

PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR NO ENSINO DE CONTROLE EM MODELAGEM DE PROCESSOS FOPDT E NA SINTONIA DO CONTROLADOR PI-IMC

Rejane de Barros Araujo – rejane.barros@posgrad.ufsc.br

Daniel C. Jeronymo – d.cavalcanti@posgrad.ufsc.br

Gabriel Manoel da Silva – gabriel.manoel@gmail.com

Antonio Augusto Rodrigues Coelho – antonio.arc@ufsc.br
Departamento de Automação e Sistemas – GPqTCA – UFSC
Cx. Postal 476
88040-900 – Florianópolis – Santa Catarina

Resumo: Modelagem, sintonia de controladores PID e projeto de controle avançado são conteúdos teóricos necessários e de fundamental importância na formação de engenheiros de controle, elétrico, químico e de automação. Dado o grau de complexidade destes assuntos, diversas ferramentas computacionais vêm sendo desenvolvidas, com diferentes características e funcionalidades, tentando minimizar a dificuldade da relação ensino/aprendizagem e oferecer aos alunos um conjunto maior de opções para absorção destes conteúdos teóricos. Este artigo apresenta um novo ambiente computacional alternativo de ensino e treinamento em identificação de processos First-Order Plus Dead-Time (FOPDT) e sintonia do controlador PI através da técnica de projeto do Controlador por Modelo Interno (IMC – Internal Model Controller), utilizando modelos de primeira ordem simplificados a partir da representação FOPDT. A plataforma de simulação denominada PIPIMC, possui uma interface amigável, motivacional e intuitiva com o usuário, produz resultados dinâmicos desejados para avaliação e foi desenvolvida no ambiente Matlab[®].

Palavras-chave: educação em controle, identificação de processos, aprendizagem, controlador PI, sintonia IMC, simulação por computador.

1. INTRODUÇÃO

Os cursos de graduação em Engenharia de Controle e Automação e diversas engenharias possuem disciplinas na área de modelagem de sistemas e controle de processos, trabalhando técnicas clássicas e avançadas de sintonias de controladores PI e PID.

Segundo GUZMÁN *et al.* (2008), modelagem e identificação de processos são importantes conceitos nos cursos de Engenharia e são fundamentais na formação do engenheiro. Estes modelos são necessários, por exemplo, para projetos de controladores



clássicos e avançados, embora na maioria dos casos não representem todos os aspectos físicos do sistema, mas podem caracterizar a dinâmica do processo por alguns parâmetros, ou mesmo numa faixa de frequência, facilitando o projeto dos controladores, sobretudo na sintonia de controladores PID (representando 90% das aplicações industriais). Na literatura existe uma variedade de métodos de modelagem de primeira e segunda ordem para estimar os parâmetros que caracterizam a dinâmica do processo (VISIOLI, 2006; COELHO e COELHO, 2004).

O controle de processos é hoje parte fundamental dos modernos ambientes de produção e por alta eficiência, os controladores PID são amplamente utilizados, pois proporcionam soluções eficientes para a maioria dos sistemas, onde o ajuste dos parâmetros destes controladores faz parte do dia-a-dia dos engenheiros. Um dos métodos de ajuste de controladores PID bastante difundido na literatura e na indústria é o método baseado em função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte (*First-Order Plus Dead-Time* – FOPDT), devido a sua simplicidade aliada a aplicabilidade e boa qualidade em aproximar sistemas reais, compostos por dinâmica de primeira ordem, especialmente em indústrias químicas e petroquímicas. Esta representação fez com que diversos estudos de sintonia de controladores fossem desenvolvidos para calibrar os ganhos do controlador PID a partir do ganho K_p , da constante de tempo τ e do atraso de transporte θ . Técnicas avançadas de projetos de controladores PID, baseado em processos FOPDT, vêm sendo desenvolvidas e aplicadas na indústria, sendo o projeto do Controlador por Modelo Interno (IMC – *Internal Model Controller*), foco de estudo deste artigo, uma técnica eficiente, simples de sintonizar e hoje presente em softwares industriais (COELHO *et al.*, 2013; YU *et al.*, 2011).

Na formação do engenheiro de controle, elétrico, químico e de automação, são abordados conteúdos teóricos nas áreas de modelagem e controle de processos, onde estes são de difíceis entendimentos aos alunos, gerando uma série de dificuldades, no sentido de consolidar e aplicar os conhecimentos teóricos, motivando assim professores e pesquisadores envolvidos na área de educação da engenharia, em estudar métodos e/ou ambientes por computador, que auxiliem no ensino e aprendizagem dos alunos, minimizando as reprovações, evasões e as lacunas existentes na formação dos engenheiros (ROSSITER, 2013; GONZÁLEZ *et al.*, 2013). As ferramentas de ensino assistidas por computador são bastante desenvolvidas em diversas áreas da engenharia e também na área de identificação de sistemas e controle de processos, facilitando o ensino e aprendizagem, embora ainda exista muita carência de ferramentas completas, eficientes e de fácil acesso aos alunos (ORAVEC *et al.*, 2012; GUZMÁN *et al.*, 2008; FLORES *et al.*, 2000).

