

# ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR NEBULOSO EM UM PROCESSO NÃO LINEAR

Dirceu Moreira F. Lima

Francisco José Gomes

Fac. de Engenharia da UFJF  
CP 422  
36001-970 - Juiz de Fora - MG

## RESUMO

O presente trabalho trata da síntese e implementação de um controlador nebuloso ("fuzzy controller") em um processo não-linear. A implementação foi totalmente heurística, dispensando a complexa fase de modelagem do processo e utilizando somente o conhecimento de operadores. As questões relacionadas com o estabelecimento de agrupamentos linguísticos, funções de pertinência, fuzificação, defuzificação e sintonia do controlador são discutidas. O desempenho desta classe de controladores é avaliado para rejeição de carga, com seu desempenho sendo comparado ao tradicional controlador PID.

## ABSTRACT

This paper deals with the synthesis and implementation of a fuzzy controller applied to a nonlinear process. The implementation was heuristic based, relying only on expertise knowledge, avoiding the complex step of process modeling. The points related to linguistics clusters, membership function, fuzzification, defuzzification and controller tuning are discussed. The performance of this controller is evaluated when compared with the traditional PID controller for load rejection.

**KEYWORDS** : Controle de Processos, Automação Industrial, Controlador Nebuloso, Processo Não Linear, Coluna de Destilação, Controlador PID.

Agradecimento à CAPES/FAPEMIG pelo apoio financeiro.

## 1. Introdução

O desenvolvimento de novos algoritmos de controle tem experimentado, na atualidade, enorme impulso, especialmente pela introdução da informática na área de controle de processos.

Dentre os recentes algoritmos de controle pode-se citar o Generalized Predictive Controller - GPC (Clarke, 1987), que tem se revelado um algoritmo robusto, com excelente performance para rejeições de carga e rastreamento de referência. Esta classe de controladores adaptativos auto-ajustáveis, apesar de diversas vantagens, necessita, em sua implementação, do tratamento de algumas questões específicas para obtenção da performance desejada. Pode-se citar os problemas

associados à estimação robusta de parâmetros em sistemas não lineares (Gomes, 1990) com todas as complexidades associadas (congelamento de parâmetros, "sleeping" ou "blow-up" do estimador, "resetting" da matriz de covariância e outros mais).

Uma possível minimização deste problema consiste na utilização de sistemas supervisórios auxiliares. Os resultados obtidos, embora estimulantes, implicam em esforço adicional, não só a nível computacional, mas também no desenvolvimento e implementação dos algoritmos, que demandam conhecimentos práticos do processo e do algoritmo de controle (Gomes, 1992a,b).

Neste cenário destaca-se uma nova classe de algoritmos de controle que, embora remonte à

meados da década de 70, pelo menos em sua primeira aplicação (Mamdani, 1975), tem sido objeto, nos últimos tempos, de análises, estudos e implementações diferenciadas: são os chamados Controladores Fuzzy ou Nebulosos (Self, 1990).

Existe um aspecto interessante dos controladores nebulosos que consiste na possibilidade de sua implementação baseado única e exclusivamente em condições associadas ao conhecimento de operadores e especialistas, dispensando a complexa etapa de modelagem do sistema. Esta característica abre a possibilidade de inclusão no controlador de todo o conhecimento acumulado de operadores e especialistas, que muitas vezes não consegue se traduzir em equações matemáticas ou expressões analíticas.

O presente trabalho procura analisar as condições de implementação e desempenho de um controlador nebuloso para controle de um processo não linear e complexo: uma coluna de destilação de altíssima pureza. Esta implementação, baseada unicamente no conhecimento heurístico do processo, procurou incorporar a experiência acumulada dos operadores, dispensando complexas etapas de modelagem e identificação do processo, sendo sua performance comparada ao clássico controle PID.

O trabalho está dividido como segue: o capítulo 2 apresenta as características básicas dos algoritmos utilizados, o capítulo 3 apresenta a metodologia de implementação destes algoritmos e o capítulo 4 o modelo do processo e as concepções das malhas de controle utilizadas. Os resultados obtidos e as conclusões gerais constam dos capítulos 5 e 6, respectivamente.

## 2. Algoritmos utilizados

Devido à limitação de espaço não serão apresentados os conceitos da lógica nebulosa, disponível nas referências.

