ISSN:2594-6153

Arquitetura Embarcada para Supervisão de Auto-Sintonia PI em IHM/CLP Industrial Aplicada a Processo Térmico

Thiago La Pastina dos Reis, Fernando José Cesílio Branquinho, Maurício Conceição Mario

Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos-SP, Brasil
E-mails: thiago.reis@unisanta.br; branqs@unisanta.br; cmario@unisanta.br

Resumo: O trabalho apresenta um supervisor de auto-sintonia PI incorporado ao programa executado na CPU de uma IHM/CLP industrial. Em uma partida a frio, a rotina define o intervalo de coleta a partir da resposta inicial da planta, registra a rampa de aquecimento e identifica um modelo FOPDT por regressão logarítmica. Com esse modelo, calcula ganhos candidatos por IMC/SIMC. Os valores são exibidos ao operador, sem substituir automaticamente os parâmetros do PI. A implementação usa memória fixa, não depende de bibliotecas externas e registra o diagnóstico da identificação.
Palavras-chave: auto-sintonia; controle PI; IHM/CLP industrial; sistema embarcado; processo térmico.

Embedded Architecture for PI Auto-Tuning Supervision on an Industrial HMI/PLC Applied to a Thermal Process

Abstract: This work presents a PI auto-tuning supervisor incorporated into the program running on the CPU of an industrial HMI/PLC. At cold start, the routine defines the sampling interval from the initial plant response, records the heating ramp and identifies a FOPDT model by logarithmic regression. Candidate gains are then calculated using IMC/SIMC. The values are displayed to the operator without automatically replacing the PI parameters. The implementation uses fixed memory, requires no external libraries and records the identification diagnosis.
Keywords: auto-tuning; PI control; industrial HMI/PLC; embedded system; thermal process.

Introdução

Controladores Proporcional-Integral (PI) são frequentes em aplicações industriais por exigirem poucos recursos computacionais e apresentarem relação direta entre seus parâmetros e a resposta da malha [1]. Existem diversas regras para sua sintonia [2]. Em processos térmicos, porém, inércia, tempo morto e condições de operação podem alterar a resposta da planta e tornar necessário rever o ajuste.

Neste trabalho, os ganhos são calculados a partir de um modelo obtido durante o aquecimento. A abordagem de Controle por Modelo Interno (IMC) relaciona os parâmetros identificados aos parâmetros do controlador [3]. Para a bancada foi adotado o modelo de primeira ordem com tempo morto (FOPDT), caracterizado pelo ganho estático K, constante de tempo τ e tempo morto θ [4].

O procedimento foi executado dentro da própria Interface Homem-Máquina integrada ao Controlador Lógico Programável (IHM/CLP), cuja unidade central de processamento (CPU) também controla a máquina. A rotina, portanto, precisa acompanhar o ciclo de varredura, consumir pouca memória e coexistir com o programa instalado. Este artigo descreve como a identificação, a validação e a sugestão de ganhos foram organizadas nessas condições. A avaliação quantitativa da malha fechada pertence ao estudo principal.

Objetivos: Descrever a implementação do supervisor de auto-sintonia PI na IHM/CLP industrial, incluindo a sequência de operação, as principais variáveis, os critérios de aceitação da identificação e a apresentação dos ganhos candidatos ao operador.

Material e Métodos

Os testes foram realizados em uma zona térmica aquecida por resistência elétrica e instrumentada com termopar tipo J. Na bancada, a CPU do CLP faz parte da própria IHM Branqs e executa tanto o programa de controle quanto o supervisor. A comunicação com os módulos BC8S e BC4TP ocorre pela rede Controller Area Network (CAN). O BC8S comanda a bobina do contator da resistência, e o BC4TP recebe a leitura do termopar inserido na massa de alumínio. A potência de aquecimento é modulada por largura de pulso (PWM) a partir da variável manipulada (MV); *timeSample* é o intervalo de coleta usado pelo supervisor na identificação.