Este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma nova ferramenta de ensino assistida por computador na área de modelagem de processos FOPDT e na sintonia de controlador PI através do projeto IMC. O ambiente computacional denominado PIPIMC, possui uma interface amigável com o aluno/usuário, foi desenvolvida no software Matlab® e potencialmente aplica-se em um estudo de caso experimental num processo de temperatura.

O artigo está dividido da seguinte forma: Na seção 1 é apresentada uma breve introdução. Na seção 2 mostra-se uma descrição sobre modelagem para sistemas FOPDT e projeto do controlador IMC. Na seção 3 uma descrição detalhada do software desenvolvido, com sua estrutura, funcionalidade e aplicação prática e, na seção 5, as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são apresentados.

2. MODELAGEM E PROJETO DO CONTROLADOR PI EM PROCESSOS FOPDT

Nesta seção é descrita uma breve revisão teórica sobre os métodos de modelagem para processos FOPDT e o projeto de sintonia do controlador PI através da técnica IMC em modelos de processos simplificados que se enquadram na estimação FOPDT.

2.1. Modelagem Contínua FOPDT

Na área de identificação de sistemas dinâmicos testemunha-se uma variedade de métodos baseado na resposta ao degrau da planta para estimação dos parâmetros K_p , τ e θ , onde um grande número de plantas industriais pode ser aproximadamente modelada por uma função de transferência do tipo FOPDT, isto é,

$$G_m(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

onde K_p é o ganho estático, τ é a constante de tempo e θ é o atraso de transporte, parâmetros que podem ser obtidos experimentalmente pelo *open-loop step test* ou *closed-loop step test*, visando a sintonia do controlador PI (GRIMHOLT e SKOGESTAD, 2012; VISIOLI, 2006; COELHO e COELHO, 2004).

A Figura 1 descreve duas técnicas de modelagem e os instantes de tempo necessários no cálculo das constantes da equação (1) (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 2006; SEBORG *et al.*, 2004).

O ganho estático é calculado por $K_p = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)}$ e a modelagem pelos métodos

Smith/Corripio e Sundaresan/Krishnaswamy é realizada pelas seguintes relações, respectivamente: $(t_1, t_2) = (0.283y_f, 0.632y_f)$; $\tau = 1.5(t_2 - t_1)$; $\theta = 1.5t_1 - 0.5t_2$ e $(t_1, t_2) = (0.353y_f, 0.853y_f)$; $\tau = 0.67(t_2 - t_1)$; $\theta = 1.3t_1 - 0.29t_2$.

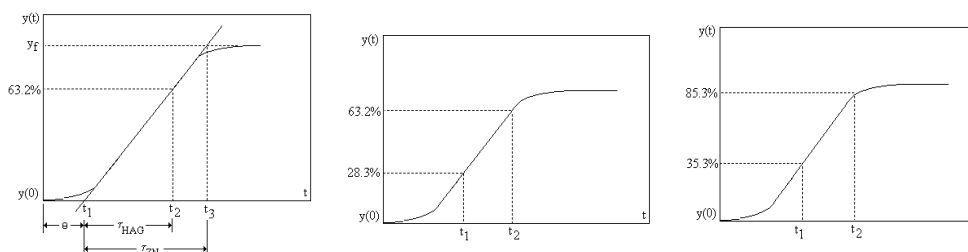


Figura 1 – Avaliação dos tempos na modelagem FOPDT.

Em alguns casos, a dinâmica de malha aberta pelo teste da resposta ao degrau pode ser difícil de obter experimentalmente, inviabilizando a estimação dos parâmetros do modelo FOPDT (por exemplo, em processos integrador ou instável). Nestes casos, é possível encontrar as medidas empregadas na identificação pelo ensaio de malha fechada. O procedimento de estimação de malha fechada abordado neste artigo é o proposto por GRIMHOLT e SKOGESTAD (2012). O sistema deve ser estável, convergente em regime permanente e, a partir da resposta de malha fechada, obtêm-se os seguintes parâmetros

conforme ilustra a Figura 2. Os parâmetros do processo são calculados pelas seguintes relações: $K_p = 1/(K_{c0}B)$; $B = |(\Delta y_s - \Delta y_\infty)/\Delta y_\infty|$; $\theta = t_p(0.309 + 0.209e^{-0.61r})$; $r = 2A/B$; $A = 1.152D^2 - 1.607D + 1$; $D = (\Delta y_p - \Delta y_\infty)/\Delta y_\infty$; $\tau = r\theta$.

