD de maneira autônoma (sem o PC) com um microcontrolador, um CLP ou outro dispositivo de aquisição e controle. Nesta configuração, o PC pode ser incluído opcionalmente para monitorar o processo através de um *software* supervisor.

O PC é o elemento que pode ter a função de monitorar e controlar o processo. A comunicação do sistema de aquisição com o PC é dependente do dispositivo utilizado. Dessa forma a variável de processo (temperatura) e a variável manipulada (tensão) podem ser monitoradas em tempo real.

A manipulação da PFD é feita em malha aberta ou fechada. Na operação em malha fechada é possível implementar um controlador de temperatura no próprio PC, CLP ou em um microcontrolador. Para malha aberta pode-se empregar conceitos de instrumentação, na calibração de sensores de temperatura, ou de identificação de sistemas para modelagem da planta.

O sistema digital, referenciado por [2], consiste no dispositivo responsável por realizar a aquisição dos valores de temperatura e controlar a plataforma. Apesar da PFD oferecer liberdade para escolher o equipamento a ser utilizado, alguns mais usuais foram definidos para testá-la, e assim os requisitos de faixa de operação do sistema foram estabelecidos. Nas próximas seções serão apresentados experimentos com os dispositivos que foram utilizados, sendo eles: CLP, placa de aquisição NI USB-6009 e placa de desenvolvimento TIVA 1294. É possível utilizar uma configuração onde a medição da variável de processo seja feita por um dispositivo (ex: microcontrolador) e o controlador seja implementado em outro (ex: CLP). Desta forma, pode-se realizar experimentos com controle em rede para analisar influência de tempo de atraso e outras características inerentes da rede.

Uma única placa de circuito impresso (PCI) acomoda os itens [3] - [6], além de outros circuitos auxiliares. O circuito de potência [3] é responsável por fornecer energia suficiente para alimentar a célula Peltier a partir dos sistemas digitais. Este circuito é formado por um conversor estático com topologia em ponte H que emprega modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). Além de apresentar uma eficiência mais elevada se comparado com circuitos lineares (fonte de tensão variável), a sua implementação se deu também pela possibilidade de controlar o sentido da corrente a

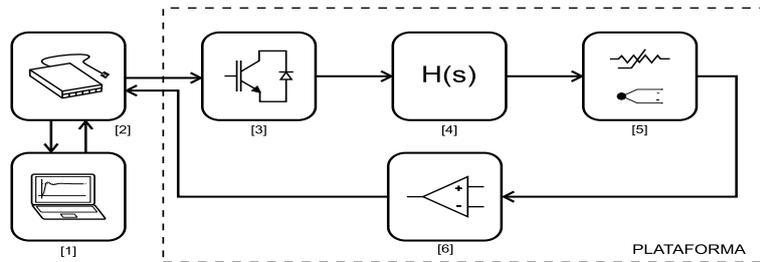


Figura 2: Esquemático em diagrama de blocos com os componentes da plataforma didática.

partir de uma fonte CC simples. Desta forma, o circuito interpreta um sinal binário (1 ou 0) para definir a polaridade e outro (PWM) para modificar o nível do valor da tensão média.

O condicionador de sinal ([5]) foi projetado para tratar o sinal proveniente do sensor de temperatura, considerando que o mesmo apresenta sensibilidade de $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Esta escolha foi para permitir a conexão direta de sensores baseados em junção PN, como o LM35 que apresenta esta sensibilidade. Desta forma, a entrada do condicionador é um sinal de tensão na faixa $0 - 1 \text{ V}$, para uma variação de temperatura $0 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Qualquer tipo de sensor de temperatura pode ser utilizado na plataforma, desde que se projete um circuito de condicionamento externo à PFD para adequar sua saída à faixa de entrada determinada pelo condicionador. O condicionador tem duas saídas independentes, uma que varia entre $0,0 \text{ V}$ e $3,3 \text{ V}$ e outra na faixa $0 - 10 \text{ V}$. Esses valores são padrões de entrada do ADC (*Analog-to-Digital Converter*) para a maioria dos microcontroladores e CLPs. O circuito desenvolvido para [5] é formado por um filtro passa baixas (de segunda ordem projetado com aproximação *Butterworth*) e um amplificador.

