

INOVAÇÕES EM CONTROLE ADAPTATIVO INTELIGENTE PARA PROCESSOS NÃO LINEARES E DE FASE NÃO MÍNIMA



<https://doi.org/10.22533/at.ed.384132410128>

Data de aceite: 13/01/2025

Márcio Mendonça

Universidade Tecnológica Federal do Paraná , PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica CP/PG, Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

Marcos Antônio de Matos Laia

Universidade Federal de São Joao Del Rei
Departamento De Ciência Da Computação
- UFSJ - São Joao Del Rei - MG
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

Emerson Ravazzi Pires da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/3845751794448092>

Henrique Cavalieri Agonilha

Universidade Filadélfia (Unifil)-Londrina- PR
<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

Fabio Rodrigo Milanez

UniSENAIPR-Campus Londrina - Londrina-PR
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Centro Paula Souza, ETEC Jacinto Ferreira de Sá - Ourinhos - SP
<http://lattes.cnpq.br/3003910168580444>

Vicente de Lima Gongora

UniSENAIPR-Campus Londrina-Londrina-PR
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

Iago Maran Machado

Egresso Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

Vitor Blanc Milani

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP - Cornélio Procópio-PR
<http://lattes.cnpq.br/4504374098250296>

Andressa Haiduk

Dimension Engenharia-Ponta Grossa-PR
<http://lattes.cnpq.br/2786786167224165>

Francisco de Assis Scannavino Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio Procópio - Pr
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

Matheus Gil Bovolenta

Discente Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio Procópio - Pr
<http://lattes.cnpq.br/1518815195539638>

Michelle Eliza Casagrande Rocha

Universidade Norte do Paraná – Unopar – Anhanguera - Londrina-PR
<http://lattes.cnpq.br/4411484670091641>

Guilherme Daiki Gimenez Kato

Discente Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/2772937420517709>

Nathaly Milena Spinello

Discente Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/8712581159609909>

Augusto Florencio Dias Neto

Centro Paula Souza, ETEC Jacinto Ferreira de Sá - Ourinhos - SP
<http://lattes.cnpq.br/6743829908494175>

Jonas Reginaldo de Britto

IFTO Campus Palmas, NDA de Controle e Processos Industriais, Palmas -TO
<http://lattes.cnpq.br/4800851831765756>

RESUMO: Este trabalho apresenta um controlador PID adaptativo para fermentadores alcoólicos, inicialmente configurado pelo método de Ziegler-Nichols e ajustado em tempo real por técnicas de sistemas inteligentes (lógica Fuzzy e Mapas Cognitivos Fuzzy). As simulações demonstram redução expressiva de erros acumulados e melhorias na resposta dinâmica, confirmando a eficácia e a aplicabilidade industrial da abordagem. A simplicidade dos FCM, aliada à precisão dos sistemas Fuzzy, revela soluções complementares para otimizar processos complexos.

PALAVRAS-CHAVE: Mapas Cognitivos *Fuzzy*, *Machine Learning*, Personalização da Aprendizagem.

INNOVATIONS IN INTELLIGENT ADAPTIVE CONTROL FOR NONLINEAR AND NON-MINIMUM PHASE PROCESSES

ABSTRACT: This work presents an adaptive PID controller for alcoholic fermenters, initially configured using the Ziegler-Nichols method and then adjusted in real-time through intelligent system techniques (Fuzzy Logic and Fuzzy Cognitive Maps). Simulations demonstrate a significant reduction in accumulated errors and improvements in dynamic response, confirming the approach's effectiveness and industrial applicability. The simplicity of FCM, combined with the precision of Fuzzy systems, provides complementary solutions for optimizing complex processes.

KEYWORDS: Sistemas inteligentes, controladores PID, sistema *fuzzy*, mapas cognitivos *fuzzy*.

INTRODUÇÃO

A automação industrial se destaca como área estratégica para otimizar eficiência e competitividade, apoiada em soluções como CLPs e SCDs (FRANCHI, 2011). Nesse contexto, controladores PID são amplamente utilizados graças à sua simplicidade e eficácia (OGATA, 2010), tendo seus parâmetros tradicionalmente ajustados pelos métodos de Ziegler e Nichols (1942). Porém, processos com dinâmicas não lineares e parâmetros variáveis evidenciam limitações nos ajustes manuais, estimulando pesquisas em sistemas inteligentes.