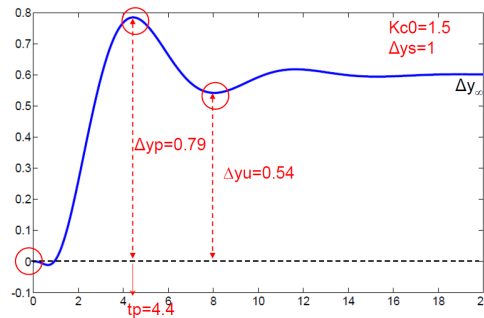


Figura 2 – Resposta de malha fechada com controlador proporcional.

2.2. Projeto do Controlador PI-IMC

A principal característica de projeto do controlador IMC é a estrutura simples da lei de controle, com poucos parâmetros para sintonia on-line e a facilidade de interpretação de calibração. O controlador IMC pode melhorar a robustez e desempenho do controle em sistemas com longo atraso de transporte e cuja compensação de realimentação ajuda, adicionalmente, no tratamento de incertezas do modelo e perturbações (RIVERA *et al.*, 1986).

Para sistemas de controle monovariáveis, o IMC emprega o inverso da parte de fase mínima do modelo e adiciona um filtro passa-baixa com parâmetro de sintonia visando garantir a implementação do sinal de controle e qualificar a forma do rastreamento da referência e rejeição de perturbação, erro nulo em regime permanente, estabilidade e robustez de malha. A Figura 3 ilustra a topologia do controlador IMC.

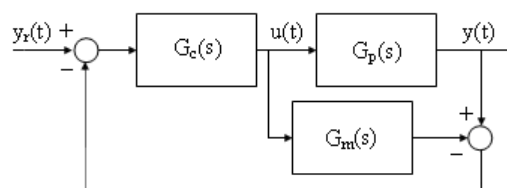


Figura 3 – Diagrama de controle da estrutura IMC.

Assumindo que o sistema de controle de malha fechada é estável, a seguinte relação pode ser obtida:

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)[G_p(s) - G_m(s)]} Y_r(s) \quad , \quad G_m(s) = G_m^+(s)G_m^-(s) \quad (2)$$

onde $G_m^+(s)$ contém os elementos de fase não-mínima e o atraso de transporte enquanto que $G_m^-(s)$ contém a parcela de fase mínima. Deve-se conectar um filtro passa-baixa de ganho

unitário em série com o controlador IMC. A função de transferência do controlador IMC assume a forma da equação (3), onde λ é o parâmetro do filtro e n a ordem do filtro.

$$G_c(s) = \frac{F(s)}{G_m^-(s)} \quad , \quad F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (3)$$

A maioria dos controladores utilizados na indústria é do tipo PID. Por questões de eficiência operacional de malha fechada, tratamento de plantas com longo atraso de transporte e simplicidade de programação/instalação, como um dispositivo de controle de campo, emprega-se a estrutura PI. O controlador PI analógico, do tipo ideal, tem a seguinte forma:

$$u(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right\} \quad \Rightarrow \quad G_c(s) = K_c \left\{ 1 + \frac{1}{T_i s} \right\} \quad (4)$$

onde $u(t)$ é o sinal de controle, $e(t) = y_r(t) - y(t)$ é o erro do sistema, K_c é o ganho proporcional e T_i o tempo integral.

Para tornar o controlador PI efetivo no tratamento de plantas complexas, diversas regras de calibração têm sido desenvolvidas desde o aparecimento da primeira proposta de J. G. Ziegler e N. B. Nichols em 1942. Em geral, as técnicas de projeto do controlador PI baseiam-se em métodos heurísticos, analíticos (paramétricos e não-paramétricos), inteligentes, de otimização e avançados (*auto-tuning* ou *self-tuning*).

Para obter-se o mapeamento entre os controladores IMC e PI, o diagrama de blocos da Figura 3 pode ser rearranjado de acordo com a Figura 4.

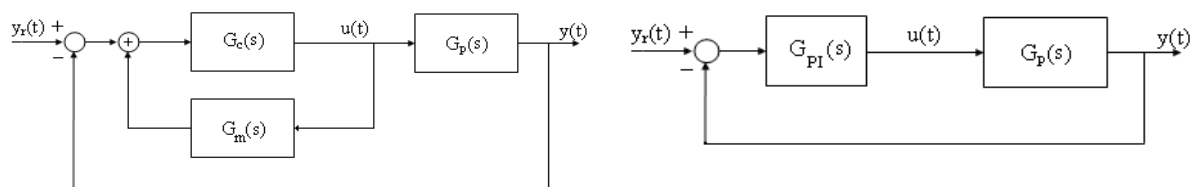


Figura 4 – Diagrama de blocos do IMC e PI.

