

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESCARBONIZAÇÃO EM FORNOS INDUSTRIAIS

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROL STRATEGIES FOR ENERGY EFFICIENCY AND DECARBONIZATION IN INDUSTRIAL FURNACES

Karine Evelyn de Mello^{1, i}
Everton Bodo Gomes^{2, ii}
Mateus de Souza Senadia de Lima^{3, iii}
Yan dos Santos Silva^{4, iv}
Tiago Akira Tashiro de Araújo^{5, v}

RESUMO

A crescente demanda por processos industriais mais sustentáveis tem impulsionado a adoção de estratégias avançadas de controle voltadas à redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, surge o problema central que motiva este estudo: como selecionar e implementar metodologias de controle capazes de otimizar o desempenho de processos térmicos industriais, conciliando eficiência energética com a necessidade de descarbonização? Tal questionamento é relevante, pois processos de alta demanda energética, como os fornos industriais, estão entre os principais responsáveis pelo consumo intensivo de combustíveis fósseis e pela emissão de gases de efeito estufa.

Com base nesse desafio, o objetivo geral deste trabalho é investigar a otimização do consumo energético em um forno industrial por meio da comparação entre diferentes estratégias de controle, com ênfase na eficiência energética e na redução de emissões. Para tanto, desenvolveu-se um modelo de simulação no ambiente MATLAB/Simulink, incorporando sensores de temperatura, válvulas moduladoras de fluxo de gás e controladores PID programáveis. A partir desse modelo, buscou-se atingir objetivos específicos como implementar as estratégias de controle *Feedback* e *Cascade*, analisar o comportamento dinâmico do sistema em diferentes condições operacionais e avaliar os impactos de cada abordagem tanto no consumo de combustível quanto na estabilidade térmica do processo.

Os resultados obtidos indicam que o controle *Cascade* apresenta vantagens expressivas em relação ao *Feedback*, proporcionando maior estabilidade térmica e ganhos de eficiência energética, ao mesmo tempo em que reduz as flutuações no consumo de combustível e promove diminuição significativa nas emissões. O controle *Feedback*, embora de implementação mais simples, demonstrou maior variabilidade de resposta, o que pode comprometer o desempenho em aplicações que demandam elevada precisão.

¹ Estudante de graduação em Tecnologia de Automação Industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos.
Email: karine.mello2@senaisp.edu.br

² Estudante de graduação em Tecnologia de Automação Industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos.
Email: everton.bodo@senaisp.edu.br

³ Estudante de graduação em Tecnologia de Automação Industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos.
Email: mateus.senadia@senaisp.edu.br

⁴ Estudante de graduação em Tecnologia de Automação Industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos.
Email: yan.santos11@senaisp.edu.br

⁵ Professor de Educação Superior na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos.
Email: tiago.araujo@sp.senai.br

A justificativa para a realização deste estudo reside na relevância industrial e ambiental da temática. A adoção de estratégias de controle mais robustas representa não apenas um avanço tecnológico, mas também uma resposta concreta às exigências regulatórias e sociais ligadas à sustentabilidade. Além de oferecer um aporte acadêmico ao campo do controle de processos, a pesquisa fornece subsídios práticos para a indústria, que enfrenta o desafio de alinhar competitividade, produtividade e responsabilidade ambiental. Assim, conclui-se que a escolha da estratégia de controle deve considerar os requisitos específicos do processo, sendo o controle *Cascade* uma alternativa mais vantajosa para aplicações em que a estabilidade operacional e a redução do impacto ambiental são prioritárias.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Descarbonização, Controle Cascade, Controle Feedback, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

The growing demand for more sustainable industrial processes has driven the adoption of advanced control strategies aimed at reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. In this context, the central issue that motivates this study arises: how to select and implement control methodologies capable of optimizing the performance of industrial thermal processes, reconciling energy efficiency with the need for decarbonization? This question is particularly relevant, as high-energy-demand processes, such as industrial furnaces, are among the main contributors to intensive fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions.

