



## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE PARA DETERMINAÇÃO DE SET POINT NO CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL DA ALUMINA**

**Hugo Pedro de Sousa Valente da Costa**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Carlos Tavares da Costa Junior

Belém  
Abril de 2015

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE PARA  
DETERMINAÇÃO DE SET POINT NO CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL  
DA ALUMINA**

Hugo Pedro de Sousa Valente da Costa

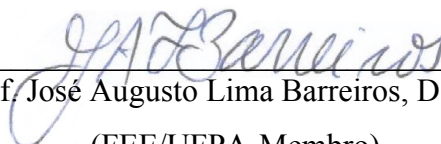
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



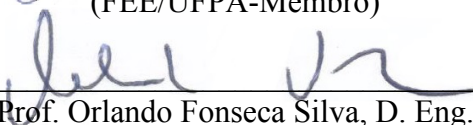
(PPGEP/UFPA-Orientador)

Prof. Carlos Tavares da Costa Júnior, Dr. Ing.



Prof. José Augusto Lima Barreiros, D. Eng.

(FEE/UFPA-Membro)



Prof. Orlando Fonseca Silva, D. Eng.

(FEE/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

ABRIL DE 2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

---

Costa, Hugo Pedro de Sousa Valente da  
Desenvolvimento de um sistema inteligente para  
determinação de Set Point no controle da área superficial  
da alumina /Hugo Pedro de Sousa Valente da Costa.- 2015.

Orientador: Carlos Tavares da Costa Junior;

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade  
Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2015

1.Sistemas Fuzzy 2. Controle de processo 3. Óxido  
de alumínio I. Título

CDD 22.ed. 511.313

---

*Este trabalho é dedicado aos amigos e colegas que sempre apoiaram, incentivaram e de alguma forma contribuíram para a elaboração do mesmo. Em particular à minha esposa pelo incentivo e perseverança.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família por terem compreendido a minha falta de tempo para com eles.

Ao professor e orientador Dr. Carlos Tavares da Costa Junior que não mediu esforços durante o período de orientação, para que esse trabalho fosse concluído.

Aos demais professores do Curso de Mestrado pelos conhecimentos repassados contribuindo e nos preparando para mais uma tarefa profissional.

Ao doutorando Renan Landau pelo apoio na criação dos programas em MATLAB® e pela orientação e interpretação dos resultados ao longo do trabalho.

À Hydro – Alunorte que através do programa de mestrado profissionalizante ofereceu oportunidade de voltar a estudar e a incrementar meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M.Eng.)

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTELIGENTE PARA  
DETERMINAÇÃO DE SET POINT NO CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL  
DA ALUMINA**

**Hugo Pedro de Sousa Valente da Costa**

Abril/2015

Orientador: Carlos Tavares da Costa Junior

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Mediante as novas exigências do mercado consumidor, tornou-se necessário que as mudanças nos processos produtivos nas indústrias sejam rápidas o bastante para não perderem mercado consumidor, e sistemático, a fim de minimizar os impactos causados pelas mudanças na qualidade do produto final oferecido ao cliente. Neste sentido, este trabalho investiga a implementação de um sistema fuzzy em um ambiente simulado para o controle da área superficial da alumina. A escolha da metodologia fuzzy deu-se devido a sua capacidade de resolver diversos tipos de problemas em várias aplicações de engenharia, em especial nos relacionados ao controle de processos. O raciocínio aproximado da lógica fuzzy fornece uma maneira de compreender o comportamento do sistema, a partir de experiências vividas por pessoas que estão diretamente envolvidas nas operações de chão de fábrica, permitindo a interpolação aproximada entre situações observadas. Primeiramente, são discutidos os impactos que a variável área superficial acarreta no processo produtivo da alumina e como a escolha dos set points de temperatura e pressão pode influenciar no controle da área superficial. Em seguida, são analisados quais variáveis de processo podem ser utilizadas como parâmetros para serem as entradas do sistema e como esse controle é feito atualmente. O próximo passo foi a criação de uma base de regras a partir da experiência dos engenheiros e especialistas de processo. Feito isso, foi criado um sistema fuzzy utilizando o software Matlab®, para proposição dos set points da temperatura e pressão. Com o intuito de melhorar a assertividade da base de regra criada, algumas regras foram ajustadas pela técnica look up table sendo utilizada base de dados coletados no período de Janeiro a Dezembro de 2014. As comparações dos resultados obtidos por simulação confirmam o bom desempenho do sistema desenvolvido.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

