

# Sistema Supervisório e Controle Multivariável aplicando Controlador Fuzzy Ponderado-PID em um Processo de Fermentação Alcoólica

## Supervisory System and Multivariable Control Applying Weighted Fuzzy-PID Logic in an Alcoholic Fermentation Process

Márcio Mendonça<sup>1</sup>; Elton Carlos Correa<sup>2</sup>; Ivan Rossato Chrun<sup>3</sup>; Orion Buss<sup>4</sup>

### Resumo

Neste trabalho, é analisado, o controle de um sistema multivariável, um processo de fermentação alcoólica com fase não mínima. O controle é feito com controladores clássicos, Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID) associado a um sistema supervisório baseado em Sistemas *Fuzzy*. O sistema *Fuzzy*, a priori, será um passador de *set-points* aos controladores PID, porém também agrega funções de proteção, como por exemplo, caso a biomassa esteja com valor zero ou muito próximo; O controlador *Fuzzy* altera a campanha para evitar ou amenizar o problema de paralisar a reação química na cuba. Duas arquiteturas de controle baseadas em sistemas de controle *Fuzzy* serão apresentadas, e comparadas em desempenho com controle clássico em campanhas diferentes. Um breve resumo sobre teoria *Fuzzy* e alguns trabalhos correlatos também serão apresentados. E, finalmente resultados de simulações, conclusões e futuros trabalhos encerram o artigo.

**Palavras-chave:** Sistemas Supervisórios. Controle de um Sistema Multivariável. Processo de Fermentação Alcoólica. Controle Clássico. Controle Fuzzy-PID.

### Abstract

In this work, it is analyzed a multivariate system control of an alcoholic fermentation process with no minimum phase. The control is made with PID classic controllers associated with a supervisory system based on Fuzzy Systems. The Fuzzy system, a priori, send set-points to PID controllers, but also adds protection functions, such as if the biomass valued is at zero or very close. The Fuzzy controller changes the campaign to prevent or mitigate the paralyzation of the process. Three control architectures based on Fuzzy Control Systems are presented and compared in performance with classic control in different campaigns. The third architecture, in particular, adds an adaptive function. A brief summary of Fuzzy theory and correlated works will be presented. And, finally simulations results, conclusions and future works end the article.

**Keywords:** Supervisory Systems. Multivariate Control System. Alcoholic Fermentation Process. Classic Control. Fuzzy-PID Control.

<sup>1</sup> Docente no departamento de Engenharia Elétrica, (DAELE), UTFPR-CP, Programa de Mestrado (COEME) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio-Procópio; mendonca@utfpr.edu.br

<sup>2</sup> Aluno de graduação do Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio; eltoncorrea.utfpr@gmail.com

<sup>3</sup> Aluno de mestrado na Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba (CPGEI)

<sup>4</sup> Aluno de Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio; orion.buss@gmail.com

## Introdução

A lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy*. Ela difere dos sistemas lógicos tradicionais em suas características e seus detalhes, a rigor a lógica clássica é uma generalização devida sua capacidade de modelar somente zeros e uns, estados limites das funções de pertinência. De outro modo, nessa lógica, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas (GOMIDE, PEDRIKS, 2006).

A motivação da aplicação dessa técnica está na capacidade de seres humanos de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas e/ou aproximadas. A estratégia adotada é também de natureza imprecisa e geralmente possível de ser expressa em termos linguísticos. (PASSINO; YOURKOVICH, 1997).

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema supervisório com algumas funções de proteção para um processo de fermentação alcoólica, utilizando Sistemas *Fuzzy*. A arquitetura clássica de controle supervisório pode ser vista na literatura, como por exemplo, o trabalho de Passino e Yourkovich (1997).

No processo em estudo, o controle é multivariável, no qual, controladores PID (Proporcional Integral e Derivativo) determinam a abertura e fechamento das válvulas **Fin** (Válvula de Entrada) e **Fout** (Válvula de Saída), a primeira é responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado da cuba. Vale ressaltar que: a modelagem do sistema e os controladores clássicos são similares do trabalho de Mendonça (2011).

Essa pesquisa desenvolve um sistema supervisório para o processo de fermentação alcoólica, com duas arquiteturas de controle, diferentes quanto à utilização da lógica *Fuzzy* simultaneamente com controle PID. Estas

arquiteturas estão descritas a seguir: na primeira arquitetura um controlador *Fuzzy* passa os *set-points* para os controladores PID; na segunda um controlador *Fuzzy* passa os *set-points* para os controladores PID quando o sistema está em condições de alarmes, e um segundo controlador *Fuzzy* assume a posição com o sistema operando em condições normais.

Segundo Shaw e Simões (2004) variáveis isoladas do processo são controladas por PID, enquanto o controle supervisório é feito por operadores humanos. Existem sistemas supervisórios comerciais, como, por exemplo, Elipse que implementa uma lógica clássica própria. A lógica *Fuzzy* pode fornecer uma solução eficiente para esse problema, pelos quais controladores supervisórios multivariáveis *Fuzzy* são projetados com base na experiência (conhecimento heurístico) dos operadores e/ou especialistas, e não se utilizar modelos matemáticos complexos.

A metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho é de simular o processo de fermentação alcoólica, através das equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do processo. As simulações são feitas no software MATLAB, utilizando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem para a resolução das equações.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: na segunda seção é feita uma breve revisão bibliográfica de trabalhos correlatos que utilizam Sistemas *Fuzzy* em controle e supervisão de processos; a terceira seção apresenta uma breve introdução de sistemas *Fuzzy* e suas principais vantagens e desvantagens; a quarta seção descreve e modela o sistema de fermentação alcoólica; a quinta seção apresenta o desenvolvimento do sistema supervisório para o processo de fermentação alcoólica, e, em seguida compara os resultados obtidos com o controle clássico PID; a sexta seção apresenta resultados e comportamentos dinâmicos das arquiteturas de

controle propostas.; e, finalmente a última seção faz à conclusão do trabalho, e sugestões para trabalhos futuros.

### **Trabalhos correlatos com sistemas Fuzzy**

O universo de aplicações em diferentes áreas da Lógica *Fuzzy* é bastante extenso (PASSINO; YOURKOVICH, 1997). Entretanto, alguns trabalhos correlatos serão apresentados como forma de motivação dessa pesquisa.

