

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Cleber Miralha Carneiro

**“CONTROLE DE EXAUSTÃO DE FORNOS DE
COZIMENTO DE ANODOS BASEADO EM LÓGICA
FUZZY”**

BELÉM

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Cleber Miralha Carneiro

**“CONTROLE DE EXAUSTÃO DE FORNOS DE
COZIMENTO DE ANODOS BASEADO EM LÓGICA
FUZZY”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior

BELÉM

2011

C289c

Carneiro, Cleber Miralha

Controle de exaustão de fornos de cozimento de anodos baseado em lógica fuzzy / Cleber Miralha Carneiro; orientador, Carlos Tavares da Costa Júnior.-2011.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2011.

1. Lógica fuzzy. 2. Fornos. I. orientador. II. título.

CDD 22. ed. 511.313

“CONTROLE DE EXAUSTÃO DE FORNOS DE COZIMENTO DE ANODOS BASEADO EM LÓGICA FUZZY”

Essa Dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração em Processos Industriais do programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – ITEC – UFPA.

Aprovada em 14 / 01 / 2011

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior
(ORIENTADOR – CMPPI/UFPA)

Prof. Dr. Alessandra Macedo de Souza
(MEMBRO – FEE/UFPA)

Prof. Dr. Orlando Fonseca Silva
(MEMBRO – FEE/UFPA)

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira
(MEMBRO – CMPPI/UFPA)

Aos meus pais, Raul e Aida Carneiro, que me ensinaram os melhores valores da vida. À minha esposa Adriane e a meu filho Renan, muito amados, pelo incentivo, compreensão e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e oportunidades que tem posto em minha vida.

A Albras, pela oportunidade concedida e apoio na realização deste curso de mestrado.

Aos meus pais Raul Carneiro e Aida Carneiro, pelo carinho, e por tudo que me ensinaram.

A minha esposa Adriane Carneiro e filho Renan Carneiro, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior pela orientação desta dissertação, paciência, incentivo e compreensão.

Ao Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira, pela amizade e consideração, sempre mostrando sua preocupação e incentivo para a conclusão deste trabalho.

A todos os professores do curso de mestrado profissional em processos industriais que ministraram as aulas.

A Reinhard G. Max Heilgendorff pelo apoio decisivo, confiar e acreditar no sucesso deste trabalho.

A Clayton Farias, Olavo Oliveira e João Augusto da equipe de automação do Carbono da Albras, pela amizade, apoio e suporte na execução deste trabalho.

A todo corpo técnico da área de Carbono da Albras que compartilharam comigo suas experiências profissionais.

E a todos que de alguma maneira colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A legislação ambiental cada vez mais rigorosa tem forçado as indústrias a investirem em soluções de controle inovadoras buscando diminuir as emissões de gases poluentes pelas fontes móveis e fixas, exercendo melhor controle e tratamento desses poluentes como forma de atender os limites impostos pela lei. Apresenta-se neste trabalho, a implementação de uma melhoria no sistema de controle de exaustão de fornos de cozimento de anodos da indústria de alumínio ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., localizada em Barcarena no estado do Pará, visando minimizar a poluição causada pela queima de combustíveis nos fornos sem comprometer a eficiência do processo. Para isso foi utilizado um sistema baseado em lógica *fuzzy*, buscando na experiência de engenheiros, técnicos e operadores de processo, uma forma de se obter um melhor controle e confiabilidade na gestão das emissões de gases poluentes.

PALAVRAS-CHAVES: Controle, *Fuzzy*, Forno de Cozimento de Anodo

ABSTRACT

With the ambient legislation becoming more rigorous all the time the industry has forced to invest in innovative solutions of control, searching to diminish the emissions of pollutants gases of the mobile and fixed sources, exerting better control and treatment of the pollutants comply to the limits imposed by law. Presented in this work, the implementation of an improvement in the exhaust control system for the anodes baking ovens used at the ALBRAS-Aluminio Brasileiro S.A. smelter, located in Barcarena in the state of Pará, aiming at to minimize the pollution caused by the fuel burning in the ovens without compromising the efficiency of the process. For this, a fuzzy logic based system was used, exploiting the experience of engineers, technicians and process operators, a way of getting better control and reliability in the emissions management of the pollutant gases.

KEYWORDS: Control, *Fuzzy*, Anodes Baking Ovens

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Forno de Cozimento de Anodos	19
Figura 2.2 - Corte transversal do forno de cozimento	21
Figura 2.3 - Configuração de um fogo.....	25
Figura 2.4 - Controle de Tiragem	30
Figura 2.5 - Controle da Câmara de Combustão	31
Figura 2.6 - Controle de Ponto Zero	34
Figura 2.7 - Gráfico de tendência de uma batelada	36
Figura 2.8 - Gráfico de tendência de tiragem.....	38
Figura 2.9 - Controle da tiragem via temperatura de câmara	39
Figura 3.1 - Sistema <i>Fuzzy</i> simples	43
Figura 3.2 - Sistema <i>Fuzzy</i> Puro.....	45
Figura 3.3 - Sistema <i>Fuzzy</i> com fuzzificador e defuzzificador	45
Figura 3.4 - Sistema <i>Fuzzy</i> Takagi-Sugeno.....	46
Figura 3.5 - Função de pertinência trapezoidal	48
Figura 3.6 - Função de pertinência triangular	49
Figura 3.7 - Função de pertinência gaussiana	50
Figura 3.8 - Função de pertinência singleton	50
Figura 3.9 - Conceitos dos conjuntos <i>fuzzy</i>	51
Figura 3.10 - Variáveis linguísticas de temperatura	53
Figura 3.11 - Configuração básica de um sistema <i>fuzzy</i>	54
Figura 3.12 - Modelo Mamdani.....	62

Figura 3.13 - Modelo Takagi-Sugeno	63
Figura 4.1 - Sistema de controle <i>fuzzy</i> proposto	67
Figura 4.2 - Variável erro de temperatura	71
Figura 4.3 - Variável opacidade.....	72
Figura 4.4 - Variável quantidade de pulsos	73
Figura 4.5 - Variável pressão de tiragem	74
Figura 4.6 - Gráfico de superfície temperatura x opacidade	79
Figura 4.7 - Gráfico de superfície pulsos x opacidade.....	79
Figura 4.8 - Gráfico de superfície temperatura x pulsos	80
Figura 5.1 - Gráfico de temperatura de câmaras	84
Figura 5.2 - Gráfico de opacidade no início do teste	85
Figura 5.3 - Gráfico de opacidade durante o teste	86
Figura 5.4 - Gráfico de elevação de temperatura destacando câmaras externas	87
Figura 5.5 - Gráfico de opacidade com níveis não satisfatórios.....	87
Figura 5.6 - Gráfico de opacidade com níveis normais durante o processo.....	88
Figura 5.7 - Gráfico de elevação de temperaturas próximas ao valor de referência	89
Figura 5.8 - Gráfico de elevação de temperaturas com ocorrência de problema mecânico.....	90
Figura 5.9 - Gráfico de elevação de temperatura após sistema <i>fuzzy</i> implantado	92
Figura 5.10 - Gráfico de elevação de temperaturas do sistema anterior	93
Figura 5.11 - Gráfico de elevação de temperaturas do sistema <i>fuzzy</i>	94
Figura 5.12 - Histograma de temperaturas de partida de unidades de combustão antes	95
Figura 5.13 - Histograma de temperaturas de partida de unidades de combustão depois	95
Figura 5.14 - Diferença de temperatura entre câmaras no sistema anterior	96
Figura 5.15 - Diferença de temperatura entre câmaras no sistema <i>fuzzy</i>	97

Figura 5.16 - Gráfico do índice de rejeitos.....	97
Figura 5.17 - Gráfico de opacidade do sistema anterior	99
Figura 5.18 - Gráfico de opacidade do sistema <i>fuzzy</i>	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VI	<i>Ventilador de Insuflamento</i>
ME	<i>Manifold de Exaustão</i>
UC	<i>Unidade de Combustão</i>
UT	<i>Unidade de Tiragem</i>
FTM	<i>Furnace Tending Machine</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programavel</i>
CVRD	<i>Companhia Vale do Rio Doce</i>
BPF	<i>Baixo Ponto de Fluidez</i>
PI	<i>Proporcional Integral</i>
PPM	<i>Pulsos Por Minuto</i>
EUA	<i>United States of America</i>
MIMO	<i>Muliple-Input/Multiple-Output</i>
MISO	<i>Muliple-Input/Single-Output</i>
SISO	<i>Single-Input/Single-Output</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	14
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FORNOS DE COZIMENTO DE ANODOS	17
2.1	INTRODUÇÃO	17
2.2	DESCRIÇÃO DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODOS	19
2.3	EQUIPAMENTOS DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODOS ..	22
2.4	DESCRIÇÕES DO PROCESSO DE COZIMENTO DE ANODOS	23
2.5	CONTROLES EXISTENTES	28
2.5.1	Controle do pré-aquecimento	28
2.5.2	Controle do fogo forçado	31
2.5.3	Controle do resfriamento ou ponto zero	33
2.6	PROBLEMAS DO CONTROLE DO PRÉ-AQUECIMENTO	35
2.6.1	Alta diferença de temperatura entre câmaras de combustão	35
2.6.2	Baixa temperatura de partida da etapa de fogo forçado	36
2.6.3	Comprometimento da qualidade dos anodos produzidos	37
2.6.4	Aumento da poluição	37
2.7	PROPOSTA DE CONTROLADOR	38
3	SISTEMAS FUZZY	41
3.1	INTRODUÇÃO	41
3.2	DEFINIÇÃO DE SISTEMAS FUZZY	42
3.3	CONJUNTOS E OPERAÇÕES FUZZY	46

3.4	VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	53
3.5	SISTEMA <i>FUZZY</i> DE MAMDANI	54
3.5.1	Fuzzificação.....	55
3.5.2	Base de regras.....	56
3.5.3	Máquina de inferência.....	60
3.5.4	Defuzzificação	63
4	SISTEMA DESENVOLVIDO	66
4.1	INTRODUÇÃO	66
4.2	VARIÁVEIS DE ENTRADA	68
4.2.1	Erro de temperatura	69
4.2.2	Opacidade.....	71
4.2.3	Consumo de combustível (Total de pulsos)	72
4.3	VARIÁVEL DE SAÍDA	74
4.4	BASE DE REGRAS E PROCESSO DE INFERÊNCIA	75
5	IMPLANTAÇÃO E RESULTADOS	81
5.1	INTRODUÇÃO	81
5.2	IMPLANTAÇÃO	82
5.3	RESULTADOS	92
5.3.1	Redução da diferença de temperatura entre câmaras de combustão.....	92
5.3.2	Redução do índice de temperatura de partida baixa da etapa de fogo forçado ..	94
5.3.3	Melhoria na qualidade dos anodos produzidos	96
5.3.4	Redução da poluição	98
5.3.5	Economia de combustível	100
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
6.1	CONCLUSÕES.....	102
6.2	TRABALHOS FUTUROS	105

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
----------	---	------------

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A preocupação com as questões ambientais tem se tornado cada vez mais expressiva nas empresas produtoras de alumínio. Não somente pela legislação que tem tomado uma postura cada vez mais rígida em relação aos passivos ambientais, mas também pela responsabilidade social que é assumida. Por este motivo, o controle sobre o nível das emissões de poluentes gerados na produção de anodos cozidos tem sido cada vez mais rigoroso.

Em novos projetos, o licenciamento ambiental está condicionado à modernização ou construção de instalações de tratamento de gases emitidos para atmosfera. Em instalações antigas, sem tratamento de emissões, manter o nível de emissão de poluentes dentro de limites determinados pela lei, é condição para obter o licenciamento ambiental.

Inaugurado em 1985, o Forno de Cozimento de Anodos 1 da ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., não possui uma planta de tratamento de gases para filtrar suas emissões. O sistema de exaustão automático é eficiente para garantir oxigênio suficiente para queima do combustível no interior dos fornos, mas não garante manter o nível de opacidade dentro dos limites exigidos, por não incluir a leitura do instrumento de medição de opacidade na estratégia de controle de exaustão, sendo então necessária a atuação manual do operador de forno para corrigir eventuais desvios de níveis de opacidade.

Neste caso, as principais ações para atender a essas exigências passam por soluções de controle inovadoras, mais precisas, menos dispendiosas, com menos intervenção de operadores e mais eficientes no controle de emissões.

Neste contexto, esta Dissertação propõe um controle de exaustão de fornos de cozimento de anodos baseado em lógica *fuzzy* que objetive garantir os níveis de opacidade dos gases provenientes dos fornos de cozimento dentro dos limites determinados pela legislação, observando o consumo de óleo combustível, a diferença de temperatura das câmaras de combustão em relação a um valor de referência e o nível de opacidade medido dos gases resultantes do processo.

A aplicação de lógica *fuzzy* neste caso se justifica pelo fato de ser uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle (Shaw & Simões, 1999), projetado para comportar-se conforme o seu raciocínio, baseado em informações já conhecidas pelos operadores.

No estado atual da arte, uma das principais empresas fornecedoras de sistema de controle de fornos de cozimento, a Innovatherm cita o uso da lógica *fuzzy* como a estrutura adequada para essa tarefa de controle multivariável (Innovatherm, 2001). Outro trabalho publicado em 2006, cita o uso de lógica *fuzzy* em sistemas de monitoração de câmaras de combustão (Leisenberg & Maiwald, 2006), onde a lógica *fuzzy* é utilizada para identificar a condição de operação de cada câmara de combustão e assim ajustar o sistema de controle a cada situação.

A motivação deste trabalho está em elaborar uma estratégia de controle de opacidade dos gases resultantes do processo de cozimento de anodo baseada no conhecimento de operadores experientes, definindo assim uma forma padrão de ação do sistema de controle para várias situações do processo. Como benefício desta nova estratégia de controle, além de controlar o nível de opacidades dos gases, espera-se ainda uma melhoria na qualidade dos anodos produzidos, uma temperatura de partida de cozimento de anodos mais elevada e uniforme e economia de combustível.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se subdividido em seis capítulos, sendo que o primeiro é a introdução, onde é apresentado de forma resumida o problema e a solução proposta.

No Capítulo 2, é descrito o processo industrial de fabricação de anodo cozidos, procurando descrever de um modo mais detalhado os problemas do sistema de exaustão atual.

O Capítulo 3 é dedicado à teoria da lógica *fuzzy*, onde são abordados os conceitos de sistemas, conjuntos e operações *fuzzy*, variáveis linguísticas, fuzzificação, defuzzificação, base de regras *fuzzy* e máquina de inferência *fuzzy*.

O sistema implementado está descrito no Capítulo 4, onde são detalhadas as variáveis de entrada e saída do sistema assim como as regras do sistema *fuzzy*.

No Capítulo 5 são relatados o histórico de implantação e os diversos resultados produzidos pelo sistema *fuzzy* que foi utilizado para o controle da exaustão do forno. Análises comparativas são também realizadas visando propósitos de validação do sistema desenvolvido.

Finalmente, no Capítulo 6, as conclusões gerais deste trabalho são apresentadas e temas pertinentes para desenvolvimento de pesquisas futuras são ainda propostos.

2 FORNOS DE COZIMENTO DE ANODOS

2.1 INTRODUÇÃO

A ALBRAS – Alumínio Brasileiro S.A. foi constituída em 1978 pela associação da Vale, antiga Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, então sob o controle acionário do governo brasileiro, com a NAAC – Nippon Amazon Aluminium Co., Ltd., empresa que contava com a participação do governo japonês e mais 32 empresas privadas (ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., 2008). Inaugurada em 1985, a ALBRAS está localizada no distrito industrial do município de Barcarena, distante 40 km em linha reta de Belém, capital do Pará, e sua produção de alumínio primário gira em torno de 449.000 toneladas de alumínio por ano (ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., 2009).

O processo convencional de produção de alumínio em escala industrial consiste na dissociação eletrolítica da alumina (Al_2O_3) em forno de redução que compõe-se em três partes distintas (ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., 1985):

- Parte catódica: recipiente em forma de cuba e fabricado à base de carbono, onde se deposita o alumínio líquido resultante da eletrólise.
- Banho eletrolítico: material fundido composto principalmente de criolita (Na_3AlF_6) e fluoretos, a uma temperatura de aproximadamente $1000^{\circ}C$, onde está dissolvida a alumina e mergulhado o anodo de carbono.
- Parte anódica: é o polo positivo da célula, consistindo de blocos de carbono, que reagem com o oxigênio liberado pela dissociação da alumina.

O processo de fabricação de alumínio é conhecido por Hall-Heroult, nome dado em homenagem aos seus dois idealizadores, Charles Martin Hall e Paul Louis Toussaint

Heroult, e é utilizado até os dias de hoje sem sofrer alterações desde a sua invenção em 1886 e tem por base a eletrólise, que consiste na realização de uma reação química devido à passagem de corrente elétrica através de um condutor denominado eletrólito. Faz-se necessário a eletricidade por ser uma reação não espontânea. É essencial para isto um anodo que é o eletrodo de onde se originam os elétrons e um catodo que é o eletrodo para onde se dirigem os elétrons (ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., 2005).

O carbono é usado ainda hoje no catodo e no anodo por ser o material que melhor atende às exigências do processo, ou seja, resiste bem ao ataque do banho e é bom condutor de eletricidade.

O anodo antes de passar pela etapa de cozimento é denominado anodo verde e por ser mal condutor de eletricidade, muito heterogêneo, possuir baixa resistência mecânica e propriedades físico-químicas inadequadas, não pode ser utilizado em células eletrolíticas pois a baixa qualidade do anodo limita o uso de corrente elétrica elevada provocando um consumo específico de carbono elevado e provocam poluição ambiental nas salas de cubas eletrolíticas devido ao desprendimento dos voláteis.

A qualidade das matérias-primas, a formulação da pasta verde e o processo de compactação têm influência decisiva na qualidade final do anodo e são, por isso mesmo, controlados no processo de fabricação dos anodos verdes. Entretanto, é no processo de cozimento que a condutividade elétrica, resistência mecânica e superfície específica podem ser substancialmente melhorados. Menor superfície específica significa menor taxa de reação com os gases, favorecendo o consumo específico e reduzindo a produção de pó de carbono durante a eletrólise.

Este capítulo descreve o processo de fabricação dos anodos da Fábrica ALBRAS, especificamente a etapa de cozimento, que é necessária para conferir aos anodos determinadas

características físico-químicas requeridas no processo de redução, através do cozimento dos anodos verdes em fornos especiais, denominados fornos de cozimento de anodo.

2.2 DESCRIÇÃO DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODOS

A Fábrica de Alumínio Primário ALBRAS possui cinco fornos de cozimento de anodos, sendo estes, distribuídos em duas Fábricas de Anodos Cozidos. A primeira fábrica possui dois fornos divididos transversalmente em trinta e seis seções cada e um forno com dezoito seções, e a segunda fábrica possui dois fornos divididos em cinquenta e quatro seções cada forno. A Figura 2.1 ilustra um forno de cozimento de anodos.

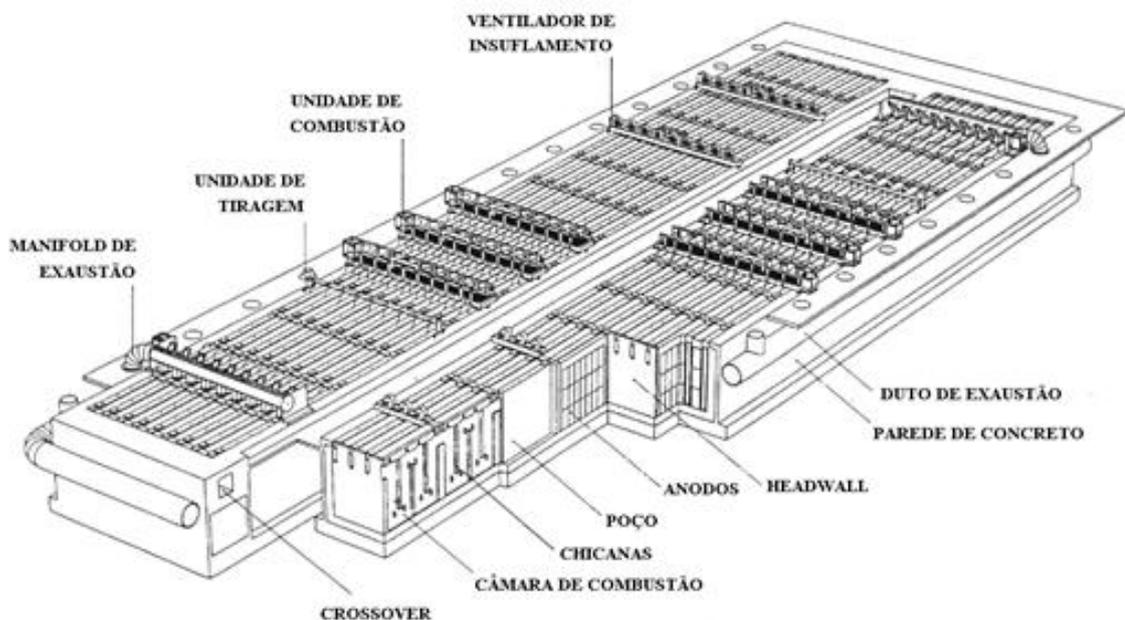


Figura 2.1 - Forno de Cozimento de Anodos

O forno de cozimento propriamente dito é constituído basicamente de concreto, tijolo isolante e refratário e pode ser subdivido em quatro partes distintas:

- Fundo do poço (*bottom wall*)
- Paredes laterais (*side wall*)
- *Head wall*
- Câmaras de combustão (*flue wall*)

O fundo do forno e as paredes laterais formam os limites do forno, dentro dos quais *head walls* são montados, de forma que as câmaras de combustão, pré-montadas, sejam encaixadas entre eles.

Transversalmente, o forno é dividido em secções pelas chamadas *head walls*. As *head walls* permitem o fluxo de gases de combustão entre duas câmaras de secções adjacentes e também possibilitam a montagem de exaustores chamados *manifolds* para remoções dos gases produzidos na queima dos combustíveis no interior das câmaras. Cada secção possui 13 corredores paralelos, sendo 7 câmaras de combustão alternadas por 6 poços de anodos. As câmaras de combustão fornecem calor aos anodos contidos nos poços. As câmaras de combustão de um lado do forno são conectadas as do outro por meio de dutos especiais denominados *crossovers*.

A câmara de combustão é o local onde ocorre o processo de queima dos combustíveis, óleo ou gás proveniente dos queimadores e os voláteis provenientes do piche que é utilizado na composição do anodo como aglutinante.

O poço de anodos é o local onde os anodos são dispostos em camadas, Figura 2.2. A troca de calor entre a câmara de combustão e o poço de anodos realiza-se através das paredes de tijolo refratário. Para se evitar a oxidação dos anodos e a infiltração de ar do

ambiente para o *flue wall* durante o cozimento, pós de coque de empacotamento (*packing coke*) são colocados nos poços de forma a preencher os vãos entre os anodos e as paredes do poço e sobre o topo da camada superior de anodos. Geralmente coque médio (granulometria de 0,2 a 3 mm) é utilizado para esta função. O cozimento dos anodos ocorre de forma indireta, por condução de calor através do coque de empacotamento. A chama dos queimadores, por radiação, e os gases gerados nas câmaras de combustão, por convecção, aquecem as paredes de material refratário do poço de anodos, as quais transferem calor para o coque de empacotamento, que, por sua vez, o transfere para os anodos.