Os outros circuitos auxiliares presentes na PCI têm o objetivo de minimizar a necessidade de placas externas (ou quaisquer circuitos) para manuseio da PFD. Algumas restrições como níveis de tensão\corrente de entrada e saída, conectores ou potência, compatíveis com diferentes equipamentos são contornados com essa PCI. Pode-se citar o caso em que deseja-se utilizar um CLP, sinais de saída na faixa de $0 - 24 \text{ V}$ e de $0 - 10 \text{ V}$ de entrada, ou um microcontrolador, que suporta na entrada\saída sinais na faixa $0 - 3,3 \text{ V}$. Além disso, proveu-se um isolamento galvânico com optoacopladores para fornecer proteção, separando os referenciais entre os circuitos de instrumentação e de potência.

3 Planta Térmica

Os processos térmicos são amplamente utilizados na engenharia, seja em ambiente industrial ou para fins de pesquisa (Lugão, 2016; Riffat et al., 2001). De modo geral, esses sistemas consistem em controlar a temperatura de uma determi-

nada região ou objeto, seja em larga ou pequena escala, como em caldeiras ou produtos farmacêuticos (Bidoia, 2005). Em alguns casos, pequenas variações de temperatura podem causar muito prejuízo financeiro (Lugão, 2016).

Na indústria automotiva faz-se necessário realizar o controle adequado da temperatura para assegurar a fixação de emblemas da empresa na carroceria dos veículos, como mostrado por de Souza et al. (2015). O sistema dinâmico desse processo é formado por uma estufa, onde foram utilizados um sensor de temperatura termoresistivo PT-100 e um resistor para fornecer calor.

No campo de pesquisa existem inúmeras aplicações para controle de temperatura, como por exemplo em um sistema de ciclagem térmica para verificar o comportamento de materiais de ligas com memória de forma (Emiliavaca et al., 2012). Nesse estudo foi empregado um controlador *fuzzy*, termopares do tipo K como sensores e MP como atuador.

Em medições de propriedades de líquidos utilizando ultrassom a variação da temperatura se torna crucial para extração dos dados, pois a velocidade é muito sensível a esse parâmetro, tornando a medição imprecisa. No trabalho realizado por Lugão (2016) é desenvolvido um controlador clássico do tipo PID com tolerância à oscilação máxima em regime permanente de $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Para isso foi utilizado um MP para fornecimento de calor e sensores do tipo RTD para ler a temperatura no fluido.

No trabalho Sarmiento (2016) objetivou-se identificar o modelo dinâmico de um sistema formado por dois MP para estudos de controle em escala laboratorial. Para isso foi utilizado um sensor do tipo junção P-N para fornecer a realimentação do sistema de controle.

Dada a relevância desse tipo de processo na perspectiva de engenharia, a plataforma didática apresentada neste artigo faz uso de uma planta térmica. Nesta planta o atuador responsável por gerar calor é um dispositivo termoelétrico, denominado célula Peltier. Do ponto de vista de teoria de controle, esse sistema apresenta características dinâmicas interessantes para serem explorada como: não-linearidades, atraso de transporte, variação com o tempo e etc. O estudante pode re-

alizer experimentos para aprender a dimensionar circuitos de potência para o acionamento dessas células, escolher e caracterizar sensores de temperatura, desenvolver projeto de controladores, realizar sintonia da planta ou implementar um supervisor.

3.1 Célula de Efeito Peltier

As células que utilizam propriedades termoelétricas, ou seja, conversão de energia elétrica em térmica (efeito Peltier), e térmica em elétrica (efeito Seebeck), são atuadores bastante utilizados para fornecimento (ou absorção) de calor a um corpo. Estas células são disponibilizadas comercialmente e encontram-se em diversos sistemas de controle de temperatura. Comparando-as com sistemas termomecânicos, há uma série de vantagens, as quais pode-se destacar: não possuem partes móveis, são silenciosas, são de alta confiabilidade, são bastante estáveis e não produzem dano ao meio ambiente (Nanophysics Group, 2015).

