



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração - PROFICAM
Universidade Federal De Ouro Preto - Escola de Minas
Associação Instituto Tecnológico Vale**

Dissertação

**APLICAÇÃO DE CONTROLADOR *FUZZY* SUPERVISÓRIO EM UM
SECADOR NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

Modesto Pereira Júnior

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2018**

Modesto Pereira Júnior

**APLICAÇÃO DE CONTROLADOR *FUZZY* SUPERVISÓRIO EM UM
SECADOR NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: D.Sc. Thiago Antônio Melo Euzébio

Coorientador: D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães

Ouro Preto

2018

P436a Pereira Júnior, Modesto.
Aplicação de controlador Fuzzy supervisor em um secador na indústria de fertilizantes [manuscrito] / Modesto Pereira Júnior. - 2018.
82f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antônio Melo Euzébio.
Coorientador: Prof. Dr. Frederico Gadelha Guimarães.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais. Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Controlador Fuzzy. 2. Secador. 3. Fertilizantes. I. Euzébio, Thiago Antônio Melo. II. Guimarães, Frederico Gadelha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 681.5:622.2

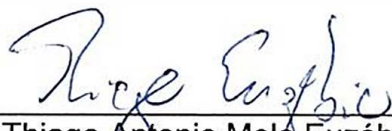
Catálogo: www.sisbin.ufop.br

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

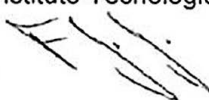
Aplicação de Controlador *Fuzzy* Supervisório em um Secador na Indústria de
Fertilizantes

Modesto Pereira Júnior

Dissertação defendida e aprovada em 20 de abril de 2018 pela banca
examinadora constituída pelos professores:



D.Sc. Thiago Antonio Melo Euzébio
Orientador – Instituto Tecnológico Vale (ITV)



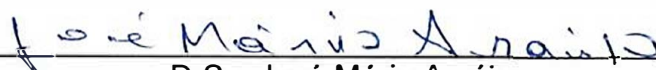
D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães
Coorientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



D.Sc. Paulo Marcos de Barros Monteiro
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. José Mário Araújo
Membro externo – Instituto Federal da Bahia (IFBA)

Aos meus pais, Modesto e Maria Luzia, pelos
esforços que me permitiram chegar até aqui.

À minha companheira, Úrsula, pelo apoio e
paciência.

Ao meu filho, Davi, fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus, pelo dom da vida e por colocar as pessoas certas em meu caminho.

Aos meus pais, Modesto e Maria Luzia, que sempre foram, e são, presença fundamental em inúmeros momentos da minha vida. Os exemplos dados por vocês me motivam muito.

À minha esposa, Úrsula, por me apoiar sempre, em qualquer situação. Pelos momentos que precisei me ausentar para prosseguir nesta jornada.

Ao meu filho, Davi, que mesmo sendo uma pequena criança, me motivava dia após dia a tentar ser uma pessoa melhor.

Ao meu orientador, Thiago, pelas orientações prestadas, pela paciência, atenção e apoio nos momentos mais diversos.

Ao amigo, Humberto Pereira, meu gestor à época do processo seletivo. Primeira pessoa a incentivar minha participação no curso de Mestrado.

Aos amigos, João Paulo que por inúmeras vezes pesquisou e enviou os artigos solicitados e ao Felipe que em vários momentos foi o consultor de softwares.

À todos os familiares, em especial às minhas irmãs Graciana e Cláudia, que sempre me incentivaram a prosseguir estudando.

Ao Instituto Tecnológico Vale pela realização do Mestrado.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À todos aqueles que não foram citados nominalmente, mas que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

Em quase todos os casos, você pode construir o mesmo produto sem lógica *fuzzy*, mas a difusa é mais rápida e mais barata.

(Lofti A. Zadeh)

RESUMO

Resumo da Dissertação apresentada à Escola de Minas/UFOP e ao ITV como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DE CONTROLADOR *FUZZY* SUPERVISÓRIO EM UM SECADOR NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES

Modesto Pereira Júnior

Abril/2018

Orientadores: D.Sc. Thiago Antônio Melo Euzébio

D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães

No presente trabalho sugere-se um controlador *fuzzy* supervisório aplicado ao processo de secagem de fertilizantes. O processo de secagem de fertilizantes estudado é composto por uma câmara de combustão, um secador rotatório e um ventilador de exaustão. O controle regulatório existente é feito a partir de um controlador PID aplicado a uma malha de controle de vazão de ar de exaustão. O controle de temperatura é feito por meio de controlador PID para a adição de comburente e uma lógica desenvolvida em ladder, que gera set points pré-definidos para adição de combustível. A pesquisa foi desenvolvida considerando-se que o controlador *fuzzy* seria empregado em uma camada de controle acima do controle regulatório. A definição do nível de pertinência das variáveis, bem como as regras para o controlador foram baseadas na experiência dos operadores da planta industrial. Os resultados obtidos com o controlador *fuzzy* no nível supervisório foram comparados com o sistema de controle sem esta camada. Os resultados obtidos pelas duas estratégias de controle foram apresentados em tabelas e em figuras, mostrando o comportamento dinâmico do processo. Foi realizada uma comparação do desempenho utilizando a Integral do Valor Absoluto do Erro e do Índice de Harris. O ganho financeiro foi apresentado ao final do trabalho.

Palavras-chave: Controlador *fuzzy*, Secador, Fertilizantes.

ABSTRACT

Abstract of Dissertation presented to Escola de Minas/UFOP and ITV as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APLPLICATION OF FUZZY SUPERVISORY CONTROLLER IN A DRYER IN THE FERTILIZERS INDUSTRY

Modesto Pereira Júnior

April/2018

Advisors: D.Sc. Thiago Antônio Melo Euzébio

D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães

In the present work it is suggested a supervisory fuzzy controller applied to the drying process of fertilizers. The fertilizer drying process studied consists of a combustion chamber, a rotary dryer and an exhaust fan. The existing regulatory control is made from a PID controller applied to an exhaust air flow control mesh. The temperature control is done using of PID controller for the addition of oxidizer and a logic developed in ladder, which generates preset set points for addition of fuel. The research was developed considering that the fuzzy controller would be employed in a control layer above the regulatory control. The definition of the level of relevance of the variables as well as the rules for the controller were based on the experience of the industrial plant operators. The results obtained with the fuzzy controller at the supervisory level were compared to the control system without this layer. The results obtained by the two control strategies were presented in tables and figures, showing the dynamic behavior of the process. A performance comparison was made using the Absolute Error Integral Value and the Harris Index. The financial gain was presented at the end of the work.

Keywords: Fuzzy controller, Dryer, Fertilizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Processo de secagem de fertilizantes.	2
Figura 1.2: Controles regulatórios da planta.	3
Figura 2.1: Diagrama de blocos do processo de produção de fertilizantes fosfatados.....	10
Figura 2.2: Ilustração de um secador rotatório (SILVA et al., 2012)..	12
Figura 2.3: Ilustração da fornalha e seus principais componentes (Adaptado de BAUER et al., 2010)..	15
Figura 2.4: Localização de instrumentos na planta.....	17
Figura 3.1: Conjuntos <i>Fuzzy</i> e grau de pertinência.....	23
Figura 3.2: Diagrama de blocos de um controlador <i>fuzzy</i>	24
Figura 4.1: Temperatura na saída do secador com a operação do controle regulatório.....	30
Figura 4.2: Histograma da temperatura na saída do secador com a operação do controle regulatório.....	30
Figura 4.3: Controle regulatório - Variável manipulada vazão de ar de combustão.	32
Figura 4.4: Controle regulatório - Variável manipulada vazão de biomassa.	32
Figura 4.5: Controle regulatório - Variável manipulada abertura da válvula de ar de exaustão do secador.....	33
Figura 4.6: Controle regulatório – Temperatura na saída da fornalha..	33
Figura 4.7: Controle regulatório – Vazão de ar de exaustão do secador.....	34
Figura 4.8: Controle regulatório – Vazão de produto..	34
Figura 4.9: Controlador <i>fuzzy</i> supervisor desenvolvido.....	36
Figura 4.10: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável temperatura na fornalha	37
Figura 4.11: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável temperatura no secador.	38
Figura 4.12: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável vazão de ar de exaustão.....	39
Figura 4.13: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável vazão de produto.....	40
Figura 4.14: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável pressão na fornalha.....	41

Figura 4.15: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável set point de temperatura na saída do secador.....	42
Figura 4.16: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável vazão de biomassa..	43
Figura 4.17: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável vazão de ar de combustão.....	44
Figura 4.18: Gráfico dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável abertura da válvula de ar de exaustão.....	45
Figura 4.19: Arquitetura de automação em que o controlador <i>fuzzy</i> está implantando	50
Figura 4.20: Temperatura na saída do secador com a operação do controle <i>fuzzy</i>	51
Figura 4.21: Histograma da temperatura na saída do secador com a operação do controle <i>fuzzy</i> e controle regulatório..	51
Figura 4.22: Saída do controlador <i>fuzzy</i> – Vazão de ar de combustão.....	52
Figura 4.23: Saída do controlador <i>fuzzy</i> – Vazão de biomassa.....	53
Figura 4.24: Saída do controlador <i>fuzzy</i> – Abertura da válvula de ar de exaustão do secador.....	53
Figura 4.25: Controle <i>fuzzy</i> – Temperatura na saída da fornalha.....	54
Figura 4.26: Controle <i>fuzzy</i> – Vazão de ar de exaustão do secador.....	55
Figura 4.27: Histograma da temperatura na fornalha – Controle <i>fuzzy</i> e regulatório.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Variáveis do controle regulatório.....	3
Tabela 4.1: Partições da variável temperatura na fornalha nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	37
Tabela 4.2: Partições da variável nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	38
Tabela 4.3: Partições da variável vazão de ar de exaustão nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	39
Tabela 4.4: Partições da variável vazão de produto nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	39
Tabela 4.5: Partições da variável pressão na fornalha nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	40
Tabela 4.6: Partições da variável set point de temperatura na saída do secador nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	41
Tabela 4.7: Partições da variável vazão de biomassa nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	42
Tabela 4.8: Partições da variável vazão de ar de combustão nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	43
Tabela 4.9: Partições da variável abertura da válvula de ar de exaustão nos respectivos conjuntos <i>fuzzy</i> , com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.....	44
Tabela 4.10: Regras do controlador <i>fuzzy</i>	46
Tabela 4.11: Índices de desempenho dos controladores.....	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CLP – Controlador Lógico Programável

cv – Cavalo vapor

DCS – Sistema de Controle Distribuído (*Distributed Control System*)

h – Hora

IAE – Integral do valor absoluto do erro (*Integrated Absolute value of error*)

IHM – Interface homem máquina (*Human Machine Interface*)

kg - Quilograma

m - Metro

mA – Mili Amperes

MIMO – Múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multiple Input Multiple Output*)

mm – Milímetro

mmCA – milímetros de coluna de água

MPC – Controle preditivo baseado em modelo

mV – Mili volts

MV – Variável Manipulada

Nm³/h – Normal metro cúbico por hora

NP – Nitrogênio e Fósforo

PI – Proporcional, Integral

PID – Proporcional, Integral, Derivativo

PV – Variável do Processo

RPM – Rotações por minuto

SISO – Única Entrada e Única Saída (*Single Input Single Output*)

SP – *Set Point*

SSP – Super Fosfato Simples

t – tonelada

t/h – Tonelada por hora

TC – Transformador de Corrente

TCP/IP – Protocolo de Controle de Transmissão / Protocolo de *Internet (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)*

TSP – Super Fosfato Triplo

Vcc – Tensão em corrente contínua, unidade Volts.

°C – Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	4
1.3	Questionamentos da pesquisa	5
1.4	Organização do texto	6
2	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES	7
2.1	Fertilizantes	7
2.2	Processo de produção de fertilizantes granulados	8
2.3	Operação unitária: Secagem de fertilizantes	10
2.3.1	Secador Rotatório	11
2.3.2	Combustão	13
2.3.3	Fornalha	14
2.3.4	Instrumentação existente	16
2.4	Revisão bibliográfica	18
2.4.1	Combustão de Biomassa	18
2.4.2	Controle de processo na produção de fertilizantes	20
3	CONTROLE FUZZY.....	22
3.1	Princípios da lógica <i>fuzzy</i>	22
3.1.1	Conjuntos <i>fuzzy</i>	22
3.1.2	Funções de pertinência	24
3.2	Controladores <i>fuzzy</i>	24
3.3	Revisão bibliográfica – Controladores <i>Fuzzy</i>	26
3.4	Índices de desempenho de controladores	27
3.4.1	IAE – Integral do valor absoluto do erro	28

3.4.2	Índice de Harris	28
4	DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY NO PROCESSO.....	29
4.1	Resultados obtidos com controle regulatório.....	29
4.2	Controlador <i>fuzzy</i> desenvolvido	35
4.3	Ferramenta utilizada para desenvolvimento	36
4.4	Variáveis de entrada do controlador.....	37
4.4.1	Variável Temperatura na Fornalha.....	37
4.4.2	Variável Temperatura na Saída do Secador.....	37
4.4.3	Variável Vazão do Ar de Exaustão	38
4.4.4	Variável Vazão de Produto	39
4.4.5	Variável Pressão na Fornalha.....	40
4.4.6	Variável Set Point de Temperatura na Saída do Secador	41
4.5	Variáveis de saída do controlador	42
4.5.1	Variável Vazão de Biomassa	42
4.5.2	Variável Vazão de Ar de Combustão	43
4.5.3	Variável Abertura da Válvula de Ar de Exaustão	44
4.6	Base de Conhecimento	45
4.6.1	Regras do controlador fuzzy	45
4.7	Implantação controlador <i>fuzzy</i> no CLP ControlLogix.....	49
4.8	Resultados obtidos com controlador <i>fuzzy</i> supervisor.....	50
4.9	Índices de desempenho das estratégias de controle.....	55
4.10	Resultados financeiros	56
4.11	Resultados obtidos com a redução da emissão de gases de efeito estufa	57
4.12	Ganhos intangíveis	57

5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	58
5.1	Respostas aos Questionamentos da Pesquisa.....	58
5.2	Trabalhos Futuros.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A reposição dos nutrientes no solo, principalmente potássio, nitrogênio e fósforo, é essencial para garantir a produtividade crescente da agricultura mundial. O papel do fertilizante no aumento da produtividade agrícola é decisivo. Estudos indicam que de 40% a 60% do aumento da produção agrícola atingida pela agricultura mundial desde 1960 só foi possível graças aos fertilizantes. A produção tem de ser incrementada ainda mais, pois o mundo necessitará de um aumento da ordem de 50% a 70% na produção de alimentos até 2050 para atender à crescente demanda, principalmente nos países em desenvolvimento (REVISTA AGROANALYSIS, 2013).

Na produção de fertilizantes granulados, a rocha fosfática e os insumos (água, ácido sulfúrico e vapor, entre outros) são dosados em um equipamento chamado granulador, que tem como objetivo adequar o produto às especificações químicas e aumentar o tamanho das partículas até um tamanho padrão desejado (entre 2 e 4 mm) (FERNANDES, 2008).

Após a etapa de granulação, é realizada a secagem. O objetivo desta etapa é evitar o empedramento dos grânulos nos armazéns ou embalagens, desintegração dos grãos devido à falta de dureza, entupimento de telas de peneiras, maiores incrustações nos equipamentos de transporte. O método mais empregado é a troca direta de calor. Neste método, uma corrente de ar quente é forçada a ter contato com o sólido úmido, no interior de um equipamento denominado secador rotatório (FERNANDES, 2008).

Os gases quentes utilizados para secagem do produto são gerados pela reação de combustão entre biomassa e ar, em uma câmara de combustão localizada na fornalha. Os gases quentes são ventilados para o secador onde se dará o contato do gás com o produto. Na saída do secador tem-se o produto e o gás que será enviado para a atmosfera através de um exaustor. Os secadores são projetados para promover o maior contato possível entre gás e produto, pois a taxa de secagem está ligada ao tempo de exposição e à superfície de contato entre gás e sólido.

A Figura 1.1 ilustra o processo de secagem de fertilizantes na Planta de Granulação do Complexo Industrial de Paulínia, unidade de produção de fertilizantes da empresa Galvani/Yara.

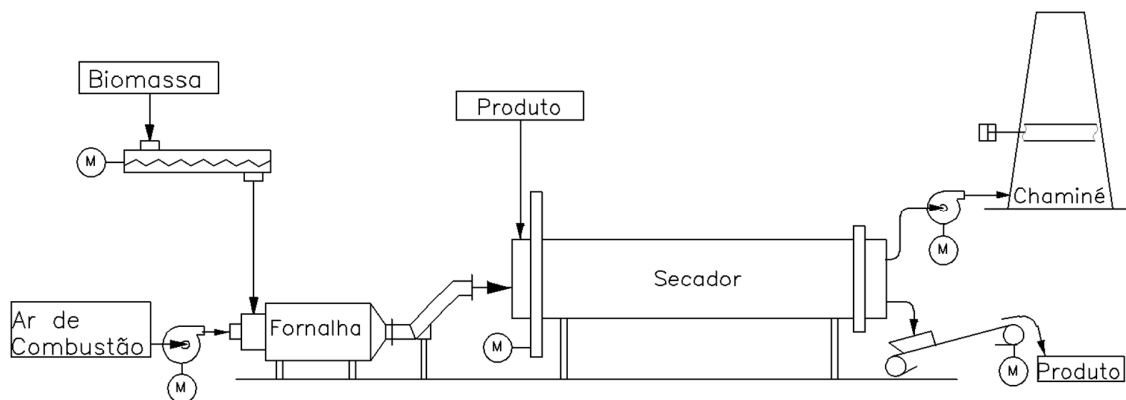


Figura 1.1: Processo de secagem de fertilizantes. Fonte: Autor (2018).

Existem três malhas de controle regulatório para o sistema de secagem ilustrado pela Figura 1.1, duas que controlam temperatura e uma que controla a vazão de gases através do secador.

O controle regulatório para controle de temperatura consiste em uma malha de controle PID, denominada TIC02, em que a PV é a temperatura na fornalha, o set point é inserido pelo operador no supervisório e a MV é o set point de vazão enviado para o inversor de frequência SZ02, que controla a vazão de ar de combustão para a fornalha.

A malha denominada TIC03 tem como PV a temperatura na fornalha, o SP é calculado por meio de uma lógica implementada no CLP e a MV é o set point enviado para o inversor de frequência SZ03, que controla a vazão de biomassa para a fornalha.

Existe também uma malha de controle PID para a vazão de ar de exaustão do secador, denominada FIC01. A PV é a vazão de ar de exaustão do secador, o SP é inserido pelo operador no supervisório e a MV é a referência de abertura para válvula de ar de exaustão, localizada na chaminé.

Os parâmetros dos três controladores estudados foram verificados de modo empírico. Produziu-se variações crescentes e decrescentes nas variáveis manipuladas e observou-se a resposta da variável de processo. Não foram utilizados métodos de sintonia como Ziegler e Nichols, Cohen e Coon, dentre outros. Desta forma, os parâmetros dos controladores PID foram considerados adequados.

A Figura 1.2 ilustra o controle descrito. A Tabela 1.1 apresenta as malhas do controle regulatório existente, as PV's e as MV's.

Tabela 1.1: Variáveis do controle regulatório

Malha	TIC02			
	PV	Tag	MV	Tag
	Temperatura na fornalha	TT01	SP de vazão de ar de combustão	SZ02
Malha	TIC03			
	PV	Tag	MV	Tag
	Temperatura na fornalha	TT01	SP de vazão de biomassa	SZ03
Malha	FIC01			
	PV	Tag	MV	Tag
	Vazão de ar de exaustão do secador	FT01	Abertura da válvula de ar de exaustão	ZT01

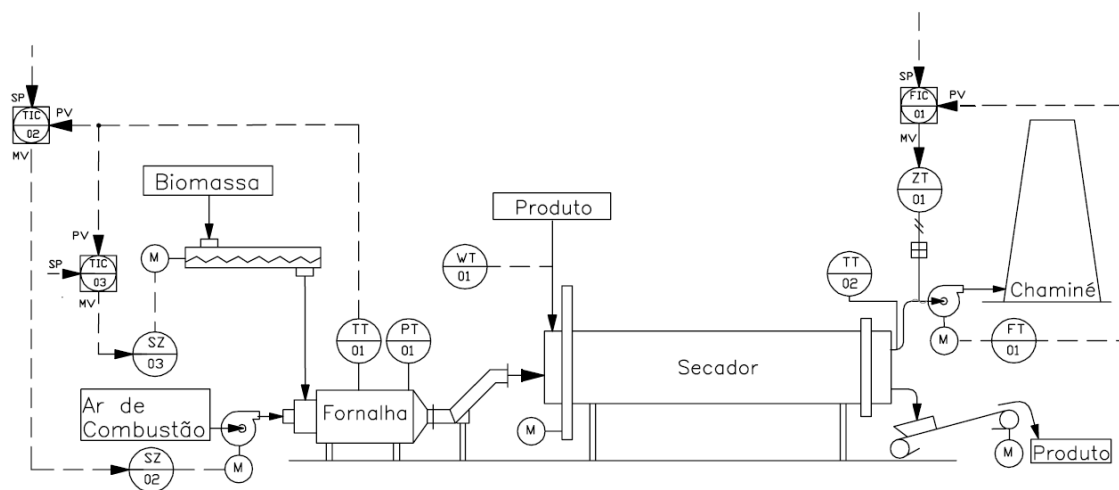


Figura 1.2: Controles regulatórios da planta. Fonte: Autor (2018).

