
CONTROLE ADAPTATIVO VERSUS CONTROLE FUZZY: UM ESTUDO DE CASO EM UM PROCESSO DE NÍVEL

Cristiano C. Luiz, Allan C. Silva, Antonio A. R. Coelho e Augusto H. Bruciapaglia

Laboratório de Controle e Microinformática

Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina

Caixa Postal 476 - 88040.900 Florianópolis, SC

RESUMO - Este artigo apresenta um estudo comparativo experimental de três controladores monovariáveis quando aplicados a uma planta de nível. As técnicas de controle baseiam-se nas estratégias PI adaptativo, preditivo e fuzzy. As ações de controle adaptativo e preditivo são implementadas com um algoritmo de identificação on-line para obter os parâmetros do processo e do controlador. A expertise e experiência de operadores de processos permitem elaborar um conjunto de regras heurísticas para implementação do controlador fuzzy, evitando-se assim a etapa complexa da modelagem do processo presente em controladores adaptativos e preditivos. Os resultados experimentais mostram que os controles proporcionam respostas transitória e de regime adequadas para diferentes condições de operação. As melhores características das diversas classes dos sistemas de controle podem ser combinadas para a realização de um esquema de controle mais eficiente e inteligente.

Palavras Chave: controle preditivo, identificação, lógica fuzzy, controle de nível, PID.

ABSTRACT - This paper presents an experimental comparative study of three monovariate controllers when applied in a level process. The control techniques are based on PI adaptive, predictive and fuzzy strategies. The adaptive and predictive control actions are implemented with an identification procedure in order to find the process and controller parameters. Expertise and experiences of process operators allow to elaborate a set of rules to a fuzzy logic control, avoiding the complex step of process modeling in the predictive and adaptive control algorithms. Experimental results shown that the controllers provide good transient and steady-state responses in different operating conditions. The best characteristics of each of these various classes of control systems may be combined for realizing a more efficient and intelligent control scheme.

Key Words: predictive control, identification, fuzzy logic, level control, PID.

1 - INTRODUÇÃO

A teoria clássica de controle por realimentação tem sido a base para o desenvolvimento de simples sistemas de controle automático. As principais razões para a larga aplicação na indústria deve-se à simplicidade de implementação, baixo custo e o princípio matemático é facilmente compreendido por operadores (engenharia não-complexa). Entretanto, os controladores de realimentação com ganhos fixos são insuficientes para compensar variações de parâmetros no processo, bem como, adaptarem-se para mudanças no meio. A necessidade de superar tais problemas e de uma sintonização adequada para o controlador, não apenas para um único ponto de operação mas em diferentes pontos de operação, tem motivado a idéia de aplicação de algoritmos de controle adaptativo, preditivo e fuzzy (Åström e Hägglund, 1995).

Nas últimas três décadas, numerosas técnicas de controle adaptativo tem sido propostas na literatura de controle de processos para substituir os métodos de controle clássicos convencionais na indústria (Clarke *et alii*, 1987). Os desenvolvimentos na teoria de controle adaptativo devem-se às teorias da estabilidade e do controle moderno. A habilidade para preservar o desempenho do sistema de controle adaptativo em malha fechada na presença de variações na dinâmica da planta e no meio tem motivado a crescente experimentação em diversas aplicações práticas. Os controladores adaptativos podem ser obtidos segundo dois procedimentos: direto e indireto. O caso direto utiliza um estimador recursivo para obter diretamente os parâmetros da lei de controle de realimentação a partir da medidas de entrada e saída do processo (como exemplo, tem-se o controlador PI adaptativo). O caso indireto combina um estimador recursivo para obter os parâmetros do modelo da planta e um procedimento de projeto do algoritmo de controle (controlador preditivo). A imprecisão na etapa para determinação da modelagem da planta ou dos parâmetros do controlador conduzem a desempenhos inadequados na lei de controle. Adicionalmente, os controladores adaptativos e preditivos apresentam parâmetros de projeto que podem ser de difícil sintonização e entendimento para engenheiros e operadores de processos (relacionar os parâmetros de projeto com as ações de controle é

uma tarefa complexa de engenharia) (Yoon e Clarke, 1994; Clarke, 1994).

A teoria dos conjuntos fuzzy tem apresentado popularidade em várias aplicações práticas incluindo-se gerenciamento econômico, medicina e controle de processos e, utiliza conceitos abstratos representados por termos lingüísticos tais como: "muito frio" e "muito quente", entre outros (Sugeno, 1985; Lee, 1990). Os termos lingüísticos são aplicados em sistemas baseados em regras de produção para formar o algoritmo de controle fuzzy. O controlador lógico fuzzy (FLC) está baseado em um modelo lógico que representa os diferentes procedimentos que um operador humano toma ao executar o controle manual em um processo. O FLC apresenta um conjunto de regras heurísticas e utiliza a teoria dos conjuntos difusos apresentada por L. A. Zadeh para transpor as regras de controle lingüísticas em uma estratégia de controle coerente (Zadeh, 1965). O FLC é um algoritmo de controle não-matemático que requer a sintonia fina entre a base de regras e as funções de pertinência, ou vice-versa. O projeto de um algoritmo de controle fuzzy pode ser baseado na resposta dinâmica do processo em malha fechada e não necessita do modelo matemático do processo conforme filosofia dos controladores adaptativos e preditivos (tarefa complexa). A primeira experimentação do FLC em uma planta em escala de laboratório (máquina a vapor) foi apresentada em 1975, mostrando a viabilidade do FLC em atividades de controle de processos industriais. Uma lista de recentes desenvolvimentos e aplicações da lógica fuzzy é apresentada em Schwartz *et alii* (1994).