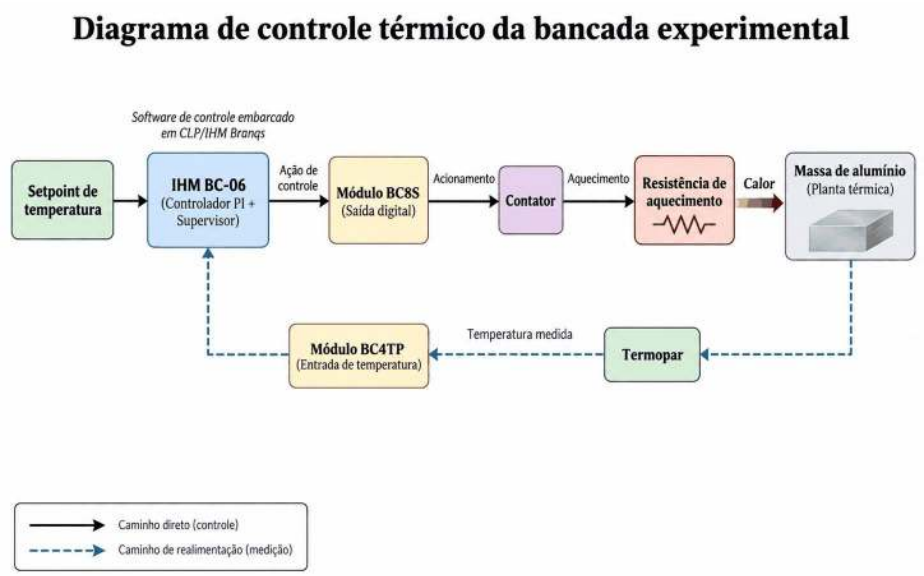

Figura 1. Diagrama de blocos da bancada térmica e da topologia de *hardware*.

O PI continua responsável pelo controle da temperatura durante todo o processo. O supervisor não substitui essa rotina: ele é executado após o cálculo do controlador e utiliza,

como dados de observação, a temperatura, o valor de referência (*setpoint*) e a saída percentual do PI.

A rotina foi implementada em C++ bare-metal (sem sistema operacional) e encapsulada em macros. DECLARA_SUPERVISOR(Zona1) cria variáveis e buffers da zona; EXECUTA_SUPERVISOR(Zona1, aquecimentoLigado) executa a lógica a cada ciclo, recebendo o estado do aquecimento. Nas macros, ##x substitui x pelo identificador da zona; temperatura##x e setPoint##x são a temperatura e o setpoint da zona. SUP_ e _sup_ identificam parâmetros/estados e variáveis internas.

A rotina opera como máquina de estados: SUP_ST_IDLE, SUP_ST_CALIBRA, SUP_ST_IDENT, SUP_ST_OK e SUP_ST_ERRO_ID correspondem à espera, calibração, identificação, conclusão e falha. A partida inicia somente com condição térmica adequada. Na calibração mede-se a subida inicial para definir o intervalo de coleta; na identificação armazenam-se temperatura, tempo e MV médio até 80% do caminho ao setpoint ou o limite de amostras.

Para a identificação foi adotado o modelo FOPDT (First Order Plus Dead Time), G(s) = K·e^(−θs)/(τs + 1). Nessa etapa, Tss (temperatura de regime estimada) é obtida a partir da tendência da rampa coletada. Em seguida, aplica-se regressão linear a log(Tss − T) em função do tempo para obter τ, θ e K [5]. Antes de aceitar o resultado, verificam-se limites para K e τ, a consistência de θ/τ e a cobertura mínima da subida. Com o modelo aceito, IMC/SIMC [3,6] calcula Kp (ganho proporcional), Ki (ganho integral) e Ti (tempo integral) candidatos. Esses valores são publicados na IHM como sugestão; os ganhos ativos permanecem inalterados até uma ação do operador.

Resultados

Com o supervisor incorporado, o PI continuou executando normalmente o controle de temperatura. A nova rotina atua durante a identificação sem escrever nos ganhos do controlador. A Figura 2 resume a sequência, da verificação de máquina fria à publicação dos valores calculados.



Figura 2. Fluxo funcional do supervisor embarcado de auto-sintonia PI.

A Tabela 1 relaciona cada etapa funcional do supervisor ao seu significado físico e aos respectivos identificadores utilizados no código, permitindo associar a lógica apresentada na Figura 2 à implementação embarcada.

Tabela 1. Etapas funcionais e identificadores usados na implementação.

