



UNIVERSIDADE DE UBERABA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL

MANUEL FERREIRA SILVA NETO

CONTROLE FUZZY DO pH NO PROCESSO DE CALEAÇÃO
PARA A PRODUÇÃO DO AÇÚCAR

UBERABA-MG

2019



MANUEL FERREIRA SILVA NETO

**CONTROLE FUZZY DO pH NO PROCESSO DE CALEAÇÃO
PARA A PRODUÇÃO DO AÇÚCAR**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/ UNIUBE).

Orientador (a):

Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva

Coorientador (a):

Prof. Dr. Edílberto Pereira Teixeira

UBERABA-MG

2019

i

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

Silva Neto, Manuel Ferreira.

S38c Controle fuzzy do pH no processo de caleação para a produção do açúcar /
Manuel Ferreira Silva Neto. – Uberaba, 2019.

48 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira.

1. Lógica difusa. 2. Sistemas não-Lineares. 3. Açúcar – Usinas. I. Silva,
Antônio Manoel Batista da. II. Teixeira, Edilberto Pereira. III. Universidade de
Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 511.322

MANUEL FERREIRA SILVA NETO

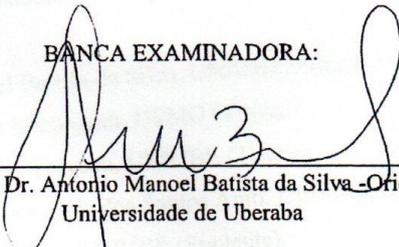
**CONTROLE FUZZY DO pH NO PROCESSO DE CALEAÇÃO
PARA A PRODUÇÃO DO AÇÚCAR**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 26/02/2019

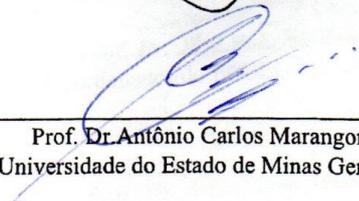
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Antonio Manoel Batista da Silva -Orientador
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira
Universidade de Uberaba



Prof. Dr. Antônio Carlos Marangoni
Universidade do Estado de Minas Gerais

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa, pelo incentivo para que pudesse alcançar meu objetivo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por permitir a realização deste trabalho.

Agradeço aos Professores Dr. Antônio Manoel B. Silva, orientador deste trabalho, e ao Professor, co-orientador, Doutor Edilberto Pereira Teixeira pela paciência, dedicação, profissionalismo e pelos conhecimentos repassados durante as aulas.

Agradeço ao professor Msc. Marcelo Lucas pela dedicação e incentivo em iniciar esta jornada de estudo que muito enriqueceu meus conhecimentos e aos professores, funcionários e colegas do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Química da Universidade de Uberaba pelo aprendizado e momentos de alegria.

Agradeço à Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

Resumo

Apresenta-se neste trabalho uma proposta para o controle de pH do caldo em usinas produtoras de açúcar. Por se tratar de um sistema com características não lineares e com perturbações variadas, os métodos convencionais de controle não satisfazem as exigências do processo. Dentre esses métodos convencionais, destaca-se o controlador PID, que é basicamente linear e monovariável. Logo, se mostra ineficiente para o controle de pH. Ampliando as possibilidades de ação, a proposta de controle apresentada neste trabalho mostrou-se bastante satisfatória, por utilizar a lógica *fuzzy* de forma preditiva na consideração do efeito das perturbações de maneira inteligente. No trabalho, os detalhes do controlador proposto são apresentados, incluindo-se os diagramas de processo e de simulação. A comprovação da eficácia do controlador proposto é realizada por simulação, mostrando-se graficamente as perturbações impostas e a consequente ação de controle, que elimina o erro de regime permanente.

Palavras Chave: controle de pH, lógica *fuzzy*, não lineares.

Abstract

This work presents a proposal to control the pH of the broth in sugar production plants. Because it is a system with non-linear characteristics and with varied perturbations, conventional control methods do not satisfy the requirements of the process. Among these conventional methods, we highlight the PID controller, which is basically linear and monovisible. Therefore, it is inefficient for pH control. Extending the possibilities of action, the control proposal presented in this work proved to be quite satisfactory, by using fuzzy logic in a predictive way in the consideration of the effect of the perturbations in an intelligent way. At work, the details of the proposed controller are presented, including process and simulation diagrams. The proof of the effectiveness of the proposed controller is performed by simulation, showing graphically the disturbances imposed and the consequent control action, which eliminates the steady state error.

Keywords: pH control, fuzzy logic, nonlinear.

Lista de Figuras

Figura 1- Função de pertinência para o conjunto das temperaturas baixas	10
Figura 2- Função de pertinência para o conjunto das temperaturas médias.	11
Figura 3- Função de pertinência para o conjunto das temperaturas altas	11
Figura 4- Função de pertinência triangular para todos os conjuntos de temperaturas ..	11
Figura 5- Função de pertinência na forma trapezoidal.....	12
Figura 6- Representação de um forno com três entradas	14
Figura 7- Estrutura básica de um controlador <i>fuzzy</i>	17
Figura 8- Controlador <i>fuzzy</i> aplicado a sistema sem realimentação	18
Figura 9- Simulação no módulo <i>Simulink</i> do sistema <i>Matlab</i> , para um controlador <i>fuzzy</i> direto	18
Figura 10- Controlador <i>fuzzy</i> aplicado a sistema com realimentação	19
Figura 11- Simulação no módulo <i>Simulink</i> do sistema <i>Matlab</i> , para um controlador <i>fuzzy</i> aplicado a um sistema com realimentação	19
Figura 12- Diagrama de processo e de instrumentação (P&I) do controle de pH do caldo.	21
Figura 13- Diagrama de controle de pH do caldo.	22
Figura 14- Sistema de controle <i>fuzzy</i> , módulo 1	24
Figura 15- Sistema de controle <i>fuzzy</i> , módulo 2	25
Figura 16- Funções de pertinência triangulares (Nível do reservatório de cal).....	25
Figura 17- Funções de pertinência triangulares (pH da entrada)	26
Figura 18- Funções de pertinência triangulares (Vazão da entrada)	27
Figura 19- Funções de pertinência do erro.....	27
Figura 20- Funções de pertinência da derivada do erro	28
Figura 21- Possibilidades das funções de pertinência para criação da base de regras, módulo 2	29
Figura 22- Possibilidades das funções de pertinência para criação da base de regras, módulo 1	30
Figura 23- Algumas regras de implicação para criação da base de regras, módulo 2 ..	30
Figura 24- Regras de implicação para criação da base de regras, módulo 1	31
Figura 25- Diagrama, variação das três perturbações	34
Figura 26- Diagrama, nível de cal constante, variação do ph e da vazão de entrada....	35

Figura 27- Diagrama, pH de entrada constante, variação do nível de cal e da vazão do caldo	35
Figura 28- Diagrama, vazão do caldo constante, variação do nível de cal e do pH de entrada	36
Figura 29- Resposta ao degrau, as variações no pH, nível do cal e vazão do caldo	37
Figura 30- Resposta ao degrau e as variações no pH, nível do cal e vazão do caldo ...	37
Figura 31- Resposta ao degrau, as variações do pH da entrada e vazão do caldo, e ao nível de cal constante	38
Figura 32- Resposta ao degrau, as variações do pH e vazão, e ao nível de cal constante.....	39
Figura 33- Resposta ao degrau, as variações no nível do tanque de cal e do pH do caldo, e a vazão do caldo da entrada constante.....	39
Figura 34 – Resposta ao degrau, as variações no nível do tanque de cal e da vazão do caldo, e ao pH da entrada constante.	40
Figura 35- Resposta ao degrau e as variações do nível de cal, da vazão do caldo e do pH entrada.	41
Figura 36- Resposta ao degrau e as variações do nível de cal, da vazão do caldo e do pH entrada.	41
Figura 37- Resposta ao degrau e as variações do nível de cal, da vazão do caldo e do pH entrada.	42
Figura 38- Desvio padrão para o erro do controlador PID	43
Figura 39- Desvio padrão para o erro do controlador <i>fuzzy</i>	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Pertinência dos conjuntos BAIXAS, MÉDIAS E ALTAS.	8
Quadro 2- Regras de implicação.....	15

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

μ_A	função de pertinência correspondente ao conjunto das temperaturas altas.
μ_B	função de pertinência correspondente ao conjunto temperaturas baixas.
$\mu_{A \cup B}$	função de pertinência correspondente a união dos conjuntos das temperaturas altas e baixas.
μ_{caln}	função de pertinência correspondente ao conjunto caln;
μ_{calp}	função de pertinência correspondente ao conjunto calp;
μ_{calz}	função de pertinência correspondente ao conjunto calz;
μ_{den}	função de pertinência correspondente ao conjunto den;
μ_{dep}	função de pertinência correspondente ao conjunto dep;
μ_{dez}	função de pertinência correspondente ao conjunto dez;
μ_{en}	função de pertinência correspondente ao conjunto en;
μ_{ep}	função de pertinência correspondente ao conjunto ep;
μ_{ez}	função de pertinência correspondente ao conjunto ez;
$\mu_{Nível-}$	função de pertinência correspondente ao conjunto Nível-
$\mu_{Nível_0}$	função de pertinência correspondente ao conjunto Nível_0
$\mu_{Nível+}$	função de pertinência correspondente ao conjunto Nível+
μ_{pH-}	função de pertinência correspondente ao conjunto pH-
μ_{pH_0}	função de pertinência correspondente ao conjunto pH_0
μ_{pH+}	função de pertinência correspondente ao conjunto pH+
$\mu_{vazão-}$	função de pertinência correspondente ao conjunto Vazão-
$\mu_{vazão_0}$	função de pertinência correspondente ao conjunto Vazão_0
$\mu_{Vazão+}$	função de pertinência correspondente ao conjunto Vazão+
μ_{VP-}	função de pertinência correspondente ao conjunto VP-
μ_{VP_0}	função de pertinência correspondente ao conjunto VP_0
μ_{VP+}	função de pertinência correspondente ao conjunto VP+.
den	derivada erro negativo

dep	derivada erro positivo
dez	derivada erro zero
en	erro negativo
ep	erro positivo
ez	erro zero
fA	Fluxo do produto A;
fB	Fluxo do produto B:
fp	Função de pertinência
GP1(s)	Ganho da perturbação um
GP2(s)	Ganho da perturbação dois
GP3(s)	Ganho da perturbação três
k1	Ganho um
k2	Ganho dois
k3	Ganho três
M1	Reservatório de caldo;
ncal-	Nível baixo do reservatório da cal;
ncal+	Nível alto do reservatório da cal;
ncal0	Nível médio do reservatório da cal;
Nível-	diminuição no nível de cal,
Nível_0	não variação do nível de cal,
Nível+	elevação no nível de cal
p1(t)	Perturbação causada pela variação no nível do tanque;
p2(t)	Perturbação causada pela variação da concentração da cal;
p3(t)	Perturbação causada pela variação do pH do caldo de entrada;
pH	Potencial hidrogeniônico
pH-	diminuição do pH do caldo da entrada.
pH_0	não variação do pH do caldo da entrada
pH+	elevação do pH do caldo

pHC	Controlador de pH;
pHT1	Transmissor de pH da saída;
pHT2	Transmissor de pH da entrada;
PID	proporcional, integral e derivativo.
PID	Controlador proporcional, integral e derivativo;
PV	Variável de processo.
T1	Reservatório um de cal hidratado;
T2	Reservatório dois de cal hidratado;
V	Vazão de vapor.
V1	Válvula manual um;
V2	Válvula manual dois;
V3	Válvula de controle para a injeção de cal hidratada;
Vazão-	Diminuição do volume de vazão da entrada
Vazão_0	Não variação da vazão da entrada
Vazão+	Crescimento da vazão da entrada
V _G	Vazão grande;
V _M	Vazão média;
V _P	Vazão pequena.
τ_2	Constante de tempo dois
τ_1	Constante de tempo um
τ_3	Constante de tempo três

Sumário

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1	Contexto, Justificativa e Objetivo	1
1.2	Etapas do Processo de Fabricação de Açúcar e o Controle do pH	3
1.3	Organização do Trabalho	5

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1	Problemas do Controlador PID no Controle de pH.....	5
2.2	Princípios da Lógica <i>Fuzzy</i>	6
2.3	Breve Histórico da Lógica <i>Fuzzy</i>	7
2.4	Variáveis Linguísticas e Conjuntos <i>Fuzzy</i>	8
2.5	Operações Lógicas Envolvendo os Conjuntos <i>Fuzzy</i>	9
2.6	Funções de Pertinência	10
2.7	<i>Fuzzificação</i>	12
2.8	Regras de Implicação.....	13
2.9	<i>Defuzzificação</i>	16
2.10	Estrutura Básica de um Controlador <i>Fuzzy</i>	16
2.11	Controladores <i>Fuzzy</i> direto e Realimentado	17

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1	Descrição do Processo do Controle de pH do Caldo	19
3.2	Controlador <i>Fuzzy</i>	23
3.3	Funções de Pertinência	25
3.4	Regras de Implicação.....	28
3.5	Operações Lógicas entre as Funções de Pertinência	31

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1	Simulações.....	33
4.2	Resultados.....	36

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1	Conclusão	44
5.2	Perspectivas Futuras	44

Referências	46
--------------------------	----

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

1.1 Contexto, Justificativa e Objetivo

O controle do pH tem um significado vital para as indústrias de processos modernos, tais como unidades de processamento de alimentos, fábricas do setor biofarmacêutico, indústrias de ferro e aço, centrais térmicas, dentre outras, que executam várias operações onde a monitorização e controle de pH são críticos. Mais importante ainda, temos uma vasta e rápida globalização, que exige enorme foco no controle de efluentes industriais que utilizam tratamento de águas residuais de modo que o equilíbrio ecológico e ambiental, possam ser mantidos. O controle do pH, muitas vezes é tomado como ponto de referência para o controle de um processo, devido a natureza altamente não linear do processo de neutralização. Sendo o processo de neutralização do pH, de natureza multivariável, o pH pode ser considerado como um alvo em movimento, cujo controle preciso é quase impossível de alcançar (Singh, et al. 2015).

O controle de pH é reconhecido como ponto de referência para modelagem e controle de processos industriais altamente não lineares. Esse controle tornou-se mais difícil e exigente porque modernas indústrias de processo requerem sistemas de controle mais precisos, robustos e flexíveis para operações eficientes e confiáveis. Para atender a essas demandas do controle de pH, estratégias inteligentes, estão sendo cada vez mais empregadas em indústrias de processos modernos.(Singh, et al., 2014)

A preocupação com o aumento de produção e qualidade, de forma a garantir competitividade de produtos, buscando atender as normas ambientais, utilizando-se de tecnologias mais limpas, e que ao mesmo tempo possam garantir um local de trabalho seguro aos seus colaboradores, é fundamental.

Para o processo industrial da produção de açúcar, os sistemas de controle mostram-se fundamentais para um bom desempenho da fábrica. Entre esses sistemas, destaca-se o controle de pH, grandeza que indica a acidez, a neutralidade ou a alcalinidade de uma solução aquosa. O processo tem as características de forte não linearidade, várias entradas e propriedades variáveis no tempo. É difícil calcular os parâmetros em tempo real, a fim de manter o pH sem ajustes manuais. Na maioria das indústrias de açúcar, a forma manual de controle é utilizada para manter um valor desejável para o pH do açúcar, já que não há automação para controlar o pH. Ocorrem nesses casos, alterações indesejáveis do valor de pH quando a quantidade de reagente é variada continuamente. Esta é a principal razão para

procurar um novo tipo de controle a ser implementado no processo de controle de pH (Vijayaragavan, et al., 2015). Considerando ser muito difícil desenvolver a modelagem matemática para este processo, sugere-se o uso de um método inteligente para controlar o pH da solução (Suchithra, et al., 2016). A seguir faremos uma breve introdução, que dá a importância desse processo, na produção de açúcar.

O controle do pH é um processo importante na clarificação do caldo de cana-de-açúcar, para a produção e a qualidade do açúcar branco. A etapa de tratamento do caldo vem a ser uma etapa importante do processo de produção de açúcar, para a obtenção de um produto final de qualidade e um aumento da vida útil dos equipamentos utilizados nesse processo de produção, através da retirada de impurezas sólidas. Esses tratamentos, também são responsáveis por manter as características nutricionais da cana que são necessárias ao metabolismo das leveduras, pela eliminação das partículas coloidais e da diminuição de contaminantes microbianos que atrapalham o processo de recomposição das leveduras (Ageitec, 2019). Para que se consiga produzir um açúcar dentro da escala de cor ideal, o caldo é purificado, através de tratamentos físicos e químicos (Pinheiro; Finzer, 2016).

O processo de purificação é altamente dependente da medição e do controle do pH. Não obstante, em sistemas industriais, as soluções para o controle automático efetivo de pH são, em geral, bastante complexas (Karthik, 2010). De fato, devido às características não lineares, aliadas às dificuldades de manutenção dos sensores de pH, tanto na instalação de acidificação, como nas refinarias de açúcar, o controle de pH nem sempre é satisfatório (Elfatni; Bounahmidi, 2006). Porém, nessas indústrias de processamento, um dos fatores de grande importância é o controle do pH para o intervalo desejado, para que se possa atender aos padrões de qualidade estabelecidos (Vijayaragavan, et al., 2015).

