

ARQUITETURAS E TOPOLOGIAS DE CONTROLADORES ADAPTATIVOS, FUZZY-PID E FCM-PID EM FERMENTADOR ALCOÓLICO INDUSTRIAL

Data de aceite: 03/07/2023

Márcio Mendonça

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

Emerson Ravazzi Pires da Silva

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

Ricardo Breganon

Instituto Federal do Paraná, Campus
Jacarezinho
Jacarezinho - PR
<http://lattes.cnpq.br/2441043775335349>

Matheus Gil Bovolenta

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

Marcos Antônio de Matos Laia

Departamento De Ciência Da Computação
– UFSJ
Minas Gerais - MG
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

Bruno Oliveira Rosa

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Acadêmico - Departamento Acadêmico de
Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
<http://lattes.cnpq.br/5010826876808074>

Rodrigo Rodrigues Sumar

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia
Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
<http://lattes.cnpq.br/1461760661483683>

Vicente de Lima Gongora

Faculdade de Tecnologia SENAI Londrina
Londrina – PR
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

Carlos Alberto Paschoalino

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia
Elétrica
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/0419549172660666>

Michelle Eliza Casagrande Rocha

Universidade Norte do Paraná -Unopar
Engenheira projetista elétrica
Londrina-Pr
<http://lattes.cnpq/4411484670091641>

Andre Luis Shiguemoto

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/924365653421182>

Kazuyochi Ota Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/3845751794448092>

Andressa Haiduk

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

Janáina Fracaro de Souza Gonçalves

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/1857241899832038>

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Engenharia Mecânica (DAMEC)
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/2487283169795744>

Ângelo Feracin Neto

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/0580089660443472>

RESUMO: Neste artigo, o controle de um processo complexo de fermentação alcoólica que é caracterizado por não-linearidade e comportamento de fase não mínima. Para estabelecer a validade de nossa abordagem, começamos a discussão fornecendo uma visão geral de estudos relevantes e um breve histórico das técnicas utilizadas, incluindo métodos heurísticos. Além disso, oferecemos uma breve introdução à teoria Fuzzy e aos Mapas Cognitivos Fuzzy (FCM) para fornecer contexto. O sistema de controle é implementado usando uma arquitetura

de controle adaptativo que utiliza dois métodos, ou seja, Fuzzy e FCM, para ajustar os parâmetros do controlador PID. Esses sistemas inteligentes ajustam de forma eficaz os ganhos proporcionais e derivativos do controlador. Para avaliar o desempenho desses sistemas, comparamos o Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo (ITAE) e o Erro Quadrático Integral (ISE) em duas campanhas de fermentação distintas. Por fim, tiramos conclusões com base nos resultados encontrados e propomos direções potenciais para pesquisas futuras, visando aprimorar ainda mais o controle do processo de fermentação.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Inteligente, Mapas Cognitivos Fuzzy, Processo de Fermentação Alcoólica, Controlador PID

ARCHITECTURES AND TOPOLOGIES OF ADAPTIVE, FUZZY-PID, AND FCM-PID CONTROLLERS IN INDUSTRIAL ALCOHOL FERMENTER

ABSTRACT: In this paper, the control of a complex alcoholic fermentation process that is characterized by non-linearity and non-minimal phase Beauvoir. To establish the validity of our approach, we begin the discussion by providing an overview of relevant studies and a concise historical background of the utilized techniques, including heuristic methods. Furthermore, we offer a brief introduction to Fuzzy theory and Fuzzy Cognitive Maps (FCM) to provide context. The control system is implemented using an adaptive control architecture that employs two methods, namely Fuzzy and FCM, for tuning the parameters of the PID controller. These intelligent systems effectively adjust the proportional and derivative gains of the controller. To evaluate the performance of these systems, we compare the Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) and Integral of Square Error (ISE) across two distinct fermentation campaigns. Finally, we draw conclusions based on the findings and propose potential directions for future research, aiming to further enhance the control of the fermentation process.

KEYWORDS: Intelligent Control, Fuzzy Cognitive Maps, Alcoholic Fermentation Process, PID Controller.