Estudos indicam que controladores Fuzzy podem superar o PID convencional em diversos cenários (FERREIRA et al., 2008), enquanto abordagens como a linearização harmônica (COELHO, 2004) ou o uso de FCM e sistemas nebulosos (YESIL et al., 2011; ALMEIDA e COELHO, 2001) promovem ajustes automáticos mais eficientes.

Neste trabalho, propõe-se o uso conjunto de FCM e lógica Fuzzy para adequar dinamicamente os parâmetros PID em tanques fermentadores, notáveis por sua alta complexidade e fase não mínimas. Simulações demonstraram melhorias na precisão, na resposta dinâmica e na redução de erros acumulados. Também são discutidos os benefícios e desafios de aplicar essas técnicas em dispositivos de baixo custo, apontando possibilidades futuras no desenvolvimento de controladores embarcados.

OBJETIVO

As aplicações de controladores PID são amplas e podem contemplar sistemas hidráulicos, pneumáticos e outros. Como colocado por Ogata (2010), a grande parte dos controladores nas indústrias são ajustados em campo, com a observação da resposta do sistema.

Segundo Ferreira (2009), alguns processos podem apresentar certas peculiaridades, tais como não-linearidades, atrasos de transporte e/ou parâmetros variantes no tempo, que tornam o controle PID clássico ineficiente resultando em uma resposta insatisfatória.

O processo em questão neste trabalho é altamente não-linear e possui comportamento de fase não-mínima, apresentando grande tempo de acomodação, como caracterizado pela Figura 1.

De maneira geral, sistemas controlados de maneira eficiente e satisfatória possuem impacto significativo na competitividade das organizações. Processos bem controlados resultam em produtos de melhor qualidade e redução de custos responsáveis por aumentar a participação de mercado das empresas.

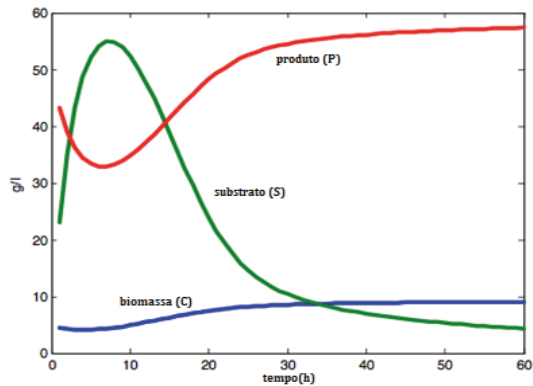


Figura 1. Comportamento dinâmico das variáveis de estado do processo de fermentação

Em pesquisas realizadas nos Estados Unidos, Yu (2006) demonstra que apenas 20% das malhas de controle na indústria de papel e celulose são operadas de maneira satisfatória. De modo geral, apenas 32% das malhas operam de forma aceitável, mostrando a grande ineficiência que afeta diretamente o rendimento das empresas. Logo, a necessidade da instalação de controladores bem ajustados é de extrema importância na realidade atual das indústrias.

Segundo Franchi (2011), os controles de processos possuem três objetivos principais:

- Redução da variabilidade: quanto menor for a variabilidade do produto, melhor será sua qualidade. Os sistemas de controle se comportam de maneira aproximar a composição dos produtos de acordo com o necessário. Diminuindo a variabilidade é possível reduzir também os custos.
- Aumento da eficiência: muitos processos industriais precisam estar em um determinado ponto de operação para que o produto possua boa qualidade. O não cumprimento dessa condição pode demandar a aplicação de mais recursos consumindo tempo e finanças.
- Segurança: o controle de caldeiras e usinas nucleares, por exemplo, podem oferecer grandes riscos se controlados de maneira indevida.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção está organizada de maneira a fundamentar os conceitos, ferramentas e técnicas utilizadas neste artigo.

