

APLICAÇÃO DE MÉTODOS TÍPICOS INDUSTRIAS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID EM UM PROTÓTIPO DE SISTEMA TÉRMICO DE BAIXO CUSTO PARA ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE

EDUARDO PINTO MAGALHÃES*, ANDRÉ POLATSCHEK RODRIGUES*, WENDERSON DE SOUZA SILVA*,
EDUARDO BENTO PEREIRA*, MÁRCIO FALCÃO SANTOS BARROSO*

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UFSJ/CEFET)*
UFSJ - Universidade Federal de São João del-Rei
Pça. Frei Orlando, 170 - Centro - 36307-352 - São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil
Grupo de Pesquisa em Tecnologias e Promoção Humana
UFSJ - Universidade Federal de São João del-Rei
Pça. Frei Orlando, 170 - Centro - 36307-352 - São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

Emails: eduardopintomagalhaes@gmail.com, andre_polat@hotmail.com,
wenssilva@hotmail.com, ebento@ufsj.edu.br, barroso@ufsj.edu.br

Abstract— The learning of Proportional, Integral, Derivative (PID) controller tuning methods establishes a direct relation to didactic prototypes. In this context, the purpose of this work is to enhance the knowledge acquisition process and broaden students' interest, through the pedagogical incentive focused on practical teaching in the area of Control Systems. The present article deals with the development of a didactic plant and the modeling and temperature control of a prototype of a heating system. For the development and control of the didactic plant, low cost materials and resources already available in the laboratory were used. Several methods of PID tuning have been applied, generally used in industry as a motivation. The results presented are intended to demonstrate the operation of the prototype and its educational applicability in the Control Systems area.

Keywords— Thermal System, Control System, Education, PID.

Resumo— O aprendizado dos métodos de sintonia de controladores Proporcional, Integral, Derivativo (PID) estabelece uma relação direta aos protótipos didáticos. Nesse contexto, este trabalho tem como propósito potencializar o processo de aquisição do conhecimento e ampliar o interesse de alunos, mediante o incentivo pedagógico voltado para o ensino prático na área de Sistemas de Controle. O presente artigo trata do desenvolvimento de uma planta didática e da modelagem e controle da temperatura de um protótipo de um sistema de aquecimento. Para o desenvolvimento e controle da planta didática utilizou-se materiais de baixo custo e recursos já disponíveis no laboratório. Aplicou-se diversos métodos de sintonia PID, geralmente utilizados na indústria como motivação. Os resultados apresentados tem o intuito de demonstrar o funcionamento do protótipo e a sua aplicabilidade educacional na área de Sistemas de Controle.

Palavras-chave— Sistema Térmico, Sistemas de Controle, Educação, PID.

1 Introdução

A Engenharia está sempre necessitando de inovações em métodos de ensino. Segundo Froyd et al. (2012), alunos aprendem mais com métodos de aprendizagem cooperativa. Esses métodos são baseados em problemas e inquéritos quando comparados com abordagens que dão ênfase apenas a entrega da informação por meio da apresentação (Sarık and Kymissis, 2010).

A Educação em áreas aplicadas, como a Engenharia de Sistemas de Controle, assume muitas formas de ensino que vão desde o altamente teórico até o profundamente prático. Alunos de Engenharia destacam-se sob diferentes ênfases do ponto de vista do uso do conhecimento obtido no processo educacional. Aqueles que vão obter um grau mais alto, como uma pós-graduação, geralmente precisam de uma base sólida em princípios científicos básicos. Entretanto, alunos que optam por seguir uma carreira industrial normalmente precisam de um maior destaque na relevância prática (Goodwin et al., 2011).

Nesse contexto, há uma grande importância em ofertar aos alunos um ensino pragmático e didático por meio da construção e simulação de protótipos aplicados a indústria, tal como afirma Colón et al. (2009).

Ou seja, para que os alunos possam estar motivados a seguirem uma carreira industrial, as universidades precisam proporcioná-los uma experiência sobre como realizar projetos que demandam uma teoria, e que se transforme em experimental durante o ensino de determinada disciplina. Bristol (1986) afirma que nenhuma técnica teórica (cientificamente recomendada) foi devidamente ensinada a menos que tenha sido demonstrada experimentalmente, tanto no sucesso realista quanto no fracasso realista.

