

IMPLEMENTAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID *FUZZY* EM REATOR CONTÍNUO DE CRAQUEAMENTO TÉRMICO

M. LAZZARI¹, V. R. WIGGERS¹, R. GOZDZIEJEWSKI Jr¹, H. F. MEIER¹ e L. ENDER¹

¹ Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos

E-mail para contato: ender@furb.br

RESUMO – Os controladores PID clássicos são bastante usados para controlar os processos industriais e assim permitir um melhor desempenho do mesmo e de forma segura e confiável. Sugere-se um estratégia de controle PID com ajuste on-line de seus parâmetros, baseados em lógica *fuzzy*, denominado PID *fuzzy*. A estratégia abordada tem como objetivo um melhor ajuste dos parâmetros do controlador, resultando uma qualidade operacional melhor e qualidade dos produtos obtidos superior. Apresenta-se neste trabalho a metodologia empregada, bem como um estudo comparativo do PID *fuzzy* e o PID clássico, aplicados em um reator contínuo de craqueamento térmico. Os experimentos foram conduzidos na temperatura de 550°C, sendo provocadas perturbações na temperatura e na vazão de alimentação do reator, caracterizando problemas servo e regulador, respectivamente. Os resultados experimentais foram analisados através dos critérios de erro ISE, IAE e ITAE e do consumo de energia do reator. Com base nos experimentos realizados, verificou-se a eficiência da estratégia implementada, PID *fuzzy*, resultando em um controlador mais robusto.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de conjunto *fuzzy* foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley). A lógica *fuzzy* está relacionada com os princípios formais de raciocínio aproximado. A importância desta da lógica *fuzzy* vem do fato que a maioria dos modos de raciocínio humano está relacionado à inferência de respostas aproximadas para questões baseadas em conhecimentos inexatos, incompletas ou não totalmente confiáveis.

O desenvolvimento de um sistema de controle *fuzzy* é baseado na idéia de incluir o “conhecimento especialista” ou “experiência” de um operador para se obter a melhor estratégia de controle. A lógica *fuzzy* utiliza variáveis lingüísticas no lugar de variáveis numéricas. Variáveis lingüísticas admitem como valores apenas expressões lingüísticas (ou termos primários), que são representadas por conjunto *fuzzy* (Almeida *et al.*, 2001).

Atualmente observam-se inúmeras indústrias necessitando de estratégias de controle em seus processos produtivos e, com isso, vem crescendo o incentivo pela implementação de estratégias de controle de muitos processos industriais complexos. Essas estratégias de controle avançadas requerem implementação dos algoritmos em microprocessadores e computadores para que seja possível ter

ações mais rápidas e precisas quanto ao desempenho e segurança do processo. A utilização dos conceitos estabelecidos na lógica *fuzzy* no ajuste on-line dos parâmetros do controlador PID são passíveis de implementação em microprocessadores, permitindo assim embarcar a estratégia de controle proposta em controladores comerciais.

Um processo de craqueamento térmico é um processo termoquímico que decompõem a matéria orgânica, desmembrando as cadeias dos compostos, formando novos produtos (Wiggers, *et al.*, 2013). O reator de craqueamento térmico opera em regime contínuo e apresenta comportamento altamente não linear, pois as reações de decomposição térmica são bastante complexas. O processo de craqueamento térmico sofre influência de diversas variáveis operacionais sendo uma unidade altamente interessante para avaliação de estratégias de controle (Lazzari, 2012).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Mesmo com o grande avanço de técnicas de controle avançado e sua tendência crescente de implementação na indústria de processos, é ainda muito comum a aplicação de técnicas de controle clássicas, especificamente o PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Uma das possíveis razões para isso é a sua larga gama de aplicações e seu relativo baixo custo e facilidade de implantação quando comparado com técnicas de controle avançado. Levando-se isso em consideração neste trabalho, o controle clássico através dos controladores PID é também implementado e será comparado com o controle PID *fuzzy*. A estratégia de controle proposta está baseada no PID clássico, diferenciando-se por usar da lógica *fuzzy* no ajuste *on-line* dos parâmetros do controlador.

