

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

ELTON CARLOS CORRÊA

**SISTEMA SUPERVISÓRIO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY-PID EM
UM PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

ELTON CARLOS CORRÊA

**SISTEMA SUPERVISÓRIO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY-PID EM
UM PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial (Diretoria de Graduação), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Mendonça

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

ELTON CARLOS CORRÊA

**SISTEMA SUPERVISÓRIO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY-PID EM
UM PROCESSO DE FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 19h30min do dia 26 de Fevereiro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Professor Doutor Márcio Mendonça
Professor Orientador
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Professor Mestre Marco Antônio Ferreira Finocchio
Professor Convidado
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Professor Mestre Jancer Frank Zanini Destro
Professor Convidado
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

Professor Doutor Rodrigo Rodrigues Sumar
Professor Convidado
UTFPR/ Campus Cornélio Procópio

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as oportunidades, ao longo desta jornada.

Ao Professor Orientador Márcio Mendonça pelos ensinamentos, apoio e compreensão; aos Professores Rodrigo Rodrigues Sumar e Wagner Fontes Godoy que fizeram parte banca da proposta; e aos Professores Marco Antônio Ferreira Finocchio e Jancer Frank Zanini Destro que gentilmente aceitaram o convite para a banca examinadora.

A toda a minha família pela motivação e apoio incondicional desde meus primeiros passos até essa importante etapa de minha vida, em especial a minha Mãe Rosilene Aparecida Alves Corrêa, meu Pai Antônio Carlos Corrêa, minha irmã Larissa Geovana Corrêa e minha namorada Larissa Polyane Sato.

A todos os amigos de curso e do trabalho pela amizade e convivência.

"Em quase todos os casos, você pode construir o mesmo produto sem lógica fuzzy, mas a difusa é mais rápida e mais barata." (Lotfi A. Zadeh, 1988)

RESUMO

CORRÊA, Elton Carlos. **Sistema Supervisório Utilizando Controle *Fuzzy*-PID Em Um Processo De Fermentação Alcoólica.** 2015. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

O presente trabalho sugere um sistema supervisório para um processo de fermentação alcoólica, utilizando lógica *fuzzy*. Esse processo é simulado no *software MATLAB* através de um modelo do fermentador por equações diferenciais, que descrevem o comportamento dinâmico do processo. O mesmo é composto por um tanque de fermentação, uma válvula de entrada *Fint* e uma válvula de saída *Fout*, essas válvulas são controladas por controladores Proporcionais Integrais e Derivativos (PID). A pesquisa contém três arquiteturas de controle para a utilização da lógica *fuzzy*; a primeira e a segunda arquiteturas fazem a supervisão do processo, passando os *set-points* aos controladores PID, já a terceira arquitetura além de passar os *set-points*, faz o ajuste *on-line* do parâmetro KP. Para validação da pesquisa é utilizado duas campanhas de fermentação distintas, aplicadas às três arquiteturas de controle supervisório, e no processo controlado apenas pelos controladores PID. Os resultados das simulações são apresentados em tabelas, com os desempenhos das arquiteturas, e em figuras, que mostram o comportamento dinâmico do processo; as três arquiteturas apresentaram resultados satisfatórios, em relação ao controle clássico PID, proporcionando uma redução da Integral do Valor Absoluto do Erro, do inglês *Integral of the Absolute Magnitude of the Error* (IAE) para variável controlada, (Produto Fermentado) de até 32% na segunda arquitetura. E finalmente, é feita uma conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Sistema Supervisório. Controle *fuzzy*. Controle Clássico. Processo de Fermentação Alcoólica.

ABSTRACT

CORRÊA, Elton Carlos. **Supervisory System Using Fuzzy-PID Control In A Fermentation Process Alcohol** . 2015. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

This work suggests a supervisory system to a fermentation process using fuzzy logic. This process is simulated in MATLAB software through a fermenter model by differential equations, which describe the dynamic behavior of the process. The same is composed of a fermentation tank, Fint inlet valve and an outlet valve Fout, these valves are controlled by controllers, and Proportional Integral Derivative (PID). The study has three control architectures for use of fuzzy logic; the first and second architectures make the supervision of the process, from the set-points to PID controllers, already the third architecture in addition to passing the set-points, is the online assemble the KP parameter. Search for validation is used two different fermentation campaigns, applied to the three architectures of supervisory control, and process controlled by PID controllers only. The simulation results are presented in tables, with the performances of architectures, and figures, which show the dynamic behavior of the process; the three architectures showed satisfactory results with respect to classic PID control, leading to a reduction of the integral of the absolute value error (IAE) for the controlled variable (fermented product) up to 32% in the second architecture. And finally, is made a conclusion and suggestions for future work.

Keywords: Supervisory System. Fuzzy control. Classic Controller. Alcoholic Fermentation Process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funções de Pertinência da Variável Linguística ALTURA.....	17
Figura 2 – Funções de Pertinência Disponíveis no <i>Fuzzy Logic Toolbox do Software MATLAB</i>	18
Figura 3 – Diagrama de Bloco de Sistemas <i>Fuzzy</i>	19
Figura 4 - <i>Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox</i>	20
Figura 5 – Processo de Fermentação Alcoólica	24
Figura 6 - Comportamento Dinâmico das Variáveis de Estado do Processo de Fermentação Alcoólica.....	25
Figura 7 – Arquitetura de Controle Supervisório com um Sistema <i>Fuzzy</i>	28
Figura 8 – Desenho do Controlador <i>Fuzzy</i>	29
Figura 9 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Variação do Set-point ..	31
Figura 10 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Erro do Produto	31
Figura 11 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Concentração de	32
Figura 12 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Concentração de Biomassa.....	32
Figura 13 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Volume do Tanque	33
Figura 14 – Funções de Pertinência: da Válvula de Entrada <i>Fint</i>	33
Figura 15 – Funções de Pertinência: da Válvula de Saída <i>Fout</i>	34
Figura 16 – Ponderação das Regras do Controlador da Primeira Arquitetura de Controle, Ajustada para a Campanha 01	35
Figura 17 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Variação SP x Erro Produto x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	36
Figura 18 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Variação SP x Erro Produto x Válvula de Saída <i>Fout</i>	36
Figura 19 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Biomassa x Substrato x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	37
Figura 20 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Volume x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	38
Figura 21 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Volume x Válvula de Saída <i>Fout</i>	38
Figura 22 – Ponderação das Regras do Controlador da Primeira Arquitetura de Controle Ajustada para a Campanha 02	39
Figura 23 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Variação SP x Erro Produto x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	40
Figura 24 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Variação SP x Erro Produto x Válvula de Saída <i>Fout</i>	40
Figura 25 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Substrato x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	41
Figura 26 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Biomassa x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	41
Figura 27 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Volume x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	42
Figura 28 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Volume x Válvula de Saída <i>Fout</i>	42
Figura 29 – Arquitetura de Controle Supervisório com Dois Sistemas <i>Fuzzy</i>	43
Figura 30 – Controlador <i>Fuzzy</i> para Condições Normais do Processo de Fermentação Alcoólica.....	44
Figura 31 – Ponderação das Regras do Controlador 02 da Segunda Arquitetura de Controle Ajustada para as Campanhas 01 e 02.....	45

Figura 32 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Variação SP x Erro Produto x Válvula de Entrada <i>Fint</i>	45
Figura 33 – Superfície <i>Fuzzy</i> : Variação SP x Erro Produto x Válvula de Saída <i>Fout</i>	46
Figura 34 – Arquitetura de Controle Supervisório com Três Sistemas <i>Fuzzy</i> , com Ajuste do Parâmetro KP dos Controladores PID, e Passando <i>Set-points</i>	47
Figura 35 – Controlador <i>Fuzzy</i> , Ajuste do Parâmetro KP.....	48
Figura 36 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Erro do Produto	48
Figura 37 – Funções de Pertinência da Variável de Saída: Ajuste de KP	49
Figura 38 – Ponderação das Regras do Controlador 03 da Terceira Arquitetura de Controle Ajustada para as Campanhas 01 e 02.....	50
Figura 39 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Controle PID.....	52
Figura 40 - Ponto de Interação entre as Variáveis: Substrato, Biomassa e Volume .	53
Figura 41 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Arquitetura 01	53
Figura 42 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Arquitetura 02.....	54
Figura 43 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Arquitetura 03.....	55
Figura 44 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Controle PID.....	55
Figura 45 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Arquitetura 01	56
Figura 46 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Arquitetura 02.....	57
Figura 47 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Arquitetura 03.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Campanha 01	27
Tabela 2 – Campanha 02	27
Tabela 3 – Constantes	27
Tabela 4 – Variáveis do Processo de Fermentação Alcoólica	27
Tabela 5 – Relações de Controle do Processo de Fermentação Alcoólica	29
Tabela 6 – Restrições de Operação do Processo de Fermentação Alcoólica	30
Tabela 7 – Resultados de Simulação, para a Concentração do Produto Fermentado	51
Tabela 8 – Resultados de Simulação, para a Concentração do Substrato	51
Tabela 9 – Resultados de Simulação, para a Concentração de Biomassa	51
Tabela 10 – Resultados de Simulação, para o Volume do Tanque	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 METODOLOGIA	12
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2 SISTEMAS FUZZY	14
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.2 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS FUZZY.....	16
2.2.1 Conceitos Iniciais.....	16
2.2.2 Diagrama de Bloco de Sistemas Fuzzy	18
2.2.2.1 Interface de fuzzificação.....	19
2.2.2.2 Base de regras	20
2.2.2.3 Mecanismo de inferência.....	20
2.2.2.4 Interface de defuzzificação.....	21
2.3 QUANDO UTILIZAR A LÓGICA FUZZY.....	22
2.4 QUANDO NÃO UTILIZAR A LÓGICA FUZZY	22
3 DESENVOLVIMENTO.....	24
3.1 INTRODUÇÃO.....	24
3.1.1 Processo de Fermentação Alcoólica.....	24
3.2 SISTEMA SUPERVISÓRIO UTILIZANDO CONTROLE FUZZY-PID	26
3.2.1 Primeira Arquitetura de Controle.....	28
3.2.1.1 Campanha 01	34
3.2.1.2 Campanha 02.....	38
3.2.2 Segunda Arquitetura de Controle.....	42
3.2.3 Terceira Arquitetura de Controle.....	46
3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	50
3.3.1 Resultados na Campanha 01	52
3.3.2 Resultados na Campanha 02	55
4 CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os Seres Humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações que são imprecisas e/ou aproximadas. A estratégia adotada é também de natureza imprecisa, e, geralmente possível de ser expressa em termos linguísticos. Entretanto, informações também podem ser adquiridas a partir dos dados de operação e/ou funcionamento de um sistema. Este tipo de manipulação pode ser realizado através de técnicas de identificação e modelagem (PASSINO; YOURKOVICH, 1997).

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema supervisório com funções de proteção para um processo de fermentação alcoólica, utilizando lógica *fuzzy*. Esta arquitetura de controle supervisório é proposta na literatura de Passino e Yourkovich (1997).

No processo em estudo, controle multi-variável, 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 provenientes do trabalho de Mendonça (2011).

A pesquisa desenvolve um sistema supervisório para o processo de fermentação alcoólica, com três 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; já na terceira arquitetura tem o mesmo princípio da segunda, porém conta com um terceiro controlador *Fuzzy* ajustando o parâmetro KP dos controladores PID.

Neste contexto, esse trabalho apresenta um sistema de controle com multivariáveis baseado em lógica *Fuzzy*. E compara os resultados com o processo de fermentação alcoólica sendo controlado apenas por controladores clássicos.

1.2 OBJETIVOS

Desenvolver uma ferramenta computacional fundamentada em lógica *Fuzzy* para executar funcionalidades no sistema supervisorio, como: passar *set-points* para os controladores PID; desenvolver funções de proteção no processo de fermentação alcoólica; e ajustar o parâmetro KP, proporcionando um melhor desempenho no controle do processo de fermentação alcoólica.

1.3 METODOLOGIA

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. E para a construção dos sistemas *Fuzzy* é aplicado o *Fuzzy logic toolbox (MATLAB)*.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do capítulo introdutório, este trabalho de conclusão de curso conta com outros três capítulos. Os parágrafos a seguir apresentam resumidamente o teor de cada um deles.

No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica de trabalhos que utilizam lógica *Fuzzy* para supervisão de processos, também é apresentado os fundamentos de sistemas *Fuzzy*, e suas principais vantagens e desvantagens.

No terceiro capítulo é desenvolvido o sistema supervisorio para o processo de fermentação alcoólica, e, em seguida compara os resultados obtidos com o controle clássico PID.

O quarto capítulo faz à conclusão do trabalho, discutindo os resultados obtidos e a relevância da pesquisa, finalizando com sugestões para trabalhos futuros.

2 SISTEMAS FUZZY

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas *Fuzzy* têm aplicações em diferentes áreas de conhecimentos. Por exemplo: navegação robótica, sistemas supervisórios, qualidade de energia, controle de fluxo, modelagem de jogos entre outros. (PASSINO; YOURKOVICH, 1997). Este trabalho utiliza lógica *Fuzzy* para sistema supervisório, desta maneira é apresentado abaixo alguns trabalhos com este enfoque.

No trabalho de Fernandes (2005) é sugerido 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. (FERNANDES, 2005).

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, bem como melhorar o desempenho do equipamento, resultando em uma maior correção dos reativos.

O trabalho de Fernandes Junior et al. (2005) consiste na sintonia de parâmetros de controladores PID, para controlar o nível de um sistema de tanques acoplados. Na obtenção dos parâmetros foi utilizado métodos como Sensibilidade Limite e Método da Curva de Reação; o diferencial deste trabalho foi à utilização de sistema *Fuzzy* para alterar os parâmetros dos controladores PID conforme a mudança no ponto de operação do sistema de tanques, resultando em menores *overshoot* e menor tempo de estabilização.

O artigo de Yesil e colaboradores (2011) 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 o suficiente por causa de diferentes propriedades estáticas e

dinâmicas, porém esse trabalho mostrou uma solução bastante 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* supervisor gerando *set-points* para o controle clássico. O sistema supervisor proporcionou uma economia de combustível de 2,5 a 6,5 %, dependendo da carga de vapor.

Segundo Shaw e Simões (2004), variáveis isoladas do processo são controladas por PID, enquanto o controle supervisor é feito por operadores humanos. Existem sistemas supervisórios comerciais, como por exemplo, Eclipse 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 em vez de se utilizar modelos matemáticos complexos, assim torna-se muito eficiente o controle supervisor *Fuzzy* nos pontos de operação dos controladores PID.

No trabalho de Mendonça (MENDONÇA, 2011) foi desenvolvida uma Rede Cognitiva Dinâmica, do inglês *Dynamic Cognitive Networks*, para controle e sistema supervisor do mesmo processo, fermentador alcoólico.

O trabalho Wang e colaboradores (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 que vem do motor a trabalhar no estado gerador à rede elétrica. Esse sistema de controle se faz necessário porque o controle PI convencional não pode funcionar de forma eficiente no controle da variável tempo e objetos não lineares.

2.2 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS FUZZY

2.2.1 Conceitos Iniciais

Um sistema de controle *Fuzzy* representa 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).

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 na construção do sistema supervisor, 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 (MAMDANI; ASSILIAN, 1975).

A lógica *Fuzzy* começa com o conceito de um conjunto *Fuzzy*, (ZADEH, 1992) para entender este princípio é importante conhecer a definição de um conjunto clássico. Um conjunto clássico inclui totalmente um elemento em um determinado grupo ou o exclui totalmente deste grupo. Por exemplo, o conjunto dos números pares são todos os números divisíveis por dois, e exclui-se desse conjunto todos os números que não são divisíveis por dois.

Um conjunto *Fuzzy* é um conjunto sem um limite definido de forma clara (MATLAB, 2009). Para compreender esse conjunto, toma-se como exemplo o conjunto das pessoas altas e das pessoas baixas; classificando pessoas pela estatura através da lógica clássica booleana, classifica-se uma pessoa é alta se ela é maior que 1,8 metros e que é baixa se for inferior a esta altura. A lógica *Fuzzy*, através dos conjuntos *Fuzzy*, tem a capacidade de lidar com esta situação de forma mais coerente.

No mundo real uma pessoa de 1,79 metros não pode ser considerada totalmente baixa, em conjuntos *Fuzzy* um elemento pode pertencer a dois grupos dividindo sua participação em grau de pertinência, por exemplo, o indivíduo de 1,79 metros teria um grau de pertinência no conjunto das pessoas Baixas e Altas. Desta forma enquanto na lógica clássica a verdade corresponde a um, e a não verdade

corresponde ao zero, em lógica *Fuzzy* pode-se ter valores entre zero e um para o grau de pertinência em um determinado conjunto *Fuzzy*.