O trabalho de Yang et al. (2010) utiliza um controlador *Fuzzy* Ponderado em um moinho de esfera, processo industrial que se utiliza de conceitos de química, metalurgia e energia elétrica. Esse processo é um complexo mecanismo mecânico; com ponto de controle crítico quando se relaciona capacidade de produção e eficiência energética. Nesse contexto, um controlador com regras ajustáveis obteve resultados da ordem de 25% melhores do que o PID clássico, segundo os autores.

Fernandes (2005) sugere um modelo de supervisão utilizando lógica *Fuzzy* para um sistema de geração de energia híbrido, este modelo é composto por um grupo gerador diesel, um gerador eólico e um banco de baterias. O objetivo é fazer o gerador diesel trabalhar o menos possível para economizar combustível; o banco de baterias atua quando o gerador eólico não consegue suprir a demanda de energia por um curto intervalo de tempo, onde não é viável utilizar o gerador diesel, conseguindo uma eficiência maior no uso do gerador eólico.

Yamakawa (2007) propõe um sistema de controle *Fuzzy* para banco de capacitores automático, aplicado nos alimentadores de distribuição de energia elétrica com o intuito de minimizar o número de chaveamento do banco de capacitores sem alterar os níveis de tensão do alimentador, otimizando o desempenho do equipamento, resultando em uma maior correção dos reativos.

O artigo do Yesil et al. (2013) apresenta um FCM (*Fuzzy Cognitive Maps*) para a sintonia dos parâmetros de controladores PI aplicado a um sistema não linear. Os controladores PI, para sistemas deste tipo, não conseguem resultados satisfatórios, por causa de diferentes propriedades estáticas e dinâmicas, porém esse trabalho mostrou uma solução eficiente para esse problema com o ajuste online dos parâmetros do controlador PI para cada ponto de operação do sistema, através de um FCM.

O trabalho de Arriaga-De-Valle e Dieck-Assad (2006) discute e compara o controle clássico PID aplicado a um sistema de caldeira para geração de vapor, com um sistema *Fuzzy* supervisório gerando *set-points* para o controle clássico. O sistema supervisório proporcionou uma economia de combustível de 2,5 a 6,5 %, dependendo da carga de vapor.

No trabalho Mendonça (2011) apresenta uma Rede Cognitiva Dinâmica, do inglês *Dynamic Cognitive Networks*, uma evolução dos *Fuzzy Cognitive Maps*, para controle e sistema supervisório do mesmo processo, fermentador alcoólico, similar ao utilizado nessa pesquisa.

O trabalho Wang et al. (2012) utiliza um controlador *Fuzzy*-PID para elevadores. Com o objetivo de reduzir o grande consumo de energia, este trabalho apresenta um novo sistema de controle que pode transformar a energia do motor para trabalhar no estado gerador à rede elétrica. Esse sistema de controle é necessário porque o controle PI convencional não pode funcionar de forma eficiente no controle do variável tempo e de objetos não lineares.

### **Vantagens e desvantagens da lógica Fuzzy**

A lógica *Fuzzy* foi proposta pelo professor de ciências da computação Lotfi A. Zadeh em meados da década de 60 (ZADEH, 1992). O modelo de controle *Fuzzy* Mamdani, utilizado

nesse trabalho, foi criado por Ebrahim Mamdani em 1975, para controlar a caldeira de uma máquina a vapor; através de um conjunto de regras baseada em variáveis linguísticas, regras que foram construídas por meio do conhecimento de operadores (PASSINO; YOURKOVIC, 1997).

A idéia básica em controle fuzzy é modelar as ações a partir de conhecimento especialista, ao invés de, necessariamente, modelar o processo em si. As motivações para esta nova abordagem estão nos casos nos quais o conhecimento de um ou mais especialistas de controle são possíveis de serem obtidos. Seja por meio de operadores ou de projetistas ou até mesmo de ambos. Enquanto que os modelos matemáticos envolvidos são em geral custosos, ou complicados para serem desenvolvidos (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

De um modo geral, um sistema de controle *Fuzzy* clássico, como utilizado nesse trabalho, pode ser desenvolvido com o conhecimento de um especialista do processo por meio de um conjunto de regras, nas quais as condições são dadas a partir de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de entrada e saída do processo. (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

Não é escopo desse trabalho apresentar os mecanismos de funcionamento da lógica *Fuzzy* e/ou as operações matemáticas utilizadas para fuzzificação e defuzzificação dos dados. Limita-se a somente a uma breve introdução e algumas das vantagens e desvantagens dessa técnica.

### **Vantagens de se utilizar lógica *Fuzzy*:**

- Abstração e modelagem pode ser feita por meio de conhecimentos expressos em termos linguísticos; a linguagem natural, que é usado por pessoas comuns em uma base diária.
- Uma abordagem mais intuitiva, sem a complexidade de longo alcance e flexível;

- Tolerante com dados imprecisos;
- A lógica *Fuzzy* pode modelar funções não lineares de complexidade arbitrária.
- Pode-se desenvolver um sistema *Fuzzy* para combinar com qualquer conjunto de dados de entrada e saída. Através de técnicas adaptativas (Alisson, 2014), como por exemplo, *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems* (ANFIS);
- Pode-se desenvolver controladores, por meio do conhecimento e experiência de um ou mais especialistas e operadores;
- Em contraste direto com Redes Neurais Artificiais, que utilizam dados históricos para treinamento, a lógica *Fuzzy* permite contar com o conhecimento, e a experiência de pessoas que já entendem o sistema; entretanto dados podem ser usados para refinamento do modelo.
- A lógica *Fuzzy* pode ser usada em conjunto com técnicas de controle convencionais (caso dessa pesquisa);

Porém, se uma solução mais simples já existe, esta é recomendada. Entretanto é uma ferramenta sugerida para lidar com rapidez e eficiência problemas com imprecisão e não linearidade (KASABOV, 1998). Outra desvantagem, não só da Lógica *Fuzzy*, mas também de sistemas computacionais inteligentes, de um modo geral, não se garante que o resultado final seja ótimo, porém é possível se obter soluções em situações onde não se conhece ou somente parcialmente os modelos matemáticos de um sistema, por exemplo (MENDONÇA, 2011).