### 2.1. Estrutura de um controlador nebuloso

A estrutura de um controlador nebuloso foi apresentada inicialmente por Mamdani (Mamdani, 1975). Esta classe de controladores procura expressar, através de variáveis linguísticas, a relação entre variáveis dependentes e independentes do processo, mediante uma seqüência de regras com premissas e consequências.

O algoritmo do controlador nebuloso apresenta a seguinte configuração:

(1) Efetuar a leitura das variáveis dependentes  $x_i$

(2) Fuzificar as variáveis  $x_i$

$$A(x) = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

onde  $A(x)$  representa cada agrupamento linguístico do subconjunto nebuloso respectivo.

(3) Para cada regra R, calcula-se seu grau de satisfação  $\tau$ , com

$$\tau = \min(A(x), B(x)), \forall x.$$

(4) Calcular o valor linguístico da variável de controle  $u$  como um subconjunto nebuloso  $D$ , onde para cada  $z$  na base do conjunto  $Z$  de  $u$  temos que

$$D(z) = \max(\min(\tau, D(z)))$$

(5) Efetuar a defuzificação do controle  $U$  a partir de  $D(z)$

(6) Aplicar o controle  $U$  no processo e retornar ao passo (1)

### 2.2. Controlador PID com algoritmo velocidade

O controlador PID utilizou a forma do algoritmo velocidade (Nisenfeld, 1981):

$$\Delta u(t) = K \{ e(t) - e(t-1) \} + (\Delta t / \tau) e(t) + (\tau_d / \Delta t) \{ e(t) - 2e(t-1) + e(t-2) \}$$

onde as constantes  $K$ ,  $\tau$  e  $\tau_d$  são os ganhos proporcional, integral e derivativo, respectivamente,  $\Delta t$  representa o intervalo de amostragem,  $e(t)$  o erro e  $\Delta u$  o acréscimo de controle no instante  $t$ . Dada a existência do ambiente computacional de simulação SIMPAC (Gomes, 1993) o controlador foi sintonizado utilizando-se a regra da curva de reação de Ziegler-Nichols e a seguir, mediante simulação, efetuou-se um ajuste fino.

### 3. O Modelo do Processo utilizado

Os algoritmos foram utilizados para controle de uma coluna de destilação de alta pureza, utilizada na indústria de semicondutores, cuja finalidade é a purificação do Triclorosilano, a partir de uma alimentação binária contendo triclorosilano-tetracloroto de silício ( $\text{SiHCl}_3$ - $\text{SiCl}_4$ ) (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados Operativos da Coluna de Destilação

Alimentação (fração molar)	..0,80
Destilado (fração molar)	.0,99938
Base (fração molar)	.....0,00024
Alimentação (ton. por hora)	.1,42
Destilado (ton. por hora)	...1,13
Base (ton. por hora)	.....0,29
Refluxo (ton. por hora)	.....1,78
Refervedor (Mcal)	.....127,22
Vapor (ton. por hora)	.....3,41
Número de estágios	.....27
Estágio de alimentação	.....15

Para simulação da coluna utilizou-se o ambiente computacional SIMPAC (Gomes, 1993). O processo apresenta duas variáveis controladas (composição do produto no topo e na base da coluna), sendo seu controle efetuado, respectivamente pelas duas variáveis independentes (refluxo no topo da coluna e energia fornecida ao refervedor na base da coluna) (Figura 2).

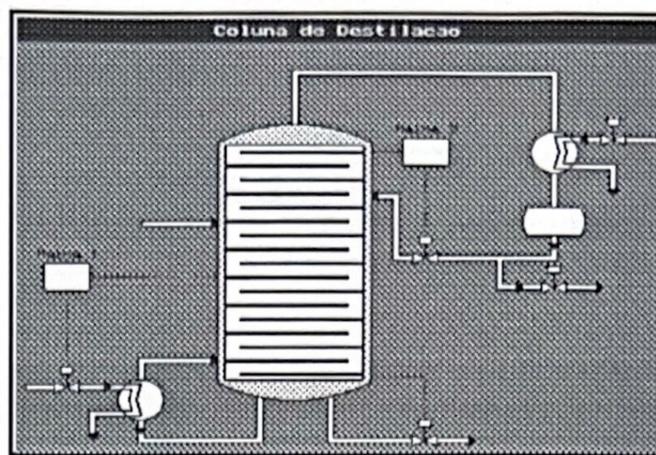


Figura 2 : Coluna de destilação com as malhas de controle

### 4. Síntese e Implementação dos Controladores

#### 4.1. Controlador PID

O controlador PID foi implementado na versão distribuída, com duas malhas, uma no topo e outra na base da coluna, onde as variáveis controladas são as composições no topo e base da coluna, respectivamente; as variáveis de controle são a vazão do refluxo e energia do refervedor, para as respectivas malhas de controle citadas (Figura 2).