## **DEVELOPMENT OF A SMART SYSTEM FOR DETERMINATION OF SET POINT IN THE CONTROL OF ALUMINA SPECIFIC SURFACE AREA**

**Hugo Pedro de Sousa Valente da Costa**

April/2015

Advisor: Carlos Tavares da Costa Junior

Research Area: Process Engineering

By the new requirements of the consumer market, it became necessary that the changes in the production processes in the industries are quick enough to avoid losing consumer market, and systematic in order to minimize the impacts caused by changes in the quality of the final product offered to the customer. Thus, this study investigates the implementation of a fuzzy system in a simulated environment to control the surface area of the alumina. The choice of methodology has become fuzzy due to its ability to solve various kinds of problems in various engineering applications, in particular related to the control process. The approximate reasoning of fuzzy logic provides a way to understand system behavior, from experiences of people who are directly involved in plant floor operations, allowing the approximate interpolation between observed situations. First, the impacts that the surface area variable entails the production process of alumina and as the choice of temperature set points and pressure influenced the control of surface area are discussed. They are then analyzed which process variables can be used as parameters to the system inputs and how this control is currently done. The next step was to create a rule base from the experience of the engineers and process experts. Then, it created a fuzzy system using the Matlab software, for the proposition of temperature set points and pressure. In order to improve the rule base created assertiveness, some rules have been set by the technical look up table being collected database used in the period from January to December 2014. Comparisons of results obtained by simulation confirm the good performance of the system developed.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2 - TEORIA DA CALCINAÇÃO DA ALUMINA (ALCAN, 1990).....	1
1.3 - PROPRIEDADES DA ALUMINA.....	3
1.3.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS.....	3
1.3.2 - PROPRIEDADES QUÍMICAS.....	5
1.4 - ÁREA SUPERFICIAL DA ALUMINA.....	6
1.5 - IMPACTO DA ÁREA SUPERFICIAL NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA(O) ALUMINA/ALUMÍNIO.....	6
1.6 - PROBLEMÁTICA DO CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL.....	8
1.7 - MOTIVAÇÕES PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	10
1.8 - OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS.....	11
1.9 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	11
<b>CAPÍTULO 2 - CALCINAÇÃO.....</b>	<b>12</b>
2.1 - PROCESSO BAYER.....	12
2.1.1 - MOAGEM E ARMAZENAMENTO DA POLPA.....	12
2.1.2 - DIGESTÃO.....	12
2.1.3 - PRECIPITAÇÃO.....	13
2.1.4 - CALCINAÇÃO.....	14
2.2 - ESTRUTURA DO CALCINADOR.....	15
2.2.1 - PRÉ-AQUECIMENTO FASE I.....	16
2.2.2 - PRÉ AQUECIMENTO FASE II.....	17



2.2.3 - FASE DA CALCINAÇÃO.....	17
2.2.4 - RESFRIAMENTO FASE I.....	18
2.2.5 - RESFRIAMENTO FASE II.....	19
2.2.6 - RESFRIAMENTO FASE III.....	19
2.3 - CONTROLES DO CALCINADOR.....	19
2.3.1 - CONTROLE DA QUANTIDADE DE MATERIAL A SER CALCINADO.....	20
2.3.2 - CONTROLE DA PRESSÃO DA FORNALHA.....	20
2.3.3 - CONTROLE DA TEMPERATURA DA FORNALHA.....	21
<b>CAPÍTULO 3 - SISTEMAS <i>FUZZY</i>.....</b>	<b>23</b>
3.1 - INTRODUÇÃO.....	23
3.2 - CONJUNTOS <i>FUZZY</i> E FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA.....	23
3.3 - LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	24
3.4 - REGRAS <i>FUZZY</i> .....	25
3.5 - ARQUITETURAS DE UM SISTEMA <i>FUZZY</i> .....	26
3.5.1 - PROCESSADOR DE ENTRADA (FUZIFICAÇÃO).....	28
3.5.2 - MÁQUINAS DE INFERÊNCIA.....	29
3.5.3 - PROCESSADOR DE SAÍDA (DEFUZZIFICAÇÃO).....	29
<b>CAPÍTULO 4 - SISTEMA <i>FUZZY</i> PARA CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL.....</b>	<b>30</b>
4.1 - INTRODUÇÃO.....	30
4.2 - MÉTODO DE OBTENÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL.....	30
4.3 - DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA.....	31
4.4 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA <i>FUZZY</i> .....	32