Decerto, para que os alunos adquiram tais aprendizagens é necessário que se envolvam com protótipos didáticos. Diante desse fato, cresce o interesse no desenvolvimento de protótipos de baixo custo com o propósito do ensino prático e pedagógico, por exemplo: o desenvolvimento de uma plataforma física de baixo custo para o ensino de técnicas de Sistemas de Controle (Janito et al., 2016); o uso de simulações virtuais na educação de Engenharia de Controle (Goodwin et al., 2011); o desenvolvimento de um equipamento didático de baixo custo para o ensino de Sistemas de Controle (Diógenes et al., 2016) e o desenvolvimento de um levitador magnético didático (Thiago et al., 2016). Em Sistemas de Controle, a aquisição de protótipos físicos industriais para a finalidade do

ensino investigativo e prático tem se tornado cada vez mais difícil. Os motivos desse dilema são: soluções comerciais de alto custo, escassez de recursos financeiros da instituição de ensino, escassez e inflexibilidade de funções técnicas e limitações pedagógicas desses protótipos.

Diante do exposto, o uso de protótipos de baixo custo é a estratégia mais adequada para desenvolver um ensino com o propósito de ampliar o desenvolvimento cognitivo e o interesse dos alunos pelo conteúdo. Portanto, neste trabalho apresenta-se um desenvolvimento de um protótipo térmico de baixo custo para aplicação de técnicas tradicionais de sintonia de controladores PIDs com um viés educacional. Devido a grande variedade de comportamentos de sistemas dinâmicos e a existência de inúmeras especificações de desempenho, há diversos métodos de sintonia de controle disponíveis para cada caso. Neste trabalho, serão consideradas as técnicas típicas utilizadas em processos industriais (Herbert and Mário Cesar, 2006).

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 são levantados conceitos sobre a plataforma microprocessada, o sistema de aquisição de dados e seu ambiente gráfico, além disso, uma revisão sobre o controlador PID, os tipos de implementação da lei de controle PID e os métodos de sintonia de controladores PIDs. Na Seção 3, a metodologia é apresentada descrevendo os detalhes da construção do protótipo bem como da modelagem do sistema, da simulação e da implementação do método mais adequado para o controle da planta. Na Seção 4, os resultados são apresentados e discutidos e finalmente na Seção 5 são apresentadas as conclusões e possíveis trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

Nesta Seção serão apresentados os recursos, as técnicas e os métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Quanto aos recursos, cujos alguns são de alta *performance*, foram aproveitados aqueles que estão disponíveis pelo laboratório da UFSJ. Embora são equipamentos e *softwares* de alto custo, os mesmos fornecem maior produtividade, pois agilizam os processos de integração, conectividade e condicionamento. Além disso, proporcionam um interfaceamento direto a qualquer sensor ou sinal elétrico.

2.1 Plataforma Microprocessada Arduino Uno

O processamento do sistema de controle e o envio de informações ao protótipo térmico implicam na utilização de um microcontrolador sofisticado. A escolha da unidade de processamento baseou-se em fatores como baixo custo, capacidade de processamento de dados e disponibilidade em laboratório. Por conseguinte, optou-se pela plataforma Arduino Uno, ilustrado na Figura 1, como a solução mais viável para alcançar o objetivo pretendido.



Figura 1: Arduino Uno Atmel.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica baseada na filosofia de *hardware* e *software* livres. A plataforma é destinada aos diversos tipos de aplicações e públicos, cujo seu manuseio é fácil e interativo (Sarik and Kymissis, 2010). A programação é realizada por meio de uma linguagem própria chamada *Wiring* e baseada em C/C++, onde é produzida e executada em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) (Badamasi, 2014).

2.2 Sistema de Aquisição de Dados CompactDAQ e o Ambiente Gráfico LabVIEW

O CompactDAQ é uma plataforma da *National Instruments* de aquisição de dados com elevada velocidade de processamento. O motivo da escolha dessa plataforma, ilustrada na Figura 2, baseou-se em fatores como exatidão em processamento de dados, condicionamentos de sinais, robustez, disponibilidade em laboratório e interface direta a vários sensores ou sinais (National Instruments, 2018).



Figura 2: CompactDAQ. Fonte: (National Instruments, 2018).

Alguns sistemas de medição contam com *softwares* que permitem o manuseamento de sinais. O LabVIEW é a arquitetura de *software* escolhida para realizar a interface do protótipo com o CompactDAQ devido a própria compatibilidade, pois é capaz de adquirir, analisar e apresentar os dados de maneiras rápida e fácil.