Em sistemas *Fuzzy* a curva que define como cada ponto no espaço de entrada é mapeado para um valor de pertinência (ou grau de pertinência) entre zero e um, é chamada de função de pertinência. O espaço de entrada é muitas vezes referido como universo de discurso (PASSINO; YOURKOVICH, 1997).

Utilizando o exemplo de classificação de pessoas pela estatura. Na figura 1 são apresentadas as funções de pertinência para a variável linguística altura. Uma variável linguística tem por característica assumir valores dentro de um conjunto de termos linguísticos, Ou seja, palavras ou frases. Assim, ao invés de assumir instâncias numéricas. Uma variável linguística assume instâncias linguísticas. Neste caso a variável linguística altura poderá assumir como valor um dos membros do conjunto {Muito baixa; Baixa; Alta}. Para se atribuir um significado aos termos linguísticos, associa-se cada um destes a um conjunto *Fuzzy* limitado por meio de uma função de pertinência sobre um universo de discurso comum. (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

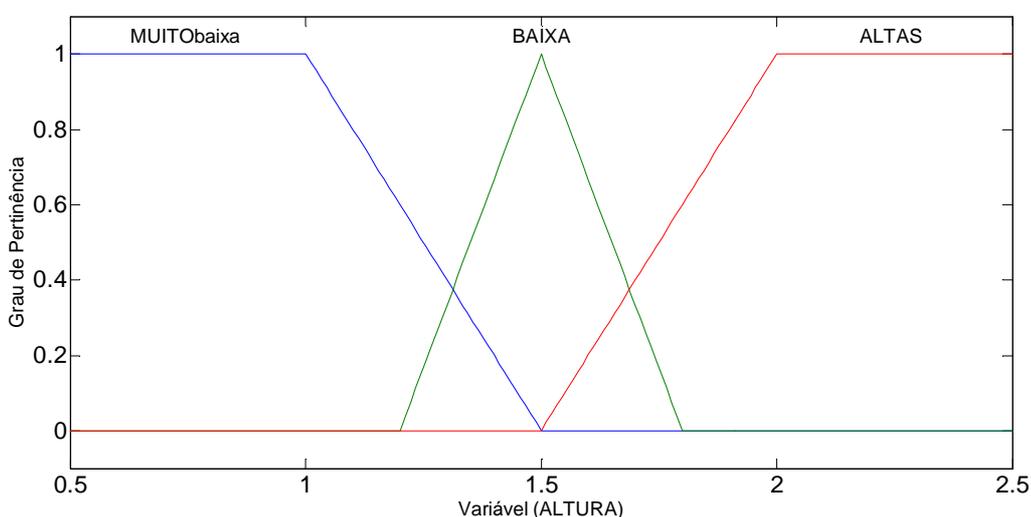


Figura 1 – Funções de Pertinência da Variável Linguística ALTURA
Fonte: Autoria Própria.

As funções de pertinência utilizadas no exemplo acima e no desenvolvimento do sistema supervisor, são do tipo triangular e trapezoidal; sendo triangular a função Baixa, e trapezoidal as funções Muito Baixa e Alta, pois essas são as mais fáceis de aproximar do ponto de referência desejado no universo de

discurso. O *Fuzzy logic toolbox*, do software *MATLAB*, disponibiliza outras funções de pertinência mostradas na figura 2, observa-se que, as duas primeiras são as funções empregadas nesse trabalho.

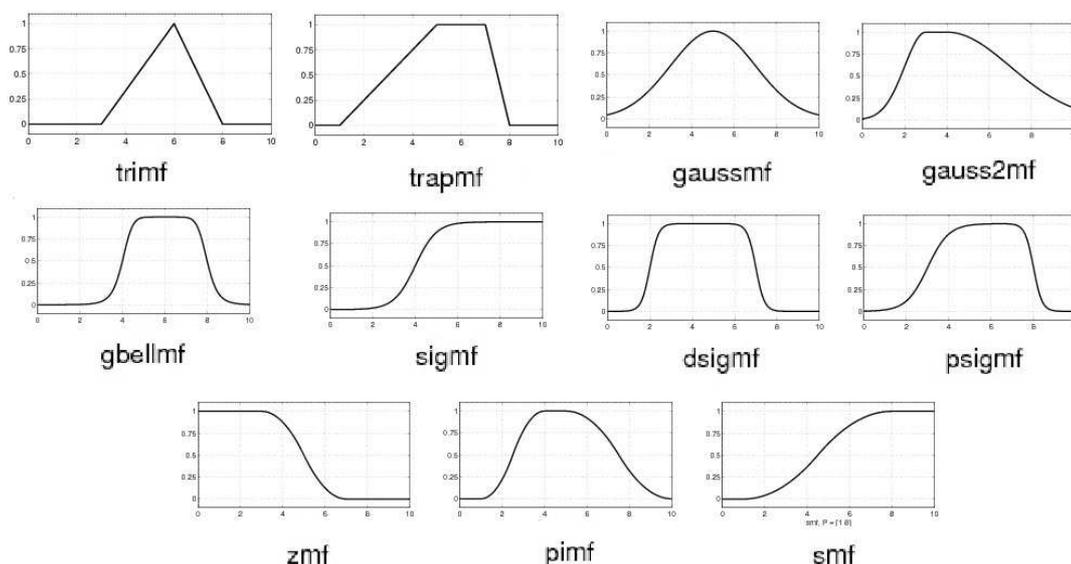


Figura 2 – Funções de Pertinência Disponíveis no *Fuzzy Logic Toolbox* do Software *MATLAB*
Fonte: (MATLAB, 2009).

2.2.2 Diagrama de Bloco de Sistemas *Fuzzy*

Um diagrama de bloco do sistema *Fuzzy* é mostrado na figura 3, esse é composto por quatro elementos: *Interface* de Fuzzificação, Base de Regras, Mecanismos de Inferência e *Interface* de Defuzzificação. Em seguida é comentado cada um deles. Existem variações do *Fuzzy* clássico, como por exemplo, o sistema *Fuzzy Takagi-Sugeno*. Entretanto, esse trabalho foi desenvolvido no sistema Mandani ponderado.

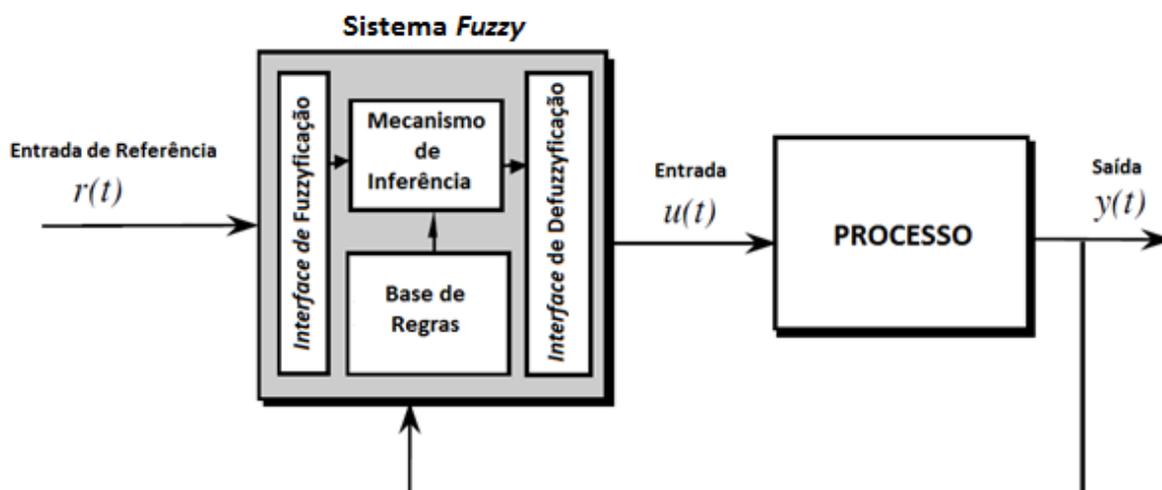


Figura 3 – Diagrama de Bloco de Sistemas Fuzzy
 Fonte: Adaptado de PASSINO e YOURKOVICH (1997).

2.2.2.1 Interface de fuzzificação

A *Interface de Fuzzificação* recebe os valores das variáveis de entrada, condicionando para um universo de discurso normalizado e fuzzifica os valores, transformando números em conjuntos Fuzzy, de modo que possam se tornar instancias de variáveis linguísticas (SHAW; SIMÕES, 2004).

A figura 1 mostra um conjunto de três funções de pertinência, com os rótulos linguísticos: Muito Baixa, Baixa e Alta, cujo universo de discurso normalizado é de 0,5 a 2,5 metros. Para fuzzificar um determinado valor de entrada, deve-se traçar uma linha vertical sobre o valor real a ser fuzzificado.

Por exemplo, considerando-se o valor discreto de 1,79 metros, observa-se na figura 4 (elaborada por meio do *Fuzzy Logic Toolbox*), que essa linha cruzar apenas as funções Baixa e Alta, logo o valor no conjunto Fuzzy para a função Muito Baixa será nulo. Desta forma, fazendo uma aproximação do valor da área de pertinência mostrada na figura 4, o vetor Fuzzy equivalente para o número real 1,79 seria $\{0; 0,1; 0,9\} \rightarrow \{\text{Muito Baixa}; \text{Baixa}; \text{Alta}\}$. Vale resaltar que esse é um exemplo didático, e que um sistema de controle Fuzzy calcula exatamente o valor de pertinência para o vetor Fuzzy.

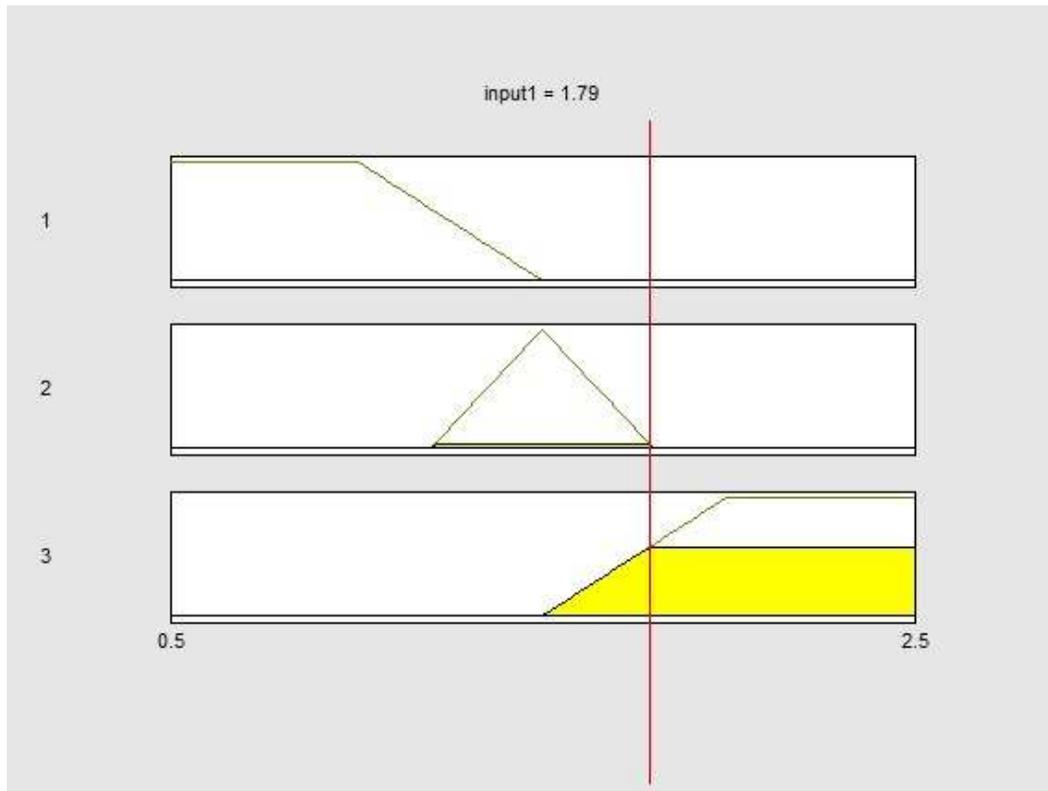


Figura 4 - Rule Viewer Fuzzy Logic Toolbox
Fonte: Autoria Própria.

2.2.2.2 Base de regras

Base de regras consiste em um conjunto de regras do tipo: se então, formuladas com base no conhecimento do especialista do processo; e, é a base de regras que caracteriza a estratégia de controle (PASSINO; YOURKOVICH, 1997). Veja abaixo um exemplo de regras para um controle de temperatura.

- **Se** (TEMPERATURA é FRIA) **então** (LIGA no QUENTE).
- **Se** (TEMPERATURA é BOA) **então** (DESLIGA).
- **Se** (TEMPERATURA é QUENTE) **então** (LIGA no FRIO).

2.2.2.3 Mecanismo de inferência

Mecanismo de inferência computa os dados de entrada *Fuzzy* com as regras, para inferir uma ação de controle *Fuzzy*. Em outras palavras inferência *Fuzzy* é um método que interpreta os valores no vetor de entrada, e com base em um

conjunto de regras, atribui valores ao vetor de saída (PASSINO; YOURKOVICH, 1997).

2.2.2.4 Interface de defuzzificação

A *Interface* de defuzzificação converte os resultados da inferência *Fuzzy* para ações de controle não *Fuzzy*. O objetivo é obter-se um único valor discreto utilizável numa ação de controle concreta no mundo real, segundo a literatura de Shaw e Simões (2004), os três métodos de Defuzzificação mais utilizados são: Centro da Área, Centro do Máximo e Média do Máximo. Abaixo é feita uma breve introdução sobre esses três métodos.

O Centro da Área é referenciado no *software MATLAB* como Centróide, esse método é empregado nos três sistemas *Fuzzy* desse trabalho, ele calcula o centro da área composta que representa o termo de saída *Fuzzy*, dividindo essa área em duas partes iguais; o valor no eixo x que representa o centro da área é o número discreto obtido (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006).

O método Centro do Máximo também é um dos métodos de Defuzzificação mais utilizado, os picos das funções de pertinência do universo de discurso, da variável de saída são usados (áreas das funções de pertinência são desconsideradas), o vetor de saída *Fuzzy* representam pesos posicionados no pico da função correspondente. Assim, o valor discreto de saída e o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados; o resultado desse ponto é a média ponderada dos máximos com seus correspondentes pesos (SHAW; SIMÕES, 2004).

O valor discreto de controle é obtido no método Média do Máximo, através da média dos pontos máximos, de cada função de pertinência do universo de discurso de saída, desconsiderando os pesos do vetor *Fuzzy* de saída (SHAW; SIMÕES, 2004).

Um importante conceito na Defuzzificação é a continuidade, segundo Shaw e Simões (2004) um método é contínuo se uma mudança infinitamente pequena em uma variável de entrada não causa uma brusca mudança em nenhuma variável de saída; os métodos Centro da Área e Centro do Máximo são contínuos, e o método Média do Máximo é descontínuo.

2.3 QUANDO UTILIZAR A LÓGICA FUZZY

O software *MATLAB* (R2009a versão 7.8.0) em seu tutorial de sistemas *Fuzzy* faz uma lista com vantagens da lógica *Fuzzy*, e recomendações de quando se deve utilizar.

- A lógica *Fuzzy* é conceitualmente fácil de entender;
- A lógica *Fuzzy* é uma abordagem mais intuitiva, sem a complexidade de longo alcance;
- A lógica *Fuzzy* é flexível;
- A lógica *Fuzzy* é tolerante com dados imprecisos;
- A lógica *Fuzzy* pode modelar funções não lineares de complexidade arbitrária.
- Pode-se criar um sistema *Fuzzy* para combinar com qualquer conjunto de dados de entrada e saída. Através de técnicas adaptativas como *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems* (ANFIS);
- A lógica *Fuzzy* pode ser construída em cima da experiência de especialistas;
- Em contraste direto com redes neurais, que levam dados de treinamento e gerar modelos opacos, impenetráveis, a lógica *Fuzzy* permite contar com a experiência de pessoas que já entendem o sistema;
- A lógica *Fuzzy* pode ser usada em conjunto com técnicas de controle convencionais;
- A linguagem natural, que é usado por pessoas comuns em uma base diária, tem sido formada por milhares de anos de história humana a ser conveniente e eficiente. As frases escritas na linguagem comum representar um triunfo da comunicação eficiente, e são empregadas nos sistemas *Fuzzy* através da base de regras.

