

# CONTROLADOR *PID* COM ESCALONAMENTO NEBULOSO DOS GANHOS: AUTO-SINTONIA, ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO

OTACÍLIO M. ALMEIDA, ANTONIO A. R. COELHO

*Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil*

*Departamento de Automação e Sistemas - Universidade Federal de Santa Catarina*

*Caixa Postal 476, 88040.900 Florianópolis, SC, Brasil*

E-mails: otacilio@lcmi.ufsc.br, aarc@lcmi.ufsc.br

**Resumo**— Neste artigo apresenta-se um novo método de auto-sintonia nebulosa de parâmetros para controladores *PID*. O esquema utiliza um conjunto de regras lingüísticas para as margens de ganho e de fase do sistema. Algumas vantagens sobre os projetos nebulosos *PID* freqüentemente encontrados na literatura podem ser citadas: i) o conjunto de regras é simples e intuitivo; ii) é completamente auto-ajustável, necessitando apenas dos parâmetros de um controlador *PID*, não necessariamente bem sintonizado ou sintonizado através do método do relé; iii) os limites de estabilidade são facilmente estabelecidos através do teorema do pequeno ganho. O projeto foi aplicado a nível de simulação a processos lineares, não lineares, variantes no tempo e com ruptura de modelos. A nível de aplicação prática optou-se pelo controle de temperatura de um túnel de aquecimento. Em comparações realizadas com o controlador *PID* convencional o esquema proposto mostrou-se superior nos casos estudados.

**Abstract**— In this paper a new method for autotuning *PID* controller parameters based on fuzzy rules is proposed and a new rule base for gain and phase margins is suggested. The proposed scheme offers advantages over the conventional fuzzy controller such as: i) it is necessary a simple rule base; ii) it may be completely autotuned, requiring only one relay feedback experiment and; iii) it shows stability and the robustness characteristics is conceptually simple. The scheme has been applied successfully to simulation and practical examples. Comparison of the stability performance is accomplished to *PID* conventional scheme.

**Keywords**— fuzzy control; intelligent control; autotuning, non-linear system.

## 1 Introdução

Os controladores de processos podem ser classificados em controladores clássicos ou convencionais e controladores avançados (Unbehauen, 1996). Nesta classificação os controladores do tipo *PID* (proporcional, derivativo e integral), controle em cascata e *feedforward* são considerados controladores clássicos, enquanto os controladores adaptativos, preditivos, ótimo, não linear e inteligentes são classificados como controladores avançados. Técnicas de controle avançado são, geralmente, empregadas para superar limitações das técnicas convencionais e seu uso deve ser justificado, desde que envolve algoritmos mais complexos e conhecimentos matemáticos mais aprimorados que podem dificultar a compreensão das estruturas empregadas, principalmente por parte de operadores não especializados (Almeida *et al.*, 2000; Coelho *et al.*, 1998). A teoria de controle clássica, por sua vez, é adequada na resolução de problemas quando o processo é definido adequadamente e, geralmente, falha no tratamento de alguns processos complexos devido as não-linearidades e comportamentos variantes no tempo. Por outro lado, operadores humanos especializados freqüentemente controlam com sucesso processos complexos. Este fato motiva o desenvolvimento de projetos de controladores avançados baseados neste tipo de experiência, sobretudo os controladores baseados em regras lin-

güísticas como os controladores nebulosos (*fuzzy*) ou sistemas nebulosos (*SNs*). A essência do controle nebuloso é, baseando-se na teoria de conjuntos nebulosos, explorar o conhecimento do operador humano de forma a permitir a configuração de projetos de controle eficientes e robustos (Yeger & Filev, 1994; Gomide *et al.*, 1995; Kosko 1992).