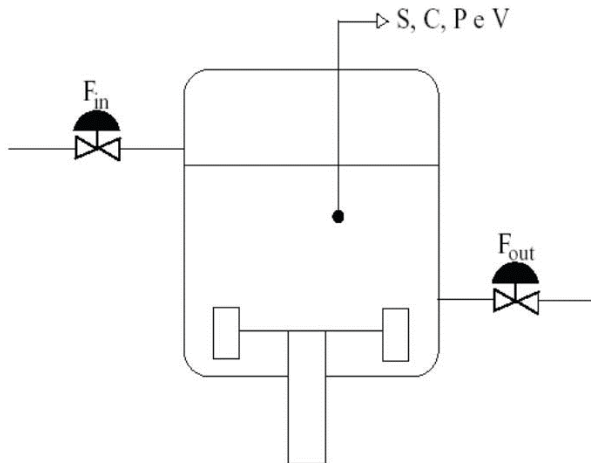
### **Processo Fermentação Alcoólica**

De um modo geral, existem duas válvulas que controlam, respectivamente, o fluxo de substrato inserido no tanque e o fluxo de produto (fermentado) retirado. Estas válvulas são

controladas por dois controladores independentes do tipo Proporcional – Integral - Derivativo (PID).

O processo de fermentação alcoólica utilizado neste artigo, foi inicialmente estudado por Maher (1995). Pode-se observar na figura 1, que o processo possui quatro variáveis de estado: as concentrações de substrato (S), de biomassa (C), de produto (P) e o volume (V) do tanque onde ocorre a fermentação. As concentrações são dadas em gramas/litro (g/l), e o volume em litros (l). A figura 1 também apresenta as válvulas Fin e Fout onde, a primeira é responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado da cuba.

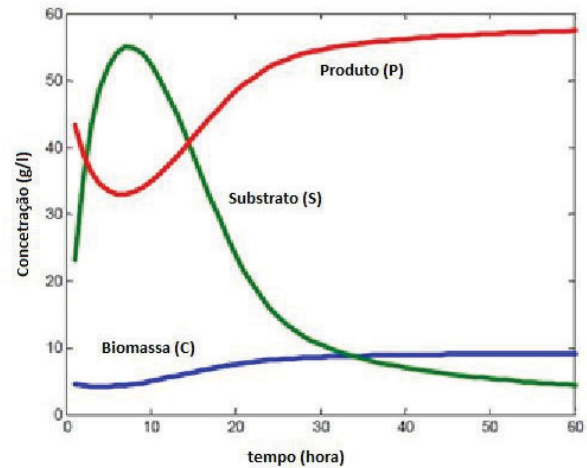
**Figura 1** - Processo de Fermentação Alcoólica



**Fonte:** Adaptado de Maher (1995).

Este processo apresenta interação entre suas variáveis, o que resulta em não linearidade. A análise da curva de resposta ao degrau, na figura 2, mostra um comportamento de fase não mínima e tempo de acomodação grande (FABRO, 2003; MENDONÇA, 2011). Além disso, por medida de segurança, o volume do reservatório não deve exceder 3,5 l nem ficar abaixo de 1,5 l, e para garantir a fermentação, a concentração de biomassa não deve superar 8 g/l, do mesmo modo a concentração de substrato não pode ficar abaixo de 0,5 g/l, porque com valores muito próximos a zero da biomassa a reação química se extingue.

**Figura 2** - Comportamento Dinâmico das Variáveis de Estado do Processo de Fermentação Alcoólica



**Fonte:** o próprio autor

As equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do processo são dadas de (1) a (4).

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_c/s} \mu C + \frac{F_{in}}{V} S_a - \frac{F_{out}}{V} S \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \mu C - \frac{F_{out}}{V} C \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{Y_p/s}{Y_c/s} \mu C - \frac{F_{out}}{V} P \quad (3)$$

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (4)$$

Onde:

$S_a$  → concentração de substrato da alimentação;

$Y_c/s$  → constante de conversão da biomassa;

$Y_p/s$  → constante de conversão do produto;

$\mu$  → função de crescimento da biomassa, dada pela equação (5).

$$\mu = \mu_0 \frac{S}{K_s + S} \left(1 - \frac{P}{P_m}\right) \quad (5)$$

Onde:

$\mu_0$  → máxima taxa de crescimento;

$K_s$  → constante de Michaelis-Menton;

$P_m$  → coeficiente de inibição do produto durante a reação.

### Sistema de controle e supervisor Fuzzy

Como já citado, essa pesquisa desenvolve duas formas de aplicação de controle *Fuzzy* juntamente com controladores PID, para simulação do processo, análise e comparação de resultados é utilizado duas campanhas de fermentação distintas, de tal modo que as duas arquiteturas de controle são testadas nessas duas campanhas, mostradas nas tabelas 1 e 2.

**Tabela 1** - Campanha 1

CAMPANHA 01	
Tempo até (horas)	Concentração de produto desejado (g/l)
60	40
120	45
150	35
200	40
350	45

Fonte: o próprio autor

**Tabela 2** - Campanha 2

CAMPANHA 02	
Tempo até (horas)	Concentração de produto desejado (g/l)
60	40
120	15
180	35
240	45
350	20

Fonte: o próprio autor

Nas duas campanhas citadas, os mesmos *start-up* mostrados utilizam os valores das constantes utilizadas para a evolução das equações diferenciais, e podem ser vistos na tabela 3, já os valores iniciais das variáveis S, C, P e V são mostrados na tabela 4.

A Primeira Arquitetura de Controle: Nesta arquitetura de controle supervisor apenas um controlador *Fuzzy* passa os *set-points* aos

controladores PID, com o intuito de melhorar o processo de fermentação alcoólica, e alcançar funções de proteção para o S, C e V. No diagrama de bloco da figura 3 podemos observar o princípio do funcionamento desta arquitetura de controle supervisor, onde o processo é controlado pelos controladores PID e o sistema *Fuzzy* atua em nível supervisor passando os *set-points* aos controladores clássicos.

Figura 4 apresenta a estrutura do primeiro controlador *Fuzzy*, nota-se que este controlador possui cinco entradas e duas saídas. Para a entrada foi levado em consideração à variação do ponto de operação desejado (variação da concentração do produto fermentado, ou *set-point* do processo), o erro do ponto de operação além das concentrações de biomassa e substrato, e por último o volume do tanque. Enquanto as saídas – Fator *Fint* e Fator *Fout* – são fatores de multiplicação que controlam os valores dos *set-points* efetivamente aplicados aos controladores PID, que por sua vez controlam a abertura e fechamento das válvulas *Fint* e *Fout*.