Based on this challenge, the general objective of this work is to investigate the optimization of energy consumption in an industrial furnace through the comparison of different control strategies, with emphasis on energy efficiency and emission reduction. To this end, a simulation model was developed in the MATLAB/Simulink environment, incorporating temperature sensors, modulating gas flow valves, and programmable PID controllers. From this model, specific goals were pursued, such as implementing Feedback and Cascade control strategies, analyzing the system's dynamic behavior under different operating conditions, and evaluating the impact of each approach on both fuel consumption and thermal stability of the process.

The results obtained indicate that Cascade control offers significant advantages over Feedback control, providing greater thermal stability and energy efficiency gains, while also reducing fuel consumption fluctuations and promoting a substantial decrease in emissions. Feedback control, although simpler to implement, showed greater response variability, which may compromise performance in applications requiring high precision.

The justification for conducting this study lies in the industrial and environmental relevance of the topic. The adoption of more robust control strategies represents not only a technological advancement but also a concrete response to regulatory and societal demands related to sustainability. In addition to contributing academically to the field of process control, the research provides practical insights for industry, which faces the challenge of aligning competitiveness, productivity, and environmental responsibility. Thus, it is concluded that the choice of control strategy should consider the specific requirements of the process, with Cascade control being a more advantageous alternative for applications where operational stability and environmental impact reduction are priorities.

Keywords: Energy Efficiency, Decarbonization, Cascade Control, Feedback Control, MATLAB/Simulink.

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética e a descarbonização tornaram-se prioridades no setor industrial devido aos desafios ambientais e à crescente demanda por sustentabilidade (SCIENTEDIRECT, 2023). A busca por soluções sustentáveis no setor industrial tem se intensificado diante dos desafios globais relacionados às mudanças climáticas e à crescente demanda por energia. Nesse cenário, a eficiência energética e a descarbonização assumem papéis centrais.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A eficiência energética procura reduzir o consumo de energia sem comprometer a produtividade, otimizando recursos e diminuindo custos operacionais. Já a descarbonização busca mitigar as emissões de gases de efeito estufa por meio da adoção de fontes renováveis, tecnologias limpas e processos produtivos mais eficientes (PMC, 2024).

Além de responder a exigências ambientais e regulatórias, tais estratégias representam oportunidades de inovação, competitividade e desenvolvimento sustentável, tornando-se um tema de grande relevância para pesquisas acadêmicas e aplicações práticas.

1.2 OBJETIVO GERAL

O presente estudo propõe uma análise comparativa entre duas estratégias de controle — Feedback e Cascata — aplicadas a um forno de aquecimento a óleo, com foco na eficiência no consumo de gás e na robustez do controle de temperatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nesse contexto, empresas têm investido em tecnologias que reduzem a pegada de carbono e aumentam a eficiência energética, promovendo competitividade e redução de custos. A automação e o controle de processos industriais se destacam, permitindo otimização energética e monitoramento de emissões em tempo real (PMC, 2024).

Essa transição energética é considerada essencial para combater as mudanças climáticas e atender aos compromissos estabelecidos por acordos internacionais. Além das exigências regulatórias, a pressão dos consumidores por produtos ambientalmente responsáveis tem incentivado as indústrias a adotar práticas sustentáveis (OSTI, 1999). Estudos mostram que produtos com certificações ambientais, como LEED, ISO 14001 e FSC, possuem maior aceitação no mercado, agregando valor às marcas (SCIENTEDIRECT, 2023).