Processo de fermentação alcoólica

A modelagem matemática da dinâmica do processo de fermentação baseia-se na resolução de equações diferenciais envolvendo quatro variáveis de estado: concentrações de substrato (s), biomassa (c), produto (P) e volume (V) no sistema. O processo apresenta características específicas, como resposta não-linear, de fase não-mínima e tempo de acomodação elevado, resultando em um controle complexo, pois a válvula de saída regula o fluxo do produto gerado na fermentação. As equações utilizadas são resolvidas pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem para simular o processo (Mendonça, 2011).

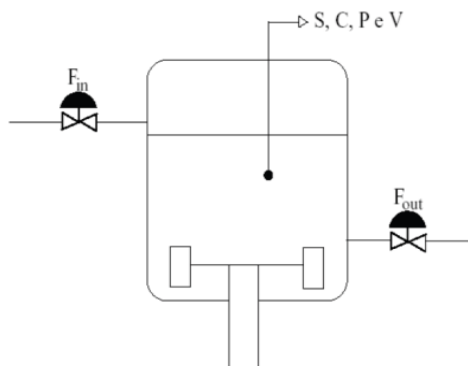


Figura 2. Modelo do tanque de fermentação alcoólica

Controle Clássico

Os sistemas de controle proporcionaram importante desenvolvimento para processos industriais e deram início aos sistemas de manufatura automatizados. Dentro deste conceito, os controladores PID atualmente estão presentes em mais de 90% dos processos industriais (Aström; Hägglund, 2001).

Qualidade do Controle

- De maneira a avaliar o desempenho de controladores, existem índices presentes nas malhas que podem ser analisados. Estes índices são estabelecidos em função da resposta em regime transiente a um degrau unitário (Franchi, 2011).
- Os parâmetros citados possuem especificações e, alguns destes limites para um controle estável, como descrito abaixo:
- Sobrelevação (*overshoot*) máxima: é caracterizado como o valor de pico da resposta;
- Tempo de subida, t_r (*rise time*): é o tempo que a resposta necessita para alcançar o valor final de regime permanente. Segundo Ogata (2010), o tempo é medido usualmente de 0% a 100% ou de 10% a 90% do valor de *setpoint*;

- Tempo de resposta, t_s (*settling time*): tempo necessário para a resposta atingir o valor de *setpoint* e permanecer dentro de uma faixa de valores em torno de (de 2% a 5%);
- Outro índice que é utilizado como parâmetro para medir a qualidade do controle é conhecido como IAE (Integral of the Absolute magnitude of the Error). Este índice demonstra o valor do erro absoluto acumulado ao longo da campanha e pode ser utilizado como referência para medir a aproximação do valor requerido (*setpoint*).

Controladores Proporcional Integrativo Derivativo (PID)

Os controladores PID têm por tarefa avaliar a diferença entre o sinal vindo da planta controlada e o valor de *setpoint*. Esta diferença resulta no valor chamado “erro” que será tratado e aplicado ao processo e, para tal, o controlador PID possui três parâmetros ajustáveis. Segundo Goodwin, Graebe e Salgado (2000), apesar de o impacto dos parâmetros em malha fechada ser diferente daquele observado individualmente, estes podem ser caracterizados como seguem:

- Proporcional: a atuação do controlador cresce proporcionalmente ao erro calculado.
- Integrativo: a saída é proporcional ao erro acumulado;
- Derivativo: é proporcional a variação do erro.

Os controladores PID tem se mostrado bastante eficientes em diversas aplicações, apesar de sua simplicidade. Porém, esta simplicidade implica em diversas limitações em relação a plantas em que estes são capazes de controlar satisfatoriamente (GOODWIN; GRAEBE; SALGADO, 2000).

Segundo Ogata (2010), se um modelo matemático da planta é conhecido, existem diversos métodos de sintonia dos parâmetros do controlador que podem ser definidos de acordo com a exigência do projeto a ser implantado. Dessas técnicas, o método de Ziegler-Nichols (1947) é o mais retratado pela literatura. Porém, quando planta é possui alto grau de complexidade matemática e um modelo não pode ser adquirido, os parâmetros são ajustados de maneira heurística de acordo com o conhecimento do especialista em automação até que se observe uma boa resposta a perturbações ao longo de uma campanha de produção (FRANCHI, 2011).

Controle Adaptativo

Um sistema de controle adaptativo possui como característica a capacidade dos controladores em se adaptarem às propriedades da planta através de ajustes automáticos de seus parâmetros para alteração da malha em função do erro (Ferreira, 2009).