2.1. Estratégia Clássica de Controle PID

O algoritmo de controle PID é uma modalidade de controle clássico, onde a ação aplicada sobre uma variável manipulada é proporcional ao erro verificado entre o valor desejado e o medido. Três parcelas são consideradas: uma de proporcionalidade direta a cada novo erro, outra de proporcionalidade à soma acumulada do erro e uma terceira de proporcionalidade à taxa de variação do erro. O PID traduz a idéia de que a variável manipulada será alterada proporcionalmente ao erro que aparece a cada instante, ao acúmulo (integral) do erro ao longo do tempo e à taxa de variação do erro da variável controlada. Segundo Iserman (1989):

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (1)$$

Onde:

$$q_0 = k_c \left(1 + \frac{T_0}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_0} \right) \quad (2)$$

$$q_1 = -k_c \left(1 + 2\frac{\tau_d}{T_0} - \frac{T_0}{2\tau_i} \right) \quad (3)$$

$$q_2 = k_c \frac{\tau_d}{T_0} \quad (4)$$

Desta forma o algoritmo de controle é conhecido como algoritmo de velocidade (Iserman, 1989).

Ajustes do Controle PID Clássico

Um dos procedimentos mais utilizados para o ajuste dos parâmetros *PID* baseia-se em procedimentos empíricos, os quais analisam o comportamento do sistema em malha fechada como aberta, variando-se as condições operacionais de entrada através de perturbações do tipo degrau, oscilatórias e outras.

Dentre os procedimentos de ajuste, destacam-se o método de *Ziegler-Nichols*, *Cohen-Coon* (Curva de Reação) e *ITAE*, dos quais o primeiro foi usado neste trabalho. Estes procedimentos são descritos em detalhes em Seborg (1989), Sthephanopoulos (1984) e Ogata (2003).

O valor de *Ku* é o valor do ganho proporcional que torna a saída do processo oscilante mantendo uma amplitude constante, e o *Pu* é o período desta oscilação. A determinação dos parâmetros *Ku* e *Pu* foram realizadas pela técnica proposta por Åström e Hägglund (1984), os quais desenvolveram uma técnica atrativa e alternativa para automatizar o método da curva de oscilação de Ziegler e Nichols. No teste auto-tuning via relê, um simples ensaio experimental é utilizado para determinar *Ku* e *Tu*.

2.2 Controlador PID Fuzzy

A estrutura *PID fuzzy* apresentada é uma alternativa interessante para tratar estes processos por realizar ajuste *on-line* dos parâmetros do PID. O sistema de inferência *fuzzy* é composto por um conjunto de regras que descrevem o comportamento desejado do controlador. O controlador PID *fuzzy* é expresso de forma similar ao PID clássico, diferenciando-se no ajuste *on-line* dos parâmetros do controlador (*Kc*, *Ki*, *Kd*), da seguinte forma:

Kc – ganho Proporcional

$$K_i = \frac{k_c}{\tau_i} \quad (\text{ganho Integral}) \quad (5)$$

$$K_d = k_c \cdot \tau_d \quad (\text{ganho Derivativo}) \quad (6)$$

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos da estratégia de controle *PID fuzzy*, onde pode-se verificar que a estrutura da estratégia de controle está baseada na estratégia *PID* clássica, com ajustes *on-line* de seus parâmetros de acordo com um sistema de inferência *fuzzy*.