Nos últimos anos nota-se um acentuado crescimento do número de aplicações e sofisticação dos sistemas de controle avançados que empregam conceitos da teoria dos conjuntos nebulosos. A contribuição central dos *SNs* é a de tratar-se de uma metodologia apta ao tratamento de imprecisão, raciocínio aproximado, sistemas baseados em regras e manipulação de termos lingüísticos (Sandri, 1999; Kosko 1992). Os *SNs* são uma ferramenta poderosa possibilitando a expressão de conceitos que não sejam bem definidos, onde usualmente é empregado um nome ou adjetivo para descrevê-lo. A concepção lingüística da teoria dos *SNs* habilita a fusão de processamento simbólico e computação numérica, provendo uma metodologia apta a tratar problemas de decisão e controle, motivando a implementação de controladores nebulosos (*CNs*).

Entre as vantagens dos *CNs* sobre os controladores convencionais têm-se: (i) não necessitam do modelo matemático do processo; (ii) podem trabalhar com entradas imprecisas, (iii) tratam processos complexos, com características de comportamento não-linear, elevada ordem, atraso de transporte, e sistemas “mal” definidos, (iv) possibilitam a imple-

mentação do conhecimento e experiência de especialistas utilizando regras lingüísticas.

Este artigo apresenta uma nova abordagem de projeto do controladores nebulosos *PID* (*CN-PID*) cujos os ganhos são escalonados através de um auto-ajuste nebuloso das margem de fase e de ganho para o sistema em malha fechada. Desta forma processos não lineares, variantes no tempo e que apresentam ruptura do modelo podem ser eficientemente controlados, superando-se as deficiências que as malhas de controle convencionais geralmente apresentam nestes casos. Simulações e aplicação prática a um processo real são apresentados com o objetivo de verificar as propriedades do método proposto. Aspectos de estabilidade do controlador são também estudados. O artigo está dividido como segue: na seção 2 apresenta-se o *CN-PID* proposto; na seção 3, os exemplos de simulações e a aplicação prática no túnel de aquecimento são apresentados; na seção 4, alguns aspectos de estabilidade são abordados e finalmente algumas conclusões são estabelecidas na seção 5.

## 2 Controlador *PID* com escalonamento nebuloso dos ganhos – *CN-PID*

O *CN-PID* proposto pode ser considerado como um controlador *PID* não-linear cujos parâmetros são determinados a cada período de amostragem em função do erro entre a referência e a saída do processo. Para a compensação do erro, um conjunto de regras, traduzindo o conhecimento intuitivo do operador sobre quantidades satisfatórias de margens de ganho e margem de fase para o sistema, são empregada a cada etapa da evolução do processo conforme apresentado na figura 1.

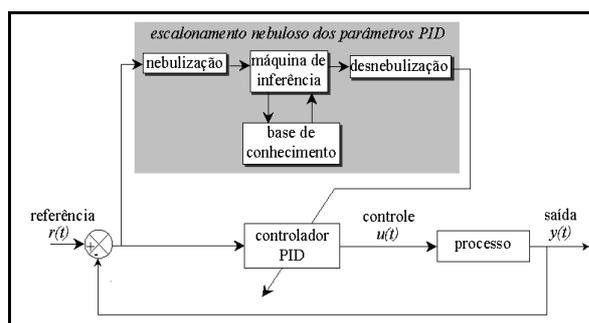


Figura 1. Estrutura do *CN-PID* Auto-tuning .

Para a implementação do projeto é necessário, em uma etapa inicial, identificar um modelo de segunda ordem para o processo, sintonizar um controlador *PID* (não necessariamente bem sintonizado) para um determinado ponto de operação e definir os limites de variação nebulosa das margens de fase e de ganho do sistema em malha fechada.

O modelo de segunda ordem para o processo é dado pela equação 1, cuja estrutura pode ser consi-

derada suficiente para o propósito de representação da grande maioria dos processos práticos encontrados em sistemas de controle.

$$\hat{G}_p(s) = \frac{e^{-sL_d}}{as^2 + bs + c} \quad (1)$$

os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $L_d$  são determinados através do método do relé (Åström, 1995) o que proporciona uma característica auto-ajustável ao controlador. Conforme os valores determinados para os parâmetros  $a$ ,  $b$  and  $c$ , o modelo pode apresentar pólos reais ou complexos em sua dinâmica adequando-se à representação de processos cuja respostas são exponenciais ou oscilatórias.

