

Design of PID Type Local Controller Network with Fuzzy Supervision

L. Castro, H. Ramos, G. Amorim, and A. Silveira

Abstract—This paper proposes a feasible fuzzy strategy, network of local PID controllers type, applicable to the improvement of the dynamic stability and robustness of a well-known electromechanical system. Experimental tests confirm the superiority of the proposed method over classical control methods to treat nonlinearities and parametric variations of the plant.

Index Terms—Fuzzy Logic and Control, PID Control, Stability of Dynamic Systems.

I. INTRODUÇÃO

ESTE trabalho propõe uma estratégia *fuzzy*, do tipo rede de controladores locais, aplicável à melhoria da estabilidade dinâmica do sistema *fan and plate*, localizado no Laboratório de Controle e Sistemas (LACOS) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A planta contém uma placa conectada a um potenciômetro que mede o ângulo de inclinação, esta placa é movimentada pela velocidade do vento gerado por um motor DC (*Direct Current*) acoplado a uma hélice. Para regular a posição angular da placa, o fluxo de ar, gerado pelo conjunto de rotação motor DC e hélice, deve ser controlado. Os circuitos de medição e atuação estão limitados na faixa de 0 V a 5 V.

A estratégia utilizada visa compensar possíveis perdas de sintonia devido à ocorrência de variações nas condições operacionais da planta. A adaptação dos ganhos do supervisor *fuzzy* é realizada *online*, interpolando-se os ganhos de um conjunto finito de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) locais fixos. Ao ocorrer variações nas condições operacionais da planta, os ganhos da lei de controle são ajustados automaticamente de modo a manter satisfatório o desempenho do sistema de controle. O desempenho do controle é avaliado por meio de simulações experimentais no sistema estudado.

Os resultados demonstram que o uso da estratégia proposta permite melhorias no desempenho em malha fechada do sistema.

Este trabalho possui apoio de instituições de fomento e incentivo à pesquisa no Brasil CAPES e CNPq.

L. A. M. Castro é vinculado à Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, (e-mail: luismesquita@ufpa.br).

H. M. Ramos Filho é vinculado à Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, (e-mail: hm.ramosfilho@gmail.com).

G. S. Amorim é vinculada à Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, (e-mail: gaby_amorim@outlook.com).

A. S. Silveira é vinculado à Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, (e-mail: asilveira@ufpa.br).

O artigo está dividido em: na seção 2 explana-se sobre os benefícios da rede de controladores locais; na seção 3 é exposta a teoria de lógica e controle *fuzzy*; a etapa de projeto do supervisor *fuzzy* é detalhada na seção 4; os resultados obtidos pelo método de controle proposto são discutidos na seção 5 e, por fim, as conclusões são apresentadas na seção 6.

II. REDE DE CONTROLADORES LOCAIS

A operação segura e eficiente de qualquer sistema dinâmico depende do emprego de controladores automáticos em diferentes níveis hierárquicos, para garantir estabilidade de operação. A maioria dos sistemas de controle atualmente em uso ainda são baseados em estruturas lineares com parâmetros fixos, denominados controladores convencionais. A razão para isso talvez resida na maior familiaridade dos engenheiros com técnicas de projeto e implementação de controladores convencionais.

Contudo, é um fato bem conhecido que as não linearidades e condições operacionais variáveis, tipicamente em sistemas reais, podem provocar perda de sintonia em um sistema de controle a parâmetros fixos. Tais limitações motivaram um grande número de pesquisas na busca de novas estratégias de controle aptas a lidar com tal problema. Dentre as estratégias mais investigadas podemos citar aquelas baseadas em controle adaptativo [1], controle preditivo [2] e aquelas baseadas em inteligência computacional, com destaque para as metodologias via lógica *fuzzy* [3,4,5] e redes neurais artificiais [6,7]. Para o sistema *fan and plate*, sintonizaram-se 5 controladores PID baseados em 5 modelos lineares do tipo ARX (*Auto-Regressive with eXogenous Input*) de segunda ordem levantados para 5 pontos de operação distintos, do tipo:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + w(k) \quad (1)$$

onde $y(k)$, $u(k)$ e $w(k)$ são o sinal de saída, de entrada e ruído, respectivamente. $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, são polinômios, q^{-1} é o operador de atraso de tempo discreto e d é o atraso discreto de tempo. Na Fig. 1 é apresentada a resposta do sistema em malha aberta a uma sequência de entradas do tipo degrau. É possível notar a dinâmica não linear presente no sistema para cada condição operacional. O período de amostragem T_s utilizado é igual a 50 milissegundos.

O sistema *fan and plate* é estável em malha aberta e sem atraso de tempo, todavia seus parâmetros de coeficiente de amortecimento ξ , frequência natural não amortecida ω_n (rad/s) e ganho estático k_c variam conforme o ponto de operação considerado. Tais parâmetros variam dentro dos seguintes

intervalos: $\xi = [0,7162, 1]$, $\omega_n = [0,7017, 7,2177]$ e $k_c = [0,9831, 1,6073]$.