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo de três algoritmos de controle SISO (uma entrada, uma saída) quando aplicados a uma planta de nível. Por quê os diferentes algoritmos de controle são comparados? Os diversos algoritmos de controle utilizam diferentes técnicas de projeto. Assim, pela aplicação de cada algoritmo de controle, para solucionar o mesmo problema de controle, pode-se entender as diferenças, similaridades e observar as vantagens e desvantagens de cada metodologia de controle sob condições idênticas de operação (os três sistemas são comparados com respeito à mudança de setpoint e efeito de perturbações de carga). A implementação de cada algoritmo requer ajuste de parâmetros locais e correções heurísticas sobre a planta particular. Apesar de se tirarem algumas conclusões sobre os méritos e deméritos de cada sistema de controle, espera-se que os resultados dos estudos experimentais proporcionem habilidade e sentimento para o desenvolvimento de uma estratégia de controle eficiente e inteligente. Adicionalmente, embora a literatura de controle de processos seja rica na descrição de técnicas e procedimentos de projeto, poucos

em tempo real (a avaliação de um grande número de algoritmos de controle baseia-se em ambientes de simulação digital).

A próxima seção descreve as características práticas do sistema de controle de nível. Nas seções 3, 4 e 5 são apresentados os resumos das técnicas de controle PI adaptativo, preditivo e lógica fuzzy. As seções 6 e 7 apresentam e discutem os resultados do estudo experimental e conclusões, respectivamente.

2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL

O sistema de controle de nível consiste de um sistema mono-tanque desenvolvido no laboratório de controle de processos do EEL/UFSC. Um processo de nível está presente em diversos ambientes industriais. O diagrama esquemático do protótipo experimental é apresentado na figura 1.

A planta de nível consiste de um tanque retangular de vidro com dimensões de 29cmx12cmx28cm e com capacidade para 9,8 litros. Na base do tanque, existe um reservatório com aproximadamente 10 litros de fluido. A água é bombeada do reservatório ao tanque por uma mini-bomba elétrica DC. O nível é medido por um sensor do tipo bóia (potenciômetro) acoplado ao tanque. As variações na resistência são convertidas em tensões analógicas por uma Ponte de Wheatstone com ajuste de zero. Um circuito transmissor (figura 2) com amplificadores operacionais para o ganho (ajuste de span) é utilizado na calibração do nível medido para a faixa de 0 a 5 volts (5cm a 18cm). Adicionalmente, existe um circuito de potência, para acionamento, envolvido na implementação (figura 3). Uma placa de comunicação para aquisição de dados e controle digital é utilizada. As características básicas da placa para o controle por computador são: um conversor analógico/digital com resolução de 8 bits, faixa de entrada de 0 a 5 volts e tempo de conversão de 40 μ s e um conversor digital/analógico com resolução de 8 bits, faixa de saída de 0 a 5 volts e tempo de conversão de 0.8 μ s. Um microcomputador IBM PC-AT com coprocessador aritmético e a linguagem pascal, para o desenvolvimento dos algoritmos de controle, são utilizados. O objetivo do controle é regular o nível da água fornecendo a correta voltagem para a mini-bomba DC que, consequentemente, consiste em equilibrar as vazões de entrada e saída da planta em um ponto previamente definido. Informações adicionais do sistema de controle de nível estão disponíveis em Coelho (1995).