Considerando a função de transferência do controlador *PID* na sua forma padrão

$$G_c(s) = k \left( \frac{As^2 + Bs + C}{s} \right) \quad (2)$$

onde,  $A=K_d/k$ ,  $B=K_p/k$ ,  $C=K_i/k$  e ( $K_d$ ,  $K_p$ ,  $K_i$ ) são os ganhos do controlador *PID*.

Se os zeros do controlador são definidos para cancelar os pólos do modelo do, equação 1, tais que  $A=a$ ,  $B=b$  e  $C=c$  a função de transferência de malha do sistema é dado por

$$\hat{G}_p(s)G_c(s) = \frac{ke^{-sL_d}}{s} \quad (3)$$

onde  $k$  é derivado dos valores de margem de ganho ( $A_m$ ) e margem de fase ( $\Phi_m$ ) do sistema. Considerando as equações para o sistema nas frequências de cruzamento de ganho e cruzamento de fase (Franklin, 1986) as seguintes equações podem ser derivadas.

$$\Phi_m = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{1}{A_m} \right) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} K_p \\ K_i \\ K_d \end{bmatrix} = \frac{\pi}{2A_m L_d} \begin{bmatrix} b \\ c \\ a \end{bmatrix} \quad (5)$$

Os parâmetros  $A_m$  ou  $\Phi_m$  podem ser considerados variáveis lingüísticas, desde que seus valores podem ser expressos em termos de regras lingüísticas extraídas a partir do conhecimento operacional do processo

$$\text{se } e(t) \text{ é } A_i \text{ e } \Delta e(t) \text{ é } B_i \text{ então } A'_{m,i} \text{ é } C_i; \quad i=1,n \quad (6)$$

onde  $A'_{m,i}$  é a margem de ganho normalizada para a regra  $i$ ;  $A_i$ ,  $B_i$  e  $C_i$  são conjuntos nebulosos definidos no universo de discurso das variáveis correspondentes.

A normalização da margem de ganho garante que a margem de ganho e a margem de fase do sistema sejam mantidas em um intervalo especificado  $[A_{m,min}, A_{m,max}]$  e  $[\Phi_{m,min}, \Phi_{m,max}]$ . Os parâmetros

normalizados assumem valores entre 0 e 1 através das seguintes transformações

$$A'_m = (A_m - A_{m,\min}) / (A_{m,\max} - A_{m,\min}) \quad (7)$$

$$\Phi'_m = (\Phi_m - \Phi_{m,\min}) / (\Phi_{m,\max} - \Phi_{m,\min}) \quad (8)$$

A base de regras para a margem de ganho pode ser extraída de uma resposta típica do processo à uma entrada degrau. Uma resposta típica e uma possível base de regras são apresentadas nas figuras (2a) e (2b) respectivamente.

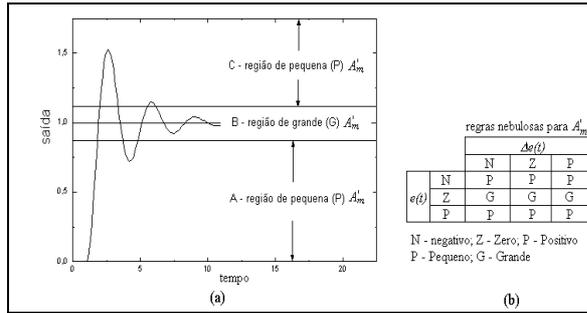


Figura 2. (a) resposta do processo; (b) Regras para o CN-PID Auto-tuning.

As funções de pertinências para o CN-PID são definidas conforme a figura 3, na qual funções triangulares são atribuídas ao erro  $e(t)$  e derivada do erro  $\Delta e(t)$  e funções logarítmicas para a saída  $A'_m$ .