O principal objetivo dessa estratégia é monitorar e avaliar o *feedback* do processo controlado e alterar alguns aspectos do mecanismo de controle para fornecer melhor eficiência e desempenho para a planta.

As principais funções do controle adaptativo são:

- Identificação: análise do erro para obtenção do desempenho atual do sistema;
- Decisão: a partir da identificação, o controlador decide por qual parâmetro alterar para obter um desempenho mais apurado;
- Modificação: aplicação da alteração demandada pela decisão.

O controle clássico utiliza da estabilidade relativa para avaliar e gerar um fator de controle que possa ser utilizado mesmo perante as incertezas ao longo da campanha. Porém, algumas plantas controladas sofrem grandes influências de componentes internos ou externos apresentando variações tão significativas que uma malha de controle com ganho linear não é capaz de atender satisfatoriamente. Logo, é necessário que haja um controle que se adapta a essas mudanças e garanta a estabilidade do sistema. (Berto, Sá e Jr., 2004).

Segundo Ferreira (2009), um sistema de controle adaptativo possui duas malhas de controle a serem consideradas: a malha convencional com realimentação linear; e a malha de adaptação, responsável por analisar, decidir e aplicar alterações no controlador.

Controle Adaptativo por Sistemas Inteligentes

De acordo com o apresentado sobre controle adaptativo, a aplicação de sistemas inteligentes pode ser de grande importância para a tomada de decisão quanto ao ajuste dos parâmetros dos controladores. O escopo deste trabalho é aplicar o Sistema *Fuzzy* e os Mapas Cognitivos *Fuzzy* (FCM) para, através de conceitos linguísticos, possibilitarem um ajuste dinâmico de maneira a atingir melhores resultados advindos do controle.

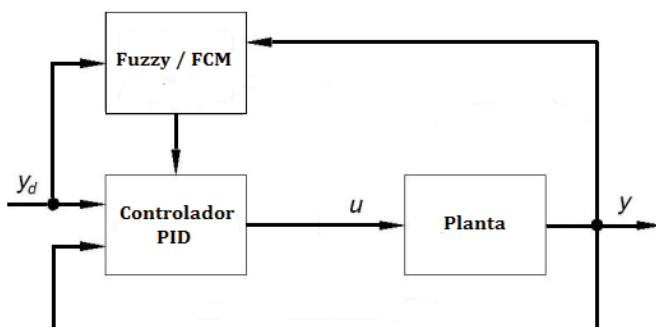


Figura 4. Sistema adaptativo por *Fuzzy* e FCM

A Figura 4 ilustra um sistema baseado na definição de sistemas adaptativos utilizando ferramentas inteligentes para o ajuste dos parâmetros.

Sistema Fuzzy

A lógica difusa, ou lógica *Fuzzy*, proposta por Zadeh (1965), são sistemas projetados para utilizar os conhecimentos de seres humanos através de conceitos linguísticos para sua operação. Esta é uma importante ferramenta computacional pois é capaz de lidar com informações imprecisas, advindas do conceito humano, que geralmente não apresentam alto grau de precisão sobre diversos fenômenos físicos existentes (Ross, 2004).

A possibilidade de aplicação desta ferramenta, lógica *Fuzzy*, é de extrema importância pois aproveita-se do conhecimento heurístico de um operador de um determinado sistema e pode ser implementada sem que haja especificamente o conhecimento sobre o modelo matemático da planta.

Estes sistemas, quando bem empregados, podem trazer grandes melhorias e soluções para diversas aplicações, como no controle de processos industriais (ROSS, 2004). Dentro destas aplicações industriais, o sistema *Fuzzy* permite que os dados sejam tratados na forma de variáveis linguísticas, sendo relacionadas internamente através de regras.

O método mais utilizado atualmente, que envolve conceitos de fuzzificação, defuzzificação e máquina de inferência, foi proposto por King e Mamdani (1977).