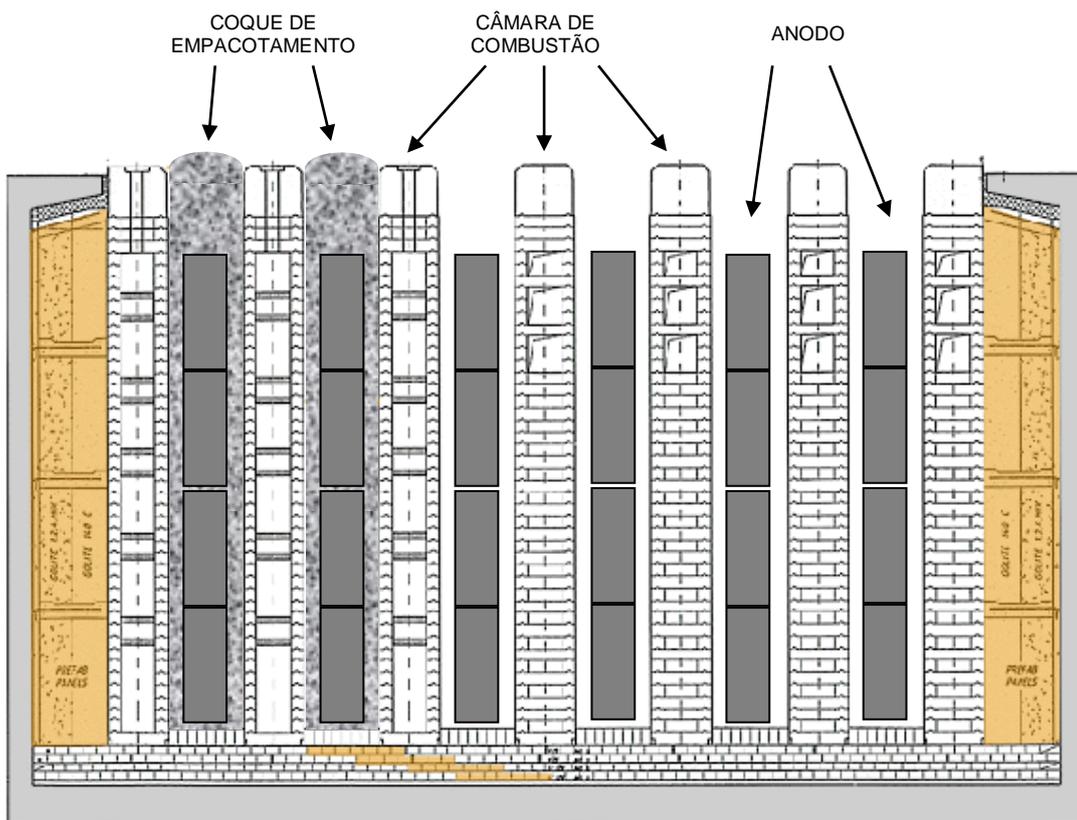


Figura 2.2 - Corte transversal do forno de cozimento

2.3 EQUIPAMENTOS DE UM FORNO DE COZIMENTO DE ANODOS

Uma fábrica de cozimento de anodos necessita dos seguintes equipamentos para realizar controle de aquecimento do forno pelo do sistema de controle, dispostos sobre o forno de cozimento conforme Figura 2.1:

- Ventilador de insuflamento (VI) que insufla ar atmosférico nas cavidades das *head walls* no interior do forno. Além de ter a função de fornecer ar para combustão mantendo a pressão interna da última seção do fogo em nível zero atmosférico, possui a finalidade de arrefecer os anodos que acabaram de ser cozidos. Para controlar o fluxo de ar inserido na *flue wall*, o ventilador de insuflamento possui 7 *dampers* motorizados, um para cada câmara de combustão, que podem ser acionados pelo sistema de controle ou manualmente pelo operador.
- *Manifold* de exaustão (ME) é instalado na *head wall* da primeira seção do fogo. Ele tem a função de conectar as câmaras de combustão ao duto que transporta os gases, por meio de exaustores, às chaminés do forno de cozimento. Ao mesmo tempo que coleta os gases de combustão, o *Manifold* de exaustão cria pressão negativa na câmara de combustão. Para esta função, o *Manifold* de exaustão possui 7 *dampers* motorizados, cada um regulando a pressão negativa correspondente a sua câmara de combustão. O acionamento do *damper* pode ser automático através do sistema de controle ou manual com atuação do operador do forno.
- A unidade de combustão (UC) é uma estrutura metálica que é posicionada sobre uma seção e é deslocada transversalmente ao longo do forno. Esta unidade é construída de forma a permitir que os seus 7 queimadores e 7

termopares sejam colocados nos seus respectivos furos existentes nas câmaras de combustão. Sua função é executar a leitura das temperaturas das câmaras de combustão e, de acordo com a resposta da estratégia de controle, injetar óleo combustível no interior das câmaras de combustão para elevar ou diminuir a temperatura.

- A unidade de tiragem (UT) é um cavalete metálico que contém 7 transmissores de pressão e 7 termopares para controle de pressão e temperatura dos gases de combustão, enviado sinais de controle para os *dampers* do *Manifold* de exaustão.
- Ponte de operação de fornos de cozimento (FTM – *Furnace Tending Machine*) é uma ponte multifuncional que tem as funções de colocação e retirada de anodos e de coque de empacotamento nos poços de anodos, e manuseio de exaustores, unidades de combustão, alimentadores de ar e unidades de tiragem.

2.4 DESCRIÇÕES DO PROCESSO DE COZIMENTO DE ANODOS

O processo de cozimento de anodos tem como principal objetivo, conferir aos anodos características físicas e químicas adequadas a sua utilização nas cubas eletrolíticas (ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., 2005). Dentre estas características podemos citar:

- Condutividade elétrica: Com o aumento da condutividade elétrica tem-se como consequência uma redução no consumo de energia;

- Condutividade térmica: Reduz as perdas de calor da cuba eletrolítica e assim evita o resfriamento do banho. Isso irá trazer como consequência, uma redução na taxa de oxidação ao ar diminuindo então o consumo do anodo, contribuindo também para a redução do consumo total de energia por diminuição das perdas térmicas;
- Estabilidade mecânica e química: O anodo é utilizado em ambiente altamente agressivo (oxidante e com altas temperaturas). Dessa forma com uma boa resistência iremos reduzir a oxidação do anodo;
- Resistência mecânica: Necessária para resistir ao manuseio sem que ocorram quebras;
- Densidade e porosidade: O anodo deve possuir alta densidade e baixa porosidade para dentre outros problemas, diminuir a penetração de banho;
- Resistência ao choque térmico: Para que o anodo não seja danificado quando colocado nas cubas eletrolíticas.

O processo de cozimento consiste, basicamente, na coqueificação do piche contido no anodo verde pela elevação de sua temperatura, até determinado valor, de acordo com uma curva de aquecimento que é parâmetro de processo.

O aquecimento do poço de anodos é feito indiretamente através das paredes das câmaras de combustão adjacentes, onde é injetado óleo combustível, que se inflama e gera calor.

Na área situada entre o ventilador de insuflamento e o *manifold* de exaustão, são posicionadas as unidade de combustão e de tiragem. Este conjunto é denominado de fogo e é responsável pela realização do ciclo de cozimento, ver Figura 2.3. De acordo com a programação de produção de anodos, o fogo é configurado para se movimentar, em sentido

pré-estabelecido, pelas seções do forno segundo um ciclo de cozimento. Quando um ciclo termina, o ventilador, o *manifold* de exaustão, a unidade de tiragem e a primeira unidade de combustão se movem no sentido do fogo. Assim, mais um lote de anodos cozidos está produzido e outros anodos verdes começam a ser cozidos. O cozimento então, se processa pela translação dos equipamentos de combustão ao longo das seções do forno.

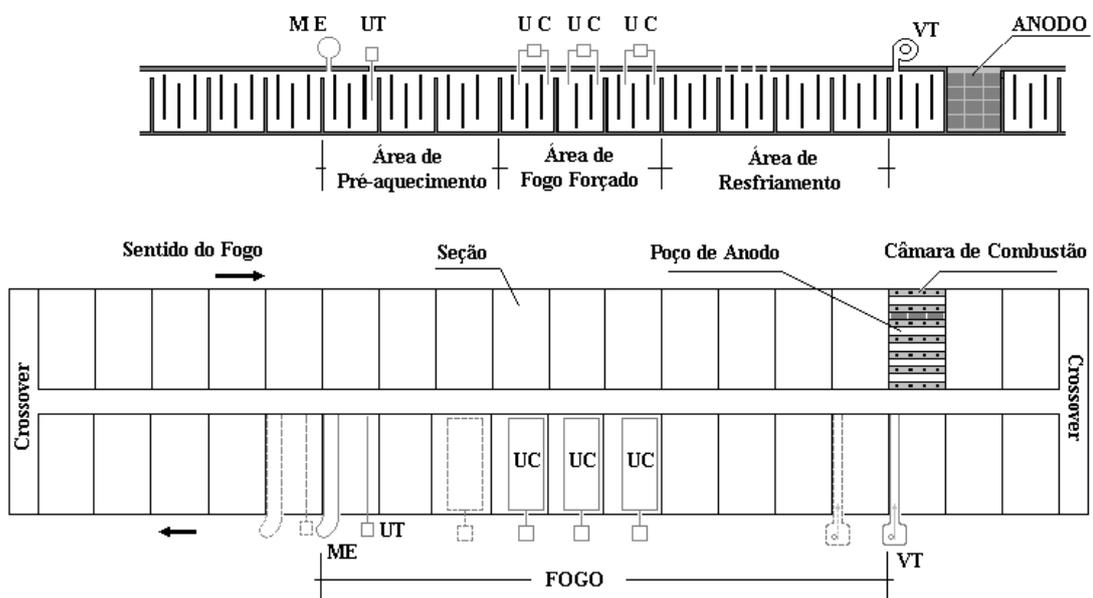


Figura 2.3 - Configuração de um fogo

Analisando o fogo, verifica-se que se compõe de 3 zonas, em relação a evolução da temperatura dos anodos:

- Zona de Pré-aquecimento natural;
- Zona de fogo forçado;
- Zona de resfriamento.

Como consequência desta definição de zonas para um fogo, observa-se que a elevação de temperatura processada em uma seção do forno é constituída de 3 etapas ou fases (ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A., 2005), a saber:

Etapa de pré-aquecimento natural.

É a etapa em que os anodos são aquecidos até a temperatura mínima de 600°C. No aquecimento natural a pressão de tiragem deve ser tal que permita um gradiente de aquecimento constante no máximo de 12°C/h entre as temperaturas 200°C a 600°C.

Na região em que está acontecendo o aquecimento natural (localizada nas 3 seções mais próximas aos *manifold* de exaustão), as câmaras de combustão estão com pressão negativa em relação aos poços e isso permite que os voláteis de piche liberados sejam sugados para o interior das câmaras e entrem em combustão aumentando o rendimento térmico dos fornos (é necessário que se tenha oxigênio suficiente para ocorrer essa combustão, caso contrário, parte dos voláteis não irá queimar e poderá ficar agregado nas paredes dos dutos de exaustão aumentando então o risco de explosão do forno). Para uma operação eficiente neste estágio é necessário se minimizar as infiltrações de ar nessa região, pois caso contrário, teremos o resfriamento das câmaras de combustão, interferência na pressão negativa e interferência na queima dos voláteis de piche.

Etapa de aquecimento forçado.

É a etapa em que ocorre a mistura de combustível (óleo BPF) com o oxigênio para obter a queima perfeita. Na configuração de um fogo, temos 3 unidades de combustão (uma unidade para cada seção). Para garantir maior eficiência do processo nesta etapa, os seguintes fatores são importantes:

- Todo o ar de combustão deve ser pré-aquecido na zona de resfriamento;

- Garantir uma boa vedação para se eliminar a infiltração de ar frio na região;
- Injeção eficiente de combustível (atomização, largura e comprimento de pulso);
- Pré-aquecimento do óleo BPF para facilitar a atomização do mesmo;
- Inspeção dos queimadores para se evitar a formação de crostas;
- Ter-se controle da tiragem dos gases;
- Ter-se controle do posicionamento do “ponto zero”;

Etapa de resfriamento

Ao contrário das outras duas regiões do forno nas quais as câmaras estão sob pressão negativa, nesta região do forno (constituída de 4 seções) as seções estão sob pressão positiva. Dessa forma teremos a troca térmica entre os anodos aquecidos e o ar injetado pelo ventilador de insuflamento (dessa forma o ar irá se aquecer antes de entrar na região do fogo forçado). Para que o ar inserido nas câmaras de combustão não resfrie a zona de fogo forçado, é importante termos o controle do ponto zero de pressão situado atrás da última unidade de controle.

Após o ventilador de insuflamento, todos os orifícios das câmaras de combustão são destampados bem como as *head walls* para que os anodos se resfriem até atingir temperaturas abaixo de 300°C para serem desenformados. O desenformamento dos anodos é crítico, pois se forem desenformados com temperaturas elevadas, eles poderão ter sua superfície oxidada o que irá causar problema de descolamento da camada de *spray* de alumínio em processo futuro.

2.5 CONTROLES EXISTENTES

O processo de cozimento de anodos acontece, basicamente, nas áreas de pré-aquecimento, fogo forçado e resfriamento. A principal função do sistema de controle é regular a elevação de temperatura de cada câmara de combustão nestas três áreas.

O aquecimento das câmaras de combustão se dá seguindo uma curva de referência de temperatura/tempo e é realizado por um conjunto de equipamentos denominado 'fogo'. Este fogo se move pelo forno a cada ciclo de cozimento concluído. Durante este processo, os anodos permanecem enfiados e parados recebendo calor das paredes das câmaras das três áreas que possuem parâmetros de aquecimento que devem ser regulados com máxima precisão possível.

O sistema de controle de um forno de cozimento é composto de três subsistemas que atuam nas áreas de pré-aquecimento, fogo forçado e resfriamento.

2.5.1 Controle do pré-aquecimento

O sistema de controle de pré-aquecimento regula o fluxo de gás no interior das câmaras de combustão das três seções que compõem a área de pré-aquecimento. A instrumentação do sistema de controle do pré-aquecimento é composta de um *manifold* de exaustão com sete *dampers* motorizados, um para cada câmara de combustão, e um cavalete para monitoração de temperatura e pressão de cada câmara de combustão posicionado em uma das três seções de pré-aquecimento.

Os principais objetivos do sistema de controle de pré-aquecimento são:

- Garantir uma taxa de elevação de temperatura de anodos controlada;
- Evitar trincas nos anodos;

- Evitar perda de calor reduzindo perdas no fluxo de gás;
- Garantir a combustão dos voláteis de piche;
- Garantir a combustão na área de fogo forçado;
- Reduzir a poluição;
- Garantir operação segura.

A área de pré-aquecimento é controlada por *dampers* automáticos que regulam a pressão interna das câmaras de combustão, criando o fluxo de oxigênio necessário para combustão do óleo BPF na zona de fogo forçado e, ao mesmo tempo, removendo do interior das câmaras de combustão os gases resultantes da queima do combustível. Esta área consiste, basicamente, de três seções com sete câmaras de combustão cada, que podem necessitar de diferentes fluxos de gás. Nesta área, o sistema de controle precisa observar o compromisso entre fornecer oxigênio suficiente para queima do combustível na área de fogo forçado e o efeito da queima dos voláteis de piche contidos nos anodos que podem elevar sua temperatura a uma taxa além da suportada.

Os modos de operação desta área podem ser automático, semiautomático e manual.

O modo de operação manual permite que se efetue a operação de abrir e fechar os *dampers* do *manifold* localmente através de botoeiras instaladas no painel de controle da tiragem.

Em modo semiautomático, o sistema de controle permite que seja ajustado, manualmente, o valor de referência para a pressão de qualquer câmara de combustão. O sistema de controle, então, ajusta os *dampers* automáticos para fornecer a pressão programada para a respectiva câmara de combustão.

O modo automático de controle de tiragem atual (Figura 2.4) procura garantir oxigênio suficiente para a queima do óleo combustível no interior das câmaras de combustão na área de fogo forçado e garantir que os gases proveniente desta queima, sejam retirados do interior do forno aquecendo a área de pré-aquecimento. Para calcular o valor de pressão ideal para um corredor de câmaras de combustão na área de pré-aquecimento, o sistema de controle de tiragem totaliza a quantidade de óleo combustível injetado no corredor do forno e numa relação proporcional, calcula (equação 2.1) qual pressão deve ser assumida como referência para o respectivo corredor de câmara de combustão dentro de limites de operação que são parâmetros de processo.

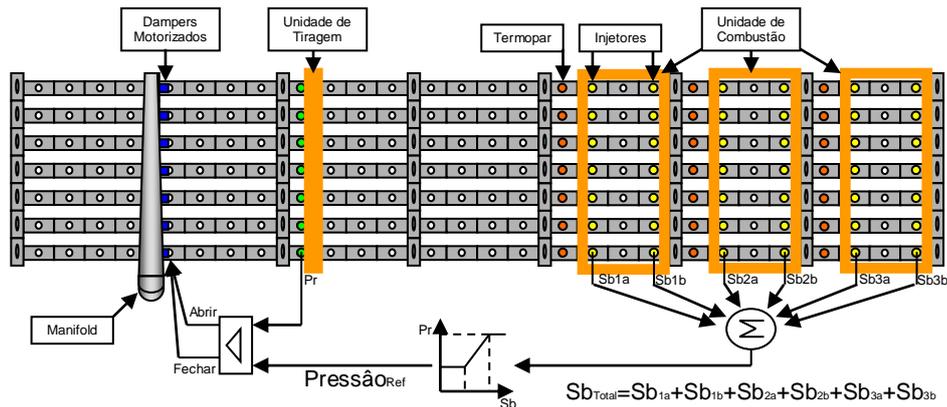


Figura 2.4 - Controle de Tiragem

$$Press\tilde{a}o_{Ref} = \left(\frac{Sb_{Total} - Sb_{Inferior}}{Sb_{Superior} - Sb_{Inferior}} \right) (Pr_{Superior} - Pr_{Inferior}) - Pr_{Inferior} \quad (2.1)$$

2.5.2 Controle do fogo forçado

O sistema de controle da área de fogo forçado regula a taxa de elevação das temperaturas das câmaras de combustão controlando a injeção de combustível no interior destas câmaras.

O controle é executado por três unidades de controle, uma para cada seção da área de fogo forçado. Cada unidade de controle de combustão possui um conjunto de um termopar e dois injetores de combustível para cada uma das sete câmaras de combustão, conforme Figura 2.5.

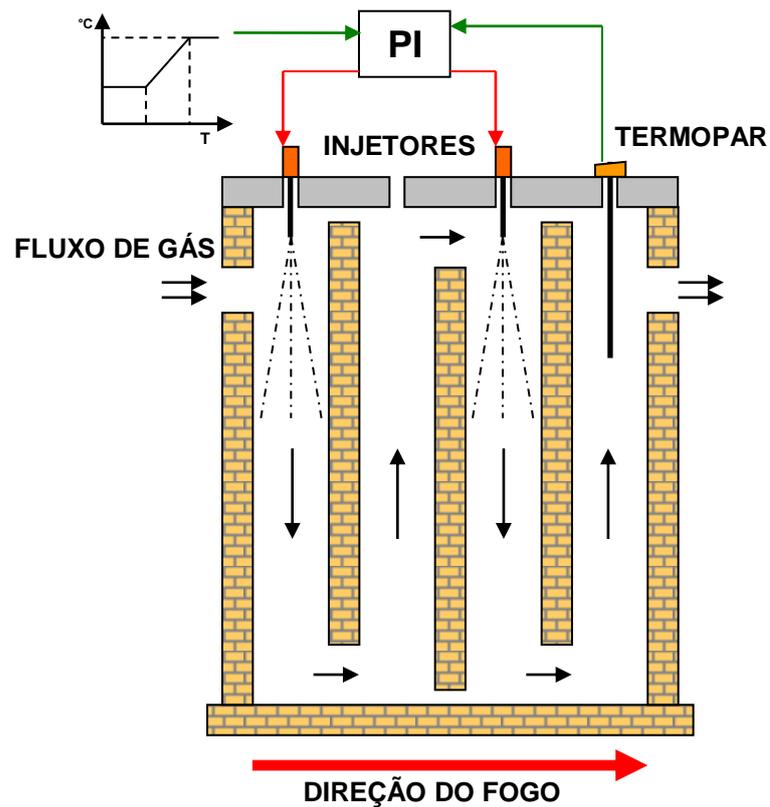


Figura 2.5 - Controle da Câmara de Combustão

Os principais objetivos do sistema de controle de fogo forçado são:

- Garantir a qualidade de anodos produzidos;
- Garantir máxima eficiência de combustão;
- Garantir que a temperatura dos anodos atinja o valor especificado;
- Garantir mínima diferença de temperatura entre câmaras de uma seção;
- Garantir operação segura.

Para manter a taxa de elevação das temperaturas em cada seção da área de fogo forçado, um controle PI (proporcional integral) é implementado. Um valor de temperatura de referência é gerado pelo sistema de controle para cada unidade de controle, que deverá ser o valor a ser seguido pelo algoritmo proporcional integral em cada uma das sete câmaras de combustão. A taxa de elevação da temperatura de referência depende da etapa do ciclo de cozimento em que o fogo se encontra. Este perfil de elevação de temperatura de referência é configurado pelo operador como um parâmetro do processo.

A saída do controlador PI é dimensionada em pulsos por minutos (PPM) e tem sua largura em mili-segundos como um parâmetro fixo de processo.

Entre as câmaras de combustão existe um compromisso de injeção máxima de óleo combustível no interior de um corredor para evitar que a combustão não ocorra devido a falta de oxigênio suficiente para a queima. A unidade mais antiga tem maior prioridade em injetar combustível e a unidade mais nova, menor. É atribuído à cada unidade um percentual do valor máximo de óleo combustível permitido para injeção. Como a unidade de controle mais antiga tem prioridade sobre as demais, ela pode injetar o seu máximo percentual programado. Se esta unidade não necessitar de seu máximo, ela transfere o excedente para as menos prioritárias.

Uma lógica de inter-travamento entre a pressão da câmara de combustão e a quantidade de óleo combustível injetado nesta câmara foi implementada para segurança do processo. Quando a pressão for inferior a um determinado valor que é parâmetro do processo, o sistema de controle para de injetar óleo combustível para evitar explosões.

Os modos de operação desta área podem ser automático e manual. O modo de operação manual permite que o operador programe uma frequência fixa de pulsos por minutos para cada injetor. Em modo automático, o sistema de controle assume a responsabilidade de gerar as saídas para os injetores.

2.5.3 Controle do resfriamento ou ponto zero

O sistema de controle do ponto zero mantém constante a pressão nas câmaras de combustão após a última unidade de controle da área de fogo forçado. Os instrumentos que compõem este sistema de controle são um transmissor de pressão monitorando a pressão em cada uma das câmaras de combustão e um *damper* motorizado, um para cada câmara de combustão, que são instalados no ventilador de insuflamento, ver Figura 2.6.