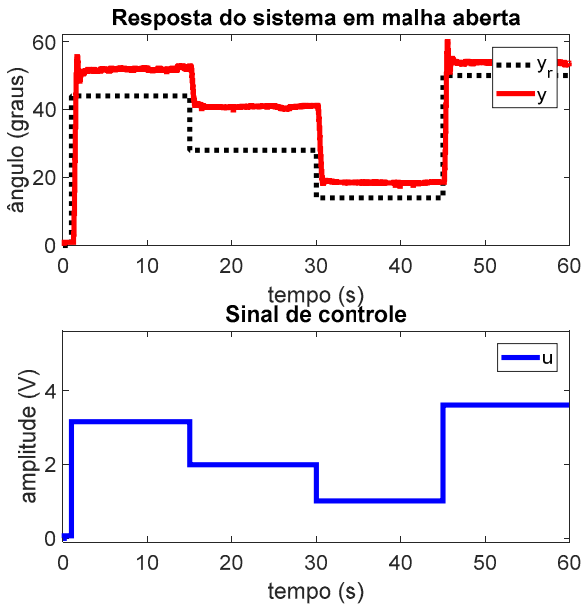


Fig. 1. Resposta em malha aberta do sistema.

Essa característica não linear é esperada em sistemas reais, o que torna uma abordagem de controle avançado mais adequada para garantir o desempenho desejado pelo projetista ao sistema de controle. A estrutura RST de controlador adotada para o PID fixo é [1]:

$$R(q^{-1})u(k) = T(q^{-1})y_r(k) - S(q^{-1})y(k) \quad (2)$$

onde $R(q^{-1})$, $S(q^{-1})$ e $T(q^{-1})$ são polinômios e $y_r(k)$ é o sinal de referência. Como o controlador utilizado é do tipo PID, então tem-se que: $R(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$ e $T(q^{-1}) = S(q^{-1})$.

Na Fig. 2 é apresentado o diagrama de blocos clássico de sistema de controle em malha fechada.

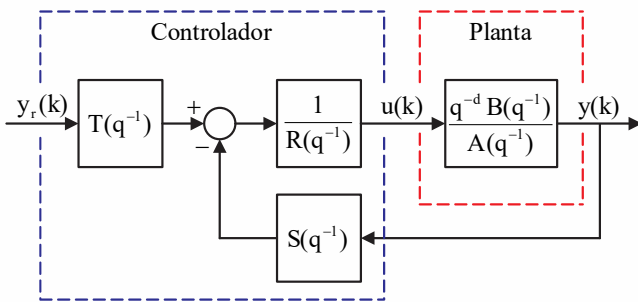


Fig. 2. Diagrama de blocos da topologia RST de controlador.

Os controladores locais são sintonizados para os pontos de operação onde a *plate* encontra-se com 15° , 25° , 35° , 45° e 55° de inclinação em relação ao eixo vertical, de forma a manter uma dinâmica adequada e com convergência assintótica da malha de controle. Os controladores locais projetados via cancelamento dinâmico são [8]:

$$C_{15^\circ}(q^{-1}) = \frac{0,3885 - 0,3549q^{-1} - 0,0137q^{-2}}{1 - q^{-1}}$$

$$C_{25^\circ}(q^{-1}) = \frac{0,8712 - 1,3280q^{-1} + 0,4914q^{-2}}{1 - q^{-1}}$$

$$C_{35^\circ}(q^{-1}) = \frac{0,7534 - 1,1484q^{-1} + 0,4475q^{-2}}{1 - q^{-1}}$$

$$C_{45^\circ}(q^{-1}) = \frac{0,5985 - 0,9273q^{-1} + 0,3767q^{-2}}{1 - q^{-1}}$$

$$C_{55^\circ}(q^{-1}) = \frac{0,7040 - 1,0530q^{-1} + 0,4199q^{-2}}{1 - q^{-1}}$$

O projeto via cancelamento dinâmico tem como objetivo sintetizar um método de sintonia pra um PID digital descrito por:

$$\frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{S(z^{-1})}{\Delta} = \frac{(s_0 + s_1z^{-1} + s_2z^{-2})}{1 - z^{-1}} \quad (3)$$

que cancele a dinâmica de malha aberta da planta, cujo equivalente discreto via método de discretização ZOH (*Zero Order Hold*) é:

$$\frac{U(z^{-1})}{E(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})z^{-1}}{A(z^{-1})} = \frac{(b_0 + b_1z^{-1})z^{-1}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (4)$$

Note que o equivalente discreto via ZOH de um sistema dinâmico descrito na forma canônica de segunda ordem vai resultar em uma descrição aumentada com um zero discreto. Portanto, será necessário aproximar esse modelo pela contribuição estática do polinômio do numerador, ou seja:

$$G(z^{-1}) = \frac{(b_0 + b_1z^{-1})z^{-1}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \cong \frac{B(1)z^{-1}}{A(z^{-1})} \quad (5)$$

Impondo-se uma dinâmica de malha fechada desejada de primeira ordem, cujo equivalente discreto via ZOH é:

$$G_{mf}(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{Y_r(z^{-1})} = \frac{(1 - z_d)z^{-1}}{1 - z_dz^{-1}} \quad (6)$$