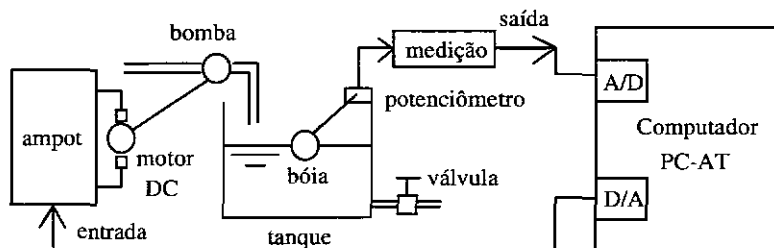


Figura 1 - Hardware do sistema de controle de nível

trabalhos apresentam propostas práticas para o controle digital

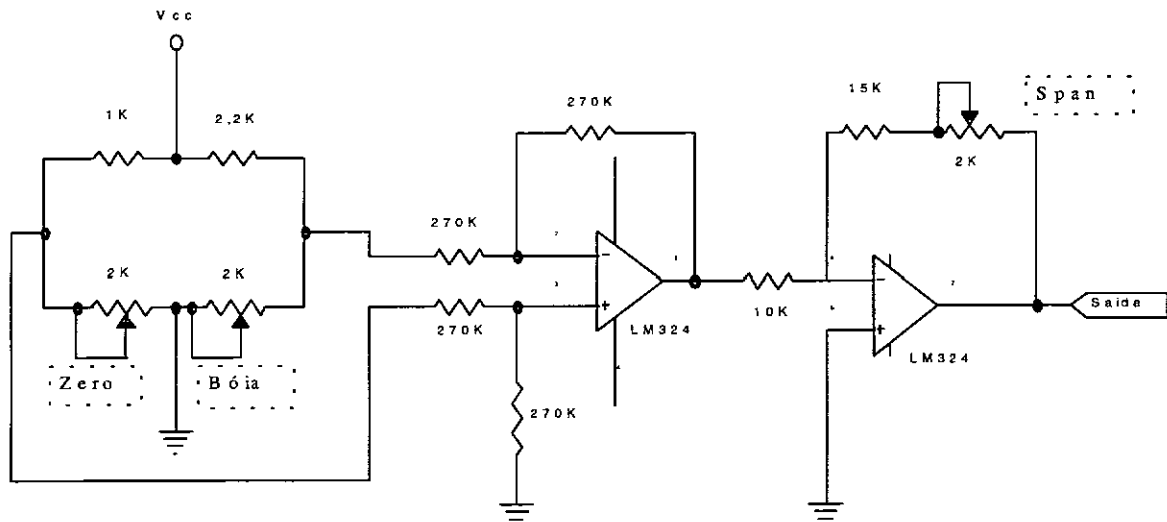


Figura 2 - Circuito de transmissão e condicionamento de nível

3 - CONTROLE PI ADAPTATIVO

A maioria das aplicações industriais utiliza os controles PI e PID. A popularidade decorre da simplicidade e, se sintonizado adequadamente, proporciona condições estáveis ao processo controlado. Em situações onde existem alterações na planta devido a mudanças no ponto de operação, falhas no equipamento e outros fatores que alteram o processo, é necessário repetir-se regularmente um procedimento de sintonia dos ganhos do controlador para manter a integridade do sistema. O controlador PI adaptativo (PI-A) enquadra-se neste tipo de estrutura e é desenvolvido a partir do controle auto-ajustável de variância mínima generalizada (GMV) como proposto por Clarke e Gawthrop (1975).

A lei de controle PI é obtida considerando-se o modelo do processo do tipo CARIMA ("Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average"), ou seja:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t) + \frac{\xi(t)}{\Delta} \quad (1)$$

e, minimizando-se a seguinte função custo:

$$\min_{u(t)} J = E\{\hat{y}(t+k) + \Gamma\Delta u(t)\}^2 \quad (2)$$

onde

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(t+k) &= \hat{y}(t+k) + \Gamma\Delta u(t) = \\ &= F(z^{-1})y(t) + [G(z^{-1}) + \Gamma]\Delta u(t) \end{aligned} \quad (3)$$

obtém-se o controle incremental

$$\Delta u(t) = \frac{F(z^{-1})}{G(z^{-1}) + \Gamma} y(t) \quad (4)$$

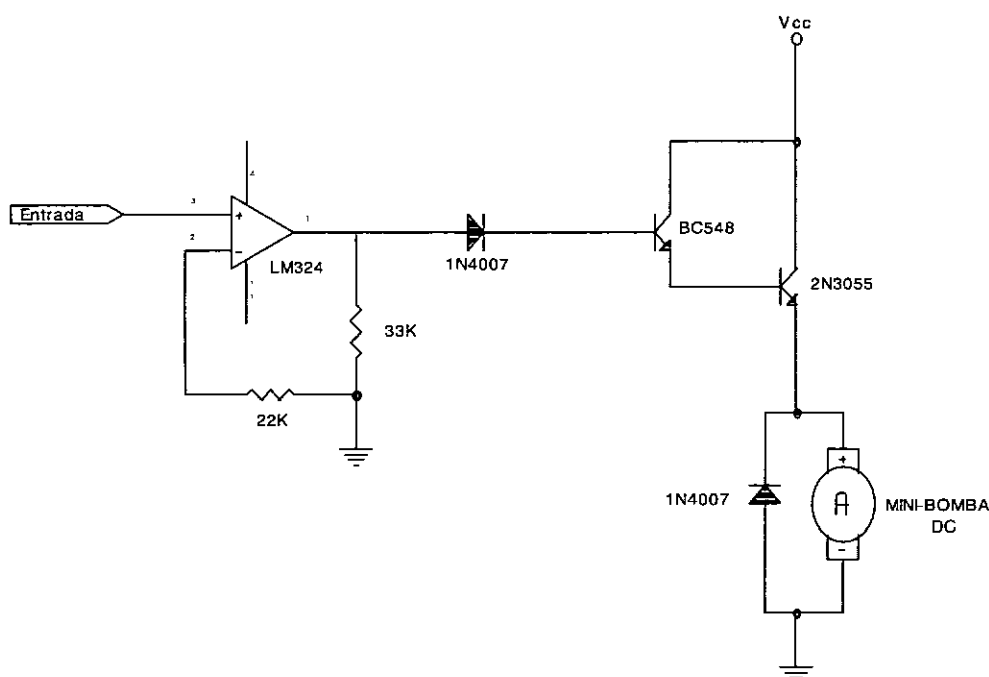


Figura 3 - Esquemático eletrônico de atuação da mini-bomba DC

A ponderação Γ é um parâmetro de projeto para reduzir o esforço de controle (responsável também pela estabilidade do sistema em malha fechada) e especificado pelo operador. Na implementação do algoritmo auto-ajustável direto, os parâmetros do modelo preditivo devem aparecer diretamente na lei de controle. Assim, rescrevendo-se a equação (3)

$$\hat{\phi}(t+k) = \hat{\alpha}_0 y(t) + \hat{\alpha}_1 y(t-1) + \dots + \hat{\beta}_0 \Delta u(t) + \dots + \hat{\beta}_l \Delta u(t-l) \quad (5)$$

com

$$\begin{aligned} l &= n_b + k - 1; \\ \alpha(z^{-1}) &= F(z^{-1}); \\ \beta(z^{-1}) &= G(z^{-1}) + \Gamma \end{aligned} \quad (6)$$