Existe uma série de sistemas e processos em que a aplicação do sistema *Fuzzy* pode ser altamente eficiente, como em sistemas complexos de difícil modelagem, sistemas que utilizam da percepção humana para gerarem entradas e saídas, entre outros (McNEILL, THRO, 1994 apud MARRO et al., 2011);

Mapas Cognitivos Fuzzy

Os Mapas Cognitivos Fuzzy (FCM), propostos por Kosko (1986) com base nas premissas de Axelrod (1976), representam conhecimento em forma de palavras, ideias e tarefas, destacando as relações causais entre esses elementos. Utilizando a teoria de grafos, os mapas estabelecem uma rede de conceitos interligados por variáveis *Fuzzy* que expressam relações causais com pesos, chamados níveis de causalidade. Diferentemente de sistemas baseados em regras se/então, os FCM capturam a dinâmica das relações causais e realizam cálculos por meio de operações matriciais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados a serem apresentados a seguir foram obtidos através da simulação de duas campanhas diferentes utilizando o PID clássico (como referência para comparação), o PID ajustado por *FCM* e o PID ajustado por *Fuzzy*.

O desenvolvimento de ambas as ferramentas inteligentes seguiu a mesma estratégia para que a comparação entre as mesmas seja apurada. Os dados obtidos de cada experimento serão apresentados após a apresentação dos resultados, de maneira a facilitar a comparação entre os métodos utilizados.

Os gráficos que representam a resposta do processo possuem o eixo das abscissas como as iterações da campanha e o eixo das ordenadas em gramas por litro.

PID Clássico

O texto descreve a aplicação de um controlador PID clássico em dois testes, utilizando parâmetros definidos pelo método Ziegler-Nichols ($K_p=0,7$, $K_d=6,0$ e $K_i=0,55$). No primeiro teste, a resposta foi mais estável e com baixo erro acumulado, mas com transientes lentos. No segundo, a resposta foi mais rápida, mas com maiores oscilações, destacando a complexidade do processo. Esses resultados servirão como base para validar abordagens adaptativas com sistemas inteligentes. A figura 5 ilustra as duas campanhas.

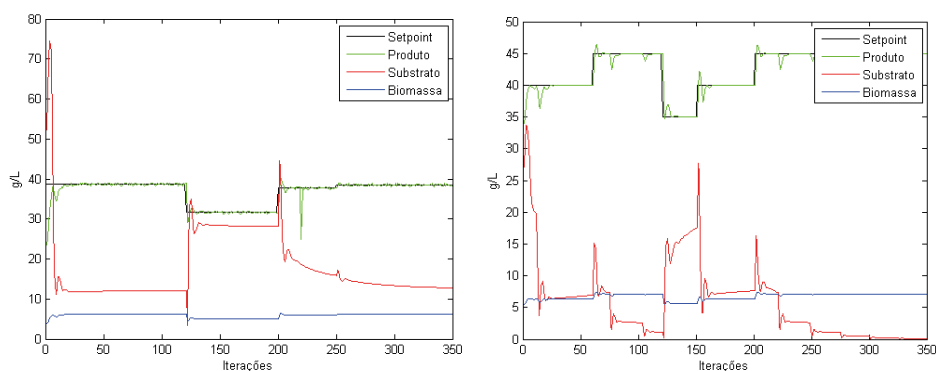


Figura 5. Aplicação do PID clássico na primeira e segunda campanha

Mapas Cognitivos Fuzzy (FCM)

O desenvolvimento do controlador PID ajustado por *FCM* seguiu a estratégia de análise de influência na resposta do processo para cada parâmetro observado de maneira individual. De maneira simplificada, segue-se que:

- O incremento do parâmetro proporcional (k_p) cresce proporcionalmente ao erro instantâneo calculado;
- O incremento da parcela derivativa (k_d) é inversamente proporcional ao aumento da variação do erro da resposta;
- Para o incremento do parâmetro integrativo (k_i) o valor é ajustado proporcionalmente de acordo com o erro cumulativo calculado durante a campanha.

Variável	Descrição	Valor Sugerido	Justificativa
W1	Peso associado ao erro (Kp)	0.5	Moderado, para evitar ajustes muito rápidos ou instáveis em Kp.
W2	Peso associado à variação do erro (Kd)	0.3	Ajuste suave de Kd, para lidar com tendências rápidas.
-W2	Peso negativo para variação do erro (Kd)	-0.3	Inversamente proporcional para evitar aumento excessivo em Kd.
W3	Peso associado ao erro acumulado (Ki)	0.1	Valor baixo, pois Ki deve ser ajustado lentamente para evitar overshoot.