A presença de tempo morto faz a função de transferência ser irracional e faz o projeto de simulação e controle muito complexo: (Sunori, et al., 2016). Os atuadores e sensores podem apresentar não linearidades, causando instabilidade no sistema de controle, zona morta e erro estacionário. Propriedades que variam ao longo do tempo podem aparecer, tornando o sistema de controle, sensível a pequenas perturbações quando o controlador trabalha perto do ponto de equilíbrio.

Dessa forma, neste trabalho, tem-se por objetivo mostrar o desempenho do controlador *fuzzy* em sistemas não-lineares, como o controle de pH do caldo no processo de caleação para a produção de açúcar, por meio de simulação, incluindo-se algumas possíveis perturbações e os detalhes do controlador proposto. Para enfatizar a eficácia do controlador *fuzzy*, faremos

um comparativo do seu desempenho com um controlador tradicional para este uso, o PID simples.

Os métodos de controle do pH são geralmente divididos em três categorias principais. A primeira categoria é do tipo em circuito aberto de controle, na qual o valor de controle de abertura é mantido em determinada posição durante um tempo específico. A segunda categoria com base no princípio de controle de retorno em que existe relação direta entre a abertura da válvula de controle e o valor de pH no processo. O terceiro método de controle que é largamente usado para o controle do pH é o controle antecipado, no qual o controlador irá compensar qualquer perturbação, antes que afete o processo. (Arun, et al.,2015)

1.2 Etapas do Processo de Fabricação de Açúcar e o Controle de pH

O processo completo da produção de açúcar inclui as seguintes etapas: lavagem da cana, esmagamento, extração, adição de cal, carbonização, filtração, adição de dióxido de enxofre, concentração, cristalização e secagem. A adição de cal, a carbonização e a adição de dióxido de enxofre são fases críticas do processo e precisam de um controle contínuo de pH. Depois da lavagem da cana, ocorre a moagem com uma corrente contrária de água quente para se efetuar a extração em um difusor. O caldo bruto assim obtido deve ser tratado com uma solução de cal, isto é, hidróxido de cálcio (CaOH).

A adição de cal é necessária para que se neutralizem os ácidos provenientes da cana de açúcar e, com isso, se evite que a sacarose se converta em amido, pelo processo de hidrólise, ou a inversão para outras formas de açúcar. O leite de cal é adicionado para a solução de sacarose a fim de neutralizar o seu valor de pH para 7 (Karthik; Valarmathi, et al. 2011). Regulação do pH manualmente para cada corrida é uma tarefa pesada e requer muito tempo, também, a mesma definição pH, nos diz que o processo é não-linear (Abdullah e Brahim, 2012).

Além do mais, a adição de cal permite que se precipitem os ácidos orgânicos na forma de sais, facilitando assim a sua remoção. Outros tipos de materiais, tais como materiais orgânicos insolúveis e proteínas são mantidas em suspensão no caldo. Esses materiais são então removidos facilmente no processo de filtração.

Um outro processo que exige controle de pH é a carbonização. Nessa etapa, os traços de cal são removidos antes de se iniciar o processo de concentração, evitando, deste modo, o acúmulo de material. O dióxido de carbono é adicionado ao caldo para precipitar a cal e outras impurezas. Isto é efetuado por meio da reação $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$, pois o CaCO_3 é

sólido. Em seguida, o caldo é aquecido e dióxido de carbono é adicionado com a finalidade de se efetuar o controle de pH. Para que se consiga o melhor processo de purificação, a carbonização pode ser feita em dois estágios. Desta forma, evitam-se dificuldades na precipitação que podem ocorrer quando se executa o processo em apenas uma etapa. Com o propósito de assegurar a perfeita retirada de impurezas e de cálcio, torna-se necessário que se garanta o melhor controle possível de pH em todos os estágios. Depois da carbonização, o caldo é filtrado, para que se retirem todas as possíveis partículas sólidas. O estágio seguinte é a sulfitação. Nessa etapa, adiciona-se dióxido de enxofre, em alta temperatura. Por meio desse processo, o pH fica em torno de 5 a 6, com o fim de ser levado aos evaporadores. O dióxido de enxofre produz também o efeito de clarear o caldo, melhorando o seu odor e a sua textura. Se esta etapa não fosse executada, seria produzido um caldo alcalino que resultaria na formação de cristais agrupados devido à absorção de umidade, além de um sabor indesejável. A etapa final na produção de açúcar é a evaporação que resulta um produto com características neutras. Finalmente, são utilizadas centrífugas para que sejam retirados possíveis sólidos no produto.

Por ser um processo contínuo, o controle de pH torna-se bastante vulnerável às perturbações do processo. Na seção seguinte, descrevem-se algumas características desse processo, enfatizando-se a necessidade de se aplicarem técnicas de controle multivariável, para que a influência dessas perturbações possa ser tratada de forma conveniente. Além de multivariável, deve-se considerar as características não lineares do processo, que justificam a aplicação de técnicas de controle avançado, como o controlador *fuzzy*. Sendo assim, neste trabalho, optou-se pelo uso de controladores *fuzzy*, considerando-se algumas perturbações possíveis. O uso de controlador *fuzzy*, também pode-se justificar por:

- Não exigir conhecimento a priori das equações dinâmicas do processo;
- As regras de controle *fuzzy* são independentes, o que torna o sistema confiável e menos sensível a perturbações externas;
- As regras de controle *fuzzy*, são criadas a partir do senso comum, garantindo maior compreensão por parte do pessoal da manutenção.

1.3 Organização do Trabalho

Neste trabalho apresenta-se o desempenho do controlador *fuzzy* por meio de simulações, utilizando-se funções de transferência de primeira ordem como modelo do processo. E embora o sistema seja reconhecidamente não linear, o uso de um modelo linear é aceitável em torno do ponto de operação utilizado. Técnicas de controle lineares e não lineares ou a mistura delas são usadas para controlar plantas reais (Cavalcanti, et al., 2008). Os valores dos parâmetros da função de transferência foram obtidos analisando-se constantes de tempo típicas em usinas de açúcar. Os resultados da simulação são apresentados, incluindo-se uma análise do desempenho da estratégia de controle utilizado.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Problemas do Controlador PID no Controle de pH

O controlador PID é empregado na maioria das plataformas de controle comerciais, sendo robusto, de fácil entendimento, e é capaz de prover desempenho satisfatório para uma grande variedade de processos industriais. (Chen; Seborg, 2003). Entretanto, os controladores PIDs não são capazes de prover soluções satisfatórias para o controle de pH. O controle do pH é muito difícil e depende de técnicas de controle não lineares, controladores baseados em lógica *fuzzy* e de rede neural são exemplos das estratégias de controle não lineares que proporcionam um desempenho satisfatório de controle, em comparação com os sistemas de controle clássicos. Os controladores PI convencionais não são capazes de controlar o sistema não linear de forma satisfatória. Controle de lógica *fuzzy* proporciona uma melhor escolha. (Arun, et al., 2015)

Na prática, o que se emprega na maioria dos processos é o controle linear de plantas não lineares. O mais utilizado pela indústria atual é o controlador PID. (Bazanella; Gomes, 2005).

Três parâmetros ponderam as ações do controlador PID. São eles os proporcionais, integrais e derivativos ao sinal do erro. O sinal do erro é gerado pela diferença entre o sinal de referência (*setpoint*) e o sinal de saída da planta. O controlador PID trabalha com o modelo matemático que representa satisfatoriamente a planta, tarefa difícil para sistemas complexos e não lineares.

Para aplicação de um controlador PID, normalmente aproxima-se o comportamento do sistema para um modelo linear, em malha fechada. Temos então o modelo linearizado da planta, em torno de um ponto de operação. Nessa aproximação, normalmente temos uma diferença de desempenho do sistema real.

Caso o sistema apresente alguma alteração que torne o seu comportamento não-linear, o controle automático é interrompido, e os operadores tentam conduzir, manualmente, o sistema para uma situação estável e segura.

É importante salientar que nem sempre essa aproximação é satisfatória, logo as técnicas de controle clássicas devem ser substituídas por outras técnicas.

O fato de o controle PID existir a mais tempo, faz com que já tenhamos de forma difundida, uma vasta teoria para o controle de sistemas lineares.

Uma das dificuldades da utilização de técnicas de controle não linear é que não existe um método geral para se lidar com essas técnicas. (Ogata, 1985). Normalmente, são consideradas diferentes classes de processos não lineares e experimentadas várias ferramentas matemáticas. (Salgado, 2008). Além disso, há casos em que o modelo não linear é tão complexo que fica impraticável a utilização dessas técnicas de controle para o projeto de controladores com base no modelo. (Barros et al., 2006).

Se analisarmos as características do controlador PID, podemos perceber que o controlador *fuzzy* é uma importante ferramenta para o controle de processos em que as tecnologias de controle convencional podem ter baixo desempenho e exigir operadores humanos com larga experiência.

2.2 Princípios da Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy*, também denominada lógica nebulosa ou difusa, tem se tornado a opção mais prática e promissora para a implementação de sistemas de controle.

Podendo ser empregada em sistemas simples, como o de ar condicionado, máquinas de lavar roupas, e também em sistemas mais complexos, que em grande parte são representados pela indústria química. Sua compreensão se torna de fácil entendimento, já que sua teoria baseia-se na experiência, na intuição, no conhecimento especialista e a natureza imprecisa do processo decisório humano através de um conjunto de regras ou heurísticas simples. Em outras palavras, podemos dizer que a teoria *fuzzy* imita a ação dos operadores de máquinas e de grandes plantas industriais.

A lógica *fuzzy* se justifica por conferir ao sistema de controle uma série de vantagens, entre elas:

- Solução para problemas de controle até então intratáveis por técnicas clássicas;
- Não exige um tratamento complexo para o modelo do processo;
- Melhor tratamento das imprecisões inerentes as variações do sistema;
- Facilidade na especificação das regras de controle, em linguagem próxima à natural;
- Associação do raciocínio lógico humano.

2.3 Breve Histórico da Lógica *Fuzzy*

A Teoria de Conjuntos *Fuzzy*, introduzida em 1965 por Lotfi A. Zadeh, publicou o primeiro artigo sobre a teoria dos conjuntos nebulosos para tratar as incertezas não probabilísticas, o que foi denominado *Fuzzy Sets*. É importante salientar que a teoria dos conjuntos e a teoria de probabilidades, embora muito úteis, nem sempre conseguem captar a riqueza da informação fornecida pelos seres humanos, pois baseiam-se na idéia de um elemento pertencer ou não a um determinado conjunto.

O artigo publicado por Zadeh contribuiu para o desenvolvimento da lógica *fuzzy*, que permitiu a um elemento pertencer a um conjunto com certo grau de pertinência, ou seja, sugere que alguns elementos possam ser mais membros de um conjunto do que outros. Ele tinha como objetivo fornecer ferramentas matemáticas capazes de lidar com o raciocínio lógico que contemplassem aspectos imprecisos e ambíguos. A partir de 1978, Zadeh desenvolveu a teoria das possibilidades, para tratar a incerteza da informação, comparável com a teoria de probabilidades.

A teoria criada por Zadeh, através da teoria dos conjuntos *fuzzy*, evoluiu para a área de controles de processos em algumas companhias japonesas, através dos trabalhos de Mandani e Sugeno, nas décadas de 70 e 80, respectivamente.

2.4 Variáveis Linguísticas e Conjuntos *Fuzzy*

Na teoria clássica de conjuntos, um elemento x pode pertencer ou não a um dado conjunto. Não há meio termo, isto é, não é possível que um elemento pertença um pouco a um

conjunto e um pouco a outro conjunto. Entretanto, isso é perfeitamente possível na teoria dos conjuntos *fuzzy*.

Diariamente empregamos o conceito de conjuntos *fuzzy*, representando conceitos linguísticos como alto, médio ou baixo, na intenção de definirmos o estado de uma variável. Que é tratada na lógica *fuzzy*, como variável linguística ou variável *fuzzy*.

O fato das variáveis *fuzzy* permitirem uma transição gradual entre conjuntos é de grande importância, pois assim, podemos trabalhar com variáveis incertas. Para melhor compreensão, apresentaremos uma situação de aplicação.

Considere um forno, onde precisamos classificar as temperaturas como BAIXAS, MÉDIAS e ALTAS.

Cria-se, então, uma tabela, classificando-se as medidas com pesos que variam entre 0 e 1, e que definam a pertinência dos elementos aos conjuntos. Por exemplo, a classificação de temperaturas poderia ser como na tabela 1.

Quadro 1: Pertinência dos conjuntos BAIXAS, MÉDIAS E ALTAS.

CONJUNTOS	PERTINÊNCIA				
BAIXAS	1	0,8	0,5	0,2	0
MÉDIAS	0	0,5	1	0,5	0
ALTAS	0	0,2	0,5	0,8	1
TEMPERATURAS (°C)	10	20	30	40	50

Fonte: Autor

Os valores das temperaturas, assim como as grandezas de engenharia, de um modo geral são conhecidos como universo de discurso. Podemos também representar os conjuntos *fuzzy* da seguinte forma:

$$\text{BAIXAS} = \left\{ \frac{1}{10}, \frac{0,8}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,2}{40}, \frac{0}{50} \right\}$$

$$\text{MÉDIAS} = \left\{ \frac{0}{10}, \frac{0,5}{20}, \frac{1}{30}, \frac{0,5}{40}, \frac{0}{50} \right\}$$

$$\text{ALTAS} = \left\{ \frac{0}{10}, \frac{0,2}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,8}{40}, \frac{1}{50} \right\}$$

Observe que se trata somente de uma representação, não tendo o traço horizontal o significado de fração ou divisão.

2.5 Operações Lógicas Envolvendo os Conjuntos *Fuzzy*

Considere que, no exemplo anterior, se crie outro conjunto que contenha tanto os elementos considerados altos como aqueles considerados baixos, excluindo-se os médios. Isso equivale a operação lógica OU, que é também a operação de união de dois conjuntos. Por definição a operação lógica OU entre dois conjuntos nebulosos é realizada tomando-se o valor máximo de pertinência, isto é:

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B)$$

onde:

μ_A : função de pertinência correspondente ao conjunto das temperaturas altas.

μ_B : função de pertinência correspondente ao conjunto temperaturas baixas.

$\mu_{A \cup B}$: função de pertinência correspondente a união dos conjuntos das temperaturas altas e baixas.

No caso do exemplo citado, pode-se criar um conjunto contendo tanto os elementos das ALTAS como os elementos das BAIXAS, obtendo-se:

$$\text{ALTAS} \cup \text{BAIXAS} = \left\{ \frac{1}{10}, \frac{0,8}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,8}{40}, \frac{1}{50} \right\}$$

A operação lógica E é, por definição, realizada obtendo-se uma função de pertinência que é o mínimo entre os conjuntos. Esta operação é também conhecida como a interseção entre os dois conjuntos.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B)$$

No caso do exemplo citado, pode-se criar um conjunto contendo os elementos das ALTAS e das BAIXAS, ao mesmo tempo. Observe que a função de pertinência resultante é semelhante ao conjunto das médias, porém não é idêntica.

$$\text{ALTAS} \cap \text{BAIXAS} = \left\{ \frac{0}{10}, \frac{0,2}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,2}{40}, \frac{0}{50} \right\}$$

A operação de negação ou complemento é realizada, por definição por:

$$\mu_{\overline{B}} = 1 - \mu_B$$

Desta forma, o conjunto das não BAIXAS será:

$$\overline{\text{BAIXAS}} = \left\{ \frac{0}{10}, \frac{0,2}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,8}{40}, \frac{1}{50} \right\}$$

2.6 Funções de Pertinência

Os conjuntos *fuzzy* podem também ser representados por funções contínuas das mais variadas formas, como: triangular, trapezoidal, gaussiana, em forma de sino, entre outras. Através de tentativa e erro, deve-se determinar a forma apropriada para cada aplicação específica. É importante lembrar que, isso normalmente não causa alterações na resposta, já que a maioria das aplicações não são muito sensíveis a variação na forma dessas funções.

Essas funções contínuas que representam os conjuntos *fuzzy*, são chamadas de funções de pertinência. Considerando os conjuntos de pertinência das temperaturas representados na Tabela 1, temos as funções de pertinência representadas nas figuras a seguir.

$$\text{Conjunto de temperaturas: BAIXAS} = \left\{ \frac{1}{10}, \frac{0,8}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,2}{40}, \frac{0}{50} \right\}$$

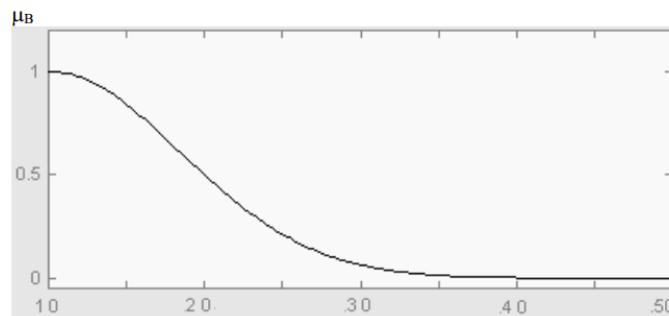


Figura 1: Função de pertinência para o conjunto das temperaturas baixas.