2.3 Controle Proporcional, Integral e Derivativo

A técnica de controle proporcional, integral e derivativa (PID) é utilizada em diversas aplicações de Sistemas de Controle devido a possibilidade de apresentar as seguintes características: ação de controle rápido, robustez, facilidade de implementação e versatilidade

(Bagis, 2011). Ela é a mais utilizada entre as técnicas de controle industriais pela capacidade de fornecer desempenhos satisfatórios e é designada para uma grande variedade de processos encontrados na indústria (Basílio and Nogueira, 2009). Antes de se obter o método de sintonia adequado do controlador PID, deve-se definir o critério de desempenho desejado, por exemplo: a temperatura deve ser mantida mais próxima de 60 °C e nunca exceder 62 °C (Herbert and Mário Cesar, 2006).

Geralmente, o desempenho do sistema de controle é especificado pelas características de resposta transitória a uma entrada em degrau. Essas características são as seguintes: o tempo de subida T_r , tempo que o sistema leva para ir de 0% a 100% do estado estacionário. O tempo de acomodação T_s , tempo necessário para a variável do processo alcançar valores entre uma faixa de 2% a 5% em torno do valor final. O tempo de atraso T_d , tempo necessário para que a resposta alcance metade do seu valor final pela primeira vez. O tempo de pico T_p , tempo necessário para que a resposta atinja o primeiro pico de sinal e o máximo sobre-sinal M_p , valor máximo de pico da curva de resposta, expresso como uma porcentagem (Herbert and Mário Cesar, 2006). É importante ressaltar que as definições dos índices de desempenho podem variar de um autor para outro. O controlador PID interfere nas características de resposta por meio das ações proporcional, integral e derivativa fornecidas pelos tipos de implementação do algoritmo PID.

2.4 Tipos de Implementação do Algoritmo PID

Para implementar o controlador PID é importante conhecer o tipo adequado do algoritmo para se obter o melhor desempenho desejado em um projeto (Johnson et al., 2005). Existem diversos tipos de leis de controle PIDs formadas pelos termos proporcional, integral e derivativo que realizam funções distintas, são elas: ideal, paralelo, paralelo alternativo, série, interativo e clássico (O'Dwyer, 2000), (Herbert and Mário Cesar, 2006). Dentre esses citados, o algoritmo paralelo clássico foi o utilizado. A Equação 1 do controlador PID paralelo clássico, cujo ganho proporcional afeta os termos integral e derivativo é a seguinte:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (1)$$

onde: $U(s)$ é a saída do controlador; $E(s)$ é o erro; K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e K_d é o ganho derivativo. A ação proporcional proporciona um erro no sistema. A ação integral remove erros estacionários e em regime permanente. A ação derivativa é proporcional à taxa da variação do erro (Ogata, 2011).

2.5 Métodos de Sintonia de Controladores PID

Para que o sistema tenha uma resposta dentro do desejado é necessário aplicar os métodos de sintonia para que o controlador otimize o processo. Sendo assim,

dentre os inúmeros métodos de sintonia PID, a Tabela 1 indica alguns dos métodos típicos industriais de sintonia de controladores PID baseados em modelos de primeira ordem. Eles são fornecidos por meio dos ganhos e fundamentados em critérios de resposta transitória (no domínio do tempo): Ziegler e Nichols (ZN) de malha aberta; Chien, Hrones e Reswick (CHR); Cohen e Coon (CC); integral do valor absoluto do erro (IAE); integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro (ITAE); modelo interno (IMC); Skogestad e Chidambaram (Herbert and Mário Cesar, 2006).

3 Metodologia

Esse trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Controle e Instrumentação (LACOI) do departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei. Sua concepção foi dividida nas seguintes etapas: desenvolvimento do protótipo físico didático, desenvolvimento do *driver* de potência, obtenção do modelo do sistema, definição dos critérios de desempenho, simulação do sistema e implementação do método de sintonia do controlador mais adequado fornecido pela Tabela 1, cujo λ é o parâmetro de desempenho, θ é o tempo morto, τ é a constante de tempo e A , B , C , D , E e F são as constantes para o cálculo dos ganhos dos métodos ITAE e IAE.

As simulações foram realizadas utilizando um computador com processador Intel Core i7-3537U de 2.00 Ghz, com memória RAM DDR3 de 6 GB em um sistema operacional Windows 10 Home de 64 bits. O *software* de computação numérica utilizado para a simulação dos métodos de sintonia foi o Matlab 2017a e sua ferramenta interna *Simulink*. O controle digital da temperatura durante a aplicação do método de sintonia foi realizado utilizando a plataforma Arduino Uno. Como forma de visualizar a temperatura em tempo real durante a experimentação prática utilizou-se o LabVIEW e a plataforma *CompactDAQ* para a aquisição dos dados. É importante ressaltar que o *CompactDAQ*, o Matlab e o LabVIEW foram utilizados para a validação do trabalho. Além disso, como forma de analisar a robustez do controlador PID, foi realizada uma perturbação temporária no sistema por meio de uma ventilação forçada.