Observe em (6) que z_d é o polo discreto desejado de malha fechada e cuja escolha pode ser associada em relação com a constante de tempo de malha fechada desejada, τ_{mf} , com base no modelo SOPDT (*Second Order Plus Dead Time*), a partir de:

$$z_d = e^{-\frac{T_s}{\tau_{mf}}} \quad (7)$$

onde T_s é o período de amostragem. A síntese de sintonia desejada pode ser estabelecida igualando-se a função de transferência de malha fechada como o modelo dinâmico desejado apresentado acima, tal que:

$$\frac{Y(z^{-1})}{Y_r(z^{-1})} = \frac{\frac{S(z^{-1})}{\Delta} G(z^{-1})}{1 + \frac{S(z^{-1})}{\Delta} G(z^{-1})} = \frac{(1 - z_d)z^{-1}}{1 - z_dz^{-1}} \quad (8)$$

O problema apresentado em (8) é um problema de alocação de polos e cuja solução para um PID digital com um processo SOPDT discreto sintetiza a seguinte forma:

$$\begin{aligned} s_0 &= \frac{(1 - z_d)}{b_0 + b_1} \\ s_1 &= a_1 s_0 \\ s_2 &= a_2 s_0 \end{aligned} \quad (9)$$

Com base na sintonia apresentada em (9) e considerando o fato de que o controlador PID digital projetado é descrito por uma função de transferência pulsada e possui condições iniciais nulas, esta pode ser reescrita na forma de equação a diferenças do seguinte modo:

$$u(k) = u(k-1) + s_0 e(k) + s_1 e(k-1) + s_2 e(k-2) \quad (10)$$

III. LÓGICA E CONTROLE FUZZY

Nos últimos anos, as técnicas de controle usando Inteligência Artificial (IA) tem sido cada vez mais utilizadas com sucesso no controle dos mais variados tipos de processos. Dentre todas as técnicas de IA existentes, a lógica *fuzzy* parece ser uma das mais promissoras, sendo utilizada desde o controle de estoque de mercadorias até ajudando em diagnósticos médicos [9]. A teoria dos conjuntos *fuzzy* não é algo tão recente. Ela foi proposta inicialmente na década de 1960 [10] e a partir de então, subdividiu-se em um grande número de ramificações, tornando muito difícil que se domine plenamente a totalidade da teoria dos conjuntos *fuzzy* [11]. Entretanto, para realização de aplicações concretas, somente uma pequena base de conhecimento sobre a teoria dos conjuntos *fuzzy* é realmente necessária.

A lógica *fuzzy* suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos. Isto faz com que seja natural utilizar termos linguísticos para expressar a condição de um elemento dentro de um conjunto *fuzzy*. Uma das maneiras mais fáceis de compreender os conjuntos *fuzzy* é fazer uma analogia com os conjuntos clássicos ou ordinários. Na teoria dos conjuntos clássicos, um objeto qualquer pode assumir somente duas condições: pertencer ou não pertencer a um determinado conjunto. Assim, para um determinado universo U e um elemento x , $x \in U$, o grau de pertinência $\mu_A(x)$ com respeito a um conjunto $A \subseteq U$, pode ser expresso por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (11)$$

A função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$ é uma representação binária chamada de função característica na teoria clássica de conjuntos [12], servindo apenas para indicar a total pertinência ou total exclusão de um determinado elemento em relação a um dado conjunto *fuzzy*. Com o objetivo de estender esta representação binária, [10] propôs que esta função característica, a qual ele chamou de função de pertinência, pudesse assumir qualquer valor dentro do intervalo 0 e 1, criando assim os conjuntos *fuzzy*.

Nas teorias de controle clássica e moderna, é necessário que se conheça qual o modelo matemático que representa o sistema a ser controlado. Algumas vezes, esta informação não está disponível ou é muito complexa de ser obtida, tornando inviável a utilização destas técnicas de controle. Entretanto, o sistema a ser controlado não é totalmente desconhecido. Quase sempre é conhecida alguma informação sobre o sistema, seja com relação a seu comportamento ou sobre os critérios de desempenho desejados para o mesmo. Embora este tipo de informação não seja precisa, ela fornece aspectos importantes sobre o comportamento do sistema, sendo em muitos casos a única fonte de conhecimento disponível.

A modelagem e o controle *fuzzy* são técnicas utilizadas para manusear informações qualitativas de maneira rigorosa [12]. Por não envolver modelagem exata do problema, são muito mais rápidas computacionalmente que outras técnicas existentes, favorecendo sua utilização no controle de sistemas em tempo real. Utilizando apenas as entradas do sistema e suas saídas desejadas, por meio de variáveis linguísticas pode-se considerar sistemas complexos, que desta forma podem ser controlados de um modo mais rápida, com desempenho robusto e estável. Além disso, problemas que antes não tinham solução quando abordados por técnicas de controle convencionais devido a sua complexidade, podem agora ser resolvidos de uma maneira simples e bastante eficiente. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se cada um destes a um conjunto *fuzzy* definido sobre um universo de discurso comum. A forma mais comum de expressar este conhecimento é por meio de regras do tipo Se-Então, chamadas de declarações funcionais *fuzzy* ou simplesmente regras *fuzzy* [12].