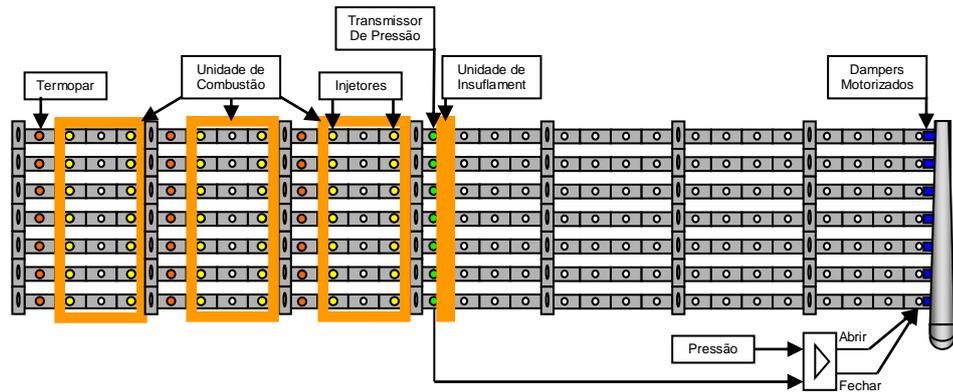


Figura 2.6 - Controle de Ponto Zero

Os principais objetivos do sistema de controle de fogo forçado são:

- Garantir a qualidade de anodos produzidos;
- Promover economia de combustível evitando injetar ar mais frio na última seção da área de fogo forçado;
- Garantir o resfriamento dos anodos cozidos.

O sistema de controle busca manter a pressão medida logo após a última seção do fogo forçado próximo de zero. Isto garante que apenas uma pequena quantidade de ar frio penetre na seção de fogo forçado e a maior quantidade de oxigênio a ser utilizada pela área de fogo forçado seja pré-aquecido na área de resfriamento.

O tipo de controle utilizado nesta área é direto, ou seja, a pressão lida é comparada a zero. Sendo maior que zero, o sistema fecha o *damper* motorizado do ventilador de insuflamento para diminuir a pressão até que seja próxima a zero. Quando menor que zero, o sistema de controle abre o *damper* para aumentar a pressão.

Os modos de operação desta área podem ser automático e manual. O modo de operação manual permite que o operador ajuste a posição do *damper* de modo a fornecer a

pressão desejada. Em modo automático, o sistema de controle assume a responsabilidade de ajustar o ponto zero.

2.6 PROBLEMAS DO CONTROLE DO PRÉ-AQUECIMENTO

O princípio básico do sistema de controle de pré-aquecimento atual é fornecer às câmaras de combustão, oxigênio suficiente para a melhor combustão.

Como citado no item 2.5.1, o sistema de controle fornece um valor de referência de pressão para o controle dos *dampers* motorizados do *manifold* de exaustão baseado no total de pulsos por minuto de óleo injetado nas câmaras de combustão da área de fogo forçado referente aquele *damper*. Este princípio de controle é eficiente quando garante o oxigênio suficiente para a combustão, mas outros eventos deixam de ser observados ou controlados gerando situações indesejadas ou prejudiciais ao processo tais como:

2.6.1 Alta diferença de temperatura entre câmaras de combustão

Na área de fogo forçado, cada unidade de controle possui um único valor de referência de temperatura para suas sete câmaras de combustão, mas o controle realizado pela unidade de controle é independente entre as câmaras. Dependendo da temperatura da câmara de combustão lida em determinado momento, o controlador PI gera saídas diferentes para cada câmara de combustão de acordo com a necessidade.

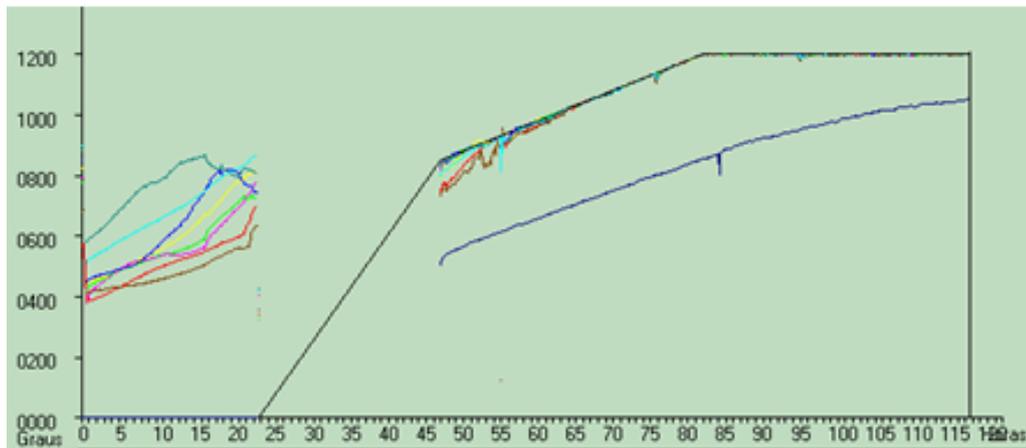


Figura 2.7 - Gráfico de tendência de uma batelada

O calor produzido pela queima do óleo combustível é conduzido pelo corredor de câmaras para a área de pré-aquecimento de maneira não uniforme entre as câmaras de combustão adjacentes, gerando perfil de temperaturas indesejado no processo. As primeiras 20 horas do processo de pré-aquecimento apresentados na Figura 2.7, mostram que elevações de temperatura diferentes para cada câmara resultaram em temperaturas bastante diferentes no término da etapa de pré-aquecimento. Dependendo da diferença de temperaturas em relação à temperatura de partida programada para a primeira unidade de controle da área de fogo forçado, poderá haver excesso de combustível injetado para recuperação de temperatura ou inexistência de combustível para baixar a temperatura, o que vai provocar queda na temperatura de pré-aquecimento também.

2.6.2 Baixa temperatura de partida da etapa de fogo forçado

A falta de um valor de referência para aquecimento da temperatura de pré-aquecimento faz com que algumas câmaras tenham temperaturas abaixo do valor especificado no momento da partida de unidades de combustão no início da etapa de fogo forçado,

causando um aumento de consumo de combustível utilizado para recuperar a temperatura baixa.

2.6.3 Comprometimento da qualidade dos anodos produzidos

A diferença de temperaturas de partida de câmaras de combustão é refletida nos anodos enforados que deverão receber diferentes quantidades de calor através de suas câmaras de combustão adjacentes, provocando um perfil de temperatura não uniforme podendo provocar com isso, trincas nos anodos.

A temperatura final de cozimentos dos anodos pode ter um perfil diferente entre as câmaras de anodo devido à quantidade de calor diferente que receberam das câmaras de combustão adjacentes, que compromete a qualidade dos anodos produzidos.

2.6.4 Aumento da poluição

Uma das situações de maior distúrbio e difícil de prever no processo de cozimento de anodos, é o momento da queima do piche contido nos anodos que, enquanto ocorre, provoca um aumento excessivo de temperatura no anodo. O destaque em círculo na Figura 2.8 mostra o momento em que o piche contido nos anodos aquecidos pela câmara representada pela cor azul escuro é queimado, elevando rapidamente a temperatura da câmara. Para regular a pressão no interior do corredor de câmaras de combustão, o sistema de controle de tiragem se baseia apenas na quantidade de óleo combustível sendo injetado naquele corredor. Se no momento em que está ocorrendo a queima de piche na área de pré-aquecimento, o total de combustível injetado na área de fogo forçado for baixo, o sistema de controle de tiragem vai

reduzir a quantidade de oxigênio no corredor de câmaras o que vai provocar baixa eficiência na queima do piche devido a falta de oxigênio gerando poluição indesejada.

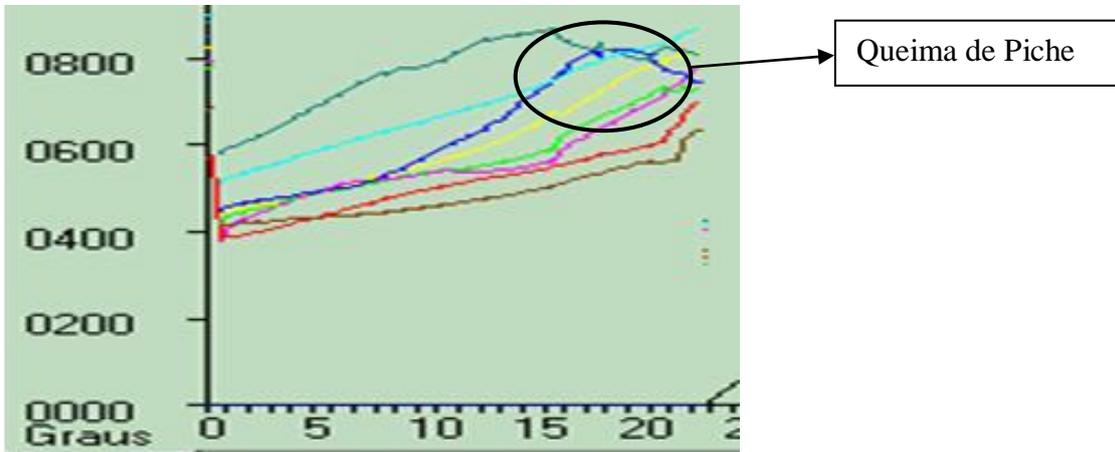


Figura 2.8 - Gráfico de tendência de tiragem

2.7 PROPOSTA DE CONTROLADOR

O sistema de controle de pré-aquecimento atual foi concebido no ano de 1996, e já foram tentadas duas estratégias para controle desta área.

A primeira estratégia de controle implementada para a área de pré-aquecimento consistia em controlar a elevação da temperatura de cada uma das sete câmaras de combustão de acordo com uma curva de elevação de temperatura de referência. Um controlador proporcional integral ajustava o valor de referência de pressão para cada câmara de combustão buscando assim, corrigir o erro de temperatura medida em relação à temperatura de referência. A Figura 2.9 ilustra esta estratégia de controle.

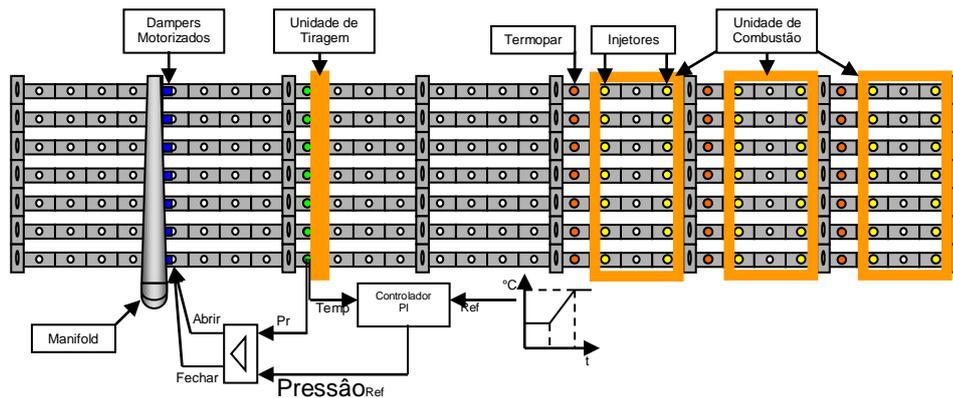


Figura 2.9 - Controle da tiragem via temperatura de câmara

O problema desta estratégia estava no efeito colateral provocado na variável de processo não controlada como eficiência de combustão. Em determinadas situações de processo, o sistema de controle, ao tentar corrigir um erro de temperatura de pré-aquecimento reduzia o fluxo de oxigênio no interior das câmaras de combustão quando esta necessitava de mais oxigênio para melhorar a eficiência de queima do combustível, ou aumentava o fluxo de oxigênio no interior das câmaras de combustão quando esta não necessitava de mais oxigênio. Esta interferência na eficiência de combustão era refletida na qualidade dos gases emitidos para atmosfera, que eram elevados a níveis indesejados.

Como a qualidade dos gases emitidos para atmosfera estava comprometida ao se tentar controlar a temperatura de pré-aquecimento, este controle de tiragem foi substituído por uma segunda estratégia de controle para se tentar manter a eficiência de combustão em níveis que não compromettesse a qualidade dos gases resultantes da combustão.

Nesta nova estratégia, que ainda é utilizada, o objetivo principal é garantir oxigênio suficiente para a combustão. Para isso, o sistema monitora a quantidade de óleo combustível injetado no interior de cada câmara de combustão e através de um controle

proporcional, aumenta ou diminui o fluxo de oxigênio no interior das câmaras numa relação direta com a quantidade de combustível. A Figura 2.4 ilustra esta estratégia de controle.

Esta estratégia de controle garante níveis de oxigênio satisfatórios para uma combustão, mas como não está comprometida com a temperatura das câmaras de combustão, esta fica sem referência e tende a aumentar ou diminuir os níveis que podem comprometer a qualidade do produto final que é o anodo e também o nível de opacidade dos gases resultantes da queima de combustível.

Para evitar que a qualidade do anodo e o nível de opacidade sejam comprometidos pelo descontrole da temperatura, o operador do forno coloca o controle de sistema em modo manual e usa sua experiência para fazer correção da temperatura observando a quantidade de combustível consumido e o nível de opacidade gerado pelo forno.

Controlar este processo de forma automática é uma tarefa difícil, pois o processo é complexo, não linear e multivariável, porém a base de conhecimento dos operadores é rica. Nestas condições, um sistema de controle baseado em lógica *fuzzy* é mais indicado, pois não necessita de um modelo analítico completo do processo. Ele calcula as suas ações em função de uma base de conhecimento de como se deve controlar este processo, que por sua vez pode ser complexo, mal conhecido (modelos imprecisos) e incerto.

Esta Dissertação propõe uma nova estratégia de controle baseado em lógica *fuzzy*, objetivando garantir os níveis de opacidade dos gases resultantes da queima de combustíveis dentro dos limites determinados pela legislação, procurando minimizar o consumo de óleo combustível, e manter mínima a diferença de temperatura das câmaras de combustão em relação a um valor de referência.

3 SISTEMAS FUZZY

3.1 INTRODUÇÃO

O conceito de conjunto *fuzzy* (Zadeh, 1965) foi proposto por Lotfi A. Zadeh (Universidade da Califórnia, Berkeley). Naquela época, Zadeh observou a dificuldade de automatizar as atividades relacionadas a problemas que compreendessem situações ambíguas, pois o processamento computacional se baseia na lógica tradicional booleana. Procurando solucionar esses problemas, o Prof. Zadeh propôs em seu artigo, uma teoria de conjuntos em que não há descontinuidades, ou seja, não há uma distinção abrupta entre elementos pertencentes e não pertencentes a um conjunto, são os conjuntos *fuzzy*. Esta teoria deu origem à lógica *fuzzy* (Zadeh, 1973) e aos sistemas de inferência *fuzzy* e, desde então, é aplicada para resolver problemas em diversas áreas do conhecimento humano.

Até 1970, a teoria dos conjuntos *fuzzy* não tinha sido aplicada a sistemas de controle devido à capacidade insuficiente de processamento dos computadores antes dessa época. Os americanos demoraram a acreditar nesta tecnologia, enquanto os europeus e japoneses já trabalhavam para construir produtos reais em torno dela.

Foi então que em 1970, ocorreu a primeira demonstração prática do uso da lógica *fuzzy* para controle de processos. Ebrahim Mamdani e seu aluno, Sedrak Assilian, do Queen Mary College, de Londres, usaram lógica *fuzzy* para controlar o funcionamento de um motor a vapor de pequeno porte, sendo que o controle desta máquina foi feito sem aplicação de fórmulas, segmentando o problema com a utilização de regras de produção, o que chamou a atenção dos pesquisadores de todo o mundo e impulsionou uma série de aplicações da lógica *fuzzy* em problemas de engenharia.

Então em 1975, surgiu a primeira aplicação industrial de um controlador *fuzzy* em uma fábrica de cimento na Dinamarca, a FL Smidth & Co. A/S. O controle *fuzzy* foi usado para regular o funcionamento de um forno de cimento, que é um processo complexo, sujeito a perturbações aleatórias e de difícil controle para um operador.

Em 1987, a lógica *fuzzy* foi introduzida em um sistema preditivo utilizado para operar os trens do metrô automatizado em Sendai, no Japão. Com este sistema, projetado pela Hitachi, o consumo de energia foi reduzido em 10% e também reduziu a margem de erro de parada dos comboios em locais especificados para menos de 10 centímetros.

A teoria alcançou popularidade com o lançamento no mercado da primeira máquina de lavar roupas usando lógica *fuzzy*, da Matsushita Electric Industrial Co, em 1990. Hoje, a lógica *fuzzy* é um conceito amplamente utilizado em muitas implementações, como motor de automóvel e sistemas de controle automático de velocidade, ar condicionado, controle de foco automático, máquinas de lavar, robôs móveis, triagem e tratamento de dados, sistemas de informações, reconhecimento de padrões, sistemas de controle de movimento, sistemas de apoio a decisão, sistemas de controle de tráfego e muitos outros.

Neste capítulo citaremos os conceitos mais relevantes de conjuntos *fuzzy* e lógica *fuzzy*, que foram utilizados para desenvolver este trabalho.

3.2 DEFINIÇÃO DE SISTEMAS FUZZY

O termo *fuzzy* significa nebuloso, difuso, algo que não está bem definido, e se refere ao fato de não conhecermos com precisão os sistemas que estamos analisando. Expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas podem então ser traduzidas em valores

numéricos pelos Sistemas *Fuzzy*, permitindo que computadores sejam utilizados como sistemas inteligentes baseados na experiência humana.

Sistemas *Fuzzy* são sistemas especialistas baseados em regras e inferência. Regras *fuzzy* representam, de uma forma simples, conhecimentos e competências, ou conhecimento que é subjetivo, ambíguo, vago ou contraditório. Esse conhecimento pode ter vindo de muitas fontes diferentes e pode ter sido adquirido em experiência de longo prazo, a partir da experiência de muitas pessoas, durante muitos anos.

A ideia básica de um Sistema *Fuzzy* simples (Ibrahim, 2003), é representado na Figura 3.1.

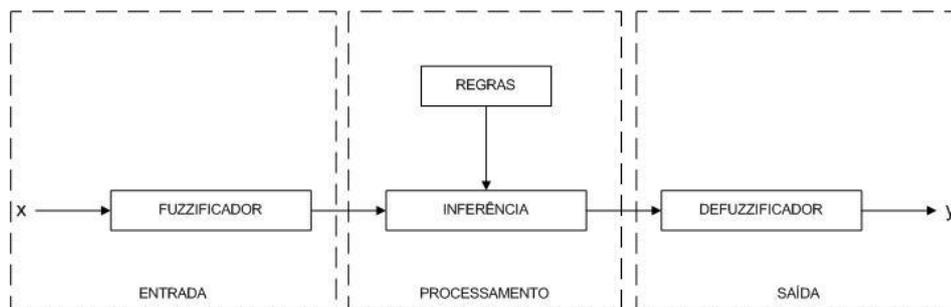


Figura 3.1 - Sistema *Fuzzy* simples

Sistemas *Fuzzy*, em geral, possuem os estágios de entrada, processamento e saída.

No estágio de entrada se processa a transformação das variáveis de entrada do problema em valores *fuzzy*. Para cada valor de entrada é aplicada uma função de pertinência, a qual retornará o grau de pertinência em um Conjunto *Fuzzy*, e esse valor estará limitado entre 0 a 1. Este processo é chamado de "Fuzzificador".

O grau de pertinência 0 significa que o valor não pertence ao conjunto, enquanto o grau de pertinência 1 indica que o valor é uma representação completa do conjunto.

No estágio de processamento as regras são verificadas e aplicadas sobre os valores de entrada já "Fuzzificados", disparando um peso para cada uma num processo chamado de Inferência. As regras são fornecidas por especialistas ou são extraídas de dados numéricos.

Para a elaboração dessas regras é importante ter em mente alguns conceitos importantes. São eles:

- 1) Variáveis linguísticas, que são o centro da técnica de modelagem de sistemas *fuzzy*. Com elas é possível nomear os Conjuntos *Fuzzy*, e ainda qualificá-los utilizando adjetivos. Dessa forma, a representação do sistema se torna muito mais próxima do problema real,
- 2) Implicações do tipo Se A então B,
- 3) Operações lógicas do tipo E/OU, para criar relações entre as variáveis.

No estágio de saída, as regiões resultantes do processo de inferência são convertidas em valores precisos para a variável de saída do sistema num processo chamado de “Defuzzificador”. Dentre as diversas técnicas de “Defuzzificação”, as mais comuns são:

- 1) Centróide ou centro de gravidade,
- 2) Máximo,
- 3) Média dos máximos.

Uma grande variedade de Sistemas *Fuzzy* pode ser encontrada na literatura, e podem ser agrupados em três modelos (Raitamäki, 2003): Sistema *Fuzzy* Puro, Sistema *Fuzzy* com fuzzificador e defuzzificador e Sistema *Fuzzy* Takagi-Sugeno.

O modelo de Sistema *Fuzzy* Puro usa apenas conjuntos *fuzzy* em sua entrada e saída. Ele consiste somente de regras fuzzy do tipo SE [antecedente] ENTÃO [consequente] e um mecanismo de inferência como visto na Figura 3.2. O mecanismo de inferência *fuzzy* determina um mapeamento dos conjuntos *fuzzy* do universo de discurso da entrada em $U \in R^n$ com os conjuntos *fuzzy* da saída pertencente ao universo de discurso $V \in R^n$. O uso deste sistema em uma aplicação real é limitado devido ao fato do uso de variáveis reais como entrada e não conjuntos *fuzzy*, e o mesmo vale para as saídas.

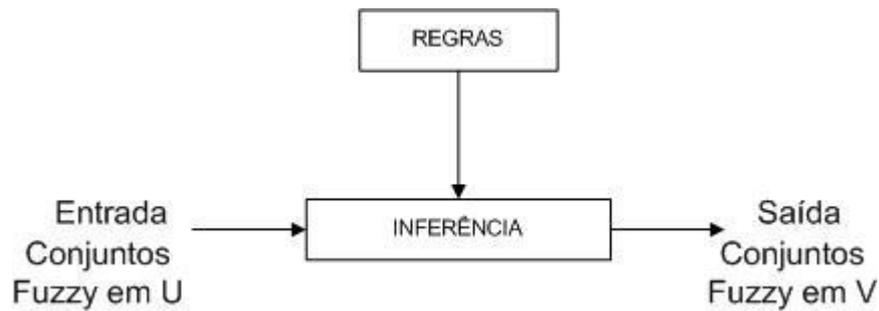


Figura 3.2 - Sistema *Fuzzy* Puro

O modelo de Sistema *Fuzzy* com fuzzificador e defuzzificador foi inicialmente proposto por Ebrahim Mamdani e basicamente é um Sistema *Fuzzy* Puro que acrescenta um fuzzificador para a entrada e um defuzzificador para a saída. O mecanismo de fuzzificação mapeia valores reais de x em U a subconjuntos fuzzy em U e o processo de defuzzificação mapeia subconjuntos fuzzy em V a valores reais de y em V . Os mecanismos de inferência *fuzzy* são os mesmos dos Sistemas *Fuzzy* Puro. Esse Sistema *Fuzzy* consiste de quatro componentes com visto na Figura 3.3.