3.1 Protótipo Didático

O protótipo da planta física ilustrada na Figura 3 consiste de uma caixa de vidro com um resistência interna em formato de tubo. Para calafetar o sistema de sua vizinhança, ou seja, impedir a troca de calor entre os meios, utiliza-se silicone entre as paredes. A parte superior é removível e uma de suas laterais pode ser aberta, o que dá acesso aos terminais da resistência elétrica fixada em um suporte de madeira no interior da caixa. É utilizada uma resistência elétrica de tubo de aço inox 304, pois é comumente encontrada em fornos elétricos e em sistemas de aquecimento de água. A mesma possui uma potência de aproximadamente

Tabela 1: Cálculo dos ganhos dos métodos de sintonia PID. Fonte: (Hebert and Mário Cesar, 2006).

Método	K_p	K_i	K_d
ZN	$\frac{1,2\tau}{K\theta}$	2θ	$0,5\theta$
CHR	$\frac{0,6\tau}{K\theta}$	τ	$\frac{\theta}{2}$
CC	$(1,35 + 0,25\frac{\theta}{\tau})\frac{\tau}{K\theta}$	$\frac{(1,35 + 0,25\frac{\theta}{\tau})}{(0,54 + 0,33\frac{\theta}{\tau})}\theta$	$\frac{0,5\theta}{(1,35 + 0,25\frac{\theta}{\tau})}$
Int. do Erro (ITAE/IAE)	$\frac{1}{k} \left(A^* \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{B^*} \right)$	$\frac{\tau}{(C^* + D^* \left(\frac{\theta}{\tau} \right))}$	$\tau \left(E^* \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{F^*} \right)$
Chidambaram	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} + 0,5 \right)$	$\tau + 0,5\theta$	$\frac{0,5\theta(\tau + 0,1667\theta)}{\tau + 0,5\theta}$
Skogestad	$\frac{\tau}{K(\lambda + \theta)}$	$\min \{ \tau, 4(\lambda + \theta) \}$	—
IMC	$\frac{2\tau + \theta}{K(2\lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{(2\tau + \theta)}$

ITAE - A: 0,965 B: -0,85 C: 0,796 D: -0,147 E: 0,308 F: 0,929

IAE - A: 1,086 B: -0,869 C: 0,740 D: -0,130 E: 0,348 F: 0,914

$\lambda = \theta$

600 W quando alimentada por uma tensão de 127 V. A Figura 4 ilustra uma representação simplificada e funcional do processo de controle e monitoramento do protótipo didático.

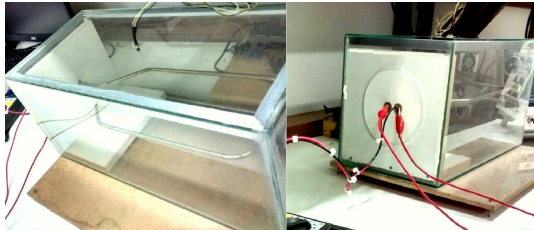


Figura 3: Protótipo da planta térmica.

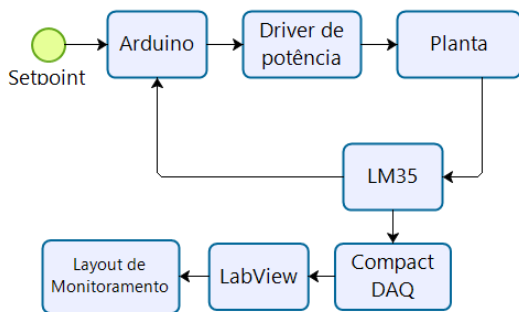


Figura 4: Modelo do sistema de controle e de supervisão utilizado para validação do protótipo.

3.2 Driver de Potência

Para fins de medição de temperatura optou-se por utilizar o sensor LM35. A escolha desse sensor foi baseada no baixo custo, na resposta linear, na precisão

e principalmente na baixa drenagem de corrente, cuja amplitude é de 60 mA. Para um projeto de controle de temperatura isso é ideal, pois é indesejável que variáveis adjacentes influenciem a resposta final do sistema. Além disso, o sensor possui uma variação de tensão de saída de 10 mV para cada grau Celsius (1 °C). Sua tensão de alimentação está entre 4 V e 20 V (Texas Instruments, 2017). O *driver* de potência tem como finalidade detectar o instante inicial do sinal elétrico senoidal da rede monofásica, identificá-lo pela passagem da onda pelo ponto 0 V e enviá-lo ao microcontrolador.