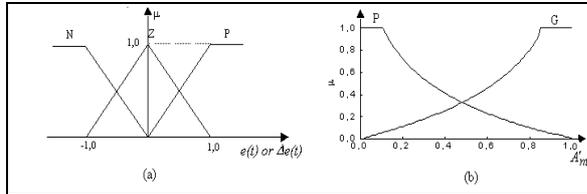


Figura 3. Funções de Pertinência do CN-PID auto-tuning

$$\mu_G(A'_m) = -\frac{1}{4} \ln(A'_m) \text{ ou } A'_m(\mu_G) = e^{-4\mu_G}$$

$$\mu_P(A'_m) = -\frac{1}{4} \ln(A'_m) \text{ ou } A'_m(\mu_P) = e^{-4\mu_P}$$

Considerando-se que o grau de disparo de cada regra  $\mu_i$  (Yeger & Filev, 1994) é dado pelo produto dos valores de pertinência dos termos antecedente das regras

$$\mu_i = \mu_{A_i}[e(k)] \cdot \mu_{B_i}[\Delta e(t)] \quad (9)$$

O valor de saída  $A'_{m,i}$  para cada regra é determinado baseado em  $\mu_i$  conforme o processo de implicação nebuloso da figura 4.

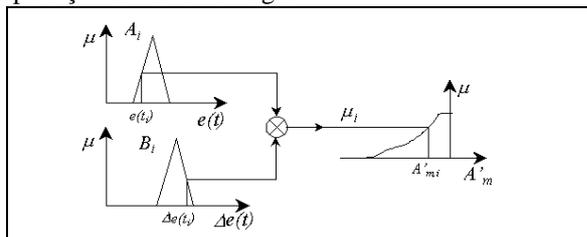


Figura 4. Processo de implicação de uma regra nebulosa

Utilizando as funções de pertinência da figura 3 e o processo de implicação da figura 4, tem-se que

$$\sum_{i=1}^n \mu_i = 1 \quad (10)$$

$$A'_m = \sum_{i=1}^n \mu_i A'_{m,i} \quad (11)$$

onde  $A'_{m,i}$  é a margem de ganho normalizada correspondente ao grau  $\mu_i$  da  $i$ -ésima regra em um dos setores do plano de fase apresentado na figura 5.

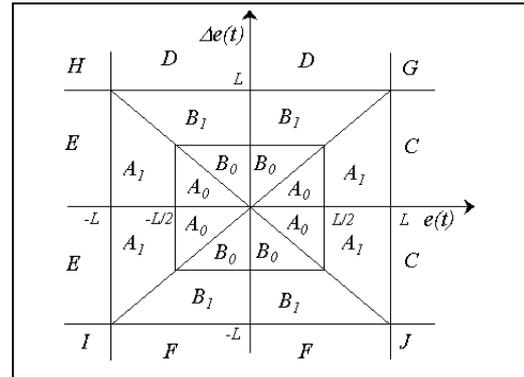


Figura 5. Plano de fase do CN-PID

A desnebulização das regras para o setor  $A_0$  pode ser determinada conforme as tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Regras ativas para o setor  $A_0$

Regra Ativa	Função de Pertinência	Saída
R <sub>5</sub>	$\mu_{5,A_0} = [-\frac{1}{L} e(t) + 1][-\frac{1}{L} de(t) + 1]$	$1 - e^{-4\mu_{5,A_0}}$
R <sub>6</sub>	$\mu_{6,A_0} = [-\frac{1}{L} e(t) + 1][\frac{1}{L} de(t)]$	$1 - e^{-4\mu_{6,A_0}}$
R <sub>8</sub>	$\mu_{8,A_0} = [\frac{1}{L} e(t)][-\frac{1}{L} de(t) + 1]$	$e^{-4\mu_{8,A_0}}$
R <sub>9</sub>	$\mu_{9,A_0} = [\frac{1}{L} e(t)][\frac{1}{L} de(t)]$	$e^{-4\mu_{9,A_0}}$

Tabela 2. Parcelas da Regras ativas para o setor  $A_0$

Regra Ativa	Parcela
R <sub>5</sub>	$A'_{m0,1} = [-\frac{1}{L} e(t) + 1][-\frac{1}{L} de(t) + 1] \cdot \mu_{5,A_0}$
R <sub>6</sub>	$A'_{m0,2} = [-\frac{1}{L} e(t) + 1][\frac{1}{L} de(t)] \cdot \mu_{6,A_0}$
R <sub>8</sub>	$A'_{m0,3} = [\frac{1}{L} e(t)][-\frac{1}{L} de(t) + 1] \cdot \mu_{8,A_0}$
R <sub>9</sub>	$A'_{m0,4} = [\frac{1}{L} e(t)][\frac{1}{L} de(t)] \cdot \mu_{9,A_0}$