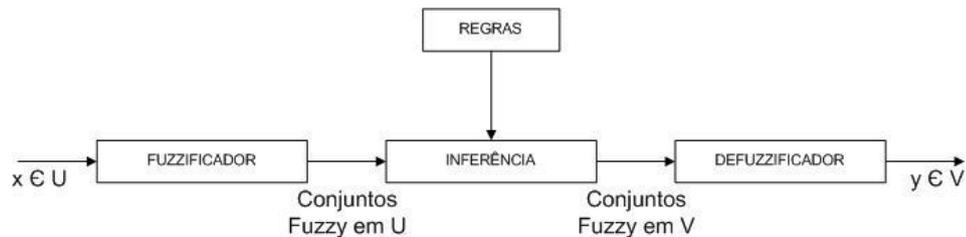


Figura 3.3 - Sistema *Fuzzy* com fuzzificador e defuzzificador

O modelo de Sistema *Fuzzy* Takagi-Sugeno (Takagi & Sugeno, 1985), é uma implementação prática do modelo de Sistema *Fuzzy* com fuzzificador e defuzzificador, sendo a principal diferença o cálculo da saída y , como sendo o consequente de cada regra definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada. Isto é, a regra R_i pode ser escrita como:

Regra (R_i): Se x_1 é A_i e x_2 é B_i então $y = f_i(x_1, x_2)$

O resultado de cada regra é um valor numérico e não um conjunto *fuzzy*, que assume como peso o valor da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra. A resposta final do controlador é obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais. A representação gráfica deste modelo pode ser vista na Figura 3.4.

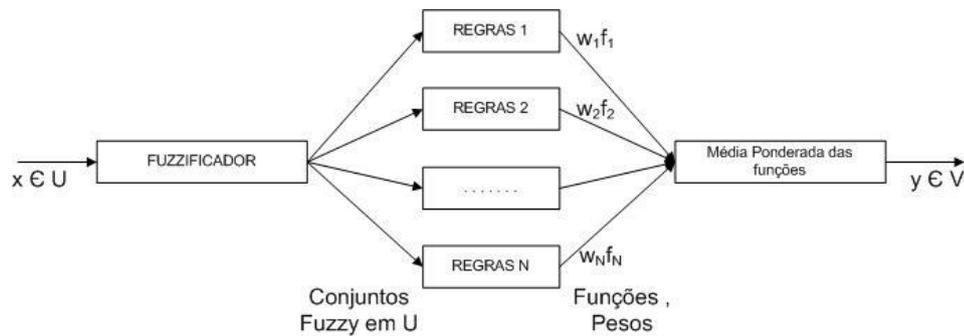


Figura 3.4 - Sistema *Fuzzy* Takagi-Sugeno

3.3 CONJUNTOS E OPERAÇÕES FUZZY

A teoria clássica dos conjuntos determina que um elemento pertence ou não a um determinado conjunto. Assim, pode-se definir a pertinência de um elemento x de um conjunto A em um determinado universo U através da função característica:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \notin A \\ 1 & \text{se } x \in A \end{cases} \quad (3.1)$$

Ao contrário de conjuntos clássicos, que apresentam limitações para lidar com problemas onde a transição de um conjunto A para outro conjunto B deve acontecer de forma gradual, os conjuntos *fuzzy* atribuem a cada elemento possível no universo de discurso, um

valor que representa o grau de pertinência no conjunto *fuzzy*. Esse grau de pertinência é representado por valores numéricos reais variando dentro de um intervalo fechado de 0 a 1.

Um conjunto *fuzzy* A definido em um universo de discurso U é caracterizado por uma função de pertinência $\mu_A(x)$ que assume valores no intervalo $\{0,1\}$. Assim, um conjunto *fuzzy* A em U pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico x e seu valor de pertinência como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (3.2)$$

Quanto mais próximo μ_A é de 1, mais x é considerado pertencente ao conjunto A e quanto mais próximo μ_A é de 0, menos x é considerado pertencente ao conjunto A .

Os conjuntos *fuzzy* podem ser definidos sobre um universo contínuo ou discreto. Quando U é contínuo, então A pode ser representado como:

$$A = \int_U \mu_A(x) / x \quad (3.3)$$

Onde o sinal integral não denota integração e a barra inclinada não denota divisão. Eles representam a coleção de todos os pontos $x \in U$ com seu grau de associação da função de pertinência $\mu_A(x)$.

Do mesmo modo, quando U é discreto, então A pode ser representado como:

$$A = \sum_U \mu_A(x) / x \quad (3.4)$$

Onde nem o sinal do somatório e nem a barra de divisão denotam essas operações novamente.

Não existe uma regra fechada para o uso das funções de pertinência, elas podem ser definidas pelo usuário ou podem assumir algumas funções típicas, a modelagem do sistema será tão melhor quanto mais próxima a função de pertinência mapear o comportamento do fenômeno. Apenas a aplicação pode dizer se um padrão particular é apropriado ou não. As funções mais utilizadas para representar um conjunto fuzzy são (Ibrahim, 2003):

- 1) Trapezoidal: nela é possível representar todo um intervalo de pontos de máximo. Sua função pode ser representada pela equação 3.5 e gráfico na Figura 3.5.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \geq x \end{cases} \quad (3.5)$$

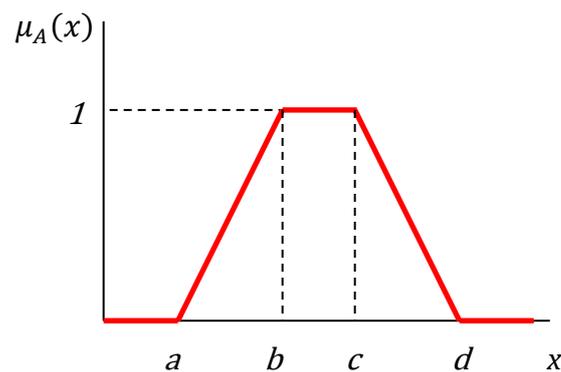


Figura 3.5 - Função de pertinência trapezoidal

- 2) Triangular: muito parecida com a trapezoidal, sendo que a função apresenta apenas um único ponto de máximo no conjunto. A equação 3.6 e a Figura 3.6 representam esta função.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \geq x \end{cases} \quad (3.6)$$

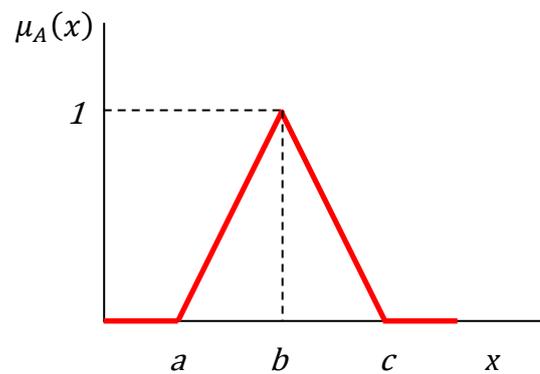


Figura 3.6 - Função de pertinência triangular

- 3) Gaussiana: tem uma distribuição normal, ou seja, tende a zero para valores muito maiores ou muito menores do que a média. Sua representação gráfica é vista na Figura 3.7 e sua formulação na equação 3.7.

$$\mu_A(x) = e^{\frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$

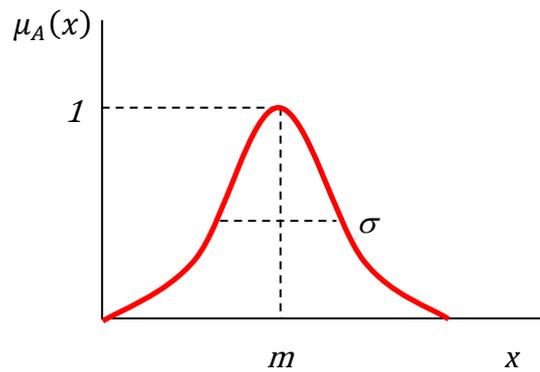


Figura 3.7 - Função de pertinência gaussiana

- 4) Singleton: função de pertinência que apresenta o grau de pertinência igual a 1 (um), em apenas um ponto do seu domínio, e o grau 0 (zero) nos demais pontos. Esta função é mais empregada na parte consequente das regras *fuzzy*. Este conjunto é representado pela equação 3.8 e seu gráfico na Figura 3.8.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x = a \\ 0, & x \neq a \end{cases} \quad (3.8)$$

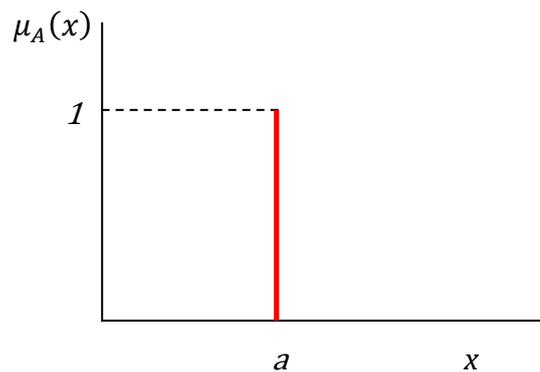


Figura 3.8 - Função de pertinência singleton

Os principais conceitos relacionados aos conjuntos fuzzy (Ibrahim, 2003) estão visualizados na Figura 3.9 e listados a seguir:

- 1) Suporte: é a área efetiva do domínio de um conjunto *fuzzy* A num universo de discurso U , que apresenta valores $\mu_A(x) > 0$. Os conjuntos que apresentam um único ponto em U com valor $\mu_A(x) = 1$, é chamado de Conjunto Singleton.
- 2) Altura: é o maior grau de pertinência permitido pela função de pertinência.
- 3) Conjunto *fuzzy* normal: um conjunto *fuzzy* é normal se sua altura for igual a 1. É prática normalizar conjuntos *fuzzy* para se obter um desempenho melhor.
- 4) Núcleo: o núcleo de conjunto *fuzzy* A num universo de discurso U , é um subconjunto de U em que todos seus elementos apresentam $\mu_A(x) = 1$.
- 5) Corte- α : dado um valor de pertinência α , os elementos do domínio que possuem $\mu_A(x)$ acima deste valor α estão contidos neste conjunto.

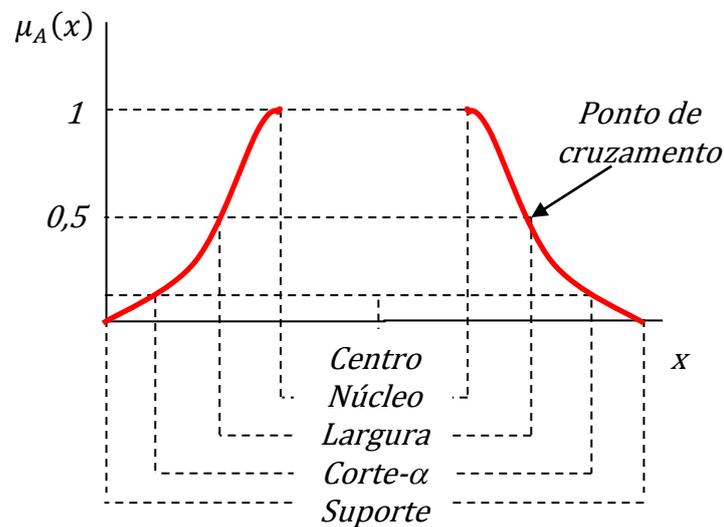


Figura 3.9 - Conceitos dos conjuntos *fuzzy*

- 6) Centro: se a média do valor de todos os pontos no qual a função de pertinência de um conjunto *fuzzy* atinge seu valor máximo, sendo este finito, então este valor é definido como centro de um conjunto *fuzzy*.
- 7) Ponto de cruzamento: é o ponto no universo U onde o valor de pertinência em A é igual a 0,5.

Da mesma forma como ocorre na teoria dos conjuntos clássicos, há uma série de definições e operações envolvendo conjuntos *fuzzy*. As definições apresentadas aqui são as usadas com maior frequência em operações com conjuntos *fuzzy* (Ibrahim, 2003).

Sejam A e B dois conjunto *fuzzy* em um universo de discurso U com funções de pertinência μ_A e μ_B respectivamente. As operações de união, interseção, igualdade e complemento são apresentadas a seguir:

- 1) União: A função de pertinência $\mu_{(A \cup B)}$ da união, $A \cup B$, é definida para todo $x \in U$ por:

$$\mu_{(A \cup B)}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.9)$$

- 2) Interseção: A função de pertinência $\mu_{(A \cap B)}$ da interseção, $A \cap B$, é definida para todo $x \in U$ por:

$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (3.10)$$

- 3) Igualdade: Num universo de discurso U , dois conjuntos *fuzzy* são considerados iguais se os valores de pertinência forem iguais para todo $x \in U$ correspondente conforme segue:

$$\mu_{(A)}(x) = \mu_{(B)}(x), \forall x \in U \quad (3.11)$$

- 4) Complemento: A função de pertinência $\mu_{\bar{A}}$ do complemento de um conjunto *fuzzy* A é definida para todo $x \in U$ por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.12)$$

3.4 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Outro conceito bastante importante relacionado com conjuntos *fuzzy*, é o de variáveis linguísticas. Define-se por variável numérica um identificador que pode assumir um dentre vários valores. Da mesma forma, uma variável linguística pode assumir um valor linguístico dentre vários outros em um conjunto de termos linguísticos com seu grau de pertinência associado. Ou seja, uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média e alta. Estes valores são descritos por conjuntos *fuzzy*, conforme representado na Figura 3.10.

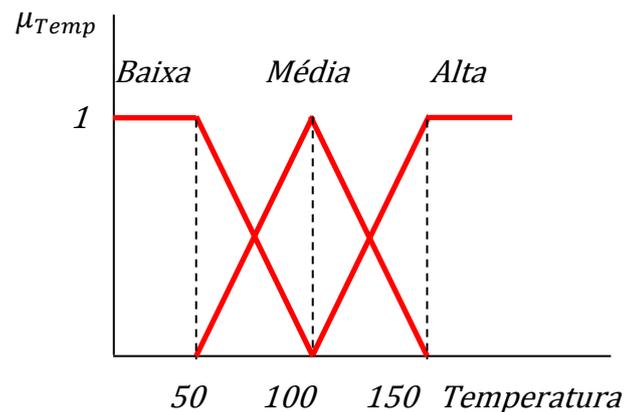


Figura 3.10 - Variáveis linguísticas de temperatura

Formalmente (Zimmermann, 1992), uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(N, T(N), U, G, M)$, onde: N é o nome da variável, $T(N)$ é o conjunto de

termos de N , ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de N , U é o universo de discurso, G é a regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de $T(N)$, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores e M é a regra semântica usada para associar a cada valor gerado por G um conjunto fuzzy em U . No caso da variável temperatura da Figura 3.10, temos: N sendo a temperatura, $T(N)$ os termos {baixa, média, alta}, U o intervalo 0 a 150 °C por exemplo, G é a temperatura não baixa e não muito alta, por exemplo e M associa o valor acima a um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência exprime o seu significado.

3.5 SISTEMA FUZZY DE MAMDANI

Um sistema baseado em lógica *fuzzy* é composto de quatro módulos principais: uma interface de fuzzificação, uma base de conhecimento, uma lógica de tomada de decisão e uma interface de defuzzificação como ilustrado na Figura 3.11.

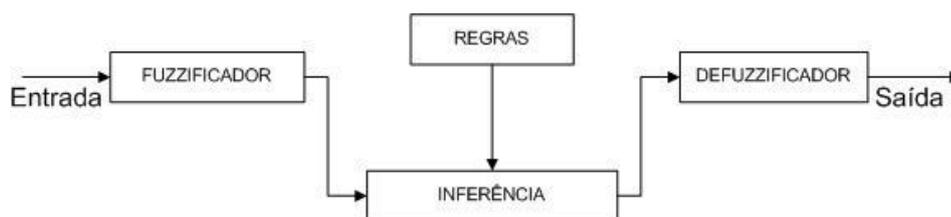


Figura 3.11 - Configuração básica de um sistema *fuzzy*

A interface de fuzzificação é responsável pelas seguintes funções:

- 1) Adquirir os valores das variáveis de entrada,
- 2) Mapear os valores de entrada para seus valores correspondentes dentro do universo de discurso,

- 3) Realizar a função de fuzzificar os valores de entrada em valores linguísticos.

A base de regras compreende o conhecimento sobre o domínio da aplicação e os objetivos a serem atingidos.

O procedimento de inferência é o núcleo de um sistema *fuzzy*, ele permite reproduzir o mecanismo humano de tomada de decisão, empregando implicações *fuzzy* e regras de inferência da lógica *fuzzy*.

A função de defuzzificação gera, uma conclusão não *fuzzy* a partir de conclusões *fuzzy* oriundas do procedimento de inferência.

3.5.1 Fuzzificação

A fuzzificação é o processo de associar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos, chamados de conjuntos *fuzzy*. Sua função é realizar o mapeamento entre os valores de entrada numéricos em conjuntos *fuzzy* para que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas.

Cada termo linguístico pode ser interpretado como um conjunto *fuzzy*. Cada conjunto *fuzzy*, é representado por uma função de pertinência que indica com que grau o valor medido pertence ao conjunto. Assim, para um determinado valor numérico, a função de pertinência associada a um termo linguístico retorna um número real do intervalo $[0; 1]$.

Quanto mais próximo de 1, mais a medida é compatível com o valor linguístico. Cabe ressaltar que um mesmo valor pode pertencer com certo grau, a um conjunto *fuzzy* e, em outro grau, a outro conjunto *fuzzy*.

As funções de pertinência em conjuntos *fuzzy* de um sistema são escolhidas dependendo da exatidão, resposta, estabilidade, facilidade de implementação, manipulação e manutenção requeridas pelo sistema. As funções de pertinência triangulares e trapezoides são as mais comuns.

3.5.2 Base de regras

Dois dos principais conceitos dentro da lógica *fuzzy* formam o núcleo das aplicações *fuzzy*: o primeiro é o da variável linguística e o outro são as regras SE-ENTÃO *fuzzy*, que são proposições contendo variáveis linguísticas. As regras *fuzzy* descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise de especialistas, e cuja inferência produz um resultado desejado. A inferência baseada em regras *fuzzy* pode ser compreendida como um funcional que mapeia um conjunto de uma ou mais variáveis de entrada associadas a um conjunto *fuzzy*, denominadas antecedentes, para um conjunto de uma ou mais variáveis de saída, também, associadas a conjuntos *fuzzy*, denominadas consequentes, de um dado sistema.

Cada regra *fuzzy* é formada por uma parte antecedente, parte “SE”, e uma parte consequente, parte “ENTÃO”, resultando em uma estrutura do tipo:

$$\text{SE (antecedente), ENTÃO (consequente)} \quad (3.13)$$

O antecedente é composto por um conjunto de premissas que, quando satisfeitas, determinam o processamento do consequente da regra por um mecanismo de inferência *fuzzy*. Por sua vez, o consequente é composto por um conjunto de ações que são gerados com o

disparo da regra. As partes que compõem um antecedente ou conseqüente de uma regra são relacionadas pelo conectivo lógico “E”, “OU” ou “NÃO” representando, respectivamente, a intersecção, união e complemento fuzzy. Assim, se x e y são variáveis linguísticas nos universos de discurso U e V , e A e B são conjuntos *fuzzy*, respectivamente, em U e V , tem-se:

1) A proposição *fuzzy* dada por:

$$x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B \quad (3.14)$$

é uma relação *fuzzy* $A \cap B$ em $U \times V$ definida por seu grau de pertinência

$$\mu_{(A \cap B)}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.15)$$

ou

$$\mu_{(A \cap B)}(x, y) = t(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.16)$$

com $t: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ uma T-norma

tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$ satisfazendo as condições:

- a. Comutatividade: $x \otimes y = y \otimes x$
- b. Associatividade: $(x \otimes y) \otimes z = x \otimes (y \otimes z)$
- c. Monotonicidade: se $x \leq y, w \leq z$, então $x \otimes w \leq y \otimes z$
- d. Condições de contorno: $x \otimes 0 = 0$ e $x \otimes 1 = x$

2) A proposição *fuzzy* dada por:

$$x \text{ é } A \text{ ou } y \text{ é } B \quad (3.17)$$

é uma relação *fuzzy* $A \cup B$ em $U \times V$ definida por seu grau de pertinência

$$\mu_{(A \cup B)}(x, y) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.18)$$

ou

$$\mu_{(A \cup B)}(x, y) = s(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.19)$$

com $s: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ uma S-norma

tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$ satisfazendo as condições:

- a. Comutatividade: $x \oplus y = y \oplus x$
- b. Associatividade: $(x \oplus y) \oplus z = x \oplus (y \oplus z)$
- c. Monotonicidade: se $x \leq y, w \leq z$, então $x \oplus w \leq y \oplus z$
- d. Condições de contorno: $x \oplus 0 = x$ e $x \oplus 1 = 1$

3) A proposição *fuzzy* dada por:

$$x \text{ é não } A \quad (3.20)$$

é uma relação *fuzzy* \bar{A} em U definida por seu grau de pertinência

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.21)$$

Dependendo do o número de variáveis linguísticas apresentadas na entrada e na saída dos sistemas, os modelos linguísticos podem ser classificados como:

1) modelo SISO (*Single-Input/Single-Output*), com regras constituídas por uma única entrada e uma única saída. Este modelo apresenta a seguinte estrutura:

Regra 1: Se x é A_1 , Então y é B_1 ;

ou

Regra 2: Se x é A_2 , Então y é B_2 ;

ou

...

Regra n: Se x é A_n , Então y é B_n

onde x é a variável linguísticas antecedente, y é a variável linguísticas consequente e A_n e B_n são subconjuntos *fuzzy* de um universo de discurso U e V , respectivamente, os valores *fuzzy* de entrada e saída do modelo, em

geral, os conjuntos fuzzy A_n e B_n estão associados a um termo linguístico, como por exemplo, frio, normal, quente.

- 2) modelo MISO (*Multiple-Input/Single-Output*), com regras constituídas de múltiplas entradas e uma única saída. Este modelo apresenta a seguinte estrutura:

Regra 1: Se x_1 é $A_{1,1}$ e x_2 é $A_{2,1}$ e ... e x_m é $A_{m,1}$, Então y é B_1 ;

ou

Regra 2: Se x_1 é $A_{1,2}$ e x_2 é $A_{2,2}$ e ... e x_m é $A_{m,2}$, Então y é B_2 ;

ou

...

Regra n: Se x_1 é $A_{1,n}$ e x_2 é $A_{2,n}$ e ... e x_m é $A_{m,n}$, Então y é B_n ;

onde x_1, x_2, \dots, x_m são as variáveis linguísticas antecedentes, y é a variável linguística consequente e $A_{m,n}$ e B_n , subconjuntos de um universo de discurso U e V , respectivamente, os valores *fuzzy* de entrada e saída do modelo.