Os parâmetros finais obtidos para a sintonia foram  $K = 0,09$ ,  $\tau = 6000$  e  $\tau_d = 0,003$ , com  $\Delta t = 0,015$  para a malha da base e  $K = 0,00065$ ,  $\tau = 755000$ ,  $\tau_d = 450$ ,  $\Delta t = 0,022$  para a malha do topo.

#### 4.2. Controlador Nebuloso

A experiência anterior com o processo, resultante da aplicação de diferentes algoritmos de controle, permitem destacar algumas características fundamentais do processo:

- variações positivas de carga aumentam o conteúdo de impurezas na base da coluna, aumentando a pureza da composição no topo da coluna;
- variações negativas de carga aumentam o conteúdo de impurezas no topo da coluna

aumentando a pureza da composição da base da coluna;

- a relação entre os ganhos dos efeitos anteriores é não linear e assimétrica;

- acréscimo de impurezas na composição do topo da coluna pode ser corrigida através de aumento da vazão do refluxo (realimentação positiva) ou mediante uma diminuição da energia entregue ao refeedor (realimentação negativa);

- acréscimo de impurezas na composição da base da coluna pode ser corrigida através de diminuição da vazão do refluxo (realimentação negativa) ou mediante aumento da energia entregue ao refeedor (realimentação positiva);

- O ganho do processo apresenta variações bruscas, não lineares e assimétricas;

As informações acima são sintetizadas na Tabela 2, onde os símbolos (+) significam variações positivas, o símbolo (-) variações negativas e (Imp.) o conteúdo de impurezas nas variáveis controladas.

Face à estas considerações o controlador nebuloso foi implementado com as seguintes características:

a) O modelo implementado foi do tipo posicional, com estrutura

$R$  : se  $x_1$  é  $A_1$  e  $x_2$  é  $A_2$  ...então  $y$  é  $B$ .

b) Identificação da estrutura do modelo

A estrutura do modelo utilizou as mesmas variáveis do controlador PID descrito anteriormente.

c) Agrupamentos ("clusters") de variáveis dependentes

As colunas de destilação, para efeitos de controle, podem ser divididas em três classes : média, alta e altíssima pureza, em função da complexidade para o controle (Mountiziaris, 1988). Assim, foram adotados três agrupamentos à esquerda e direita

da região de regime do processo (Figura 3).

Tabela 2 - Informações do Operador sobre o Processo

Variável	Imp. top	Imp. base	Ganho top	Ganho base
Carga(+)	-	+	Baixo	Alto
Carga(-)	+	-	Alto	Baixo
Refluxo(+)	-	+	Baixo	Alto
Refluxo(-)	+	-	Alto	Baixo
Refeedor(+)	+	-	Alto	Baixo
Refeedor(-)	-	+	Baixo	Alto

d) agrupamentos ("clusters") de variáveis independentes

Adotou-se, por decorrência do item c anterior, a divisão das variáveis independentes no mesmo número de agrupamentos, pelas já citadas características distintas de controle das regiões (Figura 4).