Tabela 1: Valores Sugeridos para Variáveis de Controle

As variáveis apresentadas para avaliação do comportamento da resposta do processo são: “Erro” sendo o valor instantâneo da diferença entre o *setpoint* e o valor medido do produto; “Variação do Erro” sendo a diferença entre o erro instantâneo atual e o erro na iteração anterior; e o “Erro Acumulado” sendo a integral do erro ao longo da campanha.

Os resultados desta aplicação mostraram melhoras em relação ao PID clássico, quando analisados de acordo com os parâmetros dispostos para comparação. Os sinais presentes no processo, para a primeira campanha, podem ser observados na Figura 7.

Analisando o valor de IAE nota-se uma melhora de 8,16% do sinal advindo da planta, o que mostra uma resposta mais aproximada da referência e, consequentemente, uma maior aproximação do valor ideal.

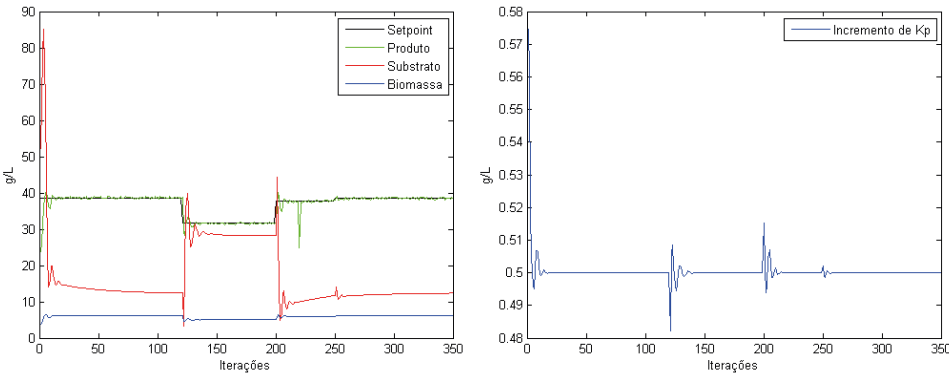


Figura 6. Resposta do controlador PID ajustado por FCM para a primeira campanha Incrementos do ganho proporcional ao longo do primeiro teste.

De modo a aumentar a reação química que gera o produto, para que este atinja o valor de referência mais rapidamente, nota-se uma atuação mais intensa do controlador, resultando em uma maior abertura da válvula de entrada de substrato no tanque. Essa ação se deve ao aumento do ganho proporcional do controlador no começo do processo. A alteração em questão está retratada na Figura 8, onde se mostra uma grande alteração desta variável nos períodos iniciais de operação do sistema.

O segundo teste implementado, como mostrado na simulação utilizando PID convencional, possui uma campanha de difícil controle e que apresenta comportamento irregular, sofrendo variações ao longo do processo.

A aplicação do controlador ajustado por FCM para este teste resultou em uma resposta melhorada, porém nota-se que há baixa estabilidade nos períodos transitórios. A Figura 8 mostra a resposta do sistema em que pode ser observada uma dinâmica mais rápida.

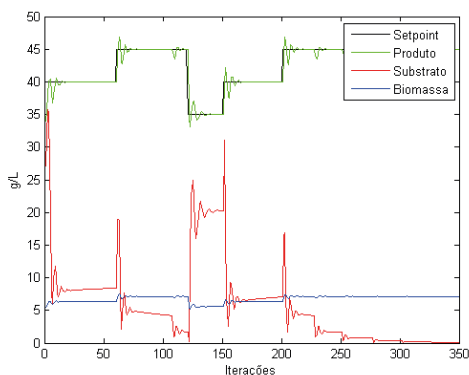


Figura 8. Resposta do controlador PID ajustado por FCM para a segunda campanha

Nota-se que, apesar de o sistema apresentar uma resposta mais rápida e com erro acumulado menor (melhora de 11,33%), os períodos transitórios estão menos estáveis, comparados ao PID clássico.