4.4.1 - DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.....	32
4.4.2 - CRIAÇÃO DAS BASES DE REGRAS FUZZY.....	35
4.5 - TÉCNICA DO LOOK UP TABLE.....	35
<b>CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO DO SISTEMA FUZZY.....</b>	<b>37</b>
5.1 - INTRODUÇÃO.....	37
5.2 - ESTUDOS DE CASOS.....	38
5.2.1 - CALCINADOR ‘D’ .....	38
5.2.1.1 - UTILIZANDO REGRAS DOS ESPECIALISTAS.....	38
5.2.1.2 - UTILIZANDO REGRAS DO <i>LOOK UP TABLE</i> .....	39
5.2.2 - CALCINADOR ‘F’ .....	41
5.2.2.1 - UTILIZANDO REGRAS DOS ESPECIALISTAS.....	41
5.2.2.2 - UTILIZANDO REGRAS DO <i>LOOK UP TABLE</i> .....	42
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>44</b>
6.1 - CONCLUSÕES.....	44
6.2 - SUGESTÕES.....	44
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> - Processo de formação da alumina.....	2
<b>Figura 1.2</b> - Perda de água durante processo da formação da alumina.....	2
<b>Figura 1.3</b> - Grão de alumina.....	6
<b>Figura 1.4</b> - Comportamento da área superficial durante ano de 2014.....	8
<b>Figura 1.5</b> - Comportamento da temperatura da fornalha durante ano de 2014.....	9
<b>Figura 1.6</b> - Comportamento da pressão da fornalha durante ano de 2014.....	9
<b>Figura 1.7</b> - SSA X Alumina Alfa.....	10
<b>Figura 2.1</b> - Processo Bayer.....	15
<b>Figura 2.2</b> - Processo do calcinador.....	16
<b>Figura 2.3</b> - Tela de supervisor do forno calcinador da linha 04.....	20
<b>Figura 2.4</b> - Típico controle da pressão da fornalha.....	21
<b>Figura 2.5</b> - Controlador de temperatura da fornalha.....	22
<b>Figura 3.1</b> - Valores linguísticos da variável velocidade.....	25
<b>Figura 3.2</b> - Fluxo de dados de um sistema fuzzy. Fonte: AGUADO e CANTANHEDE (2011).....	27
<b>Figura 4.1</b> - Ilustração da medição da área superficial.....	31
<b>Figura 4.2</b> - Conjunto de entrada – #325 granulometria do hidrato.....	33
<b>Figura 4.3</b> - Conjunto de entrada - IA índice de atrito.....	33
<b>Figura 4.4</b> - Conjunto de entrada – Rotação da rosca de alimentação do forno.....	33
<b>Figura 4.5</b> - Conjunto de entrada – SSA área superficial.....	34
<b>Figura 4.6</b> - Conjunto de entrada – Tendência da área superficial.....	34
<b>Figura 4.7</b> - Conjunto de saída - Temperatura da fornalha.....	34

<b>Figura 4.8</b> - Conjunto de saída - Pressão da fornalha.....	35
<b>Figura 5.1</b> - Resultado da simulação para a temperatura com as regras dos especialistas.....	38
<b>Figura 5.2</b> - Resultado da simulação para a pressão com as regras dos especialistas.....	39
<b>Figura 5.3</b> - Resultado da simulação para a temperatura com as regras ativadas pelo <i>look up table</i> .....	40
<b>Figura 5.4</b> - Resultado da simulação para a pressão com as regras ativadas pelo <i>look up table</i> .....	40
<b>Figura 5.5</b> - Resultado da simulação para a temperatura com as regras dos especialistas.....	41
<b>Figura 5.6</b> - Resultado da simulação para a pressão com as regras dos especialistas.....	42
<b>Figura 5.7</b> - Resultado da simulação para a temperatura com as regras ativadas pelo <i>look up table</i> .....	42
<b>Figura 5.8</b> - Resultado da simulação para a pressão com as regras ativadas pelo <i>look up table</i> .....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> - Parâmetros de produção do alumínio X propriedades da alumina.....	7
<b>Tabela 4.1</b> - Comparação entre regras dos especialistas e as criadas pelo <i>Look up table</i> .....	36
<b>Tabela A1.1</b> - Regras do sistema fuzzy.....	47

## NOMENCLATURA

ALBRAS	ALUMÍNIO BRASILEIRO S.A.
ALCAN	RIO TINTO ALCAN
ALCOA	ALCOA ALUMÍNIO S.A.
HYDRO ALUNORTE	ALUMINA DO NORTE DO BRASIL S.A.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA**

A empresa Hydro Alunorte - Alumina do Norte do Brasil S/A, controlada hoje, pela norueguesa Norsk Hydro, foi fundada em 1978, através de acordo entre os governos do Brasil e do Japão. Suas operações industriais começaram apenas em julho de 1995 com uma produção inicial de 1,1 milhões de toneladas.

