

## DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE PID EM CASCATA PARA NÍVEL E VAZÃO EM SISTEMAS CHILLER

Antonio da Silva<sup>1\*</sup>, Alexandre Marcos Ferreira<sup>1</sup>, Dhyonatan Santos de Freitas<sup>1</sup>, Fabiana Regina R. Padilha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário SENAI Santa Catarina – Campus Joinville

### 1. Introdução

A automação de processos industriais tem evoluído significativamente com a aplicação de técnicas avançadas de controle, especialmente em sistemas térmicos como *chillers*. O controle preciso de nível e vazão é fundamental para garantir estabilidade operacional, qualidade do processo e segurança industrial. Controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) são amplamente utilizados devido à sua robustez, simplicidade e eficiência em sistemas industriais [1]. No entanto, estratégias convencionais como o controle ON/OFF ainda são frequentemente empregadas, apresentando limitações como oscilações e baixa precisão [2]. Nesse contexto, a utilização de controle PID em cascata surge como alternativa para melhorar a resposta dinâmica do sistema e a rejeição a perturbações externas [3]. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar essa estratégia aplicada a um sistema *chiller*, avaliando seu desempenho em comparação ao controle ON/OFF. Além disso, a crescente demanda por eficiência energética e confiabilidade operacional em sistemas térmicos industriais tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias de controle mais sofisticadas. Nesse cenário, o controle em cascata se destaca por sua capacidade de mitigar efeitos de perturbações internas e externas, melhorando significativamente a resposta dinâmica do sistema. Apesar de sua ampla aplicação, ainda existem lacunas na validação experimental em sistemas didáticos e industriais de pequeno porte, especialmente em ambientes de ensino tecnológico, o que justifica a relevância deste estudo.

### 2. Experimento

O sistema experimental consiste em um tanque cilíndrico instrumentado, com controle estruturado em duas malhas: primária de controle de nível e secundária de controle de vazão. A dinâmica do sistema pode ser descrita por um balanço de massa simplificado:

$$A \frac{dt(t)}{dh} = q_{in}(t) - q_{out}(t)$$

Desta forma, ( $A$ ) representa a área da seção transversal do tanque, ( $q_{in}$ ) a vazão de entrada e ( $q_{out}$ ) a vazão de saída. A estratégia de controle em cascata permite que a malha interna responda rapidamente às perturbações, estabilizando a malha externa e melhorando o desempenho global do sistema [3]. A implementação foi realizada em CLP (Controlador Lógico Programável) com sensores industriais integrados, permitindo aquisição de dados em tempo real e ajustes dos parâmetros do controlador PID.

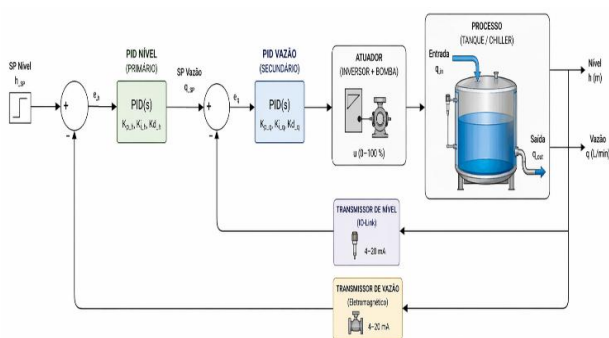
### 3. Resultados e Discussão

A arquitetura de controle em cascata utilizada no sistema pode ser observada na Figura 1, na qual a malha interna de vazão atua de forma mais rápida, contribuindo para a estabilização da malha externa de nível e aumentando a robustez do sistema frente a perturbações [3]. A resposta dinâmica apresentada na Figura 2 evidencia diferenças significativas entre as estratégias de controle avaliadas. O controlador PID em cascata apresenta comportamento suave, com *overshoot* reduzido (~5%), rápido tempo de acomodação e erro em regime permanente praticamente nulo, resultado da ação integral bem ajustada [1]. Em contraste, o controle ON/OFF apresenta comportamento oscilatório persistente em torno do ponto de operação, com maior tempo de estabilização e menor precisão, características típicas de estratégias discretas [2]. A melhoria no desempenho do controle em cascata está diretamente associada à atuação da malha interna de vazão, que responde rapidamente às perturbações, reduzindo seu impacto sobre a variável de nível. Além disso, observa-se que o sistema apresenta

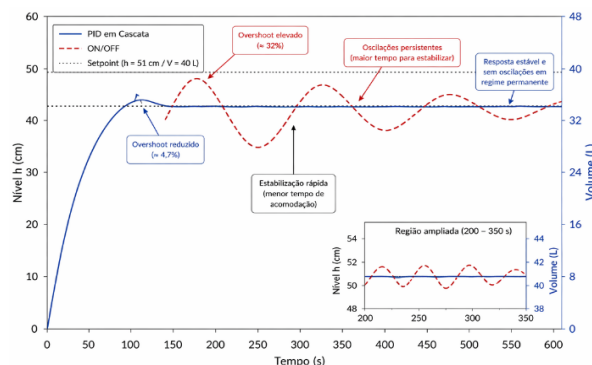
\*Autor correspondente: antonio.s@edu.sc.senai.br

comportamento compatível com um modelo dinâmico de primeira ordem com atraso, o que justifica a boa aderência do controlador PID ajustado. Esse tipo de comportamento é típico em sistemas hidráulicos com armazenamento, nos quais a dinâmica é governada por relações de balanço de massa e resistência ao escoamento.

Do ponto de vista prático, a adoção da estratégia em cascata contribui para maior estabilidade operacional, redução do esforço dos atuadores e melhoria da eficiência energética do sistema, uma vez que evita acionamentos excessivos e oscilações indesejadas. Adicionalmente, a estrutura em cascata facilita o processo de sintonia dos controladores, permitindo o ajuste independente das malhas interna e externa, o que aumenta a flexibilidade de implementação em ambientes industriais reais. Resultados consistentes com esses achados são reportados na literatura recente sobre controle em processos térmicos e hidráulicos [4], [5].



**Figura 1.** Diagrama de blocos – controle PID em cascata de nível e vazão. Estratégia: malha externa de nível (primária) – malha interna de vazão (secundária).



**Figura 2.** Comparação da resposta dinâmica do nível do tanque (40 l) utilizando controle PID em cascata e controle ON/OFF. O controle PID em cascata apresenta menor overshoot, menor tempo de acomodação e erro praticamente nulo em regime permanente.

#### 4. Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que a estratégia de controle PID em cascata proporciona ganhos significativos em desempenho dinâmico, estabilidade e robustez quando comparada ao controle ON/OFF. A redução do erro em regime permanente, aliada ao menor tempo de resposta e à diminuição das oscilações, evidencia a eficiência da abordagem proposta. Do ponto de vista científico e tecnológico, o trabalho contribui para a validação experimental de técnicas avançadas de controle em sistemas didáticos com aplicação industrial, reforçando sua relevância no contexto da Engenharia de Controle e Automação. Como trabalhos futuros, sugere-se a implementação de estratégias de controle adaptativo ou preditivo, visando otimização adicional do desempenho do sistema.

#### 5. Referências

- [1] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 2019.
- [2] D. Seborg et al., *Process Dynamics and Control*, 2021.
- [3] S. Skogestad, *Multivariable Feedback Control*, 2020.
- [4] J. Liu et al., *Cascade Control Strategy for Industrial Process Systems*, IEEE Access, 2023.
- [5] M. Zhang et al., *Advanced PID Control in Thermal Systems*, Journal of Process Control, 2022.