

PROTÓTIPO DE CONTROLE PID DE TEMPERATURA COM MONITORAMENTO REMOTO APLICADO A UM PROCESSO DE EXTRUSÃO

Ricardo Colaço Martins, João Victor Rabelo Barbalarga Souza, Andrey Henrique de Oliveira Silva, Leonardo Yuji Ishizaki e Victor Emanuel Correia de La Rosa

RESUMO

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo para controle e monitoramento de temperatura aplicado a um processo de extrusão de borracha. O objetivo consistiu em implementar um sistema de controle PID local, de forma cabeada e autônoma, aliado a um sistema de supervisão da variável de processo, permitindo a visualização dos dados em um painel supervisor. Como metodologia, foi utilizado um microcontrolador ESP32 para leitura do sensor de temperatura, execução do algoritmo de controle PID em tempo discreto e acionamento do elemento atuador. Paralelamente, os dados de temperatura foram transmitidos para um ambiente de supervisão instalado em um Raspberry Pi, possibilitando o acompanhamento remoto do processo. O protótipo foi integrado em uma estrutura física desenvolvida especificamente para o projeto, confeccionada por meio de impressão 3D, permitindo a organização dos componentes eletrônicos. Os resultados obtidos nos testes em bancada demonstraram estabilidade no controle de temperatura, resposta adequada às variações de referência e confiabilidade no sistema de supervisão. Conclui-se que o protótipo desenvolvido é tecnicamente viável, apresentando desempenho satisfatório nos testes em bancada, com potencial para aplicações experimentais e futuras validações em ambientes operacionais.

Palavras-chave: controle PID; monitoramento remoto; sistemas embarcados; automação industrial; processos térmicos.

Prototype of PID Temperature Control with Remote Monitoring Applied to an Extrusion Process

ABSTRACT

This paper presents the development of a prototype for temperature control and monitoring applied to a rubber extrusion process. The objective was to implement a local, wired, and autonomous PID control system combined with a supervisory system for the process variable, enabling data visualization through a supervisory dashboard. The methodology employed an ESP32 microcontroller for temperature sensor acquisition, execution of a discrete-time PID control algorithm, and actuation of the control element. In parallel, temperature data were transmitted to a supervisory

environment installed on a Raspberry Pi, allowing remote monitoring of the process. The prototype was integrated into a physical structure specifically developed for the project and manufactured using 3D printing, enabling proper organization of the electronic components. The results obtained from bench tests demonstrated temperature control stability, adequate response to reference variations, and reliability of the supervisory system. It is concluded that the developed prototype is technically feasible, presenting satisfactory performance in bench tests, with potential for experimental applications and future validation in operational environments.

Key words: PID control. remote monitoring. embedded systems. Industrial automation. thermal processes.

1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias embarcadas e a crescente incorporação de sistemas automatizados nos ambientes industriais têm impulsionado a busca por soluções que ampliem o controle, a segurança e a eficiência dos processos produtivos. Em processos térmicos, como a extrusão de materiais poliméricos, o controle preciso da temperatura é um fator determinante para a estabilidade operacional, a qualidade do produto e a preservação dos equipamentos, tornando-se um requisito essencial para a indústria de transformação.

Na empresa Multibelt Indústria e Comércio de Correias Ltda., localizada no município de Ibiporã, no Paraná, a produção de componentes industriais em borracha inclui a utilização de equipamentos de extrusão cujo controle térmico é realizado de forma predominantemente manual. Nesse cenário, o sistema de resfriamento do canhão da extrusora é acionado por meio de válvulas operadas manualmente, o que resulta em baixa precisão no controle da variável de processo e elevada dependência da intervenção do operador. Essa condição pode ocasionar instabilidades térmicas, comprometendo a repetibilidade do processo e qualidade do produto, além de contribuir para o aumento de perdas e retrabalhos.

Diante desse contexto industrial, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema embarcado para o controle e monitoramento da temperatura do canhão de uma extrusora de borracha, aplicado ao ambiente produtivo da indústria Multibelt. A proposta consiste na implementação de um controle

térmico local e autônomo, associado a um sistema de monitoramento remoto, visando aumentar a confiabilidade do processo e fornecer ao operador informações em tempo real sobre a variável controlada.