O dimensionamento, modelagem e simulação de secadores rotatórios constituem um grande desafio. A secagem envolve transferências de calor e massa, além de processos fluidodinâmicos das mais diferentes formas. Este sistema possui múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), caracterizadas pelo acoplamento entre as variáveis do processo, não-linearidades e atrasos de tempo. O processo de secagem depende tanto da vazão do ar de exaustão do secador, quanto da temperatura dos gases que saem da fornalha. A primeira variável é responsável pela secagem da superfície dos grãos, enquanto que a segunda é responsável pela secagem do interior do grão, por meio do mecanismo de difusão. Controlar cada uma destas variáveis, de maneira isolada, é uma tarefa bastante onerosa para o operador de sala de controle, dado o atraso de tempo e o acoplamento entre as variáveis. O aumento na vazão de ar de

combustão e vazão de biomassa gera uma maior quantidade de calor no sistema. Existe um atraso de tempo na detecção do aumento de temperatura na fornalha pelo sensor de temperatura. Existe também um atraso de tempo na detecção do aumento da temperatura na saída do secador, devido ao atraso ocasionado pelo sensor e pelo tempo de residência do produto no secador. A vazão do ar de exaustão é impactada pela variação de temperatura do gás, já que a variação de temperatura faz variar o volume do gás.

Dessa forma, verificou-se a oportunidade do desenvolvimento de um controle avançado, empregando-se um controlador *fuzzy* supervisor acoplado ao sistema regulatório existente, permitindo um controle mais adequado das variáveis, mesmo na presença de atrasos de tempo e acoplamento entre estas.

Algumas estratégias de controle podem ser aplicadas de forma a se obter e manter o nível desejado de desempenho em sistemas complexos, na presença de grandes incertezas. O uso da lógica *fuzzy* para resolver problemas complexos, que tratam de raciocínios aproximados, é uma das formas de aplicação bem-sucedidas de controle especialista. (SILVA et. al, 2017), (ASSMANN et. al., 2017), (MICCIO e COSENZA, 2014), (TENG e ZHANG, 2014).

Os controladores *fuzzy* tornaram-se uma alternativa viável no controle de processos com parâmetros que variam ao longo do tempo, presença de não-linearidades e informações imprecisas. O desempenho destes processos, quando se utiliza um controlador *fuzzy*, é tão bom ou até melhor quando comparado com o desempenho de um controlador clássico, embora este último controlador seja normalmente mais simples de implementar e sintonizar.

1.2 Motivação

A secagem é um dos fenômenos físicos mais comuns, de maior importância na natureza e em diversos setores industriais (por exemplo, indústrias químicas, alimentos, mineração, papel e celulose, entre outras). Consiste na retirada de umidade de um material, sendo esta retirada ocorrida mediante o fornecimento de energia térmica (GEANKOPLIS, 1993). Por ser um processo térmico, é dada ênfase aos gastos energéticos envolvidos na retirada de água. As baixas eficiências térmicas observadas nos secadores industriais sugerem que estudos nesta área podem contribuir significativamente para a economia de energia e recursos naturais hoje gastos por esta atividade (LEONEL, 2014).

O secador opera com o fertilizante sendo alimentado em uma de suas extremidades, com a umidade variando, tipicamente, entre 10 e 15%. A taxa de alimentação é controlada pelo operador. A velocidade de rotação e a inclinação do secador são fixas. A diferença de pressão pode variar devido a diferentes fatores, como temperatura dos gases, umidade do produto, entrada de ar falso etc. O arraste gerado pelo gás quente em movimento varia em função da abertura da válvula do ar de exaustão, da quantidade de alimentação do produto e da própria temperatura do gás. A temperatura do gás varia em função das vazões de ar de combustão e biomassa, da proporção estequiométrica entre estas, do poder calorífico e da umidade da biomassa utilizada. Além do acoplamento entre as variáveis, existe também o atraso de tempo entre as variações de temperatura e a detecção pelos sensores.

O desafio presente no controle da operação de secagem é conciliar a menor temperatura possível na fornalha, de modo a minimizar o consumo específico de biomassa, suficiente para promover o mecanismo de difusão e realizar a secagem da parte interna dos grãos. Aliado a isso, também é necessário controlar a vazão de ar de exaustão, que dentre outras variáveis, é afetada pelas variações de temperatura.

A escolha em se utilizar controlador *fuzzy* se justifica pelas vantagens deste controlador sobre os controladores convencionais ou clássicos, podendo-se citar: (i) podem trabalhar com entradas contendo informações imprecisas; (ii) tratam processos complexos com características de comportamento não linear, elevada ordem, atraso de transporte e sistemas mal definidos e (iii) possibilitam a implementação do conhecimento e experiência de especialistas utilizando-se regras linguísticas (COELHO E ALMEIDA, 2003).

1.3 Questionamentos da pesquisa

As importações de fertilizantes realizadas pelo Brasil nos dois primeiros meses de 2018 foram superiores a 70% do total de fertilizantes entregues ao mercado, segundo estatística divulgada pela ANDA (2018). A necessidade de tornar o processo de produção de fertilizantes mais eficiente, e consequentemente, tornar o custo de produção competitivo, resulta em três questões no âmbito desta pesquisa.

Questão 1: O desenvolvimento de uma camada de controle acima do controle regulatório existente seria capaz de diminuir o consumo específico de biomassa?

Questão 2: É possível controlar a geração de calor na fornalha utilizando-se como variável de controle temperatura na saída do secador ao invés da temperatura na fornalha?

Questão 3: Existe algum impacto negativo em se alterar a variável de controle da geração de calor para a temperatura na saída do secador?

1.4 Organização do texto

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução, onde é feita uma breve contextualização sobre a indústria de fertilizantes, são apresentados o processo e o controle regulatório existente e são apresentados os questionamentos relacionados à pesquisa.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos envolvidos no processo de produção de fertilizantes, secadores rotatórios, combustão de biomassa e a revisão bibliográfica relacionada aos itens citados.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos relacionados à controladores *fuzzy* e é apresentada a revisão bibliográfica pertinente.

No Capítulo 4 aborda-se o desenvolvimento e a implantação do controlador *fuzzy* supervisor proposto e demonstram-se os resultados obtidos.

No Capítulo 5 apresentam-se a discussão dos resultados e sugestões para trabalhos futuros.

2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES

Neste capítulo são abordados conceitos relacionados aos fertilizantes e ao processo produtivo, com o objetivo de facilitar o entendimento da dinâmica envolvida no processo.

2.1 Fertilizantes

Os elementos químicos reconhecidamente essenciais ao desenvolvimento normal das plantas são: C, H, O, N, P K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo e Cl. Os três primeiros elementos as plantas retiram do gás carbônico contido no ar e da água. Todos os demais vêm do solo, via absorção pelo sistema radicular e, em pequenas quantidades, pelas folhas. Os seis elementos seguintes são denominados macronutrientes porque as plantas os requerem em quantidades apreciáveis. Os sete últimos elementos são denominados micronutrientes, porque a quantidade requerida pelas plantas é mínima, apesar de serem indispensáveis (ARRUDA, 2008).

A produção vegetal depende de vários fatores, pode-se citar: a espécie vegetal, população, tratos culturais, clima, solo, disposição de nutrientes e microorganismos no solo. A falta de nutrientes disponíveis no solo pode ser compensada pela aplicação de fertilizantes, que apresentam uma elevada taxa de recuperação desses nutrientes.

Fertilizante é um composto químico que contém um ou mais nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Tem a finalidade de recompor e/ou tornar o solo mais produtivo. A matéria-prima para a produção de fertilizantes fosfatados é o minério de P_2O_5 (pentóxido de fósforo), mais comumente designado de rocha fosfática pelos produtores de fertilizantes (CEKINSKI, 1990).

Os fertilizantes fosfatados são classificados nos seguintes produtos: Superfosfato Simples (SSP), Superfosfato Triplo (STP) e Termofosfato. Superfosfato é o termo genérico usado para denominar um fertilizante fosfatado sólido, obtido a partir da reação de concentrado fosfático com ácido sulfúrico ou ácido fosfórico. O produto obtido do ataque com ácido sulfúrico é denominado superfosfato simples (SSP) e o resultante da solubilização com ácido fosfórico é denominado superfosfato triplo (TSP). O processo de solubilização ou ataque da rocha fosfática (minério de fósforo), também pode ser chamado de acidulação.

2.2 Processo de produção de fertilizantes granulados

Granulação é uma operação que consiste na formação, cristalização ou aglomeração de um ou vários elementos. Esta operação resulta em grânulos de diâmetro maior e mais uniformes. Dessa forma, as operações de secagem, classificação, manuseio e transporte são favorecidas.

A indústria de fertilizantes utiliza em larga escala os granuladores do tipo tambor rotativo. Estes equipamentos consistem em um cilindro rotativo, com rotação controlada. O granulador possui um ângulo de inclinação que regula o escoamento do material dentro do tambor (tempo de residência). No granulador são misturadas as matérias primas sólidas (SSP, TSP e micronutrientes) e as matérias primas líquidas (água, vapor e ácido sulfúrico).

Após a etapa de granulação, os fertilizantes seguem para a etapa de secagem. A secagem de fertilizantes granulados é necessária uma vez que a granulação é um processo em via úmida, e, caso contrário, ocorreriam posteriormente vários problemas no produto final e na própria unidade de granulação como, por exemplo: empedramento dos grânulos nos armazéns ou nos sacos de embalagens, desintegração dos grãos devido à falta de dureza, entupimento de telas de peneiras e maiores incrustações nos equipamentos de transporte (correias e elevadores). O equipamento mais utilizado para este fim na indústria de fertilizantes é o secador de tambor rotativo (FERNANDES, 2008).

Após a etapa de secagem, as temperaturas dos grânulos variam tipicamente de 75 a 120 °C. Se o produto for enviado para armazenamento a essas temperaturas, certamente haveria problemas de aglomeração. Nas altas temperaturas em questão, os grânulos são bastante plásticos. Quando submetidos às pressões encontradas nos depósitos de fertilizantes, os grânulos tendem a se achatar levemente, permitindo maior contato com a superfície, prejudicando os resultados de granulometria. O resfriamento é realizado em tambores rotativos com um fluxo de ar contracorrente, semelhante ao secador (SAEMAN e MITCHELL, 1954).

A etapa seguinte é o peneiramento, uma operação que consiste na separação da mistura de grânulos com o objetivo de obter uma ou mais frações de partículas com tamanhos homogêneos. A faixa granulométrica esperada para fertilizantes granulados é entre 2 e 4 mm. O produto contido nesta faixa é enviado para o armazém de estoque. O produto fora desta faixa granulométrica retorna ao processo, sendo que o produto de maior granulometria é submetido ao processo de moagem antes de retornar ao início do processo.

Nos processos produtivos, muitas vezes ocorre liberação de gases, fumaça e/ou particulados que, misturados com o ar e em altas concentrações, podem ser prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. O tratamento dos gases que serão lançados na atmosfera consiste em reduzir a concentração destas substâncias presentes no ar, captando-as na fonte emissora ou recuperando-as, antes de liberá-los para o ambiente. Durante a produção de fertilizantes são utilizados os equipamentos denominados: ciclone, filtro de mangas e lavadora de gases.

Os ciclones são equipamentos de separação gás-sólido. O ar contaminado entra no ciclone tangencialmente e descreve um vórtice descendente próximo das paredes. O fluxo é invertido posteriormente, formando um vórtex ascendente. A saída do ar é feita pela parte superior e as partículas sólidas descem para a parte inferior do ciclone (MAURICIO, et al.; 2006).

Mangas filtrantes são elementos tubulares de tecido filtrante. Um filtro de mangas industrial contém diversas mangas a fim de suprir a área de filtração necessária. O gás contaminado atravessa o tecido permeável e o material sólido é retido no tecido, no início do processo de filtração (BIZZO, 2010).

Os lavadores de gases são equipamentos que utilizam uma corrente líquida, geralmente água, para retirar partículas sólidas que estão contidas em um gás (TELES, SALVADOR E NASCIMENTO; 2003).

A Figura 2.1 ilustra as etapas do processo citadas anteriormente.

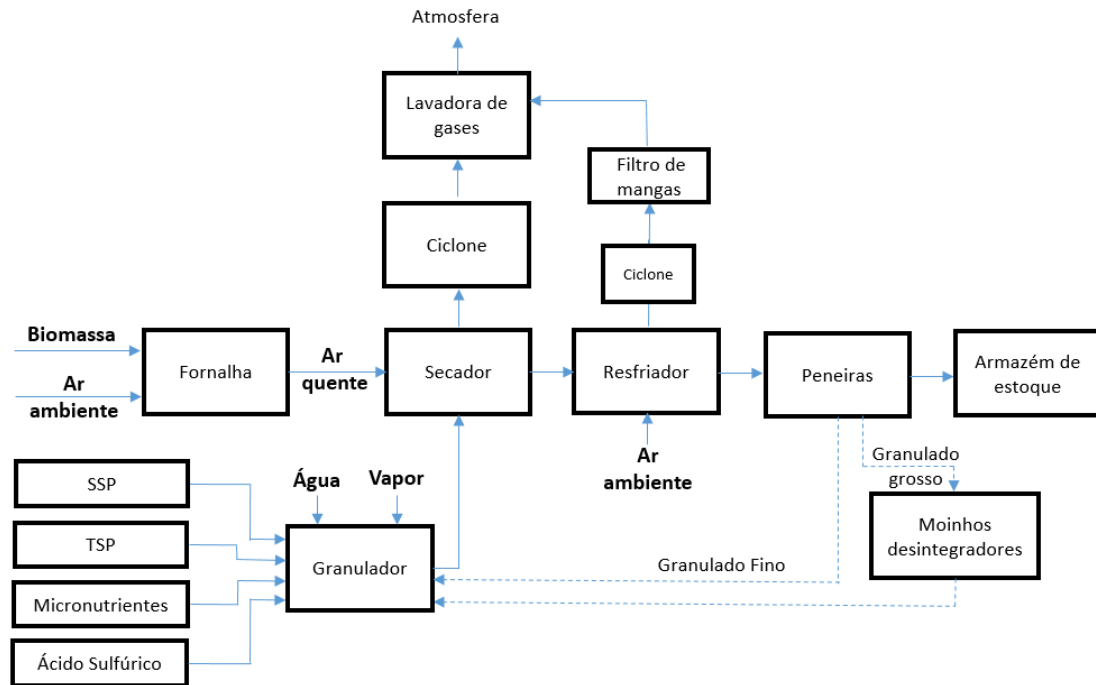


Figura 2.1: Diagrama de blocos do processo de produção de fertilizantes fosfatados.

Fonte: Autor (2018).

2.3 Operação unitária: Secagem de fertilizantes

O objetivo principal na operação de secagem é, obviamente, obter um produto com um teor final de umidade que não ultrapasse um máximo especificado. Neste caso, o valor especificado pelo cliente é 2,5%.

Para compreender os fenômenos envolvidos na secagem de fertilizantes é necessário o conhecimento básico dos fenômenos envolvidos no processo. A taxa de secagem pode ser definida como a quantidade de água que se transfere do sólido para a fase gasosa em um intervalo de tempo, ou seja, a velocidade de evaporação, ou ainda a velocidade em que o teor de umidade de um sólido é reduzido. A secagem tem duas fases principais: a primeira, quando a taxa de secagem é constante e a segunda, quando a taxa de secagem é decrescente.

A primeira fase, onde a taxa de secagem é constante, é característica das condições em que ocorre a secagem da água livre na superfície molhada do grão. Nesta fase, a troca de massa é controlada pela umidade relativa e a velocidade dos gases de secagem (VITOR e CAGLIARI JÚNIOR, 2004).

Na segunda fase, quando a taxa de secagem é decrescente, o material apresenta sua superfície totalmente seca, de modo que a transferência de massa é controlada no interior do sólido por um mecanismo de difusão e não sofre influência do aumento da vazão de gases no processo, sendo o fenômeno influenciado pela diferença de temperatura entre os gases e o sólido úmido. Então, o que tem-se nesta fase é uma taxa de secagem cada vez menor, ou seja, a transferência de água para fase gasosa é cada vez mais lenta, devido à dificuldade da água se difundir através do interior do sólido para a superfície. A energia necessária para retirar água dos grânulos nesta etapa é maior que na primeira, pois além da taxa de secagem ser cada vez menor, ainda há a necessidade de se manter o perfil de temperatura dos gases maior que a do sólido para provocar o processo de difusão (VITOR e CAGLIARI JÚNIOR, 2004).

2.3.1 Secador Rotatório

Um secador rotatório consiste em um tambor cilíndrico apoiado sobre mancais que permitem que o tambor gire. O movimento de rotação é realizado por um motor elétrico. Internamente o tambor possui suspensores (ou aletas) que trabalham promovendo o cascadeamento do produto, permitindo maior contato entre gás e sólido. O tambor possui uma leve inclinação (entre 3° e 5°) que, associada ao movimento de rotação, faz com que o material escoe ao longo do secador. A rotação e a inclinação do tambor são que determinam o tempo de residência do material dentro do secador. A quantidade, a disposição e o tipo dos suspensores também influenciam no tempo de residência (MOYERS e BALDWIN, 1999). A Figura 2.2 ilustra um secador rotatório e as principais partes que o compõem.

Os secadores rotatórios operam com cerca de 10 a 15% do volume cheio pelo material. O enchimento menor será insuficiente para usar eficazmente os septos elevatórios. O enchimento maior cria a possibilidade de haver o maior contato dos sólidos no topo do leito. Nas condições normais de enchimento, o secador pode reter os sólidos o tempo suficiente para a remoção da umidade interna. Quando a retenção do secador não é bastante grande, o tempo de passagem pode ser muito curto para remover esta umidade, ou então, em virtude do enchimento incompleto dos lanços o desempenho pode ser errático. O efeito do enchimento sobre a retenção e a uniformidade, na operação dos secadores rotatórios, é estudado por Miskell e Marshall, (1956).

O tempo de residência do produto nos secadores rotatório pode ser estimado pelas equações deduzidas por Miskell e Marshall (1956):

$$\theta = \frac{0,23L}{SN^{0,9}D} \pm 0,6 \frac{BLG}{F} \quad (1)$$

$$B = 5(D_p)^{-0,5} \quad (2)$$

Em que: B é uma constante que depende do material que está sendo manipulado e está aproximadamente definida pela Equação (2), D_p é a média ponderada das dimensões das partículas do material que está sendo manipulado [μm], F é a velocidade de alimentação do secador [$\text{lb de material seco/h.f t}^2$ da seção reta do secador], θ é o tempo de passagem [min], S é a inclinação [ft/ft], N é a velocidade [rpm], L é o comprimento do secador [ft], G é a velocidade mássica do ar [lb/h.ft^2], D é o diâmetro do secador [ft]. Emprega-se o sinal positivo quando o escoamento é contracorrente e o sinal negativo quando o escoamento é em correntes paralelas.

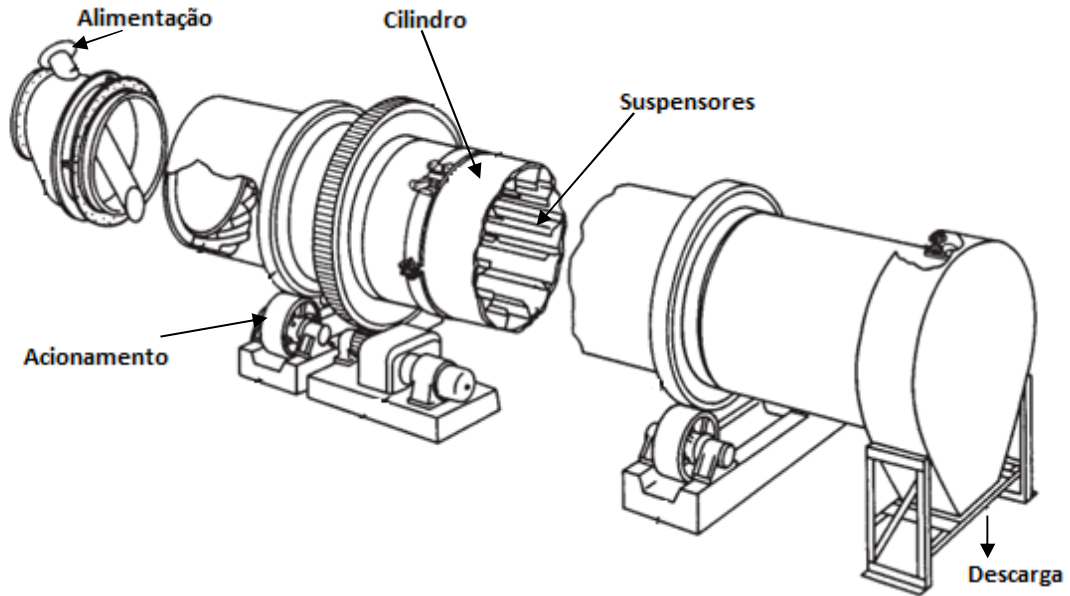


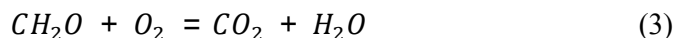
Figura 2.2: Ilustração de um secador rotatório (SILVA et al., 2012).

O secador estudado possui comprimento de 24 m e diâmetro de 3,5 m. A velocidade de operação é 3,93 RPM. O acionamento elétrico é feito com um motor elétrico de 350 cv, 4 pólos. O tempo de residência médio do material no interior do secador estudado é de 13 minutos.

2.3.2 Combustão

A combustão é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor e formar como produto um grupo de espécies diferente dos reagentes (RENDEIRO et al., 2008).

Sob as condições ideais de combustão completa, a combustão de biomassa produz dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O), de acordo com a reação química representada pela Equação (3):



em que CH_2O representa a composição média do material da biomassa. Como a combustão completa não é alcançada sob quaisquer condições de combustão da biomassa, outras espécies de carbono, incluindo monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e carbono particulado, resultam da combustão incompleta da biomassa (Levine, 1994).

A combustão de matérias sólidas acontece em 4 fases, sendo: aquecimento/secagem, pirólise, oxidação e pós combustão. Estas fases podem acontecer simultaneamente, em diferentes regiões da biomassa em combustão.

O aquecimento/secagem é a fase em que ocorre a evaporação da água contida no combustível sólido por adição de calor. Na pirólise acontece a liberação dos gases inflamáveis contidos no combustível após sua temperatura ser elevada a níveis de temperatura adequados. Os gases liberados e oxigênio em proporções adequadas resultam em uma mistura inflamável. A combustão é a fase em que ocorre a reação exotérmica entre os gases formados na etapa da pirólise com o oxigênio. A pós-combustão é a fase em que tem-se o combustível sólido na forma de carvão e cinzas. O material particulado são as partículas de menores dimensões que

são arrastadas pelos gases até a chaminé. Uma parte destes resíduos é gaseificada e escoa na forma de outros gases e outra parte é retirada como cinzas.