O efeito Peltier foi descoberto em 1834 por Jean C. A. Peltier e o princípio de funcionamento é dado pela geração de um gradiente de temperatura quando uma junção de dois materiais distintos é percorrida por uma corrente elétrica. Dentre os materiais utilizados, os semicondutores (junções P-N) apresentam uma melhor relação entre condutividade térmica e elétrica, sendo esta uma figura de mérito para a eficiência deste efeito. Este efeito se eleva através de conexões entre várias junções de semicondutores, de forma que estejam dispostas eletricamente em série e termicamente em paralelo, formando os que são conhecidos por módulo Peltier (MP) (ou célula Peltier), como apresentado na Figura 3 (Nanophysics Group, 2015) (Rowe, 1995).

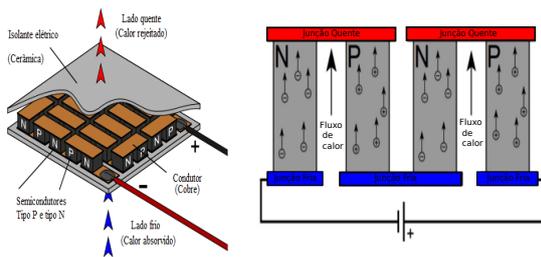


Figura 3: Módulo Peltier comercial e esquemático.

Em uma face de um MP o calor é rejeitado e na outra o calor é absorvido. Este processo é termicamente reversível, isso provém do fato de que quando uma corrente elétrica I percorre o módulo e atravessa uma junção, há um ganho e perda de energia cinética, onde há uma maior dopagem em uma das faces e menor na outra. Essa taxa de transferência de calor é proporcional a I e a uma constante que depende do material. A Figura 3 demonstra o movimento dos portadores

de carga e a face onde o calor é rejeitado e absorvido, a qual depende do sentido de I (Nanophysics Group, 2015).

3.2 Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico para os MP é bastante complexo pela presença de diversas não linearidades no processo. A equação 1 descreve o balanço de energia para a diferença de temperatura (T) entre as faces do módulo e a corrente (I) que o atravessa (Huang and Duang, 2000). As não linearidades estão presentes principalmente nas variações das propriedades do material com a temperatura e produtos entre variáveis.

$$C\gamma \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\tau}{A} I \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} + \rho \frac{I^2}{A^2} \quad (1)$$

onde C é o calor específico, γ é a densidade, τ é coeficiente de Thomson, ρ é a resistividade elétrica, k é a condutividade térmica e A é a área da seção transversal do material termoelétrico (Huang and Duang, 2000).

Apesar da complexidade do modelo completo apresentado pela equação 1 a relação entre temperatura e tensão elétrica, para uma determinada faixa de operação, pode ser simplificada por um sistema de primeira ordem com atraso. Este modelo é aceitável em muitas aplicações e simplifica bastante o projeto de controladores, podendo ser representado pela equação 2 (Mannella et al., 2014).

$$G_o(s) = \frac{\Delta T}{D} = \frac{K e^{-s\tau_0}}{\nu_0 s + 1} \quad (2)$$

onde K é uma constante que depende das propriedades do módulo, D é o ciclo de trabalho do sinal PWM, τ_0 é o atraso de transporte e ν_0 é a constante de tempo, ambos em segundos. Neste modelo a saída é a temperatura em uma das faces (denominada de quente) enquanto que a outra é mantida constante (geralmente emprega-se um dissipador com um cooler). A entrada D tem uma relação direta com a tensão média aplicada ao módulo. Utilizando-se o modelo da equação 2 pode-se projetar controladores do tipo PI clássico capazes de fornecer resultados de dinâmica e erro em regime permanente satisfatórios.