**Tabela 3** - Valores iniciais das constantes

CONSTANTES	
$S_a$	100 g/l
$P_m$	100
$K_s$	10
$\mu_0$	0,31
$Y_{p/s}$	0,07
$Y_{c/s}$	0,44

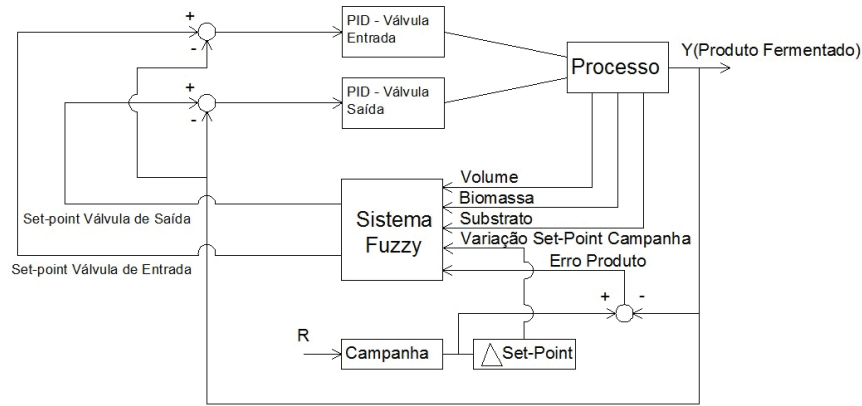
Fonte: o próprio autor

**Tabela 4** - Variáveis do processo

VARIÁVEIS DO PROCESSO	
S (Substrato)	4,5 g/l
C (Biomassa)	5 g/l
P (Produto)	50 g/l
V (Volume)	2 l

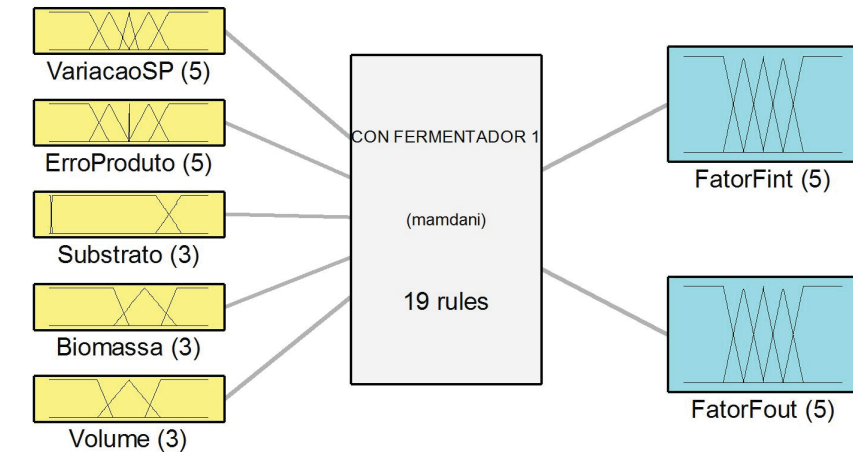
Fonte: o próprio autor

**Figura 3** - Arquitetura I de Controle Supervisório com um Sistema *Fuzzy*



Fonte: o próprio autor

**Figura 4** - Estrutura do controlador I (5x2)



Fonte: o próprio autor

A tabela 5 descreve a heurística de desenvolvimento utilizada de forma resumida. A tabela 6 mostra algumas restrições de operação do processo de acordo com os trabalhos de (MENDONÇA, 2011), (FABRO, 2003).

A figura 5 mostra um exemplo de funções de pertinências utilizadas na elaboração dos controladores *Fuzzy*, nota-se que as funções das extremidades POUCO

e MUITO são do tipo trapezoidal já a função do meio SUFICIENTE é do tipo triangular, vale ressaltar que para a construção das demais funções, das outras variáveis foi utilizado este mesmo modelo exposto como exemplo. Uma vez que as funções do tipo trapezoidal e triangular são aproximações por retas do ponto de referência desejado, quando não possui total domínio do problema.

**Tabela 5** - Descrição da observação processo

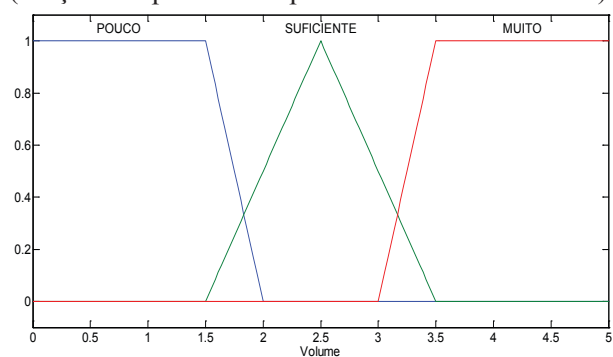
RELAÇÕES DE CONTROLE DO PROCESSO	
.	A concentração de produto no reator, variável controlada do processo, é afetada por variações no set-point do PID que controla a válvula de entrada.
.	A concentração de produto no reator, variável controlada do processo, é afetada por variações no set-point do PID que controla a válvula de saída.
.	O valor do set-point desejado no processo, que caracteriza o ponto de operação da reação, determina o valor de set-point efetivamente aplicado ao PID, que controla a válvula de entrada.
.	O valor do set-point desejado no processo, que caracteriza o ponto de operação da reação, determina o valor de set-point efetivamente aplicado ao PID, que controla a válvula de saída.
.	A variação de set-point desejado (mudança de ponto de operação) afeta o valor do set-point aplicado à válvula de entrada.
.	A variação de set-point desejado (mudança de ponto de operação) afeta o valor do set-point aplicado à válvula de saída.
.	O volume do tanque é afetado pelo valor do set-point da válvula Fin e Fout.
.	As concentrações de substrato e biomassa são afetadas diretamente pela abertura e fechamento da válvula de entrada, uma vez que essa válvula é responsável pelo fluxo de biomassa e substrato que entra na cuba.
.	As concentrações de substrato e biomassa não são afetadas pela abertura e fechamento da válvula de saída, sabendo que a válvula de saída controla apenas o fluxo de produto fermentado que sai do tanque.

Fonte: o próprio autor

**Tabela 6:** Restrições processo

RESTRICÇÕES DE OPERAÇÃO DO PROCESSO	
.	A quantidade de biomassa não deve superar uma concentração de 8 g/l.
.	O volume do reator por questões de segurança não pode exceder 3,5 litros nem ficar abaixo de 1,5 litros.
.	A quantidade de substrato não pode ficar abaixo de uma concentração mínima de 0,5 g/l.
.	Os valores de <i>set-points</i> para concentração de produto correspondem a uma lista de valores de concentração discreta no intervalo [10,50] g/l descrevendo os pontos de operação.