2.4 QUANDO NÃO UTILIZAR A LÓGICA FUZZY

A lógica *Fuzzy* não é eficiente para tudo. Se uma solução mais simples já existe, esta é recomendada. No entanto, após familiarizar-se com a lógica *Fuzzy*, ela se torna ferramenta muito poderosa para lidar com rapidez e eficiência com imprecisão e não linearidade (MATLAB, 2009). Outra desvantagem não só da Lógica

Fuzzy, mas sistemas computacionais inteligentes, é não garantir que o resultado é ótimo (MENDONÇA, 20011).

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve as principais características do processo de fermentação alcoólica utilizado neste trabalho, bem como a elaboração do sistema supervisorio utilizando lógica *Fuzzy*. E apresenta os resultados de simulação do processo, para validar o sistema proposto comparando com o controle PID.

3.1.1 Processo de Fermentação Alcoólica

O processo de fermentação alcoólica utilizado neste trabalho de conclusão de curso foi estudado inicialmente por Maher (1995), observar-se na figura 5, que esse modelo 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 5 também apresenta as válvulas *Fin* e *Fout* a primeira é responsável pelo fluxo de substrato inserido no tanque e a segunda pelo fluxo de produto fermentado retirado da cuba.

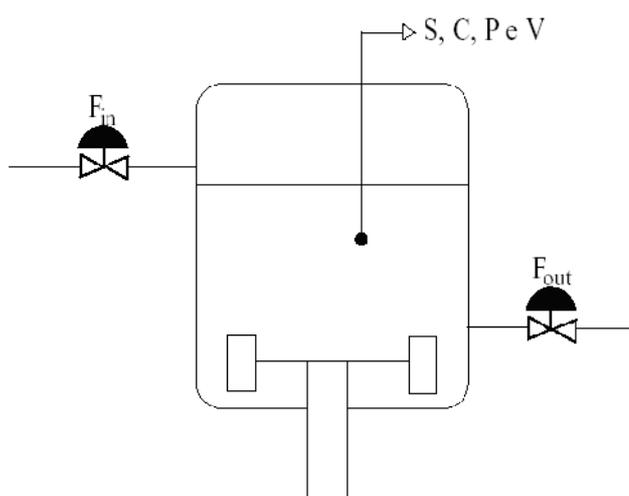


Figura 5 – Processo de Fermentação Alcoólica
Fonte: (Maher, 1995).

Este processo apresenta interação entre suas variáveis (mostrado no resultado de simulação do processo) e não linearidade (não linearidade pode ser vista na equação diferencial do substrato mostrado a seguir). A análise da curva de resposta ao degrau, na figura 6, mostra um comportamento de fase não mínima e tempo de acomodação (FABRO, 2003). Além disso, por medida de segurança, o volume do reservatório não deve exceder 3,5 l nem cair 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.

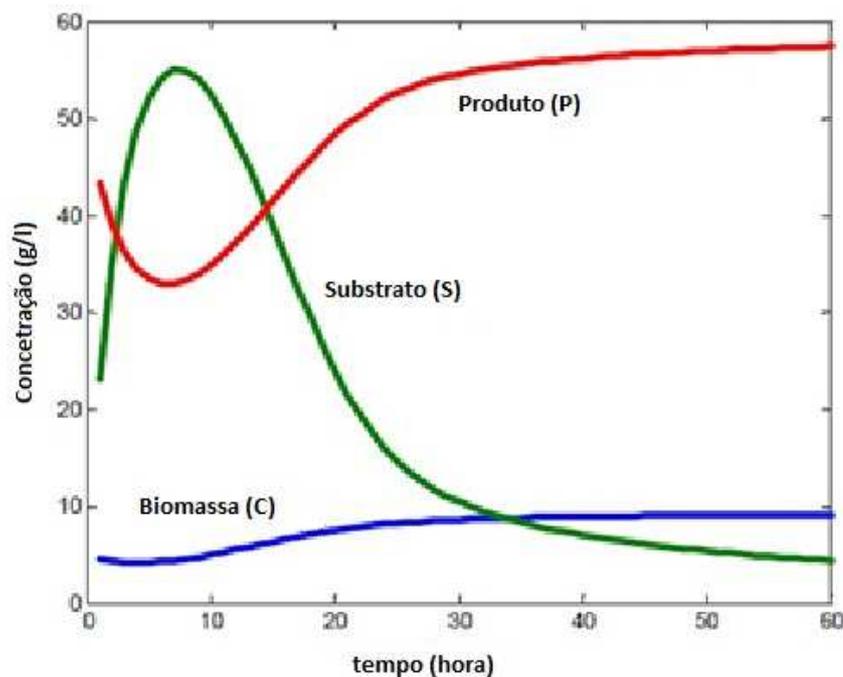


Figura 6 - Comportamento Dinâmico das Variáveis de Estado do Processo de Fermentação Alcoólica

Fonte: (Maher, 1995).

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

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

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

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

$$\frac{dV}{dt} = Fin - Fout \quad (4)$$

Onde:

S_a → concentração de substrato da alimentação;

$Y_{c/s}$ → constante de conversão da biomassa;

$Y_{p/s}$ → constante de conversão do produto;

μ → 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:

μ_0 → máxima taxa de crescimento;

K_s → constante de *Michaelis-Menton*;

P_m → coeficiente de inibição do produto durante a reação.

3.2 SISTEMA SUPERVISÓRIO UTILIZANDO CONTROLE *FUZZY*-PID

Como já citado anteriormente esta pesquisa desenvolve três 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 três arquiteturas de controle são testadas nessas duas campanhas, mostradas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Campanha 01

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

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 2 – Campanha 02

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

Fonte: Autoria Própria.

Nos dois *star-tap* mostrados acima os valores das constantes utilizadas para a resolução das equações diferenciais são as mesmas, e podem ser vistas na tabela 3, já os valores iniciais das variáveis S, C, P e V são mostrados na tabela 4.

Tabela 3 – Constantes

CONSTANTES	
S_a	100 g/l
P_m	100
K_s	10
μ_0	0,31
$Y_{p/s}$	0,07
$Y_{c/s}$	0,44

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Variáveis do Processo de Fermentação Alcoólica

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

Fonte: Autoria Própria.

3.2.1 Primeira Arquitetura de Controle

Nesta arquitetura de controle supervisorio 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 7 observa-se o princípio de funcionamento desta arquitetura de controle supervisorio, onde o processo é controlado pelos controladores PID e o sistema *Fuzzy* atua em nível supervisorio passando os *set-points* aos controladores clássicos.

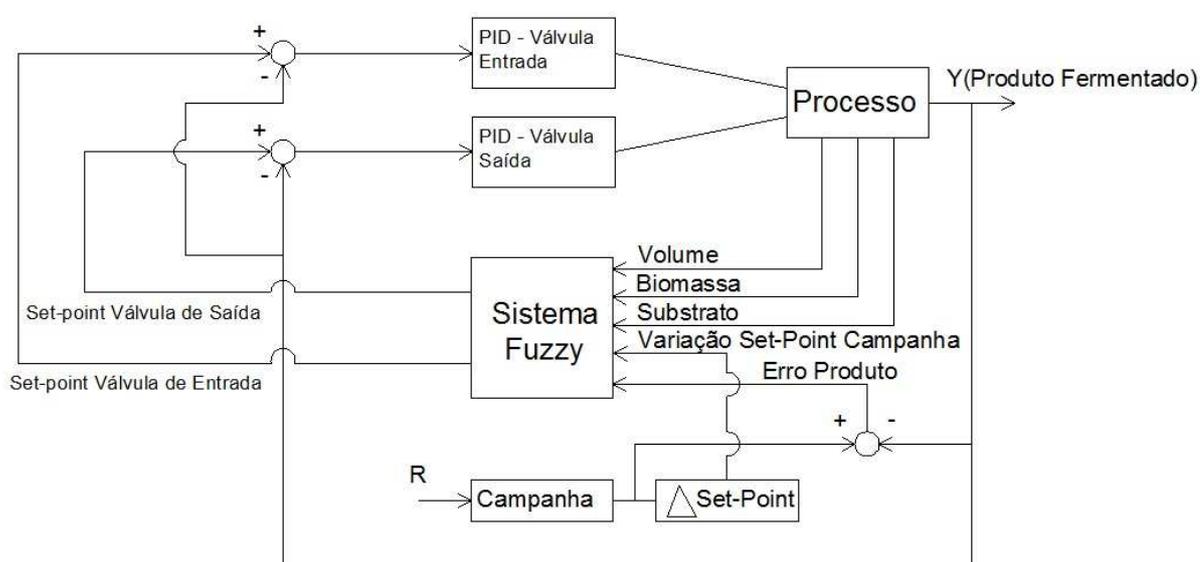


Figura 7 – Arquitetura de Controle Supervisorio com um Sistema Fuzzy
Fonte: Autoria Própria.

Na figura 8 é apresentado o controlador *Fuzzy* da primeira arquitetura de controle supervisorio, nota-se que o sistema *Fuzzy* é do tipo 5x2 com cinco entradas e duas saídas. Para a entrada foi levado em consideração a 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 controla os valores de *set-points* efetivamente aplicados aos controladores PID, que por sua vez controlam a abertura e fechamento das válvulas *Fint* e *Fout*.

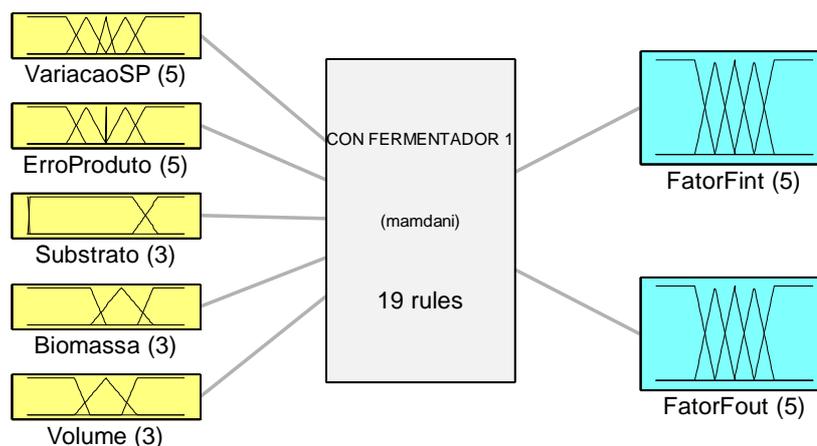


Figura 8 – Desenho do Controlador Fuzzy

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 – Relações de Controle do Processo de Fermentação Alcoólica

RELAÇÕES DE CONTROLE DO PROCESSO
A concentração de produto no reator, variável controlada do processo, é afetada por variações no <i>set-point</i> do PID que controla a válvula de entrada.
A concentração de produto no reator variável controlada do processo é afetada por variações no <i>set-point</i> do PID que controla a válvula de saída.
O valor do <i>set-point</i> desejado do processo, que caracteriza o ponto de operação da reação, determina o valor de <i>set-point</i> efetivamente aplicado ao PID, que controla a válvula de entrada.
O valor do <i>set-point</i> desejado do processo, que caracteriza o ponto de operação da reação, determina o valor de <i>set-point</i> efetivamente aplicado ao PID, que controla a válvula de saída.
A variação de <i>set-point</i> desejado (mudança de ponto de operação) afeta o valor do <i>set-point</i> aplicado à válvula de entrada.
A variação de <i>set-point</i> desejado (mudança de ponto de operação) afeta o valor do <i>set-point</i> aplicado à válvula de saída.
O volume do tanque é afetado pelo valor do <i>set-point</i> da válvula <i>Fin</i> e <i>Fout</i> .
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: (MENDONÇA, 2011)

Tabela 6 – Restrições de Operação do Processo de Fermentação Alcoólica

RESTRIÇÕES 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 cair abaixo de 1,5 litros.
A quantidade de substrato não pode cair abaixo de uma concentração mínima de 0,5 g/l.
Os valores de <i>set-point</i> para concentração de produto corresponde a uma lista de valores de concentração discretizados no intervalo [10,50] g/l descrevendo os pontos de operação.

Fonte: (MENDONÇA, 2011).

No projeto e execução deste sistema, trabalhos como de Fabro (2003) e Mendonça (2011) servirão como base de conhecimento tanto para o processo de fermentação alcoólica, como para sistemas inteligentes. De tal modo a experiência do especialista contida na base de regra do controlador *Fuzzy* leva em consideração a relação de causa e consequência expressas na tabela 5. E as restrições de operação do processo de fermentação alcoólica são mostradas na tabela 6.

Para a construção das funções de pertinência das variáveis linguísticas de entrada (cinco variáveis) e saída (Fator *Fint* e *Fout*), observou-se o comportamento destas variáveis com o processo de fermentação alcoólica sendo controlado apenas pelos controladores PID.

Nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13 é apresentado respectivamente às funções de pertinência das variáveis de entrada: variação do *set-point*, erro do produto, concentração de substrato, concentração de biomassa e o volume do tanque.

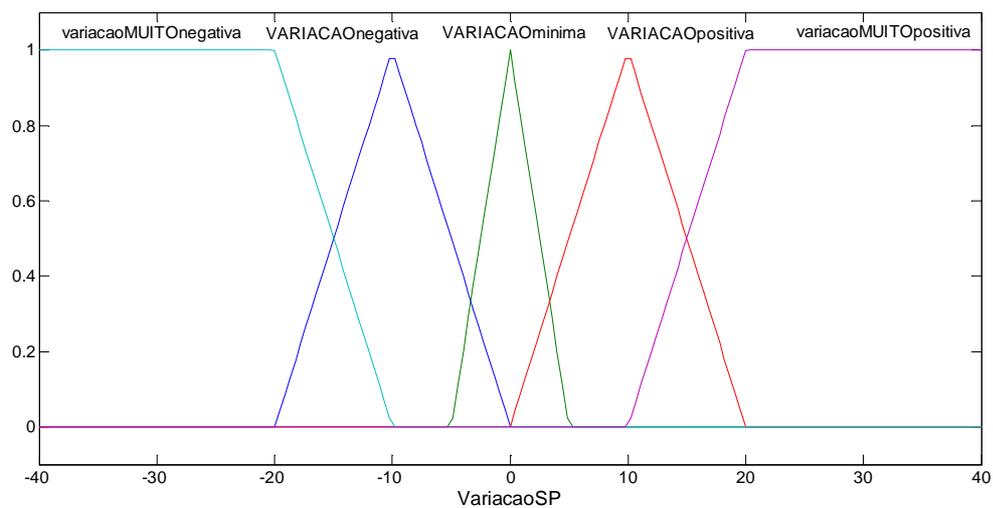


Figura 9 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Variação do Set-point
Fonte: Autoria Própria.

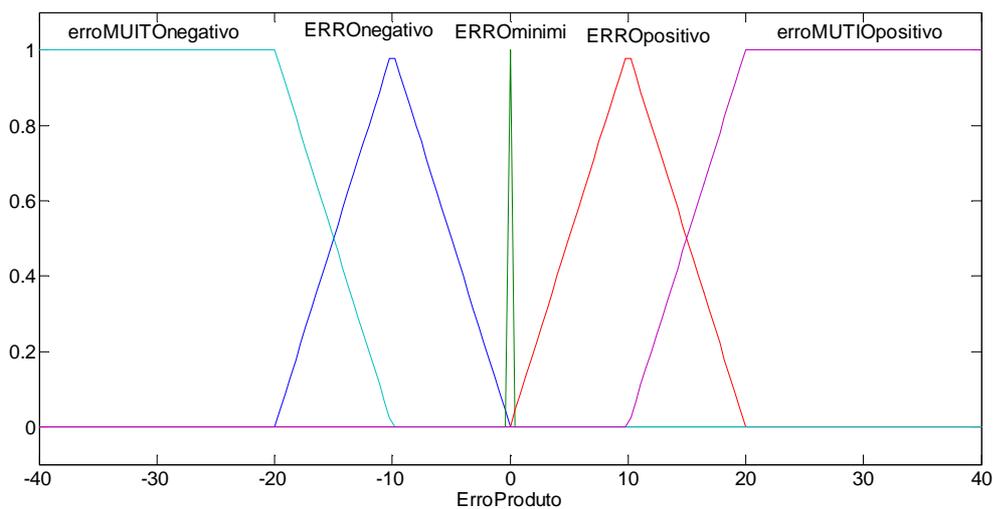


Figura 10 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Erro do Produto
Fonte: Autoria Própria.