Fonte: Autor

Conjunto de temperaturas: MÉDIAS = $\{\frac{0}{10}, \frac{0,5}{20}, \frac{1}{30}, \frac{0,5}{40}, \frac{0}{50}\}$

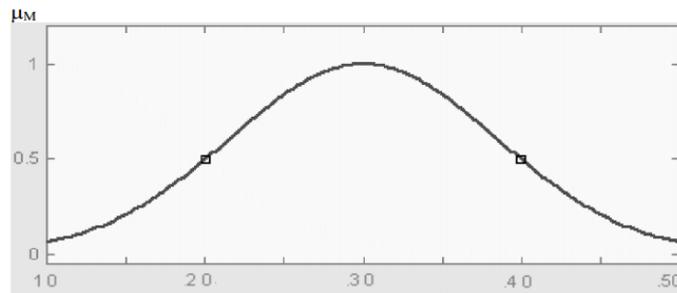


Figura 2: Função de pertinência para o conjunto das temperaturas médias.

Fonte: Autor

Conjunto de temperaturas ALTAS = $\{\frac{0}{10}, \frac{0,2}{20}, \frac{0,5}{30}, \frac{0,8}{40}, \frac{1}{50}\}$

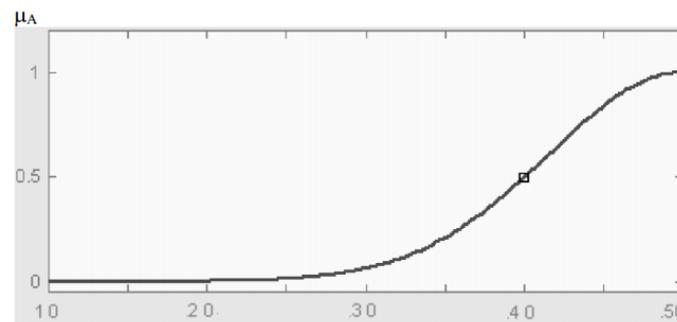


Figura 3: Função de pertinência para o conjunto das temperaturas altas.

Fonte: Autor

Estas funções podem também ter formas mais simples como na figura 4. Observe que, nesse caso, as três funções de pertinência estão representadas no mesmo gráfico e na forma triangular.

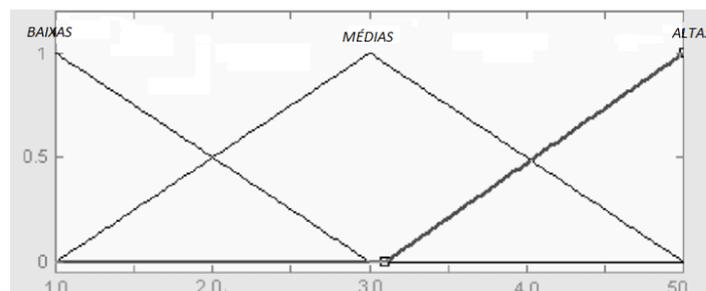


Figura 4: Função de pertinência triangular para todos os conjuntos de temperaturas.

Fonte: Autor

Na figura 5, temos a representação na forma trapezoidal de três funções de pertinência.

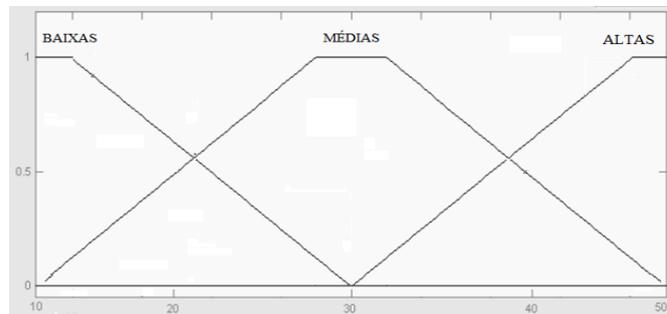


Figura 5: Função de pertinência na forma trapezoidal

Fonte: Autor

Essas funções são também denominadas por funções de pertinência, por representarem o quanto cada elemento pertence a um conjunto *fuzzy*.

Observe que se decidiu por classificar as grandezas em pequenas, médias e grandes. Entretanto, se for conveniente, pode-se aumentar essa classificação, como por exemplo, muito pequena, pequena, média, grande e muito grande. Denomina-se grau de cardinalidade ao número de classes que se classificam as grandezas. Sendo assim, neste exemplo, as grandezas possuem cardinalidade igual a 3.

2.7 Fuzzificação

A *fuzzificação* é um processo que transforma os valores obtidos das medições de campo, em valores de pertinência de um conjunto *fuzzy*. Esses valores das medições, são as entradas do controlador *fuzzy*. Podemos caracterizar esse processo de *fuzzificação*, por:

- **Entradas objetivas:** trata-se do caso apresentado no exemplo anterior, onde os valores de entrada são o resultado de medições confiáveis, no campo. Nesse caso, basta obter o valor de pertinência correspondente usando as funções preestabelecidas.
- **Entradas subjetivas:** não se têm medidas precisas, ou então, não são feitas medidas, como no caso de perturbações. Os resultados obtidos no tratamento dessas perturbações dependem dos critérios e destreza do operador. Sistemas automáticos podem ser criados, utilizando-se da lógica *fuzzy* e os critérios dos operadores.

2.8 Regras de Implicação

As regras de implicação são criadas a partir de uma base de dados de entrada, normalmente fornecidos por sensores, e do conhecimento técnico do processo. Utilizando-se dessas regras, construímos uma base de regras, que associada às variáveis de entrada, serão a referência para a atuação do controlador *fuzzy*. As regras são independentes, o que torna o sistema menos vulnerável.

Um sistema de inferência *fuzzy*, de maneira geral, é armazenado na forma de regras composta pelos termos, antecedente SE, e o conseqüente ENTÃO, e também das operações que envolvem a lógica *fuzzy* como, união, interseção e etc. Nesse instante as decisões serão tomadas.

Verificando o grau de compatibilidade entre os dados e as regras, o procedimento de inferência, atua de forma a determinar um valor de saída do controlador *fuzzy*, a partir da agregação dos valores obtidos como conclusão de todas as regras. A sequência em que as regras são disparadas, não interfere no resultado final.

De maneira geral, temos os controladores *fuzzy* do tipo MAMDANI, onde as regras de implicação dos sistemas são definidos e do tipo SUGENO, cada regra conduz a tomada de decisão representada por uma função das variáveis *fuzzy* de entrada, como pode-se ver a seguir:

- Se x é A , então y é B \longrightarrow MAMDANI
- Se x é A , então y é $f(x)$ \longrightarrow SUGENO

O controlador do tipo SUGENO não precisa do *defuzzificador*, pois sua saída é dada pela média ponderada das respostas das regras.

O controlador do tipo MAMDANI converte os valores quantitativos em funções de pertinência, ou seja valores qualitativos. Para cada regra temos um resultado e como resultado final, temos uma função de pertinência, correspondente a inferência de todas as regras. Sendo assim torna-se necessário a utilização do *defuzzificador* para a resposta final quantitativa.

Na figura 6, é representado um forno com três entradas.

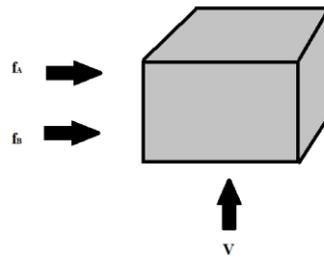


Figura 6: Representação de um forno com três entradas.

Fonte: Autor

Onde:

f_A : fluxo do produto A;

f_B : fluxo do produto B;

V : vazão de vapor.

Considere que a vazão de vapor deva variar de forma a estabelecer as características desejadas da mistura com base nos fluxos dos produtos f_A e f_B . As regras que serão apresentadas estão de forma a permitir um fácil entendimento.

- Se f_A for pequeno e f_B for pequeno então V deverá ser pequeno;
- Se f_A for pequeno e f_B for médio então V deverá ser pequeno;
- Se f_A for pequeno e f_B for grande então V deverá ser médio;
- Se f_A for médio e f_B for pequeno então V deverá ser pequeno;
- Se f_A for médio e f_B for médio então V deverá ser médio;
- Se f_A for médio e f_B for grande então V deverá ser médio;
- Se f_A for grande e f_B for pequeno então V deverá ser médio;
- Se f_A for grande e f_B for médio então V deverá ser grande;
- Se f_A for grande e f_B for grande então V deverá ser grande.

Essas regras podem ser escritas de forma mais concisa por:

- Se f_A pequeno e f_B pequeno \longrightarrow V pequeno;
- Se f_A pequeno e f_B médio \longrightarrow V pequeno;
- Se f_A pequeno e f_B grande \longrightarrow V médio;
- Se f_A médio e f_B pequeno \longrightarrow V pequeno;
- Se f_A médio e f_B médio \longrightarrow V médio;

- Se f_A médio e f_B grande \longrightarrow V médio;
- Se f_A grande e f_B pequeno \longrightarrow V médio;
- Se f_A grande e f_B médio \longrightarrow V grande;
- Se f_A grande e f_B grande \longrightarrow V grande;

Pode-se, também, usar a tabela a seguir, para representar essas regras:

Quadro 2: Regras de implicação.

		f_A		
		P	M	G
f_B	P	V_P	V_P	V_M
	M	V_P	V_M	V_M
	G	V_M	V_G	V_G

Fonte: Autor

onde:

V_G : vazão grande;

V_M : vazão média;

V_P : vazão pequena.

Na tabela acima, podemos ter até nove regras, entretanto, pode-se perfeitamente, atuar com um número menor. É importante salientar que o fato de usarmos um maior número de regras, garante maior estabilidade ao controle do sistema, tornando-o menos vulnerável as perturbações e outras possíveis variações.

Por definição, a função de pertinência da resposta deverá ser feita realizando-se a composição do antecedente de cada regra obtendo-se uma função de pertinência correspondente. Em seguida, faz-se uma operação de mínimo desse resultado com a função de pertinência do conseqüente. Desta forma, são obtidas várias funções de pertinência correspondentes à aplicação de todas as regras. As regras estão apresentadas a seguir:

$$\mu_{Resposta} = \min(\mu_{V_P}, \min(\mu_{f_{Ap}}, \mu_{f_{Bp}}))$$

$$\mu_{Resposta} = \min(\mu_{V_P}, \min(\mu_{f_{Ap}}, \mu_{f_{Bm}}))$$

$$\mu_{Resposta} = \min(\mu_{V_M}, \min(\mu_{f_{Ap}}, \mu_{f_{Bg}}))$$

$$\mu_{Resposta} = \min(\mu_{V_P}, \min(\mu_{f_{Am}}, \mu_{f_{Bp}}))$$

$$\mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{V_M}, \min(\mu_{f_{A_M}}, \mu_{f_{B_M}}))$$

$$\mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{V_M}, \min(\mu_{f_{A_M}}, \mu_{f_{B_G}}))$$

$$\mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{V_M}, \min(\mu_{f_{A_G}}, \mu_{f_{B_P}}))$$

$$\mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{V_G}, \min(\mu_{f_{A_G}}, \mu_{f_{B_M}}))$$

$$\mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{V_G}, \min(\mu_{f_{A_G}}, \mu_{f_{B_G}}))$$

Também, por definição, a função de pertinência resultante da combinação de todas as regras deverá ser obtida executando-se a operação OU lógico entre os conjuntos resultantes. Portanto, basta tomar como resultante uma função que seja igual ao máximo entre as funções obtidas para cada regra. Por essa razão, essa forma de composição é conhecida como método MIN-MAX.

2.9 Defuzzificação

A *defuzzificação* é a transformação de um conjunto *fuzzy* para um conjunto escalar, ou seja, é um processo que transforma informações qualitativas em quantitativas. É onde se obtém um valor numérico da grandeza de engenharia a partir da função de pertinência resultante. Há vários métodos de *defuzzificação*, dentre os quais destacamos:

- **Método do centro de área:** o valor resultante é obtido tomando-se o valor do universo de discurso correspondente ao centro geométrico da área sob a curva.
- **Método da média ponderada:** obtém-se o valor resultante tomando-se a média ponderada entre os valores de pertinência e os valores do universo de discurso correspondente.
- **Método da média dos máximos:** nesse caso, tomam-se os valores máximos da curva resultante e obtém-se a média dos universos de discurso correspondentes.

2.10 Estrutura básica para um controlador *fuzzy*

A partir do sinal de referência e das leituras apresentadas por sensores na saída do processo, são geradas informações que servem como entradas para o controlador *fuzzy*. Essas informações são *fuzzyficadas* e processadas em função da base de regras *fuzzy*. Logo, são *defuzzyficadas*, para que os atuadores possam intervir no processo. A seguir apresentamos uma figura para representarmos uma estrutura básica de um controlador do tipo MAMDANI, lembrando que o controlador do tipo SUGENO não precisa de um *defuzzificador*.

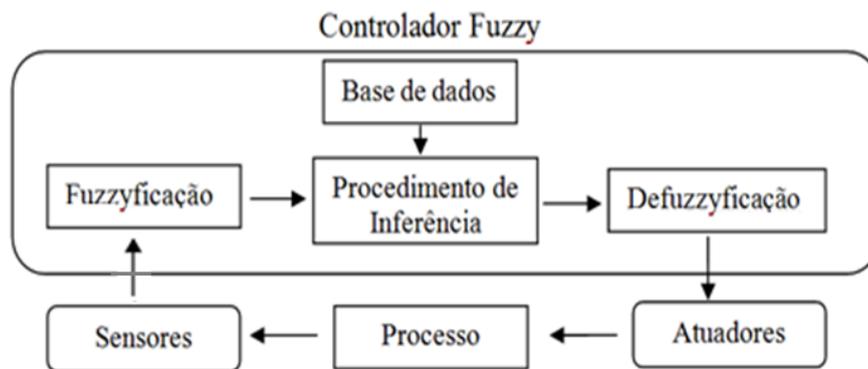


Figura 7: Estrutura básica de um controlador *fuzzy*

Fonte: Adaptado Gomide, 1994

Nesta figura 7 observa-se que o controlador *fuzzy* consiste de quatro principais unidades:

- *Fuzzificador* transforma os valores obtidos das medições de campo, em valores de pertinência de um conjunto *fuzzy*;
- Regras *fuzzy* (Base de dados) representam os conhecimentos técnicos, associados à experiência humana do sistema;
- Inferências *fuzzy* atuam no sistema associando as variáveis de entrada com as regras *fuzzy*;
- *Defuzzificador* transforma as saídas do controlador *fuzzy* em um valor de numérico para o sistema.

2.11 Controladores *Fuzzy*, Direto e Realimentado

Assim como no controle convencional, os controladores nebulosos podem ser classificados em dois grupos:

- Controlador *fuzzy* direto
- Controlador *fuzzy* realimentado

O **controlador *fuzzy* direto** atende a sistemas onde existam muitas entradas e perturbações que envolvam grandes valores de atrasos de transporte. Pois o atraso na informação da saída, torna essa informação não muito útil para o sistema de controle. O controle direto minimiza os custos com sensores e atuadores. Na figura 8, temos uma representação geral desta situação.

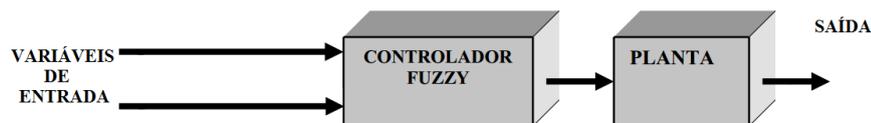


Figura 8: Controlador *fuzzy* aplicado a sistema sem realimentação.

Fonte: Autor

Na figura 9, utilizamos os módulos *Simulink* e *Fuzzy* do sistema *Matlab*, para representarmos um controle *fuzzy* direto. Observe que as duas entradas do sistema foram simuladas utilizando-se a composição com uma perturbação para evidenciar possíveis variações das entradas.

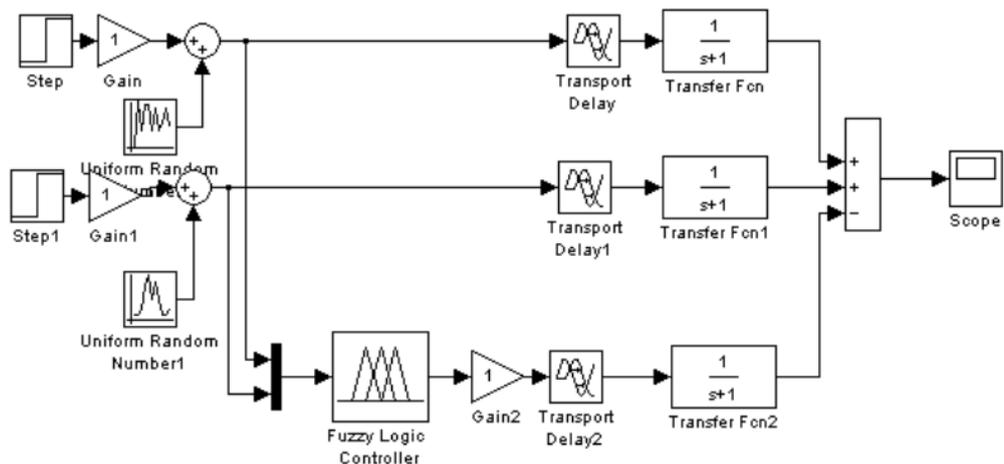


Figura 9: Simulação no módulo *Simulink* do sistema *Matlab*, para um controlador *fuzzy* direto

Fonte: Autor

O controlador *fuzzy* realimentado é conveniente para aqueles sistemas com características não-lineares e com grandes faixas de atuação, porém com atrasos de transporte que se enquadrem dentro da faixa estabelecida por Ziegler-Nichols para o controlador de Smith. Atrasos maiores que este só podem ser resolvidos, com o controle direto apresentado anteriormente.