O clima do nosso planeta é controlado pela presença de gases em quantidades muito pequenas. Muitos desses gases que controlam o clima estão aumentando sua concentração com o tempo. Gases atmosféricos de efeito estufa, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio troposférico (O_3) estão aumentando com o tempo. Concentrações de gases quimicamente ativos, óxido nítrico (NO) e monóxido de carbono (CO) também estão aumentando com o tempo. Esses gases têm fontes variadas de produção, incluindo queima de combustíveis fósseis, atividade metabólica microbiana e reações químicas. Todos esses gases são produzidos direta ou indiretamente pela queima de biomassa (Levine, 1994). Dessa forma, a combustão de biomassa pode ser um importante fator para a mudança na atmosfera e no clima global.

2.3.3 Fornalha

A fornalha é o equipamento responsável por converter a energia química do combustível em energia térmica para aquecimento do ar utilizado na secagem. Esse processo ocorre devido a reação de combustão da biomassa.

Fornalhas são compostas por uma câmara de combustão, onde os combustíveis são completamente oxidados; por uma grelha, onde se apóia o combustível sólido; por aberturas de entrada e saída, destinadas ao carregamento do combustível sólido e às passagens do ar ambiente e do ar da secagem; e por um cinzeiro, onde são depositados os resíduos da combustão (CARDOSO, 2010).

Uma análise completa da eficiência térmica de fornalhas requer a utilização dos princípios termodinâmicos e da transferência de calor e massa, os quais requerem conhecimento dos mecanismos que regem as reações químicas de combustão, a composição elementar e imediata do combustível, a composição dos gases de combustão, as propriedades físicas dos reagentes e dos produtos da combustão nas suas fases sólidas e gasosas, o fluxo de gases e de energia no sistema, as temperaturas dos gases, as propriedades dos materiais utilizados e outros parâmetros nem sempre disponíveis na prática (MAGALHÃES, 2007).

O comburente necessário para a reação de combustão é insuflado para o interior da fornalha por meio de um ventilador centrífugo, denominado ventilador de ar de combustão.

Consiste de um rotor que gira em alta rotação no interior de uma carcaça em formato espiral. O ar atmosférico entra no ventilador na direção axial ao eixo de rotação e, então é movido do centro para a periferia do rotor por ação da força centrífuga, saindo perpendicularmente ao mesmo eixo, por meio de dutos metálicos. Cada duto possui uma válvula manual que pode ser utilizada para o controle da vazão do ar. O controle de vazão do ar de combustão é realizado variando-se a velocidade do rotor do ventilador, por meio da manipulação da velocidade do motor, utilizando-se um inversor de frequência.

Para realizar a alimentação de biomassa, são utilizados um pequeno silo e uma rosca dosadora. O silo tem a função de manter uma quantidade mínima de biomassa, maior que a capacidade de dosagem da rosca. O silo é reabastecido ciclicamente. A biomassa atua também como selo, impedindo a perda de calor do interior da fornalha para o ambiente. A rosca dosadora por sua vez consiste em uma rosca sem fim, acionada por um motor elétrico, que tem sua velocidade controlada por um inversor de frequência. Como a área da rosca é conhecida, manipulando-se sua velocidade, consegue-se controlar a quantidade de biomassa enviada para a fornalha.

A Figura 2.3 ilustra a fornalha da planta industrial e seus principais componentes.

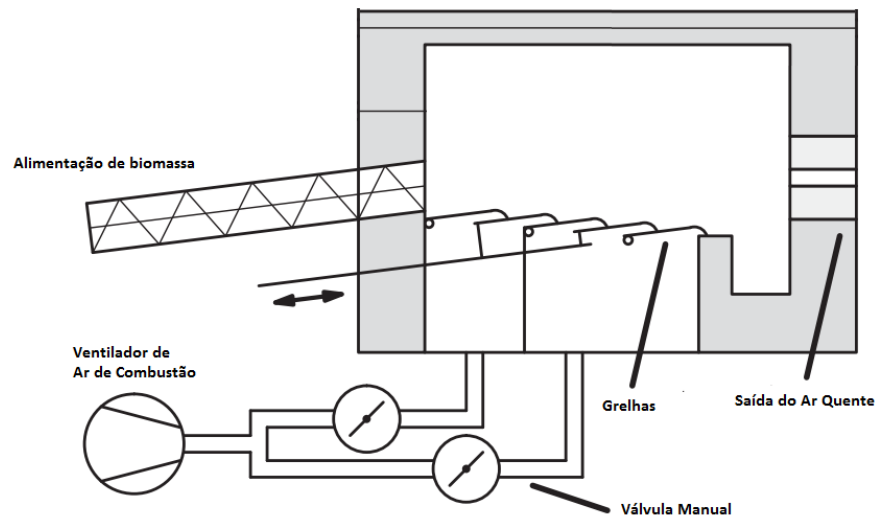


Figura 2.3: Ilustração da fornalha e seus principais componentes (Adaptado de BAUER et al., 2010).

2.3.4 Instrumentação existente

A temperatura na fornalha (TT-01) é medida por um termopar tipo “S”. A junção de medição desse termopar é inserida 200 mm além do refratário. A temperatura no interior da fornalha produz uma força eletromotriz entre os fios do termopar da ordem de mV que é diretamente proporcional a temperatura medida. Esse sinal elétrico é convertido por um transmissor de temperatura microprocessado, que converte o sinal de tensão (mV) em corrente elétrica (mA), também proporcional a temperatura. O sinal de saída do transmissor de temperatura é escalonado na faixa de 4 a 20 mA. O range deste instrumento é de 0 a 1500 °C.

A temperatura na saída da fornalha (TT-02) é medida por uma termorresistência tipo Pt-100. A resistência ôhmica do sensor varia proporcionalmente com a temperatura a que o sensor é submetido. O sinal enviado pelo sensor é convertido em corrente elétrica (mA) por um transmissor de temperatura microprocessado, com range de 0 a 200 °C.

A pressão na fornalha (PT-01) é medida por um transmissor de pressão do tipo capacitivo. A pressão da fornalha exerce sobre a área do sensor exerce uma força sobre o sensor capacitivo, que tem sua capacitância alterada. A alteração na capacitância é proporcional a pressão medida. A saída do transmissor de pressão é corrente elétrica, na faixa de 4 a 20 mA. O range do instrumento é de - 50 a 50 mmCA.

A abertura da válvula de ar de exaustão do secador (ZT-01) é controlada por um posicionador eletropneumático. Este instrumento recebe um sinal de corrente elétrica, 4 a 20 mA, e faz variar a pressão de ar comprimido que é enviada para o atuador da válvula. A abertura da válvula, 0 a 100%, é proporcional ao sinal elétrico recebido. Como a rotação do ventilador de exaustão é constante e válvula está instalada no duto de admissão do ventilador, o controle de vazão de gases é feito a partir da modulação da válvula. Quanto maior a abertura da válvula, maior a vazão de gases.

A vazão de ar de exaustão do secador (FT-01) é medida de forma indireta pela corrente do motor. É sabido que quanto maior a vazão dos gases, maior será a corrente no motor. Por meio da curva de desempenho do ventilador, que relaciona vazão com potência demandada, é possível inferir a vazão dos gases. Nesse sistema de medição, a corrente elétrica é medida por um TC, que converte o valor de corrente em uma saída de tensão, 0 a 5 Vcc. O sinal de tensão é enviado para um conversor que gera em sua saída um sinal de corrente elétrica (4 a 20 mA) proporcional à tensão.

O ventilador de ar de combustão é acionado por um inversor de frequência (SZ-01), que recebe um sinal de corrente elétrica (4 a 20 mA) que é proporcional a vazão desejada. O inversor de frequência varia a tensão e frequência da rede de forma a controlar a velocidade do motor elétrico e, conseqüentemente a velocidade do rotor do ventilador. Controlando-se a velocidade do rotor do ventilador controla-se a vazão de ar de combustão.

A rosca dosadora de biomassa é também acionada por um inversor de frequência (SZ-02) que recebe um sinal de corrente elétrica (4 a 20 mA) que é proporcional a vazão de biomassa desejada. O inversor de frequência varia a tensão e frequência da rede de forma a controlar a velocidade do motor elétrico e, conseqüentemente, a velocidade da rosca dosadora. Como a área da rosca dosadora é conhecida, controlando-se a velocidade da rosca controla-se a vazão de biomassa.

A vazão de produto (WT-01) é medida por uma balança dinâmica instalada em um transportador de correia. A vazão de produto medida na faixa de 0 a 200 t/h é convertida para um sinal de corrente elétrica de 4 a 20 mA.

Todos os sinais de saída dos instrumentos e as entradas para os elementos finais de controle estão interligados por meio físico ao CLP ControlLogix. A Figura 2.4 ilustra a locação dos instrumentos descritos.

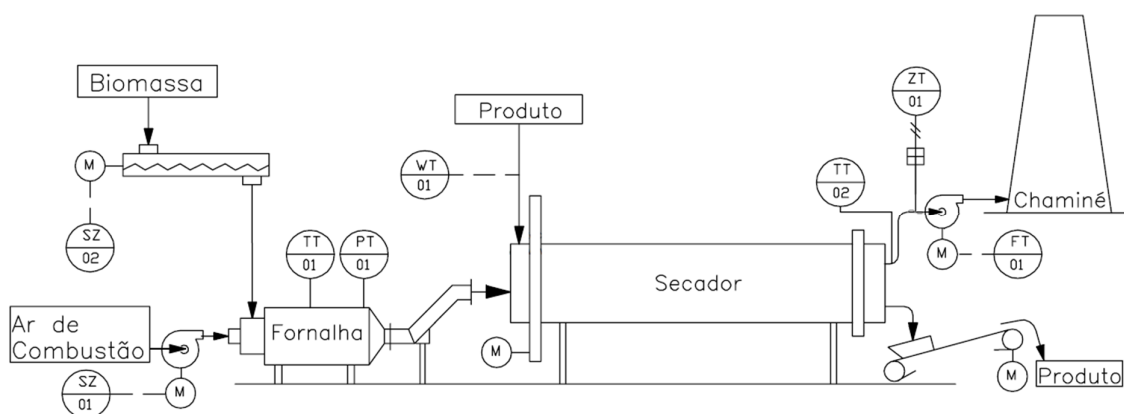


Figura 2.4: Localização de instrumentos na planta. Fonte: Autor (2018).

2.4 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica que é apresentada neste capítulo é dividida em dois itens: combustão de biomassa e processo de produção de fertilizantes. A combustão de biomassa é o processo que gera o calor para a secagem dos fertilizantes e não é foco do. Trabalhos de otimização do processo de produção de fertilizantes são apresentados aqui para demonstrar que as estratégias de controle avançado são pouco empregadas neste processo produtivo.

2.4.1 Combustão de Biomassa

Pinheiro e Valle (1995) demonstram que o controle de poluição e o controle do rendimento térmico de fornalhas geralmente é realizado de maneira inadequada, de forma independente. O excesso de ar é utilizado para assegurar a combustão completa, mantendo um teor suficiente de oxigênio até o final da chama. O desafio do controle do processo de combustão real se deve ao fato de que o excesso de ar afeta os níveis de emissão de poluentes e a eficiência térmica de maneiras distintas e antagônicas. Os autores sugerem um controle em malha fechada a partir da análise de CO_2 , O_2 e CO nos produtos da combustão na saída da fornalha, ao invés do controle em malha aberta da vazão de ar aliado a vazão de combustível constante.

Após analisar a dinâmica do sistema de controle de câmaras de combustão, concluiu-se que se trata de um processo com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO). Há uma grande quantidade de interações recíprocas entre as variáveis de entrada e saída. Por esta razão, existe o interesse em investigar e desenvolver estruturas de controle avançado para fornos industriais (ABILOV et al., 2002).

Magalhães (2007) desenvolveu e avaliou uma fornalha para geração de calor, com opção de aquecimento direto e indireto do ar, visando a secagem de produtos agrícolas. São demonstrados os cálculos para dimensionamento da fornalha como: cálculo da energia para aquecimento do ar, cálculo do consumo de combustível, cálculo do sistema de alimentação da fornalha. São previstos instrumentos para medição de temperatura na câmara de combustão e temperatura dos gases de exaustão, medição da vazão de ar e qualidade dos gases de combustão. A conclusão do autor é que a fornalha desenvolvida é um equipamento útil para geração de

calor, pode ser aplicada para gerar ar aquecido limpo nos setores agrícolas e agroindustriais com custos acessíveis.

As câmaras de combustão de biomassa são utilizadas para a produção de calor e energia. As câmaras são geralmente suficientemente equipadas com sistemas de controle e proteção. No entanto, o uso de estratégias de controle avançados para a combustão de biomassa ainda não é muito difundido (PACES e KOZEK, 2011).

Paces et al. (2011) apresentam um MPC aliado ao controle PI para um forno de grelha móvel com várias zonas de combustão. Citam a complexidade do controle devido às características do combustível que variam frequentemente, as numerosas entradas e saídas e o forte acoplamento dinâmico entre as variáveis. Os controles existentes são baseados em SISO e se mostram pouco eficientes e demandam uma interação substancial do operador. O modelo desenvolvido utiliza seis entradas e quatro saídas. Os resultados da simulação do controle proposto são satisfatórios, mas os erros de modelagem e o efeito das restrições ativas devem ser pesquisados.

Segundo Göllés et al. (2011) o potencial para operação de baixa emissão de poluentes em um forno de biomassa com alta eficiência, que é, em princípio, possível devido às geometrias de forno otimizadas bem como estratégias de preparo de ar de combustão, não podem ser explorados, pois os sistemas de controle da planta são usados apenas parcialmente, ou todos não consideram os acoplamentos e não-linearidades das plantas. Por essa razão, uma estratégia de controle baseada em modelo para fornos de grelha de biomassa, que permite uma consideração explícita dos acoplamentos e não-linearidades do sistema é desenvolvida e experimentalmente verificada em um forno de escala piloto. Os resultados atingidos são uma resposta mais rápida da temperatura após a alteração de set point, uma redução significativa na emissão de monóxido de carbono aliado ao aumento de eficiência na caldeira, se comparado a estratégia de controle anterior.

Rezende (2012) projetou e constrói um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente, acoplado a um combustor do gás para produção da mistura entre ar quente com ar ambiente com aplicação na secagem de grãos e outros fins. Seu objetivo foi controlar a temperatura na zona de combustão do gaseificador e a temperatura do ar quente de exaustão utilizando sistema lógico *fuzzy*. Os resultados demonstraram que o controle é realizado de forma eficiente, viabilizando o uso na secagem de grãos e outros fins.

2.4.2 Controle de processo na produção de fertilizantes

O trabalho de Balasevicius et al. (1998) analisou o estágio de modernização do sistema de controle de alimentação de um granulador para produção do fertilizante Ammophos (um fertilizante concentrado do tipo NP). O sistema em questão consiste em 4 malhas PID, sendo uma para dosagem de ar, dosagem de vapor, dosagem de amônia (NH_3) e dosagem de ácido fosfórico (H_3PO_4). A arquitetura de automação é centralizada e protocolo de comunicação RS-485. É sugerido pelos autores a utilização de arquitetura distribuída, com protocolo de comunicação Ethernet TCP/IP para maior velocidade no tráfego de dados, independência de controladores, programação de CLP's de diferentes lugares, comunicações externas.

Mangwandi et al. (2013) utilizaram a metodologia de superfície de resposta para otimização do processo de granulação. A partir de dados experimentais, foram utilizadas ferramentas estatísticas para correlacionar a dependência entre variáveis de processo e definir os melhores pontos de operação. Foram obtidos resultados de menor taxa de reciclo de produto, melhor resistência granular e melhor esfericidade do produto se comparados aos resultados de fábricas de fertilizantes típicas.

Estudos tem sido desenvolvidos buscando-se aliar os conceitos de otimização e controlabilidade, simultaneamente, buscando garantir uma menor variabilidade na operação dos secadores para atingir os critérios de qualidade, além de operar em condições de máxima eficiência energética (ATUONWU et al., 2013).

Ehlali e Asri (2014) escreveram a respeito do potencial de desenvolvimento dos DCS em uma fábrica de fertilizantes no Marrocos. A empresa iniciou a introdução dos DCS's em 1997 nas unidades de produção de ácido fosfórico e fertilizantes. Os autores destacam os requisitos mínimos a serem respeitados na escolha de DCS's especialmente para unidades produtoras de fosfato. Citam que o domínio da tecnologia para utilização dos DCS's abre espaço para a operação automática e inteligente das unidades de produção através do uso de controles avançados como MPC, lógica *fuzzy*, redes neurais.

Cotabarren et al. (2015) fizeram uma avaliação de diferentes estratégias de controle para aprimoramento da operação de circuitos de granulação. As estratégias foram implementadas em um simulador e os resultados validados por dados experimentais. Foram analisados controladores com realimentação de loop único e loop múltiplo (controle em cascata). Todas as estratégias foram capazes de eliminar distúrbios e atingir novos set points para as variáveis

controladas, sendo que o controle em cascata superou o controlador com feedback de loop único.

Rodrigues et al. (2017) investigaram os efeitos das variáveis para otimização do processo de granulação em tambor para fertilizante a base de super fostato. Utilizaram técnicas de regressão para quantificar os efeitos das variáveis investigadas na eficiência da granulação e propriedades do produto, além de equações para prever as respostas como funções das variáveis estudadas. Foi possível identificar condições que melhoram a eficiência da granulação e as propriedades físicas do produto final.

3 CONTROLE *FUZZY*

A lógica *fuzzy* é uma técnica que tenta emular sistematicamente e matematicamente o raciocínio humano e as tomadas de decisão. A lógica *fuzzy* permite que os conhecimentos empíricos e heurísticos, sejam representados por regras e então transferidos para um bloco de funções. Assim, a lógica *fuzzy* fornece uma maneira clara e intuitiva de implementar sistemas de controle, tomada de decisão e sistemas de diagnóstico em vários ramos da indústria.

Neste capítulo apresentam-se os conceitos utilizados e a revisão bibliográfica que servem como base para desenvolver e aplicar o controlador *fuzzy*.

3.1 Princípios da lógica *fuzzy*

O conceito de conjuntos *fuzzy* foi introduzido pelo Prof. Lotfi Zadeh em 1965, com a publicação do artigo “*Fuzzy Sets*” (ZADEH, 1965). Seu desenvolvimento foi motivado pela necessidade de uma ferramenta conceitual que pudesse expressar e tratar incertezas e imprecisões (OLIVEIRA, BRAGA E ALMEIDA, 2010). Desde então, a lógica *fuzzy* emergiu como uma técnica poderosa para o controle de processos industriais, sistemas de diagnóstico e outros sistemas especialistas.

A lógica *fuzzy* é útil em aplicações onde o processo possui não-linearidades ou respostas variáveis no tempo, devido à dificuldade de modelá-lo matematicamente. Muitas vezes, os métodos de controle tradicionais, como o controle PID, não podem fornecer controle adequado para esses tipos de aplicações (KÖRÖSI e TURCSEK, 2011).

Na sua forma mais básica, a lógica *fuzzy* considera as variáveis a serem incluídas em um conjunto com base em seus graus de pertinência, em vez de absolutas. Em vez de precisão, a lógica *fuzzy* traz um nível de tolerância para a imprecisão. Informações imprecisas, como aquelas resultantes de medições inexatas ou obtidas a partir do conhecimento humano, podem ser incorporadas em um modelo *fuzzy*.

3.1.1 Conjuntos *fuzzy*

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é definido por uma função de pertinência da seguinte forma: 0 se o elemento não é membro do conjunto, ou 1 se o elemento é membro do conjunto. Os conjuntos *fuzzy*

generalizam conjuntos clássicos e o grau de pertinência de elemento a um conjunto pode assumir qualquer valor no intervalo unitário real $[0, 1]$.

Um conjunto *fuzzy* A do universo X é definido pela função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$ e representado por um par ordenado $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$, em que $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com A . Com base nessa definição, pode-se afirmar que um elemento x_1 pertence ao conjunto A se $\mu_A(x_1) = 1$; não pertence ao conjunto A se $\mu_A(x_1) = 0$; ou pode pertencer ao conjunto A com um determinado grau de pertinência, com valores $\mu_A(x_1) \in (0, 1)$ (REZENDE, 2012).

As variáveis linguísticas são elementos simbólicos empregados na lógica *fuzzy*, cujos valores são os nomes de conjuntos *fuzzy*. Sua função é fornecer uma maneira sistemática de aproximação de fenômenos complexos ou mal definidos, se aproximando do raciocínio humano (GONÇALVES, 2007).

Um exemplo de conjuntos *fuzzy* é ilustrado pela Figura 3.1. Considere a variável temperatura, com três conjuntos *fuzzy*, que utilizam as variáveis linguísticas: baixo, médio e alto. Para cada valor particular da variável temperatura (x), pertencente ao universo de discurso (X), existe um grau de pertinência (μ_A) em relação ao conjunto (A). Neste exemplo temos: $x = 95^\circ\text{C}$, $X = [20, 150]^\circ\text{C}$, $\mu_{\text{médio}} = 0,8$ e $\mu_{\text{alto}} = 0,2$.