- 3) modelo MIMO (*Multiple-Input/Multiple-Output*), com regras constituídas de múltiplas entradas e múltiplas saídas. Este modelo apresenta a seguinte estrutura:

Regra 1: Se x_1 é $A_{1,1}$ e x_2 é $A_{2,1}$ e ... e x_m é $A_{m,1}$,

Então y_1 é $B_{1,1}$, y_2 é $B_{2,1}$, ..., y_s é $B_{s,1}$;

ou

Regra 2: Se x_1 é $A_{1,2}$ e x_2 é $A_{2,2}$ e ... e x_m é $A_{m,2}$,

Então y_1 é $B_{1,2}$, y_2 é $B_{2,2}$, ..., y_s é $B_{s,2}$;

ou

...

Regra n: Se x_1 é $A_{1,n}$ e x_2 é $A_{2,n}$ e ... e x_m é $A_{m,n}$,

Então y_1 é $B_{1,n}$, y_2 é $B_{2,n}$, ..., y_s é $B_{s,n}$;

onde as variáveis linguísticas antecedentes x_1, x_2, \dots, x_n e os termos linguísticos $A_{i,j}$ com $i=1,2,\dots,m$ e $j=1,2,\dots,n$, são definidos como no modelo MISO, y_1, y_2, \dots, y_s são as variáveis linguísticas consequentes e $B_{i,j}$ com $i=1,2,\dots,m$, e $j=1,2,\dots,n$, são subconjuntos *fuzzy* definidos no universo de discurso V_1, V_2, \dots, V_n das variáveis de saída.

3.5.3 Máquina de inferência

O processo de inferência *fuzzy* permite que sistemas *fuzzy* sejam elaborados por um conjunto de regras *fuzzy* através de proposições condicionais, do tipo “SE (condição) ... ENTÃO (ação)”, baseadas nas variáveis linguísticas para executar um processo de tomada de decisão, ou seja, a máquina de inferência recebe valores *fuzzy* provenientes do módulo de entrada, processa as regras existentes na base de regras e gera um conjunto *fuzzy* de saída a partir da composição de todas as regras disparadas.

Existem duas categorias principais de inferência na lógica *fuzzy*, que se diferenciam pela avaliação que elas perfazem sobre a base de regras (King, 1999). Existem as dirigidas aos dados, onde são valores de entrada os antecedentes e se busca o consequente de uma regra, e as dirigidas às metas, que executa uma busca em sentido inverso. Estas formas de operar são chamadas *de Modus Ponens* e *Modus Tollens*, respectivamente e são definidos como:

1) *Modus Ponens* generalizado:

Fato: x é A'

Regra: SE x é A ENTÃO y é B

Consequência: y é B'

2) *Modus Tollens* generalizado:

Fato: y é B'

Regra: SE x é A ENTÃO y é B

Consequência: x é A'

Onde, os conjuntos *fuzzy* A , A' , B , B' são associados às variáveis linguísticas x e y .

Vários modelos de inferência *fuzzy* podem então ser utilizados para relacionar as entradas e saídas de um conjunto de regras, e estas inferências diferem pelo tipo de operador e pelos tipos de proposições antecedentes e consequentes utilizados. O método de inferência determina a forma operacional do modelo *fuzzy*, e este é um mapeamento que define uma transformação do valor *fuzzy* de entrada em um valor de saída. Dentre os modelos de inferência mais utilizados, estão o modelo de Mamdani e o modelo de Takagi-Sugeno (Jantzen, 2007).

O modelo Mamdani consiste em modelos linguísticos nos quais a saída é formada pela superposição dos consequentes das regras individuais. No modelo Mamdani cada regra é expressa como demonstrado no exemplo a seguir. A Figura 3.12 ilustra o processo de inferência de Mamdani para o sistema S , no caso em que seu comportamento é dado pelas seguintes regras:

Regra 1: Se x_1 é $A_{1,1}$ e x_2 é $A_{2,1}$, Então y_1 é B_1 ; e

Regra 2: Se x_1 é $A_{1,2}$ e x_2 é $A_{2,2}$, Então y_2 é B_2

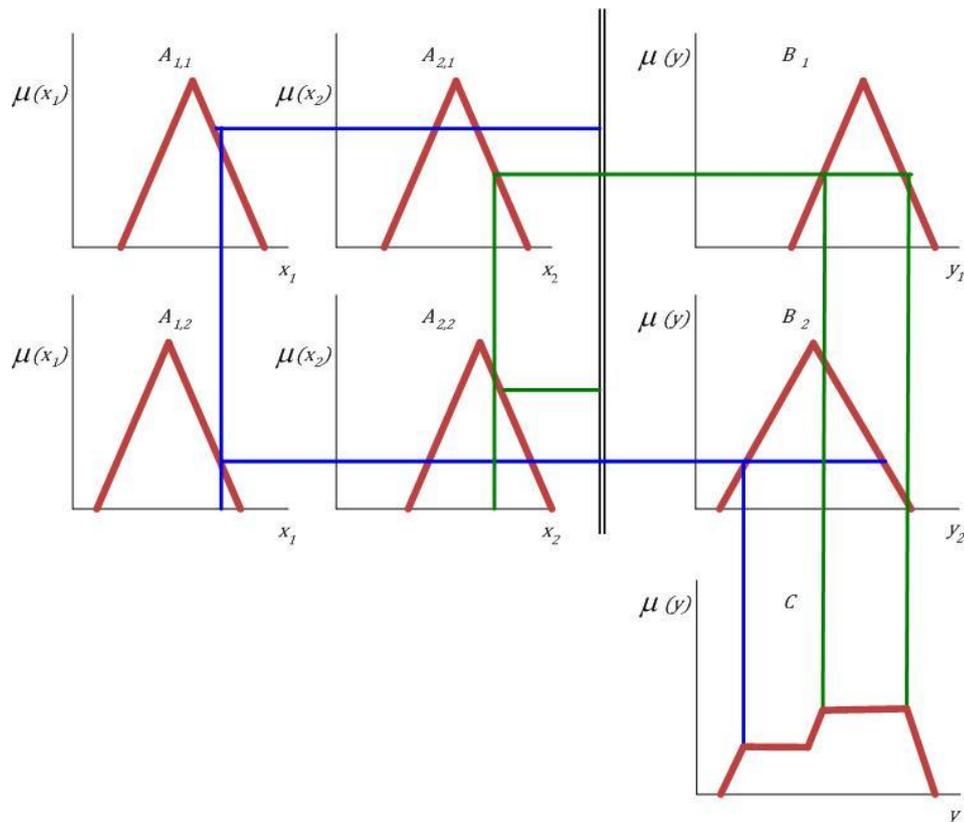


Figura 3.12 - Modelo Mamdani

No modelo Takagi-Sugeno, seu algoritmo é similar ao método de inferência de Mamdani como a fuzzificação das entradas e aplicação dos operadores *fuzzy*. A principal diferença entre esses dois métodos de inferência é a forma de análise da função de saída. Para o modelo de inferência de Sugeno não é necessário uma variável linguística de saída, no entanto é necessária a atribuição de pesos nas regras. O modelo de Sugeno pode ser utilizado em qualquer sistema de inferência no qual a função de pertinência de saída seja uma combinação linear das entradas. A Figura 3.13 ilustra o processo de inferência de Takagi-Sugeno que tem a seguinte forma:

Regra 1: Se x_1 é $A_{1,1}$ e x_2 é $A_{2,1}$, Então $y_1 = a \times A_{1,1} + b \times A_{2,1} + c$

Regra 2: Se x_1 é $A_{1,2}$ e x_2 é $A_{2,2}$, Então $y_2 = a \times A_{1,2} + b \times A_{2,2} + c$

$$y = \frac{w_1 \times y_1 + w_2 \times y_2}{w_1 + w_2} \quad (3.22)$$

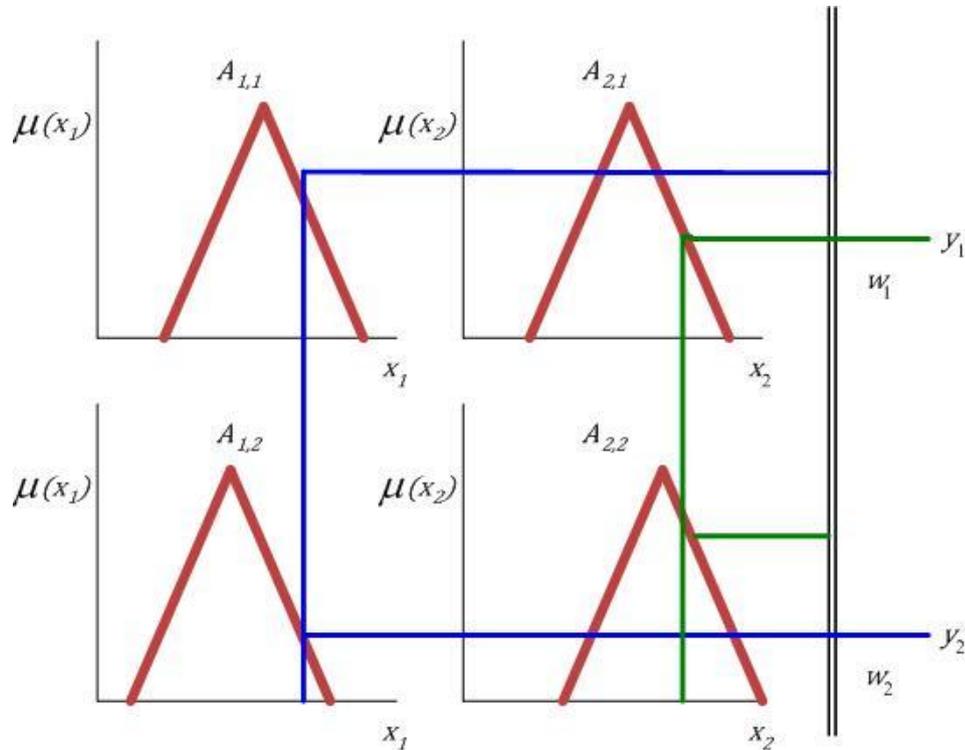


Figura 3.13 - Modelo Takagi-Sugeno

3.5.4 Defuzzificação

O processo de defuzzificação é a operação inversa ao processo de fuzzificação. Ele mapeia o conjunto de saída *fuzzy* a partir do mecanismo de inferência *fuzzy* para um número preciso. Em outras palavras, pode-se dizer que o defuzzificador dá o verdadeiro ponto que melhor descreve o conjunto *fuzzy* de saída. O defuzzificador deve apresentar um único valor de controle preciso e contínuo e tem que ter simplicidade computacional, o que é particularmente importante porque a maioria dos controladores *fuzzy* são normalmente

utilizados em tempo real. Dentre os vários métodos existentes os mais usados são: centroide (centro de gravidade), média dos máximos e média ponderada.

- 1) Centroide: Em um universo de discurso discreto, a saída Y é produzida pelo cálculo do centro de gravidade do conjunto *fuzzy* consequente $\mu(y_i)$ obtido pela composição das regras. A expressão da saída Y discreto é dada pela equação 3.23.

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(y_i) \times Y_i}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \quad (3.23)$$

onde n é o número de intervalos de quantização da saída, Y_i é o valor da variável de saída para o intervalo de quantização i e $\mu(y_i)$ seu grau de pertinência. Centroide é um dos métodos mais utilizados, mas requer maior esforço computacional, por isso nem sempre é o mais aconselhável.

- 2) Média dos máximos: Esta abordagem utiliza o valor médio entre os maiores valores das funções de pertinência, segundo a seguinte equação:

$$Y = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n} \quad (3.24)$$

onde Y_i é valor máximo da abscissa de cada regra disparada, e n é o número total de regras disparadas. Em caso onde a função de pertinência tenha mais de um valor máximo, esse método não poderá ser utilizado.

- 3) Média ponderada: Quando apenas singletons são usados como consequentes das regras *fuzzy*, este método combina os consequentes com o nível de disparo de cada uma das regras gerando uma saída Y de acordo com a equação:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3.25)$$

onde n é o número regras *fuzzy*, μ_i é o nível de disparo da regras i , e Y_i é o valor do singleton i . Este método também é utilizado na defuzzificação dos modelos Takagi-Sugeno de primeira ordem.

No projeto desta dissertação foi adotado o método de média ponderada para o módulo de defuzzificação do sistema.

4 SISTEMA DESENVOLVIDO

4.1 INTRODUÇÃO

A principal função da área de pré-aquecimento de fornos de cozimento de anodos é a retirada de gases provenientes da queima de combustível no interior das câmaras de combustão e, por conseguinte, a criação de um fluxo de gás necessário a esta combustão. Esta área é composta por 3 seções e 7 dutos individuais que podem necessitar de diferentes volumes de gases de combustão. Nesta área, o sistema de controle tem compromisso com diversas variáveis como, por exemplo, quantidade de oxigênio no interior das câmaras de combustão, poluição gerada pela queima do combustível e enviada para atmosfera e a taxa de elevação das temperaturas das Câmaras de combustão. Um modelo adequado para esse controle multivariável e de difícil identificação, é um sistema *fuzzy*, o qual permite capturar estratégias de controle de operadores humanos experientes somado a grande quantidade de dados históricos do sistema atual. A escolha do sistema fuzzy se deve à capacidade de relacionar as diversas entradas do processo com a saída desejada, à rapidez do cálculo de respostas para o problema, além da facilidade de implementação do sistema proposto nos equipamentos de controle atuais.

O sistema de controle proposto está representado na Figura 4.1. O controlador *fuzzy* controla a taxa de elevação da temperatura de cada uma das 7 câmaras de pré-aquecimento individualmente, ajustando o volume dos gases de combustão de cada corredor, observando o consumo de óleo combustível e o nível de opacidade medido dos gases resultantes do processo.

- 2) Construir a base de regras fuzzy;
- 3) Especificar o mecanismo de inferência das regras fuzzy;
- 4) Selecionar o método de defuzzificação das variáveis de saída;
- 5) Implementar e sintonizar o sistema fuzzy.

Para que a implementação do sistema *fuzzy* proposto fosse possível no equipamento de controle utilizado no controle de fornos de cozimento de anodos, foram assumidas as seguintes premissas:

- 1) Utilizar, na medida do possível, os mesmos sensores disponíveis no sistema de controle atual;
- 2) Utilizar o mínimo de recurso dos controladores de processo e não comprometer o desempenho de execução do controle. Para isso, foi assumido o compromisso de se utilizar as formas mais simples de controlador fuzzy;
- 3) Manter a interação entre os operadores e o processo, utilizando o computador supervisor para tomada de ações e exibição dos valores instantâneos, valores de referência, alarmes e gráficos;
- 4) Garantir que os níveis de segurança operacional do controle de processo atual sejam mantidos.

4.2 VARIÁVEIS DE ENTRADA

O sistema de controle proposto foi desenvolvido tendo como principais objetivos:

- 1) Garantir o controle da taxa de elevação da temperatura interna das câmaras de combustão seguindo uma temperatura de referência comum às 7 câmaras;
- 2) Minimizar a poluição gerada pela queima de combustível no interior das câmaras de combustão;
- 3) Garantir oxigênio suficiente e necessário para queima do combustível.

A determinação das variáveis de entrada do sistema de inferência *fuzzy* foi desenvolvida buscando manter os objetivos de sistema citados anteriormente sob controle.

Para garantir o controle da taxa de elevação da temperatura interna das câmaras de combustão, o erro medido entre a temperatura de referência e a temperatura real da câmara foi escolhido como a primeira variável de entrada.

O valor de opacidade medido na chaminé de saída de gases para atmosfera é a segunda variável de entrada do sistema como forma de medir a poluição gerada pela queima de combustível no interior das câmaras de combustão.

Como não existe um instrumento para medir a quantidade de óleo combustível injetado no interior das câmaras de combustão, foi considerado o total de pulsos de injeção de óleo combustível calculados pelo sistema de controle da área de fogo forçado como sendo a terceira variável de entrada.

4.2.1 Erro de temperatura

A primeira variável de entrada do controlador *fuzzy* proposto para a área de pré-aquecimento é o erro de temperatura medido entre um valor de temperatura de referência e a temperatura medida no interior de cada uma das 7 câmaras de combustão da seção sob

controle do sistema. Para calcular o erro de temperatura, uma curva de referência comum a todas as câmaras de combustão, foi definida para que o sistema de controle possa comparar com a temperatura real de cada câmara. O erro então é a diferença entre a temperatura real e a de referência. Para início dos testes, esta curva de referência foi definida pela engenharia de processo de cozimento de anodos da seguinte forma:

- 1) Temperatura inicial : 190 graus
- 2) Taxa de elevação : 15 graus/hora
- 3) Temperatura final : 550 graus para o ciclo de 24 horas

Para melhor controle desta variável, a posição de medida da temperatura das câmaras de combustão foi deslocada para a primeira seção da área de pré-aquecimento, conforme visto na Figura 4.1. Isto foi necessário pois nesta área, a elevação da temperatura possui um perfil mais linear que na seção anterior, e isso facilita a implementação da curva de referência de temperatura, pois torna-se uma reta linear de fácil codificação e mais próxima do comportamento real do forno.

Levando-se em consideração de que quanto mais simples o formato da função de pertinência, mais fácil a construção, manipulação e execução desta função, sem comprometer a eficiência, aplicou-se ao controlador proposto as variáveis linguísticas triangulares e trapezoidais.

Na elaboração das variáveis linguísticas do erro de temperatura durante entrevista com especialistas, considerou-se um conjunto de funções de pertinência triangulares e trapezoidais denominadas baixa, normal e alta, conforme demonstrado na Figura 4.2. O termo “baixa”, indica que o resultado da diferença entre a temperatura medida e o valor de referência está abaixo de um parâmetro mínimo. O termo “normal”, indica que o resultado da diferença entre a temperatura medida e o valor de referência está dentro de uma faixa de

parâmetros aceitáveis. E o termo “alta”, indica que o resultado da diferença entre a temperatura medida e o valor de referência está acima de um parâmetro máximo.

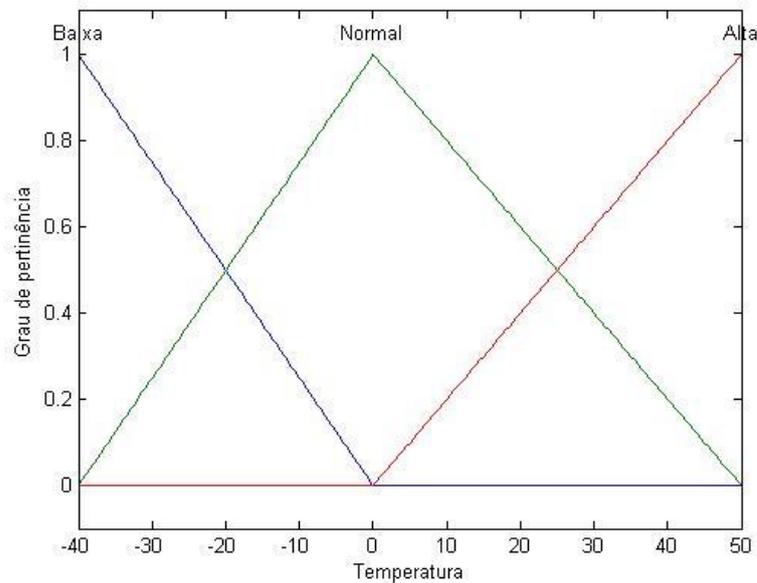


Figura 4.2 - Variável erro de temperatura

4.2.2 Opacidade

A segunda variável de entrada do controlador *fuzzy* é o nível de opacidade gerado pela queima do óleo combustível no interior das câmaras de combustão medido na saída da chaminé. O universo de discurso da variável opacidade foi delimitado entre 0 e 100%, que corresponde à faixa de leitura do instrumento opacímetro e conjunto de funções de pertinência denominadas normal e alta, foram definidas de acordo com os limites de alarmes dos níveis de opacidade do sistema de controle do forno de cozimento de anodos conforme demonstrado na Figura 4.3, e os parâmetros foram corrigidos pelo método de tentativa e erro durante a implantação. O termo “normal”, indica que o valor de opacidade medido está abaixo de um

parâmetro máximo de operação. E o termo “alta”, indica que o valor de opacidade medido está acima de um parâmetro máximo.

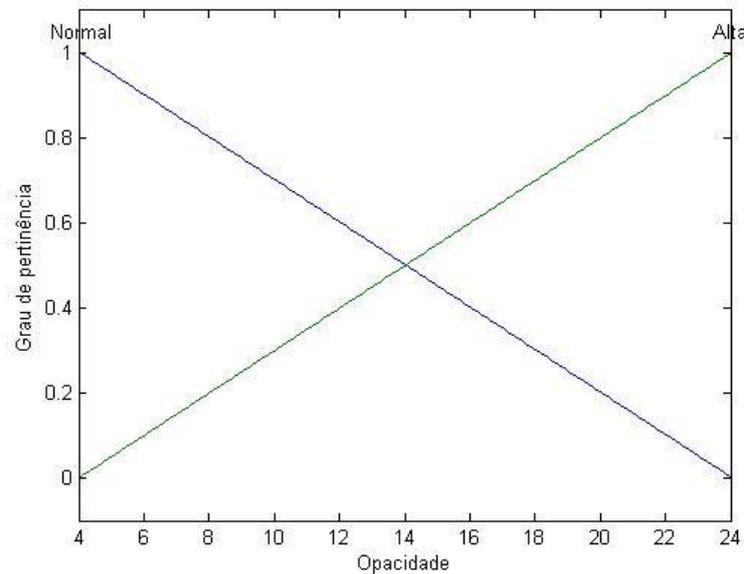


Figura 4.3 - Variável opacidade

4.2.3 Consumo de combustível (Total de pulsos)

A terceira variável de entrada é consumo de óleo combustível utilizado para aquecer as câmaras de combustão. Como não existe um instrumento para medir a quantidade de combustível injetado nas câmaras de combustão, foi considerado a somatória total de pulsos de injeção de óleo combustível regulados pelo sistema de controle da área de fogo forçado para cada uma das 7 câmaras de combustão.

Na área de aquecimento forçado existem 6 injetores de óleo combustível para cada um dos 7 corredores formados por 3 câmaras de combustão em sequência. O resultado da soma dos pulsos dos 6 injetores de um corredor representa o consumo de óleo combustível do respectivo corredor.

O universo de discurso da variável consumo de óleo combustível e os conjuntos de funções de pertinência foram determinados baseados em entrevistas com operadores especialistas e ajustados pelo método de tentativa e erro. A variável consumo de óleo combustível foi representada em seu universo de discurso através das suas três funções de pertinência, baixo, médio e alto, como ilustrado na Figura 4.4. O termo “baixo”, indica o quanto o resultado da soma de todos valores de pulsos de um corredor de câmaras de combustão ajustados pelo sistema em um ciclo de controle, está abaixo de um parâmetro mínimo. O termo “médio”, indica o quanto o resultado da soma de todos valores de pulsos de um corredor de câmaras de combustão ajustados pelo sistema em um ciclo de controle, está dentro de uma faixa de parâmetros aceitáveis. E o termo “alto”, indica o quanto o resultado da soma de todos valores de pulsos de um corredor de câmaras de combustão ajustados pelo sistema em um ciclo de controle, está acima de um parâmetro máximo.