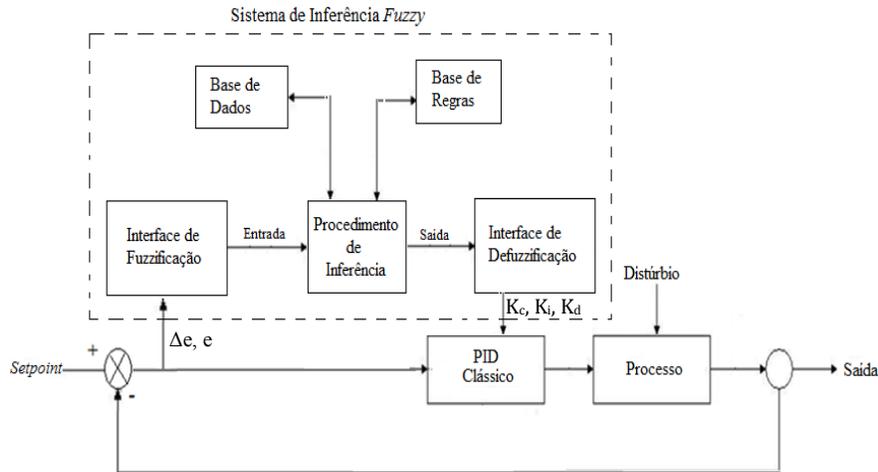


Figura 1: Estrutura de um controlador *fuzzy* (Fonte: SANDRI *and* CORREA, 1999).

Sistema Fuzzy Implementado

O sistema *fuzzy* implementado está fundamentada na proposta de Freitas *et al.* (2008), composto de:

- 2 entradas: erro e taxa de variação do erro;
- 3 saídas: K_c , K_i e K_d ;
- Sistema 25 regras para cada saída;
- Defuzzificação através do método do centro da área.

Funções de Pertinência

Na Figura 2 tem-se as funções de pertinência das variáveis de entrada, erro e taxa de erro. Nesta figura observam-se as seguintes nomenclaturas abaixo arroladas, as quais associam as respectivas variáveis linguísticas em parâmetros mensuráveis nas etapas de *fuzzificação* e *defuzzificação*.

BN = grande negativo;
 SN = pequeno negativo;
 EZ = zero;
 SP = pequeno positivo;
 BP = grande positivo;

Regras do Sistema Fuzzy

O conjunto de regras para o ajuste dos parâmetros K_c , K_i e K_d estão resumidas nas Tabelas 1 a 3, respectivamente. Os pontos **P** e **G**, representam os limites inferior e superior das variáveis de saída da lógica *fuzzy* (K_c , K_i , K_d). O controlador PID que representa o ponto **G**, apresenta ajuste de *Ziegler-Nichols*, aqui nominado de *PID fast*, e o controlador PID que representa o ponto **P** é um controlador mais conservativo (*PID slow*).

Tabela 1: Regras de Ajuste para o Ganho Proporcional (K_c).

K_c	Erro				
Taxa erro	BN	SN	EZ	SP	BP
BN	G	G	G	G	G
SN	G	G	P	G	G
EZ	G	P	P	P	G
SP	G	G	P	G	G
BP	G	G	G	G	G

 Tabela 2: Regras de Ajuste para o Ganho Integral (K_i).

K_i	Erro				
Taxa erro	BN	SN	EZ	SP	BP
BN	P	P	G	P	P
SN	P	G	G	G	P
EZ	P	G	G	P	P
SP	P	G	G	G	P
BP	P	P	G	P	P

 Tabela.3: Regras de Ajuste para o Ganho Derivativo (K_d).

K_d	Erro				
Taxa erro	BN	SN	EZ	SP	BP
BN	P	P	P	P	P
SN	G	P	P	P	G
EZ	G	P	P	P	G
SP	G	P	P	P	G
BP	P	P	P	P	P

Diante do apresentado nas tabelas anteriores, no sistema de inferência *fuzzy* implementado, o conjunto de regras e a etapa de defuzzificação é distinto para cada parâmetro de ajuste do controlador

2.3 O Reator de Craqueamento Térmico

O reator de craqueamento térmico utilizado nesse se encontra localizado no Laboratório de Desenvolvimento de Processos do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Regional de Blumenau.