O desenvolvimento do protótipo proposto permite a avaliação técnica de uma solução automatizada para controle térmico, possibilitando a análise do desempenho de um controlador PID implementado em sistema embarcado e a integração com ferramentas de monitoramento remoto. A abordagem adotada viabiliza testes em bancada, reduzindo riscos associados à aplicação direta em ambiente produtivo e fornecendo subsídios técnicos para futuras etapas de validação e escalonamento da solução.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conceitos apresentados a seguir fundamentam o desenvolvimento do sistema embarcado para controle PID local da temperatura e monitoramento remoto em processos de extrusão de borracha, fornecendo a base teórica necessária para a descrição da metodologia adotada e análise de desempenho do protótipo desenvolvido.

2.1 Controle de Temperatura em Processos de Extrusão

A extrusão é um processo contínuo amplamente utilizado na indústria de transformação para a conformação de materiais poliméricos, incluindo borracha, plásticos e elastômeros. Nesse processo, o material é transportado, aquecido e moldado por meio da ação mecânica de uma rosca giratória confinada em um cilindro aquecido, sendo posteriormente conformado por um cabeçote com geometria específica (MANRICH, 2005).

A temperatura do canhão da extrusora é uma das principais variáveis do processo, pois influencia diretamente a viscosidade do material, o escoamento, a homogeneidade e as propriedades finais do produto. Variações térmicas excessivas podem provocar degradação do polímero, instabilidades no fluxo, defeitos

dimensionais e aumento do desgaste mecânico do equipamento. Dessa forma, o controle térmico adequado é essencial para garantir a estabilidade do processo e a qualidade do produto extrudado (MANRICH, 2005; GROOVER, 2011).

2.2 Controle PID em Processos Térmicos

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é uma das estratégias de controle mais utilizadas na indústria devido à sua simplicidade, robustez e eficiência em uma ampla variedade de processos. O princípio do controle PID baseia-se na ação combinada de três termos: proporcional, que responde ao erro instantâneo; integral, responsável pela eliminação do erro em regime permanente; e derivativo, que atua na antecipação das variações da variável do processo (OGATA, 2010).

Em processos térmicos, como o aquecimento e o resfriamento em sistemas de extrusão, a dinâmica do processo é caracterizada por resposta lenta e comportamento predominantemente inercial. Nessas condições, controladores PID, ou mesmo PI, apresentam desempenho satisfatório, proporcionando estabilidade e precisão no controle da temperatura quando corretamente ajustados (ASTRÖM; HÄGGLUND, 2006).

A implementação do controle PID de forma local garante que atuação sobre o processo seja independente de sistemas externos de supervisão ou comunicação, o que é fundamental para a segurança cibernética. Essa arquitetura aumenta a confiabilidade operacional e mitiga os riscos não apenas de atrasos e falhas de rede, mas também de ataques sem fio que possam comprometer a integridade e a disponibilidade dos dados de controle (BOYUM; MOYER, 2017).

2.3 Sistemas Embarcados na Automação Industrial

Sistemas embarcados são dispositivos computacionais dedicados, projetados para executar funções específicas dentro de um sistema maior, geralmente operando em tempo real. Na automação industrial, esses sistemas são amplamente empregados para aquisição de sinais de sensores, execução de algoritmos de controle e acionamento de atuadores (GROOVER, 2011).

O uso de microcontroladores em aplicações industriais tem se intensificado devido ao avanço tecnológico, à redução de custos e à elevada capacidade de integração com diferentes periféricos. Microcontroladores modernos permitem a implementação de estratégias de controle, aquisição contínua de dados e comunicação com sistemas supervisórios, tornando-se alternativas viáveis para aplicações experimentais e industriais de pequeno e médio porte (OGATA, 2010).

2.4 Internet Industrial das Coisas (IIoT)

A Internet Industrial das Coisas refere-se à aplicação dos conceitos de Internet das Coisas no contexto industrial, promovendo a interconexão de sensores, atuadores, sistemas embarcados e plataformas de supervisão e análise. Segundo Atzori, Iera e Morabito (2010), a IIoT possibilita a coleta e compartilhamento de dados entre dispositivos físicos, permitindo maior visibilidade e controle sobre os processos produtivos.