Como trata-se do controle de potência em corrente alternada (CA), utilizou-se um TRIAC (*Triode for Alternating Current*), dispositivo semicondutor não linear capaz de realizar a função de uma chave eletrônica bidirecional. Ele é fundamental para acionar grandes potências com uma corrente de amplitude na ordem de miliamperes. O TRIAC determinado para realizar adequadamente tal função foi o TRIAC BTA08-600B de 8 A de corrente máxima de trabalho (SemiWell, 2004). Ele foi utilizado para controlar o início da condução da senoide por intermédio da aplicação de pulsos em pontos determinados durante os ciclos da corrente alternada. Tal escolha foi crítica no projeto devido a drenagem máxima da corrente realizada pela carga, cuja magnitude é de 5,4 A a 127 V. Esse dispositivo é a saída do *driver* de potência e foi conectado a resistência.

No que se diz respeito ao envio de sinais elétricos entre os estágios de potência e de comando, utilizou-se o dispositivo opto acoplador CI 4N25. Ele é um componente encapsulado contendo um foto diodo e um foto transistor, cuja função foi determinar a passagem da onda elétrica pelo ponto 0 V em con-

junto com uma ponte retificadora completa de diodos (Semiconductors, 2010). Esse dispositivo teve também como função evitar o contato elétrico entre os estágios lógico e de potência, protegendo-os de ruídos e de interferências eletromagnéticas (Barbi, 2006).

O sinal proveniente do microcontrolador possui uma corrente baixa para disparar a chave bidirecional, diante disso, para finalmente fechar o ciclo de potência utilizou-se o CI MOC3020. Ele é também um opto acoplador capaz de realizar o acionamento do TRIAC por um sinal de luz produzido pela resposta de saída do microcontrolador. A Figura 5 mostra o circuito do *driver* utilizado para o controle de potência demonstrando a ligação elétrica dos componentes.

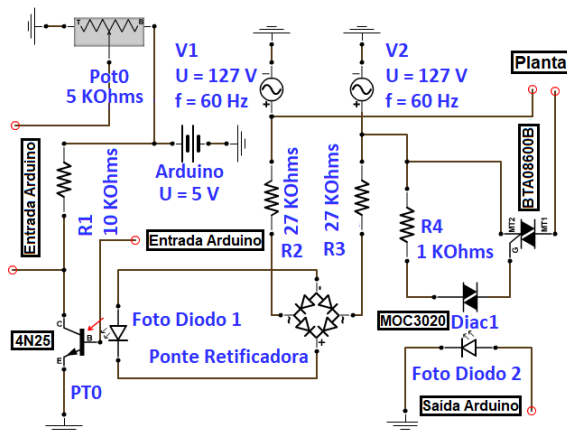


Figura 5: Circuito do driver de potência.

3.3 Obtenção do Modelo do Sistema

Partindo do conhecimento que um sistema de temperatura comporta-se como um sistema de primeira ordem, a função de transferência que o representa é expressa pela Equação 2

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

onde K é o ganho, θ é o tempo morto e τ é a constante de tempo. Para obter esses parâmetros utilizou-se uma metodologia de identificação, que consistiu em aplicar um sinal do tipo degrau em malha aberta na variável a partir de um *set point* para obter a dinâmica do processo.

Os dados foram adquiridos pelo sistema de aquisição de dados e a partir do *software* Matlab, obtiveram-se o tempo morto de 32 segundos, parâmetro correspondente ao atraso de resposta, a constante de tempo de 728 segundos, que é dado pela diferença entre o instante que a temperatura atinge 63,2% do valor final e o tempo morto, e o ganho de 0,733, que foi dado pela razão da diferença entre os valores máximo e mínimo de temperatura pela entrada ao degrau. A Figura 6 ilustra a resposta do sistema ao degrau aplicado.

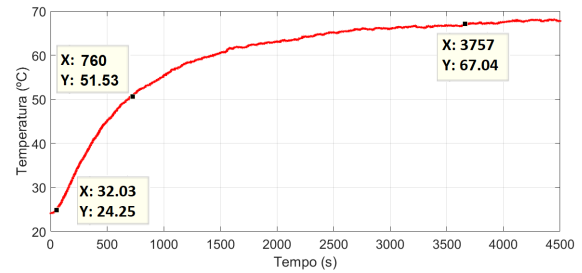


Figura 6: Resposta do sistema ao degrau e indicação de parâmetros. Intervalo de amostragem de 2 s. Fonte: Matlab 2017a.