O equipamento possui uma seção onde ocorre a reação de craqueamento e uma seção onde promove-se a condensação e recuperação dos produtos craqueados termicamente. Essa Figura é dividida em seções para melhor entendimento, portanto:

O reator possui seis termopares do tipo K (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 e T_6), para medição das temperaturas na entrada, na saída e ao longo do reator. Possui um $PT 100$ (T_7) para medir a

temperatura do condensado e também um sensor *GTP 1000* para monitorar a pressão do sistema, este localizado na saída da bomba.

A seção onde ocorre a reação de craqueamento no reator é composta de resistências elétricas que aquecem a unidade e foi dividida em quatro malhas de controle distintas que tem o objetivo de favorecer a isotermicidade do sistema.

A primeira malha (*M1* ou *SSRP1*) é composta por três resistências elétricas de 350 W cada. A segunda malha (*M2* ou *SSRP2*) possui duas resistências de 350 W cada. A terceira malha (*M3* ou *SSRP3*) possui três resistências de 350 W cada e a quarta malha (*M4* ou *SSRP4*) tem duas resistências de 350 W cada.

A unidade experimental possui um sistema *SCADA* (“*Software Control and Data Aquisition*”) desenvolvido pela equipe do Laboratório LDP que possibilita a manutenção das condições operacionais através do controle das variáveis manipuladas e aquisição de todas as variáveis do processo aferidas durante o experimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O procedimento experimental adotado na execução dos ensaios é descrito a seguir: Após atingir e estabilizar a temperatura de *setpoint* do reator (550°C), gera-se uma perturbação servo e uma perturbação regulador no processo. Para a perturbação servo incrementa-se em 20°C a temperatura de *setpoint* (perturbação I) e acompanha-se por aproximadamente 01 hora a evolução dos perfis de temperatura, em seguida, diminui-se a temperatura em 20°C no *setpoint* (perturbação II) e novamente aguarda-se 01 hora. Após isso, parte-se para a perturbação regulador, onde diminui-se a vazão de alimentação do reator de 283,4 g/h para 197,9 g/h (perturbação III); aguarda-se 01 hora para então retornar a vazão de alimentação inicial (perturbação IV) e observa-se novamente a evolução dos perfis por 01 hora. Após a estabilização desta última etapa finaliza-se o experimento.

A título de comparação foram gerados experimentos considerando a sequência de perturbações descritas, para os controladores *PID slow*, *PID fast* e *PID fuzzy*. Os dois primeiros representam os limites dos parâmetros (K_c , K_i , K_d) usados na lógica *fuzzy*. Seguem nas Figuras 2 a 4 os resultados das respostas das malhas de controle e ações de controle, para os três controladores avaliados.

Diante dos resultados dos experimentos apresentados e com os dados plotados na Tabela 4, observa-se em relação ao *PID slow* um ganho na eliminação de erros pequenos (*IAE* menor) e erros que persistem no tempo (*ITAE* menor). Porém este desempenho não é verificado na eliminação de grandes erros. De uma forma geral, o desempenho do *PID slow* e *PID fuzzy* foram semelhantes nestas condições de operação. Observa-se as ações de controle mais enérgicas nas regiões de maior erro, o que está previsto nas regras *fuzzy* implementadas. Os resultados dos experimentos para o *PID fast*, mostram um comportamento oscilatório das variáveis manipuladas e ações enérgicas na carga térmica do reator. Os parâmetros do *PID fast* são os ajustados pela metodologia proposta por Ziegler-Nichols (Ogata, 1994), num procedimento de *auto-tuning*, com a determinação de K_u e P_u pela técnica proposta por Åström e Hägglund (1984). Independente da discussão se o *auto-tuning* mostrou-se

eficiente, pode-se afirmar que o PID *fuzzy* aproximou-se bastante da resposta proporcionada pelo PID *slow*, buscando um comportamento mais robusto.