Localizada no município de Barcarena, a empresa integra o ciclo de produção de alumínio no estado paraense, através do processamento da bauxita e transformação em alumina.

A bauxita que é processada pela Alunorte é oriunda da Mineração Rio do Norte (MRN), chegando através de navios, e da mina de Paragominas, vinda através de um mineroduto com 244 quilômetros de extensão, sendo a Alunorte a pioneira a utilizar a técnica de recebimento de bauxita por desaguamento.

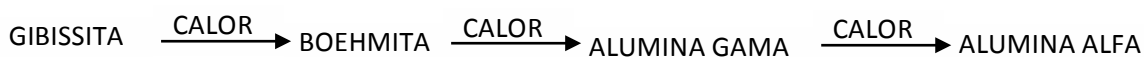
Desde seu início em 1995 até 2013, a Alunorte sofreu três expansões, se tornando a maior refinaria de alumina do mundo com capacidade de produção de 6,4 milhões de toneladas de alumina por ano com sete linhas de produção.

#### **1.2 - TEORIA DA CALCINAÇÃO DA ALUMINA (ALCAN, 1990)**

A calcinação é geralmente definida como um processo em que materiais são aquecidos a temperaturas elevadas, para a separação de compostos voláteis, às vezes reduzidos a pó, sem fusão.

Segundo a definição acima, o material submetido a temperaturas elevadas é a alumina tri hidratada; o composto volátil é a água de cristalização e o pó resultante é o óxido de alumínio, ( $Al_2O_3$ ) ou simplesmente alumina, que tanto pode ser o tipo “Sandy”, que possui textura de areia ou do tipo alfa, que possui textura de “pó fino”.

Em 1925, Harber estabeleceu que, pelo aquecimento, a gibbsita (tri hidratado de alumina) passa por mudanças estruturais e forma fases intermediária antes de chegar à forma final, alumina alfa, conforme pode ser visto na Figura 1.1.

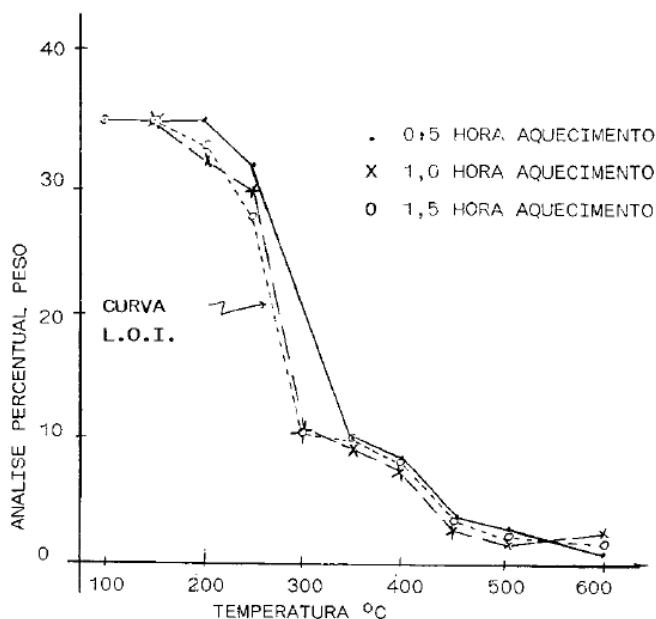


**Figura 1.1** - Processo de formação da Alumina.

Assim, a gibssita começa a perder a sua água de cristalização a 200°C. A 250°C a linha deflete, caindo aproximadamente para 10% de perda por calcinação (LOI). Daí em diante, a água é removida a velocidade mais baixa e isto continua até cerca de 450°C, onde a curva tende a se tornar assintótica em relação ao eixo horizontal, então a desidratação térmica da alumina tri-hidrata começa a 200°C e está praticamente terminada 600°C, podendo ser visualizado na Figura 1.2.

Entretanto, alumina produzida a 600°C tem a superfície altamente ativada e tende a absorver considerável quantidade de água quando em contato com a atmosfera. Por outro lado, se esta alumina for aquecida até a faixa de 1000°C a 1300°C ela perde a referida tendência, passando a ser considerada segura para o uso posterior em células de redução eletrolítica.

Na produção de alumina do tipo “Sandy”, o hidrato é calcinado a cerca de 970°C de modo que a alumina obtida apresente 1% ou menos de LOI, nível considerado satisfatório, tanto para a operação dos fornos quanto do ponto de vista econômico. Na figura abaixo pode ser visualizado o comportamento da perda de água da alumina Tri-hidratada com relação à temperatura.