O módulo de Peltier utilizado neste trabalho é o modelo comercial TEC-12706 de 60 W, com tensão de operação 0 – 15,2 V, corrente de operação 0 – 6 A e dimensões 40 x 40 mm.

4 Experimentos

Uma série de experimentos foi realizada para comprovar a viabilidade e versatilidade da PFD. A plataforma experimental durante o uso em um dos ensaios está ilustrada na Figura 4.

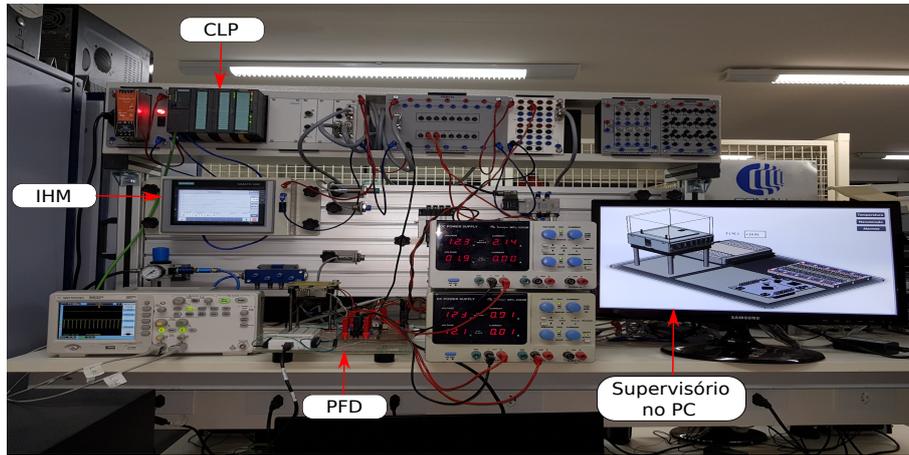


Figura 4: Plataforma experimental aplicada em um dos ensaios.

Inicialmente foi realizada a identificação da planta para obtenção do modelo matemático. Em seguida foi utilizado um método heurístico de sintonia para calcular os parâmetros do controlador. Com o controlador sintonizado o sistema em malha fechada foi implementado em um PC com placa de aquisição de dados e no CLP S7300 da Siemens disponível no laboratório. Uma interface homem máquina e um supervisor foram desenvolvidos para permitir interação com usuário. Com o sistema devidamente controlado foi possível utilizar a PFD para caracterização de sensores de temperatura, mudando-se a referência e medindo-se a resposta do sensor.

Os experimentos de identificação da planta, caracterização de sensores e sintonia de controladores, foram realizados com a PFD conectada ao PC através da placa de aquisição de dados com auxílio do LabVIEWTM.

4.1 Identificação

A identificação de sistemas é bastante útil quando necessita-se construir o modelo matemático da planta a partir de dados experimentais. O sistema utilizado apresenta um comportamento não linear descrito na seção 3.2. Entretanto, para os propósitos deste trabalho a identificação foi realizada com a aproximação da planta por um modelo de primeira ordem com atraso descrito pela equação 2. Esta aproximação foi adotada para servir como base para comparação com método de sintonia de utilizado.

A identificação da planta foi realizada utilizando-se a ferramenta *System identification* do *toolbox* de identificação do MATLAB[®]. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 5. O sistema foi submetido em malha aberta a um degrau de 20% na entrada. Pode-se visualizar que os modelos utilizados apresentam o mesmo comportamento dos dados obtidos experimentalmente. O gráfico inserido na Figura 5 é uma am-

pliação de parte da imagem e foi acrescentado para visualizar-se a diferença entre os dois modelos e a curva real.

A aproximação pelo sistema de primeira ordem com atraso (MPO) obteve um percentual de ajuste de 97,34%, enquanto que a do modelo de segunda ordem com atraso o valor foi de 97,48%. Os valores obtidos para os parâmetros do MPO foram $K = 0,76$, $\tau_0 = 4,30$ s e $\nu_0 = 142,98$. Observa-se que a elevação da ordem não gerou uma melhoria significativa no ajuste, o que comprova que o MPO é adequado para representar o sistema.