No ambiente industrial, o IIoT viabiliza o monitoramento remoto de variáveis de processo, o armazenamento de dados históricos e o suporte à tomada de decisão baseada em informações em tempo real. Em processos de extrusão, essa abordagem contribui para a rastreabilidade do processo, a identificação de desvios operacionais e a possibilidade de análises posteriores sem interferir diretamente na execução do controle local (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

2.5 Variáveis de Processo em Sistemas de Extrusão

Variáveis de processo são grandezas físicas que influenciam diretamente o comportamento e o desempenho de um sistema industrial. No processo de extrusão de borracha, destacam-se variáveis como temperatura do canhão, pressão interna, torque da rosca, velocidade de rotação e vazão do sistema de resfriamento. O controle adequado dessas variáveis é fundamental para garantir a estabilidade do processo e a qualidade do produto final (MANRICH, 2005).

O monitoramento contínuo dessas variáveis, aliado a estratégias de controle automático, reduz a dependência da intervenção humana, melhora a repetibilidade

do processo e contribui para a eficiência energética e operacional. Essa abordagem está alinhada aos princípios da Indústria 4.0, que enfatizam a integração entre automação, digitalização e conectividade dos sistemas produtivos (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem experimental, uma vez que envolve o desenvolvimento e avaliação de um protótipo para controle e monitoramento de temperatura em um processo de extrusão. Quanto aos fins, a pesquisa é classificada como exploratória e descritiva, pois busca analisar o comportamento do sistema desenvolvido em ambientes de bancada.

O estudo foi desenvolvido em parceria com a empresa Multibelt Indústria e Comércio de Correias Ltda., localizada em Ibiporã-PR. Não houve definição de universo e amostra no sentido estatístico, uma vez que o foco estava concentrado na avaliação técnica do sistema proposto.

A coleta de dados foi realizada por meio de ensaios experimentais em bancada, nos quais foram registrados os valores da variável de temperatura durante a operação do sistema.

A análise dos dados ocorreu por meio de uma abordagem quantitativa, considerando os registros de temperatura ao longo do tempo para avaliação da estabilidade do sistema e resposta do controlador PID. De forma complementar, foi realizada uma análise qualitativa, baseada na observação direta do comportamento do sistema, da atuação do mecanismo de controle e da integração entre os componentes eletrônicos e de comunicação.

3.1 Descrição do sistema de extrusão

O sistema de extrusão considerado neste trabalho é utilizado no processamento de borracha, sendo a temperatura do canhão uma variável crítica para

a estabilidade operacional do processo (GROOVER, 2016). O controle térmico é realizado por meio de um sistema de resfriamento baseado na circulação da água, cujo fluxo é regulado por uma válvula de acionamento, apresentada na figura 2, responsável pela diminuição controlada da temperatura do sistema.

Figura 1: Extrusora mono rosca LD-12



Fonte: Autor (2025)

Figura 2: Válvula de acionamento da água



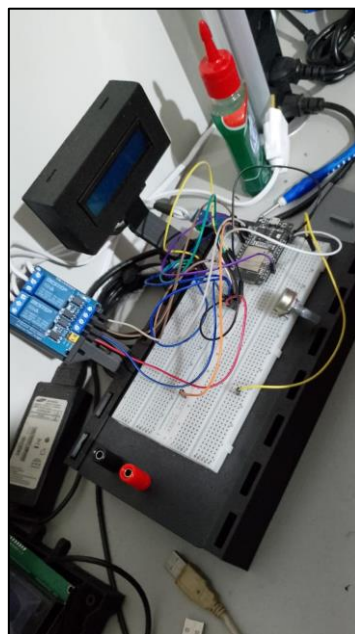
Fonte: Autor (2025)

A medição da temperatura do canhão é realizada por meio de um sensor de temperatura do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient), cuja resistência elétrica varia em função da temperatura, instalado para leitura contínua da variável de processo.