1 | INTRODUÇÃO

O controle inteligente é uma subárea emergente da engenharia de controle que utiliza várias técnicas de inteligência computacional para desenvolver controladores que possam lidar com sistemas complexos e não lineares. Entre as técnicas utilizadas estão redes neurais artificiais, lógica fuzzy, algoritmos genéticos, entre outros (ZHOU, D., QIAN, C. E WEI, Q., 2016).

Segundo Passino e Yurkovich (1997), o controle inteligente se destaca por sua capacidade de lidar com sistemas com dinâmicas incertas ou que estejam em constante mudança, com parâmetros que mudam ao longo do tempo, ou com sistemas que possuam comportamentos altamente não lineares, onde os métodos de controle tradicionais podem não ser suficientemente robustos.

Um exemplo desses métodos é o controle por lógica fuzzy, que lida com a incerteza e a imprecisão de maneira similar à lógica humana, e tem sido aplicado com sucesso em várias áreas, desde a engenharia de controle até a tomada de decisões econômicas

(ZADEH, 1992). Outro exemplo são as redes neurais artificiais, que imitam a maneira como o cérebro humano processa informações para aprender a controlar sistemas complexos (HAYKIN, 1999).

Em suma, o controle inteligente promete avanços significativos na engenharia de controle, tornando possível o controle eficaz de sistemas que até agora têm se mostrado resistentes aos métodos tradicionais.

Sempre existiram processos altamente complexos, que são fundamentos na incerteza das informações. Nessas circunstâncias, a estratégia adotada frequentemente se baseia na imprecisão e é geralmente expressa em termos linguísticos. No entanto, a partir dos dados operacionais de um sistema, é possível extrair informações e, por conseguinte, a manipulação dessas informações pode ser realizada por meio de técnicas de identificação e modelagem (PASSINO; YURKO-VICH, 1997).

A humanidade é capaz de resolver uma variedade de problemas utilizando métodos fundamentados no processo heurístico, que denotam flexibilidade e adaptabilidade (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

A palavra “heurística”, de origem grega, significa “descoberta”. Assim, esses métodos são fundamentados na experiência, regras de ouro (reciprocidade) e conceitos racionais (KASABOV, 1996). Em tal contexto, as heurísticas dependem mais do senso comum do que da matemática, e se mostram convenientes quando uma busca exaustiva é requerida para encontrar uma solução ótima, isto é, quando essa busca não é viável em termos de tempo. Soluções do tipo, embora não garantam a melhor solução, proporcionam um atalho em relação ao custo e tempo (KASABOV, 1996).

Neste artigo, baseando-se em um processo de fermentação alcoólica proposto inicialmente por Maher (1995), é discutida a construção de um sistema de controle a partir de um PID (controlador Proporcional, Integral, Derivativo) adaptativo com FCM (*Fuzzy Cognitive Maps*) (FCM-PID), e sua comparação com outros tipos de controladores. Destacam-se um PID clássico ajustado de forma híbrida, inicialmente pelo método de Ziegler-Nichols e posteriormente de maneira empírica a partir da análise do processo, e um PID adaptado com valores de um sistema Fuzzy (Fuzzy-PID) baseados nas relações anteriormente estabelecidas no FCM. Um exemplo de arquitetura clássica de controle supervisorio pode ser encontrado no trabalho de Passino e Yurkovich (1997).

No processo em análise, a função do PID é regular a abertura e/ou fechamento das válvulas de entrada (Fin) e de saída (Fout). A componente adaptativa do controlador, seja com Fuzzy ou com FCM, atua exclusivamente na válvula de saída. A primeira válvula é responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado do tanque, sendo que os controladores clássicos são similares aos utilizados no trabalho de Mendonça (2013).

Os mecanismos de ajuste propostos, Fuzzy e FCM, baseados nos erros em regime, derivativo e integral, transmitem os parâmetros de ganho proporcional e derivativo (K_p e

Kd) para o controlador PID previamente ajustado, enquanto o ganho integral (K_i) é mantido original por razões de projeto. Tanto a lógica Fuzzy quanto o uso de FCM no PID podem oferecer soluções eficientes para o problema abordado, visto que proporcionam maior facilidade para o desenvolvimento de um conjunto de regras heurísticas, explicitamente utilizadas nesses tipos de sistemas.