Fonte: o próprio autor

**Figura 5** - Exemplo de funções de pertinência (funções de pertinência para o controle do volume)

Fonte: o próprio autor

O quadro 1 apresenta, como exemplo, oito das dezenove regras do controlador *Fuzzy* da primeira arquitetura, as cinco primeiras atuam nas alterações dos pontos de operação no decorrer na campanha levando em consideração a variação do *set-point* do processo, as três últimas são responsáveis pelo controle do volume do tanque.

**Quadro 1:** Oito das dezenove regras do controlador I

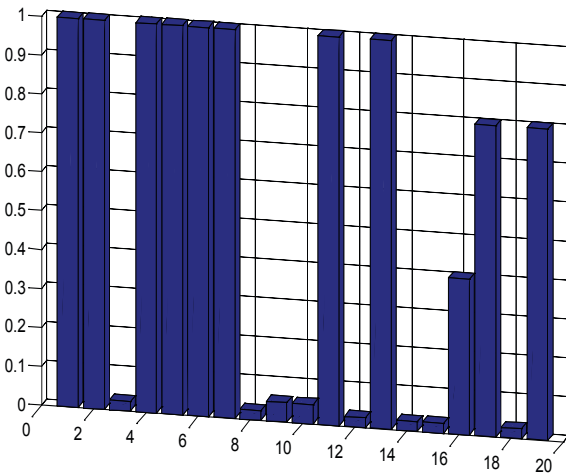
1. SE (Variação SP é MUITO negativa) ENTÃO (Fator Fint AUMENTA bastante) (Fator Fout AUMENTA bastante)
2. SE (Variação SP é negativa) ENTÃO (Fator Fint AUMENTA) (Fator Fout AUMENTA)
3. SE (Variação SP é mínima) ENTÃO (Fator Fint NÃO altera) (Fator Fout NÃO altera)
4. SE (Variação SP é positiva) ENTÃO (Fator Fint DIMINUI) (Fator Fout DIMINUI)
5. SE (Variação SP é MUITO positiva) ENTÃO (Fator Fint DIMINUI bastante) (Fator Fout DIMINUI bastante)
.
.
.
17. SE (Volume é POUCO) ENTÃO (Fator Fint AUMENTA BASTANTE) (Fator Fout DIMINUI BASTANTE)
18. SE (Volume é SUFICIENTE) ENTÃO (Fator Fint NÃO ALTERA) (Fator Fout NÃO ALTERA)
19. SE (Volume é MUITO) ENTÃO (Fator Fint DIMINUI BASTANTE) (Fator Fout AUMENTA BASTANTE)

Observa-se que, esses controladores são sistemas *Fuzzy* ponderados (YANG, et al., 2010), devido a necessidade de melhor sintonia do controlador para diferentes campanhas, no caso desse trabalho. Desse modo suas regras serão ponderadas por diferentes *setups* de conjunto de pesos para cada campanha diferente.

Figura 6 mostra a ponderação de cada regra do controlador *Fuzzy* da primeira arquitetura, ajustadas para a campanha 1, enquanto na figura 7 as regras estão ajustadas para a campanha 2. Para este controlador que trabalha tanto em condições normais de operação quanto em condições de alarme, esse ajuste de ponderação de acordo com a campanha foi essencial para o sucesso do controlador.



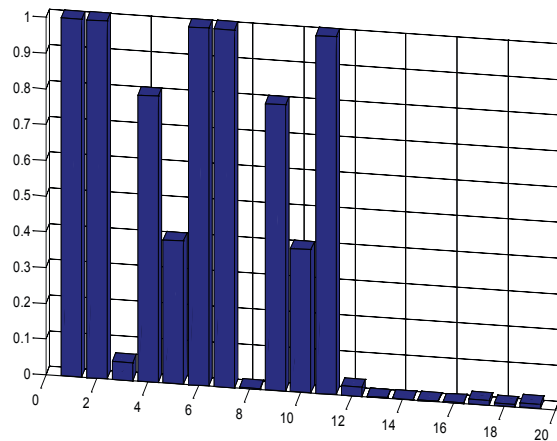
**Figura 6** - Ponderação das Regras do Controlador da Primeira Arquitetura de Controle, Ajustada para a Campanha



Fonte: o próprio autor

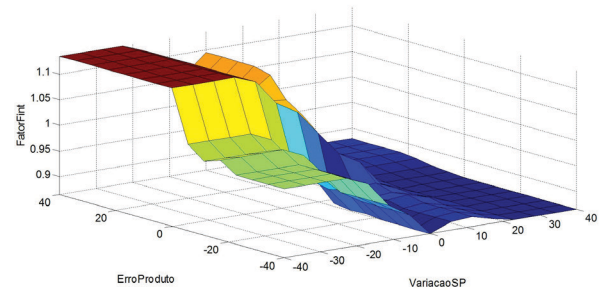
As superfícies *fuzzy* do controlador I (figuras 8 e 9) são mostradas na sequência. É possível observar a não linearidade e ações de controle diferentes nas duas válvulas.