3.2 Protótipo desenvolvido

O protótipo desenvolvido foi projetado para simular as condições térmicas do processo real da extrusão, permitindo a implementação de um sistema de controle e monitoramento de temperatura em ambiente de bancada. O sistema embarcado utiliza um microcontrolador ESP32, responsável pela leitura do sensor de temperatura NTC, monitoramento e processamento de dados, execução do algoritmo de controle PID em tempo discreto e acionamento do elemento atuador.

Figura 3: Testes em bancada com o protótipo



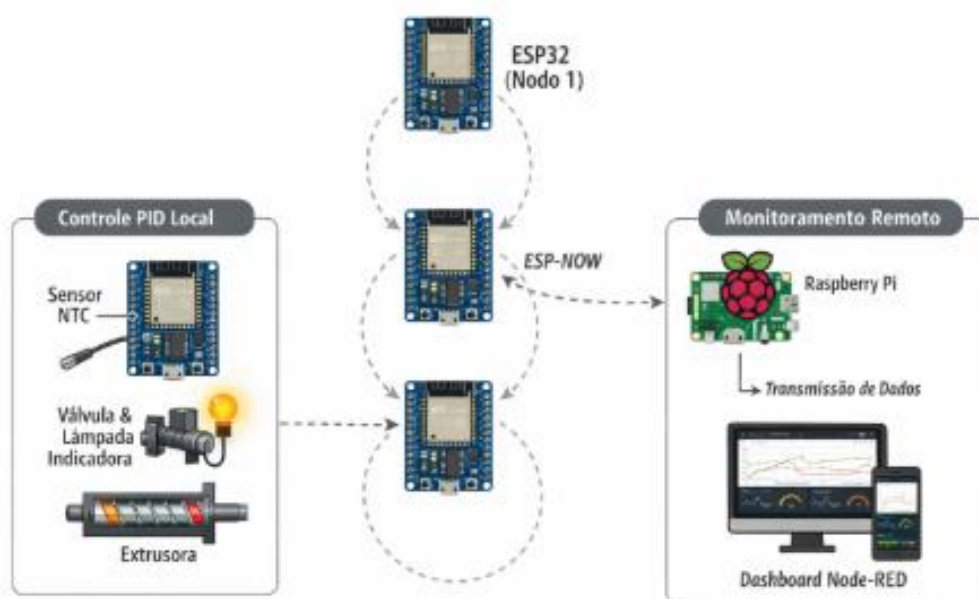
Fonte: Autor

O controle PID é implementado de forma local e autônoma, atuando sobre o erro entre a temperatura medida e o valor de referência definido. Os parâmetros proporcional, integral e derivativo foram ajustados experimentalmente durante os testes em bancada, visando obter estabilidade térmica e resposta adequada do sistema.

Paralelamente ao controle local, o sistema realiza o monitoramento remoto da temperatura por meio da comunicação sem fio utilizando o protocolo ESP-NOW, proprietário da Espressif, permitindo a transmissão dos dados para um ambiente de supervisão.

Para a montagem do Dashboard, utilizou-se um SBC (single board computer) Raspberry PI modelo 4, instalado com o sistema operacional de 64 bits. Os dados de temperatura do ESP32 são transmitidos para o Raspberry PI via serial, utilizando um conversor USB, que são posteriormente coletados pelo serviço NODE-RED, instalado no SBC. A figura 4 a seguir apresenta um diagrama do sistema proposto.

Figura 4: Diagrama do sistema.



Fonte: Autor (2025)

Os dados transmitidos são apresentados em um painel supervisor, possibilitando o acompanhamento em tempo real da variável do processo e o armazenamento de registros históricos.

Os componentes eletrônicos do sistema foram integrados em uma estrutura física desenvolvida especificamente para o trabalho, confeccionada por meio de impressão 3D, com o objetivo de organizar os dispositivos e garantir maior robustez ao protótipo durante os testes em bancada.

Figura 5: Protótipo desenvolvido.



Fonte: Autor (2025)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos referem-se aos ensaios realizados em bancada com o protótipo desenvolvido. Durante os testes experimentais, foi possível verificar o funcionamento adequado do sistema de aquisição de dados, do algoritmo de controle PID implementado localmente e do sistema de monitoramento remoto da variável de processo, evidenciando a integração satisfatória entre hardware e software.