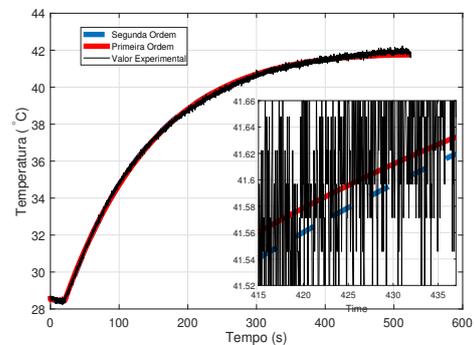


Figura 5: Resposta ao degrau para identificação da planta.

4.2 Sintonia de Controladores

Métodos heurísticos de sintonia de controladores são amplamente utilizados quando se desconhece o modelo da planta e precisa-se projetar o controlador em curto período de tempo. Alguns controladores industriais já apresentam recursos de auto sintonia para facilitar sua instalação no sistema. Neste trabalho foi utilizado o método clássico de Ziegler-Nichols usando a curva de reação baseado na resposta ao degrau. Este método aproxima o comportamento da planta real por um modelo de primeira ordem com atraso ex-

presso pela Equação 2. Os parâmetros do controlador são calculados em função do comportamento obtido com a aplicação do degrau na entrada de acordo com a Tabela 1 (Goodwin et al., 2001).

Tabela 1: Parâmetros do controlador.

Controlador	K_p	T_r	T_d
P	$\frac{\nu_0}{K_0\tau_0}$		
PI	$0.9\frac{\nu_0}{K_0\tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$1.2\frac{\nu_0}{K_0\tau_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

onde $K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}$, $\tau_0 = t_1 - t_0$ e $\nu_0 = t_2 - t_1$. A Figura 6 ilustra o comportamento obtido para aplicação de um degrau de 20% no ciclo de trabalho da onda PWM que controla o MP.

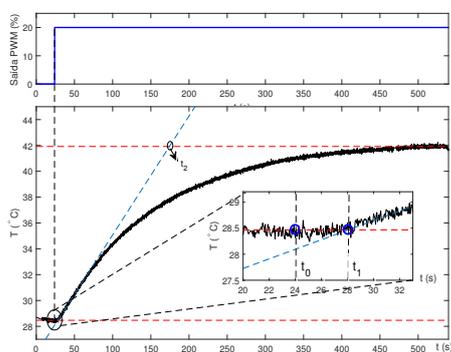


Figura 6: Respostas de entrada e saída para sintonia do controlador.

Através do comportamento ilustrado na Figura 6, determina-se $t_0 = 24,00\text{ s}$, $t_1 = 28,05\text{ s}$, $t_2 = 174,37\text{ s}$, $u_0 = 0$, $u_\infty = 20$, $y_0 = 28,47$ e $y_\infty = 41,92$. Com estes valores calcula-se os parâmetros do modelo da planta $\tau_0 = t_1 - t_0 = 4,05\text{ s}$, $\nu_0 = t_2 - t_1 = 146,32\text{ s}$ e $K = (y_\infty - y_0)/(u_\infty - u_0) = 0,67$. Estes valores estão bem próximos aos obtidos pela identificação realizada descrita na seção 4.1. Para um controlador PI os parâmetros calculados foram $K_p = 43,35$ e $T_r = 12,15\text{ s}$.

Utilizando os parâmetros obtidos, foi implementado o controlador PI no LabVIEWTM e fechada a malha de controle para gerar o sinal PWM e de direção da ponte H. O comportamento do sistema em malha fechada está ilustrado na Figura 7. A planta foi submetida a pontos de operação de 35°C , 45°C , 55°C , 45°C , 35°C , 25°C e 15°C respectivamente. Pode-se visualizar que a resposta obtida muda de acordo com a faixa de temperatura. Este resultado é esperado para a resposta em malha fechada de um controlador PI clássico com atuador não linear. Isto ocorre quando a referência se afasta do valor ao qual o controlador foi linearizado ou sintonizado. Entretanto, o controlador apresenta desempenho satisfatório mantendo a saída no valor do ponto de operação selecionado.