A proposta apresentada na figura 10 é a de um controlador *fuzzy* realimentado, que utiliza os valores do erro de controle e a variação do erro de controle como entradas para esse controlador.

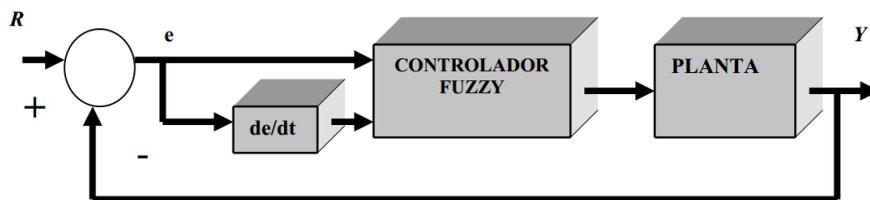


Figura 10: Controlador *fuzzy* aplicado a sistema com realimentação

Fonte: Autor

Novamente utilizamos os módulos *Simulink* e *Fuzzy* do sistema *Matlab*, para agora representarmos um controle *fuzzy* realimentado. Observe que o ganho denominado Gain2 na figura 11 tem o efeito de uma ação proporcional dependente. Alterando-se o seu valor, varia-se a velocidade de atuação do controlador nebuloso. Observa-se também que como a função de transferência da planta possui um integrador intrínseco (realimentação), não há a necessidade de integrador na malha direta. Caso contrário, seria necessário incluir um integrador em série com Gain2 na malha direta.

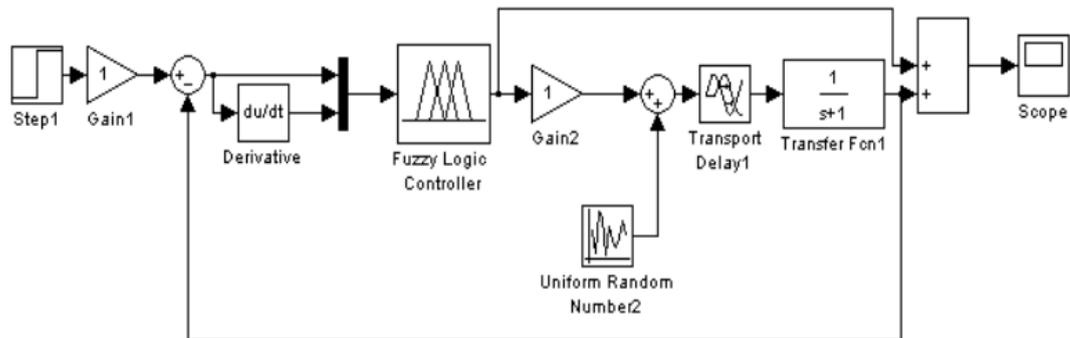


Figura 11: Simulação no módulo *Simulink* do sistema *Matlab*, para um controlador *fuzzy* aplicado a um sistema com realimentação

Fonte: Autor

CAPÍTULO 3 –MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do Processo e Controle de pH do Caldo

O controle de pH é reconhecido como um problema de controle industrialmente importante, mas notoriamente difícil, devido a não linearidade e sensibilidade extrema forte para perturbações do processo. (Norquayat, al., 1999) (Wan, et al., 2006)

O tempo morto presente, é altamente indesejável, cujo efeito deve ser anulado, porque não só aumenta o tempo de resposta, mas também pode levar à instabilidade no sistema de controle. O aumento no valor de tempo morto reduz o valor máximo de ganho K, em cima do qual o sistema torna-se instável, o que é uma limitação grave (Ogunnaike; Ray, 1994).

O processo de caleação consiste em adicionar ao caldo, o leite de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), afim de se obter um caldo com pH mais neutro. Pois o pH determina as características de coagulação e precipitação dos colóides presentes no caldo, responsáveis pela formação de substâncias que causam incrustações nos aparelhos de destilação. O caldo sai da sulfitação com pH em torno de 4 e, após a caleação, atinge valores em torno de 7. A vazão de caldo, a qualidade da cana, a qualidade do leite de cal e a dinâmica da planta industrial, são variáveis que influenciam o sistema de controle do pH.

Em geral, a solução de cal é preparada em mais de um reservatório evitando-se, por conseguinte, a parada de produção por falta desse componente. O processo é realizado de forma manual pelos operadores da planta. Há várias configurações para este processo, sendo que algumas caracterizam-se por proporcionarem um controlador mais estável. Em alguns

casos, há um reservatório intermediário com controle de nível, o que permite que a alimentação de cal seja conduzida de forma linear por meio da válvula de controle, por gravidade. Para evitar decantação, há recirculação por bombeamento entre o reservatório intermediário e os reservatórios de preparação. Em outros casos, não existe o reservatório intermediário, causando uma variação da pressão na válvula o que dificulta a ação de controle. Essa variação se traduz em uma perturbação na variável de controle, representada por P_1 , no diagrama ilustrado na figura 13.

Deve-se também considerar a variação do pH do caldo na entrada do processo. Essa perturbação, aqui denominada P_2 , influencia também a variável de controle, porém com uma periodicidade diferente da perturbação P_1 . Por outro lado, aplicar um controle de vazão, da entrada de caldo, no tanque de dosagem assegura que o processo seja alimentado da forma mais homogênea, facilitando o controle de dosagem de cal. Fornecer uma relação entre volume de caldo com volume de cal para elevar o pH é de grande relevância nesse processo. Nesse caso, no modelo apresentado neste trabalho, considera-se que esta perturbação, agora denominada P_3 , teria uma atuação direta na variável final do processo, com uma periodicidade diferente das demais perturbações.

Na figura 12, apresenta-se um diagrama simplificado do processo, com os seguintes elementos: pH_1 e pH que são os transmissores de pH da entrada e da saída respectivamente, pHC refere-se ao controlador de pH; $T1$ e $T2$ são os reservatórios que contêm a solução de cal hidratado; v_1 e v_2 são válvulas manuais; v_3 representa a válvula de controle para a injeção de cal hidratada e $M1$ é o reservatório de caldo.

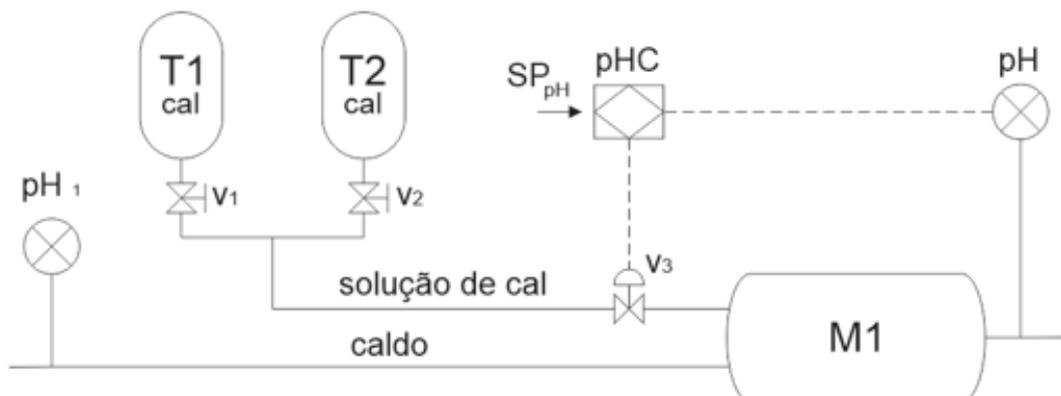


Figura 12 – Diagrama de processo e de instrumentação (P&I) do controle de pH do caldo.

Apesar da característica não linear do modelo dinâmico do pH, considera-se, neste trabalho, um modelo simplificado do processo, por meio de uma função de transferência de

primeira ordem com atraso, conforme proposto por Sunori et al. (2016), sendo representada pela equação 1. Observa-se que, fisicamente, não há tempo morto, por se tratar de fluido não compressível. Entretanto, o atraso de transporte apresentado na equação 1, refere-se a uma aproximação de um sistema de ordem superior para a função de primeira ordem,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

onde $G(s)$ é a função de transferência, $Y(s)$ é a variável de saída, correspondendo ao pH do caldo após a adição de cal, na escala de 0 a 14, e $F(s)$ é a abertura da válvula, na escala de 0 a 100%. Ademais, K é o ganho do sistema, θ é o tempo morto e τ é a constante de tempo do processo. Considerando-se que os ranges estabelecidos estejam corretamente implantados nos transmissores, pode-se, neste caso, considerar o ganho adimensional $K=1$. Os valores do tempo morto e da constante de tempo do processo foram estimados em 30 segundos e 2 minutos, respectivamente. Esses valores são o resultado da experiência prática dos operadores do processo, em usinas de produção de açúcar. Por se tratar de um trabalho baseado em simulação, torna-se desnecessário o uso de valores precisos de uma usina específica. Entretanto, a ordem de grandeza dos valores está coerente com os casos práticos das usinas visitadas. Na figura 13, apresenta-se o diagrama de controle do processo, incluindo-se as perturbações destacadas anteriormente. Simula-se, nesta análise, o caso específico de processo, onde a cal é alimentada por gravidade e utilizando-se uma válvula como elemento final de controle. Desta forma, devido a variação do nível do reservatório, tem-se diferentes valores de vazão para uma mesma abertura de válvula. Por esse motivo, o nível do reservatório é tratado pelo controlador *fuzzy* como uma perturbação. Outras duas perturbações utilizada na base de regras são a variação de pH do caldo na entrada e a variação da vazão de entrada, desse caldo. Sendo assim, torna-se fundamental, para a aplicação da estratégia de controle apresentada, a instalação de transmissores, de pH e de vazão, na entrada do processo e de nível no reservatório de cal. Essas perturbações são alimentadas no controlador *fuzzy* na forma de derivada, para que somente influenciem o elemento final de controle quando variarem. Quando estiverem em repouso, a abertura da válvula estará sob a ação do termo integral do controlador, de forma a garantir a eliminação do erro de regime permanente. O caráter antecipatório da derivada das perturbações produz o efeito desejado de praticamente eliminar as influências indesejáveis dessas três grandezas. Entretanto, há outras perturbações que não são consideradas na base de regras. Dentre elas, destaca-se a variação na

concentração de cal, que não é considerada na base de regras do controlador *fuzzy* por se considerar que, em geral, não são instalados transmissores para medi-las nas usinas de açúcar.

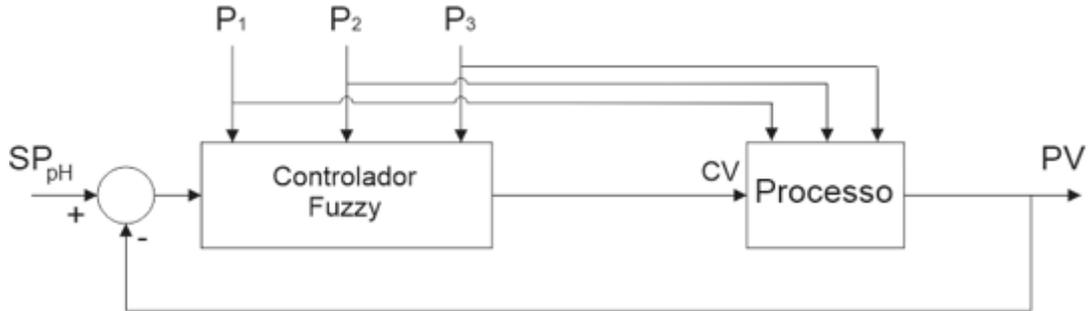


Figura 13 – Diagrama de controle de pH do caldo.

Para se ilustrar tais perturbações na simulação, foram utilizadas funções de transferência de primeira ordem, com constantes de tempo compatíveis com a realidade das usinas de produção de açúcar. Para efeito de simulação foram utilizadas as funções apresentadas nas equações (2), (3) e (4), correspondendo ao nível do reservatório de cal $G_{P1}(s)$, a variação do pH do caldo de entrada $G_{P2}(s)$ e à variação da vazão de entrada do caldo $G_{P3}(s)$, respectivamente.

$$G_{P1}(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \quad (2)$$

$$G_{P2}(s) = \frac{k_2}{\tau_2 s + 1} \quad (3)$$

$$G_{P3}(s) = \frac{k_3}{\tau_3 s + 1} \quad (4)$$

Onde $k_1, \tau_1, k_2, \tau_2, k_3$ e τ_3 são os ganhos e as constantes de tempo correspondentes as perturbações P_1, P_2 e P_3 , respectivamente. Para efeito de simulação os ganhos foram ajustados arbitrariamente no sentido de mostrar as suas influências no processo de controle. Entretanto, os valores das constantes de tempo foram obtidos de forma empírica por observações em usinas de açúcar em $\tau_1 = 4\text{min}$, $\tau_2 = 3\text{min}$ e $\tau_3 = 20\text{min}$. Para se realizar a simulação do processo controlado utilizou-se o sistema *Matlab/Simulink*, juntamente com o *Toolbox Fuzzy*.

O modelo de controlador *fuzzy* empregado inclui as influências das perturbações em sua base de regras. Nesse caso específico, foram utilizadas, na base de regras, as variações do nível do reservatório de cal, do pH de entrada e a variação da vazão de entrada do caldo de cana. Embora a variação da concentração de cal não seja considerada na base de regras, ela entra como uma perturbação na variável de controle e é corrigida pelo efeito integral do controlador.

3.2 Controlador *Fuzzy*

O controlador *fuzzy* desenvolvido e apresentado leva em consideração as perturbações mais importantes que afetam o controle de um sistema, de forma preditiva. Para tanto, essas perturbações devem ser mensuráveis, como é o caso do nível do reservatório de cal, do pH de entrada do caldo e da vazão de entrada do caldo. A forma teórica e convencional de se tratar esse problema é por intermédio de técnicas de controle preditivo baseadas no modelo multivariável da planta. Esse modelo deveria envolver a resposta da saída perante cada uma das perturbações. Entretanto, a determinação desse modelo é, em geral, muito difícil de ser realizada. Sendo assim, a opção pelo controle *fuzzy* apresenta-se como uma solução viável devido à possibilidade de resolver o problema de controle sem a necessidade de conhecimento do modelo da planta. Propõe-se então, o emprego de dois módulos de controle atuando de forma simultânea. O módulo 1 opera com o erro de controle e a derivada do erro de controle, representado na figura 14, com um integrador em sua saída, como é comum nos controladores *fuzzy*.

Este é então aplicado como se fosse um controlador PID. Nos casos em que a referência, o *setpoint*, seja ajustada pelo operador, a variação do erro pode ser substituída pela variação da grandeza de processo.

O controlador *fuzzy* módulo 1 atua no sentido de controlar a abertura da válvula de controle, em função do erro gerado entre a diferença do valor de pH do caldo da saída, com a de um valor desejado para o processo, o *setpoint*. Essa diferença, poderá ser positiva, negativa ou zero, afim de caracterizar um fechamento ou abertura da válvula de controle.

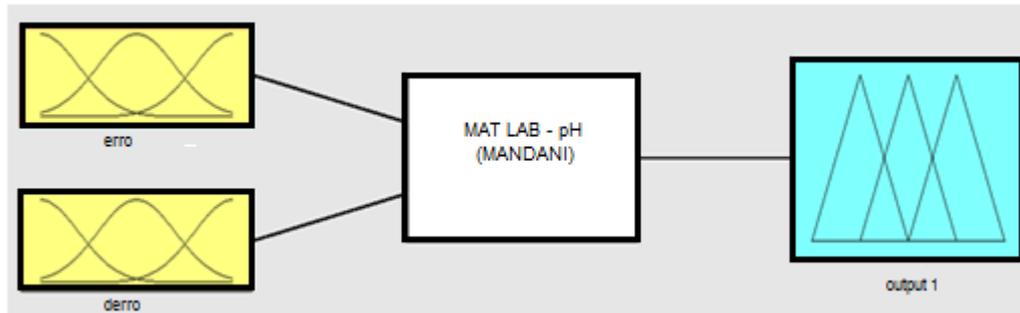


Figura 14 – Sistema de controle *fuzzy*, módulo 1.