calculam-se os incrementos do sinal de controle através da seguinte equação

$$\Delta u(t) = \frac{\alpha(z^{-1})}{\beta(z^{-1})} y(t) \quad (7)$$

Para o desenvolvimento da lei de controle PI auto-ajustável deve-se generalizar a estrutura do controlador da equação (7), isto é:

$$(\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_l z^{-l}) \Delta u(t) = (\alpha_0 + \dots + \alpha_m z^{-m}) [y_r(t) - y(t)] \quad (8)$$

onde $y_r(t)$ é o setpoint de $y(t)$ e considerar um processo de primeira ordem a ser controlado (os termos $\beta_1 \dots \beta_l$ são nulos). Logo, a equação (8) torna-se

$$\Delta u(t) = [\alpha_0 \varepsilon(t) + \alpha_1 \varepsilon(t-1)] / \beta_0 \quad (9)$$

com

$$\varepsilon(t) = y_r(t) - y(t)$$

Como o algoritmo para o controlador PI discreto é dado por

$$\Delta u(t) = K_c \left[\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1) + \frac{T_s}{T_i} \varepsilon(t) \right] \quad (10)$$

as constantes ganho proporcional (K_c) e tempo integral (T_i) podem ser determinadas comparando-se as equações (9) e (10), ou seja:

$$K_c = -\alpha_1 / \beta_0 \quad (11)$$

$$T_i = \frac{-\alpha_1 T_s}{\alpha_0 + \alpha_1} \quad (12)$$

O estimador dos mínimos quadrados recursivo pode ser utilizado para atualizar os coeficientes dos polinômios $\alpha(z^{-1})$, $\beta(z^{-1})$ e, consequentemente, K_c e T_i

4 - CONTROLE PREDITIVO

No fim dos anos 70 duas estratégias de controle com horizonte estendido (controle preditivo) são desenvolvidas por diferentes

grupos industriais: na França o MAC "Model Algorithm Control" e nos Estados Unidos da América o DMC "Dynamic Matrix Control". As técnicas de controle foram desenvolvidas para controlar processos multivariáveis com restrições sobre as variáveis de saída e de controle. Devido a simplicidade computacional e aos significativos resultados de implementação, o algoritmo encontra aplicação em sistemas auto-ajustáveis. Clarke (1987) denominou esta ação de controle de controlador preditivo generalizado (GPC). O algoritmo de controle preditivo auto-ajustável com horizonte estendido é o mais recente controle adaptativo apresentado na literatura de controle de processos e é uma generalização do controlador GMV. O GPC apresenta as seguintes características: i) pode ser aplicado em processos de fase não-mínima, ii) as propriedades de rastreamento e estabilidade não são afetadas pelo cancelamento de pólos (ou zeros) estáveis ou instáveis, iii) pode tratar aplicações multivariáveis e atraso de transporte variável ou desconhecido e, iv) proporciona uma lei de controle incremental evitando o problema do offset. No lugar do modelo da planta CARMA, utilizado no projeto de diferentes técnicas de controle auto-ajustáveis, o GPC emprega o modelo CARIMA para eliminar erro em regime entre a variável controlada e a referência para qualquer perturbação de carga e setpoint com comportamento degrau. O GPC representa uma versão robusta do GMV e, provavelmente, é o mais popular algoritmo de controle com horizonte estendido (Yoon e Clarke, 1994; Clarke, 1994).

A lei de controle do GPC é obtida minimizando-se a seguinte função custo:

$$J = \sum_{j=1}^{HY} [y_f(t+j) - y_r(t+j)]^2 + \sum_{j=0}^{HU-1} \Gamma \Delta u^2(t+j) \quad (13)$$

onde Γ é a ponderação do sinal de controle, HY é o horizonte de previsão da saída e HU é o horizonte de controle. Os termos $y_f(t+j)$ e $y_r(t+j)$ são o sinal da saída filtrado pelo polinômio $P(z^{-1})$ e o sinal de referência, respectivamente. Δ é igual a $(1 - z^{-1})$ e $\Delta u(t+j)$ é o incremento do sinal de controle no instante $(t+j)$. Os horizontes e os polinômios de ponderação são os parâmetros de sintonia do GPC. A partir destes diversos parâmetros é possível obter-se diferentes tipos de controladores preditivos e obter o desempenho desejado para o sistema controlado (Clarke *et alii*, 1987; Clarke, 1994).

A previsão da saída filtrada do processo é obtida utilizando-se o modelo do processo CARIMA e dada por:

$$YF = G\Delta U + YFA \quad (14)$$

onde o vetor de saída de previsão (YF) é constituído do vetor incremental futuro ΔU (para ser otimizado) e do vetor de previsão livre da saída (YFA), que contém as medidas disponíveis de entrada e saída. A matriz G é construída com os elementos da resposta ao degrau do modelo do processo.