A partir das equações descritivas do processo de fermentação alcoólica, o sistema foi simulado no software MatLab utilizando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para sua resolução.

2 | TRABALHOS CORRELATOS

Os *Fuzzy Cognitive Maps* (FCMs) são usados em diversas disciplinas devido à sua flexibilidade e capacidade de modelar sistemas complexos.

Em medicina e saúde, os FCMs foram usados para modelar a progressão de doenças e auxiliar na tomada de decisões clínicas. Papageorgiou et al. (2011) utilizaram FCMs para modelar a progressão da doença de Alzheimer e determinar a eficácia de diferentes intervenções terapêuticas.

No campo da engenharia de controle e automação, os FCMs foram aplicados para melhorar a performance e robustez dos sistemas. Os trabalhos de Song e Chong (2013) e Wei et al. (2016) exemplificam o uso de FCMs em sistemas de controle fuzzy.

Na área ambiental, os FCMs foram utilizados na avaliação dos impactos de políticas de gestão de recursos. Kumar e Gohil (2015) usaram FCMs para avaliar os efeitos das políticas de gestão da água na Índia.

Esses são apenas alguns exemplos do uso dos FCMs nas últimas décadas, demonstrando sua versatilidade e utilidade em diferentes campos.

Trabalhos anteriores usaram técnicas Fuzzy, DCN (*Dynamic Cognitive Networks*) e FCM para uso em controladores PID adaptativos nos mais diversos processos.

Na dissertação de Ferreira (2009), comparou-se técnicas de controle Fuzzy, PI (controlador Proporcional Integral) e controle adaptativo em um processo de fabricação de papel reciclado.

No trabalho Wang e colaboradores (2012) são apresentados ganhos em controle de energia em elevadores com sistema Fuzzy-PID.

Lima e colaborador (2015) propuseram um controlador Fuzzy robusto implementado para visualização e controle de um processo térmico. Nele, um algoritmo FCM de agrupamento estima os parâmetros anteriores do sistema e o número de regras de um modelo Fuzzy do tipo Takagi-Sugeno.

Yesil e diferentes colaboradores (2013) apresentam dois artigos: o primeiro com um controlador Fuzzy-PID auto sintonizador (*Self-tuning*) baseados em apoderamento online das regras. O segundo apresenta um FCM para a sintonia dos parâmetros de controladores

PI aplicado a um sistema não linear. Esses controladores não conseguem resultados satisfatórios o suficiente nesse tipo de sistema, pela diferença em suas propriedades estáticas e dinâmicas.

No trabalho de Mendonça (2013), uma DCN apresenta uma evolução dos FCMs, dentre outras propostas conhecidas na literatura (PAPAGEORGIOU, 2014) para controle e sistema supervisorio do processo do fermentador alcoólico proposto por Maher (1995), similar ao utilizado neste artigo. Neste trabalho, a DCN enviou setpoints para PIDs das válvulas do fermentador e implementou algumas funções de um sistema supervisorio, como por exemplo a detecção de baixo nível de biomassa.

O trabalho de Wang e colaboradores (2012) aplica um controlador Fuzzy-PID para elevadores, com o objetivo de reduzir o grande consumo de energia, onde esse sistema de controle é necessário, pois o PI convencional não satisfaz eficientemente o controle de objetos não lineares.

3 I BACKGROUND PID, FUZZY E FCM

Os controladores pid são amplamente utilizados na indústria atual, com a maioria dos controladores industriais sendo baseados em pid ou variações deste. estes controladores são tipicamente ajustados de acordo com diversas regras descritas na literatura (OGATA, 2010).

por outro lado, a lógica fuzzy, desenvolvida por Lotfi A. Zadeh na década de 60 (ZADEH, 1965), trouxe uma nova dimensão ao campo do controle. neste trabalho, o foco recai sobre o modelo de controle fuzzy Mamdani, proposto por Ebrahim Mamdani em 1975 (PASSINO; YURKOVICH, 1998). um sistema de controle fuzzy, através de um conjunto de regras, simula o conhecimento de um especialista no processo, aplicando condições baseadas em termos linguísticos associados às variáveis de entrada e saída do processo (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

Especificamente, os FCMs têm sido aplicados em sistemas sociais, modelagem e tomada de decisão em ambientes corporativos e e-commerce. Além de auxiliar na tomada de decisões e diagnóstico na área médica, navegação robótica autônoma, controle de processos industriais (PAPAGEORGIOU, 2014), e previsão de séries temporais (HOMENDA; PEDRYCKZ, 2014), ARRUDA et al., 2016), dentre outras áreas.