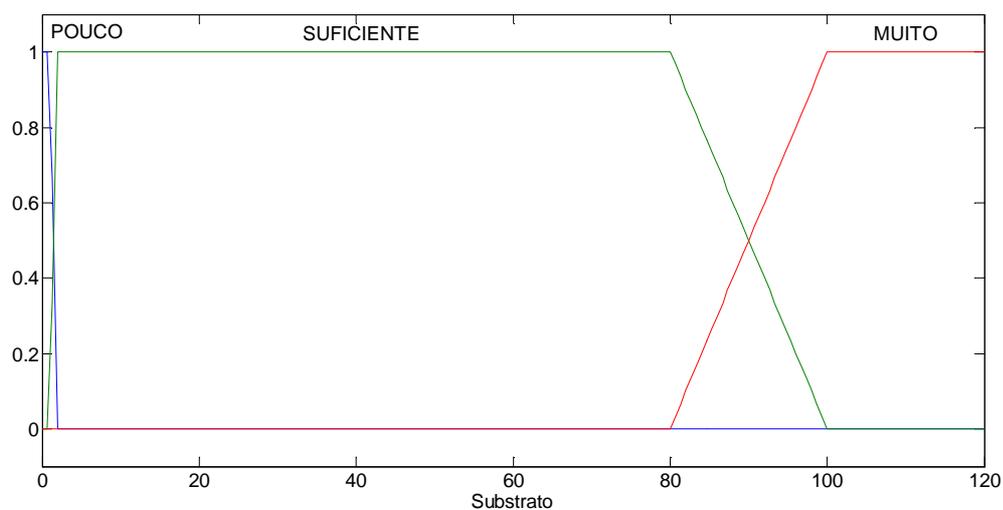


Figura 11 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Concentração de Substrato

Fonte: Autoria Própria.

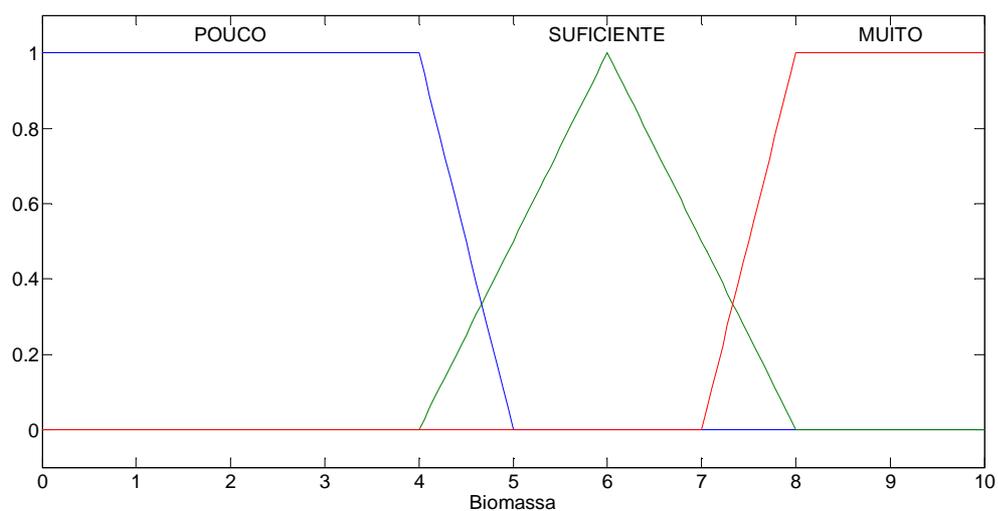


Figura 12 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Concentração de Biomassa

Fonte: Autoria Própria.

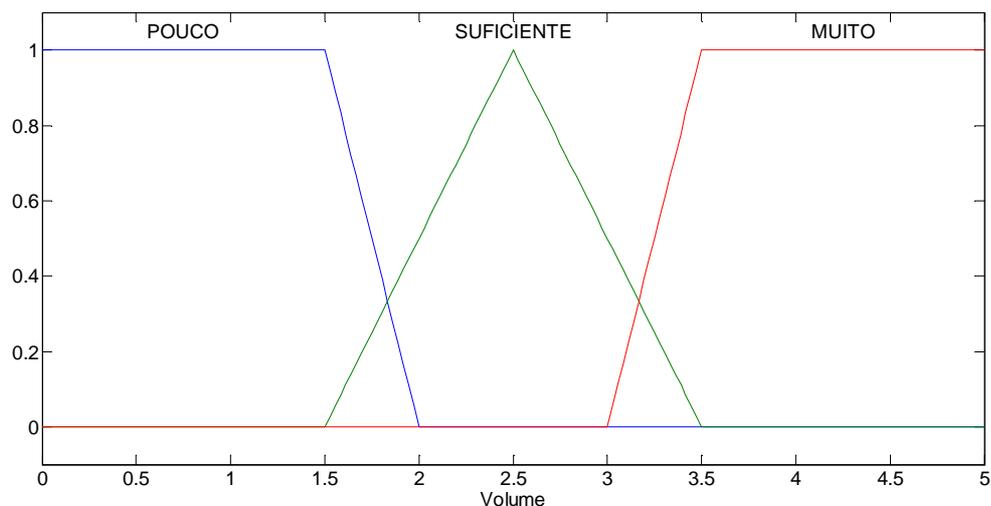


Figura 13 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Volume do Tanque
Fonte: Autoria Própria.

As figuras 14 e 15 mostram as funções de pertinência das variáveis de saída do controlador *Fuzzy*, os valores de saída do controlador *Fuzzy* monitora diretamente os *set-points* aplicados aos controladores PID.

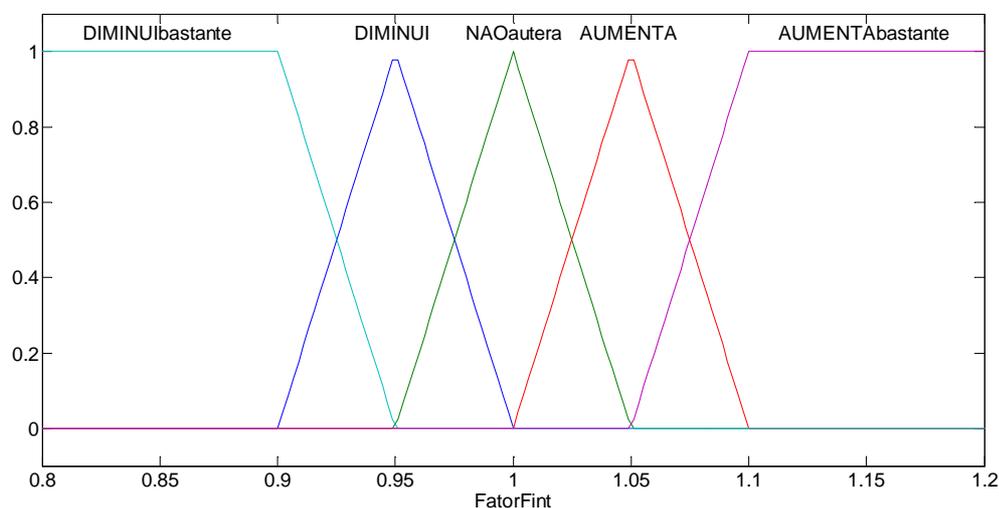


Figura 14 – Funções de Pertinência: da Válvula de Entrada Fint
Fonte: Autoria Própria.

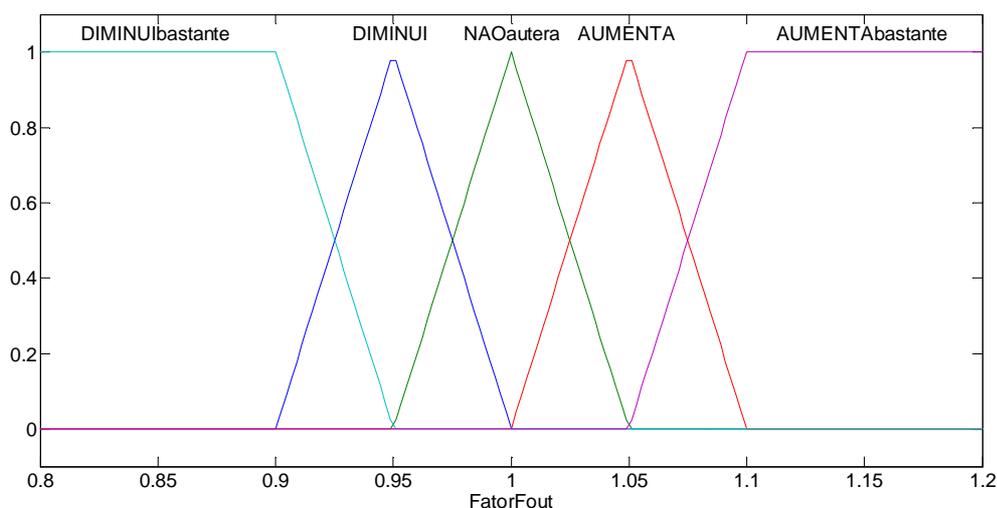


Figura 15 – Funções de Pertinência: da Válvula de Saída Fout

Fonte: Autoria Própria.

3.2.1.1 Campanha 01

A arquitetura da campanha 01 foi aplicada na campanha 02, para demonstrar a robustez do sistema, as únicas alterações foram na ponderação de determinadas regras da base de conhecimento. Logo, esta seção mostra tais características ajustadas para a campanha 01.

Na construção de um controlador *Fuzzy*, utilizando o *Fuzzy logic toolbox* do software *MATLAB*, inicialmente é definida as variáveis de entrada e saída com suas funções de pertinências, em seguida é inserida as regras do controlador *Fuzzy*, nesta base de conhecimento é onde contém a experiência de operação do processo controlado. Dessa forma a correta elaboração das regras é crucial para o sucesso do controlador *Fuzzy*. O Quadro 1 apresenta três das dezenove regras do controlador *Fuzzy*, dessa primeira arquitetura, nota-se que as três são responsáveis pelo controle do volume.

17. **SE** (Volume é POUCO) **ENTÃO** (Fator Fint AUMENTA BASTANTE) (Fator Fout DIMINUI BASTANTE) (0.8)
18. **SE** (Volume é SUFICIENTE) **ENTÃO** (Fator Fint NÃO ALTERA) (Fator Fout NÃO ALTERA) (0.025)
19. **SE** (Volume é MUITO) **ENTÃO** (Fator Fint DIMINUI BASTANTE) (Fator Fout AUMENTA BASTANTE) (0.8)

Quadro 1 – Base de Regras

Fonte: Autoria Própria.

A ponderação das dezenove regras do controlador *Fuzzy*, ajustadas para a campanha 01, estão expressas na figura 16 por meio de um gráfico de barras, no eixo X temos as regras e no eixo Y reflete a ponderação.

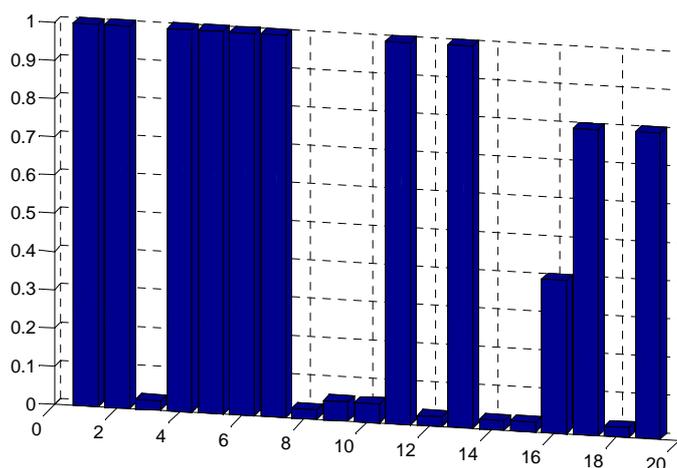


Figura 16 – Ponderação das Regras do Controlador da Primeira Arquitetura de Controle, Ajustada para a Campanha 01

Fonte: Autoria Própria.

As superfícies *Fuzzy* são comumente utilizadas por especialistas como modo de análise do desenvolvimento de sistemas *Fuzzy* (GOMIDE; PEDRYCZ, 2006). Depois de compilada as funções de pertinência das variáveis linguísticas com as regras obtêm-se um gráfico em duas ou em três dimensões (de acordo com a escolha do usuário) com as relações entre entrada e saída do controlador *Fuzzy*. Observando esses gráficos o usuário do *Software* pode fazer alterações tanto na base de regras, quanto nas funções de pertinências com uma diretriz mais apurada.

A superfície *Fuzzy* das entradas, variação do *set-point* e erro no ponto de operação, são mostradas nas figuras 17 e 18, respectivamente para as válvulas *Fint* e *Fout*. Observa-se que as ações de controle são diferentes em cada uma das válvulas (superfícies são diferentes).

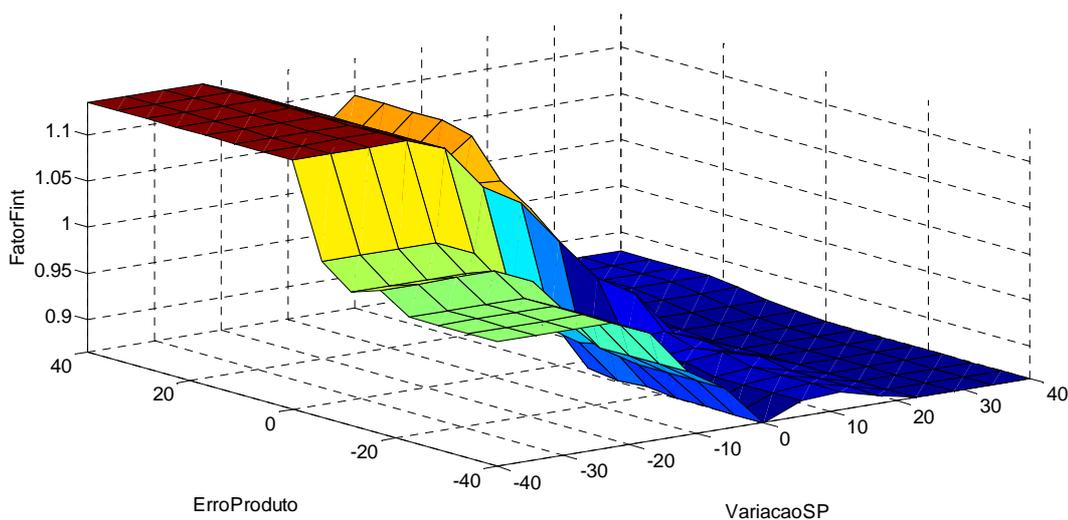


Figura 17 – Superfície *Fuzzy*: Variação SP x Erro Produto x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

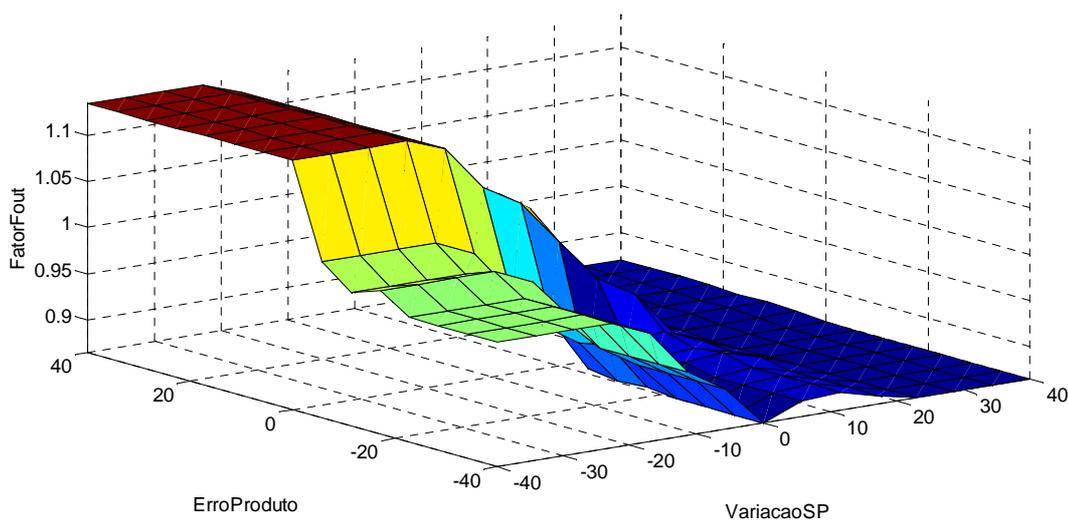


Figura 18 – Superfície *Fuzzy*: Variação SP x Erro Produto x Válvula de Saída *Fout*
Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na superfície *Fuzzy* da figura 19, que a experiência de operação mostrada na tabela 5 está presente na base de conhecimento do

controlador *Fuzzy*. Uma vez que, a válvula de entrada *Fint* influencia as concentrações de substrato e biomassa, pois essa válvula é responsável pelo fluxo dos mesmos, que entra no tanque de fermentação. Enquanto a válvula de saída *Fout* é responsável apenas pela retirada de produto fermentado, logo, não tem relação de controle com as concentrações de substrato e biomassa. E que, as superfícies são não lineares, o que sugere controle não linear feito pelo controlador *Fuzzy*.