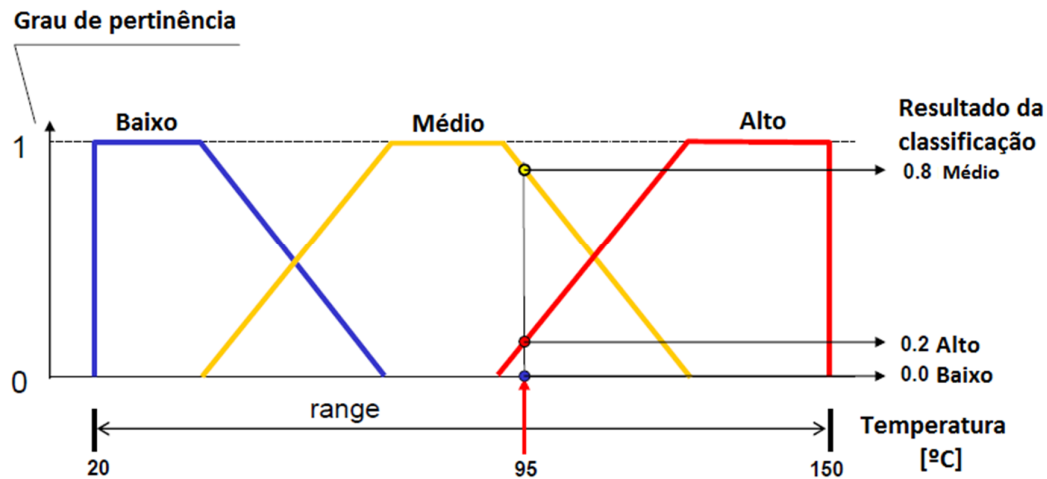


Figura 3.1: Conjuntos *Fuzzy* e grau de pertinência (Adaptado de Rockwell Automation, 2007).

As principais propriedades e proposições relacionadas aos conjuntos *fuzzy* são encontradas em Rezende (2012) e Telles (2005).

3.1.2 Funções de pertinência

Cada variável linguística é descrita por intermédio de uma função de pertinência, que pode ser contínua ou discreta, normalizada de forma que seu conjunto imagem seja projetado no intervalo $[0,1]$.

As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* podem ser definidas pela experiência do usuário, mas o comum é utilizar as funções padronizadas nas formas triangular, trapezoidal e gaussiana.

Uma abordagem detalhada dos tipos de função de pertinência e suas propriedades pode ser verificada no trabalho de Telles (2005).

3.2 Controladores *fuzzy*

Um diagrama de blocos de um controlador *fuzzy* é ilustrado na Figura 3.2. O controlador é composto por quatro elementos: Interface de Fuzzyficação, Base de Regras, Mecanismos de Inferência e Interface de Defuzzyficação.

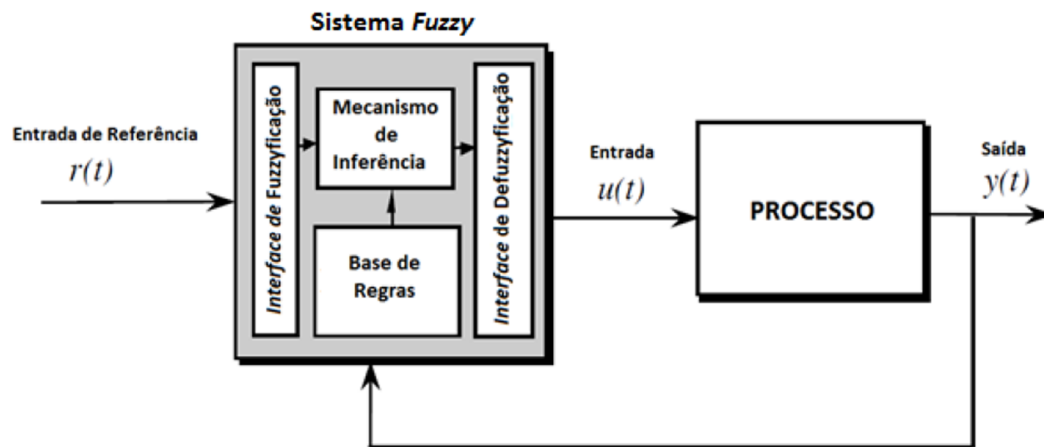


Figura 3.2: Diagrama de blocos de um controlador *fuzzy*. Fonte: Shaw e Simões (2004).

A interface de fuzzyficação recebe os valores das variáveis de entrada, frequentemente grandezas contínuas no domínio dos números reais provenientes de sensores, e condicionam os

valores para um universo de discurso normalizado, transformando números reais em valores discretos com um grau de pertinência em conjuntos *fuzzy* (SHAW e SIMÕES, 2004).

A base de regras consiste em um conjunto de regras do tipo SE <condição> ENTÃO <consequência>. Essas regras podem ser formuladas com base no conhecimento do especialista do processo. É a base de regras que caracteriza a estratégia de controle (PASSINO e YOURKOVICH, 1997).

Veja abaixo um exemplo de regras para um controle de temperatura:

→ Se (TEMPERATURA é FRIA) então (LIGA no QUENTE).

→ Se (TEMPERATURA é BOA) então (DESLIGA).

→ Se (TEMPERATURA é QUENTE) então (LIGA no FRIO).

O mecanismo de inferência é o componente do controlador em que ocorrem as operações com os conjuntos *fuzzy*, as relações e composições *fuzzy*. Há combinação entre os antecedentes (valores fuzzyficados das variáveis do processo) com os consequentes das regras para gerar o conjunto *fuzzy* de saída, conforme o procedimento de inferência adotado (REZENDE, 2012). O método de inferência de Mamdani (MANDANI e ASSILIAN, 1975), baseado nos operadores Max-Min dos conjuntos *fuzzy*, é utilizado no controlador desenvolvido. No texto de Rezende (2012), é abordado o método de inferência de Mamdani e Takagi-Sugeno, e ainda um exemplo de aplicação dos dois métodos.

A Interface de defuzzyficação converte os resultados da inferência *fuzzy* para ações de controle não *fuzzy*. O objetivo é obter-se um único valor discreto utilizável numa ação de controle concreta no mundo real. Segundo Shaw e Simões (2004), os três métodos de Defuzzyficação mais utilizados são: Centro da Área, Centro do Máximo e Média do Máximo.

O método de defuzzyficação utilizado neste trabalho é o centro da área ou centróide. Após a avaliação em paralelo de todas as regras, o resultado final é representado por um número real, que é o centro da área das contribuições de todos os consequentes do conjunto de regras (WAKABAYASHI, 2007).

3.3 Revisão bibliográfica – Controladores *Fuzzy*

Abilov et al. (2002) propuseram a aplicação de um controle avançado multivariável baseado em lógica *fuzzy* para controle de temperatura em um forno de refinaria de petróleo. A aplicação do controlador *fuzzy* permite que se atinja um amortecimento em menor tempo e melhor desempenho se comparado ao controle clássico.

Uma pesquisa sobre análise e projeto de sistemas de controle *fuzzy* foi realizada por Feng (2006). Cerca de quatro décadas após a introdução da teoria dos conjuntos *fuzzy*, o autor encontrou uma grande variedade de aplicações para controladores *fuzzy*. Essas aplicações incluem engenharia de controle, modelagem qualitativa, reconhecimento de padrões, processamento de sinais, tomadas de decisões, finanças, medicina, indústria automobilística dentre outras.

Wakabayashi (2007) realizou um estudo de caso da potencialidade da aplicação de controladores *fuzzy* em um processo de semi-batelada. Foi utilizado programa de simulação em ambiente computacional, utilizando modelo fenomenológico. Os ajustes das regras e dos parâmetros de funções de pertinência mostraram-se capazes de produzir bom desempenho em relação aos set points solicitados, com redução de *overshoot* na temperatura.

Precup e Hellendoorn (2010) apresentaram uma pesquisa sobre desenvolvimentos de análise e projeto de sistemas de controle *fuzzy* focados em aplicações industriais reportadas no período de 2000 a 2010. Foram citadas 244 referências de trabalhos bem-sucedidos em aplicações industriais. Destacaram os desafios que merecem ser estudados quando é avaliada a aplicabilidade de controles *fuzzy* e afirmaram que os desafios atrairão pesquisadores e profissionais.

Onofre Filho (2011) propôs a concepção, avaliação do desempenho e uma metodologia para sintonia dos parâmetros iniciais das funções de pertinência de saída de um controlador *fuzzy*-PI, com a simulação de um processo de refinaria de petróleo. A comparação do controlador *fuzzy*-PI com os controladores PI e PI escalonado mostrou melhores tempos de acomodação e *overshoots* com a utilização do controlador *fuzzy*, que apresentou comportamento dinâmico estável.

Teng e Zhang (2014) utilizaram um software de simulação para propor um controle de temperatura para um forno de aquecimento por indução baseado em um controlador *fuzzy*-PI combinado com um preditor de Smith. Os resultados obtidos foram pequenos *overshoot*, tempo de resposta curto e boa estabilidade e robustez.

Vasconcellos (2016) propôs um procedimento para projeto de controladores *fuzzy* multivariáveis. O procedimento consistiu em considerar diversas malhas SISO e sintonizá-las. A etapa seguinte consistiu em unir os controladores em um único controlador MIMO, considerando todas as entradas e saídas, sem considerar a influência de cada malha nas outras. A última etapa consistiu em incluir a influência de cada variável exerce sobre todo o sistema dinâmico. Dessa forma, é possível ter uma melhor compreensão e se obter um melhor desempenho do controlador.

Silva et al. (2017) propuseram a implementação e sintonia de um sistema de controle *fuzzy*-PID utilizando-se comunicação FieldBus. O controlador *fuzzy* ajusta os ganhos de escala do controlador PID para o controle de nível em um sistema de tanques. Foi avaliado o desempenho do controlador *fuzzy*-PID frente ao controlador PID em relação a *overshoot*, tempo de subida e o critério ISE. Os resultados mostraram que a estrutura do controlador *fuzzy* possui potencial de aplicação, mesmo quando é possível implementar um controlador PID clássico. É observado que ocorre saturação da variável manipulada para o controlador PID convencional e esse fato não ocorre com a utilização do controlador *fuzzy*-PID.

3.4 Índices de desempenho de controladores

Ao projetar sistemas de controle, a avaliação do desempenho é fundamental. Para que essa análise não ocorra apenas por análise gráfica, são aplicadas técnicas que permitem a avaliação quantitativa do desempenho. Os índices de desempenho são calculados por meio do acompanhamento da trajetória da variável controlada, em relação ao seu valor de referência desejado, durante um determinado período de observação.

Neste trabalho são empregadas duas técnicas para avaliação do índice de desempenho, o IAE e o Índice de Harris. O objetivo dos índices é estabelecer uma base de comparação entre as alternativas de estratégia de controle, possibilitando melhoria na qualidade do produto final, nos aspectos de segurança de pessoas e equipamentos e minimização dos custos de produção, dentre outros.

3.4.1 IAE – Integral do valor absoluto do erro

O índice IAE (Integrated Absolute value of error) é representado matematicamente pela Equação (4):

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4)$$

Um sistema ótimo baseado nesse critério é um sistema que possui amortecimento aceitável e apresenta resposta transitória satisfatória. Desta forma, sistemas subamortecidos e sobreamortecidos avaliados por esse índice atingem valores ótimos, pois a integral é incrementada tanto para erros positivos, quanto para erros negativos (ONOFRE FILHO, 2011).

3.4.2 Índice de Harris

O índice proposto por Harris e Desborough (1992) relaciona a estimativa da variância que um Controlador de Variância Mínima produziria e a variância real da saída do processo, conforme apresentado na Equação (5):

$$\eta(k) = \frac{\sigma_{mvc}^2}{\sigma_y^2} \quad (5)$$

onde σ_{mvc}^2 é a estimativa da variância mínima teórica e σ_{mvc}^2 é a variância do sistema.

De acordo com sua concepção, o índice de Harris varia de 0 a 1. Malhas avaliadas com índice próximo da unidade estão operando em condições ótimas do ponto de vista da variância. Já em avaliações onde se obtém índice próximo de zero, o controle implementado apresenta desempenho distante do ótimo (BARBOSA, 2011).

4 DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY NO PROCESSO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com ação do controle regulatório, o desenvolvimento do controlador *fuzzy* supervisor e os resultados obtidos com sua implementação. É ainda realizada uma análise do desempenho da planta operando com o controle regulatório e do desempenho da planta com o controlador *fuzzy* atuando em um nível acima do controle regulatório.

4.1 Resultados obtidos com controle regulatório

Uma característica desejada nos fertilizantes é a baixa higroscopicidade, isto é, baixa tendência em absorver água do ambiente. A absorção de umidade durante o armazenamento e o manuseio irá reduzir sua qualidade física. A presença de água livre nos fertilizantes, ou seja, moléculas de água adsorvidas sobre ou próximas da superfície, favorece a higroscopicidade. A variável do processo que pode ser associada à água livre é a temperatura na saída do secador. Por meio desta variável é possível inferir se houve a eliminação da água livre até o patamar desejado.

O comportamento da variável temperatura na saída do secador, com a atuação apenas do controle regulatório, é ilustrado pela Figura 4.1. Apesar de ser a variável de maior interesse no processo de secagem, não observa-se um set point para esta variável, visto que o controle da temperatura na saída do secador é realizado de forma indireta. São controladas a temperatura na fornalha e a vazão de ar de exaustão por meio de controles regulatórios, conforme ilustrado na Figura 1.2.

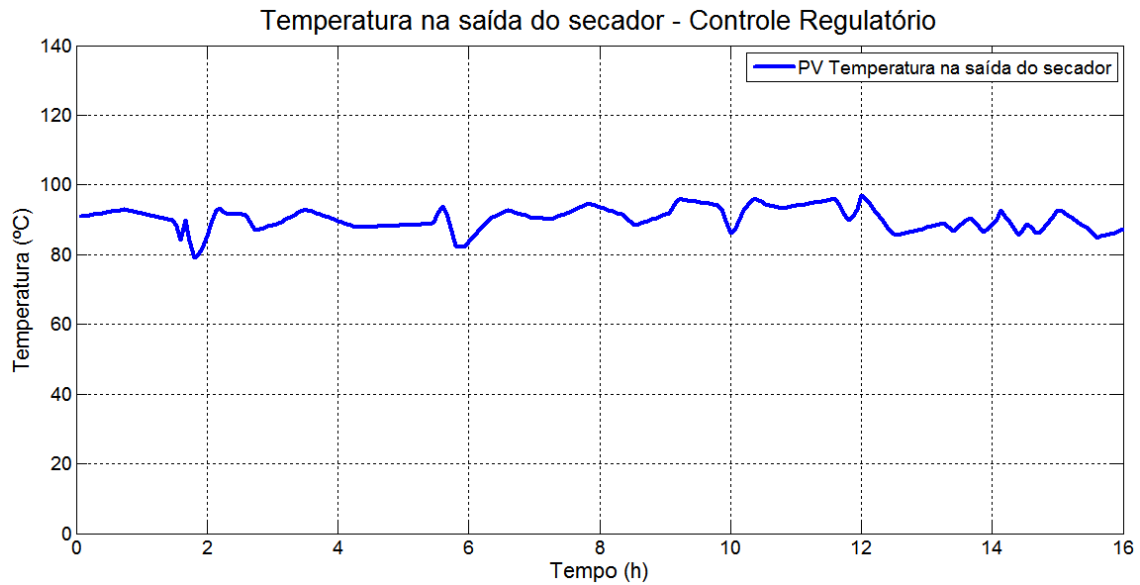


Figura 4.1: Temperatura na saída do secador com a operação do controle regulatório. Fonte: Autor (2018).

A Figura 4.2 ilustra a análise estatística do comportamento da temperatura na saída do secador com a planta operando com o controle regulatório. Observamos a média de 90,30 °C e o desvio padrão de 3,18 °C.

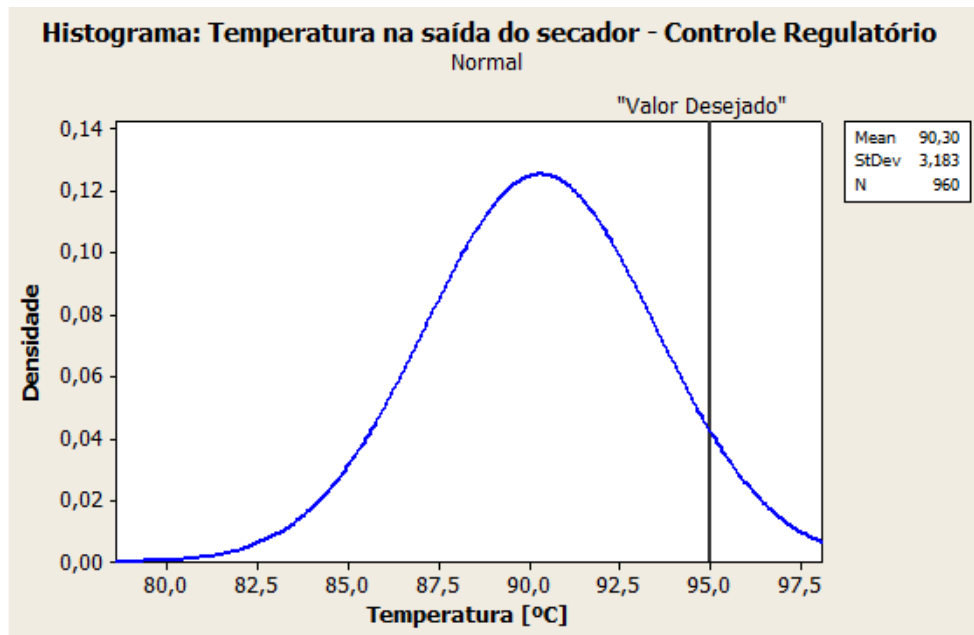


Figura 4.2: Histograma da temperatura na saída do secador com a operação do controle regulatório.

Fonte: Autor (2018).

Nas Figuras 4.3 e 4.4 ilustram-se, respectivamente, a variável manipulada vazão de ar de combustão e vazão de biomassa. Observa-se no intervalo entre 0 e 4 h que as variáveis sofrem poucas alterações, apesar da temperatura na fornalha estar abaixo do set point estabelecido, Figura 4.6. Esse fato está relacionado ao valor de vazão do produto, que é apresentado na Figura 4.8. Nas primeiras horas a vazão de produto está em torno de 105 t/h. O operador, percebendo a temperatura baixa tanto na fornalha, quanto na saída do secador, reduz a vazão de produto. Antes do instante 4 h, a vazão de produto é reduzida para 80 t/h, após esse instante é observado um aumento na temperatura na saída da fornalha. Mas esse aumento não é refletido na temperatura na saída do secador, devido a diminuição da vazão de ar de exaustão do secador.

A abertura da válvula de ar de exaustão do secador, apresentada na Figura 4.5, é aumentada de forma a corrigir o desvio negativo após o instante 5 h. Após o instante 6 h a vazão de produto é alterada para 90 t/h. As vazões de ar de combustão e biomassa são diminuídas de modo a corrigir o erro da temperatura na fornalha em relação ao set point de 1025 °C.

Antes do instante 10 h, o operador observa uma queda na vazão de ar de exaustão do secador, ilustrada na Figura 4.7, e altera o set point para $600 \times 10^2 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Essa queda da vazão de ar de exaustão, sem a alteração da abertura da válvula de ar de exaustão pode ser ocasionada por entrada indesejada de ar falso no sistema (abertura de janela de inspeção, rompimento de juntas de conexão de dutos, furo em dutos etc.). Esse fato causa uma queda na temperatura da fornalha e na saída do secador instantes depois.

Entre os instantes 10 a 16 h observam-se as maiores variações na vazão de ar de combustão, a vazão de biomassa mantém-se com poucas variações e a temperatura na fornalha apresenta algumas oscilações. A vazão de produto é alterada pelo operador entre os instantes 13 e 15 h na busca de diminuir as variações de temperatura. A vazão do ar de exaustão do secador permanece próxima ao set point.

O comportamento das variáveis temperatura na fornalha e vazão de ar de exaustão do secador comprova o quanto é complexo controlar o processo de secagem, que depende das duas variáveis, utilizando-se apenas o controle clássico. A realimentação do controle regulatório feita por uma única variável não se mostra eficaz para o controle desejado.

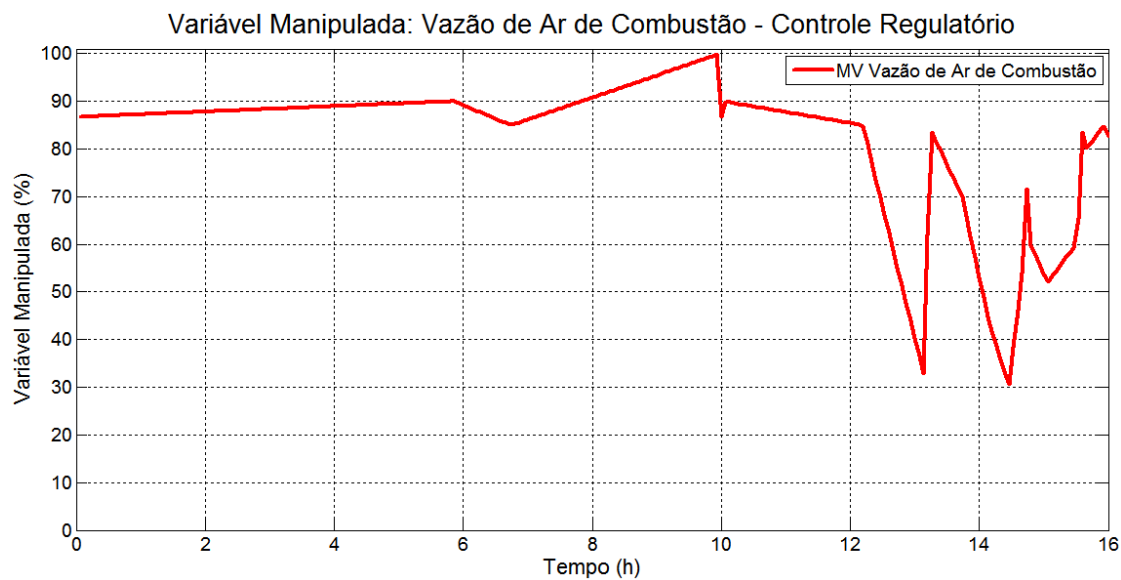


Figura 4.3: Controle regulatório - Variável manipulada vazão de ar de combustão. Fonte: Autor (2018).