As informações linguísticas disponíveis sobre determinado sistema são utilizadas para construir um conjunto de regras, que caracterizam a estratégia de controle e suas metas. Esta base de regras é o coração do sistema lógico *fuzzy*, pois interpreta as informações linguísticas disponíveis, de modo que elas passam a ser utilizadas diretamente na obtenção do controle desejado. Na prática, a maior parte dos sistemas lógicos *fuzzy* faz uso de regras do tipo Se-Então. Assim, os especialistas humanos podem expressar naturalmente o seu conhecimento sobre a dinâmica de determinado sistema [13]. Os sistemas lógicos *fuzzy* mais comuns na literatura podem ser divididos em dois grandes grupos: sistemas lógicos *fuzzy* de Takagi e Sugeno e sistemas lógicos *fuzzy* de Mamdani [3].

No sistema *fuzzy* de Takagi e Sugeno as regras *fuzzy* Se-Então propostas diferem na parte Então da regra, pois esta é formada por variáveis reais, ao invés de variáveis linguísticas como no sistema *fuzzy* de Mamdani. Esta configuração foi empregada com sucesso em muitos problemas práticos, porém sua principal desvantagem decorre da parte Então da regra não ser *fuzzy*. Deste modo, é bastante complicado acrescentar regras *fuzzy* propostas por especialistas humanos. Por sua vez, o sistema *fuzzy* de Mamdani é a maneira mais simples de tratar problemas de engenharia usando lógica *fuzzy*. Na Fig. 3 é apresentada a estrutura de um sistema *fuzzy* do tipo Mamdani.

O fuzzificador converte uma variável real em uma variável *fuzzy*. O defuzzificador converte uma variável *fuzzy* em uma variável real. A base de regras é onde o conhecimento consciente de um especialista é incorporada ao sistema *fuzzy* por meio de regras do tipo Se-Então.

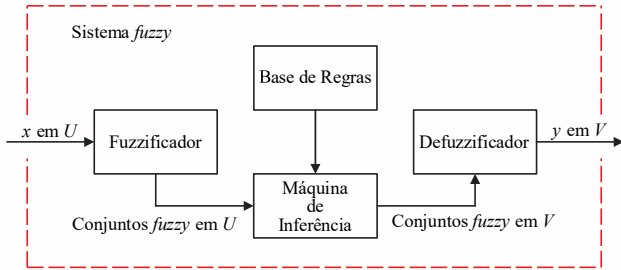


Fig. 3. Sistema lógico fuzzy de Mamdani.

A máquina de inferência utiliza da lógica *fuzzy* (modus ponens generalizado, modus tollens generalizado e silogismo hipotético generalizado) para combinar a base de regras *fuzzy* de modo a fazer um mapeamento de um conjunto A' em um universo de discurso U de entrada para um conjunto B' em um universo de discurso V de saída. A diferença entre um sistema do tipo Mamdani e um sistema do tipo Takagi e Sugeno é a inexistência do defuzzificador no último. A estrutura de sistema *fuzzy* proposta por Mamdani também é conhecida como controlador lógico *fuzzy*, pois quase sempre é usada como controlador [3].

A principal vantagem desse tipo de sistema *fuzzy* é a capacidade do mesmo tratar o problema diretamente, uma vez que a variável de entrada no controlador e o sinal de controle a ser gerado são valores reais. Além de estar sendo utilizada com sucesso em vários processos industriais, esta estrutura permite que novas regras propostas por especialistas de domínio sejam incorporadas naturalmente ao controlador [14]. Esta é a estrutura que será adotada para o supervisor *fuzzy* deste trabalho.

IV. PROJETO DO SUPERVISOR FUZZY

Com o objetivo de fazer com que o comportamento do controlador PID seja adequado em toda a faixa de operação do sistema *fan and plate*, inúmeros trabalhos na área de controle foram propostos com diferentes abordagens para a síntese de um controlador PID avançado baseado em lógica *fuzzy* [15].

Nas últimas décadas, começaram a surgir trabalhos que propõem a utilização de sistemas especialistas e controladores *fuzzy* para substituir os controladores convencionais a parâmetros fixos [16,17,18]. Estes controladores são bastante eficazes, pois além de não ser necessário uma modelagem matemática do problema, eles são bastante simples de serem implementados, fato que favorece sua utilização em tempo real. É importante deixar claro que o supervisor *fuzzy* projetado para uma rede de controladores locais é um sistema *fuzzy* estático, isto é, possui uma base de regras fixa, que não sofre modificações a partir do momento que o supervisor *fuzzy* é colocado em operação na malha de controle.