O segundo módulo, recebe na sua entrada as derivadas das perturbações, representado na figura 15. O uso das derivadas permite que a sua ação, que já é preditiva por atuar com variáveis de entrada, adquira um grau a mais de antecipação ao se considerar o caráter preditivo da função derivada. Desta forma, o módulo 2 somente tem efeito nos momentos de variação das perturbações, incrementando ou decrementando a variável de controle no sentido de diminuir o erro de controle. Eventualmente, o módulo 1 pode ser substituído por um controlador PI simples.

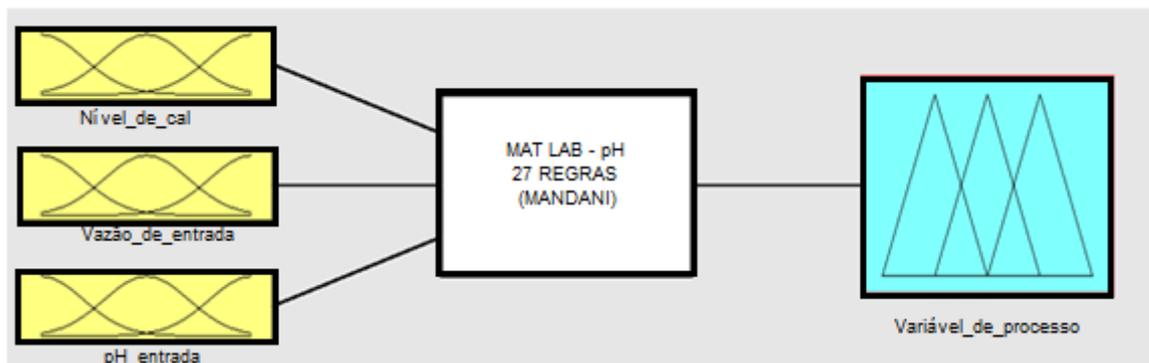


Figura 15 – Sistema de controle *Fuzzy*, módulo 2.

3.3 Funções de Pertinência

As funções de pertinências representam o quanto cada elemento pertence a um conjunto, operações lógicas entre esses conjuntos são efetuadas para a determinação da base de regras, que será detalhada mais adiante. Neste trabalho, optou-se por utilizar funções de pertinência do tipo triangular para cada variável de entrada do controlador e para a variável de saída. O universo de cada variável foi padronizado de -1 a 1, para garantir as condições de incremento e decremento à variável de controle no momento da ocorrência das perturbações.

Deste modo, as grandezas correspondentes ao pH de entrada, ao nível do reservatório, a vazão de entrada do caldo de cana e a abertura da válvula foram escaladas dos seus limites de variação, para a faixa de -1 a 1. Na fase de *fuzzificação*, do controlador módulo 2, são associadas três funções de pertinência para cada uma das variáveis envolvidas no controle do processo. Para esse trabalho, decidiu-se classificar as funções de pertinência em negativo (-), zero (0) e positivo (+).

Na figura 16, são apresentadas as três funções de pertinência correspondentes a variável do nível da solução de cal no reservatório.

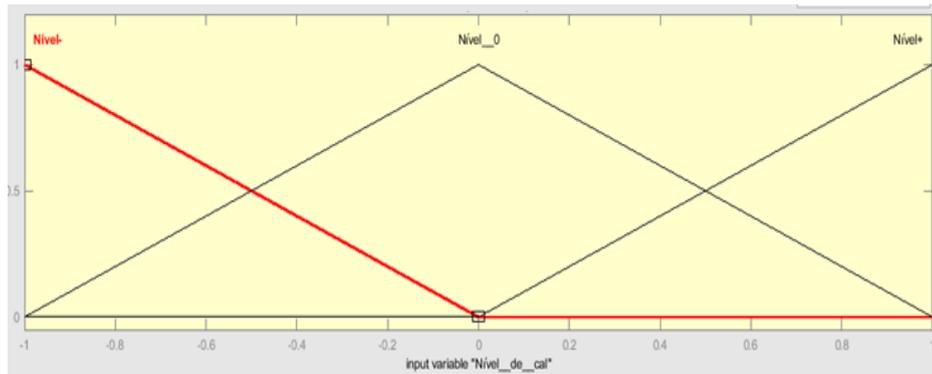


Figura 16 – Funções de pertinência triangulares (Nível do reservatório de cal).

Para melhor entendimento, apresentaremos a seguir uma breve descrição das funções de pertinência apresentadas na figura 16.

A função Nível-, corresponde a uma tendência de diminuição no nível do leite de cal. Por esse motivo, apresenta o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor mínimo do universo de discurso escalado (-1). A função Nível_0 corresponde a uma não variação do nível de leite de cal, apresentando o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor médio do universo de discurso escalado (0). Finalmente, a função Nível+ corresponde a uma tendência de elevação no nível do leite de cal. Apresentando o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor máximo do universo de discurso escalado (1).

Na figura 17, são apresentadas as três funções de pertinência correspondentes a variável do pH do caldo de entrada.

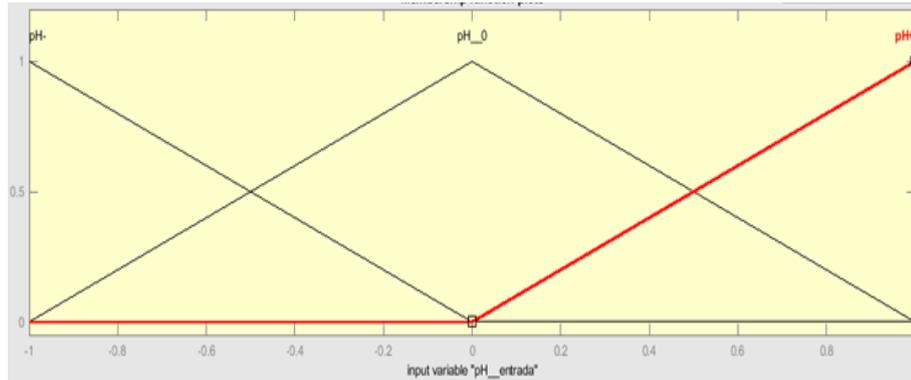


Figura 17 – Funções de pertinência triangulares (pH da entrada).

A seguir, também temos uma breve descrição das funções de pertinência apresentadas na figura 17.

A função pH- corresponde a uma tendência de diminuição do pH do caldo da entrada. Por esse motivo, apresenta o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor mínimo do universo de discurso escalado (-1). A função pH_0 corresponde a uma não variação do pH do caldo da entrada, apresentando o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor médio do universo de discurso escalado (0) e a função pH+ corresponde a uma tendência de elevação do pH do caldo, logo apresenta o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor máximo do universo de discurso escalado (1).

Na figura 18, são apresentadas as três funções de pertinência correspondentes a variável da vazão do caldo da entrada.

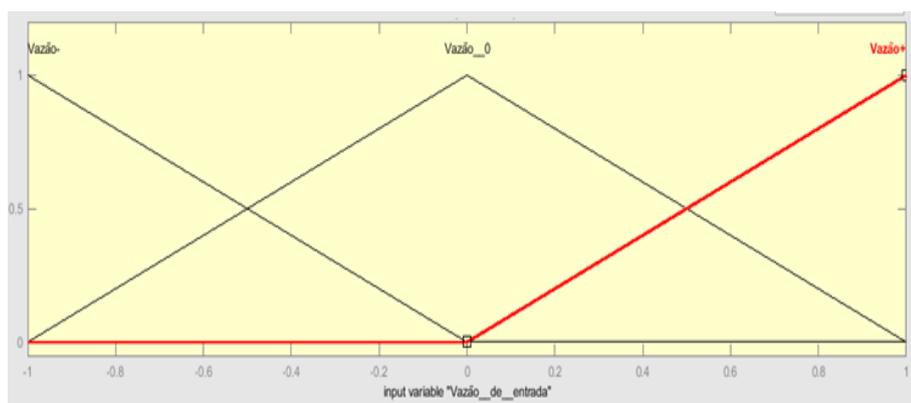


Figura 18 – Funções de pertinência triangulares (vazão da entrada).

As descrições das funções de pertinência apresentadas na figura 18, estão a seguir.

A função Vazão- corresponde a uma tendência de diminuição do volume de vazão do caldo na entrada. Por esse motivo, apresenta o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor

mínimo do universo de discurso escalado (-1). A função Vazão_0 corresponde a uma não variação da vazão do caldo na entrada, apresentando o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor médio do universo de discurso escalado (0) e a função Vazão+ corresponde a uma tendência de crescimento da vazão do caldo na entrada, logo apresenta o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor máximo do universo de discurso escalado (1).

Durante o processo de ajuste do controlador, torna-se às vezes conveniente efetuar ajustes nas inclinações e nos pontos de inflexão das retas.

Na fase de *fuzzificação*, do controlador módulo 1, também são associadas três funções de pertinência para cada uma das variáveis envolvidas, erro (e) figura 19 e derivada do erro (de) figura 20, no controle do processo.

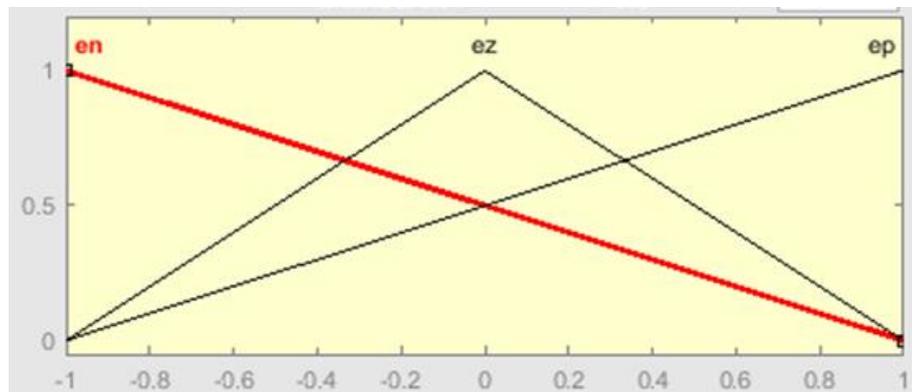


Figura 19 – Funções de pertinência do erro.

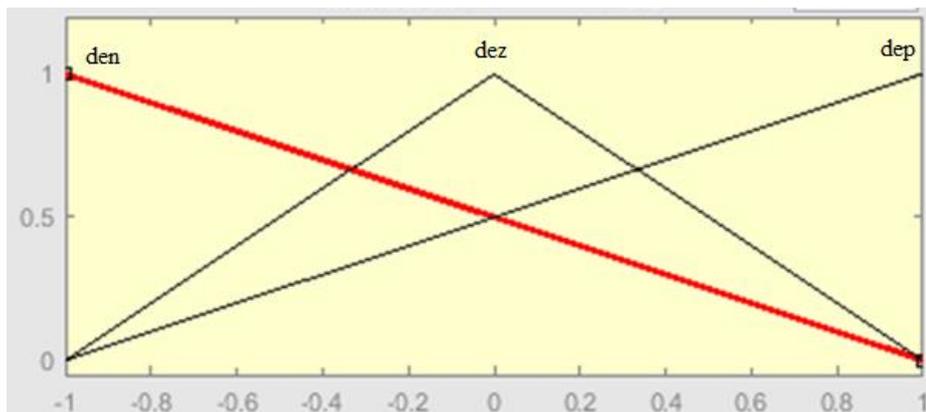


Figura 20 – Funções de pertinência da derivada do erro.

As funções en e den correspondem a uma tendência de diminuição do erro e da derivada do erro, respectivamente. Por esse motivo, apresentam o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor mínimo do universo de discurso escalado (-1). As funções ez e dez correspondem a uma não variação do erro e da derivada do erro respectivamente, apresentando o valor máximo de pertinência ($fp=1$) no valor médio do universo de discurso

escalado (0) e a função ep e dep correspondem a uma tendência de crescimento do erro e da derivada do erro, respectivamente. Logo apresentam o valor máximo de pertinência ($f_p=1$) no valor máximo do universo de discurso escalado (1).

3.4 Regras de Implicação

Outro componente importante do controlador *fuzzy* é a base de regras. Nela, traduzem-se as experiências dos operadores do processo, de forma linguística. Para o controlador *fuzzy*, módulo 2, neste trabalho, foram utilizados os atributos variação negativa (-), variação zero (0) e variação positiva (+), logo, temos três condições de operação para cada uma das grandezas envolvidas. Por exemplo, a condição de nível do reservatório com variação negativa (-) implica em uma necessidade de maior abertura da válvula de cal, no sentido de se compensar a menor vazão causada pela menor pressão no ponto de retirada de cal. Essa situação entra em conflito com as condições de pH de entrada com variação positiva (+) e vazão de entrada com variação negativa (-), que exigiriam uma redução na abertura da válvula de cal. Essas condições e possíveis conflitos são perfeitamente tratados na base de regras. É fundamental ressaltar que a cada perturbação é aplicada a função derivada, para que não haja acúmulo de efeito na variável final de controle, quando houver o acomodamento da variável de entrada. Quando isso ocorrer, caberá à função integral corrigir o erro de regime permanente. Um exemplo de regra de implicação aplicada a este processo seria: “se a variação do pH de entrada for negativa, a variação do nível de solução de cal for também negativa e a variação da vazão de entrada de caldo for positiva, então o incremento a ser dado à abertura da válvula de cal deverá ser grande”.

Seguindo-se esse procedimento, para o módulo 2 do controlador Fuzzy, foram estabelecidas vinte e sete regras de implicação correspondendo a três variáveis fuzzificadas de entrada com três funções de pertinência, cada uma. Elas atuam no sentido de interferir no controle de abertura e fechamento da válvula de controle em função das perturbações da vazão de entrada do caldo, ph do caldo de entrada, nível do tanque de cal. Para melhor compreensão algumas dessas regras estão apresentadas na figura 10.

Cada regra relaciona uma função de pertinência de cada entrada. Cobrindo-se o universo de possibilidades, escolhe-se a ação de controle para cada uma delas. Nesta etapa pode-se recorrer ao conhecimento de um especialista. Na Figura 21, mostra-se como é feito o arranjo das combinações, para a obtenção da quantidade de possibilidades que deverão

compor a base de regras que compõem o módulo 2 e na figura 22, para o módulo 1 do controlador *fuzzy*.

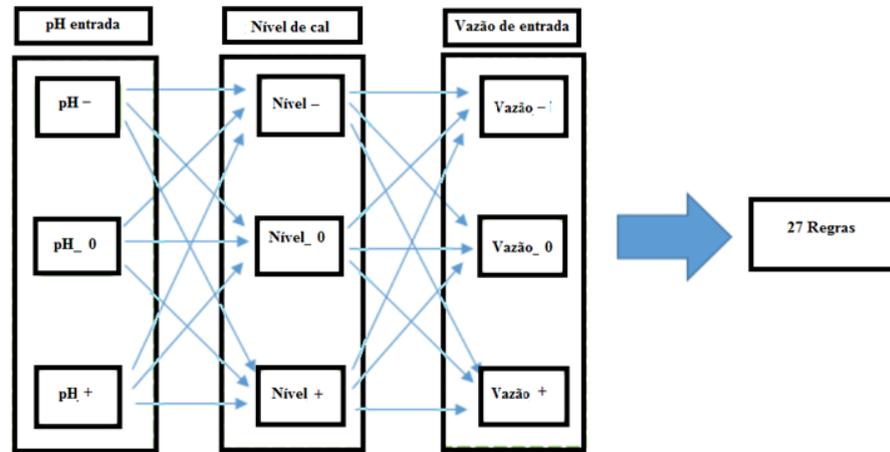


Figura 21- Possibilidades das funções de pertinência para criação da base de regras, módulo 2.

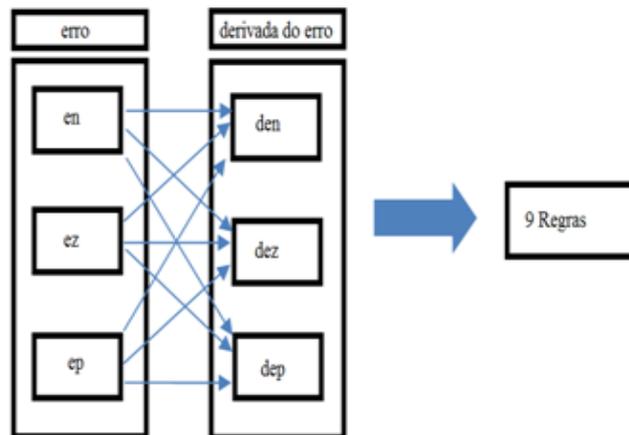


Figura 22- Possibilidades das funções de pertinência para criação da base de regras, módulo 1

Neste trabalho, o algoritmo *fuzzy* foi elaborado inicialmente no editor de sistema de inferência *fuzzy* do *Matlab*, pela facilidade de ajuste gráfico das funções de pertinência.

teoria de conjuntos *fuzzy*, criado por Lotfi Zadeh, que permite associar regras para variáveis lingüísticas.

3.5 Operações Lógicas

Temos a seguir, as funções de pertinência referentes às respostas para cada regra de implicação criada no módulo 2 e módulo 1. Para a obtenção dessas repostas a operação lógica E, é por definição, realizada obtendo-se uma função de pertinência que é o mínimo entre os conjuntos, que representam as funções de pertinências de cada variável. Esta operação é também conhecida como a interseção entre os dois conjuntos.