Adicionando-se a coluna das parcelas da tabela 2, obtém-se o valor da margem de ganho normalizada para o setor  $A_0$

$$A'_{m0} = A'_{m0,1} + A'_{m0,2} + A'_{m0,3} + A'_{m0,4} \quad (12)$$

A margem de ganho para este setor é dado por

$$A_{m0} = (A_{m,\max} - A_{m,\min}) A'_{m0} + A_{m,\min} \quad (13)$$

Estendendo-se esta abordagem para os outros setores, determina-se as equações do CN-PID

### 3 Resultados de Simulações e aplicação prática do CN\_PID

Nesta seção, o *CN-PID* é aplicado a processo lineares, não-lineares e variantes no tempo para verificar a habilidade do controlador em superar difíceis condições de controle. Em todas as aplicações, o desempenho do controlador é comparado com o desempenho do controlador *PID* correspondente.

O primeiro processo a ser examinado é linear de segunda ordem e com atraso de transporte, cuja equação é dada por

$$G_p(s) = \frac{1}{(2.5s+1)(3.75s+1)} e^{-2s} \quad (14)$$

A figura 6 apresenta os sinais de saída, controle e referência para este processo. Como esperado, ambos os controladores apresentam resposta satisfatória, entretanto o *CN-PID* apresenta melhor desempenho com menor sobre-sinal e esforço de controle. O desempenho do *CN-PID* pode implicar que este é mais robusto em termos de seguimento de referência.

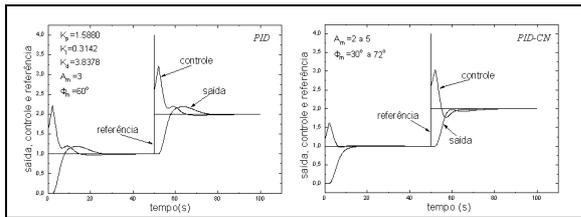


Figura 6. Saída, controle e referência do processo linear sob o controle *PID* e *CN-PID*

Para testar o desempenho dos controladores sob difícil condição de operação, uma variação de no máximo 50% com uma variância de 0.01 é provocada no atraso de transporte do processo. A figura 7 apresenta os resultados desta simulação. Conforme pode-se observar o desempenho do *CN-PID* é superior ao controlador *PID* em ambos seguimento de referência e esforço de controle

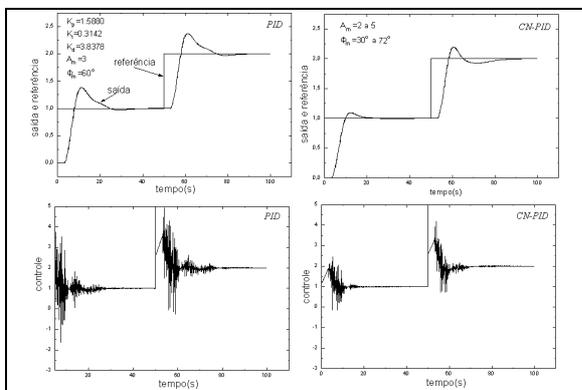


Figura 7. Saída, controle e referência do processo linear como variação de 50% e variância de 0.01 no atraso de transporte sob o controle *PID* e *CN-PID*

A seguir, além da variação no atraso de transporte, uma ruptura no modelo do processo com o parâmetro  $b$  da equação 1 variando em 50% é simulada. A figura 8, apresenta o resultado obtido para a reposta ao degrau. Observa-se que o controlador nebuloso também apresenta melhor desempenho nestas circunstâncias.