Os controladores PID clássicos tem sido utilizados em um grande número de processos industriais nas últimas, bem como no meio acadêmico. Este tipo de controlador combina os efeitos proporcional (para rapidez de resposta), integral (para eliminação do erro de regime) e derivativo (para aumento do amortecimento), além de, ao operar em conjunto, minimizar os efeitos prejudiciais de cada tipo de controle isoladamente, conseguindo quase sempre cumprir as especificações desejadas para o comportamento do sistema. O sinal de controle é gerado

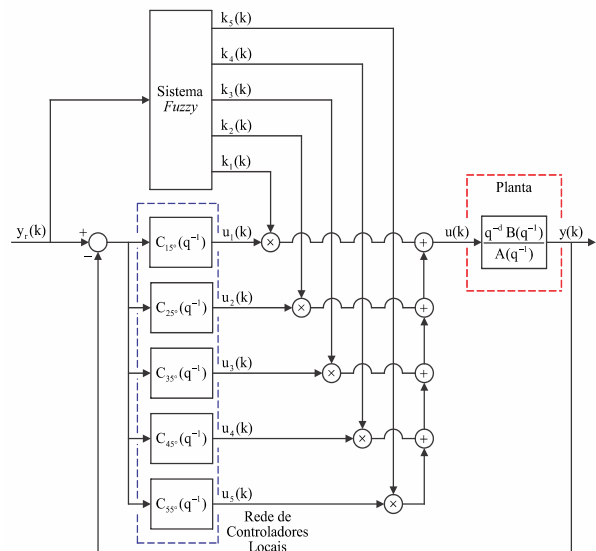
então a partir de uma combinação do erro, da integral do erro e da taxa de variação do erro [19].

Neste trabalho usou-se a estrutura digital de um controlador PID convencional, a qual possui somente três parâmetros a serem ajustados (s_0 , s_1 e s_2 que são os coeficientes do polinômio $S(q^{-1})$ apresentado na Equação 2). Apesar de ser bastante simples, o PID convencional não apresenta um desempenho satisfatório no controle de sistemas cujos parâmetros são variantes, necessitando que o controlador seja reajustado periodicamente.

Uma solução encontrada para resolver este problema é a utilização de controladores PID adaptativos ou *fuzzy* que, mesmo para sistemas variantes no tempo, conseguem manter as especificações de desempenho desejadas para a malha de controle. Dentre os controladores *fuzzy* propostos surgiram várias vertentes [3,13]. Uma delas utiliza a lógica *fuzzy* para gerar cada um dos parâmetros de sintonia do PID, de tal forma que esses parâmetros variam com a condição de operação do sistema [15]. Outra possibilidade é utilizar uma base de regras linguísticas, emulando o comportamento que o PID deve assumir e gerando diretamente o sinal de controle [20].

Na Fig. 4 é apresentado o diagrama de blocos da estratégia de controle explorada neste trabalho. O supervisor possui uma variável de entrada, o sinal de referência $y_r(k)$, e cinco variáveis de saída, os ganhos $k_1(k)$, $k_2(k)$, $k_3(k)$, $k_4(k)$ e $k_5(k)$ que ponderam os respectivos sinais de controle de cada PID sintetizados para diferentes condições operacionais.

Os sinais de controle da rede de controladores locais são somados para obtenção do sinal de controle $u(k)$ que é enviado ao sistema *fan and plate*. Vale salientar que os controladores funcionam em paralelo, sendo papel do sistema *fuzzy* a ponderação necessária da ação de controle individual para manutenção da estabilidade do sistema de controle de acordo com o ponto de operação considerado.

Fig. 4. Diagrama de blocos da malha de controle via rede de controladores locais com supervisor *fuzzy*.

O supervisor *fuzzy* possui uma base de regras unidimensional com um total de cinco regras. As variáveis *fuzzy*

de entrada $y_r(k)$ e de saída $k_1(k), k_2(k), k_3(k), k_4(k)$ e $k_5(k)$, podem ser representadas por cinco qualificadores linguísticos, ou seja, cinco conjuntos *fuzzy* {MB – Muito Baixo, B – Baixo, M – Médio, A – Alto, MA – Muito Alto}, cujas funções de pertinências são apresentadas na Fig. 5 e Fig. 6. Os conjuntos *fuzzy* MB e MA são funções trapezoidais, enquanto que os demais, B, M e A, são funções triangulares.

As regras utilizadas pelo supervisor, para gerar os ganhos, estão listadas abaixo. Estas regras são intuitivas, sendo as mesmas para qualquer sistema ser controlado [20].

Regra 1: Se $y_r(k)$ é MB, então $k_1(k)$ é MA, $k_2(k)$ é M, $k_3(k)$, $k_4(k)$ e $k_5(k)$ são MB.

Regra 2: Se $y_r(k)$ é B, então $k_1(k)$ é M, $k_2(k)$ é MA, $k_3(k)$ é M, $k_4(k)$ e $k_5(k)$ são MB.

Regra 3: Se $y_r(k)$ é M, então $k_1(k)$ é MB, $k_2(k)$ é M, $k_3(k)$ é MA, $k_4(k)$ é M e $k_5(k)$ é MB.

Regra 4: Se $y_r(k)$ é A, então $k_1(k)$ e $k_2(k)$ são MB, $k_3(k)$ é M, $k_4(k)$ é MA e $k_5(k)$ é M.

Regra 5: Se $y_r(k)$ é MA, então $k_1(k), k_2(k)$ e $k_3(k)$ são MB, $k_4(k)$ é M e $k_5(k)$ é MA.