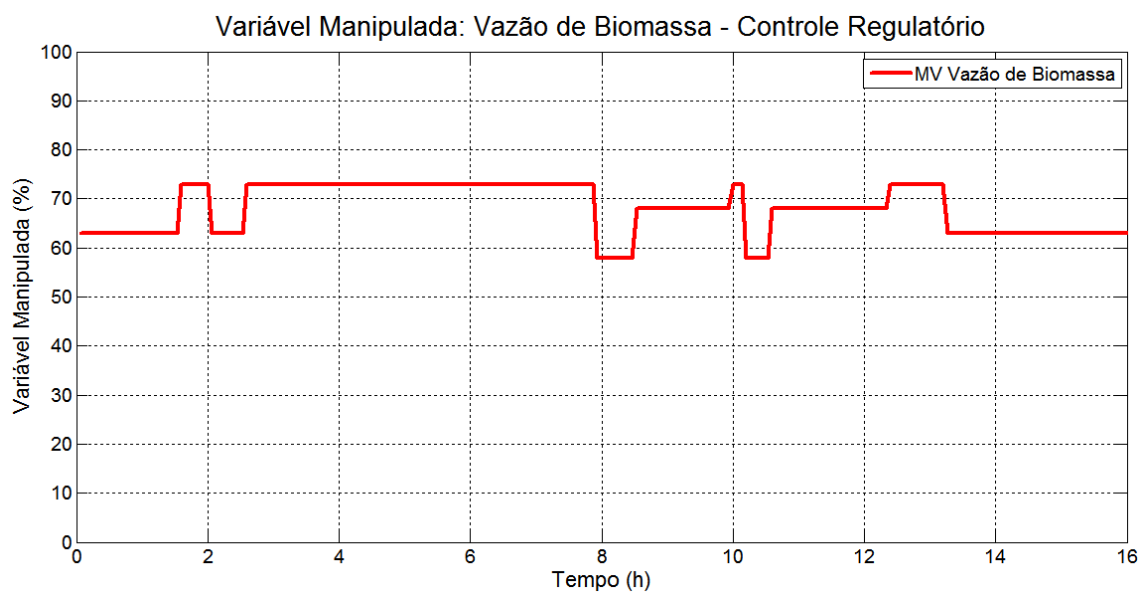


Figura 4.4: Controle regulatório - Variável manipulada vazão de biomassa. Fonte: Autor (2018).

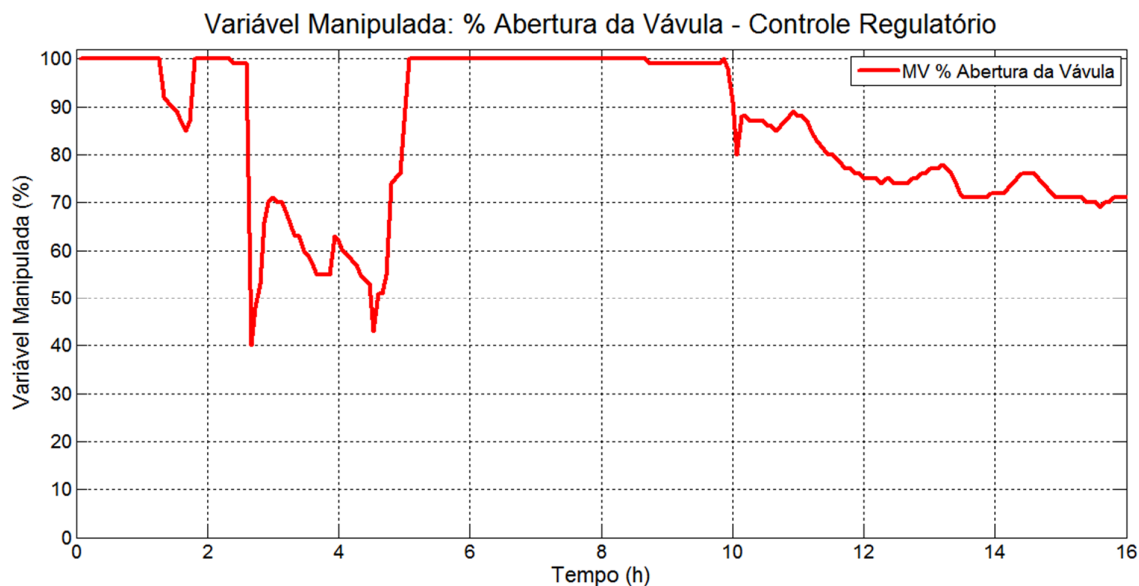


Figura 4.5: Controle regulatório - Variável manipulada abertura da válvula de ar de exaustão do secador. Fonte: Autor (2018).

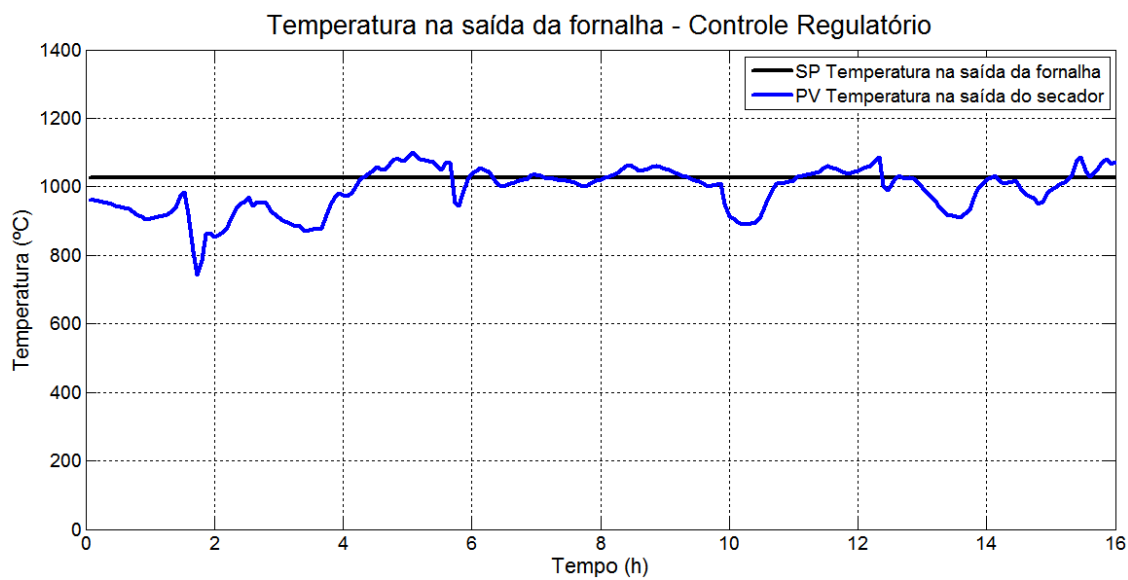


Figura 4.6: Controle regulatório – Temperatura na saída da fornalha. Fonte: Autor (2018).

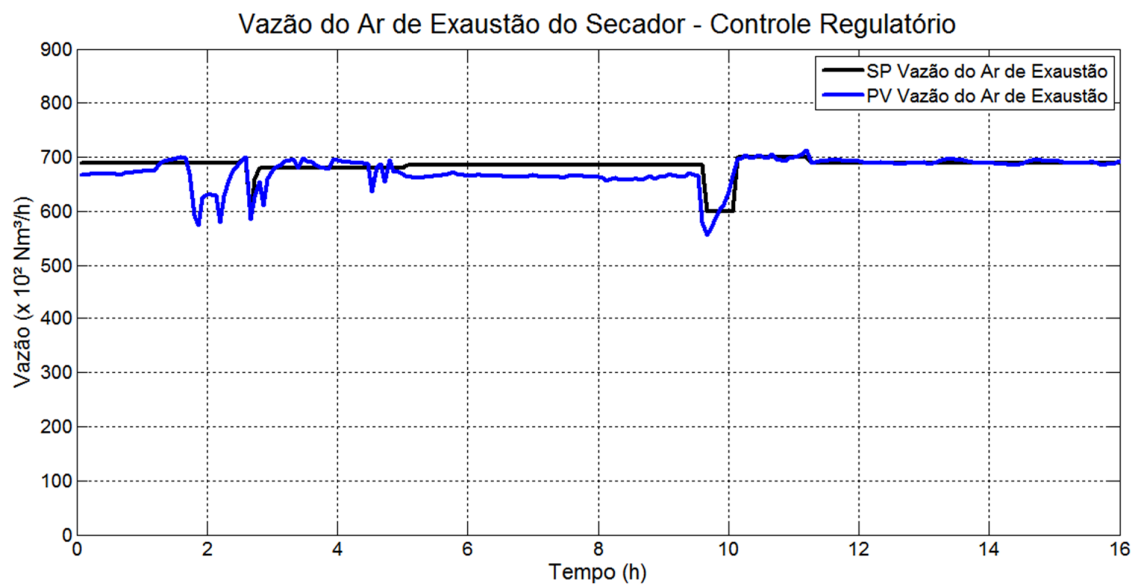


Figura 4.7: Controle regulatório – Vazão de ar de exaustão do secador. Fonte: Autor (2018).

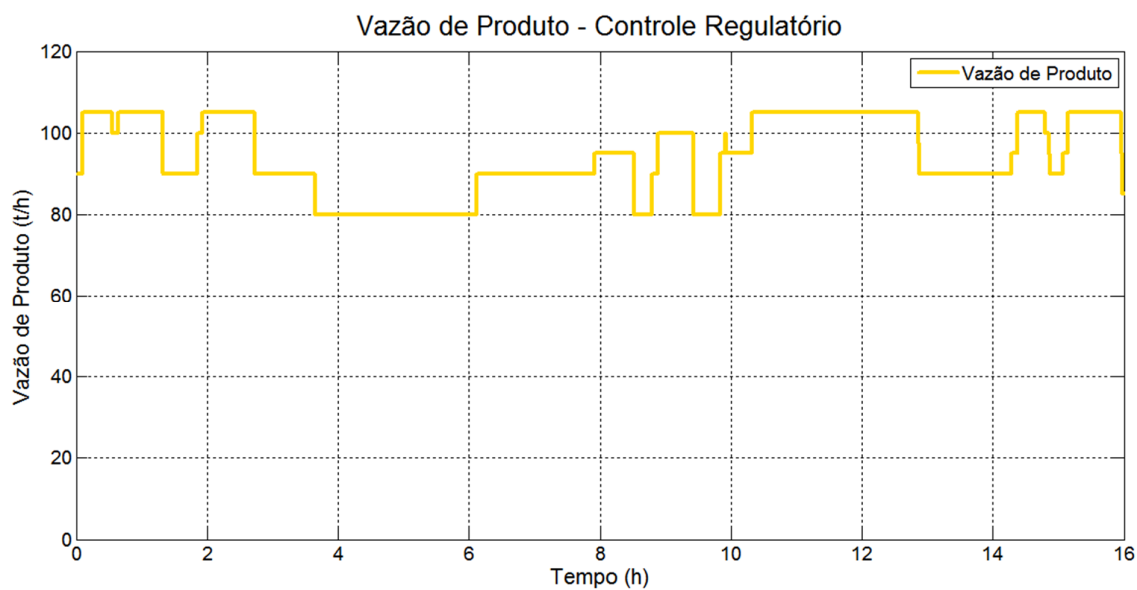


Figura 4.8: Controle regulatório – Vazão de produto. Fonte: Autor (2018).

4.2 Controlador *fuzzy* desenvolvido

A estratégia de controle proposta e implementada neste trabalho tem o objetivo de diminuir o consumo específico de biomassa no processo de secagem de fertilizantes granulados. A secagem é o processo responsável por garantir o parâmetro da qualidade teor de água livre no produto. A secagem excessiva aumenta o custo de produção, a secagem deficiente gera produto fora da especificação.

A propriedade dos controladores inteligentes, especialmente os controladores *fuzzy*, é de serem baseados em experiências práticas e nos padrões de raciocínio e não em modelos matemáticos (WAKABAYASHI, 2007). Para o desenvolvimento do controlador foram realizadas entrevistas com os operadores, para que fossem determinadas as seguintes informações:

- Definição das variáveis que exerciam influência no controle de temperatura no secador;
- Definição do universo de discurso para estas variáveis;
- Definição das variáveis linguísticas para estas variáveis e seu grau de pertinência;
- Definição das regras.

O controlador *fuzzy* supervisor possui seis variáveis de entrada e três variáveis de saída. As variáveis de entrada são: temperatura na fornalha, temperatura na saída do secador, vazão do ar de exaustão, vazão de produto, pressão na fornalha e set point de temperatura na saída do secador. As variáveis de saída são: vazão de ar de combustão, vazão de biomassa e abertura da válvula de ar de exaustão. A Figura 4.9 ilustra o controlador desenvolvido.

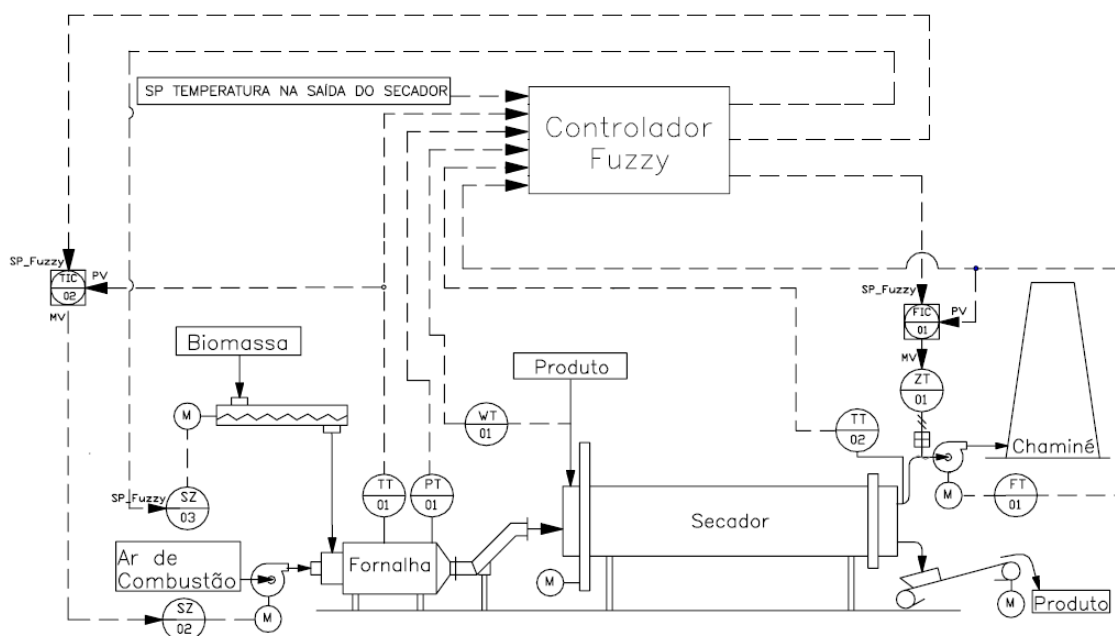


Figura 4.9: Controlador *fuzzy* supervisorio desenvolvido. Fonte: Autor (2018).

4.3 Ferramenta utilizada para desenvolvimento

Para o desenvolvimento do controlador é utilizado o software RSLogix 5000 *FuzzyDesigner*, do fabricante Rockwell Automation. Este software é utilizado para projetar sistemas *fuzzy* para a família de CLP's Logix. O software possui uma biblioteca de componentes a partir da qual pode-se projetar um controlador *fuzzy*.

O sistema *fuzzy* projetado no *FuzzyDesigner* pode ser exportado para uma instrução Add-On no formato de arquivo L5X. O usuário pode então importar o arquivo para os projetos do CLP, utilizando o software RSLogix 5000. A instrução gerada pode ser utilizada por qualquer uma das linguagens de programação (Diagrama de Blocos Funcionais, Lógica Ladder ou Texto Estruturado). Finalmente, o *FuzzyDesigner* permite ao usuário monitorar on-line e ajustar a instrução gerada diretamente no CLP da família Logix em execução, por meio de um servidor OPC.

4.4 Variáveis de entrada do controlador

As variáveis de processo que são utilizadas como entradas do controlador *fuzzy* e todos os parâmetros utilizados são apresentados a seguir.

4.4.1 Variável Temperatura na Fornalha

A variável temperatura na fornalha tem o universo de discurso entre 0 e 1500 °C. Essa faixa de valores abrange as temperaturas que podem ser obtidas na fornalha e é dividido em três conjuntos *fuzzy*. Na Tabela 4.1 estão apresentados os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. A Figura 4.10 ilustra a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.1: Partições da variável temperatura na fornalha nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[0, 0, 800, 900]	Trapezoidal
Médio	[800, 900, 1000, 1100]	Trapezoidal
Alto	[1000, 1100, 1500, 1500]	Trapezoidal

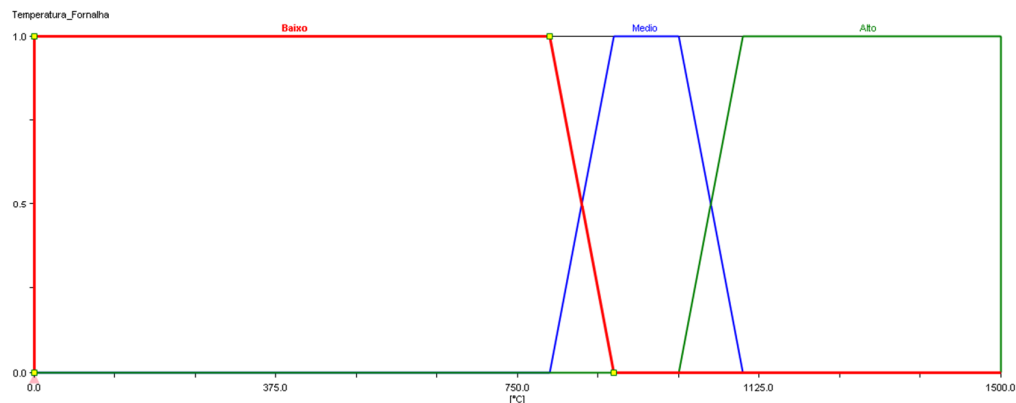


Figura 4.10: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável temperatura na fornalha. Fonte: Autor (2018).

4.4.2 Variável Temperatura na Saída do Secador

A variável temperatura na saída do secador tem o universo de discurso entre 0 e 200 °C. O set point utilizado durante a implantação do controlador *fuzzy* é 95 °C, então, o valor máximo

de 200 °C é definido como um valor suficiente para abranger algum possível distúrbio no processo. A faixa de valores é dividida em três conjuntos *fuzzy*. A Tabela 4.2 apresenta os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. A Figura 4.11 ilustra a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.2: Partições da variável nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[0, 0, 75, 90]	Trapezoidal
Médio	[75, 90, 100, 115]	Trapezoidal
Alto	[100, 115, 200, 200]	Trapezoidal

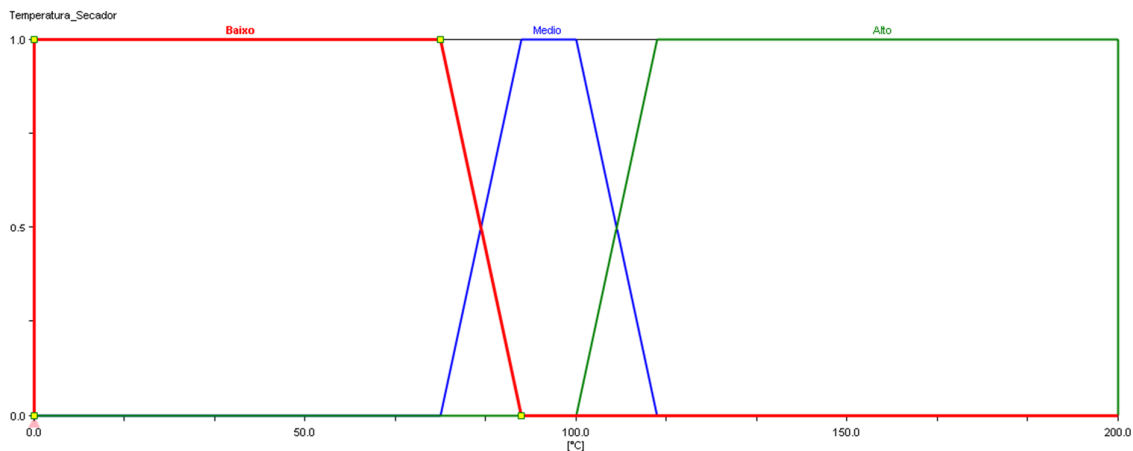


Figura 4.11: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável temperatura no secador. Fonte: Autor (2018).

4.4.3 Variável Vazão do Ar de Exaustão

A variável vazão do ar de exaustão tem o universo de discurso entre 0 e 750 Nm³/h, que é a faixa de operação do exaustor instalado. A faixa de valores é dividida em dois conjuntos *fuzzy*. Essa divisão binária é escolhida porque a primeira fase da secagem ocorre a uma taxa constante, onde a massa de água evaporada é controlada pela velocidade dos gases de secagem, como é apresentado no Capítulo 2. Então, busca-se maximizar esta fase da secagem.

Na Tabela 4.3 ilustram-se os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.12 apresenta-se a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.3: Partições da variável vazão de ar de exaustão nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[0, 0, 635, 650]	Trapezoidal
Alto	[635, 650, 750, 750]	Trapezoidal

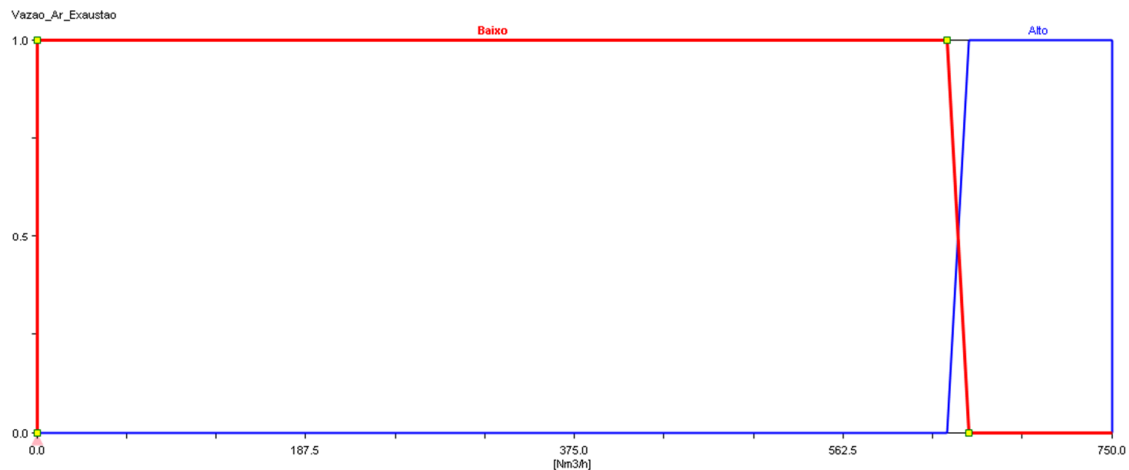


Figura 4.12: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável vazão de ar de exaustão. Fonte: Autor (2018).