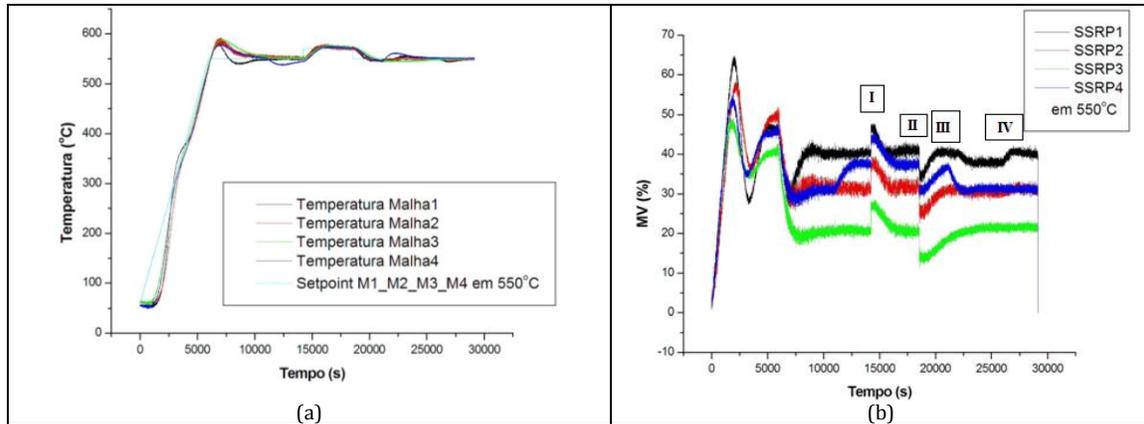


Figura 2: Temperaturas para as malhas de controle e ações de controle para PID *slow*.

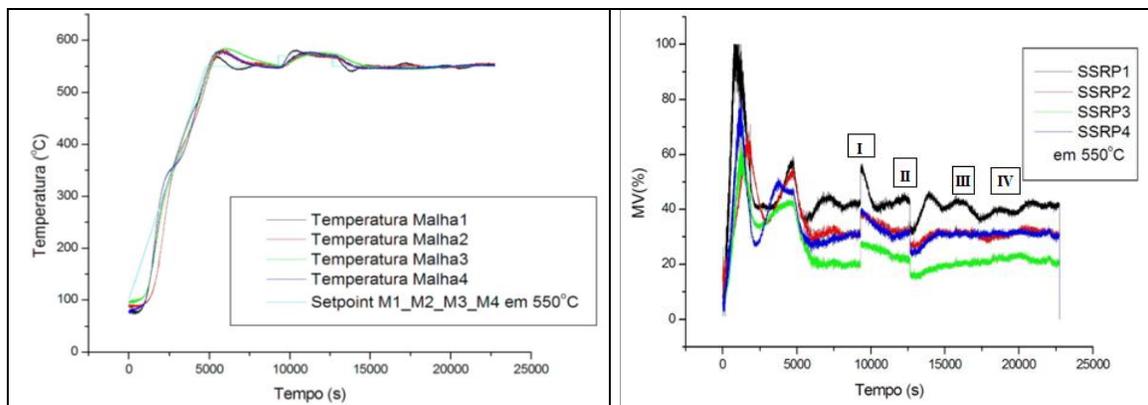


Figura 3: Temperaturas para as malhas de controle e ações de controle para PID *fuzzy*.