2 METODOLOGIA

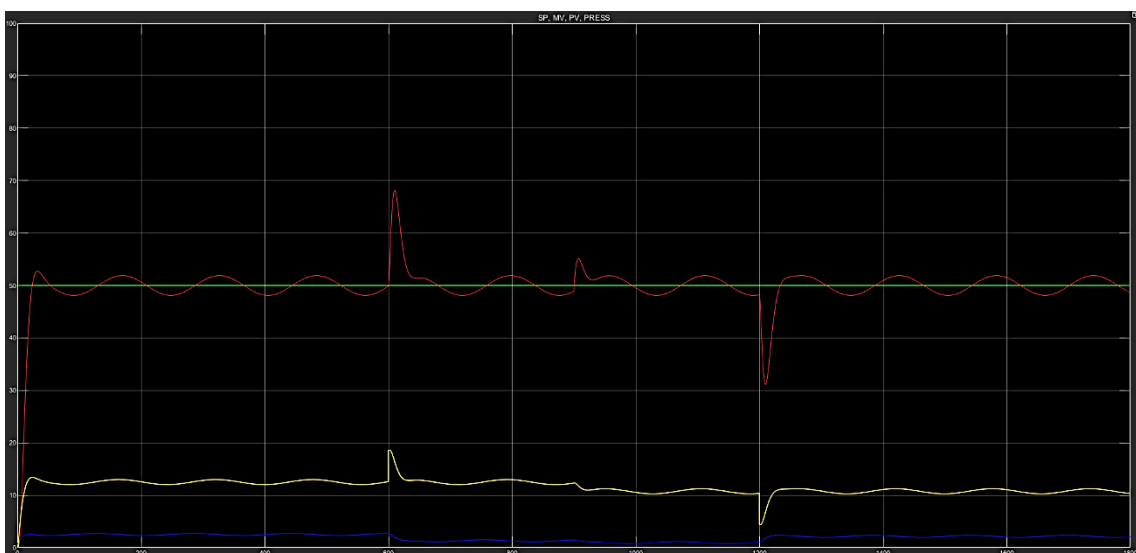
A pesquisa adota a abordagem de estudo de caso com simulação computacional de um forno de aquecimento a óleo com combustão a gás. A modelagem é realizada no MATLAB/Simulink (versão R2023a) devido à sua eficácia na simulação de sistemas dinâmicos e implementação de controladores PID. A escolha do MATLAB/Simulink para simulação se baseia na sua eficácia na modelagem de sistemas dinâmicos e implementação de controladores PID (KUMAR, 2016). O objetivo é identificar soluções que melhorem a eficiência energética e contribuam para a descarbonização industrial.

O sistema inclui sensores de temperatura (TIT), vazão (PIT), válvulas moduladoras e controladores PID configurados para manter a temperatura próxima ao ponto de ajuste. Os parâmetros são ajustados com a ferramenta PID Tuning, permitindo a avaliação do desempenho das estratégias de controle em termos de eficiência energética e redução de emissões.

3. RESULTADOS PARCIAIS

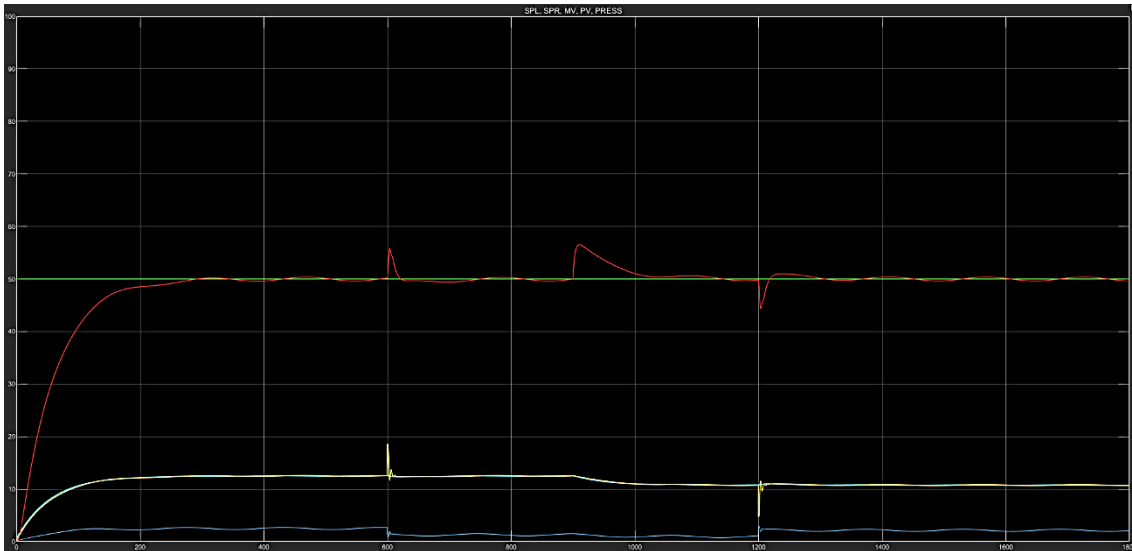
De acordo com o gráfico da Figura 2, é possível observar uma melhoria do controle no sistema cascata, tendo em vista menores distúrbios. Já o gráfico da Figura 1 indica um controle com mais distúrbios, onde podemos deduzir que o controle em cascata tende a apresentar melhor desempenho em termos de estabilidade térmica e eficiência no consumo de gás quando comparado ao controle por feedback. Essa tendência sugere maior alinhamento com metas de sustentabilidade e redução de emissões de CO_2 .