Bloco funcional	Significado físico/funcional	Identificadores no código
Partida fria	Temperatura e setpoint; estado anterior do aquecimento; sinalização de inicialização.	temperatura##x; setPoint##x; _sup_aquAnt##x; _sup_bootOk##x
Calibração da coleta	Temperatura-base; início e duração da subida; intervalo de coleta.	_sup_TcalBase##x; _sup_tCalIni##x; supCalT5##x; supIntervalo##x
Coleta	Temperatura, tempo, MV médio e índice de amostras.	_sup_bufT##x; _sup_buft##x; _sup_bufMV##x; supIdx##x
Identificação	Rotina de regressão; K, τ e θ do modelo FOPDT.	_sup_reg(); _sup_K##x; _sup_tau##x; _sup_theta##x
Validação	Limites de K, τ, θ/τ e cobertura mínima da subida.	SUP_K_MIN; SUP_K_MAX; SUP_TAU_MIN; SUP_TAU_MAX; SUP_THETA_TAU_MIN; SUP_THETA_TAU_MAX; SUP_ID_COBERTURA_MIN
Sugestão	Kp, Ki, Ti e estado (status) do supervisor.	supKpSug##x; supKiSug##x; supTiSug##x; supStatus##x

O fluxo impede que uma identificação inválida chegue à sugestão de sintonia. A rotina coleta os dados, estima o modelo e verifica os limites definidos. Somente depois publica os ganhos. Caso alguma condição falhe, o estado de erro de identificação (SUP_ST_ERRO_ID) encerra a tentativa e o resultado é descartado.

Discussão

A literatura registra diferentes estratégias de auto-sintonia de controladores [7]. Neste trabalho, a opção foi identificar um modelo FOPDT na partida e calcular os ganhos por IMC/SIMC no mesmo hardware que executa a aplicação da máquina, sem transferir a curva de aquecimento para um computador externo. Diferentemente do uso de regras de sintonia sobre um modelo já disponível [1,3], K, τ e θ são obtidos pelo próprio programa antes do cálculo dos ganhos. O PI existente continua responsável pelo controle durante esse procedimento.

Duas decisões da etapa de identificação merecem registro. Tss não é medido diretamente porque a coleta termina antes do regime permanente; a estimativa parte da tendência da rampa coletada, considerando a redução da velocidade de aquecimento entre os trechos inicial e final da amostragem. O encerramento da coleta em 80% do caminho até o setpoint segue a mesma lógica: próximo ao regime permanente, a quantização da temperatura passa a ter maior influência sobre log(Tss − T) e degrada a regressão. Interromper a amostragem antes desse trecho preserva a qualidade do ajuste sem exigir memória adicional.

O cálculo e a aplicação dos ganhos também foram mantidos como etapas distintas. O supervisor obtém Kp, Ki e Ti e os apresenta na interface, mas os ganhos programados no controlador (kpProg##x para Kp e kiProg##x para Ki) só mudam por decisão do operador. A rotina, portanto, auxilia a ressintonia sem atuar como controle adaptativo contínuo.

Os vetores de tamanho fixo, acumuladores simples e testes por limites físicos foram escolhidos em função do hardware embarcado e são compatíveis com práticas de implementação de controladores industriais [8]. Este artigo se limita à arquitetura do supervisor e à sua integração à IHM/CLP; sobressinal e demais índices de desempenho são avaliados no estudo principal.

Considerações Finais

O supervisor passou a executar, na própria CPU da IHM/CLP, a sequência necessária para identificar a planta e calcular uma nova sintonia. Em uma partida válida, define o intervalo de coleta, registra a rampa de aquecimento, estima o modelo FOPDT e verifica seus parâmetros. Se a identificação for aceita, os ganhos calculados aparecem na IHM, mas o PI permanece com os valores atuais até a decisão do operador. Assim, a rotina de identificação pode ser incorporada à aplicação industrial sem assumir automaticamente o comando da sintonia.

Agradecimentos: O autor agradece à Branqs Automação pelo fornecimento da plataforma industrial utilizada neste trabalho e à Universidade Santa Cecília (UNISANTA) pelo apoio acadêmico e institucional.

Referências

1. Åström KJ, Hägglund T. Advanced PID control. Research Triangle Park (NC): ISA; 2006.
2. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 3rd ed. London: Imperial College Press; 2009.
3. Rivera DE, Morari M, Skogestad S. Internal model control: PID controller design. Ind Eng Chem Process Des Dev. 1986;25(1):252-265.
4. Branquinho FJC, Mario MC. Simulação da resposta de processos industriais com modelo FOPDT — First Order Plus Dead Time. Unisanta Science and Technology. 2014;3(1):11-15.
5. Ljung L. System identification: theory for the user. 2nd ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall; 1999.
6. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. J Process Control. 2003;13(4):291-309.
7. Åström KJ, Hägglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica. 1984;20(5):645-651.
8. Visioli A. Practical PID control. London: Springer; 2006.