4.4.4 Variável Vazão de Produto

A variável vazão de produto tem o universo de discurso entre 0 e 150 t/h, faixa de capacidade de produção da planta. Na Tabela 4.4 ilustram-se os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.13 ilustra-se a representação gráfica destes conjuntos. São utilizados apenas dois conjuntos para esta variável porque com, vazões de produto abaixo de 70 t/h, o custo do processo de secagem torna-se financeiramente inviável. Usualmente a vazão de produto fica em torno de 100 t/h.

Tabela 4.4: Partições da variável vazão de produto nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[0, 0, 70, 85]	Trapezoidal
Alto	[70, 85, 150, 150]	Trapezoidal

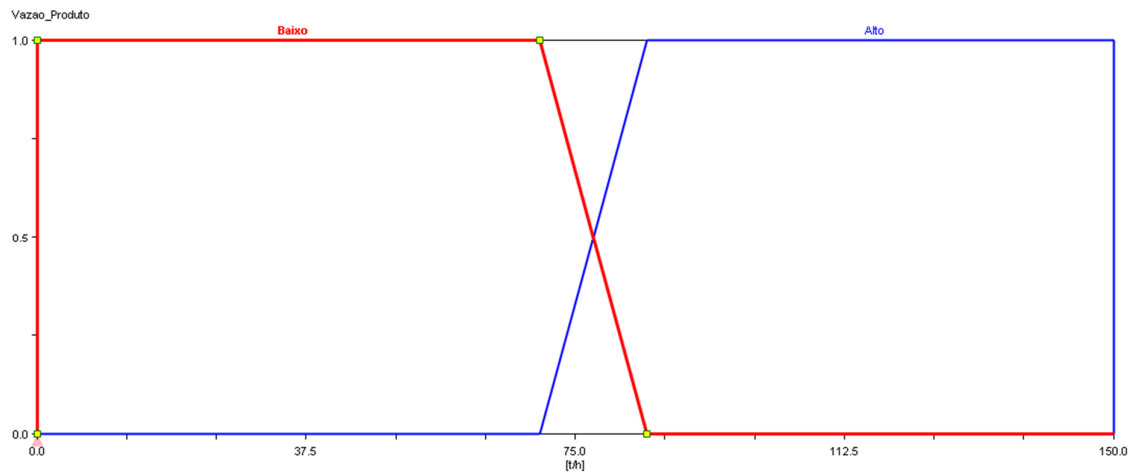


Figura 4.13: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável vazão de produto. Fonte: Autor (2018).

4.4.5 Variável Pressão na Fornalha

A variável pressão na fornalha tem o universo de discurso entre -10 e 10 mmCA. Na Tabela 4.5 ilustram-se os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.14 ilustra-se a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.5: Partições da variável pressão na fornalha nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[-10, -10, -4, -2]	Trapezoidal
Alto	[-4, -2, 10, 10]	Trapezoidal

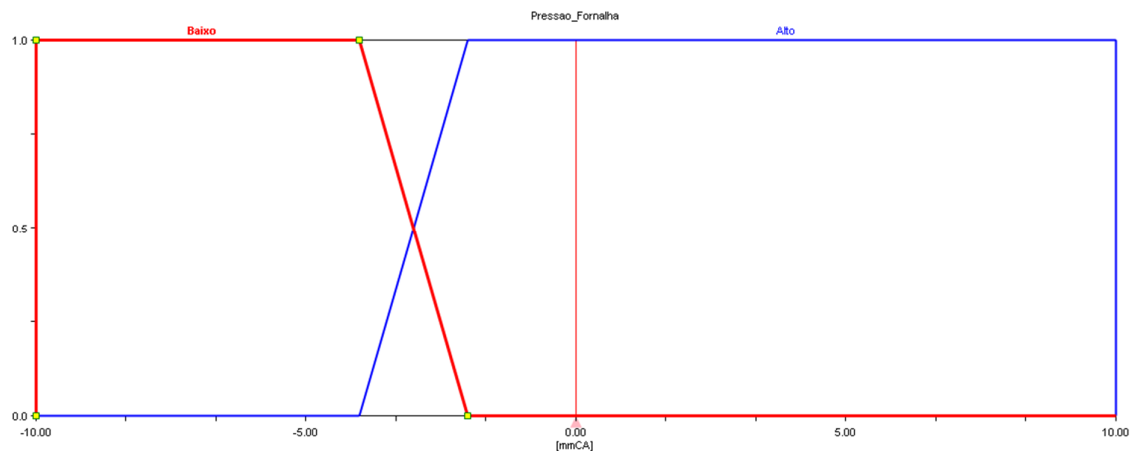


Figura 4.14: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável pressão na fornalha. Fonte: Autor (2018).

4.4.6 Variável Set Point de Temperatura na Saída do Secador

A variável set point de temperatura na saída do secador tem os mesmos parâmetros da variável temperatura na saída do secador. Na Tabela 4.6 ilustram-se os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.15 ilustra-se a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.6: Partições da variável set point de temperatura na saída do secador nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[0, 0, 75, 90]	Trapezoidal
Médio	[75, 90, 100, 115]	Trapezoidal
Alto	[100, 115, 200, 200]	Trapezoidal

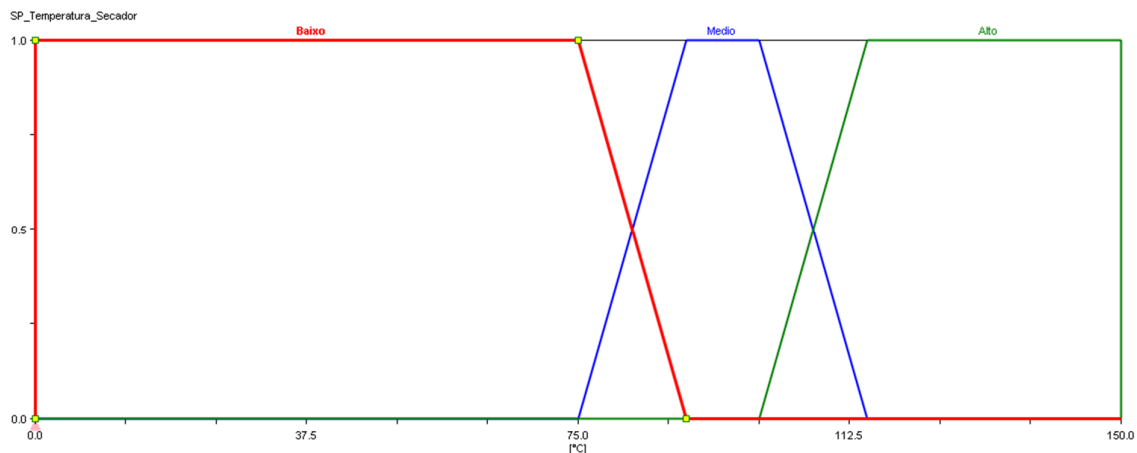


Figura 4.15: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável set point de temperatura na saída do secador.

Fonte: Autor (2018).

4.5 Variáveis de saída do controlador

As variáveis de saída do controlador *fuzzy* são obtidas utilizando-se o método de defuzzyficação “centroide” ou “centro-da-área”, apresentado no Capítulo 3.

4.5.1 Variável Vazão de Biomassa

A variável vazão de biomassa tem o universo de discurso entre 0 e 100 %. A faixa de valores é dividida em cinco conjuntos *fuzzy*. Na Tabela 4.7 estão apresentados os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.16 ilustra-se a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.7: Partições da variável vazão de biomassa nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Muito Baixo	[13, 20, 27, 34]	Trapezoidal
Baixo	[27, 34, 41, 48]	Trapezoidal
Médio	[41, 48, 55, 62]	Trapezoidal
Alto	[55, 62, 69, 76]	Trapezoidal
Muito Alto	[69, 76, 83, 90]	Trapezoidal

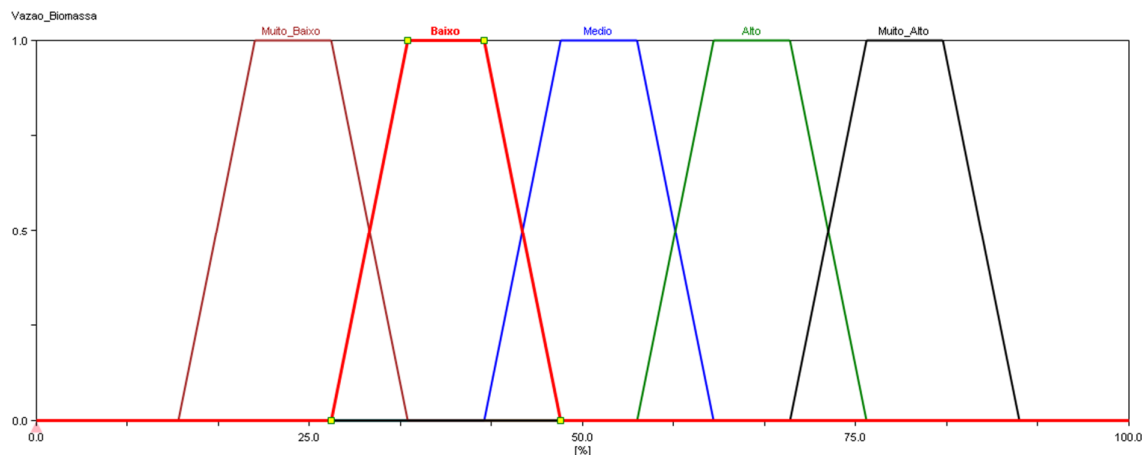


Figura 4.16: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável vazão de biomassa. Fonte: Autor (2018).

O valor mínimo da variável vazão de biomassa é definido em 13% da vazão nominal, para garantir que as roscas dosadoras de biomassa não operem vazias. O restante da faixa é escalonado em intervalos de mesmo tamanho, até o valor máximo de 90%, já que é conhecido que o sistema de dosagem de biomassa está sobredimensionado.

4.5.2 Variável Vazão de Ar de Combustão

A variável vazão de ar de combustão tem o universo de discurso entre 0 e 100 %. A faixa de valores é dividida em cinco conjuntos *fuzzy*. Na Tabela 4.8 estão apresentados os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.17 ilustra-se a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.8: Partições da variável vazão de ar de combustão nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Muito Baixo	[25, 35, 45, 55]	Trapezoidal
Baixo	[45, 55, 65, 70]	Trapezoidal
Médio	[65, 70, 75, 80]	Trapezoidal
Alto	[75, 80, 85, 90]	Trapezoidal
Muito Alto	[85, 90, 100, 100]	Trapezoidal

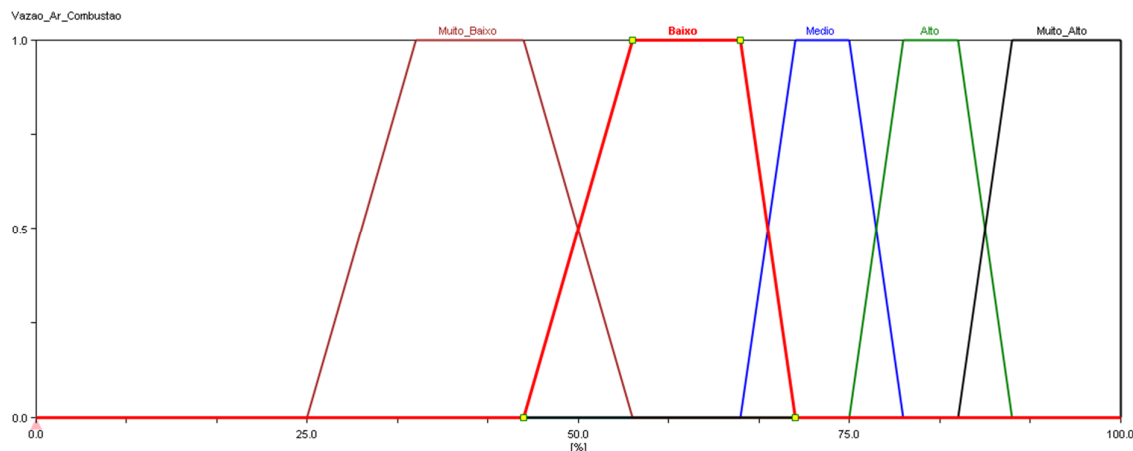


Figura 4.17: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável vazão de ar de combustão. Fonte: Autor (2018).

O valor mínimo desta variável é definido em 25% da vazão nominal, para garantir uma quantidade mínima de ar no interior da fornalha, mantendo-se, assim, a chama acesa no interior da fornalha. Os conjuntos muito baixo e baixo abrangem uma maior quantidade de valores, visto que, durante as entrevistas com os especialistas, eles disseram que, em regime permanente, é a região em que operam a maior parte do tempo. Os conjuntos médio, alto e muito alto são distribuídos buscando-se uma distribuição simétrica da faixa restante.

4.5.3 Variável Abertura da Válvula de Ar de Exaustão

A variável abertura da válvula de ar de exaustão tem o universo de discurso entre 0 e 100 %. A faixa de valores é dividida em três conjuntos *fuzzy*, baseados nos valores de abertura indicado pelos especialistas. Na Tabela 4.9 estão apresentados os conjuntos *fuzzy*, os parâmetros e os tipos de função de pertinência utilizados. Na Figura 4.18 ilustra-se a representação gráfica destes conjuntos.

Tabela 4.9: Partições da variável abertura da válvula de ar de exaustão nos respectivos conjuntos *fuzzy*, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes.

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Parâmetros	Função de Pertinência
Baixo	[0, 0, 52.5, 65]	Trapezoidal
Médio	[52.5, 65, 75, 87.5]	Trapezoidal
Alto	[75, 87.5, 100, 100]	Trapezoidal

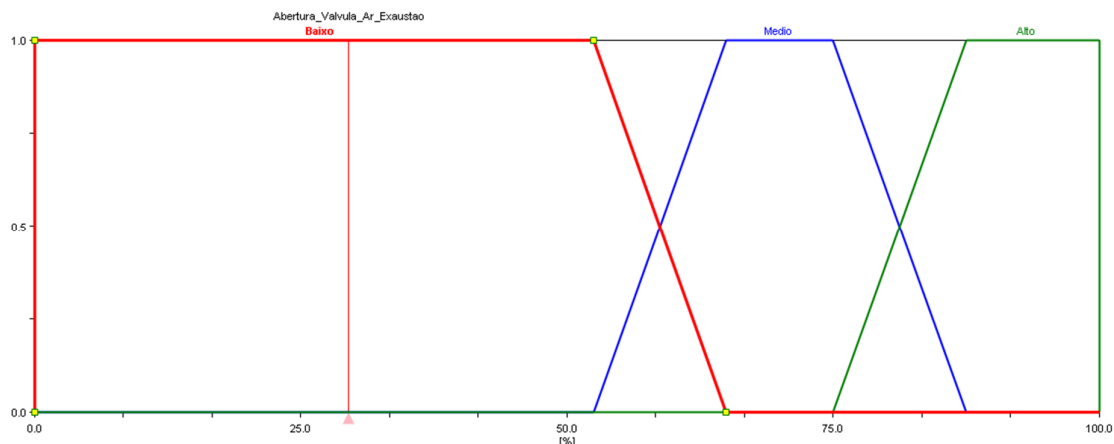


Figura 4.18: Gráfico dos conjuntos *fuzzy* da variável abertura da válvula de ar de exaustão. Fonte: Autor (2018).

4.6 Base de Conhecimento

No controlador *fuzzy* desenvolvido neste trabalho utilizou-se o modelo de inferência de Mamdani, que utiliza o operador mínimo (*t*-norma). Tal modelo de inferência é citado no Capítulo 3.

4.6.1 Regras do controlador fuzzy

Há dois tipos básicos de implicações *fuzzy*, também denominadas regras de inferência ou associações: o *modus ponens* (modo afirmativo) e o *modus tollens* (modo negativo). Ambos operam baseados em premissas ou condições, que geram uma determinada consequência (SHAW e SIMÕES, 2004).

Uma típica ação de controle é uma descrição linguística, como, por exemplo, aumente um pouco a vazão. O objetivo é se representar o conhecimento por meio de um conjunto de regras nas quais as condições são dadas a partir de um conjunto de termos linguísticos associados às variáveis de saída do processo (que são entradas do controlador *fuzzy*). As ações de controle são expressadas de modo similar para cada variável de controle. Regras do tipo se-então são frequentemente chamadas de declarações condicionais *fuzzy* ou simplesmente regras *fuzzy* (GOMIDE e GUDWIN, 1994).

São definidos três conjuntos *fuzzy* para a variável temperatura na fornalha, três conjuntos para a variável temperatura na saída do secador, dois conjuntos para a variável vazão do ar de

exaustão, dois conjuntos para a variável vazão do produto, dois conjuntos para a variável pressão na fornalha e três conjuntos para a variável set point de temperatura na saída secador. Com a combinação destas funções de pertinência existe a possibilidade de construir 216 regras diferentes.

As regras apresentadas na Tabela 4.10 são desenvolvidas a partir das entrevistas realizadas com os especialistas na operação da planta. A partir de perguntas simples, como, por exemplo: “Qual o valor do set point de determinada variável para uma dada condição do processo?” é possível extrair o conhecimento e apresentá-lo em sentenças lógicas do tipo: Se temperatura é alta, então vazão de biomassa é baixa.

Tabela 4.10: Regras do controlador *fuzzy*.

SE							ENTÃO		
Nº	Temperatura_Fornalha	Temperatura_Secador	Vazao_Ar_Exaustao	Vazao_Produto	Pressao_Fornalha	SP_Temperatura_Secador	Vazao_Biomassa	Vazao_Ar_Combustao	Abertura_Valvula_Ar_Exaustao
1			BAIXO	BAIXO	BAIXO			MÉDIO	
2			BAIXO	ALTO	BAIXO				ALTO
3			ALTO		BAIXO				ALTO
4			BAIXO	BAIXO	ALTO				BAIXO
5			BAIXO	ALTO	ALTO				MÉDIO
6			ALTO		ALTO				ALTO
7	MÉDIO	BAIXO		BAIXO		NÃO_BAIXO	MÉDIO	ALTO	
8	BAIXO	BAIXO		BAIXO		NÃO_BAIXO	ALTO	MUITO_ALTO	
9	MÉDIO	BAIXO		ALTO		NÃO_BAIXO	ALTO	MUITO_ALTO	
10	BAIXO	BAIXO		ALTO		NÃO_BAIXO	MUITO_ALTO	MUITO_ALTO	
11	ALTO	BAIXO		ALTO		ALTO	ALTO	MUITO_ALTO	
12	BAIXO	MÉDIO		BAIXO		MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	
13	MÉDIO	MÉDIO		BAIXO		MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	
14	MÉDIO	MÉDIO		ALTO		MÉDIO	MÉDIO	ALTO	
15	ALTO	MÉDIO		ALTO		MÉDIO	BAIXO	MÉDIO	
16	ALTO	ALTO		BAIXO		NÃO_ALTO	MUITO_BAIXO	MUITO_BAIXO	
17	MÉDIO	ALTO		BAIXO		MÉDIO	MUITO_BAIXO	BAIXO	
18	MÉDIO	ALTO		ALTO		NÃO_ALTO	MUITO_BAIXO	BAIXO	
19	ALTO	ALTO		ALTO		NÃO_ALTO	MUITO_BAIXO	MUITO_BAIXO	

A regra nº 1 estabelece a condição em que a planta está sendo preparada para ser colocada em operação. Nesse momento é executada a limpeza dos equipamentos. Faz-se circular produto já processado em circuito fechado para remoção de pedras, contaminantes etc. Nesta situação não é necessária temperatura na fornalha e no secador, utiliza-se uma vazão baixa de produto, pressão baixa na fornalha e a vazão de ar de exaustão baixa é suficiente. Não

é necessário dosar biomassa. Então, necessita-se apenas da vazão média de ar de combustão para limpeza dos dutos.

As demais regras são aplicáveis à condição de operação da planta. As regras de nº 2 a nº 6 são aplicáveis ao controle regulatório de ar de exaustão do secador.

A regra nº 2 estabelece a condição em que se tem baixa vazão de ar de exaustão e alta vazão de produto, com pressão baixa na fornalha. Nessa condição necessita-se que a abertura da válvula de ar de exaustão seja alta, para aumentar a vazão de ar de exaustão devido a vazão alta de produto.

A regra nº 3 estabelece que para uma vazão alta de ar de exaustão e baixa pressão na fornalha, é mantida a abertura alta da válvula de ar de exaustão, para que seja mantida a condição ideal de operação da fornalha (pressão baixa).

A regra nº 4 estabelece que para uma vazão baixa de ar de exaustão, baixa vazão de produto e alta pressão na fornalha, é solicitada que a abertura da válvula de ar de exaustão seja baixa, já que nessa condição deseja-se manter baixa a vazão de ar de exaustão.

A regra nº 5 estabelece que para uma vazão baixa de ar de exaustão, alta vazão de produto e alta pressão na fornalha, é solicitada média abertura na válvula de ar de exaustão, para que seja aumentada a vazão de ar de exaustão.

A regra nº 6 estabelece que para vazão alta de ar de exaustão e alta pressão na fornalha, tem-se alta abertura da válvula de ar de exaustão para que seja mantida a alta vazão de ar de exaustão.

As treze regras seguintes são desenvolvidas para o controle da temperatura na fornalha, e consequentemente no secador, manipulando-se a vazão de biomassa e a vazão de ar de combustão.

A regra nº 7 estabelece que para temperatura na fornalha média, temperatura na saída do secador baixa, baixa vazão de produto e set point de temperatura na saída secador não baixo, a vazão de biomassa será média e a vazão de ar de combustão será alta. Temperatura na saída do secador baixa e set point de temperatura na saída do secador não baixo (médio ou alto) indica que temos um erro negativo, então é preciso gerar mais calor na fornalha e transferi-lo até o secador.