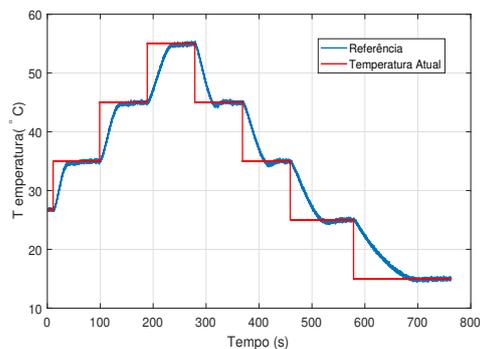


Figura 7: Resposta da planta com controlador PI.

4.3 Controle e Supervisório

Dentre as diversas possibilidades de utilização da planta didática proposta, a aplicação para sistemas de automação com controladores industriais permite ao aluno vivenciar problemas reais encontrados em ambiente de campo. Para validar a proposta foi desenvolvido um sistema de controle e supervisório completo composto por um PC, um CLP S7300 e uma IHM da Siemens TP700 Comfort. O software de desenvolvimento utilizado foi o TIA Portal V13. O controle da plataforma é feito pelo CLP que se conecta a IHM e ao PC através de uma rede Profinet de acordo com a topologia ilustrada na Figura 8.

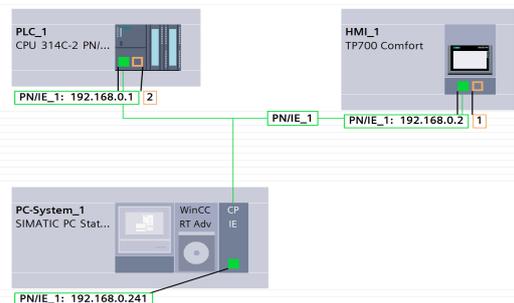


Figura 8: Controle e supervisório com CLP.

Todos os dispositivos são conectados a um Switch presente no laboratório formando uma rede local. O CLP foi programado em Ladder para adquirir o valor do sensor de temperatura e gerar o sinal de PWM e de direção necessários para controlar o módulo de Peltier. A saída de $0 - 10\text{ V}$ presente na PFD foi conectada a entrada analógica 0 do CLP. Para controlar o atuador foi utilizado a saída digital 0 com o sinal PWM e a saída digital 1 para controlar a direção da corrente no módulo de Peltier.

Em ambientes industriais a operação local da planta é feita através de uma IHM presente próxima ao sistema. Com este objetivo foi desenvolvida uma interface para a IHM TP700, que possibilita ao usuário visualizar os valores de temperatura e alarmes, além de poder modificar os ganhos

dos controladores e o ponto de operação. A interface desenvolvida pode ser visualizada na Figura 9.

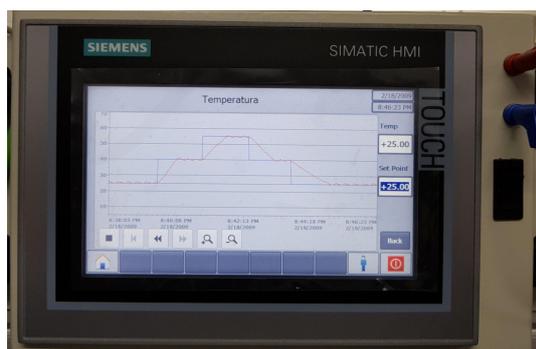


Figura 9: Interface Homem-Máquina.

A Figura 9 é uma fotografia real da IHM instalada no laboratório. A janela ilustrada possui um gráfico de tendência, um indicador do valor atual de temperatura e outro para controlar o ponto de operação. É possível visualizar a ação do controlador implementado mantendo o valor da saída de acordo com o ponto de operação selecionado. O comportamento obtido é similar ao ilustrado na Figura 7.