Conjuntos fuzzy da variável de entrada do supervisor fuzzy

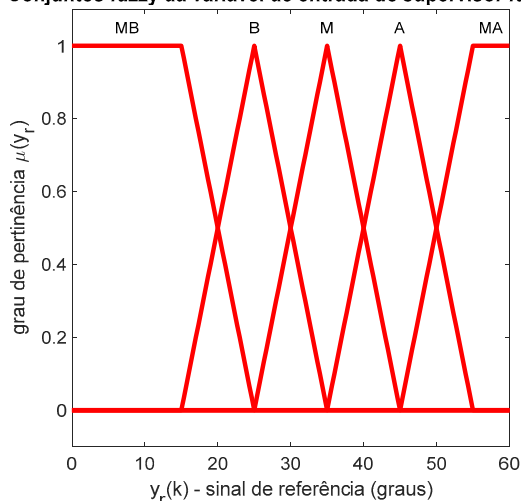


Fig. 5. Funções de pertinência do supervisor *fuzzy*.

Conjuntos fuzzy das variáveis de saída do supervisor fuzzy

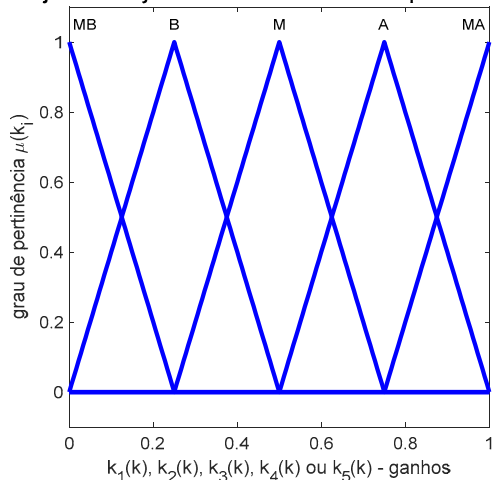


Fig. 6. Funções de pertinência do supervisor *fuzzy*.

Para o supervisor *fuzzy* selecionou-se o produto algébrico para a implicação, o máximo para a agregação e centroide para o método de defuzzificação. O projeto do supervisor *fuzzy* foi realizado com o auxílio da *toolbox* de lógica *fuzzy* presente no programa computacional MATLAB® [21].

V. RESULTADOS

O sistema é submetido a uma sequência de entradas do tipo degrau (0°, 44°, 28°, 14° e 50°) com duração de 15 segundos cada de forma a varrer quase toda a faixa operacional do sistema, o tempo total de simulação é de 60 segundos. Na Fig. 7 é apresentado o comparativo entre a estratégia *fuzzy* proposta e o controlador PID fixo $C_{15^\circ}(q^{-1})$, enquanto que na Fig. 8 é apresentada a comparação entre a estratégia *fuzzy* proposta e o PID fixo $C_{35^\circ}(q^{-1})$.

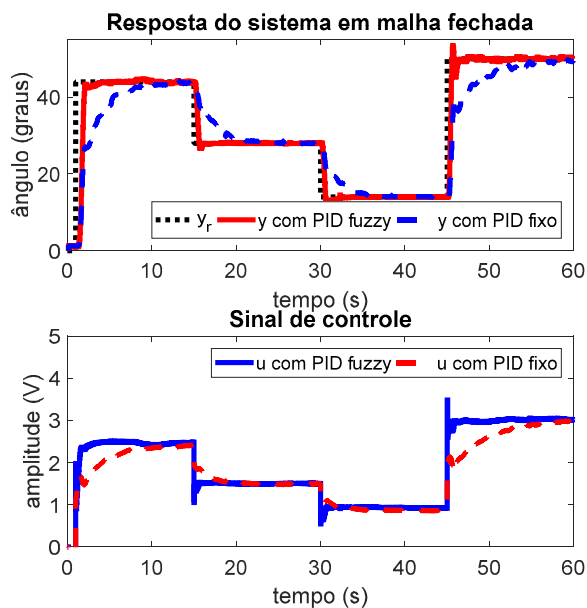


Fig. 7. Desempenho do sistema de controle.

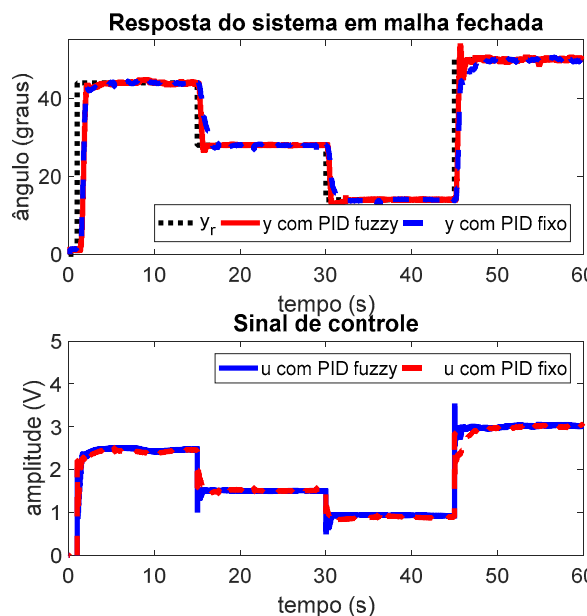


Fig. 8. Desempenho do sistema de controle.