A regra nº 8 estabelece que para temperatura na fornalha baixa, temperatura na saída do secador baixa, baixa vazão de produto e set point de temperatura na saída secador não baixo, a vazão de biomassa será alta e a vazão de ar de combustão será muito alta. Essa regra é análoga

a regra nº 7, mas como temos temperatura baixa na fornalha, os valores da saída (vazão de biomassa e vazão de ar de combustão) são maiores a fim de diminuir o erro negativo. A regra nº 9 e nº 10 seguem a mesma linha de raciocínio. Tem-se o erro negativo e os valores de saída são vazão de biomassa alta/muito alta e a vazão de ar de combustão muito alta/muito alta, respectivamente.

A regra nº 11 estabelece as saídas vazão de biomassa alta e vazão de ar de combustão muito alta, para as entradas temperatura na fornalha alta, temperatura na saída do secador baixa, vazão de produto alta, e set point de temperatura na saída do secador alto. Temos o erro negativo da temperatura na saída do secador, vazão de produto alta, o que nos levaria a pensar em valores máximos para as variáveis de saída. Mas como já se tem temperatura alta na fornalha e sabemos da presença de tempo morto, a vazão de biomassa é alta ao invés de muito alta.

A regra nº 12 estabelece que para um erro próximo de zero para a temperatura na saída do secador (temperatura na saída do secador média e set point de temperatura na saída do secador médio), temperatura na fornalha baixa e vazão de produto baixa, as saídas são vazão de biomassa baixa e vazão de ar de combustão média. Essa regra tem o intuito de manter o sistema com o erro próximo a zero. A regra nº 13 possui o mesmo objetivo, logo, possui as mesmas saídas, apesar de considerar a temperatura na fornalha média.

A regra nº 14 estabelece para um erro próximo de zero para a temperatura na saída do secador, com uma vazão de produto alta, que as saídas sejam média para a vazão de biomassa e alta para a vazão de ar de combustão. Esta regra tem o objetivo de aumentar a geração de calor, já que uma vazão alta de produto demandará uma maior quantidade de calor.

A regra nº 15 estabelece também para um erro próximo de zero para a temperatura na saída do secador, com temperatura alta na fornalha e vazão alta de produto, que as saídas sejam vazão de biomassa baixa e vazão de ar de combustão média. Como o erro na temperatura na saída do secador está próximo a zero, a temperatura alta na fornalha poderá gerar uma sobretemperatura na saída do secador, então a geração de calor na fornalha é diminuída.

A regra nº 16 estabelece que para um erro positivo na temperatura na saída do secador (temperatura na saída secador maior que o set point) e baixa vazão de produto, as saídas sejam muito baixo para as vazões de biomassa e ar de combustão. Esta regra busca diminuir a geração de calor de forma mais brusca para que o erro positivo da temperatura na saída do secador seja diminuído.

A regra nº 17 estabelece as saídas de tal forma que a taxa de diminuição da geração de calor seja menor que na regra nº 16, já que as condições são as mesmas, exceto a temperatura na fornalha que é média. As saídas para esta regra são vazão de biomassa muito baixa e vazão de ar de exaustão baixa.

Analogamente as regras nº 16 e 17, as regras nº 18 e 19 têm as saídas entre baixo e muito baixo com o objetivo de diminuir o erro positivo na temperatura na saída do secador.

4.7 Implantação controlador *fuzzy* no CLP ControlLogix

O controlador projetado é transformado em uma rotina de instruções, para que possa ser inserido no CLP ControlLogix existente. A rotina gerada na linguagem de programação ladder resultou em 94 linhas.

Na Figura 4.19 é mostrada a arquitetura de automação existente na planta utilizada para a implantação do controlador *fuzzy*. O software FactoryTalk® é uma IHM de nível supervisão, para monitorar e controlar aplicativos de servidor de distribuição/multiusuário. O software RSLogix 5000 é uma aplicação para configurar, programar e manter a família de CLP's Logix e dispositivos relacionados. O software de comunicação RSLinx® oferece a capacidade de navegar nas redes de automação, configurar, diagnosticar dispositivos de rede, além de ser um servidor OPC.

Os três software comunicam entre si via rede Ethernet, juntamente com o software RSLogix *FuzzyDesigner*. A comunicação com o CLP ControlLogix é também feita via rede Ethernet. A comunicação entre o CLP e os sensores e atuadores do controle regulatório se dá por meio de sinal elétrico, sinal 4-20 mA.

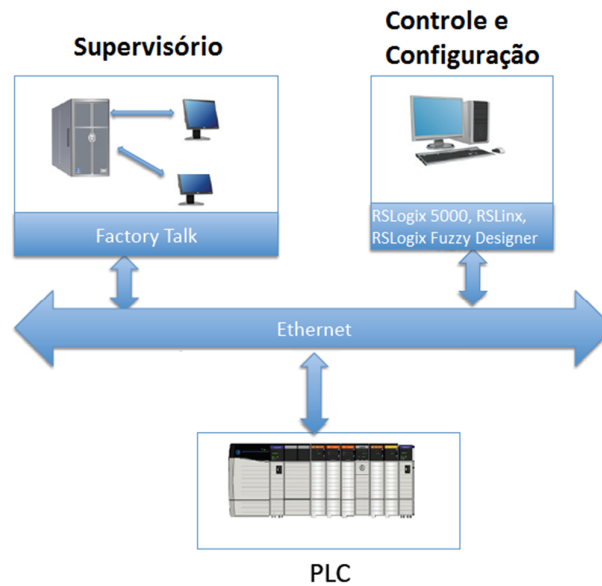


Figura 4.19: Arquitetura de automação em que o controlador *fuzzy* está implantando (Adaptado de Rockwell Automation, 2007).

4.8 Resultados obtidos com controlador *fuzzy* supervisor

O controlador projetado está em operação na planta de Granulação do Complexo Industrial da Paulínia, uma unidade de produção de fertilizantes da Galvani/Yara. Após realizar os ajustes no controlador *fuzzy*, a planta ficou operando por um período de 16 horas sem a intervenção dos operadores nos controles regulatórios em estudo.

Na Figura 4.20 ilustram-se o comportamento da variável temperatura na saída do secador com a planta em operação e seu respectivo set point. A temperatura apresentou os maiores picos acima do set point nos instantes 0,55 h (104 °C), 2,15 h (109 °C), 3,63h, 8,52 h e 9,03 h (103°C). Os menores valores de temperatura abaixo do set point são observados nos instantes de tempo 7,85 h (78 °C) e 12,82 h (81 °C).

Na Figura 4.21 ilustram-se a análise estatística do comportamento da temperatura na saída do secador com a atuação do controlador *fuzzy* supervisor, o comportamento da temperatura na saída do secador com a atuação do controle regulatório e o set point. Observam-se a média de 94,20 °C e desvio padrão de 5,76 °C para o controlador *fuzzy* e média de 90,30 °C e desvio padrão de 3,18 °C para o controle regulatório. Houve um aumento no valor médio de 3,9 °C, em contrapartida a variabilidade aumentou em 2,58 °C. Apesar do aumento da variabilidade, o comportamento do controlador *fuzzy* é considerado benéfico para o processo,

devido ao aumento do valor médio da temperatura na saída do secador. Os valores mínimos atingidos são semelhantes, aproximadamente 80 °C, mas com as ações do controle fuzzy a variável oscilou em torno do set point a maior parte do tempo.

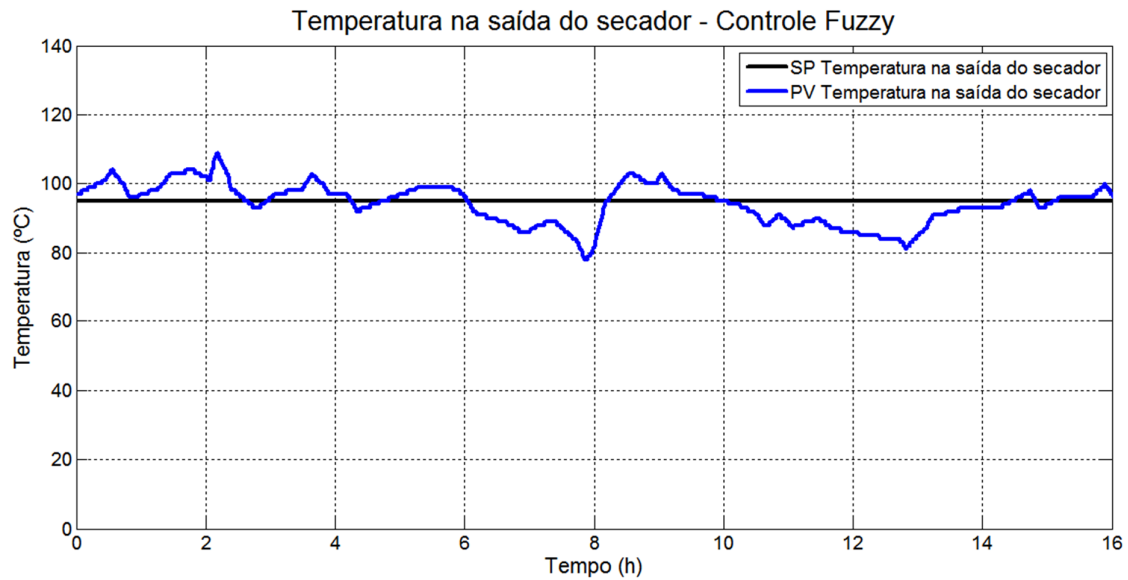


Figura 4.20: Temperatura na saída do secador com a operação do controle *fuzzy*. Fonte: Autor (2018).

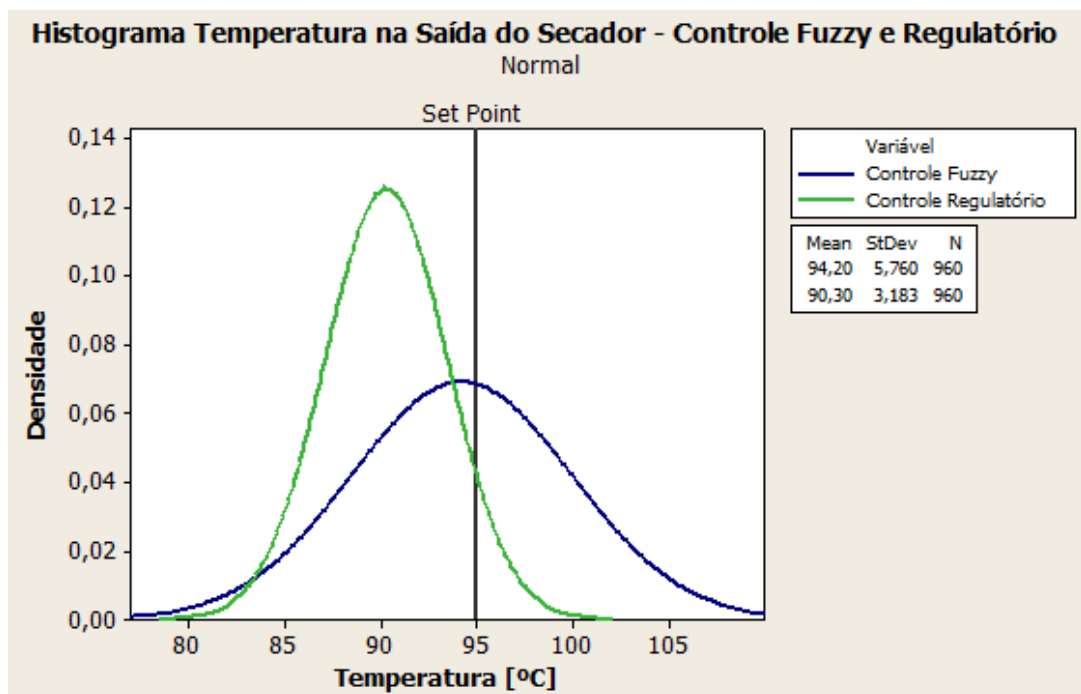


Figura 4.21: Histograma da temperatura na saída do secador com a operação do controle *fuzzy* e controle regulatório. Fonte: Autor (2018).

Nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 ilustram-se, respectivamente, as variáveis de saída do controlador *fuzzy*: vazão de ar de combustão, vazão de biomassa e abertura da válvula do ar de exaustão.

Um aspecto do processo de combustão que é levado em consideração no desenvolvimento das regras é a premissa de se operar com a mistura pobre, ou seja, ter mais ar de combustão (comburente) do que biomassa (combustível). Essa premissa tem o objetivo de evitar a combustão incompleta da biomassa e ocasionar emissão de material sólido na chaminé. Desta forma, o set point para vazão de biomassa sofre pequenos incrementos/decrementos, enquanto que o set point da vazão de ar de exaustão permanece inalterado. Antes que a vazão de biomassa atinja um valor que possa tornar a mistura rica (mais combustível do que comburente), o set point de vazão de ar de exaustão é alterado. Observa-se este comportamento por meio das Figuras 4.22 e 4.23.

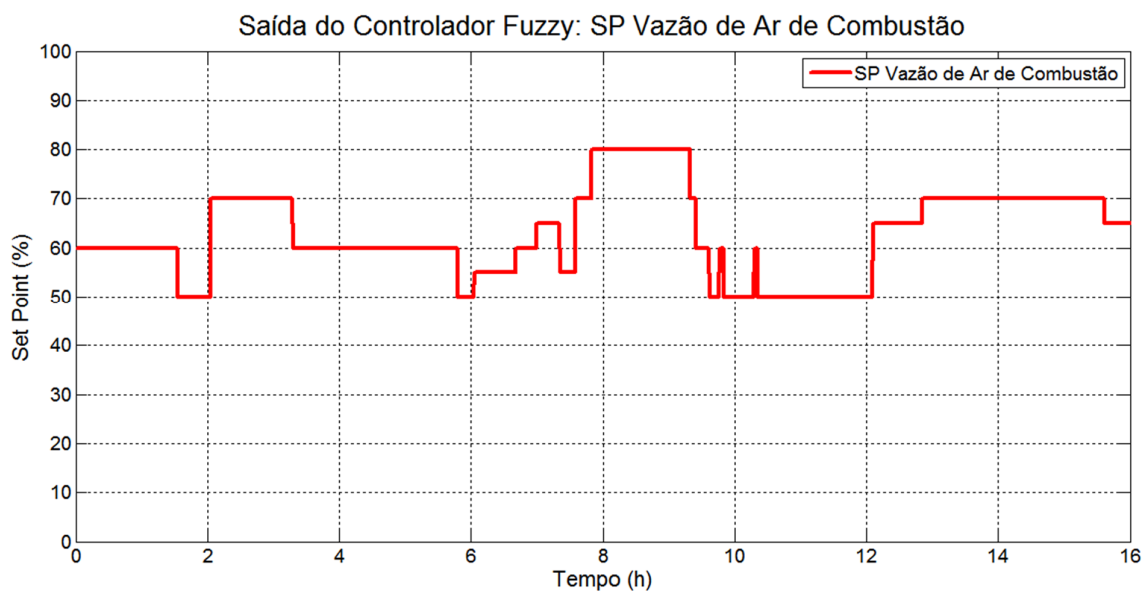


Figura 4.22: Saída do controlador *fuzzy* – Vazão de ar de combustão. Fonte: Autor (2018).

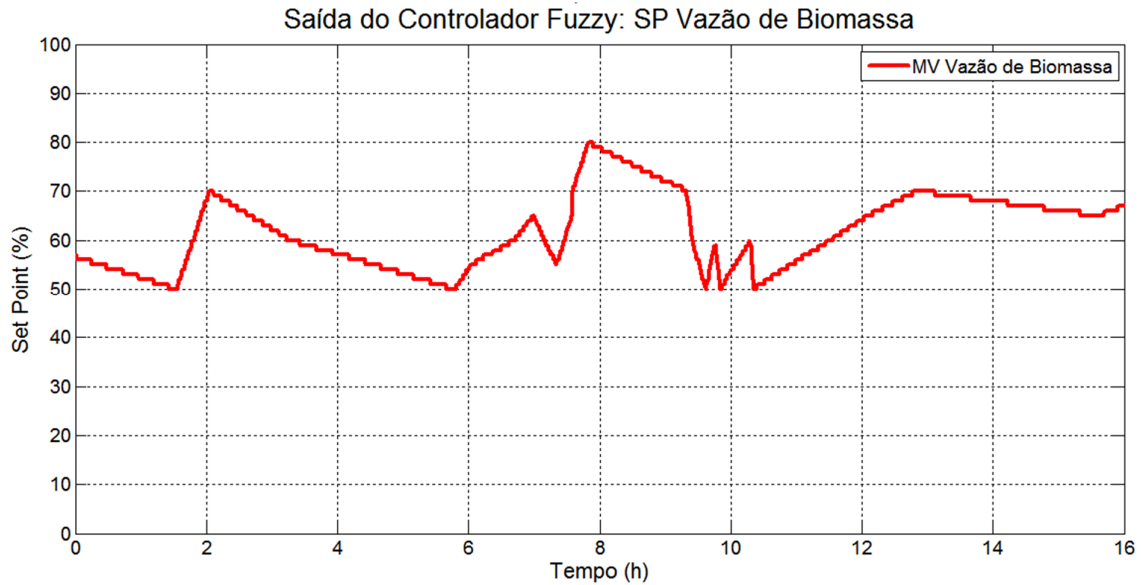


Figura 4.23: Saída do controlador *fuzzy* – Vazão de biomassa. Fonte: Autor (2018).

O controle de vazão possui dinâmica rápida se comparado ao controle de temperatura, então, o comportamento do set point para abertura da válvula de ar de exaustão apresenta grandes variações ao longo do período de observação, entre 40 e 99%.

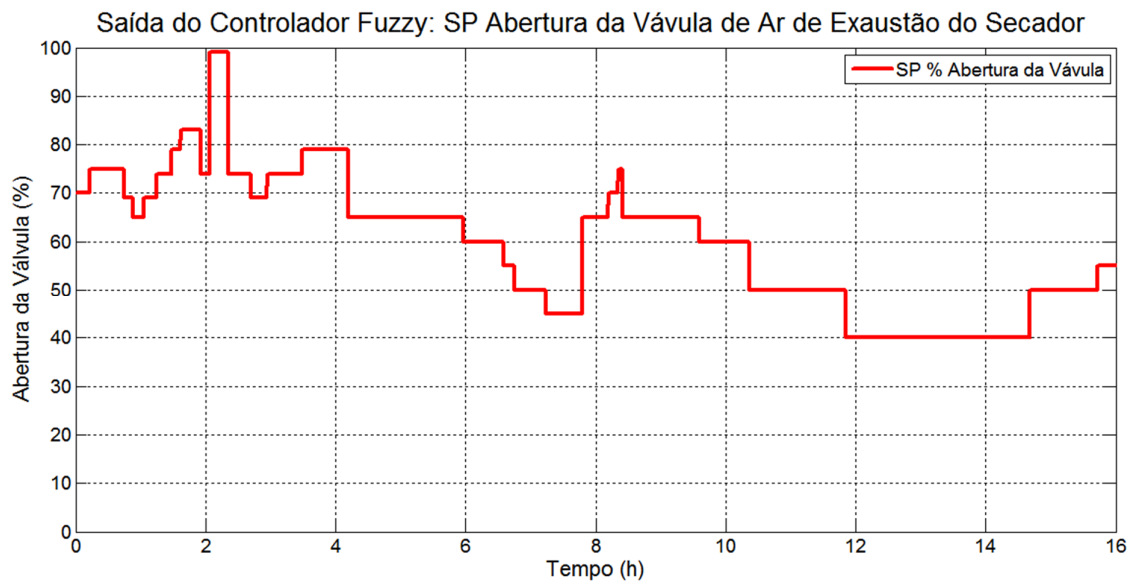


Figura 4.24: Saída do controlador *fuzzy* – Abertura da válvula de ar de exaustão do secador. Fonte: Autor (2018).

Nas Figuras 4.25 e 4.26 ilustram-se o comportamento das variáveis de entrada do controlador, temperatura na fornalha e vazão do ar de exaustão do secador. No Capítulo 2 abordou-se a importância destas duas variáveis para o processo de secagem. A evaporação da água contida na superfície dos grãos é impactada pela vazão do ar de exaustão do secador. Já a temperatura na fornalha impacta a fase da secagem onde ocorre a secagem do interior do grão, devido ao mecanismo de difusão.

Esta condição apresenta o grande desafio para o controlador *fuzzy*: reduzir o consumo de biomassa, consequentemente a temperatura na fornalha, sem prejudicar a secagem do produto. A energia necessária para retirar água do interior dos grânulos é maior que a necessária para retirar a água da superfície, pois além da taxa de secagem ser cada vez menor, ainda há a necessidade de se manter o perfil de temperatura dos gases maior que a do sólido, para provocar o processo de difusão.

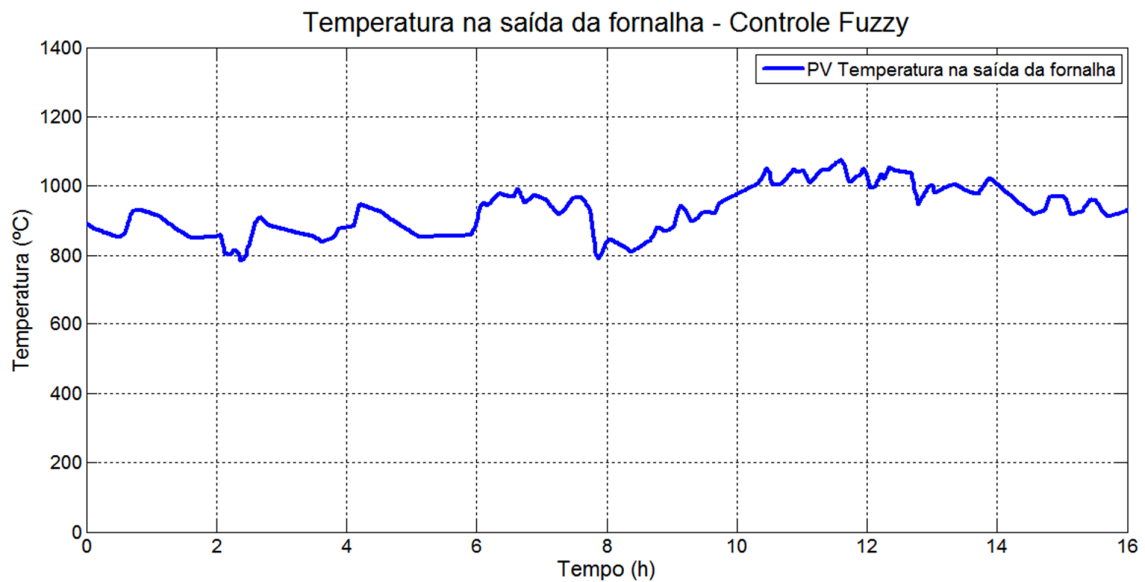


Figura 4.25: Controle *fuzzy* – Temperatura na saída da fornalha. Fonte: Autor (2018).