Após a determinação dos parâmetros da curva de resposta, tem-se a função de transferência dada pela Equação 3:

$$G(s) = \frac{0,733e^{-32s}}{728s + 1} \quad (3)$$

3.4 Critérios de Desempenho

Antes de se aplicar os métodos de sintonia do controlador PID foi necessário definir os critérios de desempenho desejados. Sendo assim, neste trabalho foi definido que a temperatura se mantivesse em torno do *setpoint* de 50 °C, e que a mesma não devesse se exceder em 10% do valor definido durante todo tempo. Esse critério foi definido para demonstrar uma característica de robustez de controle propriamente dita. Inclusivamente, definiu-se que o método mais adequado devesse obter o menor tempo de subida. Tais escolhas motivam a atender e entender requisitos e demandas reais na indústria, cujo objetivo possa ser um controle da temperatura do habitat artificial de bactérias ou mesmo de um acionamento rápido de um aquecedor em uma indústria siderúrgica.

3.5 Simulação e Implementação do Sistema Em Malha Fechada

Para verificar o funcionamento dos métodos de sintonia de acordo com os critérios de desempenho definidos, calculou-se os ganhos K_p , K_i e K_d para cada método, determinados pela Tabela 1. Obtidos os ganhos, todos os métodos foram então simulados no *Simulink* utilizando a função *ode45* com o passo de integração variável, como indicado na Figura 7. A partir das curvas de reação dada pela simulação em topologia PID tradicional, determinou-se o método mais adequado para a aplicação. Com base nesses resultados, implementou-se no Arduino o controlador com os ganhos necessários para realizar o controle da temperatura.

4 Resultados

A Figura 8 mostra a simulação das curvas de reação do controlador para cada método de sintonia. Observa-se que todas as sintonias foram aplicadas corretamente e

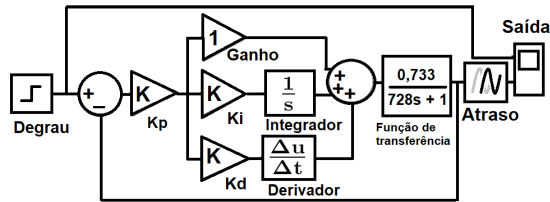


Figura 7: Diagrama de simulação do sistema térmico da planta didática. Fonte: Matlab 2017a.

com o degrau definido em 50 °C percebeu-se que os métodos ZN e CC forneceram os *overshoots* mais altos e os menores tempos de subida e de acomodação em regime transitório até se estabilizarem. Ressalta-se que a resposta brusca em relação ao *setpoint* determinado representa um erro no sistema, o que é indesejável. Os métodos CHR, IAE, ITAE e Chidambaram forneceram os menores tempos de subida e os maiores tempos de acomodação enquanto o IMC se destacou pelo maior tempo de acomodação e de subida. Por meio da análise comparativa foi possível determinar o método mais adequado para o sistema a ser controlado, baseando a escolha nos critérios de desempenhos pré-estabelecidos. A justificativa da escolha do método de Skogestad para a aplicação é por esse ter demonstrado uma resposta dinâmica mais coerente com os desempenhos determinados, ou seja, menor *overshoot* e menor tempo de subida.

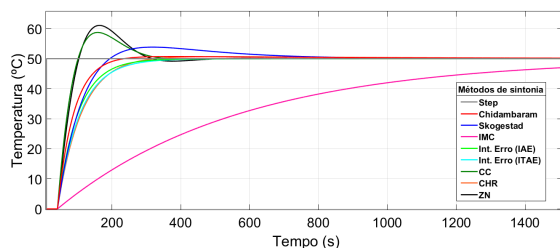


Figura 8: Curvas de reação dos métodos de sintonia PID simuladas. Passo de integração variável utilizando o ode45. Fonte: Matlab 2017a.

Na Tabela 2, tem-se os resultados dos desempenhos de cada método de sintonia. Excluindo os métodos com o sobre-sinal acima de 10%, o Skogestad é aquele que possui o menor tempo de subida.