Parte das funções de pertinência referentes às respostas para cada regra de implicação, criada no módulo 2, estão representadas a seguir:

- REGRA 1 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP-}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão+}, \mu_{pH+}))$
 REGRA 2 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP-}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão+}, \mu_{pH_0}))$
 REGRA 3 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP_0}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão+}, \mu_{pH-}))$
 REGRA 4 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP-}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão_0}, \mu_{pH+}))$
 REGRA 5 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP_0}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão_0}, \mu_{pH_0}))$
 REGRA 6 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP+}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão_0}, \mu_{pH-}))$
 REGRA 7 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP_0-}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão-}, \mu_{pH+}))$
 REGRA 8 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP+}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão-}, \mu_{pH_0}))$
 REGRA 9 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP+}, \min(\mu_{Nível+}, \mu_{Vazão-}, \mu_{pH-}))$
 REGRA 10 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP-}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão+}, \mu_{pH+}))$
 REGRA 11 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP_0}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão+}, \mu_{pH_0}))$
 REGRA 12 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP+}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão+}, \mu_{pH-}))$
 REGRA 13 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP-}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão_0}, \mu_{pH+}))$
 REGRA 14 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP_0}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão_0}, \mu_{pH-}))$
 REGRA 15 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP+}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão_0}, \mu_{pH_0}))$
 REGRA 16 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP_0}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão-}, \mu_{pH+}))$
 REGRA 17 $\longrightarrow \mu_{Resposta} = \min(\mu_{VP+}, \min(\mu_{Nível_0}, \mu_{Vazão-}, \mu_{pH_0}))$

.....

Para as regras citadas, temos:

$\mu_{Nível+}$: função de pertinência correspondente ao conjunto $Nível+$

$\mu_{Nível_0}$: função de pertinência correspondente ao conjunto $Nível_0$

- $\mu_{\text{Nível-}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto Nível-
 $\mu_{\text{Vazão+}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto Vazão+
 $\mu_{\text{vazão}_0}$: função de pertinência correspondente ao conjunto Vazão_0
 $\mu_{\text{vazão-}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto Vazão-
 $\mu_{\text{pH+}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto pH+
 μ_{pH_0} : função de pertinência correspondente ao conjunto pH_0
 $\mu_{\text{pH-}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto pH-
 $\mu_{\text{VP+}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto VP+.
 μ_{VP_0} : função de pertinência correspondente ao conjunto VP_0
 $\mu_{\text{VP-}}$: função de pertinência correspondente ao conjunto VP-
 ...

Estão representadas a seguir, as funções de pertinências, referentes às respostas para cada regra de implicação criada no módulo 1:

- REGRA 1 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{caln}}, \min(\mu_{\text{en}}, \mu_{\text{den}}))$
 REGRA 2 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{caln-}}, \min(\mu_{\text{en}}, \mu_{\text{dez}}))$
 REGRA 3 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{calz}}, \min(\mu_{\text{en+}}, \mu_{\text{dep}}))$
 REGRA 4 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{caln-}}, \min(\mu_{\text{ez+}}, \mu_{\text{den}}))$
 REGRA 5 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{calz}}, \min(\mu_{\text{ez}}, \mu_{\text{dez}}))$
 REGRA 6 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{calp}}, \min(\mu_{\text{ez}}, \mu_{\text{dep}}))$
 REGRA 7 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{calz}}, \min(\mu_{\text{ep}}, \mu_{\text{den}}))$
 REGRA 8 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{calp}}, \min(\mu_{\text{ep}}, \mu_{\text{dez}}))$
 REGRA 9 $\longrightarrow \mu_{\text{Resposta}} = \min(\mu_{\text{calp}}, \min(\mu_{\text{ep}}, \mu_{\text{dep}}))$

Para as regras citadas, temos:

- μ_{en} : função de pertinência correspondente ao conjunto en;
 μ_{ez} : função de pertinência correspondente ao conjunto ez;
 μ_{ep} : função de pertinência correspondente ao conjunto ep;
 μ_{den} : função de pertinência correspondente ao conjunto den;
 μ_{dez} : função de pertinência correspondente ao conjunto dez;
 μ_{dep} : função de pertinência correspondente ao conjunto dep;
 μ_{caln} : função de pertinência correspondente ao conjunto caln;
 μ_{calz} : função de pertinência correspondente ao conjunto calz;
 μ_{calp} : função de pertinência correspondente ao conjunto calp;

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Simulação

Os diagramas de controle, apresentados nas figuras 25, 26, 27 e 28, foram então simulados, empregando o sistema *Matlab/Simulink*. Tanto os valores das perturbações, como as funções de transferência que representam o sistema dinâmico foram obtidas utilizando-se valores compatíveis com observações realizadas em usinas produtoras de açúcar de cana.

O *Matlab* é uma poderosa ferramenta matemática que lhe permite trabalhar com cálculos, processamento de sinais, construção de gráficos, simulações e entre outras coisas. No toolbox de lógica *fuzzy* do *Matlab* além das funções já disponíveis, é permitido criar um algoritmo de inferência *fuzzy* dentro da área de trabalho do *Matlab*, ou ainda construir um programa isolado em C++ ou *Visual Basic*, que acesse algoritmos de inferência *fuzzy* compilados no *Matlab*.

Para a realização desse trabalho vários testes de simulação foram realizados, os que serão apresentados a seguir tentam representar uma situação real do processo e também algumas situações que causem dificuldades para o controle do processo. Procurou-se enfatizar a diferença de comportamento do controlador *fuzzy* com o controlador PID, considerando-se situações adversas para as perturbações, permitindo assim uma análise da atuação do controlador *fuzzy* e também do controlador PID nesse processo. No primeiro diagrama (Figura 25) apresentamos uma situação onde temos variações das três perturbações, (nível do tanque de cal, vazão do caldo de entrada, pH do caldo de entrada) em todo o intervalo de tempo do processo. No segundo diagrama (Figura 26) utilizamos uma função degrau para representarmos como constante o nível de cal no tanque, admitindo variações nas perturbações da vazão do caldo de entrada e do pH de entrada. No terceiro diagrama (Figura 27) utilizamos uma função degrau para representarmos como constante o pH do caldo de entrada, admitindo variações nas perturbações do nível do tanque e da vazão de entrada do processo. No quinto diagrama (Figura 28) utilizamos uma função degrau para representarmos como constante a vazão do caldo de entrada, admitindo variações nas perturbações do nível do tanque e do pH do caldo da entrada do processo.

Sendo assim, na seção seguinte, serão apresentados os testes realizados com o controlador proposto.

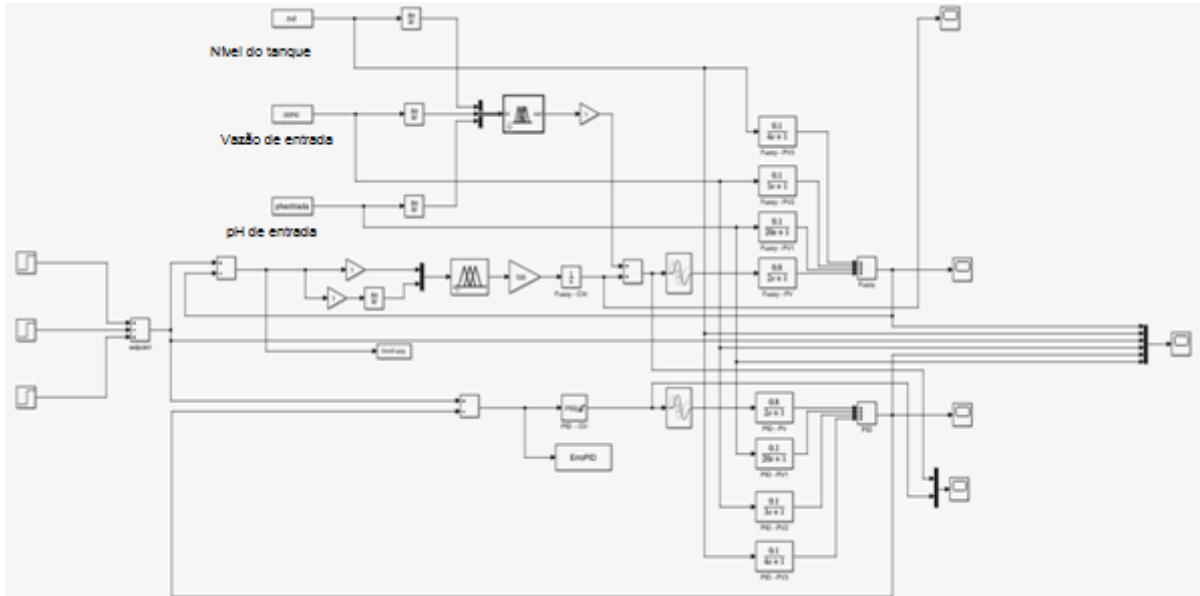


Figura 25- Diagrama do *Simulink*, variação das três perturbações.

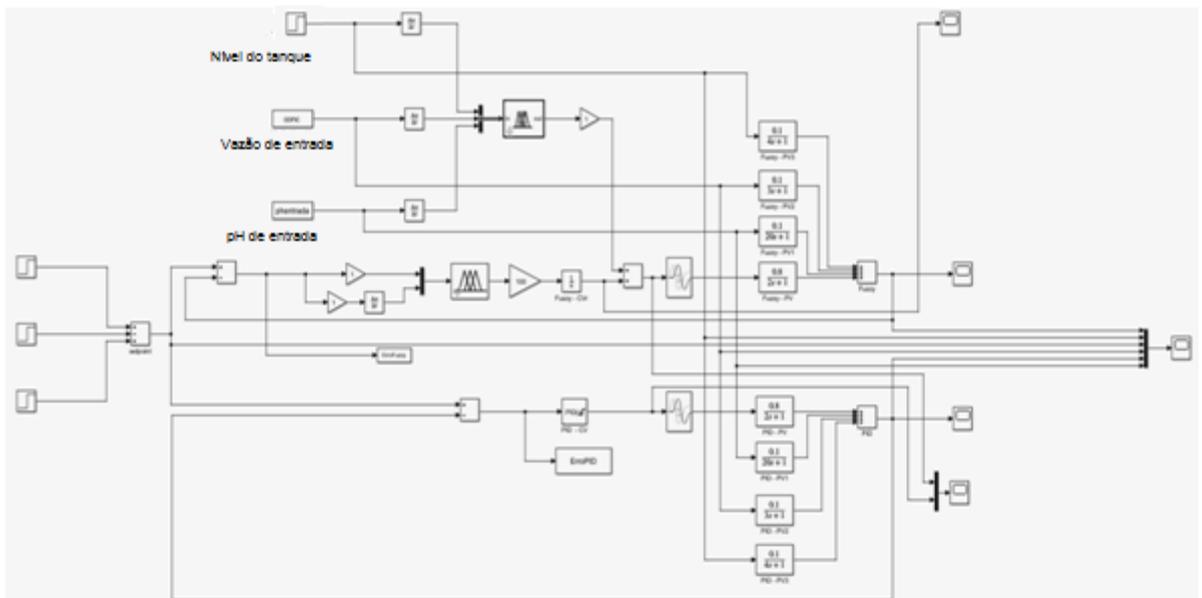


Figura 26- Diagrama do *Simulink*, nível de cal constante, variação do ph e da vazão de entrada.

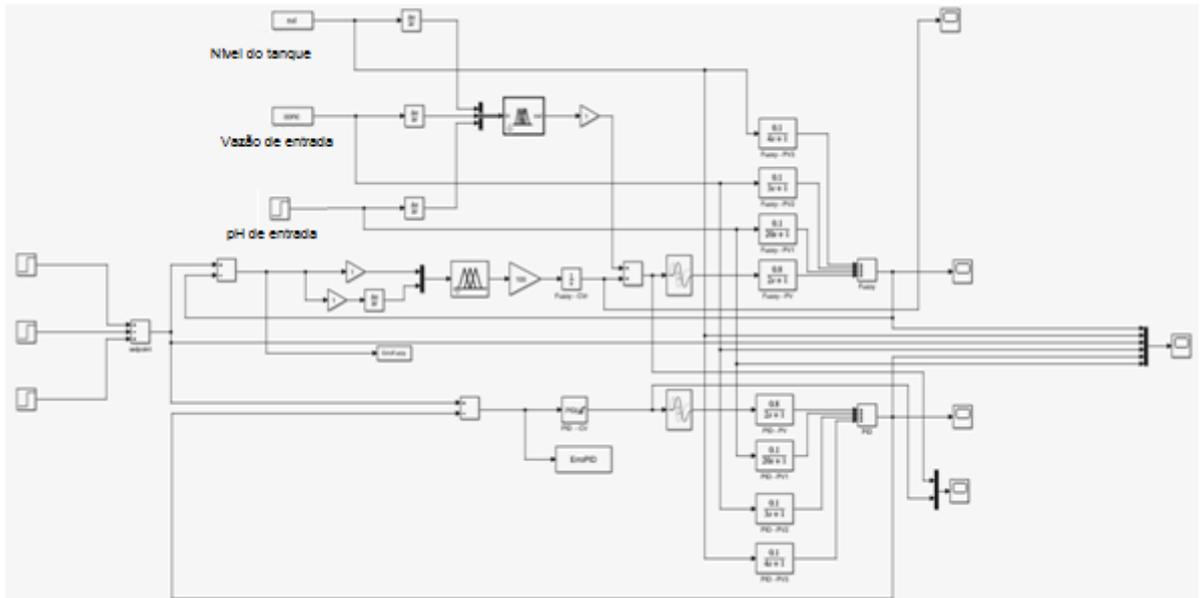


Figura 27-Diagrama do *Simulink*, pH de entrada constante, variação do nível de cal e da vazão do caldo.

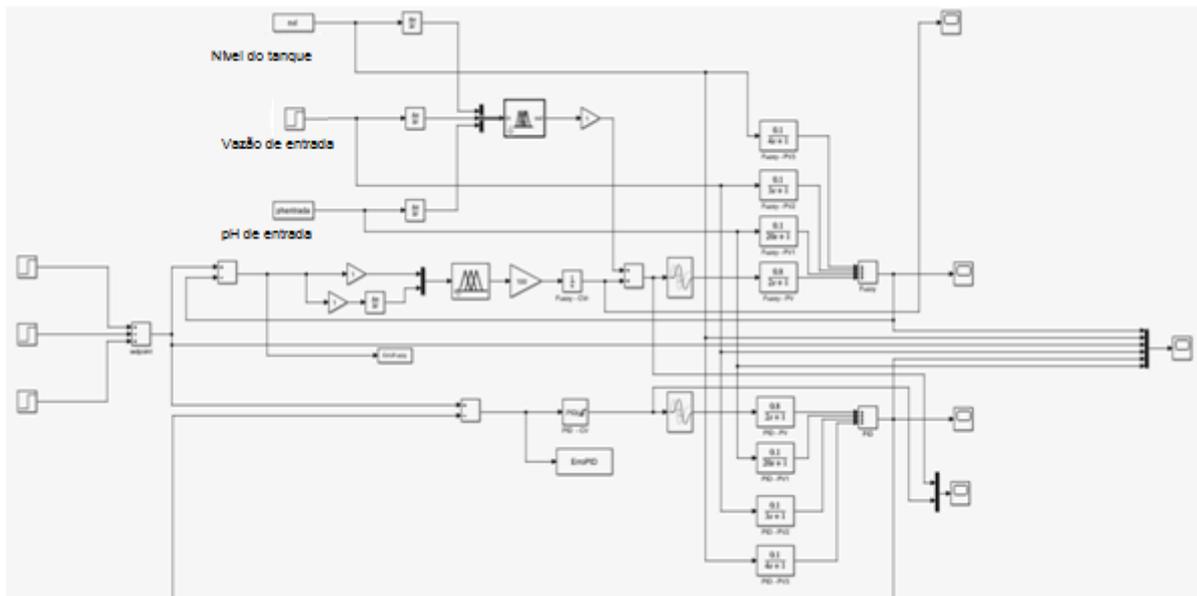


Figura 28- Diagrama do *Simulink*, vazão do caldo constante, variação do nível de cal e do pH de entrada.

4.2 Resultados

Nos testes realizados com o *Matlab/Simulink*, todas as variáveis foram escaladas para a faixa de -1 a 1, para facilitar a visualização dos resultados. A figura 29 apresenta os resultados do primeiro teste, comparando-se os resultados do controlador *fuzzy* com um controlador PID simples. A legenda apresentada no canto superior direito das figuras identifica cada um dos resultados apresentados. Observe que, neste primeiro teste, todas as perturbações, nível de cal no reservatório e pH do caldo na entrada, variam aleatoriamente e efetuam-se também duas variações no *setpoint* de pH. O o controlador *fuzzy* foi capaz de fazer com que a variável de processo acompanhasse o *setpoint*. Além disso, observa-se claramente que o controlador *fuzzy* comparado com o controlador PID simples, apresenta um desempenho mais satisfatório e antecipatório fazendo com que o pH de saída ficasse mais próximo do *setpoint*, na maior parte do tempo.