**Figura 7** - Ponderação das Regras do Controlador da Primeira Arquitetura de Controle, Ajustada para a Campanha



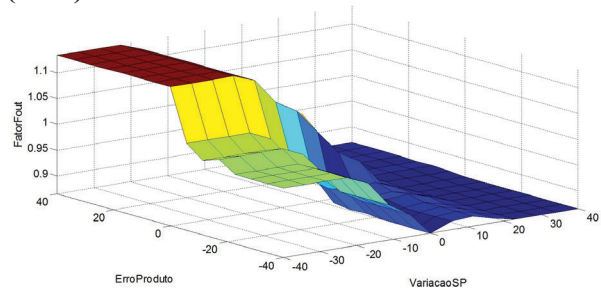
Fonte: o próprio autor

**Figura 8** - Exemplo de Superfície, controlador I (*Fin*)



Fonte: o próprio autor

**Figura 9** - Exemplo de Superfície, controlador I (*Fout*)

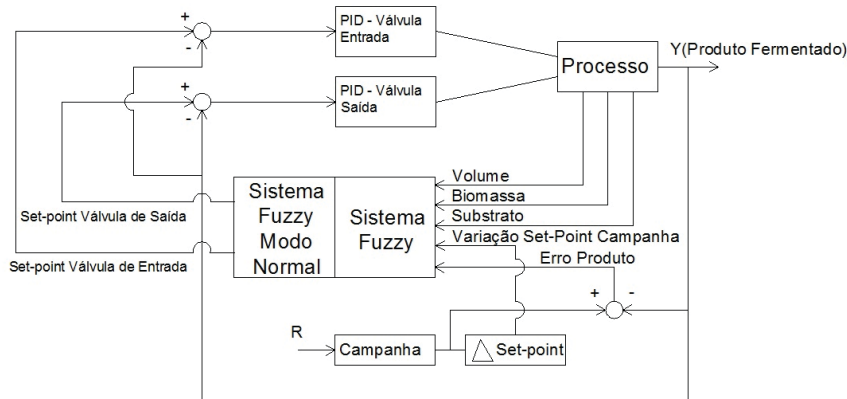


Fonte: o próprio autor

A segunda arquitetura de controle supervisório segue o mesmo princípio da primeira, no entanto utiliza-se dois sistemas Fuzzy, como mostrado na figura 10.

A ideia desta arquitetura é dividir o sistema *Fuzzy* em dois níveis de atuação, o primeiro nível é representado pelo bloco de controle *Fuzzy* da direita. Este controlador é exatamente o mesmo da primeira arquitetura de controle (figura 3) com as devidas configurações para a campanha 01 e 02.

O controlador *Fuzzy* do primeiro nível atua quando o processo de fermentação alcoólica se encontra em situações de alarmes, relacionados às restrições de operação do processo apresentados na tabela 6.

**Figura 10 - Arquitetura II (dois controladores)**

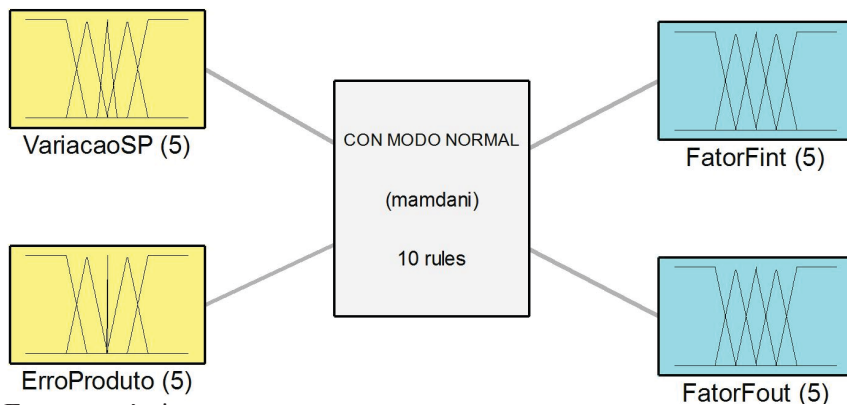
**Fonte:** o próprio autor

O segundo nível de atuação do sistema *Fuzzy* é simbolizado pelo bloco de controle da esquerda, suas características de projeto serão expostas de maneira subsequente.

O segundo nível de supervisão entra em ação quando o processo não apresenta situações de alarmes nas concentrações de substrato, biomassa e no volume do tanque de fermentação.

A transição do primeiro nível de atuação do sistema *Fuzzy* para o segundo nível é feita através da lógica clássica se/então.

O controlador *Fuzzy* do segundo nível é exposto na figura 11, note-se que o sistema é do tipo 2x2 e mantém as duas primeiras entradas e as mesmas saídas, do controlador da primeira arquitetura de controle. Estas variáveis também continuam com as mesmas funções de pertinência. Assim, o que diferencia este controlador são as regras e suas ponderações, além de desconsiderar o volume do tanque e as concentrações de substrato e biomassa.

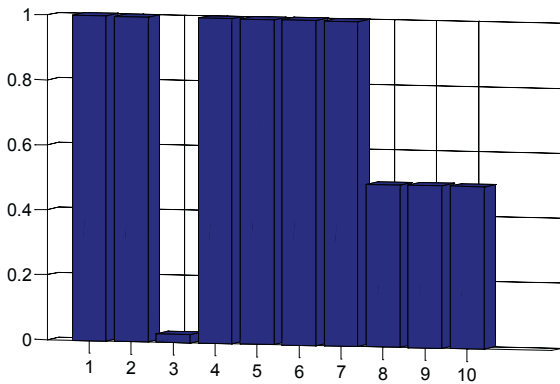
**Figura 11 - Estrutura do controlador II (2x2)**

**Fonte:** o próprio autor

Figura 12 mostra a ponderação das dez regras do controlador II. Este controlador opera apenas em

condições normais a ponderação das regras manteve-se robusta nas duas campanhas de fermentação.

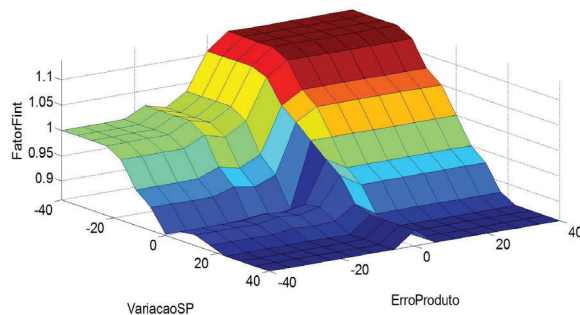
**Figura 12** - Ponderação das Regras do Controlador 02 da Segunda Arquitetura de Controle Ajustada para as Campanhas 01 e 02



Fonte: o próprio autor

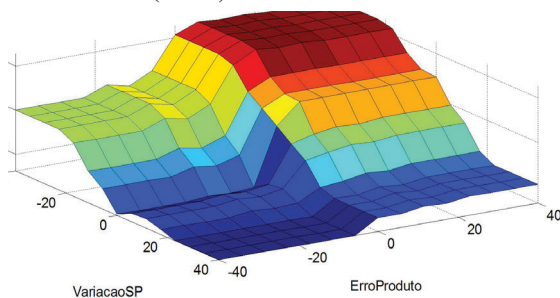
Exemplo de umas das superfícies de controle do controlador II. Figuras 13 e 14.