A Figura 9 ilustra o desempenho satisfatório do sistema controlado. O controle foi eficaz e atendeu aos requisitos de desempenhos exigidos à aplicação. Observa-se um nível satisfatório de rastreamento durante o regime permanente quando o controlador atingiu a temperatura de 50°C em 650 s. Aos 1242 s foi aplicada uma perturbação no sistema, cuja ação foi forçar a troca de calor dentro da caixa. O sistema recuperou-se em 293 s com o controlador restabelecendo novamente a temperatura de *setpoint*. Durante o processo de controle o maior pico de temperatura foi de 53,04°C, cujo valor está dentro do critério de limite. Outro detalhe importante é que existem oscilações na tensão que é fornecida pela rede de alimentação, bem

Tabela 2: Dados de desempenho dos métodos propostos.

Método	Tempo de subida (s)	Sobre-sinal (%)
Chidambaram	236,0	1,4
Skogestad	194,2	7,6
IMC	3000,0	0,0
IAE	613,0	0,0
ITAE	798,5	0,0
CC	101,7	17,4
CHR	327,3	1,3
ZN	104,1	22,1

como inconstâncias na frequência da rede, o que gerou pequenas variações na resposta final do sistema. De todo modo, o sistema de baixo custo provou ser confiável mantendo em regime permanente uma média de 50,8°C.

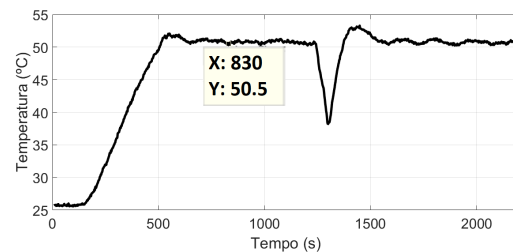


Figura 9: Resposta do sistema real para o método de Skogestad. Intervalo de amostragem de 2 s. Fonte: Matlab 2017a.

A Figura 10 mostra o resultado final do *driver* de potência, cujo custo final de produção foi de R\$ 32,58. A Figura 11 ilustra também o resultado final do protótipo didático desenvolvido especialmente para aplicação dos métodos de controle PID, cujo custo de produção foi de R\$ 35,00. Tem-se a caixa com a resistência de tubo interna contendo o sensor, o *driver* de potência e o Arduino Uno fixado em uma parede de acrílico. Um multímetro foi utilizado para medir a corrente sendo drenada pela resistência no momento da utilização da planta. Observa-se na Figura 11 a indicação do valor de 1,83 A de corrente. Esse valor correspondeu ao momento de estabilização do sistema durante o rastreamento de *setpoint*. Ressalta-se que em regime transiente a corrente drenada pela resistência chegou a picos de 2,8 A.

5 Conclusão

O artigo apresenta o desenvolvimento de um ambiente didático de baixo custo para a implementação de métodos típicos de sintonia de controladores PIDs, especificamente para o ensino de Sistemas de Controle. Foi proposta uma metodologia investigativa dos métodos por meio da simulação, cujos resultados permitiram

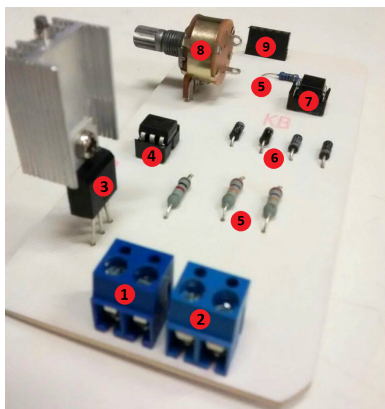


Figura 10: Driver de potência. Componentes: 1- Saída para planta; 2- Entrada de alimentação 220 V; 3- BTA08600B; 4- MOC3020; 5- Resistores; 6- Ponte retificadora; 7- 4N25; 8- Potenciômetro 5 Kohms; 9- Entrada/Saída para o Arduino.

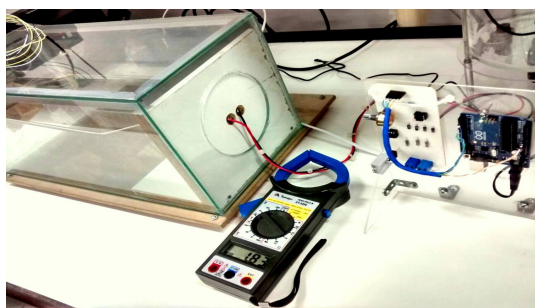


Figura 11: Protótipo didático da planta térmica.

a avaliação prévia do comportamento do sistema de controle. A partir disso, foi selecionado o método de Skogestad, pois foi o que mais se adequou aos critérios predeterminados, a fim de validar o funcionamento do protótipo. Sobre esse método, verificou-se um desempenho satisfatório quando imposta uma perturbação transitória. Este trabalho contribuirá de forma significativa para o ensino de Sistemas de Controle, de modo a complementar o conhecimento teórico utilizando a planta.