O supervisório desenvolvido apresenta interface similar à confeccionada para a IHM, com as devidas alterações para se visualizar através de um PC. O supervisório foi instalado no PC com endereço IP indicado na Figura 8. Entretanto, como o sistema está em rede local pode-se instalar o supervisório em qualquer computador do laboratório. Outra possibilidade é a criação de um banco de dados para armazenar as informações obtidas da plataforma didática.

4.4 Caracterização de Sensores de Temperatura

Foram utilizados para caracterização sensores de temperatura termoresistivos do tipo PT-100 e NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Nesta caracterização uma faixa de temperatura de 25,0 °C a 65,0 °C, com o multímetro Agilent 1252 como referência, foi utilizada.

Os sensores do tipo PT-100 são amplamente utilizados nos processos industriais e laboratoriais devido a sua elevada estabilidade e repetibilidade, resposta praticamente linear, alta precisão e uma ampla escala de temperatura. A resistência do sensor (R_T) pode ser calculada pela equação 3.

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (3)$$

onde R_0 é o valor da resistência a 0 °C e α é uma constante, denominada de coeficiente térmico (Balbinot and Brusamarello, 2010). De acordo com a norma IEC751 (padrão universal), para a platina α é 0,00385 $\Omega/\Omega^\circ C$. É apresentado na Figura 10 o resultado da caracterização e a curva

do modelo teórico sobreposta. Através de um ajuste de curvas foram determinados os parâmetros da equação 3, obtendo-se $R_0 = 100,446 \Omega$ e $\alpha = 0,00376 \Omega/\Omega^\circ C$, configurando um erro de 2,34% com relação ao valor teórico de α .

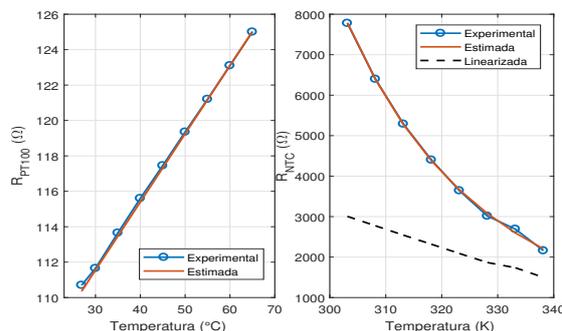


Figura 10: Caracterização do PT-100 e do NTC.

Os NTC são termistores que apresentam diminuição de sua resistência elétrica com o aumento da temperatura, ou seja, possuem um coeficiente negativo que relaciona as duas grandezas. O comportamento do NTC pode ser representado através da Equação 4.

$$R_T = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (4)$$

onde R_T é a resistência elétrica para uma temperatura T (em K, Kelvin), R_0 é o valor da resistência na temperatura de referência T_0 e β uma constante que depende do material do termistor. O gráfico mostrado na Figura 10 contém as curvas experimental, estimada e linearizada para o NTC. A linearização da curva foi realizada através de uma resistência em paralelo R_p com o sensor, calculada utilizando-se o método dos três pontos equidistantes. O valor encontrado foi de $R_p = 4,896 k\Omega$. Com o modelo linearizado há redução na não linearidade do sensor, porém o mesmo acontece com a sensibilidade. Os parâmetros estimados foram $\beta = 3.697$ e $R_0 = 9,556 k\Omega$ para um $T_0 = 25^\circ C$, o que está dentro das especificações encontradas em NTC comerciais.

5 Conclusões

A principal contribuição deste trabalho advém da deficiência presente em laboratórios em oferecer situações práticas para aplicação dos conteúdos. A PFD proposta supri esta necessidade, o que pôde ser comprovado através dos experimentos realizados. Os resultados obtidos foram bem próximos aos modelos teóricos, o que comprova a viabilidade e versatilidade da PFD. A capacidade da PFD não se limita aos experimentos apresentados, podendo ser utilizada em uma ampla variedade de aplicações. A não linearidade da planta a torna atrativa para a aplicação de técnicas de controle mais avançadas como *fuzzy*, controle adapta-

tivo, controladores não lineares entre outros controladores inteligentes. Entretanto, como demonstrado nos experimentos, é possível o emprego de controladores clássicos e técnicas de sintonia relativamente simples.