**Figura 13** - Exemplo de superfície de controle, controlador II (*Fin*)



Fonte: o próprio autor

**Figura 14:** Exemplo de superfície de controle, controlador II (*Fout*)



Fonte: o próprio autor

## Resultados de simulação

Para sugerir a robustez do sistema proposto; o mesmo foi aplicado em duas campanhas de fermentação diferentes, e comparadas com o controle clássico PID. Para quantificar os resultados; foram avaliados quatro fatores de desempenho, o erro acumulado das concentrações de produto, substrato, biomassa e a somatória das ultrapassagens dos valores limitados para o volume.

Para simplificação dos termos, os controladores serão chamados de forma resumida *Fuzzy-PID*. A comparação dos resultados foi utilizada como referência à somatória do erro (ITAE) na concentração do produto, substrato e biomassa, além da somatória das ultrapassagens dos valores determinados como limite para o volume, essa referência foi denominada como Erro Total.

As tabelas 7, 8, 9 e 10 mostram os resultados obtidos para as campanhas 01 e 02, nas duas arquiteturas de controle, respectivamente para as concentrações do produto, substrato e biomassa, por último o resultado do volume.

**Tabela 7** - Resultados de Simulação, para a Concentração do Produto Fermentado

Produto (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02
Erro Total P Campanha 01	111,39	98,57	75,72
Erro Total P Campanha 02	235,16	218,94	215,42

Fonte: o próprio autor

Observa-se na tabela 7, que as duas arquiteturas de controle supervisório propostas no trabalho, apresentaram redução no erro acumulado, em relação ao controle PID, e que a arquitetura que apresentou melhor desempenho para variável controlada (Produto), foi à segunda com uma evolução de 32% na campanha 01 e 8,4% na campanha 02.

**Tabela 8** - Resultados de Simulação, para a Concentração do Substrato

Substrato (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02
Erro Total S Campanha 01	<b>10,79</b>	<b>0,29</b>	<b>0,28</b>
Erro Total S Campanha 02	<b>0,41</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fonte: o próprio autor

Na tabela 8, observa-se que, na campanha 01 as arquiteturas 1 e 2 apresentaram, mesmo que simulados, um bom desempenho para a função de proteção do Substrato. Já na campanha 02 as duas arquiteturas conseguiram anular o erro na proteção do Substrato. Na tabela 9 observa-se que a variável Biomassa não apresentou problemas para o controle do processo em nenhuma das arquiteturas.

**Tabela 9** - Resultados de Simulação, para a Concentração de Biomassa

Biomassa (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02
Erro TotalC Campanha 01	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Erro TotalC Campanha 02	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fonte: o próprio autor

A tabela 10 mostra que, a arquitetura 01 teve o melhor resultado para a proteção do volume do tanque, conseguindo anular o erro na campanha 01 e reduzindo 70% na campanha 02.

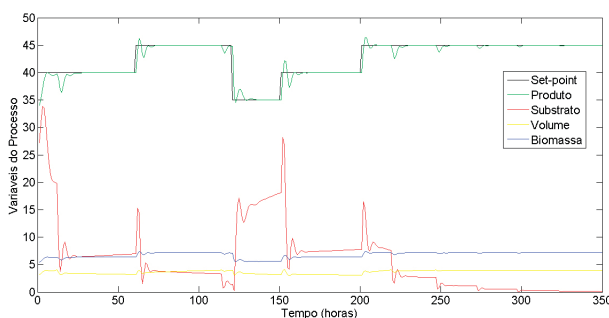
**Tabela 10** Resultados de Simulação para o volume do Tanque

Produto (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02
Erro TotalV Campanha 01	<b>89,01</b>	<b>0</b>	<b>0,06</b>
Erro TotalV Campanha 02	<b>13,96</b>	<b>4,10</b>	<b>4,25</b>

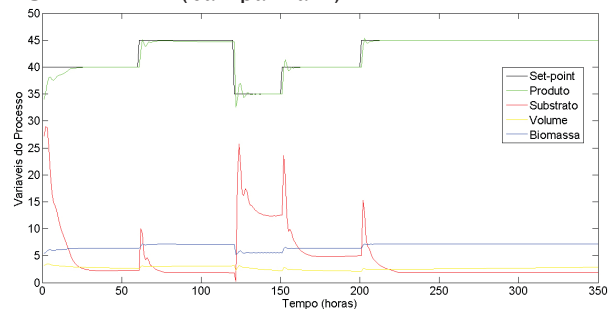
Fonte: o próprio autor

Nota-se que o erro acumulado foi melhor com a utilização dos controles *Fuzzy*-PID.

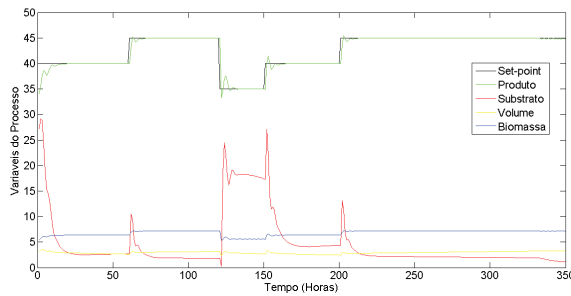
Observa-se a dificuldade de ajuste nas duas arquiteturas citadas, mesmo que o desenvolvimento foi de forma gradativa, o ajuste das funções pertinência, das regras e dos seus pesos foram feitos observando o comportamento dinâmico do sistema. E; verificando desempenho, um processo repetitivo e exaustivo, considerando as dificuldades inerentes desse tipo de processo. As figuras 15, 16, 17 e mostram o comportamento dinâmico de todas as variáveis dos processos.

**Figura 15** - Resposta dinâmica controladores PID (campanha 1)

Fonte: o próprio autor

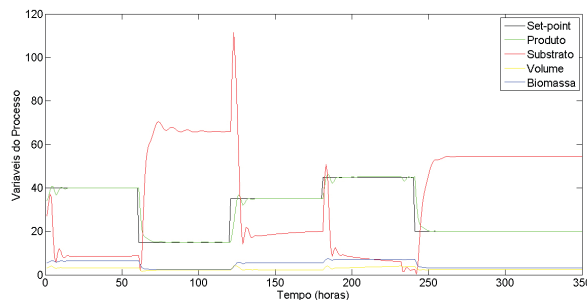
**Figura 16** - Resposta dinâmica controladores FUZZY-PID I (campanha 1)

Fonte: o próprio autor

**Figura 17** - Resposta dinâmica controladores FUZZY-PID II (campanha 1)

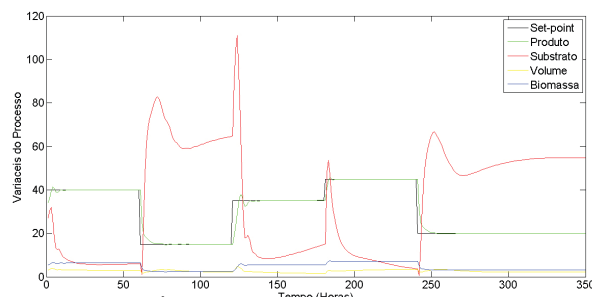
Fonte: o próprio autor

A principal variável controlada (Produto) praticamente sobrepõe os valores de *set-points* das campanhas. As figuras 18, 19, 20 e mostram as dinâmicas dos quatro controladores na campanha 2.