Para avaliar a rede de controladores PID locais com supervisão *fuzzy* proposta, será feita uma comparação entre seu desempenho e o desempenho de dois um PIDs fixos, convenientemente sintonizados, para diferentes pontos de operação do sistema *fan and plate*, um sistema *benchmark* bastante conhecido dentro da área de Teoria de Controle, sendo utilizado na investigação e eficácia de estratégias de controle. Índices de desempenho são largamente usados na literatura de controle para se avaliar de modo quantitativo e qualitativo o desvio de desempenho da malha de controle. Escolheram-se dois índices de desempenho, o primeiro é: Integral do Erro Quadrático (ISE – *Integral Squared Error*). Onde $e(k)$ é a diferença entre a referência angular do *plate* e o ângulo medido pelo sensor dado em graus, calculado por:

$$ISE = \sum_{k=1}^n e(k)^2 = (y_r(k) - y(k))^2 \quad (12)$$

O segundo índice é o Variação Total de Controle (TVC – *Total Variation of Control*), usado para avaliar o esforço de controle de cada controlador – sinal de controle dado em Volts (V) – calculado a partir do incremento de controle $\Delta u(k)$ como:

$$TVC = \sum_{k=1}^n |\Delta u(k)| = |u(k) - u(k-1)| \quad (13)$$

Na Fig. 9 são apresentados os índices de desempenho calculados para cada malha de controle. Observa-se a partir dos resultados disponibilizados na Fig. 9 que a rede de controladores locais com supervisão *fuzzy* demonstrou superioridade em relação aos dois controladores PID a parâmetros fixos tanto em relação ao desempenho em malha fechada quanto em relação ao esforço de controle requerido.

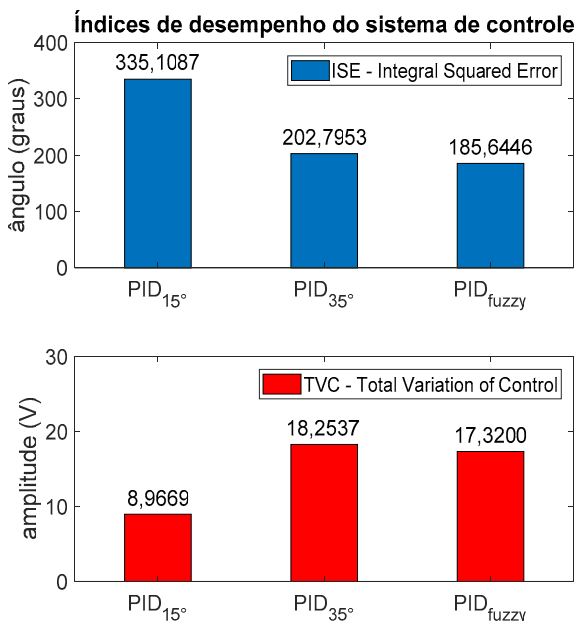


Fig. 9. Índices de desempenho do sistema.

Para o índice ISE a estratégia proposta obteve um ISE 44,6% inferior em comparação ao ISE calculado para o controlador $C_{15^\circ}(q^{-1})$ e um ISE 8,46% menor que o ISE obtido com o controlador $C_{35^\circ}(q^{-1})$. Para o índice TVC a estratégia via lógica *fuzzy* obteve um TVC 93,15% superior em comparação ao TVC calculado para o controlador $C_{15^\circ}(q^{-1})$ e um TVC 5,12% menor que o TVC obtido com o controlador $C_{35^\circ}(q^{-1})$.

Esses resultados são interessantes, pois vão em contramão com os resultados geralmente esperados quando os índices ISE e TVC são calculados. Normalmente, quando há pouco desvio de desempenho na malha de controle, ou seja, um índice ISE pequeno, o esforço de controle esperado para tal resultado é alto, ou seja, um índice TVC grande. Isso não foi o que ocorreu, pois, a rede de controladores PID com supervisor *fuzzy* consegue reduzir o desvio de desempenho da malha de controle (o que pode significar aumento da qualidade de um produto final em processos fabris) juntamente com uma redução da ação de controle necessária, o que normalmente eleva a vida útil do atuador utilizado (redução de gastos com manutenção).

VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os resultados obtidos com uma proposta de estratégia de controle que faz uso da lógica *fuzzy* para lidar com as não linearidades inerentes a aplicações experimentais de teoria de controle. A planta alvo utilizada nas simulações é o sistema *fan and plate*, localizado no LACOS – UFPA. Os diferentes pontos de operação do sistema possuem dinâmicas distintas entre si, fato esse que degrada o desempenho de qualquer controlador linear baseado em um modelo também linear. Quando o sistema a ser controlado apresenta dinâmicas complexas ou variantes no tempo, uma boa opção é a utilização de técnicas avançadas de controle, utilização de inteligência artificial ou métodos híbridos.