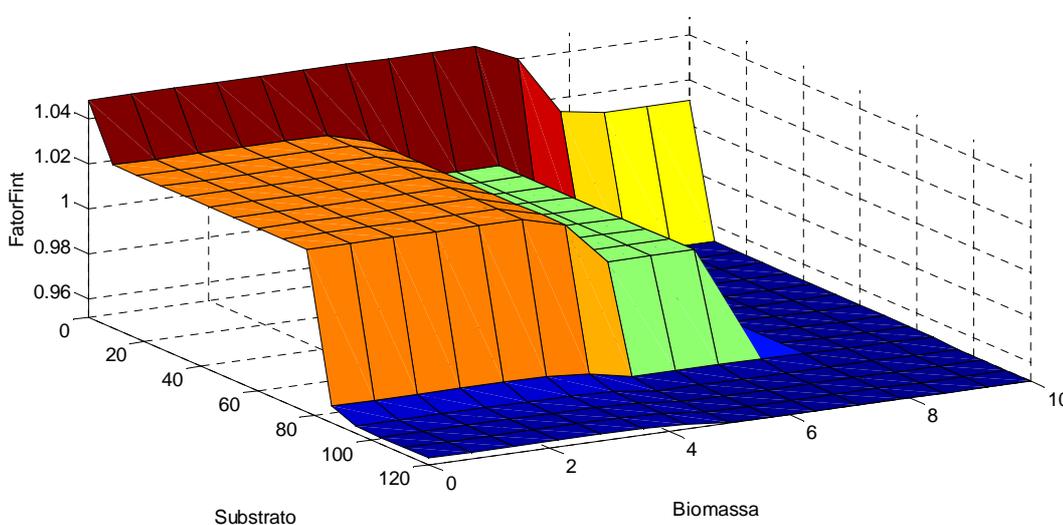


Figura 19 – Superfície *Fuzzy*: Biomassa x Substrato x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

A tabela 6 mostra que o volume do tanque deve operar entre 1,5 l e 3,5 l. As figuras 20 e 21 apresentam a atuação do controle de volume do tanque de fermentação alcoólica, observa-se que para o volume baixo o Fator *Fint* está acima de um e o Fator *Fout* está abaixo de um, isso significa manobra de abertura para a válvula de entra e fechando para a válvula de saída. Do mesmo modo é mostrada a atuação de controle para o volume alto, nota-se que, nesta situação o Fator *Fint* está abaixo de um, conseqüentemente a ação de controle na válvula de entra é uma manobra de fechamento, enquanto o Fator *Fout* está acima de um, logo o comando para a válvula de saída é de abertura.

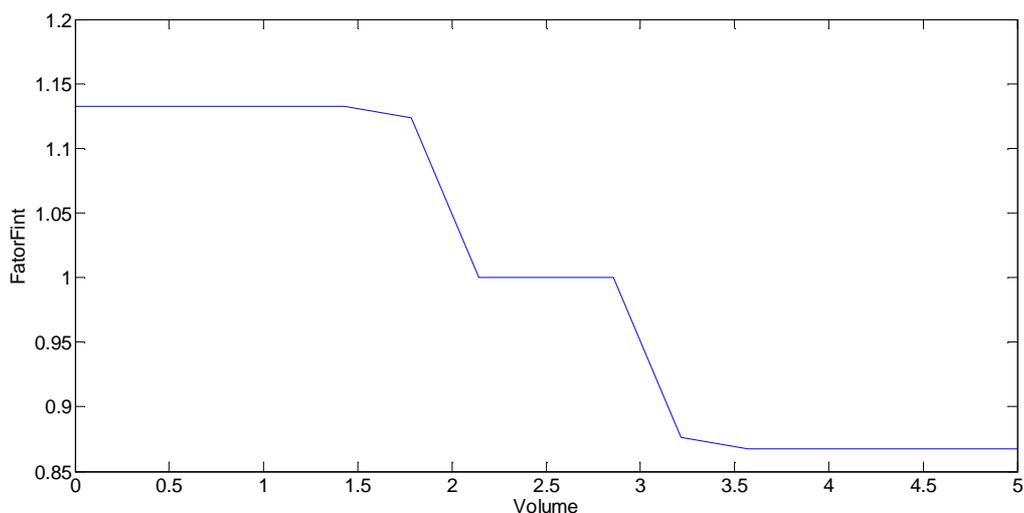


Figura 20 – Superfície *Fuzzy*: Volume x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

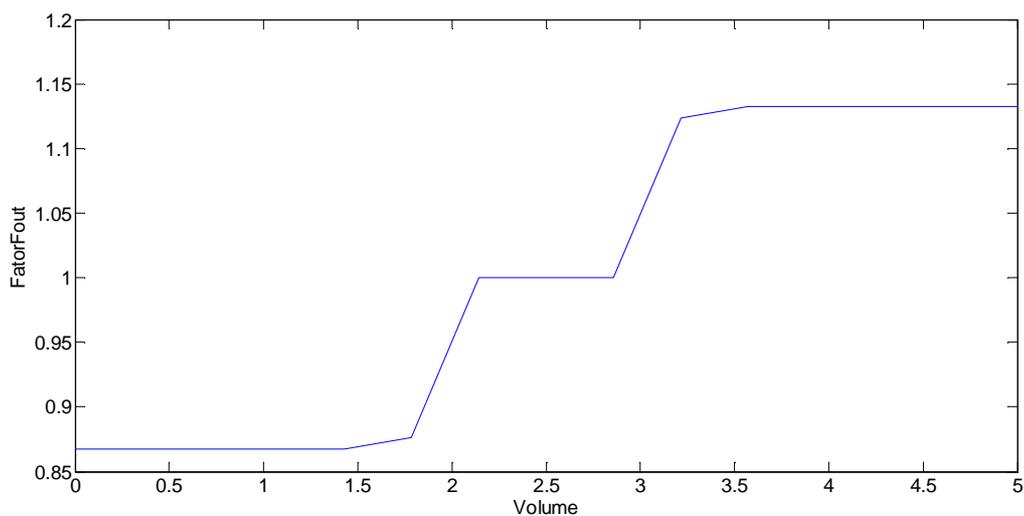


Figura 21 – Superfície *Fuzzy*: Volume x Válvula de Saída *Fout*
Fonte: Autoria Própria.

3.2.1.2 Campanha 02

O Controlador *Fuzzy* é o mesmo da campanha anterior, no entanto alterações na base de regras consequentemente geram mudanças na superfície *Fuzzy*. Esta parte do trabalho é focada em mostrar estas mudanças.

A segunda campanha conta com a possibilidade de ser monitorada pelo controlador da campanha 01, através deste método de observação do

comportamento do processo de fermentação alcoólica, foram feitas as devidas alterações na ponderação da base de regras.

A figura 22 mostra as alterações feitas na ponderação da base de regras do controlador Fuzzy, a lógica da base de conhecimento manteve-se a mesma, mas foi imprescindível a ponderação realizada, para supervisão da campanha 02.

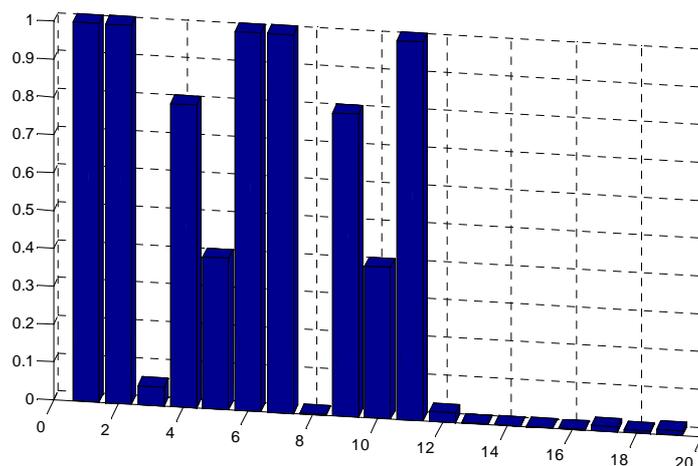


Figura 22 – Ponderação das Regras do Controlador da Primeira Arquitetura de Controle Ajustada para a Campanha 02

Fonte: Autoria Própria.

Observa-se nas figuras seguintes 23 e 24, que a superfície *Fuzzy* da variação do *Set-point* com o Erro do Produto para as saídas *Fint* e *Fout*, mantém o mesmo formato da campanha 01, porém com posicionamento diferente nos eixos X, Y e Z devido à atualização na ponderação das regras.

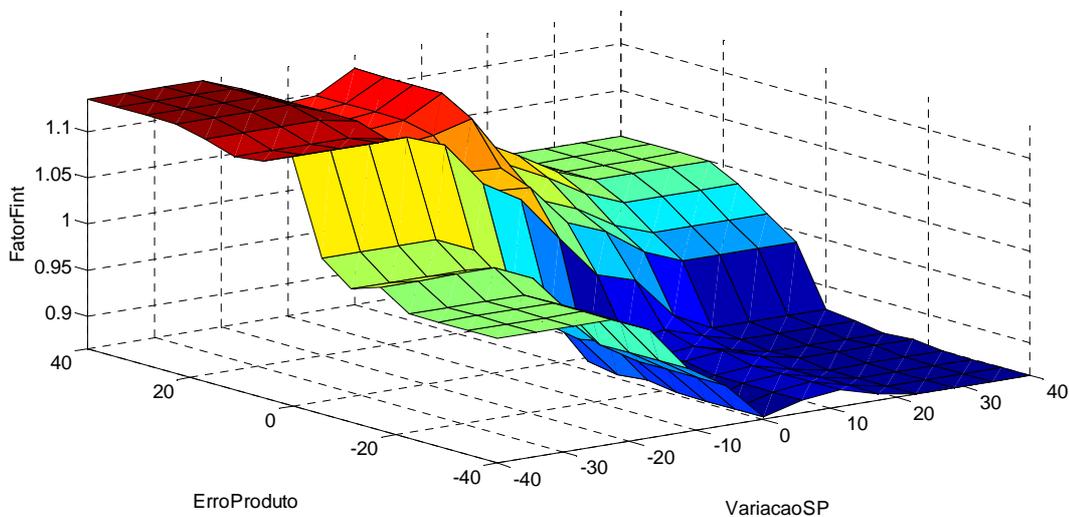


Figura 23 – Superfície Fuzzy: Variação SP x Erro Produto x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

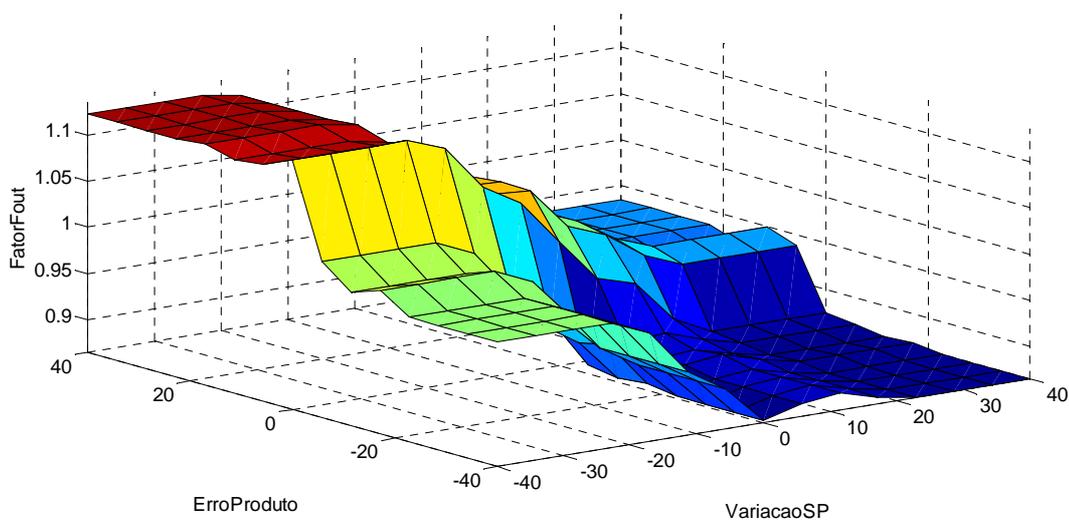


Figura 24 – Superfície Fuzzy: Variação SP x Erro Produto x Válvula de Saída *Fout*
Fonte: Autoria Própria.

As figuras 25 e 26 mostram as ações de controle na válvula de entrada *Fint*, observa-se que as ações de controle são diferentes em cada uma das válvulas (superfícies são diferentes) nas condições de alarme para as concentrações de substrato e biomassa respectivamente. Os controles são diferentes para cada válvula de acordo com a forma das superfícies.

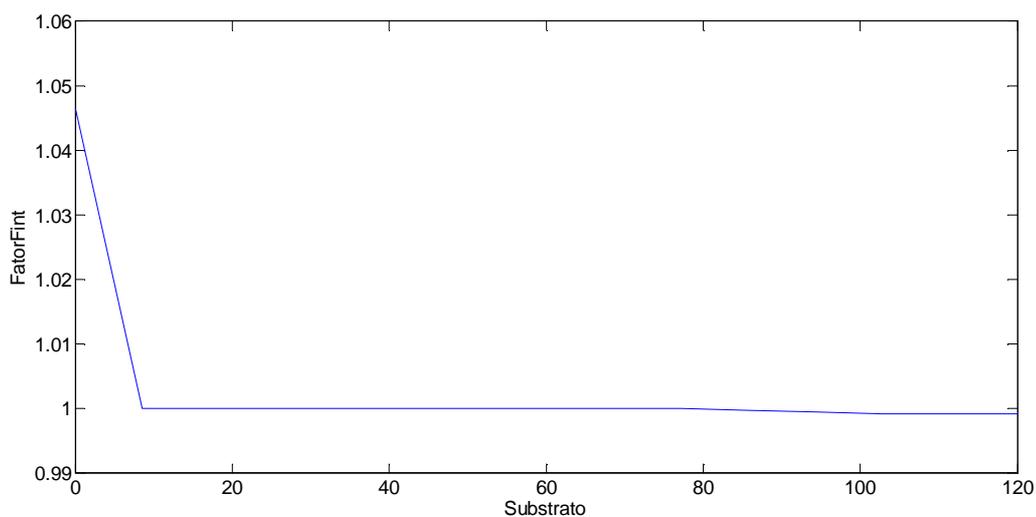


Figura 25 – Superfície *Fuzzy*: Substrato x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

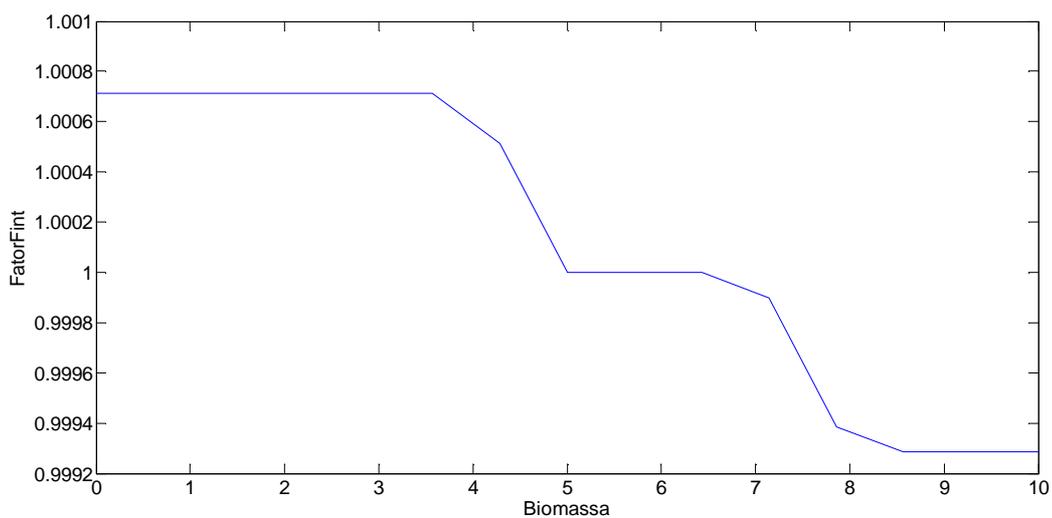


Figura 26 – Superfície *Fuzzy*: Biomassa x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

As figuras 27 e 28 mostram que, a estratégia de controle do volume é a mesma da campanha anterior, no entanto com valores diferentes para as ações de controle das válvulas de entrada *Fint* e saída *Fout*, devido à nova ponderação para a campanha 02.