Minimizando a função custo J, obtêm-se os incrementos futuros ótimos do controle, isto é:

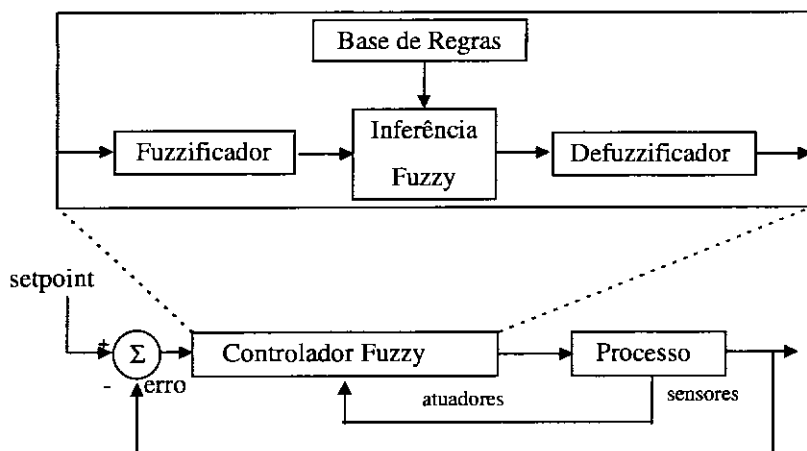


Figura 4 - Sistema de controle fuzzy.

$$\Delta U = [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+HU-1)]^T \quad (15)$$

que são calculados através da seguinte equação:

$$\Delta U = [G^T G + \Gamma I]^{-1} G^T [YR - YFA] \quad (16)$$

Desde que somente o primeiro sinal de controle seja aplicado, então

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t) \quad (17)$$

A habilidade do GPC para produzir um controle estável para sistemas de fase não-mínima é devido à suposição sobre a ação de controle futura em que, após o intervalo $HU > HY$, os incrementos do sinal de controle projetado são assumidos ser iguais a zero, isto é:

$$\Delta u(t+j-1) = 0 ; j > HU \quad (18)$$

Para o sistema de nível um controle adequado pode ser obtido com $HU = 1$, que reduz consideravelmente o esforço computacional do algoritmo de controle.

5 - CONTROLE FUZZY

O controlador lógico fuzzy tem produzido um grande impacto na engenharia de controle de processos. As pesquisas sobre controle fuzzy foram iniciadas a partir do trabalho de E. H. Mamdani e S. Assilian em 1975, motivados pelo Professor L. A. Zadeh há 30 anos atrás. O FLC tem recebido considerável importância na implementação de algoritmos de controle de processos, principalmente em casos onde a modelagem matemática é uma difícil tarefa. (Sugeno,1985). A motivação da abordagem de controle fuzzy veio de casos onde o conhecimento especialista de controle era disponível, seja por meio de operadores ou de projetistas, e os modelos matemáticos envolvidos não eram factíveis ou complexos de serem desenvolvidos. A esperteza e experiência humana são utilizadas na forma de regras com a seguinte estrutura:

SE < condições fuzzy sobre a variável de entrada >

ENTÃO < ação de controle fuzzy >

Estas regras são aplicadas a uma máquina de inferência. O procedimento de fuzzificação estabelece um grau de pertinência para as variáveis de entrada com base nos conjuntos fuzzy. O procedimento de defuzzificação calcula o controle

efetivo a partir das regras para um dado conjunto de entradas. Convencionalmente, o FLC utiliza, como variáveis de entrada, o erro e a variação do erro e, como variável de saída, o controle "crisp" (tensão de saída para a mini-bomba elétrica DC). A figura 4 mostra a estrutura de um sistema de controle lógico fuzzy.

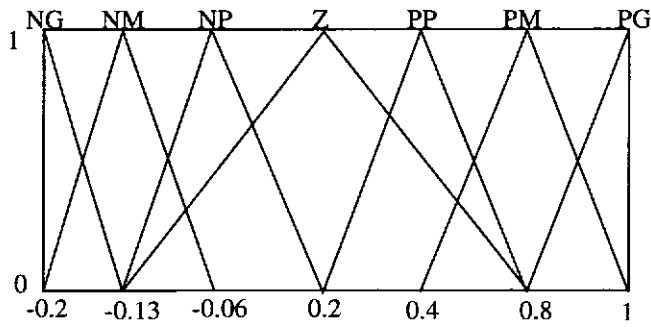
Na implementação do FLC utilizam-se, como variáveis lingüísticas de entrada, o erro (e) e a variação do erro (de) entre o nível do tanque o respectivo setpoint. Como variável de saída, adota-se o incremento na vazão de entrada do processo. As variáveis lingüísticas selecionadas são: positivo-grande (PG), positivo-médio (PM), positivo-pequeno (PP), zero (ZE), negativo-pequeno (NP), negativo-médio (NM) e negativo-grande (NG). A forma das variáveis fuzzy é triangular e o método do centróide é utilizado na defuzzificação. Várias bases de regras fuzzy com diferentes números de regras podem ser identificadas. A tabela 1 mostra o conjunto de regras da implementação do FLC no processo de nível (Sugeno,1985).

As funções de pertinência implementadas para as variáveis de

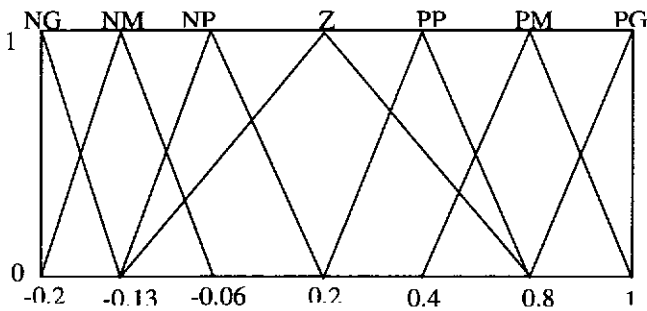
Tabela 1 - Base de regras do FLC.