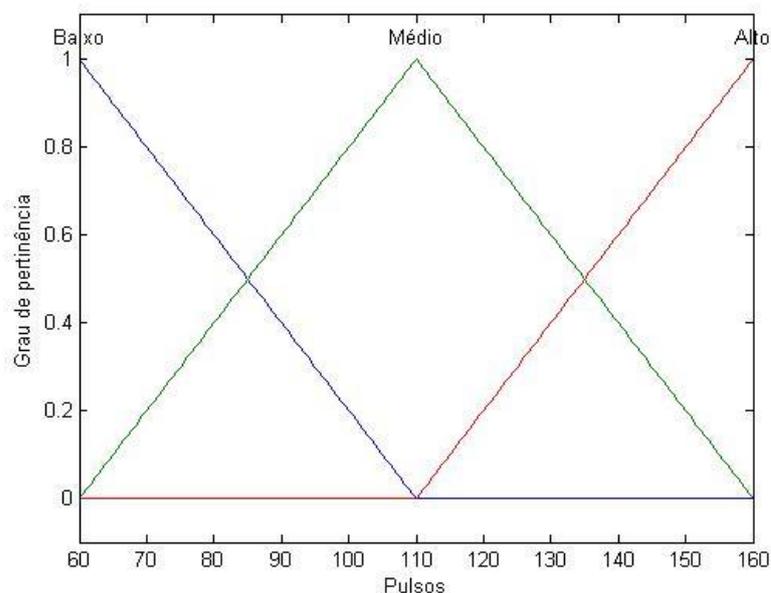


Figura 4.4 - Variável quantidade de pulsos

4.3 VARIÁVEL DE SAÍDA

Em um sistema de controle de fornos de cozimento de anodos, a principal função dos equipamentos de tiragem é retirar, do interior do forno, os gases provenientes da queima dos combustíveis e a elevação da temperatura das câmaras de combustão da área de pré-aquecimento através do arraste de temperaturas mais altas da área de fogo forçado para a área de pré-aquecimento. Esta função é feita ajustando a pressão negativa no interior das câmaras de combustão. Quanto mais alta a pressão negativa, maior a retirada dos gases, mais arraste de calor da área de fogo forçado e mais oxigênio injetado no interior das câmaras e, por conseguinte, quanto mais baixa a pressão negativa, menor a retirada dos gases, menor arraste de calor da área de fogo forçado e menos oxigênio injetado no interior das câmaras.

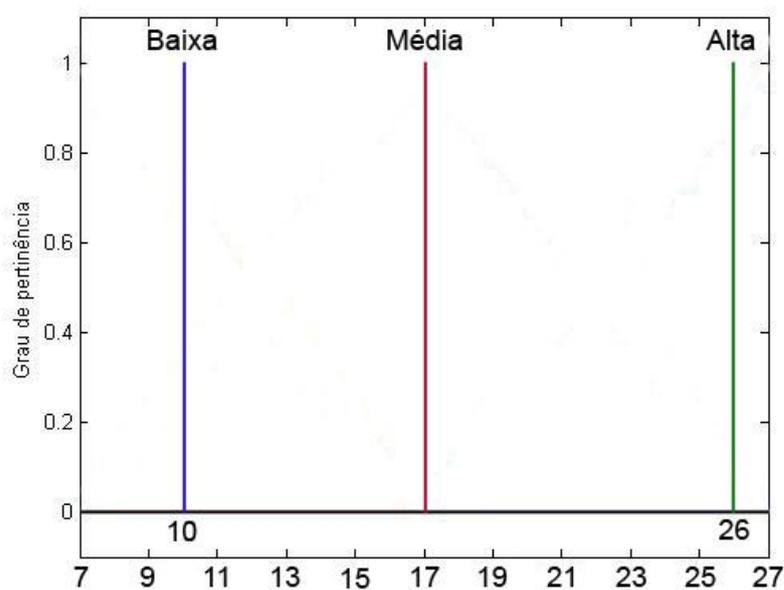


Figura 4.5 - Variável pressão de tiragem

A variável de saída do sistema *fuzzy* implementado é o valor de referência de pressão no interior de cada uma das sete câmaras de combustão na primeira seção da área de

pré-aquecimento. A variável pressão foi representada em seu universo de discurso através de suas três funções de pertinência, baixa, média e alta, como ilustrado na Figura 4.5. O termo “baixa”, indica que o valor de referência de pressão negativa no interior de uma câmara de combustão está abaixo de um parâmetro mínimo. O termo “média”, indica que o valor de referência de pressão negativa no interior de uma câmara de combustão está dentro de uma faixa de parâmetros aceitáveis. E o termo “alta”, indica que o valor de referência de pressão negativa no interior de uma câmara de combustão está acima de um parâmetro máximo.

4.4 BASE DE REGRAS E PROCESSO DE INFERÊNCIA

Com as funções de pertinência de entrada e saída e seus respectivos termos linguísticos definidos, foram feitas entrevistas com os operadores dos fornos de cozimento de anodo mais experientes para identificar as ações executadas manualmente na variável pressão de tiragem de acordo com as situações montadas utilizando os termos linguísticos das variáveis de entrada.

Após concluídas as entrevistas, foram estabelecidas as regras do modelo, que constituem um conjunto de proposições fuzzy do tipo “Se ... Então”, procurando-se relacionar as pertinências entre as variáveis. Foram identificadas um total de 18 regras para o controlador fuzzy, que são apresentadas a seguir.

- 1) Se Temperatura é Baixa e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Normal,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 2) Se Temperatura é Baixa e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Normal,
Então Pressão de Tiragem é Alta;

- 3) Se Temperatura é Baixa e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Normal,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 4) Se Temperatura é Baixa e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 5) Se Temperatura é Baixa e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Alta,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 6) Se Temperatura é Baixa e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Alta, Então
Pressão de Tiragem é Alta;
- 7) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é
Normal, Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- 8) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é
Normal, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 9) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Normal,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 10) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 11) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Alta,
Então Pressão de Tiragem é Média;
- 12) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Alta,
Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 13) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Normal,
Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- 14) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Normal,
Então Pressão de Tiragem é Baixa;

- 15) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Normal, Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- 16) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 17) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 18) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Alta.

Analisando as regras identificadas, observa-se que, a quantidade de regras do controlador pode ser reduzida a nove, pois a ação de saída pressão de tiragem induz a apenas um tipo de decisão em algumas condições de entrada, independente do nível de opacidade medido, convertendo as regras 1 a 6 em apenas uma, as regras 8 e 11 em uma e as regras 9 e 12 também em uma regra. Dessa forma, as seguintes regras foram implementadas no sistema.

- 1) Se Temperatura é Baixa, Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 2) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Normal, Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- 3) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 4) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Médio, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 5) Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Alto, Então Pressão de Tiragem é Alta;
- 6) Se Temperatura é Alta e Opacidade é Normal, Então Pressão de Tiragem é Baixa;

- 7) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 8) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- 9) Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Alta.

As nove regras identificadas, resumem todo o conhecimento de especialistas da operação dos fornos de cozimento de anodos da Albras. A regra 1 é responsável por corrigir a temperatura de câmara de combustão baixa, as regras 6,7,8 e 9 são responsáveis por reduzir a temperatura alta nas câmaras de combustão, as regras 3,7,8 e 9 são responsáveis por corrigir o nível alto de opacidade dos gases na chaminé e as regras 5 e 9 são responsáveis em aumentar o nível de oxigênio no interior das câmaras de combustão para melhorar a queima do óleo combustível em grande quantidade no interior das câmaras de combustão.

Após a definição das regras, foi utilizado o procedimento de defuzzificação de centro de área (Centroide) para o método Mamdani aplicando o cálculo das médias dos pesos para converter os valores linguísticos de saída do controlador *fuzzy* em um valor numérico. Este método foi escolhido para simplificar o processo de defuzzificação e assim não comprometer os recursos do processador. Sua formulação é representada na equação 4.1, onde S é a saída do sistema, S_i são os valores dos termos singleton e T_i são os valores de cada termo de entrada do sistema *fuzzy*.

$$S = \frac{S_1 \times T_1 + S_2 \times T_2 + S_3 \times T_3}{T_1 + T_2 + T_3} \quad (4.1)$$

As correlações entre as variáveis de entrada e saída do sistema implementado podem ser melhor compreendidas através do gráfico de superfície nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8. Os gráficos de superfície confirmam que, para um nível de opacidade “alto” ou erro de temperatura “baixo” ou quantidade de pulsos “alto”, a resposta do sistema tende para um nível de pressão “alto” necessário para corrigir estes desvios.

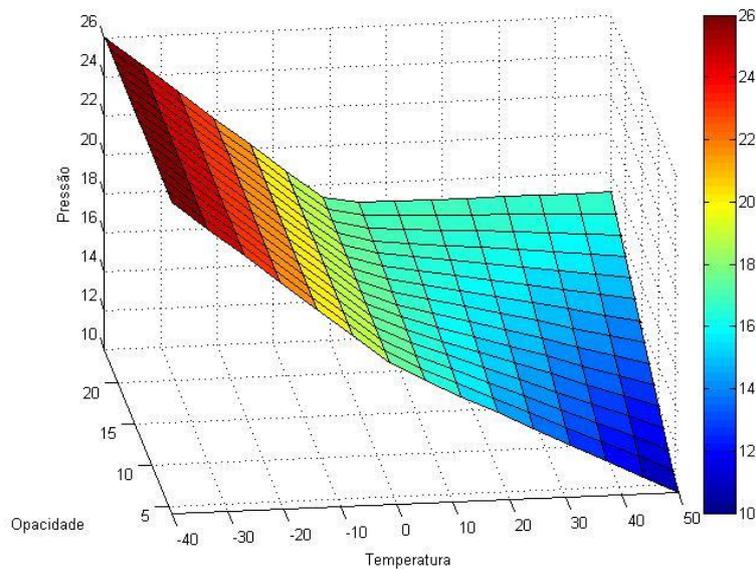


Figura 4.6 - Gráfico de superfície temperatura x opacidade

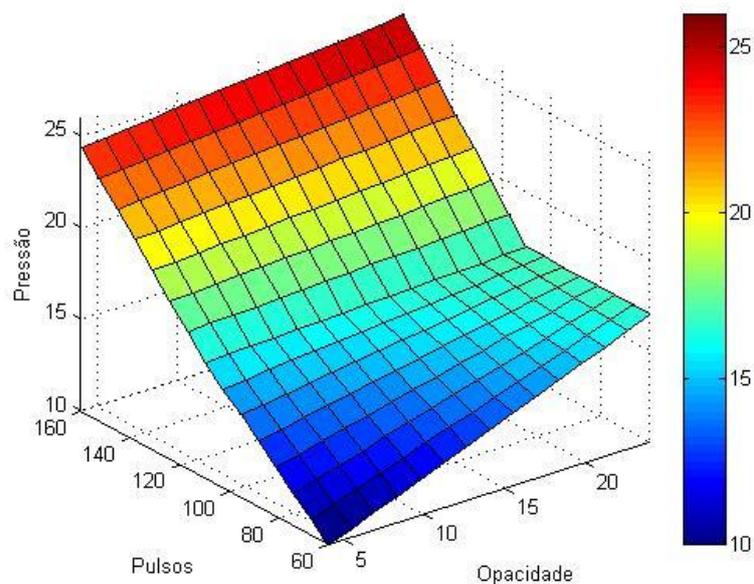


Figura 4.7 - Gráfico de superfície pulsos x opacidade

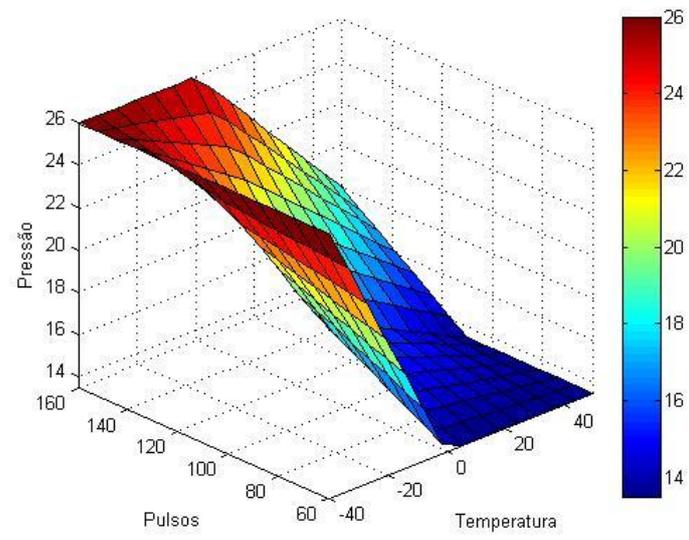


Figura 4.8 - Gráfico de superfície temperatura x pulsos

5 IMPLANTAÇÃO E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

O sistema de controle de tiragem *fuzzy* proposto foi implantado no forno de cozimento de anodos C para testes e ajuste de parâmetros pelo método de tentativa e erro. O período de duração dos testes correspondeu a 90 dias de operação do forno de cozimento de anodos C.

As seguintes premissas foram assumidas para realização do teste:

- 1) Manter o controle de tiragem em modo automático no computador supervisor e no painel de controle local. Caso fosse necessário passar o controle para modo manual, foi recomendado que fosse registrado o motivo para esta ação, para que fossem analisadas e feitas modificações no sistema se necessário.
- 2) Transmissores de pressão da tiragem calibrados. O sistema de controle tomará decisões baseado em valores lidos no campo e os instrumentos devem estar informando valores corretos.
- 3) *Dampers* motorizados de tiragem funcionando corretamente. A ação de correção da pressão de tiragem é realizada ajustando a posição dos *dampers* motorizados, por essa razão, é muito importante ter os *dampers* motorizados funcionando corretamente.
- 4) Termopares de medição de temperatura de câmaras de tiragem calibrados e em condições operacionais. A diferença entre a temperatura medida pelo termopar e o valor de referência será usado como uma das variáveis de entrada do controlador *fuzzy*.

- 5) Medidor de opacidade calibrado e alinhado. O valor de opacidade medido na chaminé será usado como uma das variáveis de entrada do controlador *fuzzy*.

5.2 IMPLANTAÇÃO

Para início dos testes, os seguintes parâmetros do controlador *fuzzy* foram usados:

- 1) Variável de entrada “erro de temperatura”.
 - a. Baixo [-Inf -50 0]
 - b. Médio [-50 0 50]
 - c. Alto [0 50 Inf]
- 2) Variável de entrada “opacidade”.
 - a. Normal [-Inf 0 20]
 - b. Alta [0 20 Inf]
- 3) Variável de entrada “consumo de combustível”.
 - a. Baixo [-Inf 40 95]
 - b. Médio [40 95 150]
 - c. Alto [95 150 Inf]
- 4) Variável de saída “pressão de tiragem”.
 - a. Baixa [7]
 - b. Média [17]
 - c. Alta [27]
- 5) Regras
 - a. Se Temperatura é Baixa, Então Pressão de Tiragem é Alta;

- b. Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Normal, Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- c. Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- d. Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Médio, Então Pressão de Tiragem é Média;
- e. Se Temperatura é Normal e Total de Pulsos é Alto, Então Pressão de Tiragem é Alta;
- f. Se Temperatura é Alta e Opacidade é Normal, Então Pressão de Tiragem é Baixa;
- g. Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Baixo e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- h. Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Médio e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Média;
- i. Se Temperatura é Alta e Total de Pulsos é Alto e Opacidade é Alta, Então Pressão de Tiragem é Alta;

O acompanhamento do teste foi feito em conjunto com operadores, técnicos e engenheiros de processo e automação, e os registros de resultados foram anotações de operadores, observações dos técnicos e engenheiros de processo e cartas gráficas de tendências de temperatura, pressão e opacidade geradas pelo sistema de supervisão e controle.

O gráfico de temperatura retirado do sistema supervisório da Figura 5.1, mostra que a lógica de controle é eficiente para regular a elevação da temperatura da área de pré-aquecimento, mas é muito dependente da disponibilidade e manutenção dos equipamentos. No gráfico é possível observar que um problema no *damp*er motorizado da câmara sete, fez

com que a temperatura não conseguisse acompanhar o valor de referência como as demais temperaturas de câmaras. Por esse motivo foi reforçada a orientação para equipe de operação e manutenção, que mantenham sempre os equipamentos em perfeito funcionamento.

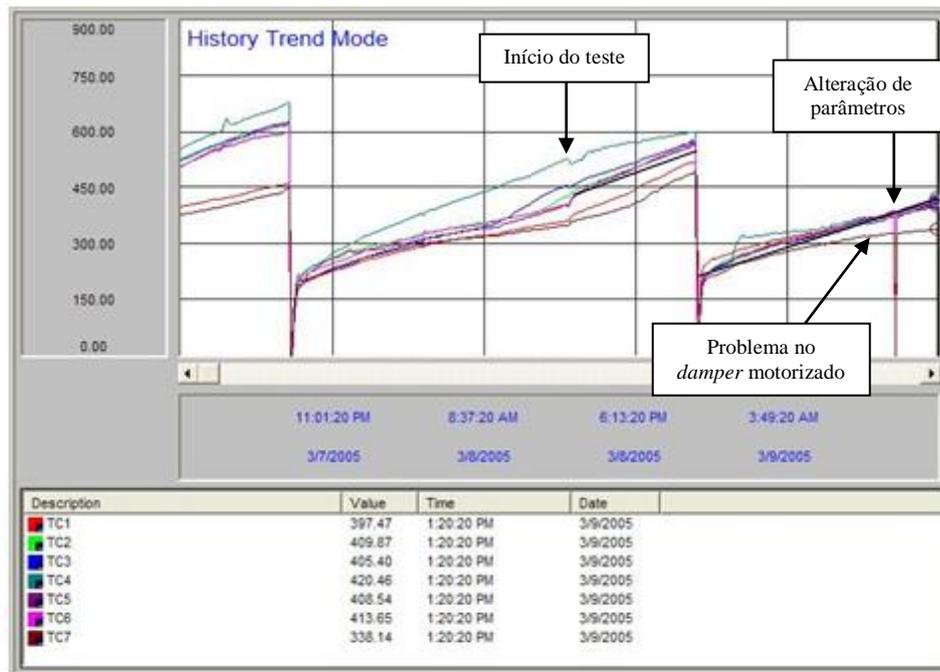


Figura 5.1 - Gráfico de temperatura de câmaras

Após a implantação do sistema proposto, foi observado um aumento dos níveis de opacidade com valores oscilando de 4% a 90% conforme visualizado na Figura 5.2.

Esta oscilação e aumento dos níveis de opacidade foram observados com mais frequência nas seguintes situações:

- 1) Quantidade de pulsos superior a 120 pulsos por minuto;
- 2) Após partida de unidades de combustão na área de fogo forçado, quando a temperatura de câmara é baixa (abaixo de 850°C) e o sistema de controle disponibiliza 50/30 ppm para recuperação de temperaturas;
- 3) Em alguns casos a pressão máxima de 27 mmH₂O é insuficiente para retirar todos os gases resultantes da queima de combustíveis.

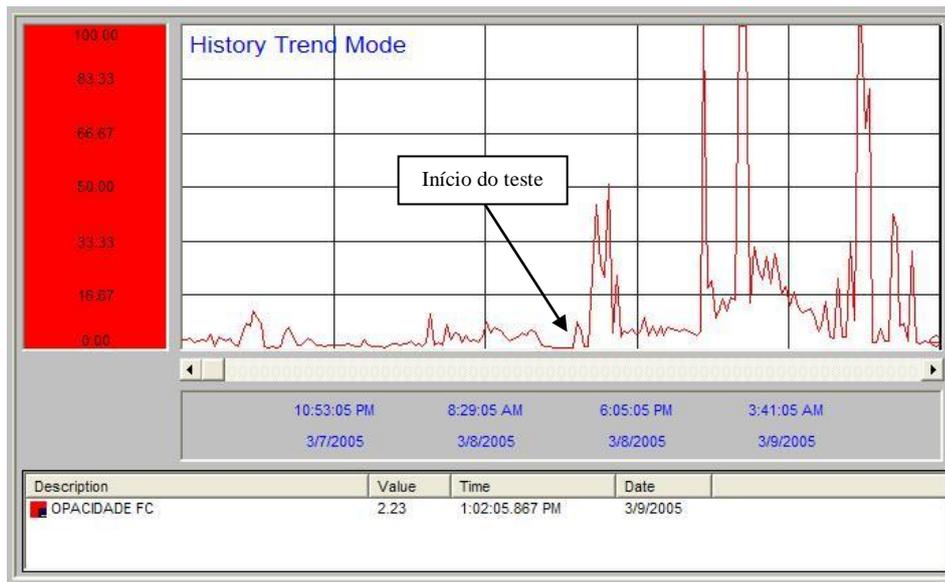


Figura 5.2 - Gráfico de opacidade no início do teste

Para reduzir o nível de opacidade os seguintes parâmetros foram alterados:

- 1) Variável “consumo de combustível” Alto [95 130 Inf];
- 2) Variável “erro de temperatura” Baixa [-Inf -40 0];
- 3) Variável “pressão de tiragem” Alta [32];
- 4) Variável “pressão de tiragem” Média [21];
- 5) Variável “pressão de tiragem” Baixa [10].

Com objetivo de reduzir a quantidade de óleo consumido após a partida de unidades, foi implementado um limitador de 30/18 pulsos por minuto para câmaras com temperaturas abaixo de 870°C. Isso foi necessário para evitar que grande quantidade de óleo combustível fosse injetado em uma câmara com temperatura baixa ou pouco oxigênio para queima, evitando assim, elevação do nível de opacidade pela má combustão.

As alterações nos parâmetros ainda não foram suficientes para diminuir as oscilações de opacidade conforme visto na Figura 5.3. Foi observado que oscilações rápidas no nível de opacidade do forno, ocasionam altas oscilações na variável de saída do sistema

fuzzy. Para estabilizar a leitura de opacidade e fazer com que o sistema responda à oscilação de opacidade mais suavemente, foi implementado um filtro na leitura de opacidade somente para valores abaixo da última leitura realizada, de modo que a queda do nível de opacidade ocorra de forma suave.