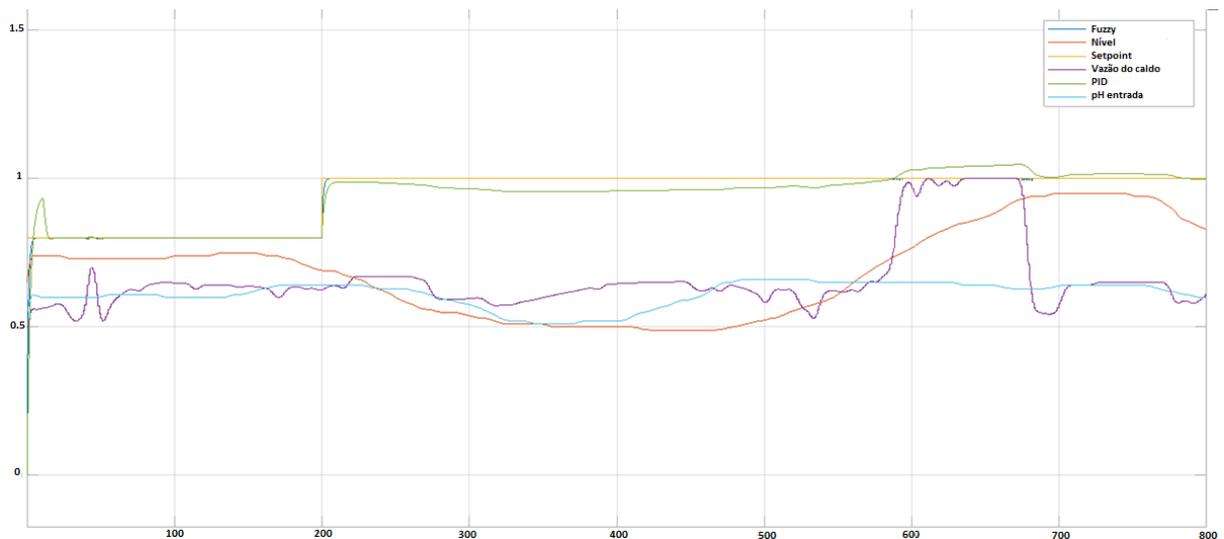


Figura 29 – Resposta ao degrau e as variações no pH, nível do cal e vazão do caldo.

Para a simulação apresentada na figura 30, variou-se o pH de entrada, o nível do reservatório de cal, a vazão de entrada aleatoriamente e o *setpoint* variou três vezes. Podemos observar que o controlador *fuzzy* novamente apresentou um desempenho melhor que o do controlador PID, mantendo a variável de processo acompanhando o *setpoint* em praticamente todo o intervalo de tempo. Neste caso, o *setpoint* apresenta mudanças nos pontos de 150 e 200 da abscissa do gráfico, o controlador *fuzzy* consegue manter a variável controlada acompanhando o *setpoint*, já o mesmo não podemos dizer do controlador PID para esse

intervalo, deixando mais evidente ainda a eficácia do controlador *fuzzy*, atuando no sentido de compensar a ação da variação do valor desejado, o *setpoint*. A compensação é feita pela ação da base de regras que altera a variável de controle em função da tendência de variação das perturbações.



Figura 30 – Resposta ao degrau e as variações no pH, nível do cal e vazão do caldo.

Para a simulação apresentada na figura 31, variou-se o pH de entrada e a vazão de entrada, o nível do reservatório de cal manteve-se constante em 0,8. O *setpoint* variou inicialmente para 0,8 e no ponto 200 da abscissa o mesmo variou para 1. Neste caso, tanto o controlador *fuzzy* quanto o controlador PID conseguiram estabilizar a variável de processo no valor desejado, o *setpoint*. Entretanto, podemos perceber a eficácia do controlador *fuzzy*, já no início da simulação, se antecipando ao controlador PID, fazendo a variável de processo se estabilizar mais rapidamente. O mesmo acontece no ponto 200 da abscissa onde tivemos variação do *setpoint*. No ponto da abscissa próximo de 600 temos uma perturbação na vazão do caldo de entrada, o controlador *fuzzy* mostra seu caráter antecipatório, fazendo a compensação da variação da perturbação, mantendo a variável de processo dentro do valor desejado, ou seja, do *setpoint*. Já o PID nesse mesmo ponto não consegue manter a variável de processo acompanhando o *setpoint*.

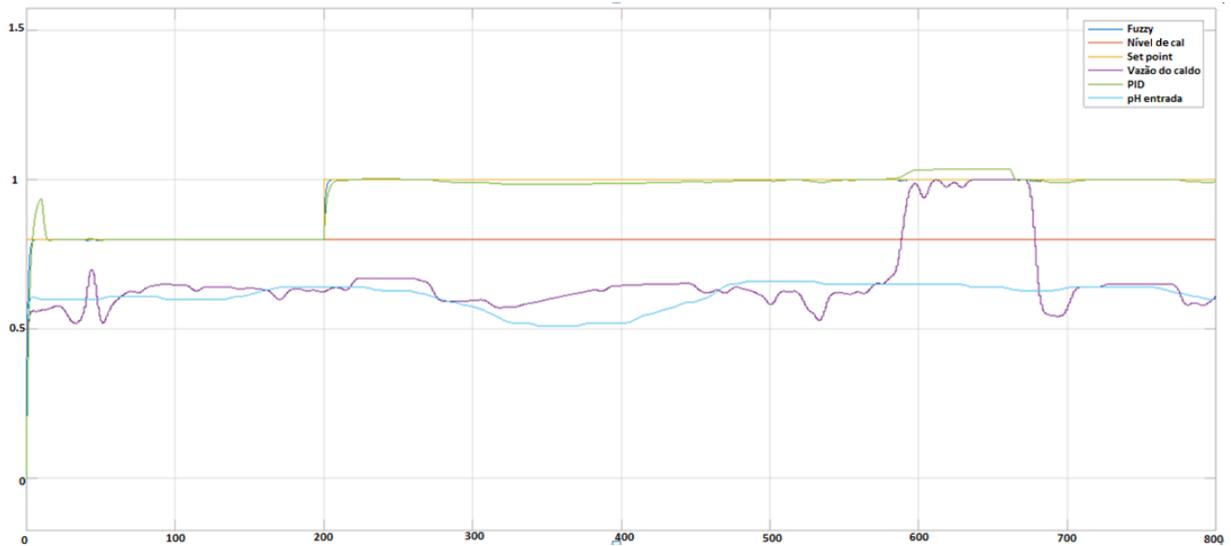


Figura 31 – Resposta ao degrau, as variações do pH da entrada e vazão do caldo, e ao nível de cal constante.

Para a simulação apresentada na figura 32, variou-se o pH de entrada e a vazão de entrada, o nível de cal do reservatório, manteve-se constante em 0,5. O *setpoint* variou inicialmente para 0,8 e no ponto 200 da abscissa o mesmo variou para 1. O controlador *fuzzy* conseguiu estabilizar a variável de processo no valor desejado, o *setpoint*. Já o controlador PID, apresenta um *overshoot* na variável de processo logo no início e não consegue manter o controle da variável de processo, após a mudança no valor de referência, o *setpoint*.

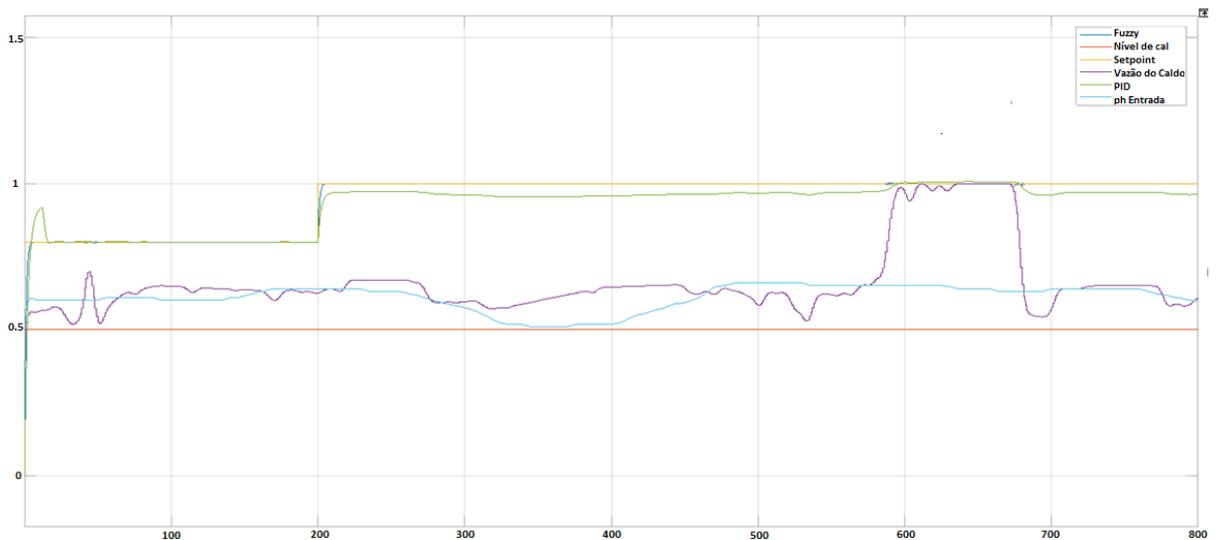


Figura 32 – Resposta ao degrau, as variações do pH entrada e vazão do caldo, e ao nível de cal constante.

Para a simulação apresentada na figura 33, variou-se o pH de entrada e o nível do

reservatório de cal, a vazão do caldo da entrada manteve-se constante em 0,2. O *setpoint* variou inicialmente para 0,8 e no ponto 200 da abscissa o mesmo variou para 1. O controlador *fuzzy* conseguiu estabilizar a variável de processo no valor desejado, o *setpoint*. Já o controlador PID a partir do ponto 200 da abscissa, não consegue manter a variável de processo acompanhando o *setpoint*. O desempenho do controlador *fuzzy* pode também ser observado, tanto no que se refere às compensações das perturbações como no acompanhamento do *setpoint*.

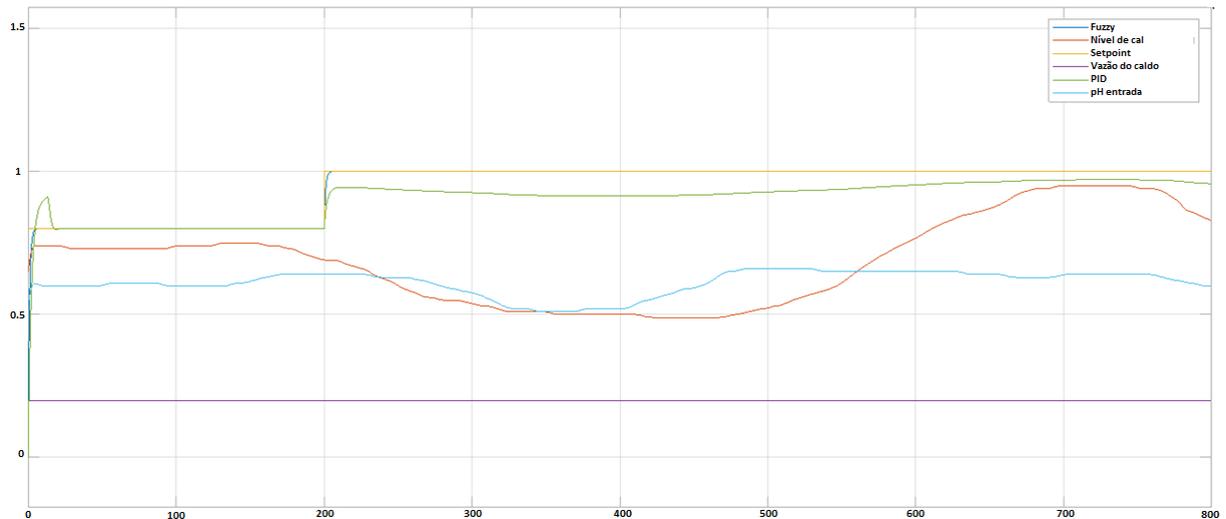


Figura 33 – Resposta ao degrau, as variações no nível do tanque de cal e do pH do caldo, e a vazão do caldo da entrada constante.

Para a simulação apresentada na figura 34, variou-se a vazão de entrada e o nível do reservatório de cal, o pH de entrada manteve-se constante em 0,6. O *setpoint* variou inicialmente para 0,8 e no ponto 200 da abscissa o mesmo variou para 1. Neste caso, tanto o controlador *fuzzy* quanto o controlador PID conseguiram estabilizar a variável de processo no valor desejado, o *setpoint*. Entretanto, podemos perceber a eficácia do controlador *fuzzy*, já no início da simulação, se antecipando ao controlador PID, fazendo a variável de processo se estabilizar mais rapidamente. O mesmo acontece no ponto 200 da abscissa onde tivemos variação no *setpoint*. No ponto da abscissa próximo de 600 temos uma perturbação na vazão do caldo de entrada e o controlador *fuzzy* mantém a variável de processo dentro do valor desejado, o *setpoint*. Já o PID nesse mesmo ponto não consegue manter a variável de processo acompanhando o *setpoint*.

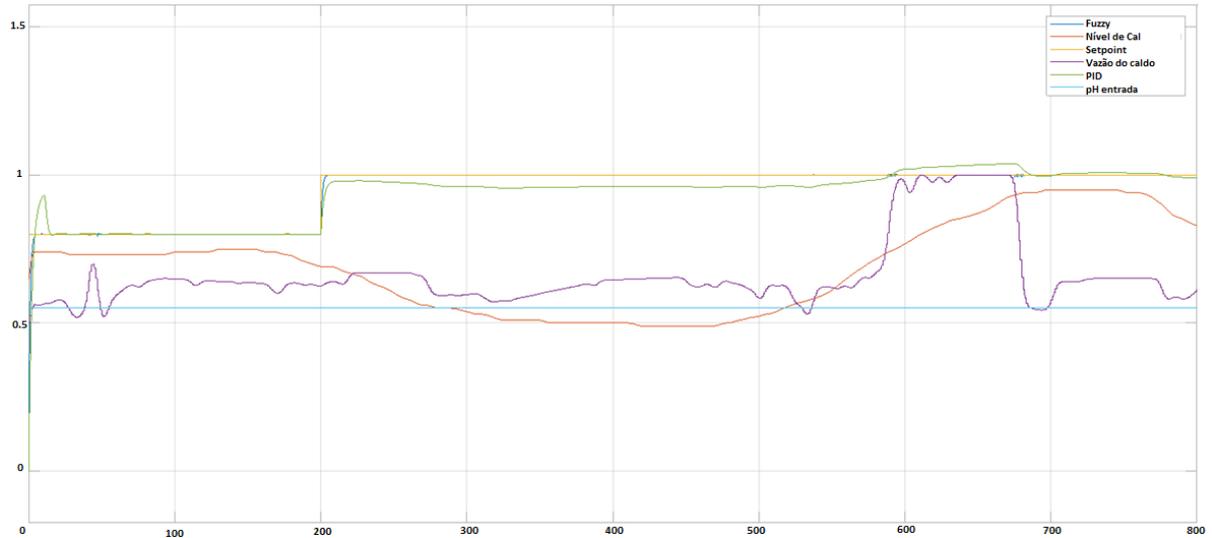


Figura 34 – Resposta ao degrau, as variações no nível do tanque de cal e da vazão do caldo, pH do caldo da entrada constante.

Para a simulação apresentada na figura 35, variou-se a vazão de entrada, o nível do reservatório de cal, o pH de entrada. O *setpoint* variou inicialmente para 0,8 e no ponto 150 da abscissa o mesmo variou para 0,2 e no ponto 250 da abscissa mesmo variou para 0,9. Essas variações do *setpoint* mostram claramente a eficácia do controlador *fuzzy* e o atraso do PID quanto a manter a variável de processo acompanhando o *setpoint*.

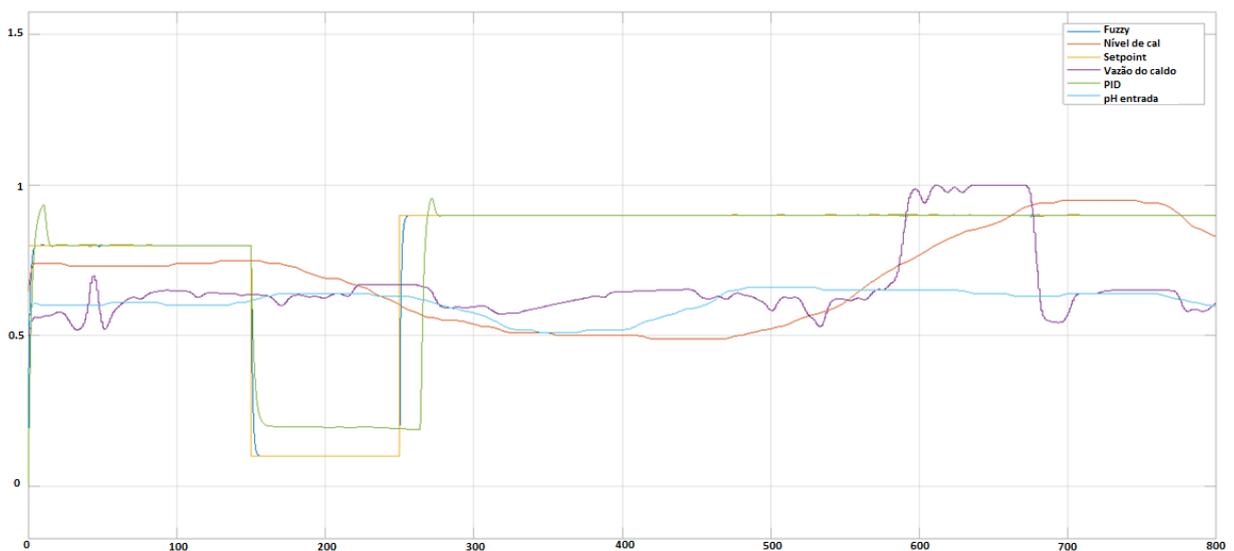


Figura 35 – Resposta ao degrau e as variações do nível de cal, da vazão do caldo e do pH entrada.