4 I PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

De acordo com a seção 1, o processo de fermentação alcoólica utilizado neste artigo foi retirado da proposta inicial de Maher (1995). Dois fermentadores reais podem ser vistos na figura 1.



Figura 1. Tanques de fermentação alcoólica reais

O processo tem quatro variáveis de estado, sendo elas: as concentrações (em g/l) de substrato (S), de biomassa (C), de produto (P) e o volume (em litros) (V) do tanque onde ocorre a fermentação.

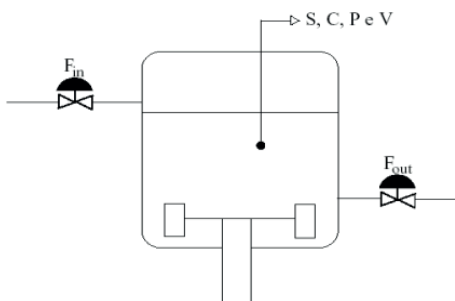


Figura 2. Esquemático do tanque de fermentação alcoólica

A figura 2 mostra o sistema do tanque analisado, com as válvulas de entrada (F_{in}) e saída (F_{out}), sendo a primeira responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado da cuba.

Destaca-se nesse processo a grande correlação entre as variáveis mencionadas acima, resultando em um sistema não-linear. A figura 3 mostra a resposta do sistema a um degrau linear.

Analisando a figura 3, nota-se um comportamento de fase não-mínima, assim como um tempo de acomodação elevado (MENDONÇA, 2013).

Outros fatores devem ser considerados, como o volume máximo de 4,75 l e mínimo de 1 l, por questões de segurança.

Além disso, para garantir a fermentação, a concentração de biomassa do sistema não deve exceder 8 g/l, enquanto o substrato deve manter-se sempre acima de 0,5 g/l, caso contrário a reação acabaria. Outra restrição é a faixa de valores do setpoint para

a concentração de produto, na faixa discreta de 10 a 50 g/l, de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Mendonça (2013).

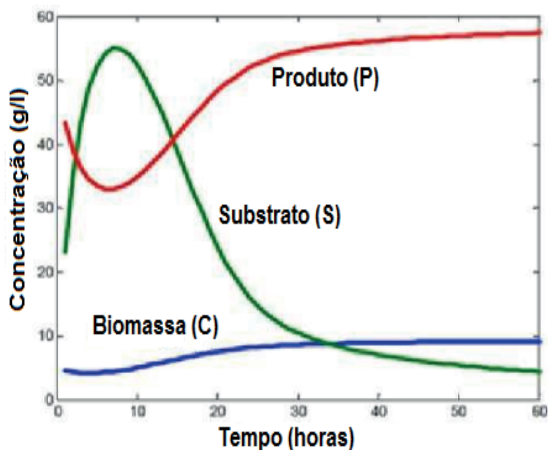


Figura 3– Resposta ao degrau das variáveis de estado da fermentação alcoólica

As equações diferenciais que descrevem a dinâmica do processo são mostradas em (1), (2), (3) e (4).

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_c/s} \mu C + \frac{F_{in}}{V} S_a - \frac{F_{out}}{V} S \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \mu C - \frac{F_{out}}{V} C \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{Y_p/s}{Y_c/s} \mu C - \frac{F_{out}}{V} P \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{S}{K_s + S} \left(1 - \frac{P}{P_m}\right) \quad (5)$$

Sendo:

Sa: concentração de substrato da alimentação;

Yc/s: constante de conversão da biomassa;

Yp/s: constante de conversão do produto;

μ : função de crescimento da biomassa, dada por (5).

μ_0 : máxima taxa de crescimento;

K_s : constante de Michaelis-Menton;

P_m : coeficiente de inibição do produto durante a reação.