Comparando os dois sistemas de controle da Figura 4, o controlador PI assume a forma

$$G_{PI}(s) = \frac{G_c(s)}{1 - G_c(s)G_m^-(s)} = \frac{G_m^-(s)^{-1}F(s)}{1 - G_m^+(s)F(s)} \quad (5)$$

Admitindo a planta com modelo FOPDT, equação (1), então se aproxima através de

$$G_m(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \approx \frac{K_p(1 - \theta s)}{\tau s + 1} = G_m^-(s)G_m^+(s) \Rightarrow G_m^-(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad , \quad G_m^+(s) = (1 - \theta s) \quad (6)$$

e substituindo na equação (5) obtém-se a função de transferência PI e os parâmetros (sintonia) do controlador

$$G_{PI}(s) = \frac{\tau s + 1}{K_p(\lambda + \theta)s} = \frac{\tau}{K_p(\lambda + \theta)} \left\{ 1 + \frac{1}{\tau s} \right\} \Rightarrow K_c = \frac{\tau}{K_p(\lambda + \theta)}, \quad T_i = \tau \quad (7)$$

A seleção de λ indica a velocidade da resposta para mudanças de referência. As principais propostas de sintonias PI *default* relacionadas na literatura de Controle de Processos são: RIVERA *et al.* (1986), $\lambda > 0.1\tau$ ou $\lambda > 0.8\theta$; CHIEN e FRUEHAUF (1990), $\theta < \lambda < \tau$; SKOGESTAD (2003), $\lambda = \theta$ e COOPER (2004), $\lambda > 0.1\tau$ ou $0.8\theta \Rightarrow 10\%$ a 15% de sobre-sinal e $\lambda > 0.5\tau$ ou $4\theta \Rightarrow$ resposta sem sobre-sinal. A tabela 2 relaciona a sintonia PI-IMC para modelos simplificados de primeira ordem.

Tabela 2. Sintonia PI-IMC via modelos simplificados da estimação FOPDT.

Modelos de Primeira Ordem	Sintonia PI-IMC	
$\frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \approx \frac{K_p(-\theta s + 1)}{\tau s + 1}$	$K_c = \frac{\tau}{K_p(\lambda + \theta)}$	$T_i = \tau$
$\frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \approx \frac{K_p}{\tau s + 1}$	$K_c = \frac{\tau}{K_p \lambda}$	$T_i = \tau$
$\frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \approx \frac{K_p}{(\tau + \theta)s + 1}$	$K_c = \frac{(\tau + \theta)}{K_p \lambda}$	$T_i = \tau + \theta$
$\frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \approx \frac{K_p}{\left(\tau + \frac{\theta}{2}\right)s + 1}$	$K_c = \frac{2\tau + \theta}{2K_p \lambda}$	$T_i = \tau + \frac{\theta}{2}$
$\frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \approx \frac{\bar{K}_p}{s} e^{-\theta s} \approx \frac{\bar{K}_p}{s}(-\theta s + 1)$ $\bar{K}_p = \frac{K_p}{\tau}$	$K_c = \frac{(2\lambda + \theta)}{\bar{K}_p(\lambda + \theta)^2}$	$T_i = 2\lambda + \theta$

Na avaliação do desempenho dinâmico de malha fechada, das diferentes sintonias PI, empregam-se as medidas de robustez do tipo margem de ganho (MG) e margem de fase (MF). Valores mínimos típicos são $1.7 < MG < 4$ e $30^\circ < MF < 45^\circ$. Outra medida de robustez é o valor de pico de M_s , obtido da função sensibilidade $S = 1/(1 + G_c G_m)$, para os quais valores pequenos são desejados, ou seja, $1.2 < M_s < 2$. Para $M_s < 2$ garante $MG > 2$ e $MF > 29^\circ$ (SEBORG *et al.*, 2004).

3. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

Atividades práticas de laboratório são importantes na formação do engenheiro, pois proporcionam melhor aprendizado, desenvolvem habilidades importantes, além de motivá-lo em estudos mais avançados. Na área de controle existem diversas propostas de trabalhos práticos em laboratório (COELHO *et al.*, 2013; GOMES *et al.*, 2012) e também elaboração de *toolboxes* com o intuito de oferecer ao aluno, estas atividades práticas, para um melhor entendimento da teoria, porém, muitos destes *toolboxes* são limitados e têm funcionalidades para determinados tipos de aplicações, não explorando de forma mais aprofundada as metodologias e teorias necessárias para um aprendizado mais eficiente (NETO e ALMEIDA, 2012; GUSMÁN *et al.*, 2008).

O software desenvolvido neste trabalho foi implementado no ambiente Matlab® e as interfaces gráficas foram desenvolvidas com os recursos GUIDE (*User Interface Development Environment*) do próprio Matlab, com o intuito de tornar o software, um ambiente de ensino e aprendizagem motivacional, amigável e autônomo ao aluno, com objetivos claros e dispostos de forma sequencial na elaboração dos experimentos.