Em trabalhos futuros, pretende-se desenvolver um relatório com roteiros práticos, com o objetivo de aplicar todas as técnicas aqui destacadas a fim de demonstrar as diferenças de sintonia PID. O que tornará o processo de aprendizagem mais pedagógico e motivacional. Além disso, pretende-se criar um *shield* referente ao *driver* com a pinagem para encaixe direto no Arduino. Criar uma interface gráfica para oferecer ao usuário opções de escolha dos métodos de sintonia. Mais ainda, criar um algoritmo utilizando um *software* livre, que capte a resposta do sistema de forma automática ao se aplicar um degrau eliminando a necessidade do uso do Labview. Sobre os métodos de sintonia de controladores PID de cunho industrial, outras abordagens poderão ser desenvolvidas a partir do uso da lógica *Fuzzy* e algoritmos genéticos. Também poderão ser aplicadas outras topologias de controlador PID

além do PID tradicional.

Agradecimentos

Os autores agradecem, pelo suporte financeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Associação Ampla UFSJ/CEFET-MG, ao Programa Institucional de Extensão (PIBEX-UFSJ), ao Programa de Extensão Universitária (ProExt) do MEC/SISU, ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI) e ao Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE).

Referências

- Badamasi, Y. A. (2014). The working principle of an arduino, *Electronics, computer and computation (icecco), 2014 11th international conference on*, IEEE, pp. 1–4.
- Bagis, A. (2011). Tabu search algorithm based pid controller tuning for desired system specifications, *Journal of the Franklin Institute* **348**(10): 2795–2812.
- Barbi, I. (2006). *Eletrônica de Potência*, Edição do Autor, Florianópolis.
- Basílio, J. C. and Nogueira, V. N. (2009). Ajuste de controladores pi e pid para plantas estáveis e instáveis.
- Bristol, E. (1986). An industrial point of view on control teaching and theory, *IEEE Control Systems Magazine* **6**(1): 24–27.
- Colón, D., Teixeira, V. A. and Diniz, I. S. (2009). Teaching and comparing advanced control techniques in a ball and beam didactical plant, *Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering*.
- Diógenes, V. M. F., Segundo, A. K. R., Gomide, V. D. O. and Nogueira, H. S. (2016). Sistema didático de controle de temperatura, *Congresso Brasileiro De Automática - CBA*.
- Froyd, J. E., Wankat, P. C. and Smith, K. A. (2012). Five major shifts in 100 years of engineering education, *Proceedings of the IEEE* **100**(Special Centennial Issue): 1344–1360.
- Goodwin, G. C., Mediol, A. M., Sher, W., Vlacic, L. B. and Welsh, J. S. (2011). Emulation-based virtual laboratories: A low-cost alternative to physical experiments in control engineering education, *IEEE Transactions on Education* **54**(1): 48–55.
- Herbert, C. G. T. and Mário Cesar, M. M. D. C. (2006). *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*, Edgard Blücher.

- Instruments, N. (2018). Compact daq, <http://www.ni.com/white-paper/14029/pt/>. Acessado em Dezembro de 2017.
- Janito, d. S. R., Machado, L. T., dos Santos Neto, A. F., dos Santos Neto, M. F. and dos Santos, M. F. (2016). Projeto de um sistema ball and beam para o ensino de controle automático, *Congresso Brasileiro De Automática - CBA*.
- O'Dwyer, A. (2000). A summary of pi and pid controller tuning rules for processes with time delay. part 1: Pi controller tuning rules, *IFAC Proceedings Volumes* **33**(4): 159–164.
- Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*, Pearson Prentice Hall.
- Sarik, J. and Kymissis, I. (2010). Lab kits using the arduino prototyping platform, *Frontiers in Education Conference (FIE), 2010 IEEE*, IEEE, pp. T3C–1.
- Semiconductors, V. (2010). Optocoupler, phototransistor output, with base connection, <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>. Acessado em Dezembro de 2017.
- SemiWell, S. (2004). Bi-directional triode thyristor, http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet_pdf/semiwell-semiconductor/BTA08-600B.pdf. Acessado em Dezembro de 2017.
- Texas, I. (2017). Lm35 precision centigrade temperature sensors, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Acessado em Dezembro de 2017.
- Thiago, R. C., Bruno Augusto, A. and Bittar, A. (2016). Levitador magnético didático controlado por arduino, *Congresso Brasileiro De Automática - CBA*.