EVDE	NP	NM	NG	Z	PP	PM	PG
NP	Z		NM	PP			
NM				PM			
NG	PM			PG			
Z	NP	NM	NG	Z	PP	PM	PG
PP				NP	Z		PM
PM				NM			
PG				NG	NM		

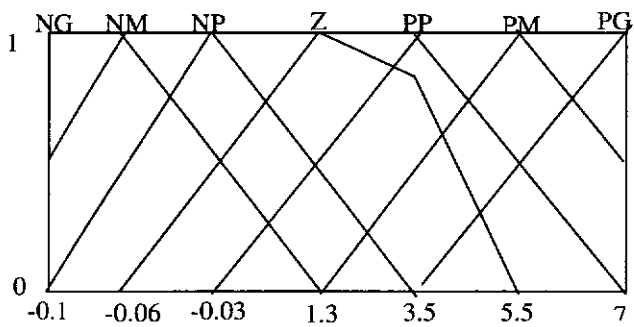
entrada e saída do FLC são:



Erro



Variação do erro



Ação de controle

As funções de pertinência implementadas no FLC são inicialmente aproximadas a partir do estudo da dinâmica em malha fechada do processo de nível sob a ação do controlador PID e, finalmente, sintonizadas pelo método da tentativa e erro. Procedimentos sistemáticos sobre a seleção dos parâmetros de projeto do controlador fuzzy têm sido propostos por pesquisadores (Kristinsson e Dumont, 1992). O “coração” do FLC é a base de regras e é constituído das regras de inferência estabelecidas a partir da operação do processo de nível. Características práticas motivam a aplicação do controle fuzzy.

6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para cada algoritmo de controle, dois grupos de experimentos (variações de setpoint e carga) são implementados sobre o sistema de controle de nível. Cada experimento é conduzido sobre 700 amostras utilizando-se um período de amostragem de 0.15 segundos que resulta no tempo total de experimentação de 1 minuto e 45 segundos. Para se obterem resultados adequados em cada experimentação, correções heurísticas e ajustes finos sobre os parâmetros em cada esquema de controle foram realizados. A respectiva metodologia e os resultados

experimentais mais adequados de cada algoritmo de controle são comparados e mostrados a seguir.

No primeiro conjunto de experimentos duas mudanças de setpoint, em degrau, são aplicadas para observar a performance e a robustez dos controladores. No caso do PI-A, o melhor desempenho é observado quando os parâmetros de projeto são ajustados por: $\Gamma = 0.9$ e fator do filtro digital passa baixa = 0.1. O estimador dos mínimos quadrados recursivo com fatorização UD, sem fator de esquecimento e matriz de covariância de $100I_3$, é utilizado para estimar os parâmetros do sistema PI-A em todos os experimentos. No caso do GPC, o melhor desempenho é obtido quando os parâmetros de projeto são selecionados de acordo com os seguintes valores: $HY = 10$, $HU = 1$, $\Gamma = 0$ e constante do filtro passa-baixa = 0.5. O estimador dos mínimos quadrados recursivo com fatorização UD, sem fator de esquecimento e matriz de covariância de $50I_2$ é utilizado para estimar os parâmetros do sistema do GPC em todos os experimentos. A técnica da reinicialização da matriz de covariância para $5I_2$ é utilizada sempre que o traço da matriz de covariância está abaixo de 0.05. No caso do FLC, o melhor desempenho é observado a partir do levantamento das funções de pertinência com o estudo da dinâmica do processo de nível sob a ação do controlador PID e, finalmente sintonizadas pelo método da tentativa e erro. A performance do FLC foi também afetada pela imprecisão na base de regras, especialmente na vizinhança do regime. A figura 5 mostra a evolução das variáveis controlada e de controle para duas mudanças na referência (inicialmente, 1 volt e depois para 2 volts). De acordo com os resultados experimentais, observa-se um comportamento adequado para a saída do processo (mínima sobre-elevação e rápida estabilização) enquanto que a variável de controle apresenta um comportamento oscilatório. Os algoritmos de controle proporcionam um desempenho dinâmico consistente no sistema de controle de nível para diferentes referências.

O segundo conjunto de experimentos é realizado com o objetivo de avaliar a habilidade dos três controladores na presença de uma perturbação de carga, visando evidenciar a robustez no procedimento de projeto de cada controlador. Para comparações idênticas entre os algoritmos de controle, mantém-se o nível em 14 cm (4 volts) e posiciona-se a válvula de saída em 20% do total durante as 450 amostras iniciais. Após este transiente, modifica-se a abertura da válvula de saída para 60% do total. O mesmo projeto e parâmetros dos controladores são utilizados nos algoritmos de controle conforme apresentado no primeiro conjunto de experimentos. O efeito da perturbação de carga sobre os três controladores estão apresentados na figura 6. Observa-se que o GPC e o FLC regulam de forma adequada o nível. Os resultados experimentais com o PI-A indicam mudanças excessivas no sinal de controle e não foi capaz de regular de forma conveniente a saída da planta. Um resumo das características e do desempenho dos resultados experimentais com os controladores PI-A, GPC e FLC é mostrado na tabela 2.