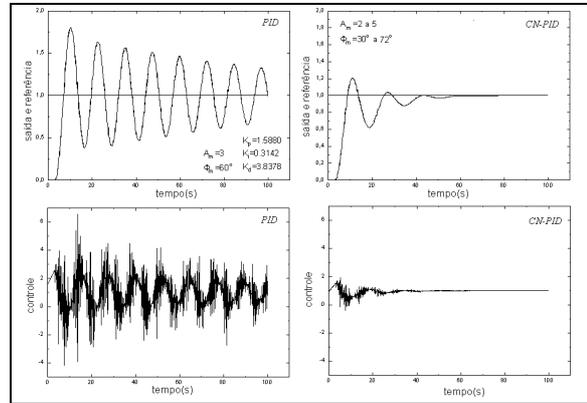


Figura 8. Saída, controle e referência considerando uma ruptura no modelo do processo

A seguir, considera-se o controle de um processo não linear, dado pela equação (15). Da figura 9 torna evidente que o controlador *PID* apresenta um pobre desempenho no controle deste processo, enquanto o *CN-PID* apresenta desempenho satisfatório com valores reduzidos de sobre-sinal e valores adequados do sinal de controle.

$$y(t) = -y(t) + \sin^2(\sqrt{|y(t)|}) + u(t) \quad (15)$$

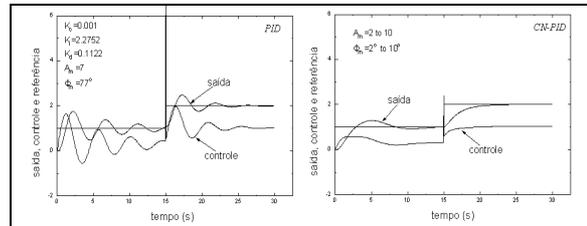


Figura 9. Saída, controle e referência do processo não-linear sob o controle *PID* e *CN-PID*

Para finalizar os testes de avaliação o *CN-PID* é aplicado com sucesso no controle prático denominado de túnel de aquecimento e desenvolvido no Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina (<http://www.lcmi.ufsc.br/lcp/>). O túnel de aquecimento, apresentado na figura 10, é composto de um sistema de ventilação e um sistema de aquecimento a resistores elétrico, montados em um tubo de 50 cm com seção transversal uniforme. A potência dos resistores elétrico é controlado por um circuito eletrônico de potência cuja entrada é compatível com a saída D/A de aquisição de dados. A temperatura é medida através de dois sensores posicionados nas extremidades do túnel cuja saída é compatível com a entrada A/D do sistema de aquisição de dados. Uma

das extremidades do túnel pode ter sua seção transversal regulada com o objetivo de introduzir perturbações de carga no sistema. A variação da temperatura ambiental constitui também, outra fonte de perturbações no sistema. O túnel de aquecimento apresenta comportamento não linear e dinâmica composta de primeira e segunda ordem.



Figura 10. Processo túnel de aquecimento

A figura 11 apresenta o controle *PID* e *CN-PID* aplicados ao túnel de aquecimento. Ambos os controladores controlam satisfatoriamente o processo, entretanto o controlador *CN-PID* apresenta um comportamento dinâmico superior ao controlador *PID* corroborando com os resultados obtidos em todos os exemplos de simulação apresentados. O sistema sob o *CN-PID* apresenta menor sobre-sinal, resposta mais rápida e, por apresentar sinal de controle menos agressivo, evita a saturação do atuador.