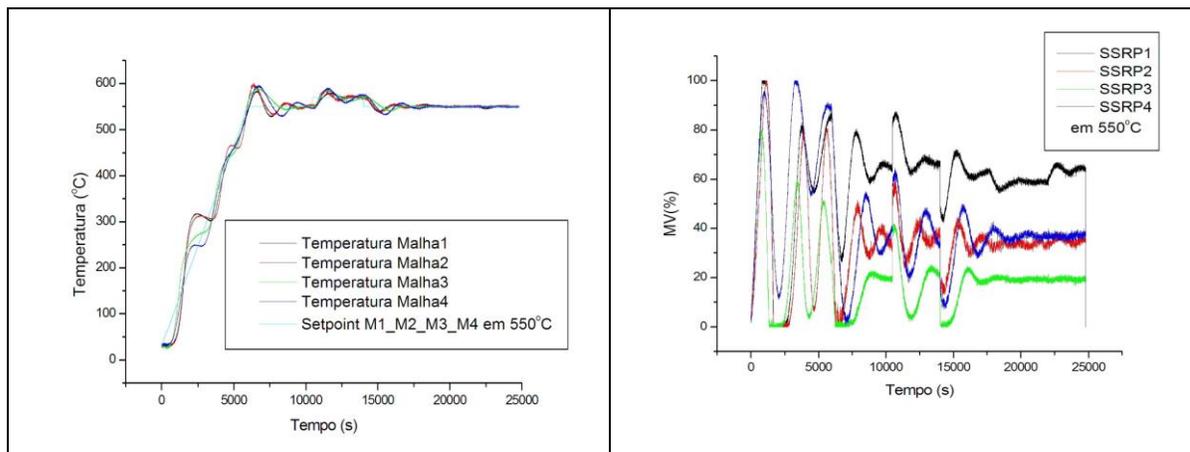


Figura 4: Temperaturas para as malhas de controle e ações de controle para PID *fast*.

Os resultados mostram que as regras definidas na lógica *fuzzy* foram eficientes, proporcionando um ajuste *on-line* dos parâmetros eficaz. O consumo de energia nos três casos avaliados permaneceu constante

Tabela 4: Valores dos critérios de erro e consumo de energia (550°C).

Critério de Erro – Malha 1	PID <i>slow</i>	PID <i>fuzzy</i>	PID <i>fast</i>
ITAE – Servo	41.569.015,40	27.027.797,40	28.883.982,90
ITAE – Regulador	20.417.879,90	17.497.134,50	8.804.600,90
IAE – Servo	32.114,50	34.799,80	32.978,40
IAE – Regulador	5.683,80	12.345,20	6.197,30
ISE – Servo	376.593,73	424.148,52	368.635,56
ISE – Regulador	44.795,68	40.883,28	15.064,39
Consumo de energia kJ/kg	17.058,00	17.121,07	16.743,60

3. CONCLUSÕES

A implementação da estratégia de controle PID com ajuste *on-line* dos parâmetros mostrou-se viável e de implementação relativamente simples, possibilitando inclusive embarcar a estratégia de controle em hardware. A proposta das regras *fuzzy* tem gerado um controlador robusto, adaptando-se as adversidades implementadas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, O. M., COELHO, A. A. R. **Controlador PID com Escalonamento Nebuloso dos Ganhos: Auto-sintonia, Análise e Implementação.** V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, V SBAI, 2001
- FREITAS, L. T. F., LIMA, O. M., ALMEIDA, O. M., BRAGA, P. S. A. **Aprendizado por Reforço no Ajuste PID-Fuzzy Aplicada.** 2008
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** Rio de Janeiro: Prentice Hall, ed.4, 2003
- SANDRI, S., CORREA, C. **Lógica Nebulosa.** V Escola de Redes Neurais, São José dos Campos, São Paulo, 1999
- SEBORG, D.E., EDGAR T.F., MELLICHAMP, D.A. **Process Dynamics and Control.** John Willey, 1989
- STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control, an Introduction to Theory and Practice.** Prentice-Hall Inc: New Jersey, 1984
- WIGGERS, V. R. **Simulação, Projeto e Construção de uma Unidade Piloto de Multi-propósito para Pirólise de Resíduos.** (Dissertação de Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2003
- ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets.** Information and Control, v.8, p.338, 1965