A implementação do controle PID local mostrou-se funcional, permitindo o ajuste dos parâmetros proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d), bem como a análise de seus efeitos sobre a resposta térmica do sistema. Durante os ensaios, a atuação do controlador sobre o sistema de resfriamento pôde ser identificada visualmente por meio de uma lâmpada indicadora, instalada no interior de uma caixa confeccionada por impressão 3D, conforme ilustrado na Figura 6. Essa lâmpada sinalizava o acionamento da válvula de corrente, permitindo a verificação imediata do comando gerado pelo controlador.

Figura 6: Protótipo final com lâmpada indicadora



Fonte: Autor (2025)

A variação dos ganhos do controlador possibilitou a análise do comportamento dinâmico da temperatura em relação ao valor de referência, evidenciando diferenças na velocidade de resposta, na estabilidade do sistema e na presença de oscilações, conforme esperado para sistemas controlados por PID. Em condições iniciais, observou-se resposta mais lenta e maior tendência à oscilação. Após o ajuste adequado dos parâmetros K_p , K_i e K_d , o sistema apresentou comportamento estável,

mantendo a temperatura próxima ao valor de referência estabelecido, com redução significativa das oscilações e melhoria no desempenho dinâmico.

O painel supervisor implementado em Node-RED e executado em um Raspberry Pi apresentou funcionamento estável durante todos os ensaios realizados. O dashboard possibilitou a visualização em tempo real da temperatura do sistema, refletindo de forma consistente as variações observadas durante o ajuste dos parâmetros do controlador PID. Ao longo dos testes, não foram identificadas interrupções, travamentos ou atrasos significativos na atualização das informações exibidas, indicando desempenho satisfatório da plataforma de supervisão adotada para o monitoramento remoto do processo.

Ressalta-se que os ensaios foram realizados em ambiente controlado de bancada, o que permitiu validar a funcionalidade do sistema proposto. Entretanto, a ausência de perturbações externas significativas e a escala reduzida do protótipo devem ser consideradas como limitações do experimento, podendo influenciar o desempenho do controlador em aplicações de maior porte ou em ambientes industriais reais. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da solução desenvolvida para o controle térmico com supervisão remota.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho permitiu demonstrar a viabilidade da implementação de um sistema embarcado para controle e monitoramento de temperatura aplicado a um processo de extrusão, integrando conceitos de automação industrial, sistemas embarcados e comunicação sem fio. A partir da construção e dos testes em bancada do protótipo, foi possível verificar o funcionamento do controle PID local, bem como a aquisição contínua da temperatura por meio de sensor NTC e a atuação sobre o sistema de resfriamento.

Os ensaios realizados evidenciaram que o ajuste dos parâmetros proporcional, integral e derivativo influencia diretamente o comportamento dinâmico do sistema, permitindo a obtenção de estabilidade térmica em torno do valor de referência

estabelecido. A utilização de uma lâmpada indicadora associada ao acionamento da válvula possibilitou a verificação visual da atuação do controlador, contribuindo para a validação do funcionamento do sistema durante os testes.

O monitoramento remoto da temperatura, implementado por meio da comunicação ESP-NOW e visualização em painel supervisorio desenvolvido em Node-RED executado em um Raspberry Pi, apresentou desempenho satisfatório, com atualização contínua dos dados e funcionamento estável ao longo dos ensaios, sem ocorrência de travamentos ou interrupções.

Dessa forma, conclui-se que o sistema desenvolvido atende aos objetivos propostos, apresentando desempenho adequado em ambiente de bancada. Como trabalhos futuros, sugere-se a realização de testes em ambiente operacional real, a ampliação do sistema para o monitoramento de outras variáveis de processo e a integração com plataformas de armazenamento e análise de dados, visando ampliar as possibilidades de aplicação da solução desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- . ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. ISA, 2006;
- . ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. Computer Networks, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010;
- . BOYUM, William G.; MOYER, Scott A. Cybersecurity for industrial control systems: SCADA, DCS, PLC, HMI, and field devices. New York: Industrial Press, 2017;
- . GROOVER, M. P. Automação Industrial e Sistemas de Manufatura. 3. ed. Pearson, 2011;
- . KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. Acatech, 2013;
- . MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos. Artliber, 2005;
- . OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. Pearson, 2010;