Os valores iniciais das variáveis de estado são: $S=4,5$ g/l, $C=5$ g/l, $P=50$ g/l e $V=2$ l. Já as constantes admitidas do processo são: $S_a = 100$ g/l, $P_m = 100$, $K_s = 10$, $\mu_0 = 0,31$, $Y_c/s = 0,44$ e $Y_p/s = 0,07$.

A partir das equações (1), (2), (3) e (4), nota-se a forte correlação entre as variáveis de modo que μC encontra-se tanto em (1) quanto em (2), por exemplo. Observa-se a fase não-mínima do sistema de equações por meio dos zeros presentes nelas, deixando a fases do sistema mais negativas.

Serão realizados dois tipos de controle no fermentador analisado: o primeiro é um seguidor de setpoint (para o produto), e o outro é um controle de faixa para o volume e o substrato, de acordo com as especificações dadas na seção 4.

5 | SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO POR FUZZY E FCM

Como abordado na seção 1, nesse trabalho será feita a comparação entre dois tipos de mecanismos de ajuste de controle adaptativo PID: a primeira usando lógica Fuzzy e a segunda utilizando FCM. Ambas recebem o valor dos seguintes erros: da janela anterior ($Erro(k)$), erro derivativo ($Diferro$) e erro integral ($Interro$). Com eles, esses mecanismos de ajuste modificam os valores dos ganhos K_p e K_d de modo a controlar o sistema dentro das especificações desejadas.

Foram criadas duas campanhas diferentes para observar as reações do processo em diferentes cenários. A primeira possui variações mais amenas do setpoint, enquanto na segunda elas são maiores.

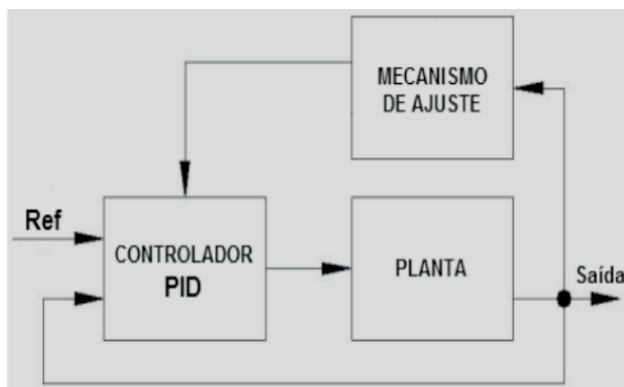


Figura 4. Esquemático do controle do processo

A figura 4 mostra o esquemático utilizado para o controle do processo, baseado na dissertação de Ferreira (2009), que traz uma abordagem de sistema adaptativo por modelo de referência, um método onde as regras de ajuste indicam como os parâmetros

do controlador devem ser ajustados (FERREIRA, 2009).

Nesse caso, os erros de saída retornam ao mecanismo de ajuste (FCM ou Fuzzy), para que sejam ajustados os ganhos K_p e K_d do PID.

Os pesos (W) do FCM foram ajustados heurísticamente até o desejado por uma lógica simplista: as variações individuais de $\text{Erro}(k)$,

Nesse caso, os erros de saída retornam ao mecanismo de ajuste (FCM ou Fuzzy), para que sejam ajustados os ganhos K_p e K_d do PID.

Os pesos (W) do FCM foram ajustados heurísticamente até o desejado por uma lógica simplista: as variações individuais de $\text{Erro}(k)$, Diferro e Interro afetam inversamente os ganhos K_p e K_d , conforme mostra a figura 5.

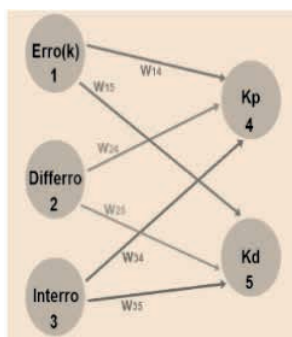


Figura 5. FCM utilizado

Essa heurística de ajuste foi obtida por meio de observação do comportamento dinâmico do processo inspirada no método de sintonia de Ziegler-Nichols.

Nota-se que o ganho integral não foi modificado pelo FCM, devido à má influência dele sobre os resultados. Os Valores utilizados nos pesos são: $W_{14} = W_{24} = W_{15} = -0,8$, $W_{34} = -0,85$, $W_{25} = W_{35} = -0,75$.