A principal janela do software PIPIMC é observada na Figura 5 e foi desenvolvida para modelagem de processos FOPDT, onde o aluno/usuário, através da configuração da interface pode modelar diferentes tipos de sistemas com característica de primeira ordem, utilizando alguns métodos existentes na literatura. Nesta interface, o aluno/usuário tem a liberdade de escolher que tipo de processo simulado, onde o software disponibiliza três processos fixos: i) 3ª ordem com atraso, ii) atraso dominante (8ª ordem) e, iii) Lag dominante (1ª ordem). Além destes processos, simulados numericamente, o aluno/usuário pode embarcar dados tanto de ensaios de malha aberta como de malha fechada para realizar diferentes testes, ou seja, o aluno/usuário pode realizar ensaios reais (dados de campo), salvar estes dados em um arquivo com extensão “.dat” e utilizar o software para encontrar a correspondente função de transferência FOPDT.

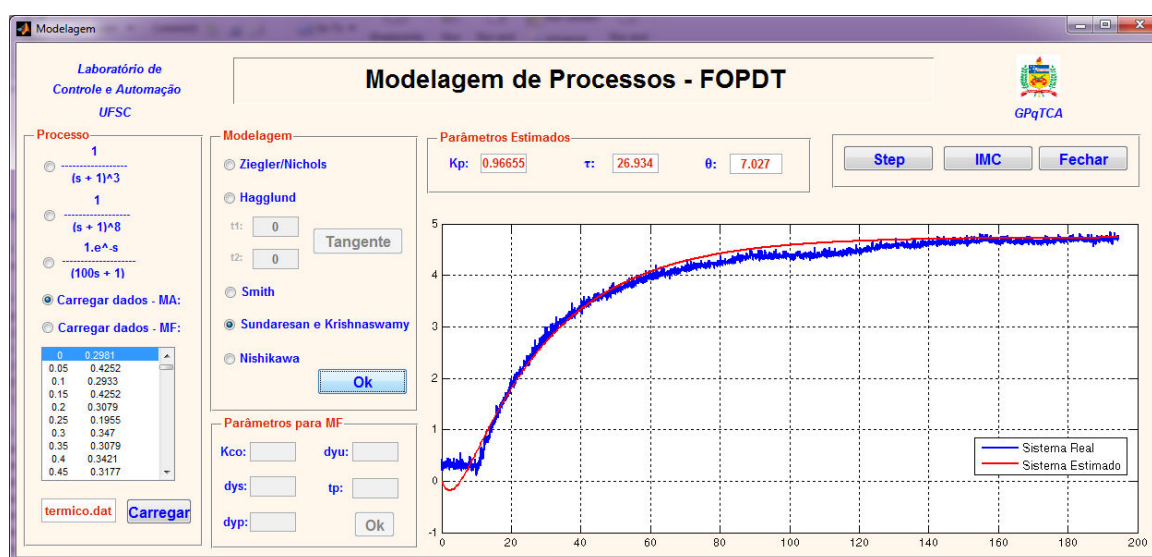


Figura 5 – Janela principal do software – modelagem FOPDT.

No software PIPIMC o aluno/usuário modela processos FOPDT utilizando os seguintes métodos: Ziegler-Nichols, Hagglund, Smith, Sundaesan e Krishnaswamy, Nishikawa, para ensaios de malha aberta e o método proposto por GRIMHOLT e SKOGESTAD (2012) para ensaios de malha fechada. Todos os métodos implementados no software retornam ao aluno/usuário os valores dos parâmetros estimados, como o ganho estático K_p , a constante de tempo τ e o atraso de transporte θ , para que o aluno/usuário possa construir o modelo matemático do processo, conforme equação (1). Para modelagem de malha fechada, os parâmetros K_{co} , dyu , dys , dyp e tp devem ser inseridos, a descrição destas variáveis e a teoria envolvida no desenvolvimento do software, encontra-se no material teórico, disponibilizado na interface de sintonia PI-IMC (Figura 6), com o intuito de auxiliar o aluno/usuário (botão **Teoria**).

Ainda na janela da Figura 5, através do botão **IMC**, o aluno/usuário pode abrir uma nova janela (Figura 6), onde são realizadas diferentes sintonias do controlador PI através do método de projeto IMC para modelos simplificados a partir do FOPDT. Na janela de **Sintonia PI-IMC** o aluno/usuário pode simular 5 (cinco) tipos de modelos e avaliar através de uma área gráfica e dos índices de robustez, qual ou quais modelos e sintonia se adaptam melhor ao estudo do processo controlado, visando atender as especificações de desempenho.