Sistema Fuzzy descreve o desenvolvimento de um controlador Fuzzy utilizando a mesma estratégia aplicada no FCM, com as mesmas variáveis de entrada e saída. Foram definidos três conceitos linguísticos para cada variável (“pouco”, “médio” e “muito”), de modo a ajustar os incrementos de K_p e K_d conforme o valor do erro e sua variação.

Testes iniciais, com regras simples, já apresentaram melhorias significativas na resposta do processo, oferecendo uma resposta mais rápida, porém com dinâmica semelhante ao PID convencional. Em um dos testes, obteve-se uma redução de 10,7% no erro acumulado em comparação ao controle PID tradicional (ROSS, 2004).

Assim como no teste anterior, a segunda campanha também apresentou uma resposta mais rápida e com maiores variações nos períodos transitórios de *setpoint*. Apesar desta característica oscilante, o controle resultou em uma resposta da planta 20,09% mais eficiente, quando comparada ao controle PID clássico. Como podem ser observados na Figura 10, os períodos transitórios devem ser amortecidos para que se possa melhorar a resposta do sistema.

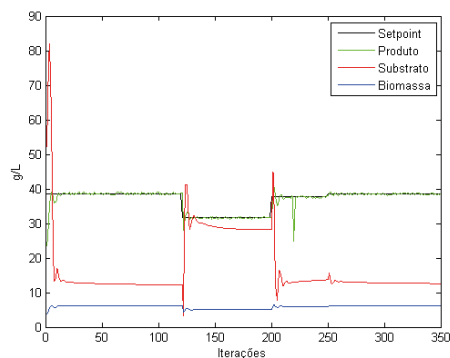


Figura 9. Resposta do controlador PID ajustado por *Fuzzy* para a primeira campanha

Como pode ser notado na Figura 11, para grandes alterações de *setpoint* (interações 0 e 120), há significativo aumento do valor de k_p para aumentar a velocidade da resposta.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os dados obtidos nos dois testes para cada controlador utilizado, a fim de traçar um paralelo resumido entre os resultados encontrados. O tempo de subida e tempo de acomodação estão medidos em número de iterações realizadas.

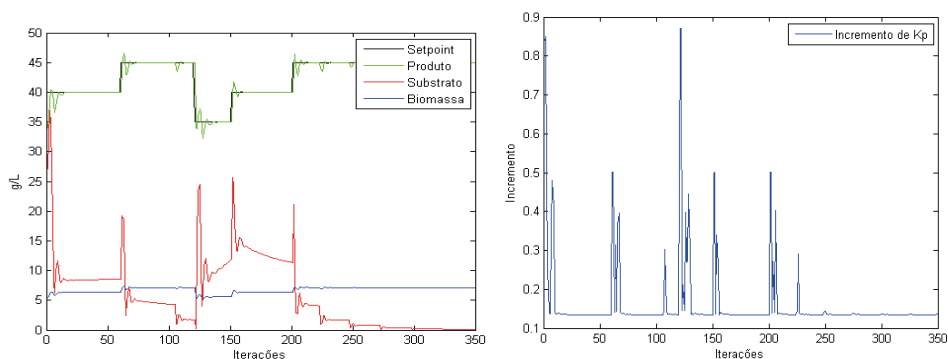


Figura 11. Resposta do controlador PID ajustado por *Fuzzy* para a segunda campanha e Incrementos do ganho proporcional ao longo do segundo teste

Observa-se que para ambos os testes houve significativa melhora em relação à eficiência do processo (8,16% a 20,09%).

Analisando o parâmetro IAE, o Sistema *Fuzzy* mostrou-se mais efetivo sobre o *FCM*, tornando a resposta mais próxima ao *setpoint*. Porém, quando observada velocidade da resposta, nota-se que o *FCM* tem a capacidade de aproximar a quantidade de produto fermentado ao demandado e estabilizar esse valor utilizando menos iterações.

O fermentador alcoólico não apresentou erro estacionário em nenhum dos testes, inclusive com o PID clássico. Entretanto, na utilização de ambas as ferramentas inteligentes, percebe-se a necessidade em se amortecer a resposta nos períodos transitórios.