A utilização de padrões industriais para de sinais de entrada e saída torna a PFD flexível para o uso de dispositivos como CLP, PC, placas de aquisição e microcontroladores. Isto possibilita ao estudante realizar projetos e ações mais próximas a realidade encontrada na indústria, inclusive com a utilização de equipamentos industriais. A presença de conexões adequadas na PCI desenvolvida torna a ligação para estes equipamentos bastante simples e rápida.

A conexão com um microcontrolador, TM4C1294 por exemplo, permite que seja realizado um controle embarcado, podendo ser trabalhado conceitos de aquisição de dados, programação, sistemas embarcados e redes de sensores. Como o TM4C1294 possui placa *ethernet* é possível também construir soluções para internet das coisas e indústria 4.0.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a disponibilidade oferecida pelos Laboratório de Automação e Controle (LAC) e Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA), ambos da UFPB.

Referências

Araújo, T., de Sousa Filho, C. A., Lima, A. M. N. and Barros, P. R. (2005). Kit de desenvolvimento para microcontroladores aduc aplicado ao ensino de controle e automação, *XXXIII COBENGE-Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Campina Grande*.

Astrom, K. and Ostberg, A.-B. (1986). A teaching laboratory for process control, *IEEE Control Systems Magazine* **6**(5): 37–42.

Balbinot, A. and Brusamarello, V. (2010). Instrumentação e fundamentos de medidas, vol. 1, *Rio de Janeiro, Brazil: LTC*.

Bidoia, F. D. O. (2005). A importância de controladores de temperatura na indústria e logística farmacêutica, Disponível em: <http://www.farmacêuticas.com.br/a-importancia-de-controladores-de-temperatura-na-industria-e-logistica-farmacêutica>. Acesso em 15/02/18.

Chen, Y.-C. and Naughton, J. M. (2000). An undergraduate laboratory platform for control system design, simulation, and implementation, *IEEE Control Systems* **20**(3): 12–20.

de Souza, L. C., da Rocha, A. F. F. and Viana, T. N. (2015). Análise da implementação do controle de temperatura em uma indústria automotiva.

Emiliavaca, A., Cavalcanti, M. B. D., Vilar, Z. T., de Araújo, C. J., dos Reis, R. P. B. and da Rocha Souto, C. (2012). Desenvolvimento de um dispositivo para ciclagem térmica usando módulo peltier, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM.

Feisel, L. D. and Rosa, A. J. (2005). The role of the laboratory in undergraduate engineering education, *Journal of Engineering Education* **94**(1): 121–130.

Goodwin, G. C., Graebe, S. F. and Salgado, M. E. (2001). Control system design, *Upper Saddle River* p. 13.

Huang, B. and Duang, C. (2000). System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler, *International journal of refrigeration* **23**(3): 197–207.

Kolb, D. A. (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*, FT press.

Lugão, J. R. L. (2016). *Controlador de temperatura para célula de medição de propriedades de líquidos por ultrassom*, Master's thesis, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira.

Mannella, G. A., La Carrubba, V. and Brucato, V. (2014). Peltier cells as temperature control elements: Experimental characterization and modeling, *Applied thermal engineering* **63**(1): 234–245.

Nanophysics Group (2015). The fundamentals of thermoelectrics - a bachelor's laboratory practical.

Riffat, S., Omer, S. and Ma, X. (2001). A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and a phase change material: an experimental investigation, *Renewable Energy* **23**(2): 313–323.

Rowe, D. (1995). *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC-Press.

Sarmiento, N. L. D. (2016). Identificação e controle de um processo termoeletrico multivariável em escala laboratorial.

Zilouchian, A. (2003). A novel intelligent control laboratory for undergraduate students in engineering, *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, Vol. 1, IEEE, pp. 633–638.