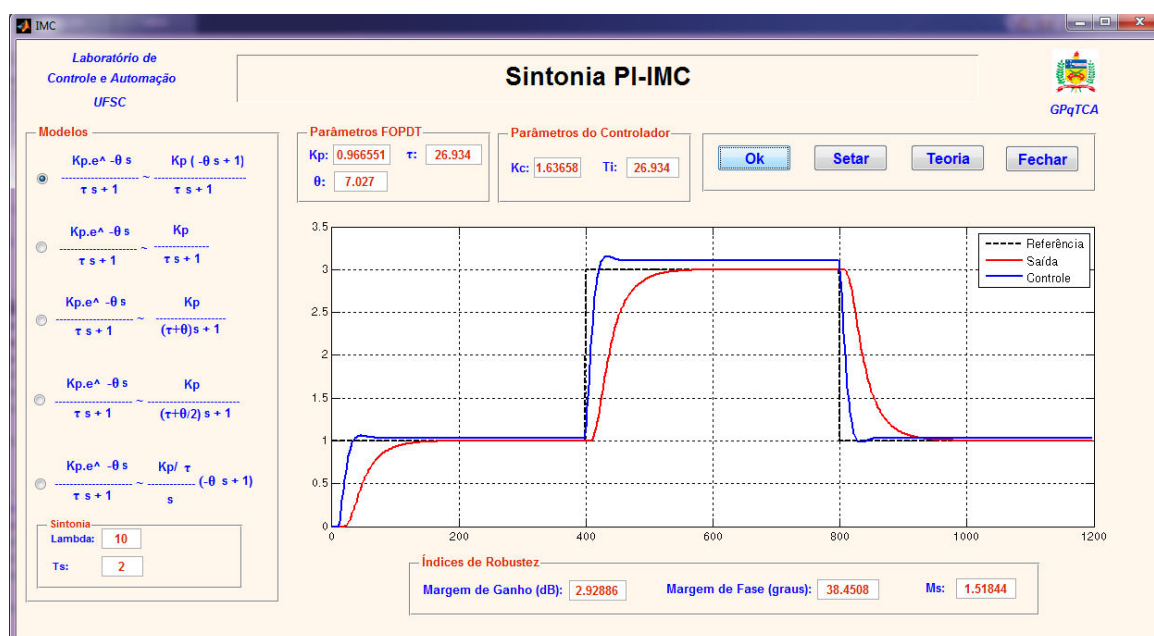


Figura 6 – Janela do projeto do controlador PI-IMC.

Ao setar (botão **Setar**) os parâmetros estimados na janela de **Modelagem de Processos - FOPDT** (Figura 5), o software migra os dados de K_p , τ e θ , para a janela de **Sintonia PI-IMC**. O aluno/usuário deve selecionar o modelo que é utilizado e digitar os valores de λ e T_s para a sintonia dos parâmetros do controlador PI, onde λ representa a constante do filtro de primeira ordem, que estabelece o compromisso entre robustez, estabilidade e desempenho e T_s é o período de amostragem. O software plota os sinais de saída, controle e referência do sistema, retorna os valores dos parâmetros do controlador PI (K_c e T_i) e dos índices de robustez (margem de ganho, margem de fase e M_s).

Para validar e ilustrar a potencialidade do software proposto são apresentadas a conectividade com o aluno/usuário e a evolução das simulações. Os ensaios foram realizados utilizando-se dados reais de um processo térmico, desenvolvido no Laboratório de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina, conforme ilustra a Figura 7.

O processo é uma caixa em madeira e acrílico e, para regular a temperatura no interior da caixa, controla-se a tensão de entrada da lâmpada, responsável pela geração do calor no interior do módulo (variável de controle). Existe um cooler acoplado, que é calibrado com uma tensão DC para operacionalizar a faixa e dinâmica de temperatura. A medição da temperatura é realizada pelo dispositivo LM35, sensor de precisão fabricado pela *National Semiconductor*. Os circuitos eletrônicos de medição e de atuação operam na faixa de 0 a 5 V.

A Figura 5 representa o teste de simulação no software PIPIMC, onde através de uma placa de aquisição de dados, realizou-se um ensaio de malha aberta do processo da resposta ao degrau e os dados de entrada e saída foram armazenadas em um arquivo. Em seguida, os dados foram carregados na interface **Modelagem de Processos - FOPDT** (Figura 5) e, através do método de Sundaesan e Krishnaswamy, obteve-se os valores estimados, equação (1), ou seja, $K_p = 0.9665$, $\tau = 26.93 s$ e $\theta = 7.027 s$.

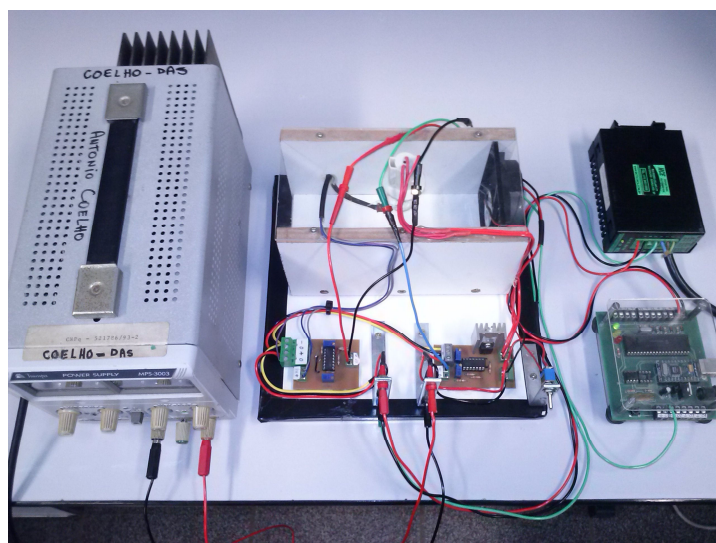


Figura 7 – Fotografia do protótipo do processo térmico de teste.