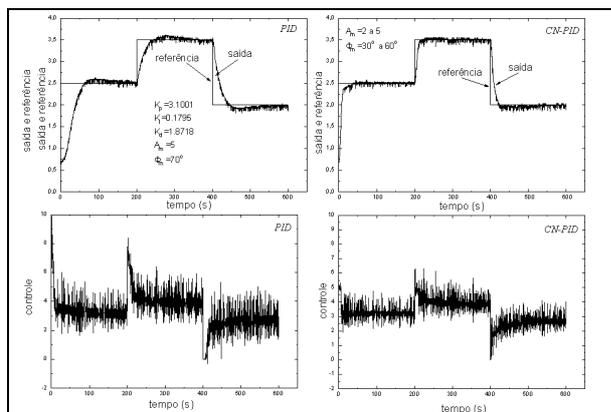


Figura 11. Processo túnel de aquecimento sob o controle *PID* e *CN-PID*

#### 4 Aspectos de estabilidade do *CN-PID*

Análise de estabilidade BIBO (*Bounded Input, Bounded Output*) de controladores nebulosos *PID* pode ser encontrada em vários artigos (Carvajal *et al.* 2000; Chen & Ying, 1997; Malkin & Chen, 1995). Estas abordagens utilizam o teorema do pequeno ganho (Dosoer & Vidyasagar, 1975) para garantir que a saída do sistema seja limitada quando a entrada é limitada. Considerando-se o sistema não linear apresentado na figura 12 tem-se

$$e_1 = u_1 - S_2(e_2) \quad (16)$$

$$e_2 = u_2 - S_1(e_1) \quad (17)$$

onde os termos relativos aos erros são funções normais limitadas e causais. Isto requer que a integral da função elevado a alguma potência seja finito. Supondo-se que as constantes  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $M_1$  e  $M_2$  existam, tal que

$$\|S_1(e_1)\| \leq M_1 + L_1 \|e_1\| \quad (18)$$

$$\|S_2(e_2)\| \leq M_2 + L_2 \|e_2\| \quad (19)$$

onde  $\|f\|$  significa  $[\int_0^\infty |f(t)^p| dt]^{1/p}$  com  $1 \leq p < \infty$ . O teorema do pequeno ganho estabelece que se o produto  $L_1 L_2$  é menor do que a unidade, então o seguinte limite é válido

$$\|e_1\| \leq (1 - L_1 L_2)(\|u_1\| + L_2 \|u_2\| + M_2 + L_2 M_2) \quad (21)$$

$$\|e_2\| \leq (1 - L_1 L_2)(\|u_1\| + L_2 \|u_2\| + M_2 + L_2 M_2) \quad (22)$$

e entrada norma limitada implica em saída norma limitada

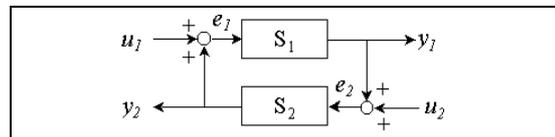


Figura 12. Sistema de controle não linear realimentado

Considerando-se a discretização do *CN-PID* através da transformação bilinear tem-se

$$\Delta u(t) = \tilde{K}_i e(t) + \tilde{K}_p [e(t) - e(t-1)] + \tilde{K}_d [(de(t) - de(t-1))] \quad (23)$$

ou

$$\Delta u(t) = e_i(t) + e_p(t) + e_d(t) \quad (24)$$

onde

$$\tilde{K}_p = K_p - \frac{TK_i}{2}; \quad \tilde{K}_i = K_i T; \quad \tilde{K}_d = K_d \quad (25)$$

$T$  é o período de amostragem e para o projeto proposto,

$$\tilde{K}_p = \frac{\pi}{2A_m L_d} b - \frac{T\pi}{2A_m L_d} a \quad (26)$$

$$\tilde{K}_i = \frac{T\pi}{2A_m L_d} c \quad (27)$$

$$\tilde{K}_d = \frac{\pi}{2A_m L_d} a \quad (28)$$

Estabelecendo-se a seguinte relação

$$e_1(t) = e(t) \quad (29)$$

$$e_2(t) = u(t) \quad (30)$$

$$u_1(t) = r(t) \quad (31)$$

$$u_2(t) = -u(t-1) \quad (32)$$

$$S_1(e_1(t)) = \Delta u(t) \quad (33)$$

$$S_2(t) = N(e_2(t)) \quad (34)$$

e definindo-se

$$M_i = \sup|e(t)|; \quad M_p = \sup|e(t) - e(t-1)|; \quad M_d = \sup|de(t) - de(t-1)|$$

onde  $\sup|f(t)|$  significa o limite superior do valor absoluto de  $f(t)$ , tem-se

$$|e_p| \leq 2 \left( \frac{\pi}{2A_m L_d} (b - Ta) \right) L \quad (35)$$

$$|e_d| \leq 2 \left( \frac{\pi}{2A_m L_d} \right) L \quad (36)$$

Das equações (23), (35) e (36) tem-se o limite em norma para a equação(33)

$$\|S_1(e(t))\| \leq \frac{\pi c T}{2A_m L_d} e(t) + 2L \left( \left| \frac{\pi c}{2A_m L_d} - \frac{T\pi b}{2A_m L_d} \right| + \left| \frac{\pi}{2A_m L_d c} \right| \right) \quad (37)$$