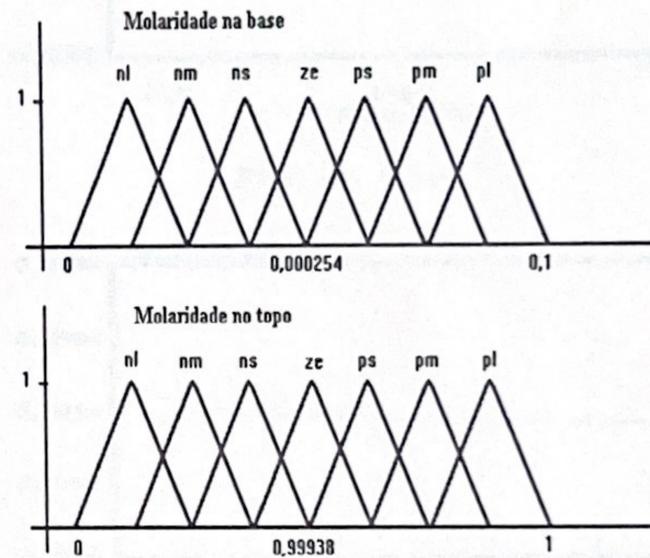


Figura 3 : Clusters do processo

## 5. Resultados obtidos

Testou-se, inicialmente, o controlador nebuloso para variações de carga de  $\pm 5\%$  na vazão de alimentação do processo. Verificou-se, nas primeiras simulações, um comportamento oscilatório deste controlador, porém sem desestabilização do processo. Após algumas simulações, com alteração dos limites dos agrupamentos os resultados apresentaram, uma melhoria sensível, conforme pode ser verificado na figura 5.

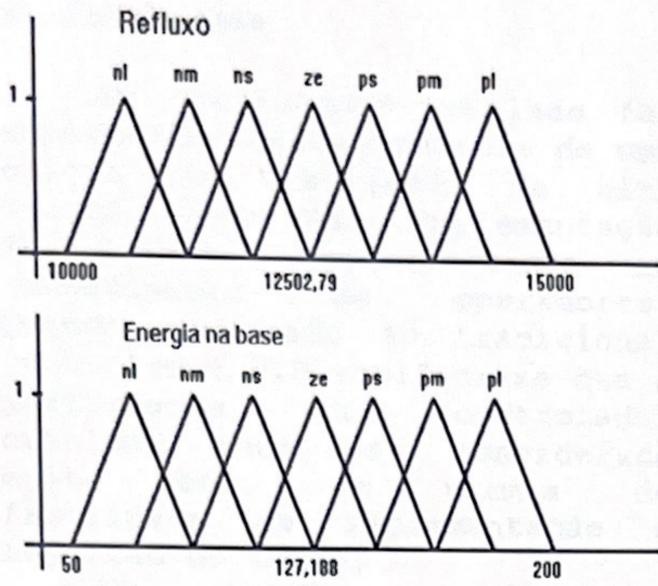


Figura 4 : clusters das variáveis independentes

Um dos aspectos que pode ser observado é a existência de um pequeno erro de "off-set" para o controlador nebuloso, que não foi possível eliminar, pois um aumento do ganho tornava o processo mais oscilatório. Os resultados obtidos para o PID são mostrados na figura 6. Verifica-se que o controlador nebuloso, a menos do erro de "off-set" assinalado, apresentou uma

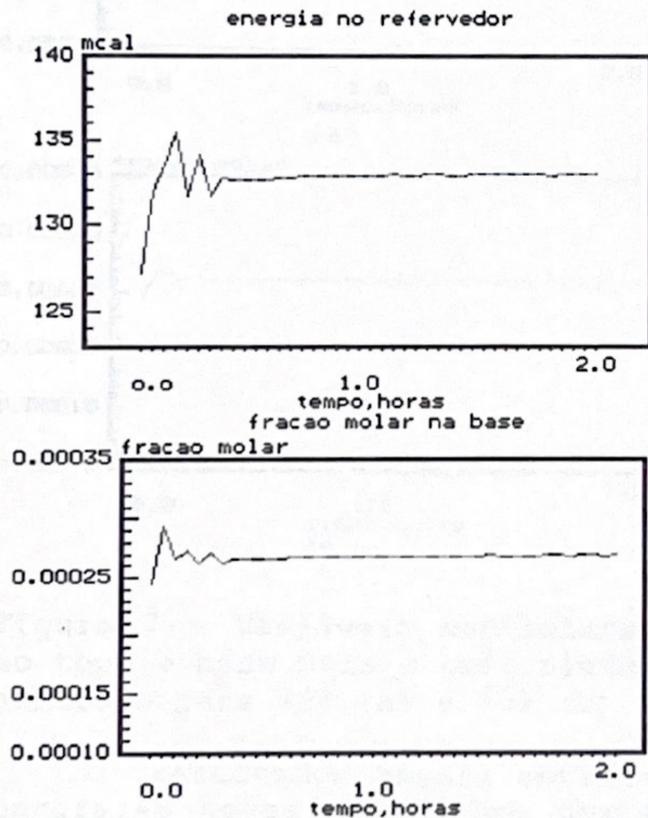


Figura 5 - variáveis de controle e controlada na base da coluna para uma perturbação de +5% de carga (controlador nebuloso).

performance qualitativamente superior ao PID (comparar, por exemplo, a composição na base para variações negativas de carga, nas figuras 6 e 7).