Na Figura 6 observa-se os resultados de sintonia do controlador PI através do projeto IMC, com a calibração do ganho K_c e constante T_i adequados para uma aplicação particular, através dos modelos de primeira ordem, levando-se em consideração os índices de robustez e desempenho dos sinais de saída e controle. A configuração da interface para sintonia do controlador PI-IMC foi realizada da seguinte forma: período de amostragem de 2 s, $\lambda = 10 s$ e modelo aproximado 1 da interface, observando-se os índices de robustez ($MG = 2.93 dB$, $MF = 38.45^\circ$ e $M_s = 1.52$), os quais estão na faixa de valores típicos permitidos e sugeridos na literatura que garantem estabilidade e robustez do processo controlado.

Explorando os aspectos educacionais e treinamento, o software PIPIMC foi desenvolvido com o objetivo de disponibilizar ao aluno/usuário uma ferramenta assistida por computador que permita:



- 1) **Testes de modelagem de processos FOPDT:** A partir de dados da planta, utilizando diferentes técnicas de identificação da literatura, de malha aberta ou malha fechada, desenvolver modelos dinâmicos de primeira ordem com atraso de transporte (estimando os parâmetros K_p , τ e θ) para um eficiente projeto do controlador PI;
- 2) **Sintonia de controlador PI pelo projeto IMC:** Avaliar diferentes métodos de calibração do controlador PI para diversos modelos simplificados de primeira ordem, observando as características de cada modelo na dinâmica de malha fechada, através do ajuste do parâmetro λ e do período de amostragem;
- 3) **Análise da dinâmica de malha fechada:** Visualizar, através de um ambiente gráfico a contribuição dos ajustes dos parâmetros do controlador PI, sob diferentes modelos aproximados do padrão FOPDT, na dinâmica de malha fechada do processo, bem como seu esforço de controle;
- 4) **Análise de sensibilidade ou robustez do sistema de malha fechada:** Através de critérios de análise e índice de robustez, como margem de ganho, margem de fase e M_s , avaliar a estabilidade e robustez do sistema de malha fechada, permitindo a sistemática comparação entre os diferentes modelos/sintonia e desta forma poder, por exemplo, embarcar em controladores *single-loops* ou CLP's.
- 5) **Os efeitos da sintonia com a redução da ordem do modelo:** A partir de um modelo de ordem superior, aproximando por um modelo FOPDT e combinando com o controlador PI, avaliar as vantagens e desvantagens da redução do modelo, em termos de estabilidade e desempenho do sistema de malha fechada.
- 6) **Ponto de vista computacional:** Através de uma ferramenta computacional, realizar ensaios com dados práticos ou numéricos com maior agilidade, segurança e motivação, pois o mesmo foi analisado e testado inúmeras vezes, avaliando-se diversas possibilidades de erros. Por outro lado, os algoritmos implementados no software podem ser escritos pelos alunos através de código no Matlab ou diagrama de blocos, no Simulink, mas estas estratégias podem se tornar cansativa e desmotivadora ao aluno/usuário, não tendo este a confiança, de que seu código ou diagrama esteja correto, levando-o em alguns casos, a desistir dos ensaios, perdendo a oportunidade de desenvolver habilidades em análise, projeto e avaliação de sistemas dinâmicos.
- 7) **Treinamento com dados de campo para indústria:** Através do software, o engenheiro da indústria pode coletar medidas de um determinado processo (dados e campo), carregar no software proposto, modelar utilizando modelos FOPDT, validar o modelo, sintonizar os parâmetros do controlador PI e embarcar estes valores em um CLP, por exemplo. O ambiente de simulação PIPIMC oferece a oportunidade para diversos ensaios sem comprometer a operacionalidade e estabilidade do processo.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma plataforma assistida por computador para apoio ao ensino/indústria e visando o aprendizado na área de modelagem e controle de processos, mais especificamente na sintonia do controlador PI através do projeto IMC. A utilização da ferramenta computacional como instrumento de ensino e aprendizagem permite ao aluno/usuário explorar os conhecimentos teóricos fornecidos em sala de aula, interagir e consolidar estes conhecimentos através de diferentes experimentos numéricos. Através do



software PIPIMC verifica-se as diferenças dos diversos modelos na sintonia de controlador PI, avaliando os índices de robustez, o desempenho da saída e do esforço de controle, além da influência do período de amostragem e do parâmetro λ do filtro na qualidade destes sinais e, conseqüentemente, na estabilidade/robustez do sistema controlado.