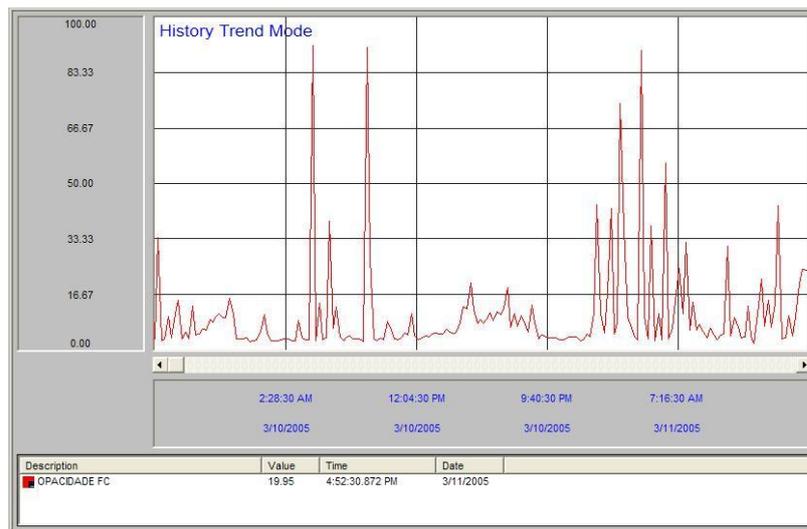


Figura 5.3 - Gráfico de opacidade durante o teste

Uma nova alteração na variável de entrada “opacidade” foi necessária conforme parâmetros a seguir:

- 1) Variável “opacidade” Normal $[-\text{Inf } 0 \ 2]$;
- 2) Variável “opacidade” Alta $[2 \ 22 \ \text{Inf}]$;

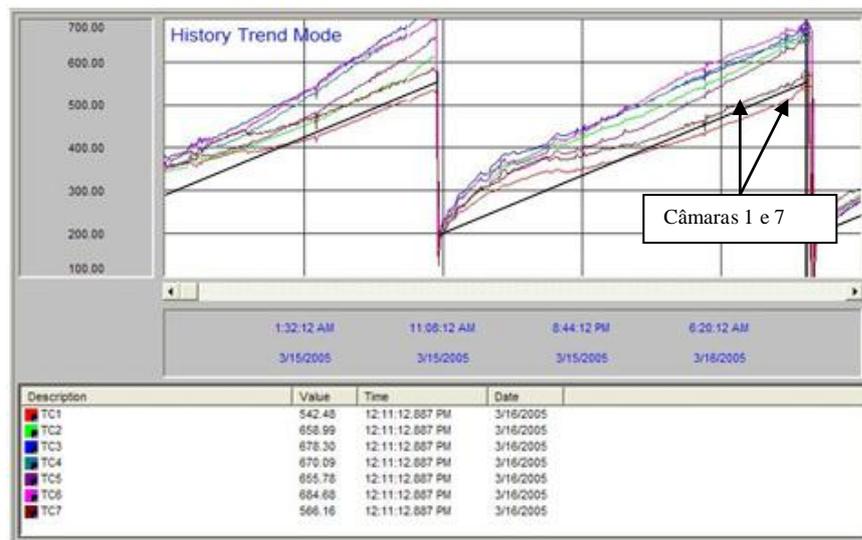


Figura 5.4 - Gráfico de elevação de temperatura destacando câmaras externas

Conforme observado na Figura 5.4, as câmaras externas 1 e 7 ficam mais próximas do valor de referência de temperatura enquanto as câmaras centrais 2,3,4,5 e 6 sobem além do valor de referência, sem que o sistema consiga reduzir a elevação, o que caracteriza “fogo adiantado” que além de elevar a temperatura da câmara favorece a formação de voláteis em áreas mais frias ocasionando variação na opacidade. A operação foi então, orientada a trabalhar para conter o avanço do fogo.

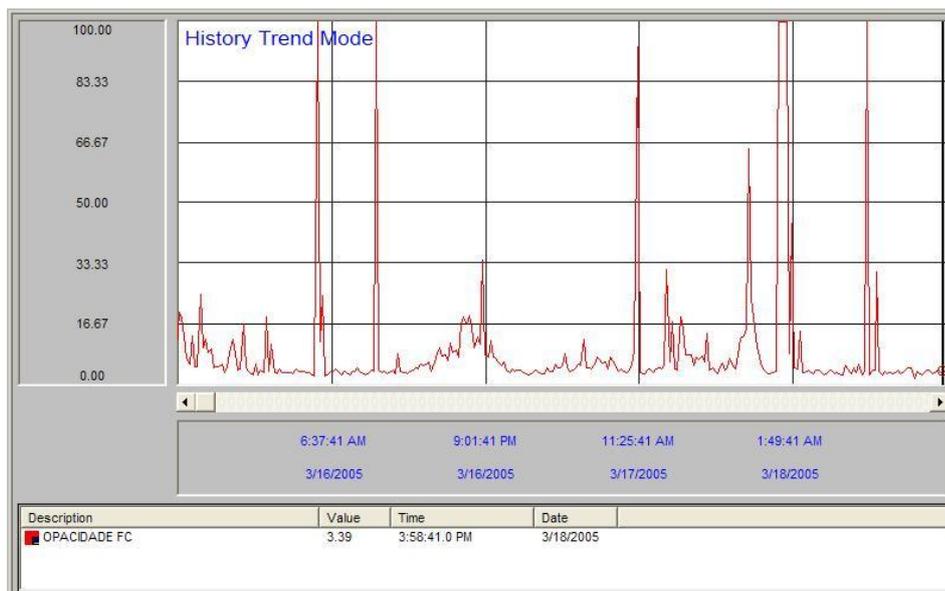


Figura 5.5 - Gráfico de opacidade com níveis não satisfatórios

Após as ações operacionais e alterações nos parâmetros realizadas, foi observado uma melhoria nos níveis de opacidade do forno, mas ainda não satisfatórias conforme visto na Figura 5.5.

Foi então identificado pela operação que o *damper 5* do *manifold* do fogo 1 estava com problema mecânico, ocasionando oscilação no índice de opacidade e por consequência no controle de todos os *manifolds* do forno. Foi solicitado seu reparo à equipe de manutenção que, depois de realizada, foi possível observar que os níveis de opacidade diminuíram a índices considerados normais de operação conforme visto na Figura 5.6.

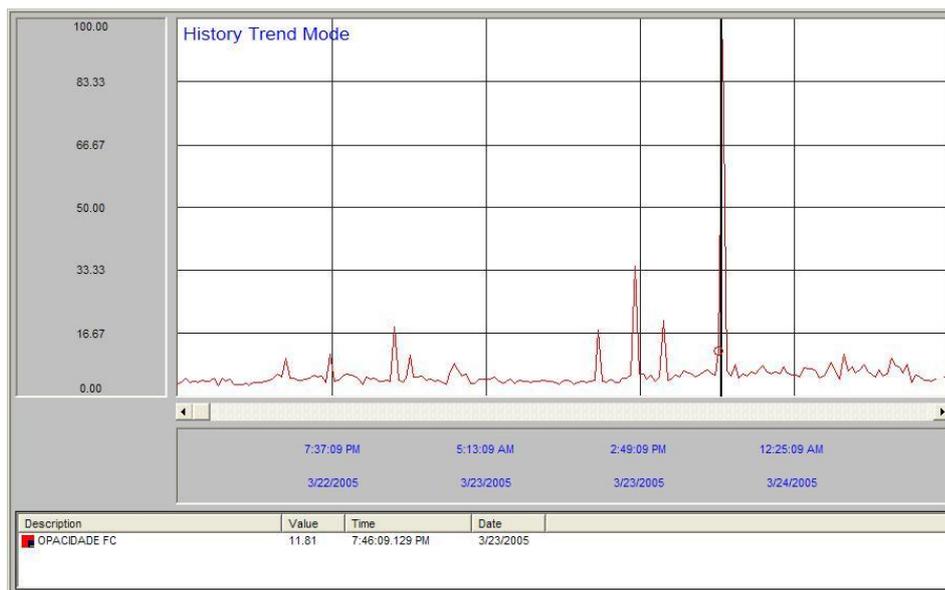


Figura 5.6 - Gráfico de opacidade com níveis normais durante o processo



Figura 5.7 - Gráfico de elevação de temperaturas próximas ao valor de referência

A opacidade do forno C se manteve em níveis normais de operação. Porém as temperaturas das câmaras centrais (2,3,4 e 6), apesar da elevação ter sido reduzida, continuaram subindo além do valor de referência, conforme ilustrado na Figura 5.7. Foi então realizada uma reunião com técnicos e operadores de processo para analisar novamente as regras de controle e parâmetros para tentar reduzir o avanço do fogo. As seguintes alterações foram realizadas:

- 1) Variável “total de pulsos” Baixo [-Inf 60 95];
- 2) Variável “total de pulsos” Médio [60 110 160];
- 3) Variável “total de pulsos” Médio [110 160 Inf];
- 4) Variável “pressão de tiragem” Baixa [8];
- 5) Variável “pressão de tiragem” Média [19];
- 6) Regra 3: Se “erro de temperatura” é Normal e “total de pulsos” é Baixo e “opacidade” é Alta, Então “pressão de tiragem” é Média.

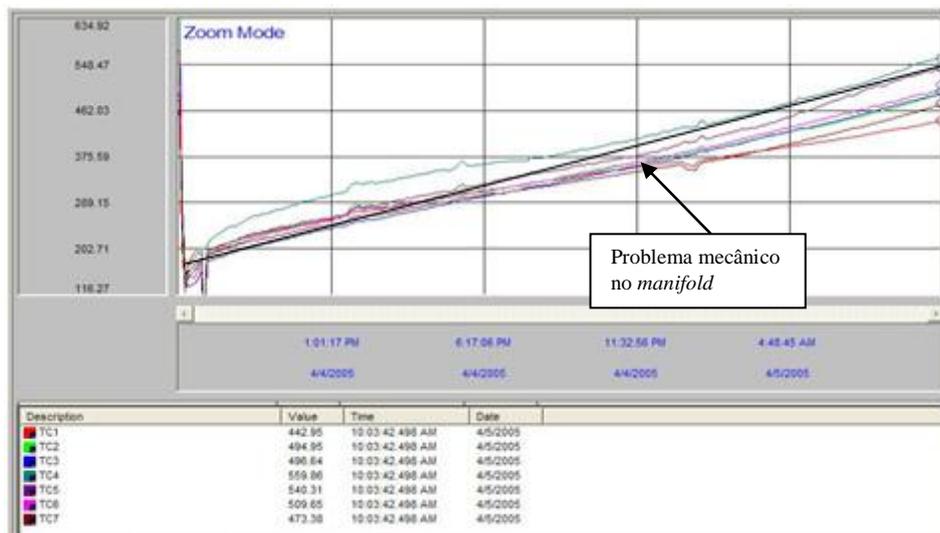


Figura 5.8 - Gráfico de elevação de temperaturas com ocorrência de problema mecânico

O perfil de elevação das temperaturas, em geral, melhorou bastante. O avanço dos fogos foi reduzido e as temperaturas finais de pré-aquecimento estão mais próximas do valor de referência, apesar de ainda ocorrerem problemas mecânicos nos *manifold* que prejudicam o controle como visto na Figura 5.8.

Devido o fato de se utilizar um único instrumento de medição de opacidade para corrigir os três fogos de um mesmo forno, quando ocorre um desvio de opacidade, os três fogos são regulados para tentar corrigir a opacidade que na maioria das vezes é causada por um só fogo. Foi então alterada a estratégia de tratamento de opacidade para tentar corrigir a opacidade atuando em um fogo de cada vez, até descobrir qual o fogo que esta causando a opacidade alta e continuar a atuar somente neste fogo.

As temperaturas das câmaras internas ainda tendem a subir além do valor de referência. Para tentar corrigir, foi feita uma alteração na variável de saída “pressão de tiragem”, para que tenha dois conjuntos de funções de pertinência. Um conjunto para câmaras externas 1 e 7, e outro conjunto para câmaras internas 2,3,4,5 e 6, devido o fato de que as

câmaras externas 1 e 7 serem as extremidades do forno e por esse motivo tendem ser as mais frias. Assim a variável de saída possui os seguintes parâmetros:

- 1) Câmaras externas 1 e 7
 - a. Variável “pressão de tiragem” Baixa [10];
 - b. Variável “pressão de tiragem” Média [19];
 - c. Variável “pressão de tiragem” Alta [32];
- 2) Câmaras internas 2,3,4,5 e 6
 - a. Variável “pressão de tiragem” Baixa [10];
 - b. Variável “pressão de tiragem” Média [17];
 - c. Variável “pressão de tiragem” Alta [26].

Houve um melhora significativa na estabilidade de pressão dos fogos com a última alteração, com desempenho de controle considerado satisfatório pela operação conforme visto na Figura 5.9. Foi então autorizado pela direção da empresa que o sistema de controle fuzzy para área de pré-aquecimento de fornos de cozimento de anodos seja implantado nos demais fornos da empresa.

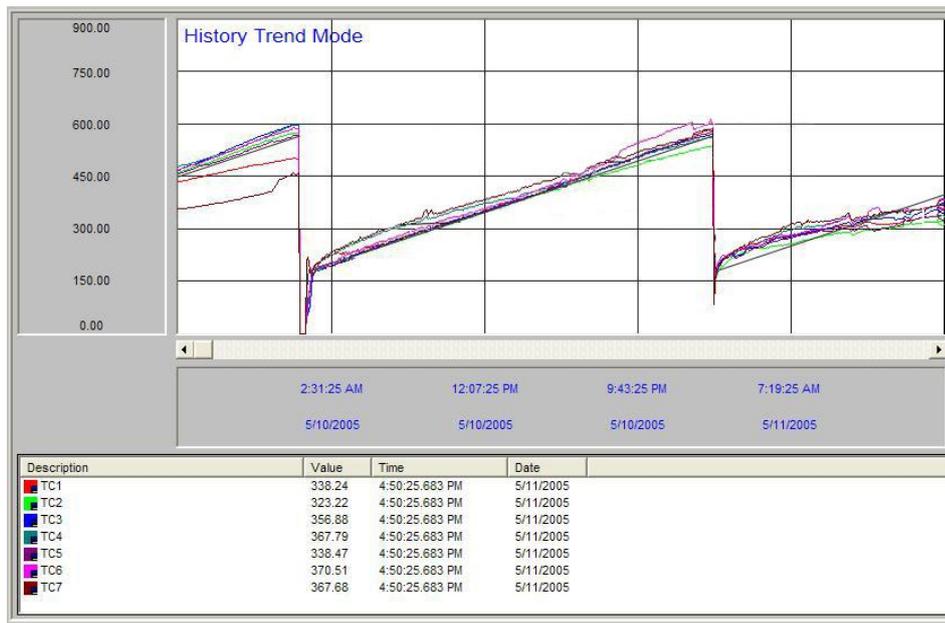


Figura 5.9 - Gráfico de elevação de temperatura após sistema *fuzzy* implantado

5.3 RESULTADOS

Após 90 dias de testes e ajuste de parâmetros do controlador *fuzzy*, os primeiros resultados puderam ser analisados. Os problemas do sistema de controle de pré-aquecimento de fornos de cozimento de anodos anterior à implantação do sistema *fuzzy*, citados no item 2.6 desta dissertação, foram comparados com os resultados apresentados pelo novo sistema, conforme descrito a seguir.

5.3.1 Redução da diferença de temperatura entre câmaras de combustão

No sistema anterior, o calor produzido pela queima do óleo combustível na área de fogo forçado é conduzido pelo corredor de câmaras de combustão, através do sistema de exaustão, para a área de pré-aquecimento de maneira não uniforme entre as câmaras de

combustão adjacentes, pois não existe um valor de referência de temperatura, gerando perfil de temperaturas indesejado no processo como visto a Figura 5.10.

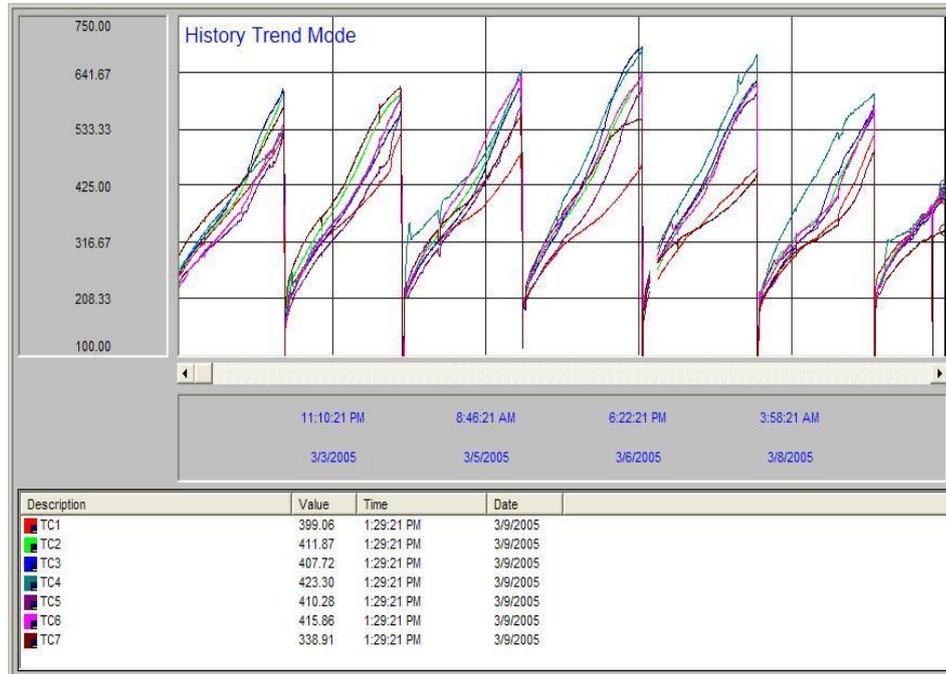


Figura 5.10 - Gráfico de elevação de temperaturas do sistema anterior

O sistema *fuzzy* implantado estabeleceu um valor de referência de temperatura de câmara de combustão como alvo a ser buscado. Isso fez com que as temperaturas de câmaras tendessem a convergir para a temperatura de referência, conforme ilustrado na Figura 5.11, minimizando as taxas de elevação de temperatura diferentes entre as câmaras adjacentes, garantindo ao anodo enornado, um perfil térmico mais uniforme.

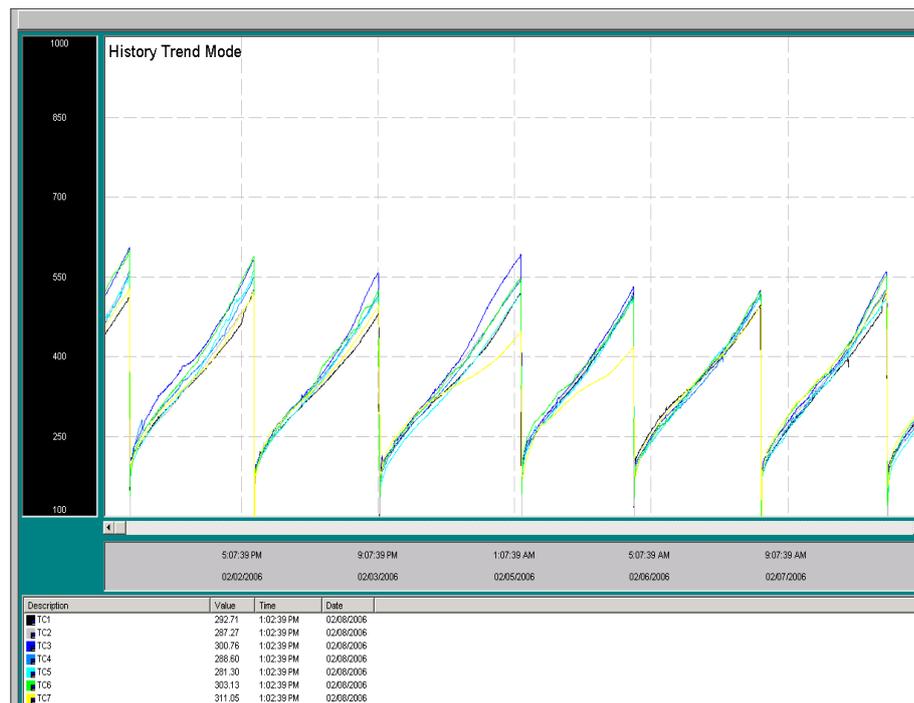


Figura 5.11 - Gráfico de elevação de temperaturas do sistema *fuzzy*

5.3.2 Redução do índice de temperatura de partida baixa da etapa de fogo forçado

A falta de um valor de referência de temperatura de câmaras de combustão para área de pré-aquecimento, faz com que a diferença de temperatura entre câmaras de combustão adjacentes seja grande, com temperaturas altas em algumas câmaras e muito baixas em outras. O impacto das temperaturas baixas na área de pré-aquecimento será refletido na partida da primeira unidade de controle de injeção de óleo combustível na área de fogo forçado, causando um aumento de consumo de combustível utilizado para recuperar a temperatura baixa.

A Figura 5.12 mostra que, no sistema antigo, numa amostragem de 10500 temperaturas de partidas de unidades de combustão na área de fogo forçado, 15,05% das temperaturas não atingem a temperatura ideal de partida de 770°C. Após a implantação do

sistema fuzzy, numa amostragem de 1442 temperaturas de partidas de unidades de combustão na área de fogo forçado, apenas 3,05% das temperaturas não atingem a temperatura ideal de partida de 770°C, como ilustrado na Figura 5.13. Isso significa menos óleo combustível consumido para recuperar temperatura baixa.

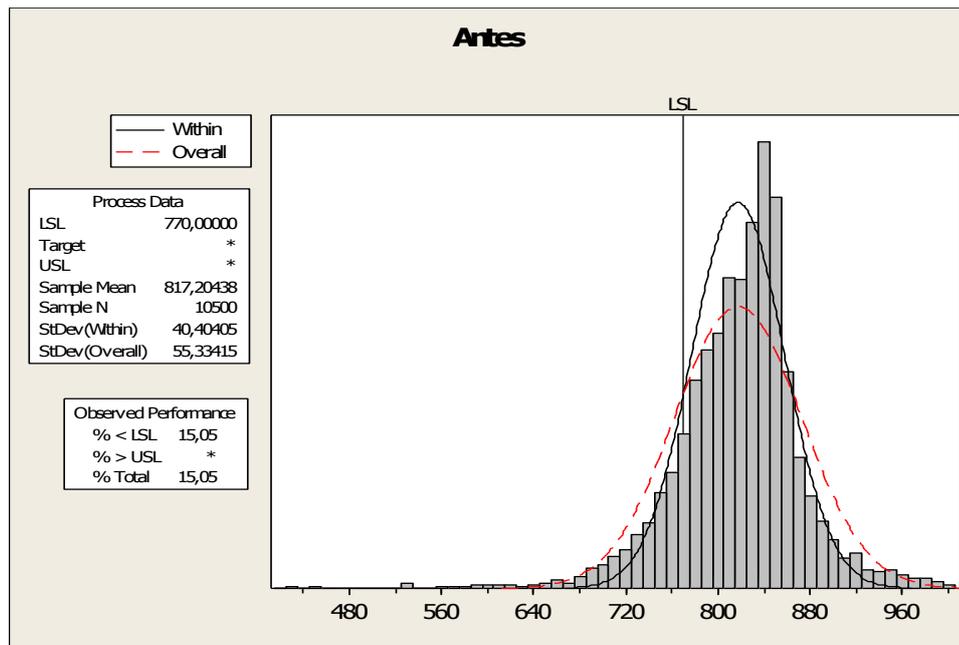


Figura 5.12 - Histograma de temperaturas de partida de unidades de combustão antes

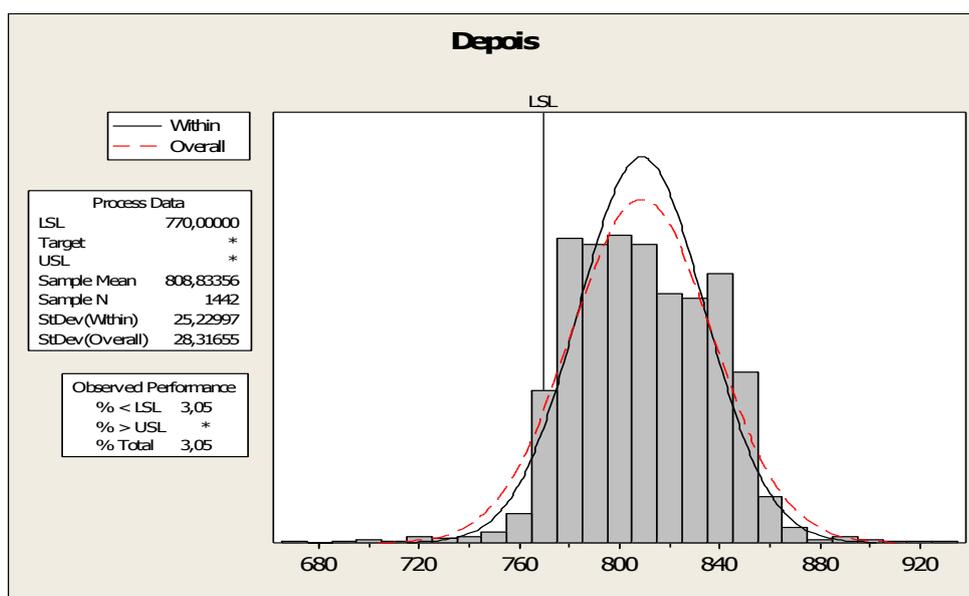


Figura 5.13 - Histograma de temperaturas de partida de unidades de combustão depois

5.3.3 Melhoria na qualidade dos anodos produzidos

Uma das etapas mais críticas no processo de cozimento de anodos é a de pré-aquecimento. É nesta etapa que podem ocorrer trincas nos anodos enfiados devido ao alto gradiente de elevação de temperatura. As altas diferenças de temperaturas entre câmaras da área de pré-aquecimento, observadas na Figura 5.14, indicam que os anodos enfiados estão recebendo quantidades de calor diferentes em suas superfícies superior e inferior, podendo provocar com isso, trincas nos anodos comprometendo a qualidade dos mesmos.