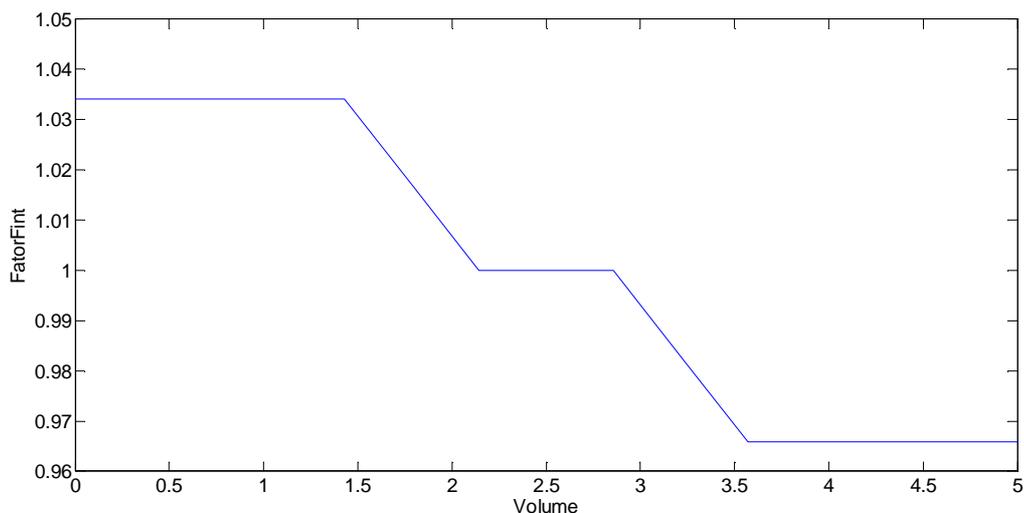


Figura 27 – Superfície *Fuzzy*: Volume x Válvula de Entrada *Fint*
Fonte: Autoria Própria.

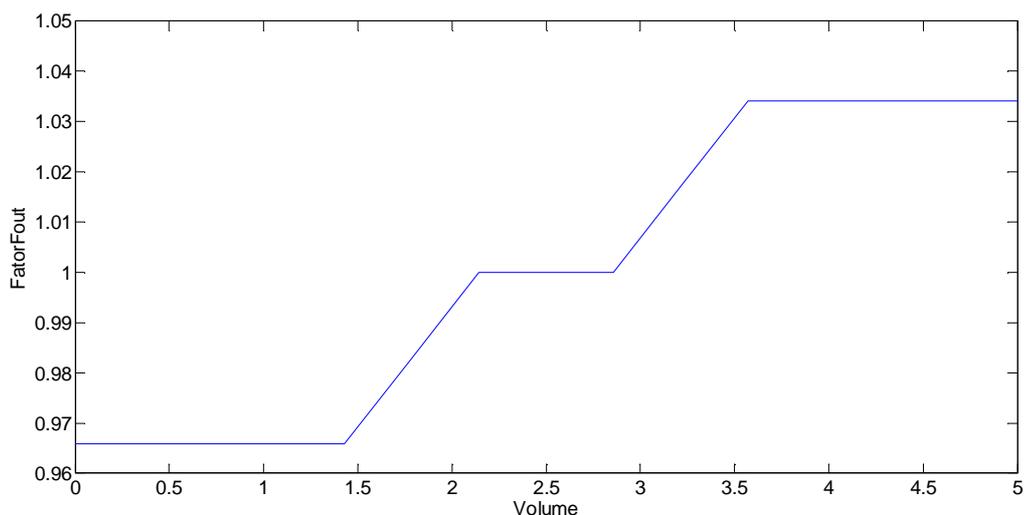


Figura 28 – Superfície *Fuzzy*: Volume x Válvula de Saída *Fout*
Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Segunda Arquitetura de Controle

A segunda arquitetura de controle supervísório, utilizada nesse trabalho de conclusão de curso, segue o mesmo princípio da primeira, apresentada nas seções anteriores, no entanto como mostrado na figura 29 agora o sistema supervísório conta com dois sistemas *Fuzzy*.

A ideia desta arquitetura é dividir o sistema *Fuzzy* em dois níveis de atuação, o primeiro nível é representado na figura 29 pelo bloco de controle *Fuzzy*

da direita. Este controlador é exatamente o mesmo da primeira arquitetura de controle com as devidas configurações para a campanha 01 e 02, apresentadas nas seções anteriores.

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

O segundo nível de atuação do sistema *Fuzzy* é simbolizado na figura 29 pelo bloco de controle *Fuzzy* da esquerda, suas características de projeto serão expostas de maneira subsequente nesta seção.

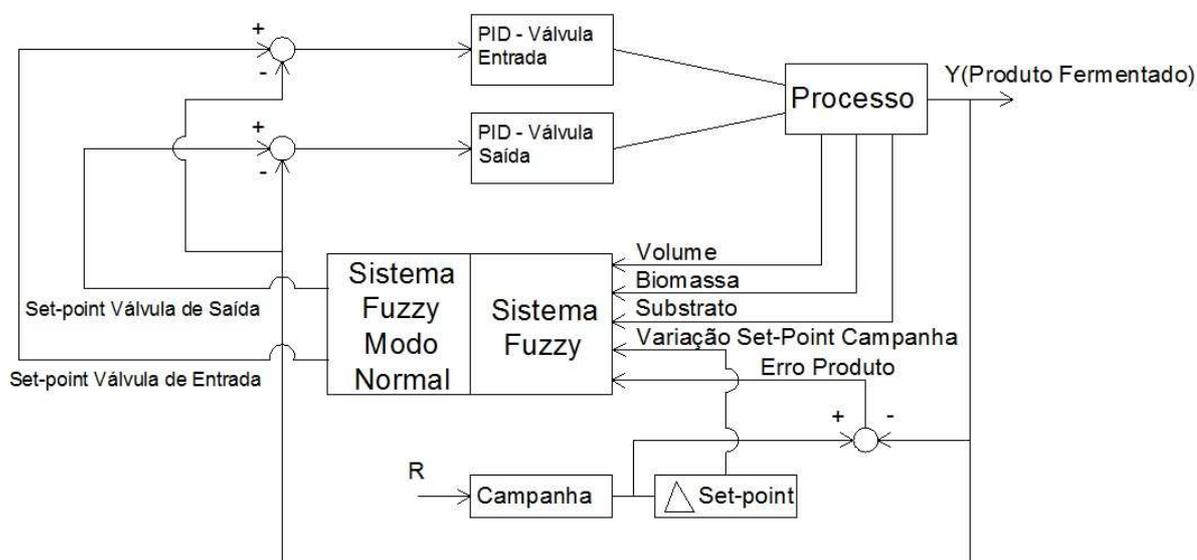


Figura 29 – Arquitetura de Controle Supervisorio com Dois Sistemas *Fuzzy*
Fonte: Autoria Própria.

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 30, 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.

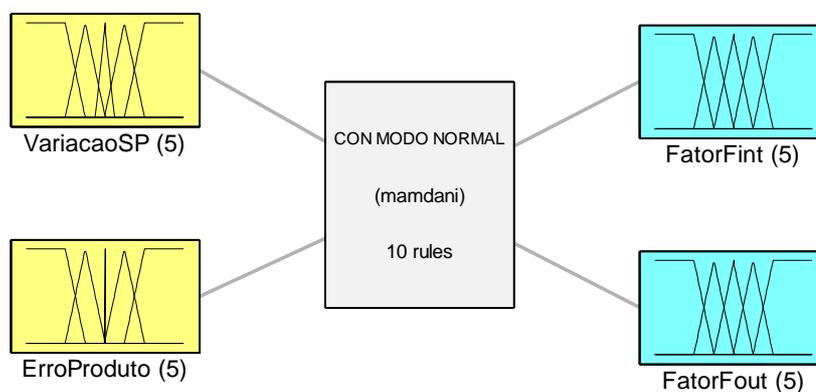


Figura 30 – Controlador *Fuzzy* para Condições Normais do Processo de Fermentação Alcoólica

Fonte: Autoria Própria.

Como o sistema *Fuzzy* do segundo nível de supervisão não opera em condições de alarme, o sistema manteve-se robusto na primeira e na segunda campanha, sem a necessidade de alterar as ponderações das regras da base de conhecimento. O controlador conta com 10 regras, e suas ponderações são mostradas na figura 31.

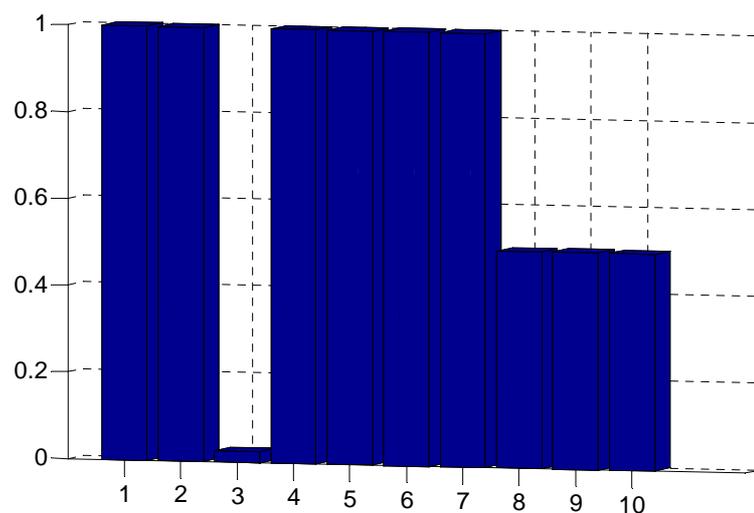


Figura 31 – Ponderação das Regras do Controlador 02 da Segunda Arquitetura de Controle Ajustada para as Campanhas 01 e 02

Fonte: Autoria Própria.

As superfícies *Fuzzy* da variação do *set-point* e erro do ponto de operação com as válvulas de entra *Fint* e Saída *Fout*, são apresentadas respectivamente nas figuras 32 e 33.

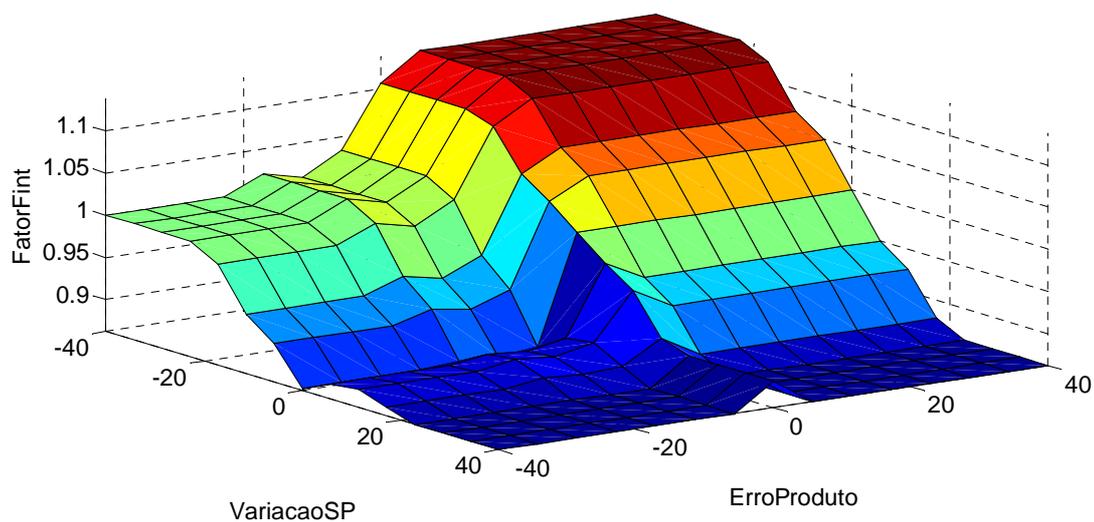


Figura 32 – Superfície *Fuzzy*: Variação SP x Erro Produto x Válvula de Entrada *Fint*

Fonte: Autoria Própria.

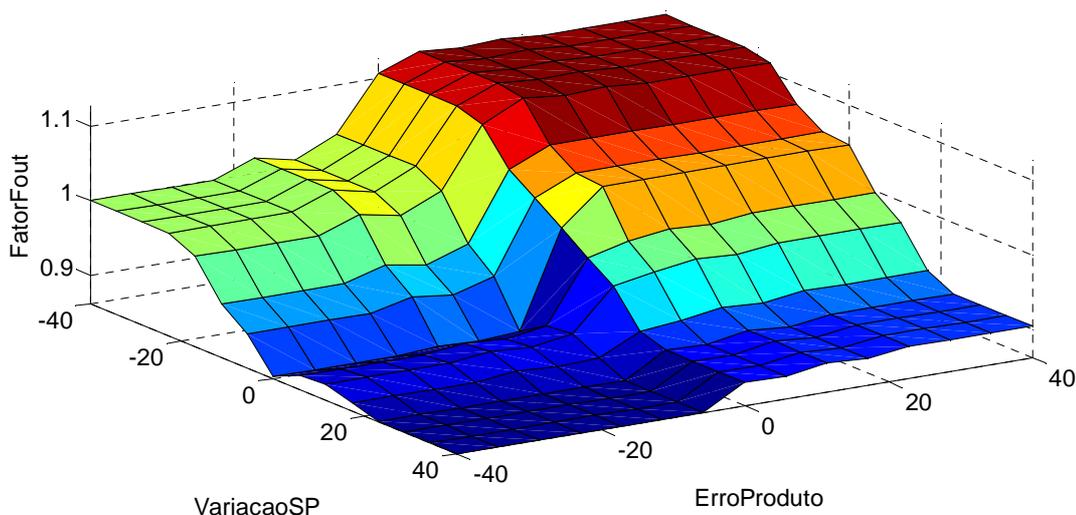


Figura 33 – Superfície *Fuzzy*: Variação SP x Erro Produto x Válvula de Saída *Fout*
Fonte: Autoria Própria.

3.2.3 Terceira Arquitetura de Controle

Na terceira arquitetura de controle, a estratégia para passar os *set-points* aos controladores PID é a mesma da segunda arquitetura, para as campanhas 01 e 02, o diferencial desta arquitetura é o ajuste do parâmetro KP feito por um terceiro sistema *Fuzzy*, esta arquitetura é mostrada no diagrama de blocos da figura 34.

Nesta terceira arquitetura de controle supervisorio com o ajuste *online* do KP, o controlador PID passa a ser adaptativo, está estratégia e proposta na literatura de Astrom e Wittenmark, 1995.

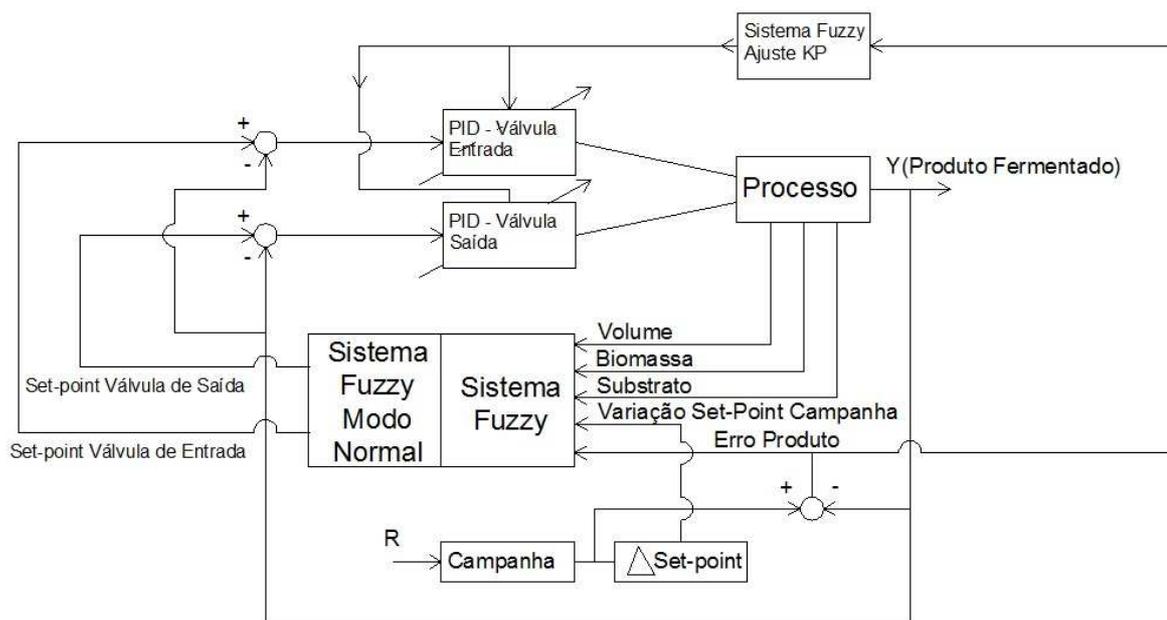


Figura 34 – Arquitetura de Controle Supervisorio com Três Sistemas Fuzzy, com Ajuste do Parâmetro KP dos Controladores PID, e Passando Set-points
Fonte: Autoria Própria.