7 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo comparativo experimental de três controladores (algoritmos de controle adaptativo, preditivo e inteligente) em um sistema de controle de nível. O comportamento dinâmico dos sistemas foi avaliado para mudanças de setpoint e perturbação de carga. Os resultados

Tabela 2 - Comparação entre as três técnicas de controle baseado nos experimentos

Critério	PI-A	GPC	FLC
complexidade computacional	média	grande	pequena
performance de rastreamento	média	grande	grande
variância da saída do controle	grande	média	média
sintonia dos parâmetros	K_c, T_i	HY, HU, Γ	funções de pertinência
modelo matemático	do controlador	da planta	não-necessário
efeito de mudanças na dinâmica da planta	média	pequena	pequena

experimentais indicam similaridades e características desejáveis em termos de precisão e tempo de resposta.

O FLC apresentou maior simplicidade de utilização e implementação se comparado com as técnicas de controle adaptativo e preditivo. A seleção das regras e das funções de pertinência são essenciais para melhorar a performance do controlador. No caso do GPC, existe alguma dificuldade na seleção dos parâmetros de projeto, especialmente se aplicado em plantas complexas. O esforço computacional do PI-A foi pequeno se comparado com o GPC e FLC.

O estudo de caso mostrou que os algoritmos de controle PI-A, GPC e FLC podem ser utilizados para operações práticas. É importante observar que o algoritmo de controle lógico fuzzy possui a vantagem de não necessitar do modelo matemático para implementação do controlador. Embora o FLC apresente algumas vantagens de aplicações em controle de processos, a principal dificuldade é a falta de um procedimento sistemático para análise e projeto de um sistema de controle fuzzy. Não existe um critério definido para seleção da forma das funções de pertinência e o procedimento iterativo tentativa e erro é utilizado na superposição dos conjuntos fuzzy.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e UFSC pelo apoio para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Åström, K.J and T. Hägglund (1995). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. ISA, Research Triangle Park, North Carolina.
- Clarke, D.W. and P.J. Gawthrop (1975). Self-Tuning Controller. *Proc. IEE*, 122, pp. 929-934.
- Clarke, D.W.; C. Mohtadi and P.S. Tuffs (1987). Generalized Predictive Control: Part I - The Basic Algorithm and Part II - Extensions and Interpretations. *Automatica*, 23, pp. 137-160.
- Clarke, D.W. (1994). *Advances in Model-Based Predictive Control*. Oxford University Press Inc., New York.

- Coelho, A.A.R. (1995). Laboratory Experiments for Education in Process Control. *Workshop on Control Education and Technology Transfer Issues*. Curitiba P.R., pp. 133-138.
- Kristinsson, K. and G.A. Dumont (1992). System Identification and Control Using Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22, pp. 1033-1046.
- Lee, C.C. (1990). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I and II. *IEEE Trans. Syst. Man and Cybernetics*, 20, 404-435.
- Schwartz, D.W.; G.J. Klir; H.W. Lewis and Y. Ezawa (1994). Applications of Fuzzy Sets and Approximate Reasoning. *Proc. of the IEEE*, pp. 482-498.
- Sugeno, M. (1985). An Introduction Survey of Fuzzy Control. *Inform. Sciences*, 36, pp. 59-83.
- Yoon, T.W. and Clarke, D.W. (1994). Adaptive Predictive Control of the Benchmark Plant. *Automatica*, pp. 621-628.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information Control*, 8, pp. 338-353.