Controlador	IAE	Melhoria	T. de Subida	T. de Acomodação
PID Clássico	1,0051	-	5	12
PID Adaptativo <i>FCM</i>	0,9230	8,16%	3	6
PID Adaptativo <i>Fuzzy</i>	0,8970	10,75%	4	10

Tabela 2: Dados Comparativo da Campanha Um

Controlador	IAE	Melhoria	T. de Subida	T. de Acomodação
PID Clássico	1,1634	-	4	7
PID Adaptativo <i>FCM</i>	1,0315	11,33%	1	9
PID Adaptativo <i>Fuzzy</i>	0,9296	20,09%	2	9

Tabela 3: Dados Comparativo da Campanha Dois

CONCLUSÃO

O texto destaca como a automação industrial, impulsionada por demandas de eficiência, segurança e sustentabilidade, beneficia-se do uso de controladores PID adaptativos aliados a sistemas inteligentes, como Mapas Cognitivos Fuzzy e lógica Fuzzy. Esses métodos aprimoram a precisão, a estabilidade e reduzem erros acumulados em processos industriais, possibilitando melhor aproveitamento de recursos e diminuindo desperdícios.

Entretanto, ainda há desafios, como desenvolver algoritmos acessíveis para dispositivos de baixo custo, otimizar respostas transitórias e integrar tecnologias avançadas (aprendizado de máquina, algoritmos genéticos). Apesar disso, a pesquisa reforça a importância da inovação no controle de processos, ampliando as fronteiras da automação com soluções mais adaptativas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, O. M. E COELHO, A. A. R. **Controlador PID com Escalonamento Nebuloso dos Ganhos: Auto-sintonia, Análise e Implementação**. V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela, 2001.

ASTRÖM, K. J. E HÄGGLUND, T. **The Future of PID Control**. Lund University of Technology. Lund, Suécia, 2001.

AXELROD, R. M. **Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites**. New Jersey, Princeton University Press, 1976.

COELHO, C. A. S. **Auto-Ajuste de Controladores PID Usando Método da Linearização Harmônica**. 2004. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FERREIRA, C. **Estudo Comparativo Entre as Técnicas de Controle Fuzzy, PI e Adaptativo Aplicado ao Processo de Fabricação de Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tune**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

FRANCHI, C. M. **Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Ed. Érica, 2011.

GOODWIN, G. C; GRAEBE, S. F. E SALGADO, M. E. **Control System Design**. Valparaíso, Chile, 2000.

GOSMANN, H. L. **Um Sistema Multivariável de Tanques Acoplados para Avaliação de Técnicas de Controle**. 2002. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília.

JUNIOR, J. R. C. **Controladores PID Industriais com Sintonia Automática por Realimentação a Relé**. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

KING, P.J. E MAMDANI, E.H. **The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Process**. Automática, 1977.

KOSKO, B. **Fuzzy Cognitive Maps**. *Int J Man-Machine Studies*, p.65-75, 1986.

MAHER, M. **Modélisation et Elaboration d'Algorithms d'Estimation et de Commande: Application à um Bioprocédé**. 1995. Tese de Doutorado - Université Paul Sabatier, Toulouse, França.

MARRO, A. A. et al. **Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte.

MATAS, A. L. **Sintonia de Controladores PID com Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC) Aplicado a um Motor de Corrente Contínua**. 2012. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

MELO JUNIOR, W. S. et al. **Controle Preditivo Multivariável Baseado em um Modelo Adaptativo Aplicado a um Fermentador alcoólico**. XIV Congresso Brasileiro de Automática. Natal, 2002.

MENDONÇA, M. **Uma Contribuição ao Desenvolvimento de Sistemas Inteligentes Utilizando Redes Cognitivas Dinâmicas**. 2011. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Prentice Hall (Pearson), 2010.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. Vol 2, 2004.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Algorithms**. Vol. 12, 1968.

ZIEGLER, J. G E NICHOLS, N. B. **Optimum Settings for Automatic Controllers**. *Transactions of the ASME*, 1942.

YESIL, E; DODURKA, M. F; SAKALLI, A; Guzey, C. e Ozturk, C. **Self-tuning PI Controller via Fuzzy Cognitive Maps**. Istanbul Technical University. Istanbul, Turquia, 2011.

YU, C.-C. **Autotuning of PID Controllers**. Springer, 2ed., 261p. 2006.