O parâmetro KP do controlador PID da válvula de entrada F_{int} é o mesmo do controlador PID da válvula de saída F_{out} , esses são pré-estabelecidos pelo método heurístico, logo, a função do sistema *Fuzzy* é atualizar os valores no decorrer da operação do processo de fermentação alcoólica.

Os valores pré-estabelecidos para os parâmetros dos controladores clássicos mantém os valores utilizados na primeira e segunda arquitetura, o KD (6,0635) e KI (0,5559) são os mesmo para as campanhas 01 e 02, já o KP de 0,7233 na primeira campanha passou para 1,6 na segunda.

O sistema *Fuzzy* que ajusta o KP é representado na figura 35. Nota-se que o controlador é do tipo 1x1 com uma entrada e uma saída, o mesmo, utiliza como entrada apenas o erro da concentração de produto fermentador, uma vez que, o sistema *Fuzzy* atualiza somente a parte proporcional do erro no controlador PID.

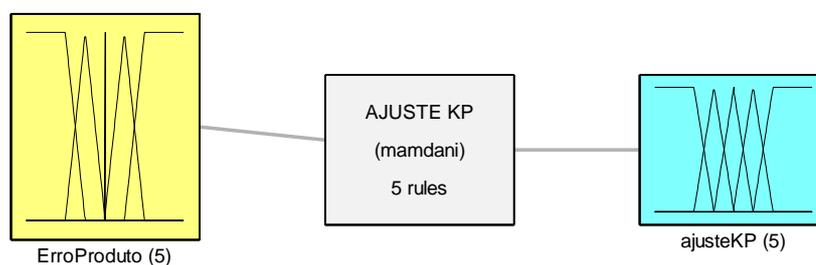


Figura 35 – Controlador Fuzzy, Ajuste do Parâmetro KP

Fonte: Autoria Própria.

As funções de pertinência da variável de entrada erro do produto são mostradas na figura 36, e as funções de pertinência da saída ajuste do KP são expostas na figura 37.

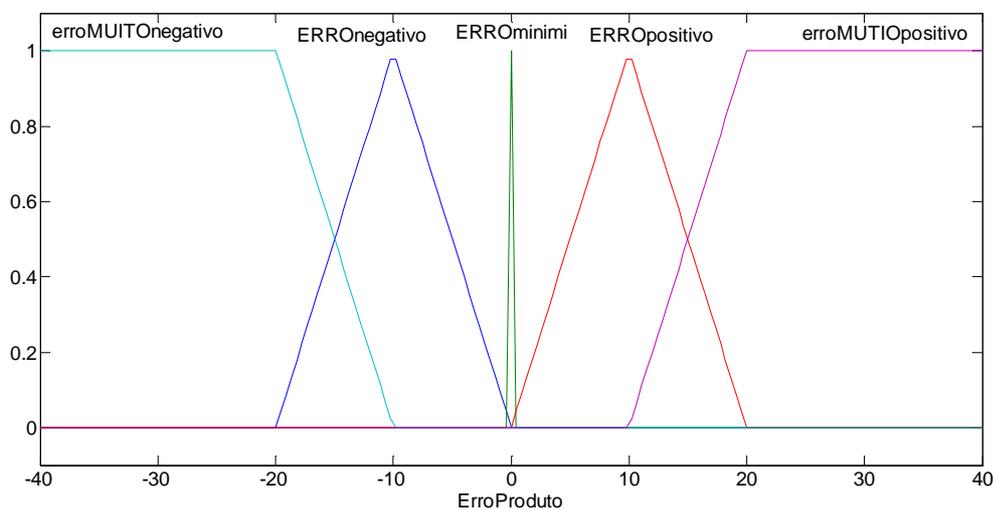


Figura 36 – Funções de Pertinência da Variável Linguística: Erro do Produto

Fonte: Autoria Própria.

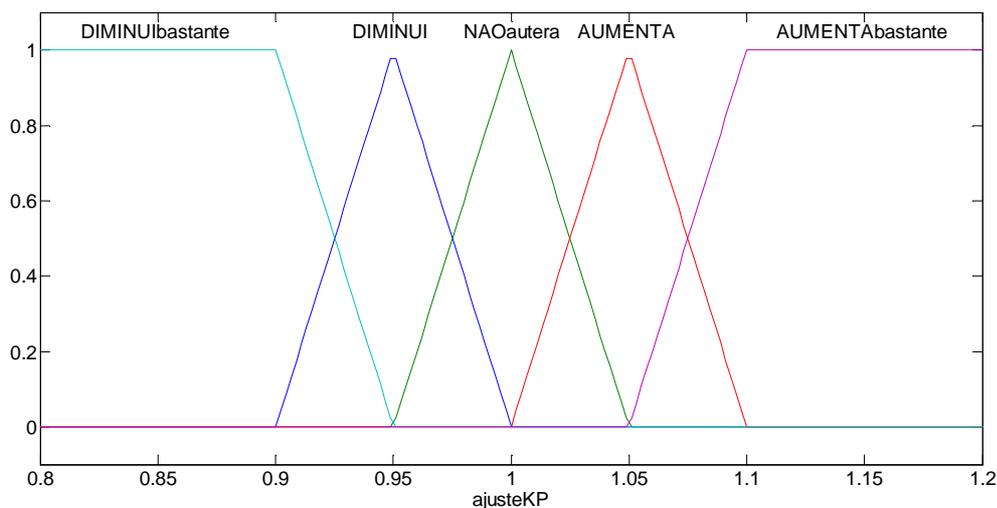


Figura 37 – Funções de Pertinência da Variável de Saída: Ajuste de KP

Fonte: Autoria Própria.

Em relação às regras do controlador *Fuzzy*, essas são apresentadas no quadro 2, e suas ponderações podem ser vistas na figura 38. Vale ressaltar que as regras e as suas ponderações mantiveram as mesmas para a campanha 01 e 02.

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. SE (Erro Produto é ERRO MUITO NEGATIVO) ENTÃO (Ajuste KP AUMENTA BASTANTE) (0.5) 2. SE (Erro Produto é ERRO NEGATIVO) ENTÃO (Ajuste KP AUMENTA) (0.5) 3. SE (Erro Produto é ERRO MÍNIMO) ENTÃO (Ajuste KP NÃO ALTERA) (0.25) 4. SE (Erro Produto é POSITIVO) ENTÃO (Ajuste KP DIMINUI) (0.5) 5. SE (Erro Produto é MUITO POSITIVO) ENTÃO (Ajuste KP DIMINUI BASTANTE) (0.5) |
|--|

Quadro 2 – Base de Regras

Fonte: Autoria Própria.

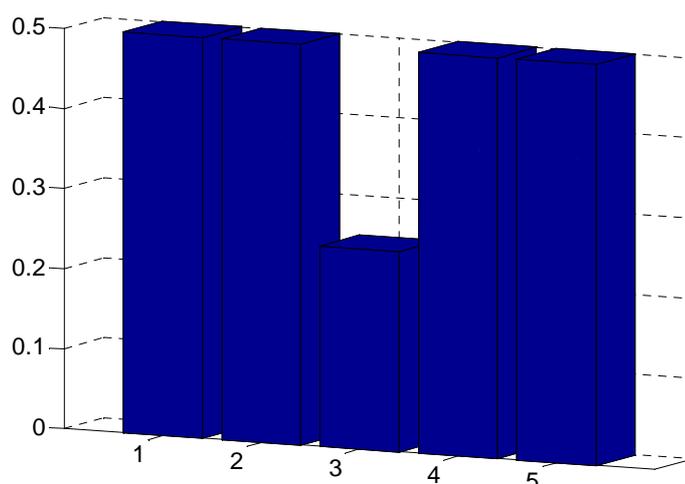


Figura 38 – Ponderação das Regras do Controlador 03 da Terceira Arquitetura de Controle Ajustada para as Campanhas 01 e 02

Fonte: Autoria Própria.

3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Na comparação dos resultados foi utilizado como referência à Integral do Valor Absoluto do Erro (IAE) mostrada na equação 6, para as concentrações de produto, substrato e biomassa, e também o erro no controle do volume.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (6)$$

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

Observa-se na tabela 7, que as três arquiteturas de controle supervisorío propostas no trabalho, apresentaram redução no IAE, 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 7 – Resultados de Simulação, para a Concentração do Produto Fermentado

Produto (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02	Arquitetura 03
IAE - P Campanha 01	111,3993	98,5740	75,7199	77,1699
IAE - P Campanha 02	235,1547	218,9355	215,4217	216,3414

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 8, observa-se que, na campanha 01 a arquitetura 02 teve o melhor desempenho para a função de proteção do Substrato com redução do IAE de 97,4%, no entanto as arquiteturas 01 e 03 também apresentaram reduções na ordem de 90%. Já na campanha 02 as três 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 8 – Resultados de Simulação, para a Concentração do Substrato

Substrato (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02	Arquitetura 03
IAE - S Campanha 01	10,7860	0,2874	0,2801	0,2881
IAE - S Campanha 02	0,4083	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Resultados de Simulação, para a Concentração de Biomassa

Biomassa (g/l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02	Arquitetura 03
IAE - C Campanha 01	0	0	0	0
IAE - C Campanha 02	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

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% do IAE na campanha 02.

Tabela 10 – Resultados de Simulação, para o Volume do Tanque

Volume (l)	PID	Arquitetura 01	Arquitetura 02	Arquitetura 03
IAE - V Campanha 01	89,0120	0	0,0555	0,0631
IAE - V Campanha 02	13,9556	4,1029	4,2509	4,2713

Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Resultados na Campanha 01

A figura 39 mostra o comportamento das variáveis do processo de fermentação alcoólica, controlado apenas pelo controle clássico PID; a figura 40 é uma ampliação de parte da figura 39, nesta observa-se um ponto de interação entre as variáveis: Substrato, Biomassa e Volume, onde, perturbação no substrato também gera perturbações para a concentração de Biomassa e para o Volume.

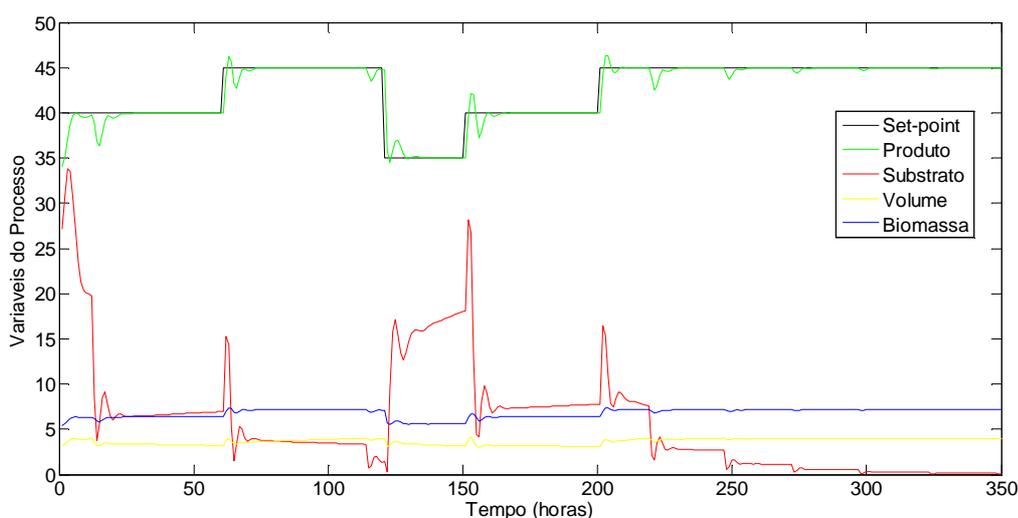


Figura 39 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Controle PID

Fonte: Autoria Própria.

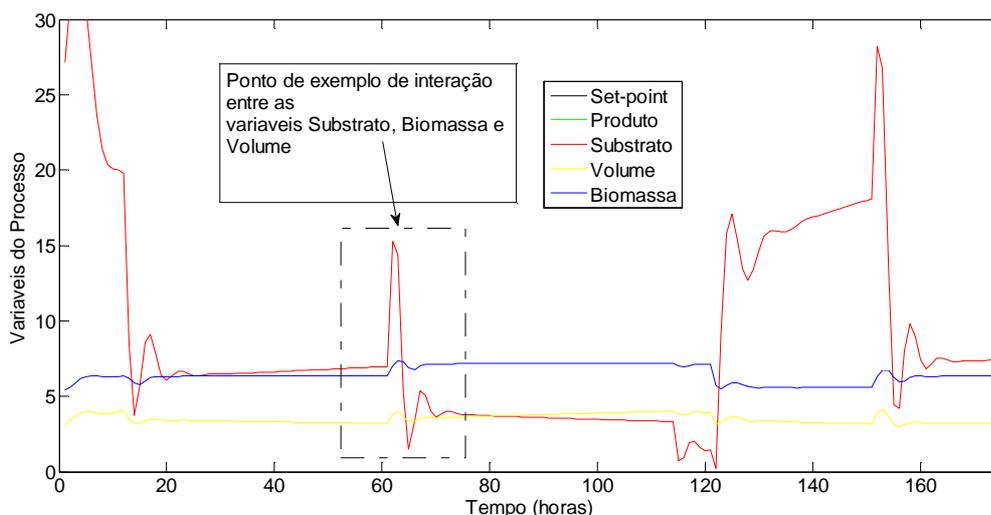


Figura 40 - Ponto de Interação entre as Variáveis: Substrato, Biomassa e Volume
Fonte: Autoria Própria.

As figuras 41, 42 e 43 apresentam os resultados de simulação respectivamente para a primeira, segunda e terceira arquitetura de controle supervisorio, na campanha 01.

Observa-se na figura 41, a evolução no controle do processo com a arquitetura 01 em relação ao controle PID, apresentado na figura 39, nota-se na figura 41 que, a linha verde (Produto) consegue acompanhar com menos oscilações o set-point desejado para a campanha (linha preta).

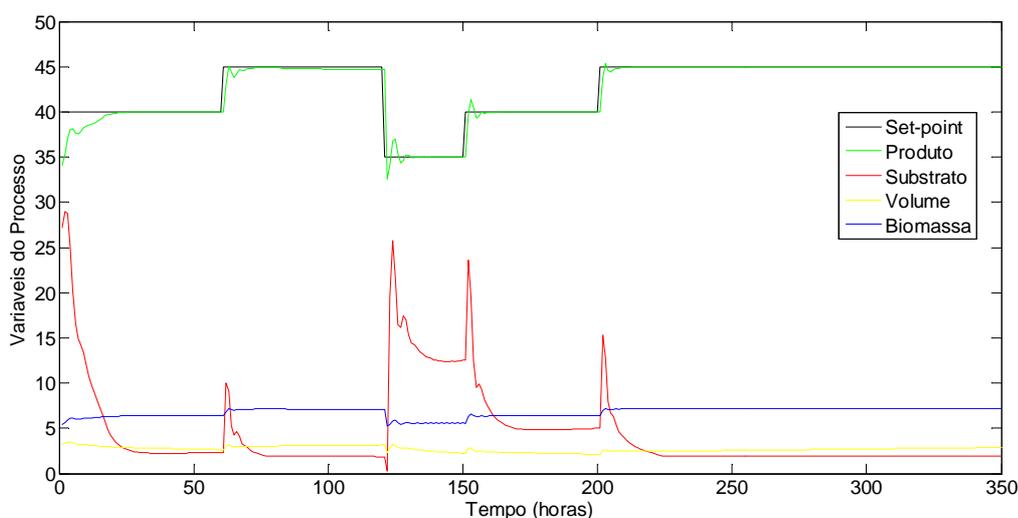


Figura 41 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Arquitetura 01
Fonte: Autoria Própria.

A figura 41 também mostra que, após o tempo 250 até o final da campanha, o processo se manteve sem oscilações nas quatro variáveis, e que o produto corresponde ao set-point desejado para a campanha neste período, comportamento diferente do controle PID (figura 39), aonde o substrato (linha vermelha) chega a ficar abaixo de 0,5 g/l (valor de restrição para o processo).

Como mostrado na tabela 7, com os resultados do IAE para o produto, a arquitetura 02 teve melhor desempenho que a arquitetura 01, para o controle do produto, mesmo com a oscilação no final da campanha, mostrado na figura 42 pela linha verde. Na proteção do substrato a arquitetura 02 também teve melhor desempenho que a arquitetura 01, mas obteve o mesmo resultado para biomassa, e apresentou resultado inferior para o volume.