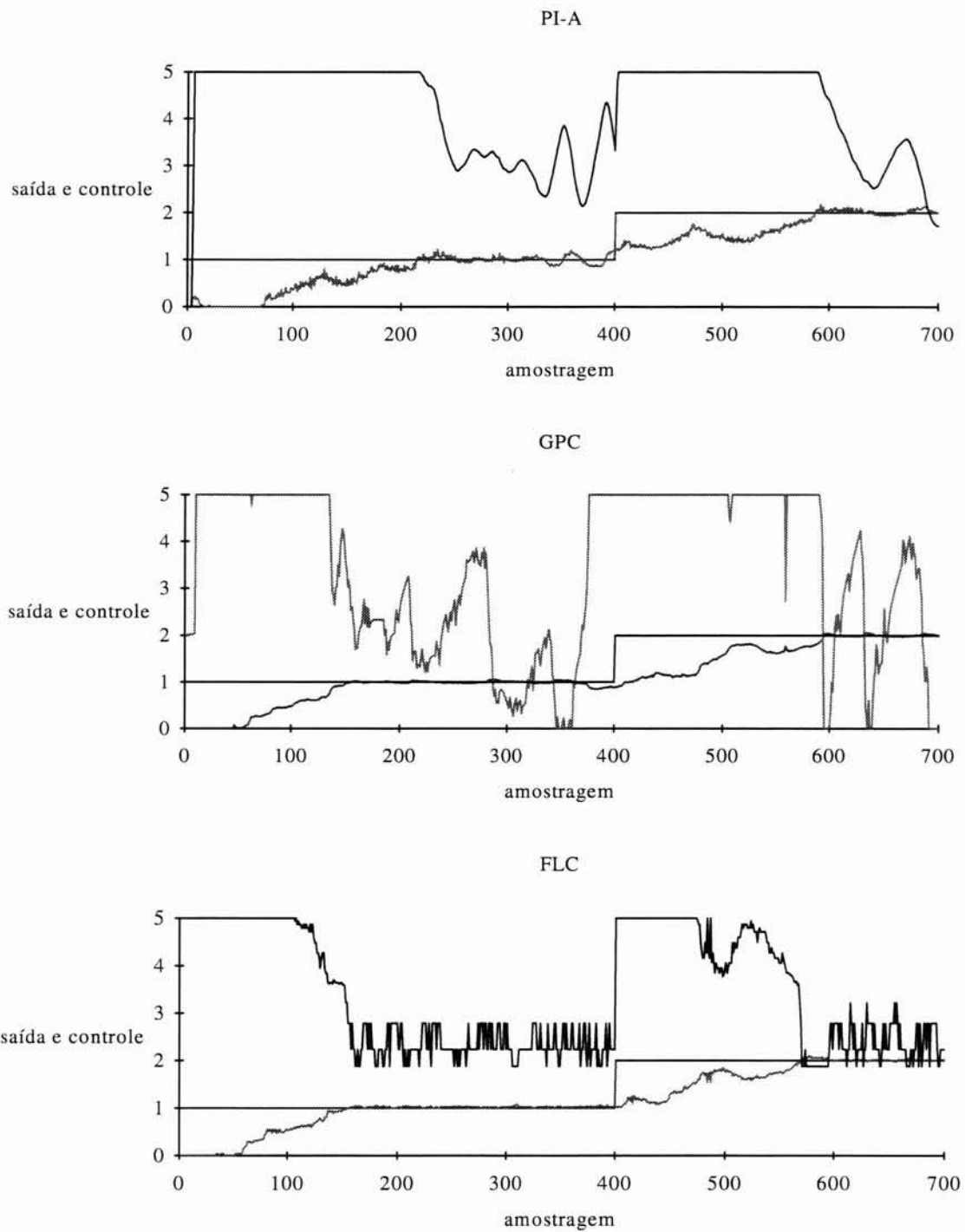


Figura 5 - Desempenho dos três sistemas para mudança de setpoint

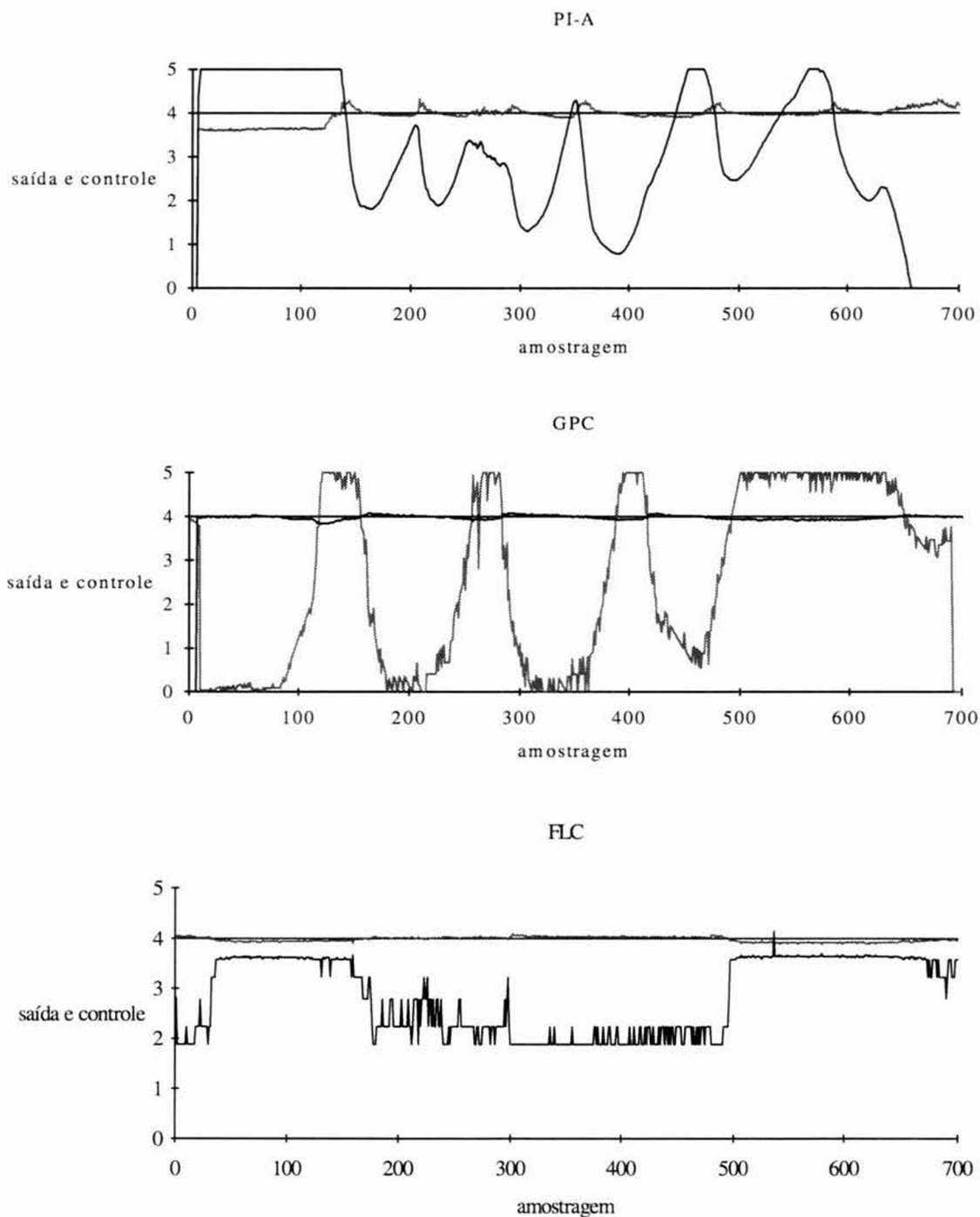


Figura 6 - Desempenho dos três sistemas para perturbação de carga.