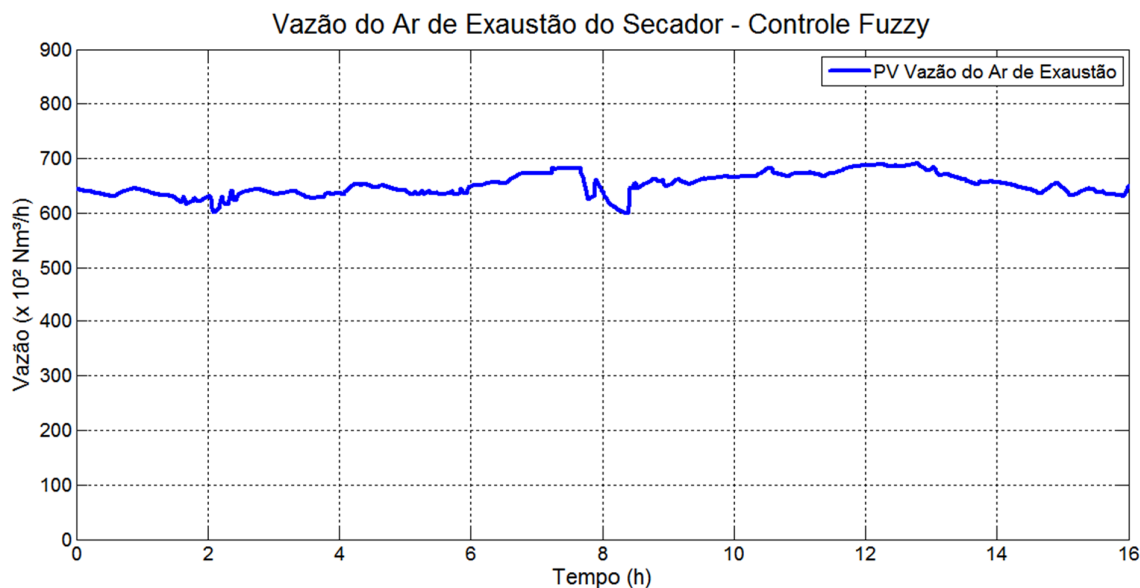


Figura 4.26: Controle *fuzzy* – Vazão de ar de exaustão do secador. Fonte: Autor (2018).

4.9 Índices de desempenho das estratégias de controle

O desempenho do controlador *fuzzy* e do controle regulatório foram avaliados por meio dos índices de desempenho integral do valor absoluto do erro (IAE) e pelo Índice de Harris.

Na Tabela 4.11 apresentam-se os resultados obtidos, avaliando-se a variável temperatura na saída do secador.

Tabela 4.11: Índices de desempenho dos controladores.

Índice utilizado	Controle Fuzzy	Controle Regulatório	Comparação (Fuzzy x Regulatório)
IAE	76,62	120,71	-37%
Harris	0,1314	0,0913	44%

Examinando-se a Tabela 4.11 observa-se que o desempenho do controlador *fuzzy* reduziu em 37% a integral do valor absoluto do erro da temperatura na saída do secador quando comparado ao controle regulatório. Analisando-se o Índice de Harris, o controlador *fuzzy* apresentou uma melhora de 44% nos resultados da variável temperatura na saída do secador.

Os resultados dos índices de desempenho convergem para o mesmo sentido da análise estatística que é realizada e ilustrada por meio dos histogramas nas Figuras 4.13 e 4.20. A temperatura na saída do secador com a atuação do controlador *fuzzy* tem o seu valor médio

aumentado em 3,9 °C se comparado ao controle regulatório. Esse valor representa 4,1 % do set point adotado.

4.10 Resultados financeiros

Para as condições em que o teste com o controlador *fuzzy* e o controle regulatório são realizados, é observada a possibilidade de economia com a utilização do controlador *fuzzy*. Com as ações de controle do *fuzzy*, variando-se os set points dos controles regulatórios de acordo com a condição do processo, a temperatura da fornalha esteve na média com o valor de 928,6 °C contra 991,7 °C do controle regulatório. Esses valores são apresentados na Figura 4.27.

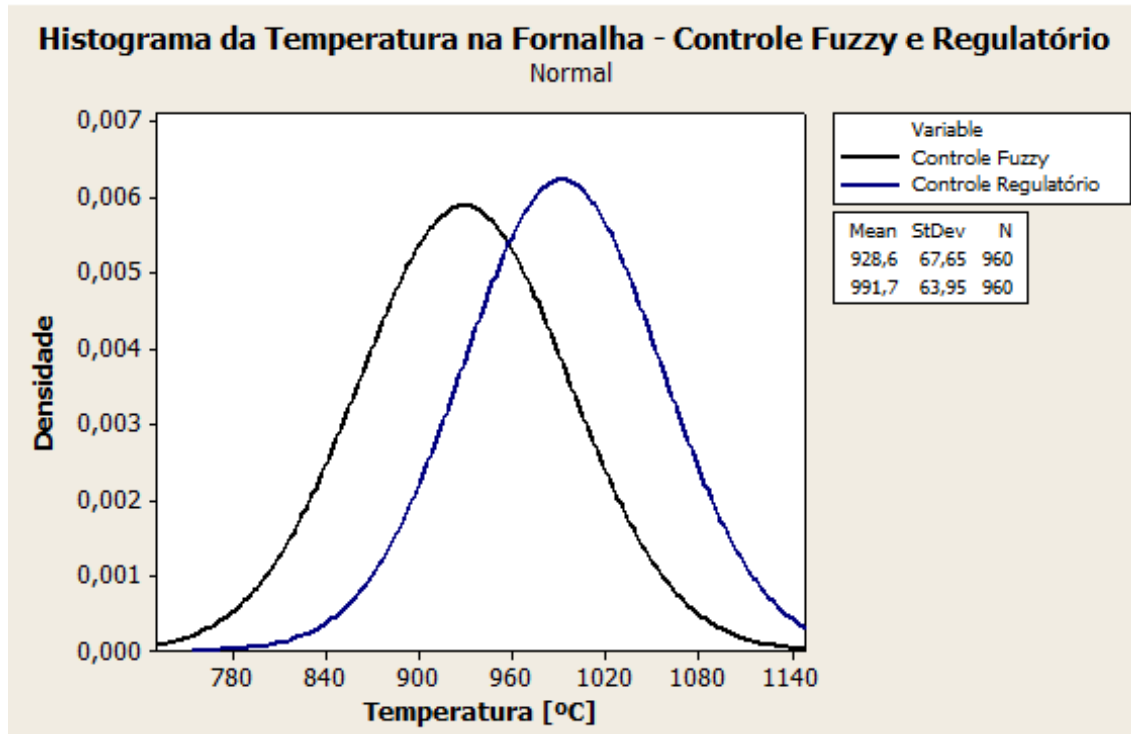


Figura 4.27: Histograma da temperatura na fornalha – Controle *fuzzy* e regulatório. Fonte: Autor (2018).

A menor temperatura na fornalha implica em um menor consumo de biomassa. É importante salientar que o menor consumo de biomassa não prejudicou a temperatura na saída do secador. A temperatura teve um aumento médio de 3,9 °C. Essa economia pode ser verificada

também pelas Figuras 4.15 e 4.22, set point de vazão de biomassa para o controle *fuzzy* e regulatório, respectivamente. A integral da área abaixo da curva nos fornece a massa de biomassa consumida no período, que foi de 49,3 t para o controle *fuzzy* e 54,2 t para o controle regulatório, uma redução de 9%.

Abaixo é demonstrado o ganho financeiro obtido aplicando-se o controlador *fuzzy*. Considerando-se a produção média de Fevereiro de 2018, o consumo específico de biomassa (kg/t), o preço médio da biomassa (R\$/t) e a redução na temperatura da fornalha, se operasse com o controlador pelo período de um ano ter-se-ia a seguinte economia:

$$Economia = \frac{450.000 \text{ t}}{\text{ano}} \times \frac{40 \text{ kg}}{\text{t}} \times \frac{R\$ 300}{1000 \text{ kg}} \times 9 \% = \frac{R\$ 486.000,00}{\text{ano}} \quad (6)$$

4.11 Resultados obtidos com a redução da emissão de gases de efeito estufa

O material da biomassa contém cerca de 40% de carbono em peso, com o restante hidrogênio (6,7%) e oxigênio (53,3%). Utilizando-se a estimativa de consumo de 18.000 t de biomassa/ano, aplicando-se o controlador *fuzzy* poder-se-ia obter a redução de 648 t/ano na emissão de dióxido de carbono (CO₂).

4.12 Ganhos intangíveis

A aplicação do controlador *fuzzy* resultou em ganhos intangíveis, relacionados à satisfação dos operadores da sala de controle. Durante o período de operação, os operadores não fizeram nenhuma alteração nas variáveis que sistema que o *fuzzy* controlava. Foi possível dedicar atenção à outras áreas da planta, as quais eram monitoradas com menor frequência. Somada à esta situação, verificar que o próprio conhecimento foi utilizado na elaboração das regras, gerou grande satisfação para os operadores.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Foi desenvolvido um controlador *fuzzy* supervisor e aplicado ao processo de secagem em uma planta de produção de fertilizantes. As regras e funções de pertinência foram desenvolvidas com base no conhecimento dos especialistas do processo. O controlador foi aplicado ao CLP existente e não houve alterações no controle regulatório existente.

A variável de maior interesse nesse sistema, a temperatura na saída do secador, obteve o valor médio de 94,2 °C frente ao set point de 95°C durante o período de teste. Com a atuação dos controles regulatórios de forma isolada, a temperatura obteve o valor médio de 90,3 °C. Já no caso da variável temperatura na fornalha foi observada uma redução em seu valor de 991,7 °C com o controle regulatório para 928,6 °C com o controlador *fuzzy*. Essa redução foi benéfica pois resultou em um menor consumo de biomassa, reduzindo-se o custo de produção total em 1,35%.

Os índices de desempenho obtidos demonstraram uma redução de 37% na integral do valor absoluto do erro (IAE) da temperatura na saída do secador, quando comparado ao controle regulatório. Já o Índice de Harris apresentou uma melhora de 44% nos resultados da variável temperatura na saída do secador.

A economia de biomassa obtida durante o teste foi de 9%. Projetando-se essa economia para a campanha anual de produção, a economia com a aplicação do controlador *fuzzy* supervisor pode chegar aos R\$ 486.000,00/ano.

A redução das emissões dos gases de efeito estufa tem recebido atenção mundial como parte do processo para atenuar o aquecimento global. O CO₂ tem apresentado taxas crescentes quanto às emissões, principalmente nos países em desenvolvimento. O presente trabalho demonstrou uma alternativa que pode reduzir a emissão de CO₂ em 648 t/ano.

5.1 Respostas aos Questionamentos da Pesquisa

Questão 1: O desenvolvimento de uma camada de controle acima do controle regulatório existente seria capaz de diminuir o consumo específico de biomassa?

Os resultados apresentados demonstraram que a aplicação do controlador *fuzzy* supervisor pode proporcionar uma temperatura média na saída do secador maior, aliada a uma menor temperatura média na fornalha. Esse resultado é obtido alterando-se o set point dos controles regulatórios, levando-se em consideração o acoplamento entre as variáveis

temperatura e vazão de ar durante o processo de secagem. A menor temperatura média na fornalha resultou na diminuição de 9% no consumo de biomassa, sem prejudicar o processo de secagem no fertilizante.

Questão 2: É possível controlar a geração de calor na fornalha utilizando-se como variável de controle temperatura na saída do secador ao invés da temperatura na fornalha?

A função da fornalha é prover calor ao sistema em quantidade adequada para a secagem dos fertilizantes. O controle regulatório é capaz de controlar esta temperatura em torno do set point definido, mas, para o processo de secagem, a variável que garante a característica física da qualidade é a temperatura na saída do secador. Dessa forma, o controle regulatório da temperatura da fornalha e o controle de vazão do ar de exaustão, operando de maneira isolada, não são capazes de garantir a temperatura na saída do secador sem o constante monitoramento e intervenção de um operador humano. A alteração da variável de controle da geração de calor na fornalha para temperatura na saída do secador aliada ao controle da vazão de exaustão do secador, monitoradas por um controlador em uma camada de controle supervisorio mostrou-se mais adequada para o controle da fornalha e do processo de secagem de fertilizantes.

Questão 3: Existe algum impacto negativo em se alterar a variável de controle da geração de calor para a temperatura na saída do secador?

Durante o período de teste não foram observados impactos negativos devido a alteração da variável de controle da geração de calor para a temperatura na saída do secador. Por meio das Figuras 4.25 e 4.26 pode-se observar que não existiram, respectivamente, desligamentos da fornalha por temperatura alta e desligamentos do ventilador de exaustão do secador por sobrecorrente. Não foi verificada emissão de particulado na chaminé e nas análises laboratoriais do teor de umidade não ocorreram resultados fora da especificação.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para continuidade desta pesquisa e realização de trabalhos futuros, sugere-se os seguintes desenvolvimentos:

- 1) Aprimoramento das funções de pertinência e regras para diminuir a variabilidade da resposta das variáveis de interesse;

- 2) Inclusão de funções de pertinência da derivada do erro para a temperatura na saída do secador, de modo a tornar a resposta a mais rápida possível;
- 3) Aplicação de algoritmos genéticos e neurofuzzy para sintonia automática dos parâmetros das funções de pertinência, permitindo sintonia de acordo com o processo;
- 4) Desenvolvimento de um controlador fuzzy que abranja o processo anterior à secagem, ou seja, um controlador para as operações de granulação e secagem.

REFERÊNCIAS

- ABILOV, AG; ZEYBEK, Z; TUZUNALP, O; TELATAR, Z. Fuzzy temperature control of industrial refineries furnaces through combined feedforward/feedback multivariable cascade systems. *Chem. Eng. Process*, 41(1): 87, 2002.
- ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Principais indicadores do setor de fertilizantes – Comentários. São Paulo, 2018. Disponível em <<http://www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf>>. Acesso em: 10/04/2018.
- ARRUDA, Edu Barbosa. Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- ASSMANN, B. W.; SALAZAR, A. O.; VIDAL, F. J. T.; FERREIRA, J. Implementation of Pi-Fuzzy Controller for Progressing Cavity Pump Artificial Oil Lift System. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, p. 263-268, 2017.
- ATUONWU, J. C. et al. Improving dryer energy efficiency and controllability simultaneously by process modification. *Computers & Chemical Engineering*, v.59, p. 138-144, 2013.
- BALACEVICIUS, Leonas. et al. Improved production and process control for fertilizer production line. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 31, p. 43-45. 1998.
- BARBOSA, Thiago Alberto. Avaliação de desempenho de malha de controle baseada em alocação de pólos utilizando variância mínima generalizada. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.
- BAUER, R. et al. Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes. *Biomass Bioenergy*. 34:417–27, 2010.
- BIZZO, W. A. Purificação do produto de gaseificação de biomassa. In: SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da gaseificação de biomassa. Editora Átomo, 2010. Capítulo 19, p. 393-422.
- CARDOSO, M. T. Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização da madeira. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa. 2010.
- CEKINSKI, Efraim. Tecnologia de Produção de Fertilizantes. São Paulo: Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico-SCTDE, Governo do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

COELHO, L. S., ALMEIDA, O. M. e COELHO, A. A. R. Projeto e estudo de caso da implementação de um sistema de controle nebuloso. SBA Controle & Automação, vol.14, n.1, p.20-29. 2003.

COTABARREN, I.M. et al. Feedback control strategies for a continuous industrial fluidized-bed granulation process. Powder Technology, v. 283, p. 415–432. 2015.

EHLALI, Mounsif. ASRI, Said El. Potential Development of DCS in Phosphoric Acid and Fertilizers Units - OCP Jorf Lasfar Experience. SYMPHOS 2013, 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry. v. 83, p. 195-207. 2014.

FENG, Gang. A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems. IEEE Transactions on fuzzy systems, v. 14, n. 5. 2006.

FERNANDES, Nilson José. Estudo da fluidodinâmica e da secagem de um secador rotatório da indústria de fertilizantes. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2008.

GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Unit Operations. 3rd ed. Prentice-Hall: NJ, 1993.

GÖLLES, M. et al. Model based control of a biomass grate furnace. 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 2011.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. Revista Controle & Automação – Sociedade Brasileira de Automática, v. 4, n. 3, p. 97-115. 1994.

GONÇALVES, André Paim. Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2007.

HARRIS, T. J.; DESBOROUGH, L. Performance assessment measures for univariate feedback control. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 70, p. 1186–1197. 1992.

KÖRÖSI, L. and TURCSEK, D. Fuzzy system for PLC. Institute of Control and Industrial Informatics, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. 2011.

LEONEL, Edmilson Cândido. Análise da eficiência energética de secadores rotativos. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, 2014.

LEVINE, J. S. Biomass burning and the production of greenhouse gases. In: Zepp RG, editor. Climate biosphere interaction: biogenic emissions and environmental effects of climate change. New York, USA: John Wiley & Sons; 1994. p. 139 – 59.

MAGALHÃES, Edney Alves. Desenvolvimento e análise de uma fornalha e para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2007.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Intern. J. Man-Machine Studies*, 7, no. 1, p.1-13. 1975.

MANGWANDI, C. et al. Optimisation of high shear granulation of multicomponent fertiliser using response surface methodology. *Powder Technology*, 238, 142–150. 2013.

MAURÍCIO, Pedro. et al. Um Algoritmo Para Dimensionamento de Ciclones. Universidade Fernando Pessoa. 2006.

MICCIO, Michele; COSENZA, Bartolomeo. Control of distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers. *Journal of Process Control*, v. 24, p. 475-484, 2014.

MISKELL, F.; MARSHALL, W. R. A study of retention time in a rotary dryer . *Chemical Engineering Progress*, 52 (1), 35. 1956.

MOYERS, C. G.; BALDWIN, G. W. Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying. In: PERRY, R. H.; GREEN D. W. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 7th edition. New York, Mac Graw-Hill, 1999.

OLIVEIRA, D. N.; BRAGA, A. P. S.; ALMEIDA, O. M. Fuzzy implementado em ladder com funções de pertinência descontínuas. In: Congresso Brasileiro de Automática - CBA, v.18, p. 411-416. 2010.

ONOFRE FILHO, Marcílio de Paiva. Lógica fuzzy para controle de pH em um processo petrolífero. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2011.

PACES, N. et al. Combined control of combustion load and combustion position in a moving grate biomass furnace. In *Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Pp. 1447–1452. 2011.

PACES, N.; KOZEK, M. Modeling of a grate-firing biomass furnace for real-time application. In *International Symposium on Models and Modeling Methodologies in Science and Engineering: MMMse*, 2011.

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

PINHEIRO, P.; VALLE, R. Controle de combustão: otimização do excesso de ar. Rio de Janeiro. 1995.

PRECUP, R.E.; HELLENDORRN, H. A survey on industrial applications of fuzzy control. *Comput. Ind.*, v. 62, p. 213-226. 2011.

RENDEIRO, Gonçalo. et al. Combustão e gasificao de biomassa sólida. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

REVISTA AGROANALYSIS. São Paulo: Fundao Getúlio Vargas, 2013. Volume 33, n 10. ISSN 0100-4298. Disponível em <bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/download/19667/18387>. Acesso em 17/03/2018.

REZENDE, Oscar Luiz Teixeira. Uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de conjunto gaseificador/combustor de biomassas. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, 2012.

ROCKWELL AUTOMATION. RSLogix 5000 Fuzzy Designer User Manual. 2007.

RODRIGUES, Rafaella F. et al. Drum granulation of single super phosphate fertilizer: Effect of process variables and optimization. *Powder Technology*, v. 321, p. 251-258. 2017.

SAEMAN, W.C. and MITCHELL, T.R., Analysis of Rotary Dryer a Cooler Performance. *Chemical Engineering Progress*, 50, 467-475. 1954.

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

SILVA, F. et al. Implementao e sintonia de um sistema de controle fuzzy-pid utilizando comunicao fieldbus. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 03, n. 07, 2017.

SILVA, M.G., et al. Modelling of Fertilizer Drying In A Rotary Dryer: Parametric Sensitivity Analysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 29: 359 - 369. 2012.

TELES, R. S.; SALVADOR, J. A.; NASCIMENTO, A. S. Lavador de Gases. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada, 2003.

TELLES, Matheus Sebastian. Sistema especialista fuzzy para diagnóstico de transformadores de potência. Dissertao (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduao em Ciência da Computao, 2005.

TENG, Ningning; ZHANG, Jian. Vacuum induction heating furnace temperature control system based on Smith fuzzy-PID. *International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)*, p. 2207-2210, 2014.

VASCONCELLOS, Bruna Santana de. Proposta para projeto de controladores fuzzy multivariáveis. Dissertao (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduao em Engenharia Elétrica e da Computao, 2017.

VITOR, Adriano Barbosa; CAGLIARI JÚNIOR, Neder. Curso preparatório para operadores de processo – Produção de Fertilizantes. Uberaba: Fosfertil, 2004.

ZADEH, L.A. Fuzzy Sets. Information and Control, v. 8, p. 338-353. 1965.

WAKABAYASHI, Cláudio. Análise e controle fuzzy de processos: estudo de caso em um reator de polimerização. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica, 2007.