A base de regras utilizadas para o mecanismo Fuzzy foi fundada na estrutura do FCM, e algumas são mostradas a seguir:

1. Se erro(k) é pequeno então K_p é grande;
2. Se erro(k) é médio então K_p é médio;
3. Se erro(k) é pequeno então K_d é grande;
4. Se erro(k) é médio então K_d é médio.

A superfície Fuzzy encontrada é mostrada na figura 6. Nela, pode-se observar o caráter não-linear do processo de fermentação.

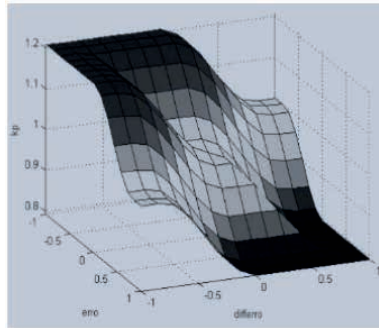


Figura 6. Superfície Fuzzy

6 | RESULTADOS

Para a comparação dos resultados foi utilizado como referência a integral do erro absoluto (ITAE) e a integral do erro quadrático (ISE) na concentração do produto nas duas campanhas. Esses erros são comumente usados para análise de resultados na área de controle, como visto nos trabalhos de Maurya e colaboradores (2015), entre outros.

Os resultados obtidos nas figuras 7 até 14 mostraram que os dois controladores tiveram resultados satisfatórios, pois mantiveram as variáveis volume e substrato dentro das faixas propostas no controle. Entretanto, a principal variável controlada (produto), uma seguidora de setpoint, de acordo com a campanha objetivada pode ser conferido pelo ITAE e ISE na tabela 1.

Para investigação da robustez dos controladores, a segunda campanha foi gerada com um leve ruído branco nas válvulas da ordem de 5%. Os resultados apontaram ligeira vantagem das duas propostas de mecanismos de ajuste em relação ao controlador clássico PID.

Em relação à resposta ao degrau, como pode-se observar tabela 2, os dois mecanismos de ajuste apresentados tiveram um overshoot pequeno, diferindo no tempo de acomodação inicial, que foi substancialmente menor no FCM-PID.

Com a análise dos resultados, e ponderando os fatores de forma heurística, tem-se que o controlador FCM-PID obteve melhores resultados considerando as duas campanhas propostas, principalmente devido ao fato do controlador Fuzzy-PID ser ajustado exclusivamente para cada campanha, enquanto o FCM-PID foi ajustado uma única vez, provando sua versatilidade. O comparativo dos erros pode ser visto na tabela 1. E, finalmente, a atuação da sintonia adaptativa para os parâmetros K_p e K_d tiveram suas ações mostradas nas figuras 8, 10, 12 e 14 e as ações de sintonia foram perceptíveis no início de cada campanha e no distúrbio provocado pela mudança de setpoint.

	Campanha 1	
	ITAE	ISE
PID Clássico	0,9324	0,0557
Fuzzy-PID	0,9008	0,0534
FCM-PID	0,7502	0,0539

Tabela 1. Comparativo dos erros

	Máximo <i>Overshoot</i> (%)	Tempo de acomodação (h)
PID Clássico	7,3224	15
Fuzzy-PID	3,8655	20
FCM-PID	6,7471	15

Tabela 2. Comparativo da resposta ao degrau

Abaixo, seguem os resultados obtidos para cada mecanismo de ajuste da arquitetura e suas respectivas campanhas.