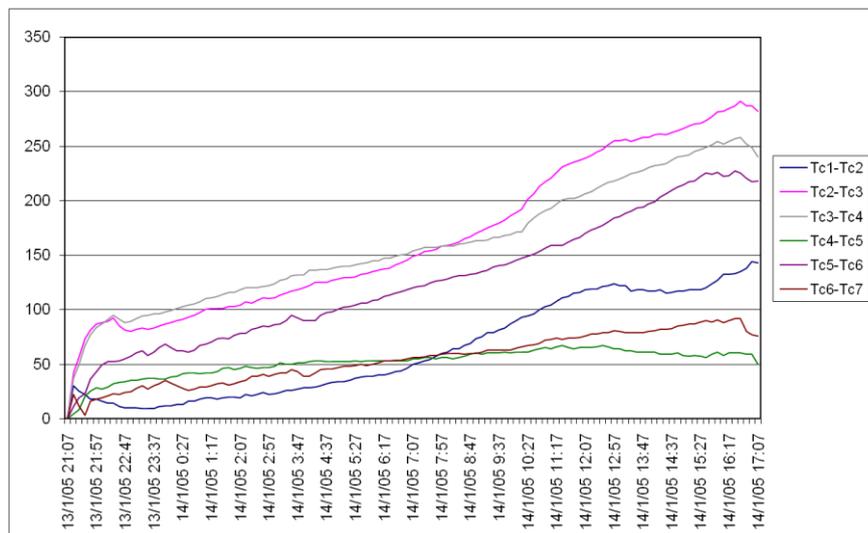


Figura 5.14 - Diferença de temperatura entre câmaras no sistema anterior

A Figura 5.15, mostra que, após a implantação do novo sistema *fuzzy*, as temperaturas de câmaras de combustão da área de pré-aquecimento estão mais uniformes, diminuindo a diferença de temperatura entre as superfícies dos anodos enfiados e minimizando a possibilidade de ocorrência de trincas nos mesmos, garantindo que a volatilização do piche encontrado nos anodos ocorra no mesmo momento para todos os anodos da mesma seção.

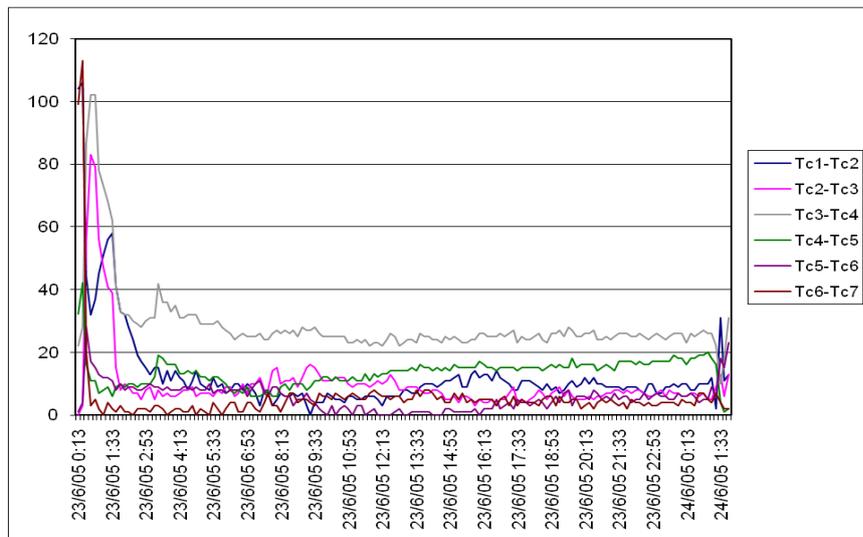


Figura 5.15 - Diferença de temperatura entre câmaras no sistema *fuzzy*

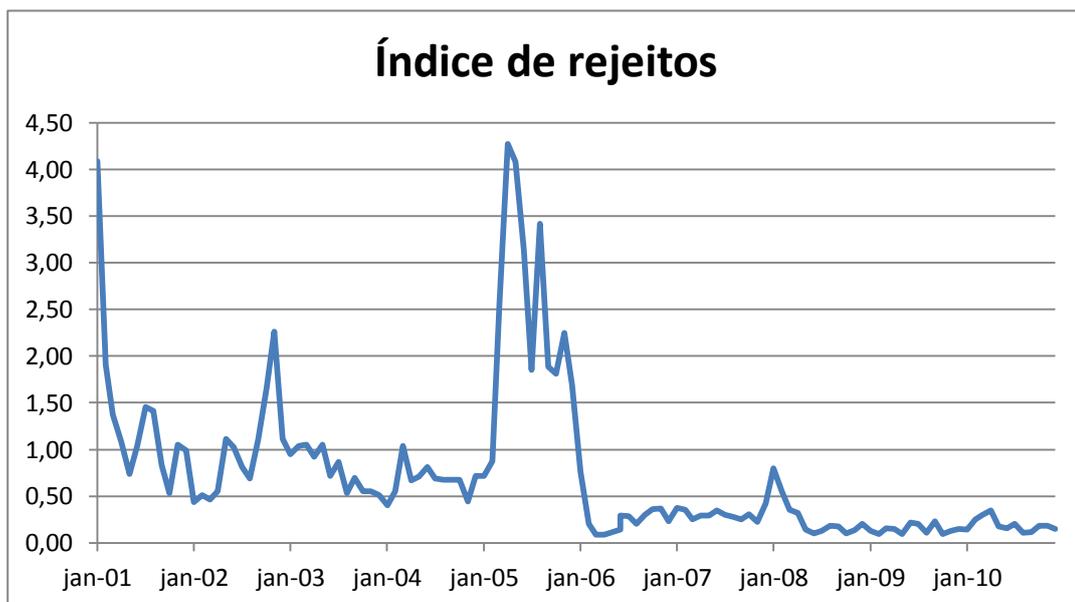


Figura 5.16 - Gráfico do índice de rejeitos

O benefício do melhor controle das temperaturas de pré-aquecimento, se refletiu na redução do índice de rejeitos de anodos fabricados no processo de cozimento. A Figura 5.16 mostra a redução do índice de rejeitos, não considerando os dados do ano de 2005, onde houve aumento considerável do índice de rejeitos devido a problemas na especificação da

matéria prima usada na fabricação dos anodos. Entre fevereiro de 2001 e fevereiro de 2005, a média do índice de rejeitos foi de 0,88% e após a implantação do sistema *fuzzy*, entre janeiro de 2006 e dezembro de 2010, essa média caiu para 0,24%. Isso representa uma redução de 72,72% no índice de rejeitos do anodos produzidos neste processo.

5.3.4 Redução da poluição

No processo de fornos de cozimento de anodos, o evento que mais influência na emissão de poluição para atmosfera é o momento da volatilização e queima do piche encontrado no interior dos anodos. É um momento em que as câmaras de combustão necessitam de mais oxigênio para a total queima dos voláteis.

No sistema anterior, a regulagem da pressão no interior do corredor de câmaras de combustão, era baseada apenas na quantidade de óleo combustível sendo injetado em cada corredor de câmaras. Se no momento em que esta ocorrendo a queima de piche na área de pré-aquecimento, o total de combustível injetado na área de fogo forçado for baixo, o sistema de controle de tiragem reduzia a quantidade de oxigênio no corredor de câmaras o que provocava baixa eficiência na queima do piche devido a falta de oxigênio gerando a poluição indesejada, conforme observado na Figura 5.17.

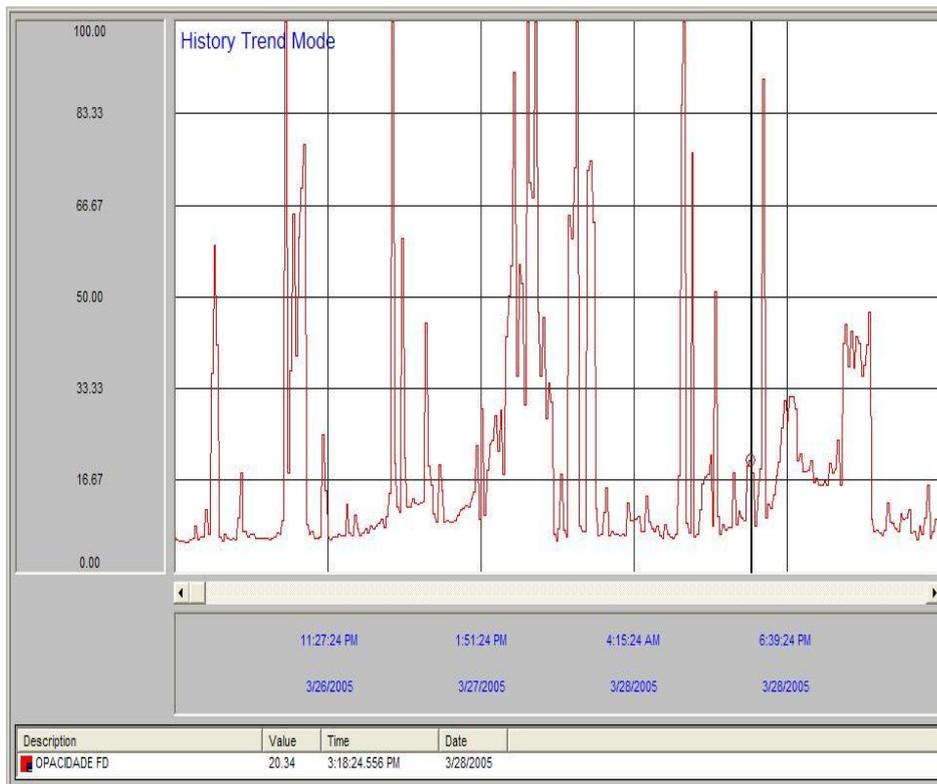


Figura 5.17 - Gráfico de opacidade do sistema anterior

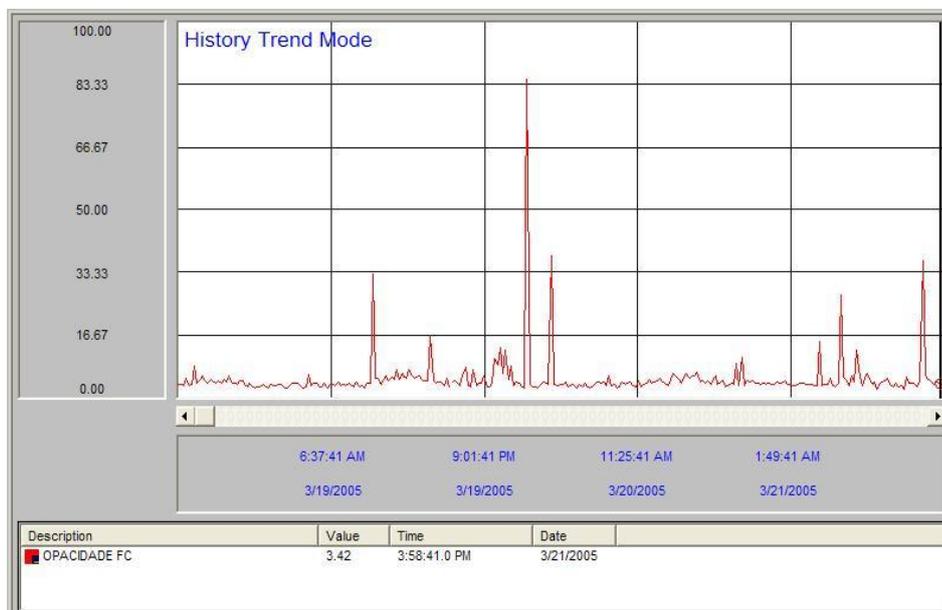


Figura 5.18 - Gráfico de opacidade do sistema *fuzzy*

No sistema *fuzzy* implantado, com a monitoração da variável opacidade, é possível identificar baixo nível de oxigênio para queima de combustíveis pelo nível de opacidade medido, e assim corrigir a pressão interna das câmaras de combustão para injetar mais oxigênio. O resultado podemos observar na Figura 5.18. Sempre que o nível de opacidade sobe, o sistema *fuzzy* corrige a pressão interna das câmaras de combustão e a opacidade é reduzida, evitando poluição do meio ambiente.

5.3.5 Economia de combustível

Após a implantação do sistema de controle *fuzzy*, foi possível observar uma economia no consumo de óleo combustível significativo no processo de cozimento de anodos.

A média de pulsos de injeção de combustível por seção do forno C de Janeiro a Março de 2005, período de 3 meses anteriores à implantação era de 119070 pulsos. Após a implantação do sistema *fuzzy*, a média de pulsos de injeção de combustível por seção do forno C de Abril a Junho de 2005, o mesmo período de 3 meses depois da implantação, caiu para 104161 pulsos.

Essa queda na quantidade e pulsos de injeção de combustível refletiu no consumo de óleo combustível. O consumo médio de combustível do forno C nos 3 meses, de Janeiro a Março de 2005, foi de 431,81 Ton/Mês. E após a implantação do sistema *fuzzy*, o consumo médio de combustível do forno C nos 3 meses, de Abril a Junho de 2005, foi de 377,75 Ton/Mês, uma redução de 54,06 Ton/Mês. Com preço médio da Tonelada de óleo combustível de Janeiro a Março de 2005, de US\$212,4/Ton, a economia obtida com a implantação do sistema *fuzzy* para o forno C foi de US\$11482,34 /Mês ou US\$137788,12 /Ano. Como o forno C é formado por 3 fogos, a economia por fogo foi de US\$3827,45 /Mês

ou US\$45929,36 /Ano. Tendo a Albras um total de 11 fogos em todos seus fornos, a economia passa a ser US\$42101,95 /Mês ou US\$505223,40 /Ano.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de controle, baseado em lógica *fuzzy*, para determinação da pressão interna ideal de câmaras de combustão na área de pré-aquecimento de fornos de cozimento de anodos, para garantir os níveis de opacidade da fumaça resultante da queima de combustíveis dentro dos níveis permitidos pela legislação. Buscou-se ainda, reduzir o consumo de combustível utilizado para aquecer as câmaras de combustão e regular o grau de elevação das temperaturas destas câmaras para minimizar os efeitos negativos de altas diferenças de temperaturas entre câmaras adjacentes da área de pré-aquecimento de anodos.

A complexidade e grande quantidade de variáveis envolvidas no sistema de exaustão de fornos de cozimento, tornou o uso da lógica *fuzzy* uma alternativa viável, pois emprega o conhecimento de especialistas por meio de variáveis linguísticas e ser tolerante a dados imprecisos.

Tendo como uma das premissas de implementação da solução, o não comprometimento de performance e recursos dos controladores existentes, o modelo *fuzzy* de Mamdani foi aplicado neste trabalho usando como consequente das regras, conjuntos *fuzzy* singletons. A resposta numérica do sistema é obtida diretamente pela média ponderada desses valores, simplificando a implementação com menor esforço computacional. A definição das variáveis de entrada com apenas 3 funções de pertinência e 9 regras de inferência foram suficientes para representar o comportamento do processo e obter respostas consideradas satisfatórias pela equipe de operação dos fornos, e não comprometeram a performance dos sistemas.

Os níveis de opacidade das emissões dos fornos de cozimento da ALBRAS devem ser constantemente monitorados e controlados para atender aos níveis estabelecidos pela Secretaria de Meio Ambiente, que é de no máximo 20% na escala Ringelmann. Antes da implantação do sistema *fuzzy*, a tarefa de monitorar e manter o nível de opacidade dentro do limite, era exercida pelo operador do forno, o que demandava horas de trabalho. O sistema implementado se mostrou capaz de reduzir e manter os níveis de opacidade abaixo do limite tolerado pela Secretaria de Meio Ambiente de forma automática, reduzindo o gasto de homem / hora necessário para monitorar e controlar a opacidade.

Devido ao fato do forno passar a operar com uma pressão interna menor após a implantação do sistema *fuzzy*, a entrada de ar frio no forno foi reduzida, e isso contribuiu para que a temperatura interna se mantivesse sem necessidade de mais combustível para recuperar temperaturas baixas. Isso se refletiu em redução no consumo de combustível de aproximadamente 12% ao mês.

Outro fator que contribuiu para a economia no consumo de combustível foi o nível de temperatura mais alto no momento da partida da unidade de combustão na área de fogo forçado, proporcionado pelo melhor controle da elevação e uniformidade da temperatura na área de pré-aquecimento. Essa temperatura mais alta e baixa diferença entre temperaturas adjacentes de uma mesma seção, evita que seja injetado mais combustível para recuperar uma temperatura baixa.

Outro benefício observado com a implantação do sistema, foi a redução do risco de explosão nos dutos do forno. O controle da elevação da temperatura na área de pré-aquecimento garante a queima total dos voláteis do piche, evitando que o mesmo condense nas paredes dos dutos formando alcatrão, que em contato com eventuais fagulhas, explodem.

Uma dificuldade observada durante os testes realizados, foi que problemas mecânicos, como *dampers* travados, comprometiam os resultados, por esse motivo, é muito importante que a equipe mantenha os equipamentos em perfeito funcionamento, para o bom funcionamento da solução implementada. Porém, foi observado também que, mesmo com instrumentos com pouca de precisão ou pequena descalibração, o sistema *fuzzy* continuou a controlar o processo de forma satisfatória, comprovando a robustez da solução implementada.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o modelo proposto pode ser usado como uma alternativa aos métodos tradicionais de controle de exaustão de fornos de cozimento.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros podemos destacar as seguintes sugestões:

- 1) O controle da exaustão dos fornos de cozimento utilizando a medição da opacidade do forno como uma das variáveis de entrada do sistema *fuzzy* proposto, se mostrou eficiente em manter a opacidade em níveis aceitáveis. Porém existe apenas um opacímetro para cada três fogos de um forno, o que torna a tarefa de correção da opacidade mais difícil para o sistema, pois é necessário primeiro identificar o fogo que está gerando a opacidade e então corrigi-lo. A existência de grande quantidade de dados de variáveis de processo armazenadas em base de dados ao longo dos anos pode ser suficiente para identificar o comportamento da opacidade dos fogos e assim construir um medidor de opacidade virtual para cada fogo, eliminando a necessidade de se adquirir um instrumento por fogo.
- 2) O sistema *fuzzy* proposto foi projetado, testado e sintonizado nas seções internas dos fornos, ou seja, numa sequência de seções em linha reta. Nas áreas onde o forno faz a curva, conhecida como “*Crossover*”, a seção tem uma configuração de câmaras diferentes, onde as câmaras 1 e 2 se juntam para formar uma só câmara, as seções 3, 4 e 5 se juntam para formar outra câmara e as seções 6 e 7 também se juntam para formarem uma só câmara, durante a curva. Após a curva, as câmaras retornam à configuração normal. O ideal é que, as áreas de curva, tenham outros parâmetros de funções de pertinência de entrada e saída e outras regras de inferência.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A. (1985). *MANUAL DE INSTRUÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO DA ALBRAS*. Barcarena: ALBRAS.
- ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A. (2001). *SISTEMA DE CONTROLE DE COZIMENTO DE ANODOS: DESCRIÇÃO FUNCIONAL*. Barcarena.
- ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A. (2001). *SISTEMA DE CONTROLE DE COZIMENTO DE ANODOS: MANUAL DE SOFTWARE*. Barcarena.
- ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A. (2005). *CURSO DE CAPACITAÇÃO DE OPERADORES DA ÁREA DE CARBONO*. Barcarena: ALBRAS.
- ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A. (2008). *A HISTÓRIA DA ALBRAS*. Barcarena: Stilgraf.
- ALBRAS-Alumínio Brasileiro S.A. (2009). *Informações Institucionais*. Acesso em 2010, disponível em www.albras.net: www.albras.net
- Carr, D., & Shearer, J. (2007). *NONLINEAR CONTROL AND DECISION MAKING USING FUZZY LOGIC IN LOGIX*. Milwaukee: Rockwell Automation, Inc.
- Ibrahim, A. M. (2003). *FUZZY LOGIC FOR EMBEDDED SYSTEMS APPLICATIONS*. Burlington: Elsevier Science.
- ICONICS,INC. (2000). *CONTROLWORX32: A COMPREHENSIVE TUTORIAL*. Fozborough: ICONICS,INC.
- Innovatherm. (2001). *ADVANCED FIRING AND CONTROLE SYSTEM FOR ANODE BAKING FURNANCES. DATASHEET*.
- Jantzen, J. (2007). *FOUNDATIONS OF FUZZY CONTROL*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- King, R. E. (1999). *COMPUTATIONAL INTELLIGENCE IN CONTROL ENGINEERING*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Leisenberg, W., & Maiwald, D. (2006). *The Continuous Monitoring of the Condition of Flues in Open and Closed Pit Anode Baking Furnaces*. Butzbach, Germany.
- Lewis, R. W. (1997). *PROGRAMMING INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS USING IEC 1131-3*. London: The Institution of Electrical Engineers.
- Raitamäki, J. (2003). *AN APPROACH TO LINGUISTIC PATTERN RECOGNITION USING FUZZY SYSTEMS*. Jyväskylä: University Library of Jyväskylä.

Shaw, I. S., & Simões, M. G. (1999). *CONTROLE E MODELAGEM FUZZY*. São Paulo: Edgard Blücher.

Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). FUZZY IDENTIFICATION OF SYSTEMS AND ITS APPLICATIONS TO MODELLING AND CONTROL. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 15:116-132.

The MathWorks, Inc. (1999). *FUZZY LOGIC TOOLBOX USER'S GUIDE*. Natick: The MathWorks, Inc.

Zadeh, L. (1965). *Fuzzy Sets*. Berkeley, California: Information and Control.

Zadeh, L. (1973). *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*.

Zimmermann, H. J. (1992). *FUZZY SET THEORY AND ITS APPLICATIONS*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.