Das equações (18), (19) e (37) e da condição estabelecida pelo teorema do pequeno ganho tem-se a condição de estabilidade que deve ser válida para  $A_m$  obtido para cada um dos setores do plano de fase da figura 5

$$\left| \frac{\pi}{2A_m L_d} c T \|N\| < 1 \quad (38)$$

### 3 Conclusão

A auto-sintonia nebulosa dos ganhos do controlador *PID* proposta neste artigo gerou um controlador nebuloso que apresentou um excelente desempenho a nível de simulação e aplicação prática. A nível de simulação o método foi aplicado a processos linear, não linear, com parâmetros variante no tempo e com ruptura do modelo. A nível de aplicação prática utilizou-se no controle de temperatura de um processo túnel de aquecimento desenvolvido no Departamento de Automação e Sistema da UFSC. Em ambos os casos o desempenho do controlador nebuloso foi comparado e mostrou-se superior ao desempenho do controlador *PID* convencional cujo conjunto de parâmetros é utilizado como condição inicial para o nebuloso. Isto torna evidente que o esquema proposto pode ser utilizado com sucesso para melhorar o desempenho de um controlador *PID* em situações em que desaconselha-se o uso de abordagens convencionais. Através do teorema do pequeno ganho, limites de estabilidade para o controlador nebuloso foram estabelecidos. Embora estes limites possam vir a ser conservadores, se respeitados, garantem a estabilidade do sistema.

Uma outra vantagem deste controlador relaciona-se como o reduzido número de regras e a necessidade de apenas um base para implementar eficientemente o esquema incentivando o desenvolvimento da abordagem para o caso multivariável.

### Referências Bibliográficas

- Almeida, O. M.; Coelho, L. S.; Coelho, A. A. R. (2000). Some issues concerning design and evaluation of fuzzy controllers, *Anais do IV Industry Applications Conferece*, pp. 168-173.
- Åström, K. J.; Häggglund T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. *Instrument Society of America*.
- Carvajal, J.; Chen, G.; Ogmen, H. (2000). Fuzzy *PID* controller: Design, performance evaluation and stability analysis, *Information Sciences*, vol. 123, pp. 249-270.
- Chen, G.; Ying, H. (1997). BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control System, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 5, pp. 245-256.
- Coelho, Leandro S.; Almeida, O. Mota; Simas, H.; Coelho, A. A. Rodrigues (1998). Intelligent and Self-Tuning *PID* Controllers: Methods and Application, *12<sup>o</sup> CBA*, vol. 1, pp.375-380, Uberlândia, MG, Brasil.
- Franklin, G. F.; J. D. Powell; A. E. Baeini, (1986). *Feedback Control of Dynamic Systems*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Gomide, F.A.C.; R. R. Gudwin; Tanscheit R. (1995). Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. *Sixth International Fuzzy Systems Association World Congress Tutorials – IFSA95*, pp. 01-38.
- Malli, H., Li, H.; Chen, G. (1995). Design and analysis of a fuzzy proportional-derivative control system, *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, pp.145-154.
- Kosko, B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Sandri S.; Correa, C. (1999) “Lógica Nebulosa – Tutorial”, *V Escola de Redes Neurais*, INPE, São José dos Campos, SP, Tutorial: pp. 028-072.
- Unbenhauen, L. (1996). Distributed Supervisory Industrial Control Systems and their Problems for Embedding Advanced Control Strategies, *7<sup>o</sup> Congresso Latinoamericano de Control Automático e XV Simposio Nacional de Control Automático*, vol. 1, Buenos Aires, Argentina, pp. I-VIII.
- Yager, R. R.; Filev, D. P. (1994). *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y.