O supervisor *fuzzy* apresentado é responsável por ponderar a ação de controle de cinco controladores PID convencionais que operam em paralelo a partir da informação do ponto de operação em que o sistema de controle se encontra. A estratégia de controle apresentada difere totalmente da estratégia Ganho Programado (*Gain Scheduling*), pois para cada possível ponto de operação dentro da região operacional do sistema o supervisor *fuzzy* realiza uma combinação única entre os 5 controladores locais projetados, ou seja, para qualquer ponto de operação que não seja um ponto de operação usado para projetar um dos 5 PIDs digitais, o sinal de controle gerado é produto da combinação *fuzzy* de 5 controladores, e isso não acontece em uma abordagem do tipo Ganho Programado, já que em determinada região próxima de um dos pontos de operação usados para o projeto de controle somente um controlador é utilizado na malha de controle por vez [1]. O sistema possui cinco regras propostas por um projetista humano em sua base de regras, podendo esta ser alterada ou expandida de forma simples. Em suma, visto os resultados experimentais obtidos, o uso de rede de controladores lineares locais supervisionados por lógica *fuzzy* é uma excelente e viável alternativa para reduzir os efeitos danosos de variações paramétricas em sistemas reais difíceis de lidar com técnicas clássicas ou até mesmo técnicas adaptativas ou preditivas de controle, além de ser de mais fácil absorção pelas indústrias atuais.

AGRADECIMENTOS

O primeiro e segundo autor agradecem ao apoio financeiro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFPA, ao CNPq, e a CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] K. J. Aström; B. Wittenmark. *Adaptive Control*. New York, NY, USA: Dover Publications, Inc., 2008.
- [2] D. W. Clarke; P. J. Gawthrop. "Self-tuning Controller", *Proceeding of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 122, no. 9, pp. 929-934, 1975.
- [3] L. Wang. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [4] S. Bongain; M. Jamett. Electrohydraulic "Active Suspension Fuzzy Neural based Control System", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 9, Sept. 2018.
- [5] K. L. Luna; E. R. Palacios. "Fuzzy Speed Controller for a Guide Robot using an HRI Approach", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 8, Aug. 2018.
- [6] S. Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [7] N. I. Silva; D. H. Spatti; A. R. Flauzino. *Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas*. São Paulo: Artliber Editora, 2010.
- [8] M. S. Araújo; B. G. Dutra; T. C. F. Pinheiro; L. B. Cunha; A. S. Silveira. "Projeto de Controladores PID e IPD: uma Análise de Desempenho", *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI – Porto Alegre, RS, Brasil*, 2017.
- [9] M. Jamshidi; N. Vadić; T. J. Ross. *Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Applications*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [10] L. A. Zadeh. "Fuzzy Sets" *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [11] T. Terano; K. Asai; M. Sugeno. *Applied Fuzzy Systems*. San Diego, CA, USA: Academic Press Professional, Inc., 1994.
- [12] F. A. Gomide; R. R. Gudwin. "Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy", *SBA Controle e Automação*, vol. 4, no. 3, 1994.
- [13] M. G. Simões; I. S. Shaw. *Controle e Modelagem Fuzzy*. São Paulo: Editora Blucher, 1999.
- [14] E. H. Mamdani. "Application of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant", *Proceedings of the IEE*, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588, Dec. 1974.
- [15] Z. Y. Zhao; M. Tomizuka; S. Isaka. "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398, 1993.
- [16] T. Hiyama; M. Kugimya; H. Satoh. "Advanced PID Type Fuzzy Logic Power System Stabilizer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 3, pp. 514-520, 1994.
- [17] A. Hariri; O. P. Malik. "A Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer with Learning Ability", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 6, pp. 721-727, 1996.
- [18] P. Hoan; K. Tomsovic. "Design and Analysis of an Adaptive Fuzzy Power System Stabilizer", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, no. 2, pp. 455-461, 1996.
- [19] K. Ogata. *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2010.



Luís Augusto Mesquita de Castro é graduado (2015) em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Possui Mestrado (2018) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atualmente é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade

Federal do Pará, atuando principalmente nas áreas: Modelagem e Identificação de Sistemas; Sistemas Inteligentes; Redes Neurais Artificiais; Lógica e Controle Fuzzy; Algoritmos

Evolucionários; Controle Digital; Controle Adaptativo; Controle Preditivo; Controle Estocástico; Controle Robusto com aplicações em Processos Industriais, Sistemas Elétricos de Potência e Sistemas Biomecânicos.



Haroldo Martins Ramos Filho é graduado (2016) em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Atualmente é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará, estando vinculado ao LACOS. Seus principais interesses de pesquisa são: eletrônica, instrumentação, teoria de controle com ênfase em controle adaptativo e controle preditivo, identificação de sistemas, projeto de filtros digitais e inteligência computacional.



Gabriela Souza de Amorim é graduada (2018) em Engenharia Biomédica pela UFPA. Atualmente é aluna de mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará, estando vinculada ao Laboratório de Controle e Sistemas. Seus principais interesses de pesquisa são: teoria de controle, identificação de sistemas, filtragem digital e redes neurais

artificiais aplicadas na área de engenharia biomédica e controle de processos.



Antonio da Silva Silveira é professor doutor Adjunto do Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará atuando na área de Controle de Sistemas Dinâmicos no LACOS. Dentre as linhas de pesquisa de interesse destacam-se as seguintes: Controle Preditivo Estocástico; Controle Robusto Multivariável; Controle Adaptativo; Aplicações em Controle de

Sistemas Aeroespaciais.