Figura 01 – Gráfico de performance (modelo feedback)



Fonte: Desenvolvido pelos autores

Figura 02 – Gráfico de performance (modelo cascata)



Fonte: Desenvolvido pelos autores

4 CONCLUSÕES PRELIMINARES

Os resultados obtidos de forma parcial até o momento demonstram que a aplicação de controle em cascata em processos térmicos industriais apresenta um potencial significativo para a melhoria da eficiência energética e a redução de emissões atmosféricas. Essa abordagem tem se mostrado eficaz especialmente em cenários com múltiplas variáveis e perturbações externas, contribuindo para maior estabilidade operacional.

Afim de ampliar a quantidade de comparações de estratégias de controle, além do Controle Feedback e do Controle Cascata, propõe-se a exploração de estratégias de controle avançadas, com destaque para o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC). Segundo o trabalho de Zhang (2017), o qual foi voltado para fornos industriais, como os reheating furnaces, pode-se observar que o MPC, quando combinado com arquiteturas em cascata, supera o controle PID convencional em termos de desempenho térmico, robustez frente a perturbações e otimização do consumo energético. Além disso, o MPC permite antecipar comportamentos do sistema com base em modelos dinâmicos, o que favorece decisões de controle mais precisas e eficientes Zhang, J., & Jiang, B. (2017).

Embora os modelos em cascata e de feedback permaneçam amplamente utilizados devido à sua simplicidade de implementação e integração com sistemas de automação industrial, a adoção de MPC pode representar uma evolução promissora. Sua capacidade de lidar com restrições operacionais e múltiplos objetivos simultâneos pode torná-lo uma alternativa estratégica para projetos que visam sustentabilidade, eficiência e inovação tecnológica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO – ABM. Controle preditivo via MPC para distribuição otimizada de gases combustíveis. *ABM Proceedings*, 2021. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/pt-br/article/controle-preditivo-via-mpc-para-distribuio-otimizada-de-gases-combustveis>. Acesso em: 15 set. 2025.

KUMAR, Y. V. P.; RAJESH, A.; YUGANDHAR, S.; SRIKANTH, V. Cascaded PID Controller Design for Heating Furnace Temperature Control. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, v. 5, n. 3, p. 76–83, abr./maio 2013. DOI: 10.9790/2834-0537683. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?q=Cascaded+PID+Controller+Design+for+Heating+Furnace+Temperature+Control&hl=pt-BR&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart. Acesso em: 11 ago. 2025.

OLIVEIRA, L. F. Proposta de Estratégia de Controle para Forno Industrial com MPC. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/274058/001189690.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

OSTI. Waste Heat Recovery and Oil Consumption Reduction in Boilers – Cascade Approach. 1999. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/20001192>. Acesso em: 11 ago. 2025.