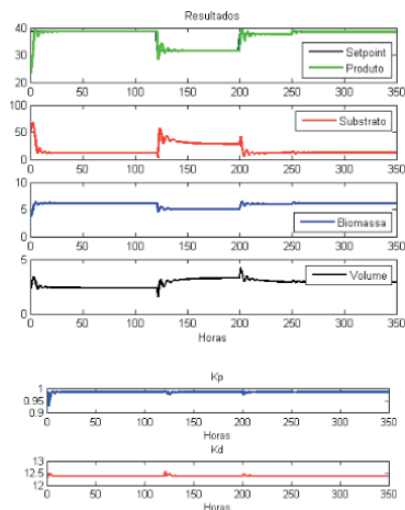


Figura 7. Resultados do Fuzzy-PID para a campanha 1

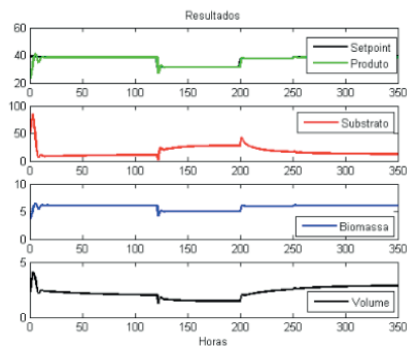


Figura 8. Ganhos do Fuzzy-PID para a campanha 1

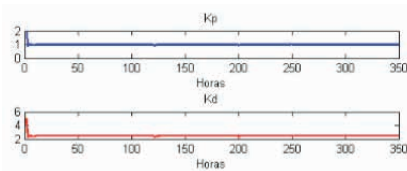


Figura 9. Resultados do FCM-PID para a campanha 1

71 CONCLUSÃO

Neste artigo, foram exploradas duas técnicas computacionais inteligentes, a lógica Fuzzy clássica e os Fuzzy Cognitive Maps (FCM), para ajustar uma arquitetura adaptativa em um processo de fermentação alcoólica. Os resultados obtidos confirmaram a natureza não-linear e de fase não mínima do processo, além de mostrar uma correlação significativa entre as variáveis de estado. Para avaliar o desempenho dos controladores propostos, foram realizadas duas campanhas de fermentação distintas, e os resultados foram consistentes, demonstrando a robustez dos controladores mesmo diante de ruído nas válvulas. Como direções para pesquisas futuras, sugere-se a implementação de um controlador Fuzzy e/ou Dynamic-Fuzzy Cognitive Maps, que permita a ajuste dinâmico das relações causais para controlar as válvulas e funções de um sistema supervisor. Essas melhorias podem resultar em avanços no controle do processo e no aprimoramento geral do desempenho.

REFERÊNCIAS

ARRUDA, L. V. R.; MENDONÇA, M.; NEVES, F.; CHRUN, I. R. e PAPAGEORGIOU, E. I. "Artificial life environment modeled by dynamic fuzzy cognitive maps". IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2016.

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". Dissertação (Curso de pós-graduação em engenharia elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, 2009.

- KASABOV, N. K. "Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering". The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1996.
- KOSKO, B. "Fuzzy cognitive maps". Int. J. Man Mach Stud, 1986.
- LIMA, F. e SERRA, G. "Fuzzy PID controller multiobjective genetic design". In: 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Auckland, 2015.
- MAHER, M. "Modélisation élaboration estimation et de commander: application à um bioprocédé". Tese - Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, Toulouse, 1995.
- MAURYA, A. K; BONGULWAR, M. R. e PATRE, B. M. "Tuning of fractional order PID controller for higher order process based on ITAE minimization". In: 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, 2015.
- MENDONÇA, M.; ANGELICO, B.; ARRUDA, L. V. R. e F. NEVES JR. "A dynamic fuzzy cognitive map applied to chemical process supervision". Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 26, n. 4, p. 1199-1210, 2013.
- OGATA, K. "Modern Control Engineering". 5ª ed. Prentice Hall, New Jersey, 2010.
- PAPAGEORGIOU, E. I. "Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering from Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms". Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- PASSINO, M. K. e YURKOVICH, S. "Fuzzy control". Addison-Wesley, Menlo Park.
- WANG, R.; LUO, F.; HUANG, X. e LI, P. "New elevator energy feedback control system design based on fuzzy PID controller". In: Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE, 2012.
- YESIL, E.; KUMBASAR, T.; KARASAKAL, O. "Self-tuning interval type-2 fuzzy PID controllers based on online rule weighting". In: 2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Hyderabad, 2013.
- ZADEH, L. A. "An introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems". Kluwer Academic Publisher, Boston, 1992.
- ZHOU, D.; QIAN, C.; WEI, Q. "Adaptive learning control of nonlinear systems with unknown dead-zone inputs". Information Sciences, v. 372, p. 380–391, 2016.