Para a simulação apresentada na figura 36, variou-se o pH de entrada, a vazão de entrada e o nível do reservatório de cal. O *setpoint* variou inicialmente para 0,2 e no ponto 200 da abscissa o mesmo variou para 1. Mais uma vez o controlador *fuzzy* mostra seu caráter antecipatório, fazendo a compensação das variações perturbações, mantendo a variável de processo acompanhando o *setpoint* em toda a simulação. Já o PID apresenta maiores dificuldades para fazer as correções das perturbações para o controle da variável de processo.

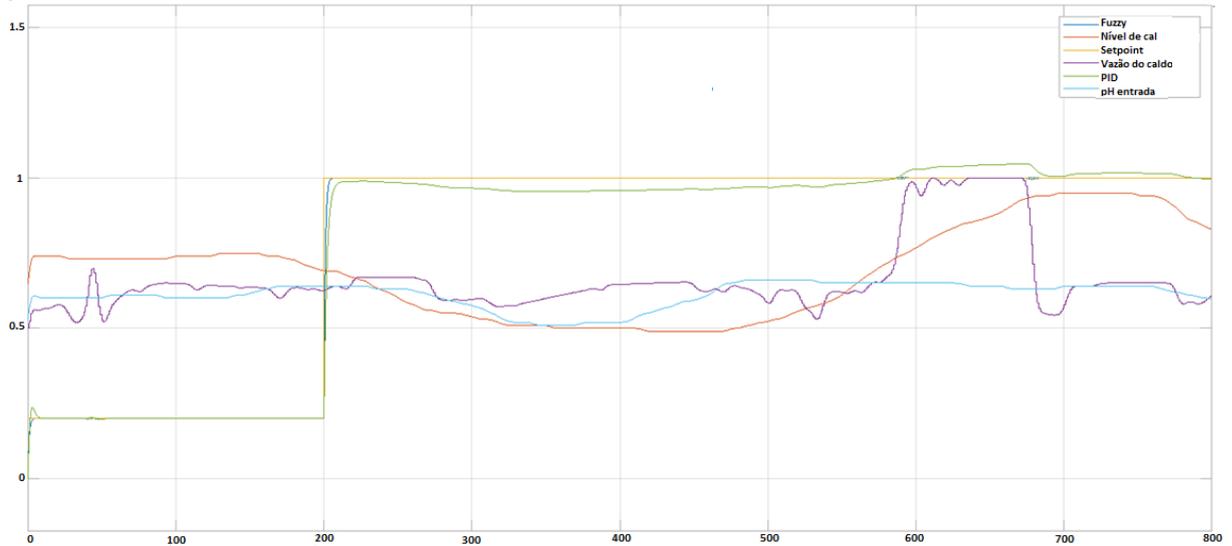


Figura 36 – Resposta ao degrau e as variações do nível de cal, da vazão do caldo e do pH entrada.

Para a simulação apresentada na figura 37, variou-se o pH de entrada, a vazão de entrada e o nível do reservatório de cal. Apresentamos alterações de *setpoint*, de maneira a dificultar o controle de processo, mostrando assim a eficiência do controlador fuzzy.

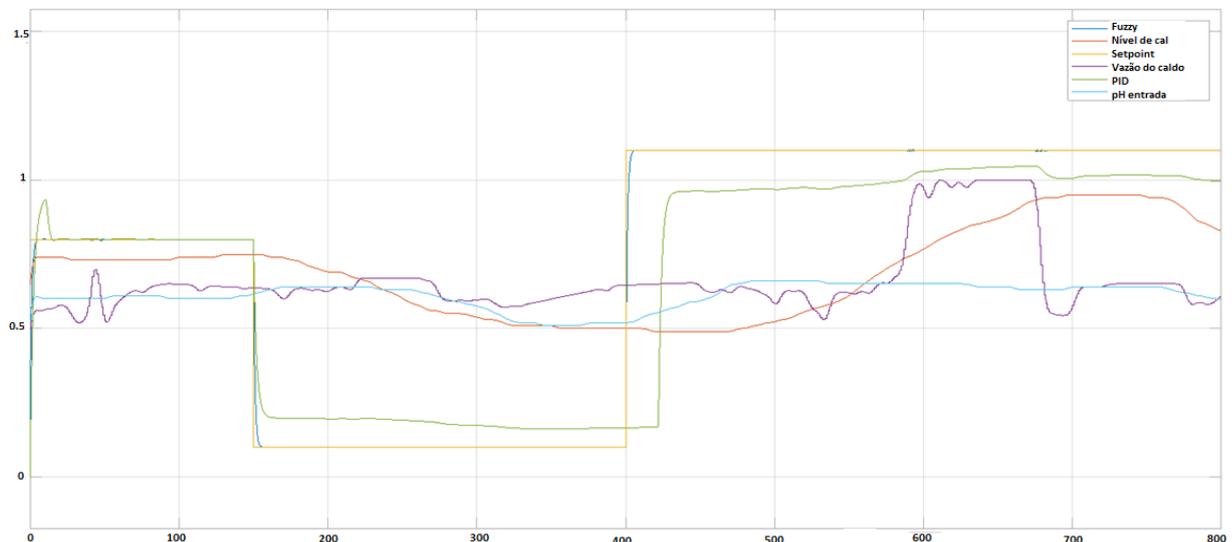


Figura 37 – Resposta ao degrau e as variações do nível de cal, da vazão do caldo e do pH entrada.

Para todas simulações, obteve-se um resultado bastante satisfatório do controlador *fuzzy* em comparação ao controlador PID. Podendo-se destacar para o controlador *fuzzy*:

- Obtenção da diminuição do erro entre a variável controlada (de processo) e seu *setpoint*;
- Maior confiabilidade do sistema de controle, pois apresenta-se menos sensível as alterações das perturbações;
- Diminuições de *overshoots* e atrasos de respostas da variável controlada (de processo), em relação as variações das perturbações e *setpoint* apresentadas para o sistema.

Logo, os resultados obtidos indicam a viabilidade do uso do controlador *fuzzy* proposto para o controle de pH do caldo na produção de açúcar. Desta forma, o modelo assim obtido poderá ser aplicado em estratégias de controle preditivo. Espera-se que os resultados obtidos nessas simulações, possam contribuir para a aplicação prática de controle de pH em usinas de açúcar.

Para melhor representar a superioridade de desempenho do controlador *fuzzy* em comparação ao controlador PID, nas figuras 38 e 39 são representados os histogramas do erro do controlador PID e do controlador *fuzzy*, respectivamente. Esses desvios apresentados, são referentes a simulação da figura 29, onde temos a resposta da variável de processo as variações no *setpoint*, no pH, no nível do cal e na vazão do caldo.

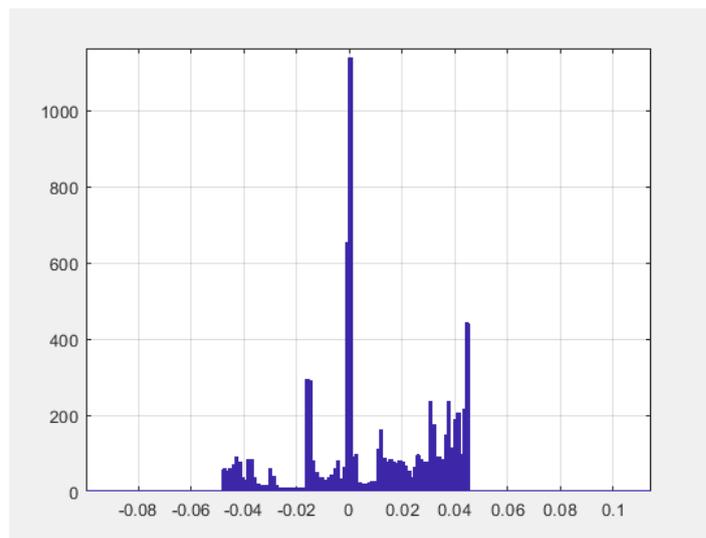


Figura 38: Histograma do erro do controlador PID.

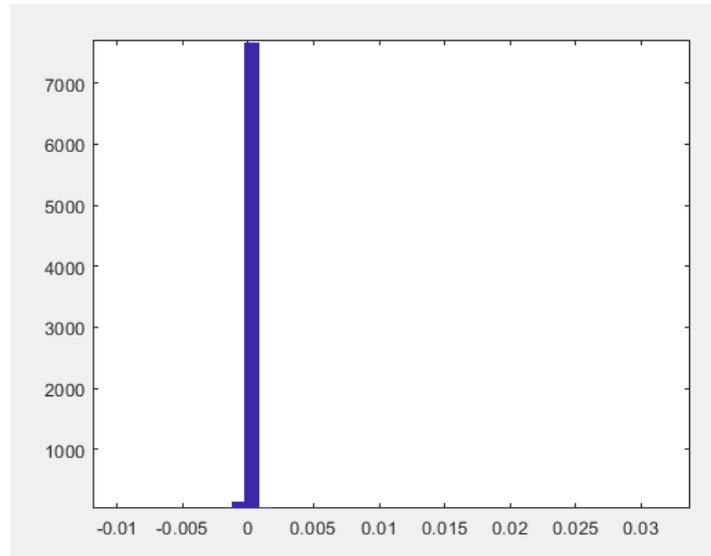


Figura 39: Histograma do erro do controlador *fuzzy*.

Analisando o histograma do erro do controlador PID, figura 38, observamos uma grande dispersão, indicando que os valores amostrais estão mais dispersos do em torno da média, quando comparado com o histograma do erro do controlador *fuzzy*, figura 39, que apresenta os valores amostrais do erro em torno do valor zero.

Nessa análise entre os dois controladores, podemos concluir que houve menor variação de erro do controlador *fuzzy*, indicando que a diferença entre os valores da variável de processo e o valor de *setpoint*, é menor. Isso indica, por parte do controlador *fuzzy*, um melhor acompanhamento da variável de processo quanto ao valor do *setpoint*.

CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 Conclusão

Os resultados das simulações apresentados indicam a conveniência do uso de sistemas *fuzzy* para o controle de sistemas não lineares, como o controle de pH do caldo de cana, no processo de caleação para a produção de açúcar em usinas. A comparação dos resultados obtidos com controladores PID convencionais e os controladores *fuzzy*, evidenciam para os controladores *fuzzy*, uma diminuição do erro entre a variável de processo e o valor desejado, menor sensibilidade às variações das perturbações, diminuições de *overshoots*, dos tempos de acomodação e atrasos de respostas, e a ação preditiva dos controladores *fuzzy*, permitindo uma redução significativa da variabilidade do erro de regime permanente. O fato de utilizarmos um controlador *fuzzy* trabalhando direto com as perturbações, de forma a antecipar as correções

das variações delas, na arquitetura do controlador *fuzzy* proposta no trabalho, permitiu que se usasse de forma eficaz as informações atribuídas aos valores de nível, pH e vazão de entrada para ajustar a abertura da válvula de cal, de forma preditiva. Essa ação preditiva é evidente nos resultados obtidos, já que em todo intervalo da simulação, a variável de processo acompanha o valor desejado, ou seja o *setpoint*. Além do mais a arquitetura apresentada poderá ser modificada no sentido de se incluírem outras perturbações para outras aplicações. Desta forma, a presente proposta poderá ser utilizada de forma geral para controle de sistemas não lineares e multivariáveis.

5.2 Perspectivas Futuras

Sugere-se para este trabalho que ele possa contribuir para o ambiente industrial, fazendo-se uma transposição da simulação para o ambiente industrial, confrontando a resposta do modelo com dados de equipamentos em escala real, de forma a divulgar as técnicas de lógica fuzzy como alternativa de controle eficaz em processos relacionados à produção de açúcar.

Considerando que a preparação da solução de cal é frequentemente efetuada de forma manual, resultando em variações na sua concentração e que por se tratar de um material altamente incrustante, o pHmetro pode ser afetado pelo meio de trabalho em pouco tempo quando não limpo com frequência. Sugere-se que essa perturbação seja acrescentada no controlador *fuzzy* proposto, já que fornecer um leite de cal nas condições ideais é relevante para o processo.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH AND BRAHIM, “A review of pH neutralization process”, IEEE Trans. On Intelligent and Advanced Systems, vol. 2, pp. 594-598, 2012.

AGEITEC. (*Agência Embrapa de Informação e Tecnologia*). Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br> . Acesso em Dezembro 2019

ARUN, U.P.; GEORGE,S.; SAMOBEEN, G. S. *Control of pH Neutralization Process using Fuzzy Logic: A Review*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 02 Issue: 03 | June-2015

BAZANELLA, A. S.; GOMES DA SILVA JR, J. M. *Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

OGUNNAIKE, B.A.; RAY, W.H., “*Process Dynamics, Modeling and Control*”, Oxford University Press, 1994.

BARROS, L. S.; MOURA, D. F. P.; MOTA, W. S. *Métodos Matriciais para Linearização e Representação no Espaço de Estados de Sistemas Elétricos de Potência Contendo Máquinas de Indução Duplamente Alimentadas Operando como Geradores Eólicos*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE), Campina Grande. Anais...Campina Grande, Paraíba: [s.n.], 2006.

CAVALCANTI, A. L. O.; MAITELLI, A. L.; FONTES, A. B. *A Phase Margin Metric for Multi-Model Multivariable MPC*. In: IEEE MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, 16., 2008, Ajaccio, France. Proceedings... pp. 1874–1879, Ajaccio, France, 2008.

CHEN, D.; SEBORG, D. E. *Design of Decentralized PI Control Systems Based on Nyquist Stability Analysis*. Journal of Process Control, v. 13, pp. 27-39, 2003.

ELFATNI, O.; BOUNAHMIDI, T. *Mathematical modeling and simulation of acidification*

process for sugar extraction. IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, Beijing, China, October 2006.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. *Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy*. *SBA Controle & Automação*, v. 4, n. 3, pp.97-115, 1994.

KARTHIK, C.; SENTHILKUMAR, M. *Intelligent Based Modelling, Control and Fault Detection of Chemical Process*. IEEE International Conference on Communication Control and Computing Technologies, Ramanathapuram, India, December, 2010.

KARTHIK, C.; VALARMATHI, K.; PRASANNA, R. “*Modeling and Control of Chemical Process in Sugar Industry*”, ICVCI, pp.24-28, 2011

LIN, X.; YANG, J.; LIU, H.; SONG, S.; SONG C. *An improved method of DHP for Optimal Control in the Clarifying Process of Sugar Cane Juice*. Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, Georgia, USA, June 2009.

NORQUAY, S. J.; PALAZOGLU, A.; ROMAGNOLI, J. A. *Application of Wiener Model Predictive Control(WMPC) to a pH Neutralization Experiment*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 4, July 1999.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de controle moderno*. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1985.

PINHEIRO, W. C.; FINZER, J. R. D. *Caleação de caldo na fabricação de sacarose*. COBEQ 2016 - XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Fortaleza, setembro 2016.

SINGH, P.K.; BHANOT, S.; MOHANTA, H.K. *Differential Evolution based Optimal Fuzzy Logic Control of pH Neutralization Process*. International Conference for Convergence of Technology – India, 2014.

SINGH, P.K.; BHANOT, S.; MOHANTA, H. K.; BANSAL, V. *Self-Tuned Fuzzy Logic Control of a pH Neutralization Process*. Proceedings of the 21st International Conference on Automation & Computing, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 11-12 September 2015

SUCHITHRA, R.; SRUTHILAY, V.; SNEHA,V.; SHANMATHI, R.; NAVASEELAN, P. *pH Controller for Water Treatment Using Fuzzy Logic*. 2016 IEEE International Conference on Technological Innovations in ICT For Agriculture and Rural Development (TIAR 2016)

SUNORI, S. K.; JUNEJA, P. K.; CHATURVEDI, M.; SAINI, P. *Model order reduction of a higher order model of pH neutralizer of sugar mil*. 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, Tehri, India, december, 2016.

VIJAYARAGAVAN, V.; VIVEK, S.; AARTHY, S. A.; RAAGAV, S.; SARANYA N. *pH Automation In Sugar Industries*. International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2015), Coimbatore, INDIA, January, 2015.

WAN,F.; SHANG,H.;WANG.L. *Adaptive Fuzzy Control of a pH Process*, 2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Sheraton Cancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada, July 16-21.