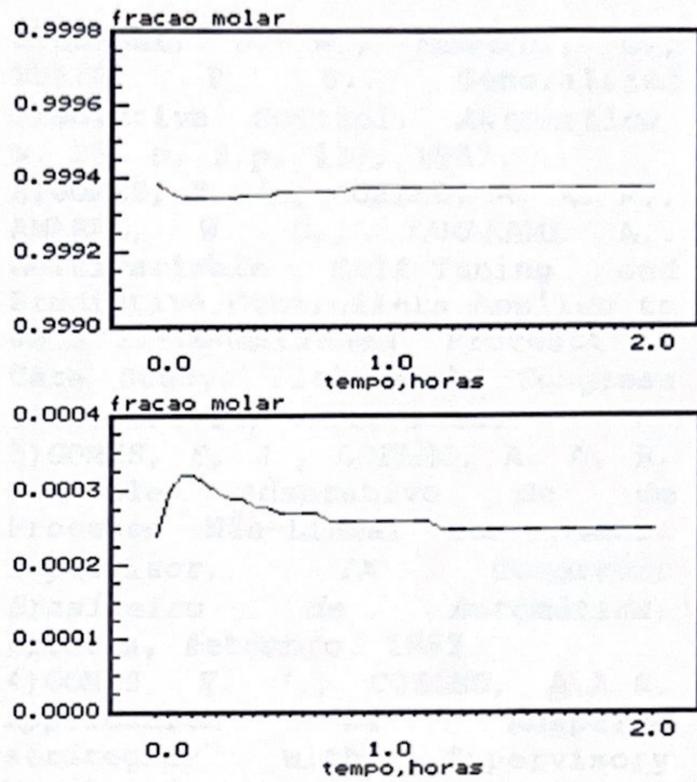


Figura 6(a)

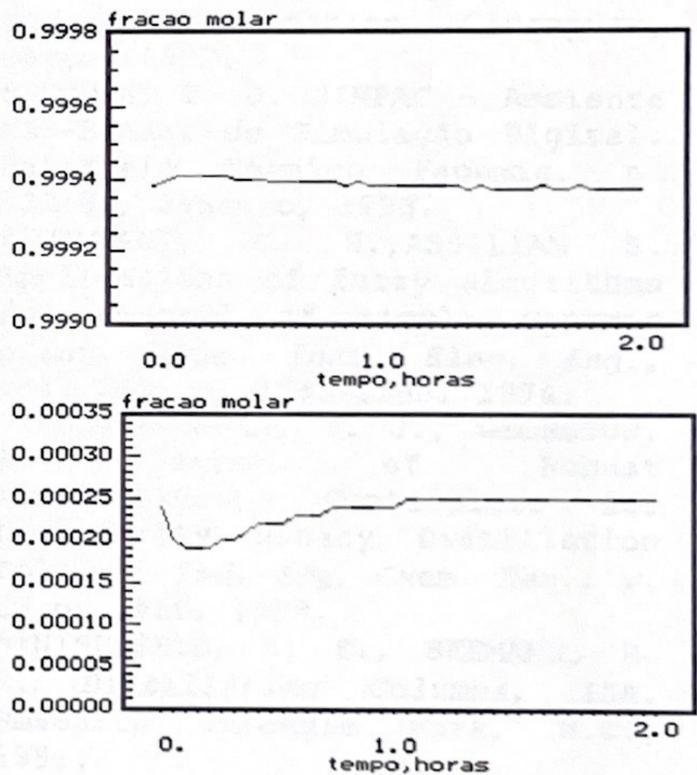


Figura 6(b)

Figura 6 - Variáveis controladas no topo (a) e base (b) para o controlador PID para variações de -5% e +5% na carga

## 6. Conclusões

Um controlador nebuloso foi implementado para controle de uma coluna de destilação de alta pureza, tendo esta implementação se baseado exclusivamente no conhecimento de operadores. Quando comparado ao tradicional controlador PID verifica-se que a performance do controlador nebuloso pode ser considerada muito boa, em termos de facilidade de implementação e rejeição de carga.