Os ensaios podem ser realizados em qualquer lugar que exista um computador com ou sem o Matlab instalado, dando ao aluno autonomia em desenvolver seus conhecimentos e pesquisa em ambientes distintos de trabalho.

Como proposta para trabalhos futuros, deseja-se reescrever o software em uma linguagem de programação de código livre, disponibilizando na internet para avaliações e contribuições. Adicionalmente, aplicações em *Hardware-In-the-Loop* estão sob desenvolvimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPGEAS-DAS da Universidade Federal de Santa Catarina, GPqTCA, CAPES e CNPq.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *Advanced PID Control*, Instrument Society of America, 2006.

CHIEN, I. L.; FRUEHAUF, P. S. Consider IMC Tuning to Improve Controller Performance, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 86, pp. 33, 1990.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*, Editora UFSC, Florianópolis, Brasil, 2004.

COELHO, A. A. R.; ALDEYTURRIAGA, R. O. G.; JUNIOR, C. A. A. L.; SILVEIRA, A. S. Low Cost Setup to Support PID Ideas in Control Engineering Education, 10th IFAC Symposium Advances in Control Education, Sheffield, UK, 2013.

COOPER, D. *Practical Process Control Using Control Station*, Published by Control Station, Inc, Storrs, CT, 2004.

FLORES, M. E.; RIVERA, D. E. *pIDtune™: A Graphical Package for Integrated System Identification and PID Controller Design*, Symposium on System Identification, Santa Barbara, CA, USA, 2000.

GOMES, F. J.; NETO, A. F. dos S.; QUINTINO, J.; BARBOSA, F. de S. Ensino de Eficiência Energética Aplicada ao Controle de Processos através do Matlab e de um Módulo Laboratorial de Baixo Custo, XL Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Belém, Pará, 2012.

GONZÁLEZ, J. C.; GUZMÁN, J. L.; DORMIDO, S.; BERENGUEL, M. Development of Interactive Books for Control Education, 10th IFAC Symposium Advances in Control Education, Sheffield, UK, 2013.

GRIMHOLT, C.; SKOGESTAD, S. Optimal PI-Control and Verification of the SIMC Tuning Rule, IFAC Conference on Advances in PID Control, Brescia, Italy, 2012.

GUZMÁN, J. L.; ÅSTRÖM, K. J.; DORMIDO S.; HÄGGLUND, T.; PIGUET, Y.; BERENGUEL, M. Interactive Learning Module: Basic Modeling and Identification Concepts, Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 2008.

- GUZMÁN, J. L.; ASTRÖM, K. J.; DORMIDO S.; HÄGGLUND, T.; PIGUET, Y.; BERENGUEL, M. Interactive Learning Modules for PID Control, IEEE Control Systems, Vol. 28, pp. 118, 2008.
- NETO, M. de O.; ALMEIDA, G. M. de. Elaboração de um Toolbox de Controle Preditivo do Tipo Controle Preditivo por Matriz Dinâmica (DMC) no Scilab, XL Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Belém, Pará, 2012.
- ORAVEC, J.; BAKOSOVÁ, M. PIDDESIGN – Software for PID Control Education, IFAC Conference on Advances in PID Control, Brescia, Italy, 2012.
- RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal Model Control. 4. PID Controller Design, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 25, pp. 252, 1986.
- ROSSISTER, J. A. Using Online Lectures to Support Student Learning of Control Engineering, 10th IFAC Symposium Advances in Control Education. Sheffield, UK, 2013.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; DOYLE, F.J. Process Dynamic and Control, John Wiley & Sons, 2004.
- SKOGESTAD, S. Simple Analytic Rules for Model Reduction and PID Control Tuning, Journal of Process Control, Vol. 13, pp. 291, 2003.
- VISIOLI, A. Practical PID Control, Springer, 2006.
- YU, Z.; WANG, J.; HUANG, B.; BI, Z. Performance Assessment of PID Control, 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011.

COMPUTER AIDED DESIGN FOR CONTROL TEACHING USING FOPDT PROCESS MODELING AND PI-IMC CONTROLLER TUNING

Abstract: *Modeling, PID controller tuning and advanced control design are necessary theoretical contents and of fundamental importance in the formation of electric, chemical, automation and control engineers. Given the complexity of these control ideas, several computational tools have been developed, with different characteristics and functionalities, trying to lessen the hardships in the teaching/learning relationship and offering to the students a larger set of options to absorb these theoretical contents. This paper presents a new computational platform as an alternative for teaching and training in First-Order Plus Dead-Time (FOPDT) process identification and PI control tuning, using the Internal Model Controller (IMC) design and also using simplified models from the FOPDT representation. This tool called PIPIMC, has an interface which is pleasant, motivational and intuitive for the user, produces desired dynamic results and was developed in the Matlab[®] environment.*

Key-words: *control education, process identification, learning, PI controller, IMC tuning, computer simulation.*