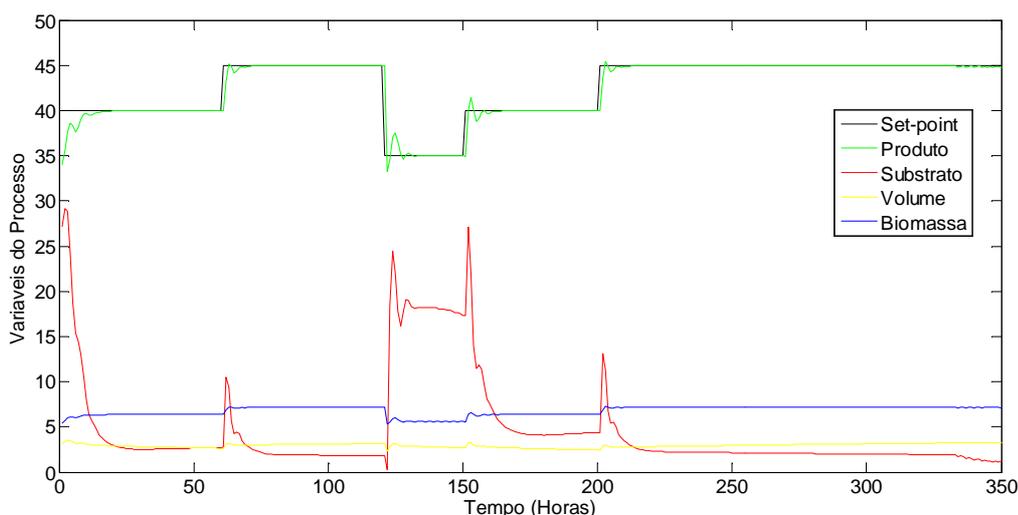


Figura 42 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Arquitetura 02

Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na figura 43 (arquitetura 03), que a oscilação do produto (linha verde) e substrato (linha vermelha) no final da campanha, é maior que na figura 42 (arquitetura 02), por isso a arquitetura 03 teve menor desempenho de IAE, no substrato, biomassa e volume, do que a arquitetura 02, no entanto a arquitetura 03 teve melhor desempenho na variável controlada que a arquitetura 01.

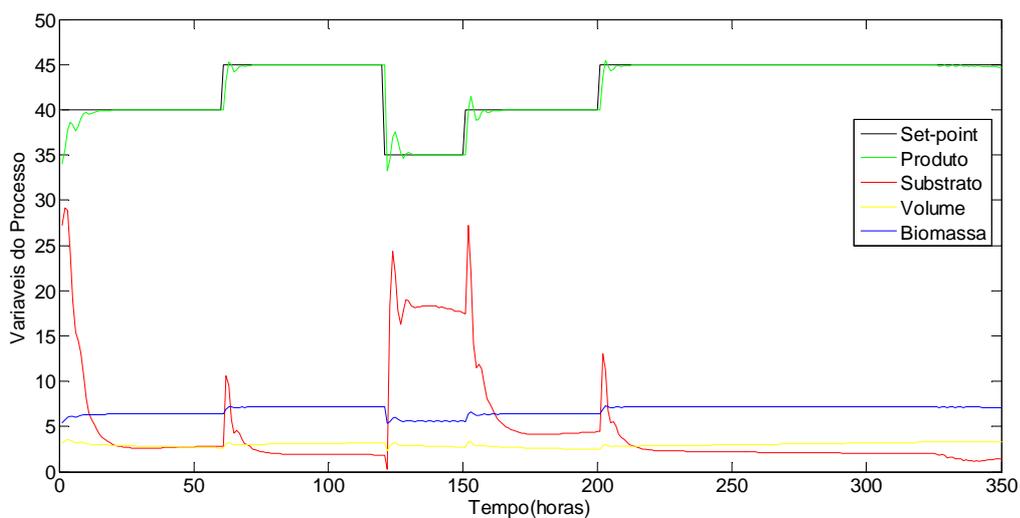


Figura 43 – Resultado de Simulação Campanha 01, com Arquitetura 03
Fonte: Autoria Própria.

3.3.2 Resultados na Campanha 02

A campanha 02 controlada pelo controle PID é mostrada na figura 44, já as figuras 45, 46 e 47 contém o comportamento do processo com a supervisão das arquiteturas 01, 02 e 03 concomitantemente.

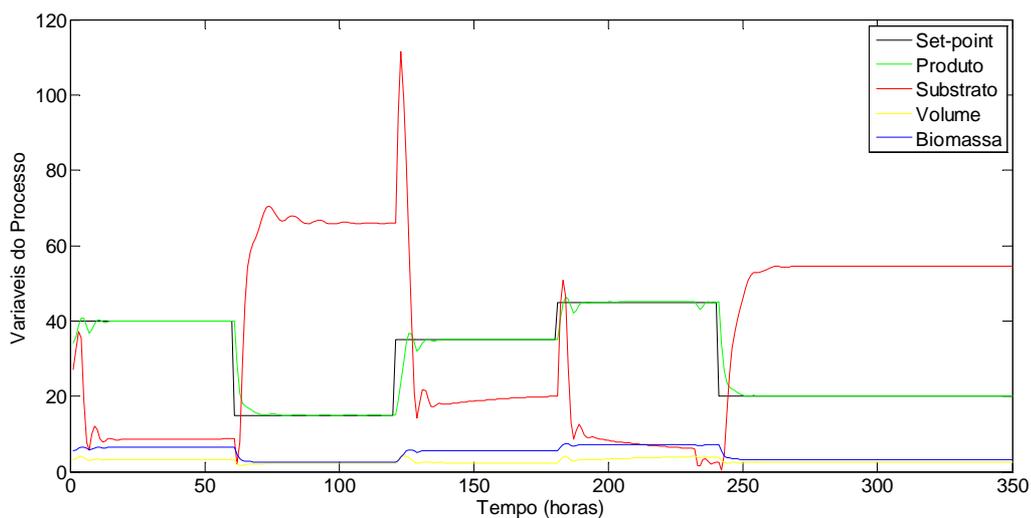


Figura 44 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Controle PID
Fonte: Autoria Própria.

A tabela 7 mostra que, os resultados do IAE foram maiores na campanha 02 do que na campanha 01, no entanto, não significa que o controle PID e as três arquiteturas de controle supervisorio propostas no trabalho, tiveram um mau desempenho na campanha 02, mas sim porque, a campanha dois tem variações no set-point do processo maiores do que na campanha 01, como é mostrado nas tabelas 01 e 02 e nas figuras com o comportamento dinâmico do processo.

Observa-se na figura 44, que o produto (linha verde) consegue acompanhar o set-point desejado (linha preta) para a campanha 02, com oscilações; na figura 45 observa-se a evolução da primeira arquitetura uma vez que o produto consegue acompanhar com menos oscilações o set-point desejado para a campanha. (esta ultima observação pode ser conferida na tabela 7).

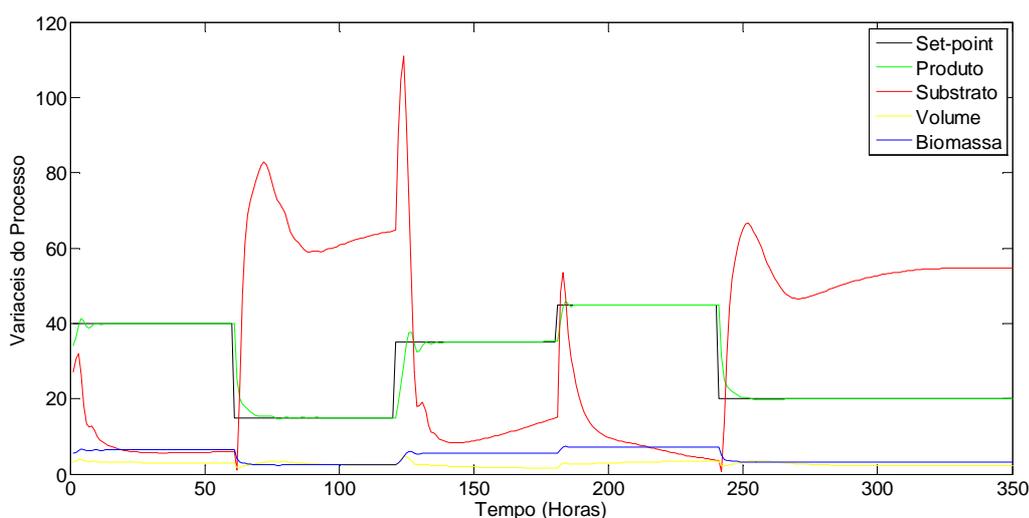


Figura 45 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Arquitetura 01
Fonte: Autoria Própria.

Observa-se nas figuras 45, 46 e 47 que o substrato (linha vermelha) apresenta concentrações maiores que na campanha 01 chegando próximo de 120 g/l, devido as maiores variações de set-point da campanha, porém o ponto positivo das três arquiteturas na campanha 02 é que o substrato não fica abaixo de 0,5 g/l seguindo a restrição para o substrato.

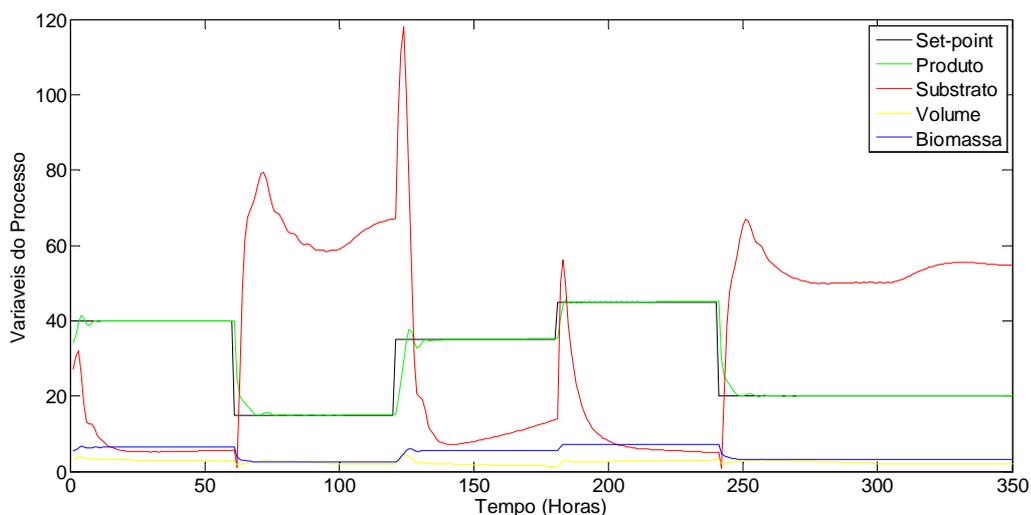


Figura 46 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Arquitetura 02
Fonte: Autoria Própria.

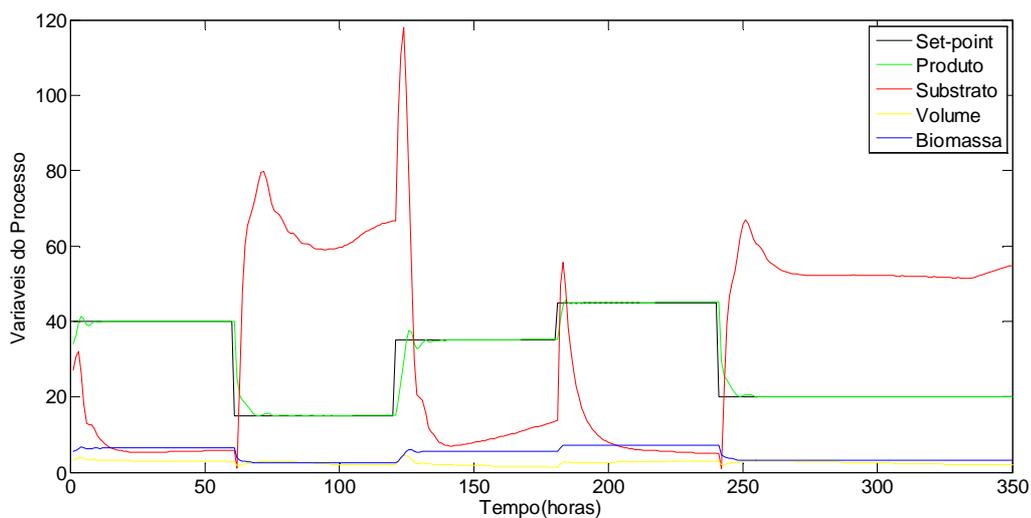


Figura 47 – Resultado de Simulação Campanha 02, com Arquitetura 03
Fonte: Autoria Própria.

O melhor desempenho para variável controlada (produto-linha verde), na campanha 02 foi a arquitetura 02 (comportamento mostrado na figura 46), mas a figura 47 mostra o comportamento do processo com a arquitetura 03, e observa-se resultado semelhante com a arquitetura 02. Esta semelhança é confirmada com o resultado do IAE mostrado na tabela 07, que foi de 215,4217 para arquitetura 02 e 216,3414 para a arquitetura 03.

4 CONCLUSÃO

Esse trabalho de conclusão de curso apresentou um sistema supervisorio baseado em lógica *Fuzzy*, com três arquiteturas para utilização da lógica *Fuzzy* aplicada a um processo de fermentação alcoólica de multivariáveis, que apresenta não linearidade, fase não mínima e tempo de acomodação.

Para comprovar a robustez do sistema proposto o mesmo foi aplicado em duas campanhas de fermentação diferentes, e comparadas com o controle clássico PID. 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.

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 supervisorio apresentaram um resultado satisfatório em relação ao controle clássico PID.

Outra vantagem do sistema proposto é a possibilidade de disparar alarme para condições adversas de operação, como realizado na arquitetura 02 e 03, podendo trocar de controlador *Fuzzy*, resultando em ganhos consideráveis para o sistema de fermentação alcoólica. Desse modo, podemos sugerir que o controlador *Fuzzy* pode ser viável para esse tipo de processo.

É necessário ressaltar que, para trabalhos futuros poderão ser acrescentadas novas funcionalidades no sistema supervisorio e compara-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, servira como base teórica para aplicações em outros processos. Finalmente, espera-se ter contribuído, ainda que com resultados simulados, com uma proposta de sistema supervisorio *Fuzzy-pid* para processos industriais.

REFERÊNCIAS

ARRIAGA-DE-VALLE, Enrique; DIECK-ASSAD, Graciano. **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: 03 nov. 2014

ASTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptative control**. 2nd. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing, 1995.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle modernos**. 2001

FABRO, João Alberto. **Uma abordagem neuro-nebulosa de controle preditivo aplicada a processos multi-estágios**. 2003. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003.

FERNANDES, Rafael Tramontini. **Supervisão de um sistema híbrido eólico/diesel usando lógica Fuzzy**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2005.

FERNANDES JÚNIOR, Francisco Guerra. et al. Implementação de controladores PID utilizando lógica Fuzzy e instrumentação industrial. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, São Luis, 7, set. 2005. Disponível em: < http://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/artigos/2005/sbai2005_03.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2013.

GOMIDE, Fernando Antonio Campos; GUDWIN, Ricardo Ribeiro. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica *Fuzzy*. **SBA Controle & Automação**. Campinas, v.4, n.3, p. 97-115, set/out. 1994.

GOMIDE, Fernando Antonio Campos; PEDRYCZ, Witold. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. 2. ed. Massachusetts: Bradford, 2006.

MAHER, M. **Modélisation et elaboration d'algorithmes d'estimation et de commande: application à um bioprocédé**. 1995. Tese - Université Paul Sabatier, LAAS/CNRS, Toulouse, 1995.

MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. Version 2.2.9. United States of America: MathWorks, 2009. SOFTWARE.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, 1975.

MENDONÇA, Marcio. **Uma contribuição ao desenvolvimento de sistemas inteligentes utilizando redes cognitivas dinâmicas**. 2011. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

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

SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy. **Controle e modelagem Fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2004.

WANG Rui; LUO Fei; HUANG Xiaohong; LI Peng, New elevator energy feedback control system design based on fuzzy PID controller, **Power Engineering and Automation Conference (PEAM)**, IEEE , Sept. 2012.

YAMAKAWA, Eduardo Kazumi. **Sistema de controle nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica**. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

YESIL, Engin. et al. **Self-Tuning PI Controller via Fuzzy Cognitive Maps**. 2011. Disponível em: <http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-41142-7_57>. Acesso em: 03 nov. 2014.

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