Um pequeno problema a considerar foi a existência de erro de "off-set" para o controlador nebuloso, que não foi possível eliminar dentro da estrutura posicional do controlador, pois um aumento de ganho tornava o controlador mais oscilatório.

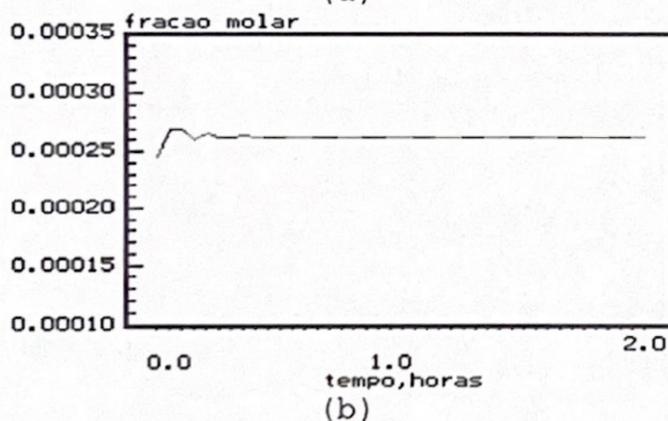
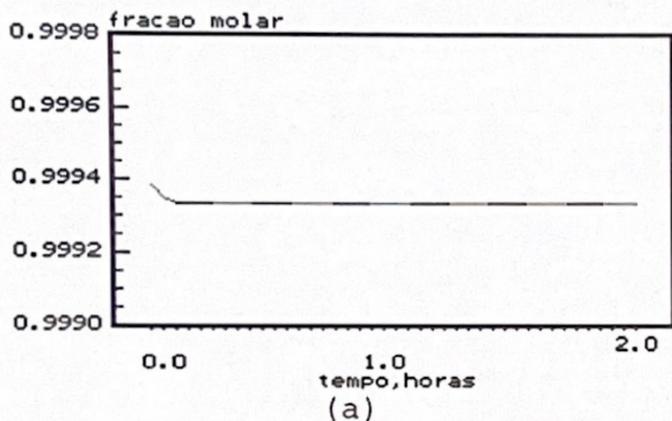


Figura 7 - Variáveis controladas no topo e base para o controlador nebuloso para -5% (a) e +5% (b).

Os resultados gerais obtidos encorajam novas aplicações deste controlador, não só em termos heurísticos, mas também através de modelagem dos agrupamentos e funções de pertinência bem como técnicas de adaptatividade que,

embora exijam esforço adicional, certamente melhorarão seu desempenho.

## 7. Bibliografia

- 1) CLARKE, D. W., MOHATDI, C., TUFFS, P. S.. Generalized Predictive Control. *Automatica*, v. 23, n. 2, p. 137, 1987.
- 2) GOMES, F. J., COELHO, A. A. R., AMARAL, W. C., YAMAKAMI A.. Multivariable Self-Tuning and Predictive Controllers Applied to an Ill-conditioned Process: A Case Study. *11th World Congress IFAC*, Tallin, URSS, 1990.
- 3) GOMES, F. J., COELHO, A. A. R. Controle Adaptativo de um Processo Não-Linear com Módulo Supervisor. *IX Congresso Brasileiro de Automática*, Vitória, setembro, 1992.
- 4) GOMES, F. J., COELHO, A.A.R. Application of Adaptive strategies with Supervisory Module to control a Nonlinear Process. *Singapore International Conference on intelligent Control and Instrumentation*, Cingapura, março, 1992.
- 5) GOMES, F. J. SIMPAC - Ambiente Não-Linear de Simulação Digital. Relatório Técnico Fapemig, n. 233/90, Janeiro, 1993.
- 6) MAMDANI, E. H., ASSILIAN S. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. Inst. Elec. Eng.*, vol. 121, p. 1585-1588, 1974.
- 7) MOUNTIZIARIS, T. J., GEORGIU, A. Design of Robust Noninteracting Controllers for High-Purity Binary Distillation Columns. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 27, p. 1450, 1988.
- 8) NISENFELD, A. E., SEEMANN, R. C. *Distillation Columns*, ISA, Research Triangle Park, N.C., 1981.
- 9) SELF, K. Designing with Fuzzy Logic. *IEEE Spectrum*, p.42, Novembro, 1990.
- 10) SUGENO, M., YASUKAWA, T. A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v. 1, n.1, p.7-31, Fevereiro, 1993.