PMC. Advances in PID Control for Thermal Systems. 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11696469/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SCIENTEDIRECT. Cascade Control – Overview and Applications. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cascade-control>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SOUSA, A. C. Implementação de controlador MPC em um sistema a parâmetros distribuídos via subsistemas interconectados. 2018. Monografia (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://acristoffers.me/Monografia.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.

YUDHO, B. S.; BAYUSARI, I.; CAROLINE; MUHAMMAD. Comparison of Cascade and Feedforward–Feedback Controllers for Temperature Control on Stirred Tank Heater Systems. In: *International Seminar on Applications for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, 2018. DOI: 10.1109/ISEMANTIC.2018.8549782. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8549782>. Acesso em: 11 ago. 2025.

ZHANG, J.; JIANG, B. Model predictive control for reheating furnace temperature regulation in steel industry. *Journal of Process Control*, v. 54, p. 1–10, 2017. DOI: 10.1016/j.jprocont.2017.03.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2017.03.005>. Acesso em: 15 set. 2025.

ZHANG, J.; JIANG, B. Multi-Mode Model Predictive Control Approach for Steel Billets Reheating Furnaces. *Sensors*, v. 23, n. 8, p. 3966, 2023. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/3966>. Acesso em: 15 set. 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos sinceramente aos professores do SENAI Santos — Tiago Akira, Humberto Megda, Sérgio Luiz, Roberto Blanco e Alessandro Marreiro — pelos conhecimentos compartilhados, orientação e incentivo ao longo de nossa formação. As aulas aplicadas e a dedicação junto a experiência foram fundamentais para nosso desenvolvimento deste artigo, proporcionando aprendizados práticos e teóricos que contribua, significativamente para nossa evolução profissional e acadêmica.

SOBRE O(S)AUTOR(ES)

i KARINE EVELYN DE MELLO



Cursando o último semestre do curso Superior em Automação Industrial no Senai de Santos, Curso técnico na área elétrica, lógica de programação, automação e áreas classificadas. Possui experiência na área portuária e área hospitalar. Atua como técnica em eletrônico I na JDE Peet's em São Paulo.

ii EVERTON BODO GOMES

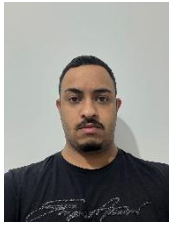


Formação técnica em Elétrica, Graduando em Tecnologia de Automação Industrial. Mais de 12 anos de experiência em elétrica e automação. Atuação em diversos segmentos e qualificação em atmosfera explosiva (EX). Atualmente mao de obra técnica na COFCO.

iii MATEUS DE SOUZA SENADIA DE LIMA



Sou formado em NR-10, NR-20, Eletricista Instalador, Segurança no Trabalho, Arduino, Software Proteus, Indústria 4.0, Pacote Office, Corel Draw, Photoshop, Dreamweaver, Adobe Suite, 3D Max e Lógica de Programação. Atualmente curso Automação Industrial no SENAI Santos (início em 2023). Possuo experiência como mecânica de manutenção, auxiliar de mecânico, auxiliar de escritório e ajudante de elétrica. Atualmente é profissional da Ageo Terminais.

ivYAN DOS SANTOS SILVA

Graduando em Tecnologia em automação pela Faculdade Senai Santos (2025). Curso técnico em Eletromecânica, possuo experiência na área Industrial e Portuária, com ênfase em Planejamento de Manutenção, Elétrica e Automação. Possuo experiência em graneis líquidos, sólidos e Atmosfera EX. Atualmente atuo como mão de obra técnica na DP World Santos | Brasil.

v Tiago Akira Tashiro de Araújo

Bacharel e Licenciado em Química com atribuições tecnológicas pela Universidade Católica de Santos (UNISANTOS), Mestre e Doutorando em Ciências (PPG em Bioprodutos e Bioprocessos - UNIFESP). Atua como docente junto à Faculdade de Tecnologia SENAI-Santos e ao Centro Paula Souza - ETEC. <https://orcid.org/0000-0003-2960-8186>