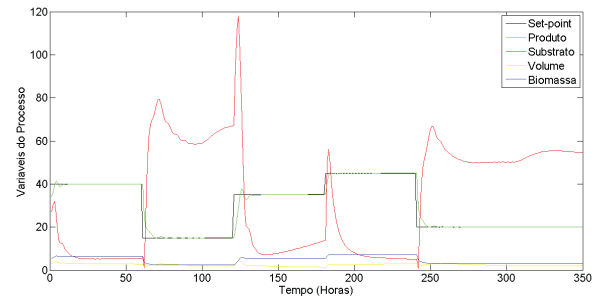
**Figura 18** - Resposta dinâmica controladores PID (campanha)

Fonte: o próprio autor

A tabela 10 mostra que, a arquitetura 01 teve o melhor resultado para a proteção do volume do tanque, conseguindo anular o erro na campanha 01 e reduzindo 70% na campanha 02.

**Figura 19** - Resposta dinâmica controladores FUZZY-PID I (campanha 2)

Fonte: o próprio autor

**Figura 20** - Resposta dinâmica controladores FUZZY-PID II (campanha 2)

Fonte: o próprio autor

## Conclusões

Esse trabalho apresentou arquiteturas de controladores, com funções de um sistema supervisor baseado em lógica *Fuzzy* Ponderada e controle clássico (PID) com duas propostas distintas de arquiteturas, aplicada a um processo de fermentação alcoólica multivariável, o qual tem alto nível de complexidade e consequentemente de controle porque apresenta não linearidade, fase não mínima e tempo de acomodação.

Como foi apresentado nos resultados simulados, através das tabelas com os valores numéricos e das figuras, com comportamento dinâmico do processo, as três arquiteturas de controle supervisor apresentaram um resultado satisfatório em relação ao controle clássico PID.

Outra vantagem do sistema proposto é a possibilidade de disparar alarmes para condições adversas de operação, como realizado na arquitetura 02, podendo trocar de controlador *Fuzzy*, resultando em ganhos consideráveis para o sistema de fermentação alcoólica. Desse modo, podemos sugerir que o sistema supervisor, ainda que inicial, e controlador *Fuzzy* pode ser viável para esse tipo de processo entre outros processos multivariáveis e não lineares.

É necessário ressaltar que, para trabalhos futuros poderão ser acrescentadas novas funcionalidades no sistema supervisor e compará-lo com outras arquiteturas de controle, como: Redes Cognitivas Dinâmicas (DCNs) e Sistema de Inferência Neuro-*Fuzzy* Adaptativo (ANFIS). Também poderá ser

construída uma Interface Homem Máquina (IHM). E tornando-se uma arquitetura de controle eficiente e consistente, a qual servirá como base teórica para aplicações em outros processos.

Fazer uma inspeção quantitativa no nível de correlação (observável nas equações diferenciais do processo) das variáveis.

E, finalmente pode-se implementar as arquiteturas de controle propostas, em especial a 2, para se avaliar desempenho em um processo de fermentação real.

Espera-se ter contribuído, ainda que com resultados simulados, com uma proposta de sistema supervisorio *Fuzzy*-PID para processos industriais.

## Referências

ALISSON M. S. *Sistemas Neuro-Fuzzy Evolutivos: Novos Algoritmos de Aprendizado e Aplicações*. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

ARRIAGA-DE-VALLE, E.; DIECK-ASSAD, G. Modeling and Simulation of a Fuzzy Supervisory Controller for an Industrial Boiler. 2006. Disponível em: <<http://sim.sagepub.com/content/82/12/841.short>>. Acesso em: 3 nov. 2014.

FABRO, J. A. *Uma abordagem neuro-nebulosa de controle preditivo aplicada a processos multi-estágios*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba.

FERNANDES, R. T. *Supervisão de um sistema híbrido eólico/diesel usando lógica Fuzzy*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 4, n. 3, p. 97-115, set/out. 1994.

GOMIDE, F. A. C.; PEDRYCZ, W. *An introduction to fuzzy sets: analysis and design*. 2. ed. Massachusetts: Bradford, 2006.

KASABOV, N. K. *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering*. Massachusetts London, England: The MIT Press Cambridge, 1998.

MAHER, M. *Modélisation élaboration estimation et de commander: application à um bioprocédé*. 1995. Tese - Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, Toulouse.

MENDONÇA, M. *Uma contribuição ao desenvolvimento de sistemas inteligentes utilizando redes cognitivas dinâmicas*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

PASSINO, M. K.; YOURKOVICH, S. *Fuzzy control*. Menlo Park: Addison-Wesley, 1997.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. *Controle e modelagem fuzzy*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004.

WANG, R.; LOU, F.; HUANG, X.; LI, P. New elevator energy feedback control system design based on fuzzy PID controller. *Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, IEEE, Sept. 2012.

YAMAKAWA, E. K. Sistema de controle nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

YESIL, E.; DODURKA, F.; SAKALLI, A.; GUZAY, C., OZTURK, C. Self-Tuning PI Controller via Fuzzy Cognitive Maps. 2013. (AIAI) *Artificial Intelligence Applications and Innovations*, Springer, Ifip, September. 2013.

YANG L.; CAI G.; CHENG T.; YANG G., Design and simulation for ball mill load control based on weighted fuzzy control algorithm, *Computer Application and System Modeling (ICCAISM)*, 2010 International Conference on , vol.14, no., pp.V14-458,V14-461, 22-24 Oct. 2010.

ZADEH, L. A. *An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems*. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1992.

Recebido em 16 Fevereiro, 2015 – Received on February 16, 2015  
Aceito em 19 Agosto, 2015 – Accepted on August 19, 2015