**Figura 1.2** - Perda de água durante processo da formação da alumina.



No resumo abaixo podemos verificar as propriedades dos dois tipos de alumina mais comercializados:

- **Alumina Flourey:** Calcinada a altas temperaturas, 1100°C a 1300°C.

Obtêm um produto com as seguintes características:

- Porcentagem de Alumina  $\alpha$  (alfa) > 90%
- Superfície Específica < 10 m<sup>2</sup>/g.
- Aspecto Áspero Rugoso dos grãos
- Teor de água igual à zero
- Imprópria para redução com lavador de gases a seco
- Baixa fluidez

- **Alumina Sandy:** Calcinada a baixa temperatura de 940°C a 1000°C.

Obtêm um produto com as seguintes características:

- Alta fluidez
- Percentagem de alumina Alfa < 20%
- Superfície Específica > 40 m<sup>2</sup>/g
- Grãos arredondados
- Uso em reduções com lavagem a seco dos gases
- Teor de água < 1%

A alumina produzida e comercializada pela Hydro Alunorte é a do tipo Sandy.

## 1.3 – PROPRIEDADES DA ALUMINA

### 1.3.1 - Propriedades Físicas

As propriedades físicas impactam diretamente a produção do alumino, podendo tornar a sua operação ineficiente. Outro impacto é o ambiental, uma vez que pode causar sujidade em excesso durante o transporte da alumina.

#### **1.3.1.1 – Granulometria: Distribuição dos tamanhos das partículas**

A granulometria é determinada principalmente no processo de Precipitação do hidrato e em menor escala pela Calcinação, a análise granulométrica é feita com uso de três peneiras: 100# (mesh), 200# e 325#.

É uma das principais propriedades para o processo de operação dos fornos de Redução, uma vez que, os grãos maiores, de 100# (149 $\mu$ ) apresentam problemas para a ação do “banho eletrolítico” (exige maior consumo de energia dos fornos para penetrar no núcleo da partícula). Quanto aos grãos mais finos, de 325# (44 $\mu$ ), também causam distúrbios no processo, pois vão se acumular no fundo dos fornos.

#### **1.3.1.2 – Fragilidade**

Basicamente é controlada na precipitação do hidrato, está relacionada com a formação dos cristais de hidrato. Os graus de hidrato devem resistir à quebra nos calcinadores em decorrência de sua ciclonagem a altas velocidades e lavadores a seco nas Reduções. É medido pelo índice de atrito, através da verificação da quantidade das partículas < 44 $\mu$  (muito fino) após a calcinação.

#### **1.3.1.3 – Densidade Aparente**

Está relacionada com o sistema de alimentação dos fornos de Redução.

O volume do alimentador é constante, portanto, qualquer variação na densidade da alumina provoca uma variação na quantidade de alimentação do forno.

Pode-se entender como os “espaços vazios” que ficam entre os grãos de alumina nos fornos de Redução, dando uma “aparente” impressão de que o forno está com sua quantidade máxima de alimentação (cheio).

#### **1.3.1.4 – Fluidez e Ângulo de Repouso**

A distribuição granulométrica das partículas e o grau de calcinação definem as condições de escoamento da alumina nos fornos. Quanto maior o ângulo de repouso menor será sua capacidade de escoamento.

Para um bom escoamento da alumina, é necessário que seus grãos tenham formato regular (arredondados), já os grãos com formas irregulares (disformes), dificultam o escoamento devido o seu maior ângulo de repouso.

### 1.3.1.5 – Grau de Calcinação

É o somatório dos efeitos da taxa de aquecimento, atmosfera do calcinador, temperatura final e o tempo de permanência da alumina no calcinador.

No laboratório são analisados estes três parâmetros:

- **Superfície Específica (SSA BET)**

É a medida da área superficial da partícula de alumina expressa em  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Quanto maior o grau de calcinação, menor será sua superfície específica, pois, o calor reduz os poros internos do grão da alumina.

- **LOI**

Definida como “perda ao fogo”, é a perda de peso da partícula com o aquecimento. Quanto maior o grau de calcinação, menor o seu LOI. Pesa-se um grão de hidrato antes e depois de ser calcinado para verificar sua perda de água.

- **Porcentagem de alumina “Alfa”**

Unidade de medida para o acompanhamento do **grau de calcinação**, quanto maior a % de alumina na fase “Alfa” maior será o grau de calcinação. O máximo permissível na produção de alumina metalúrgica é de 20% (a meta da Hydro Alunorte é de 10%). Este valor varia em **altas temperaturas de calcinação**.

### 1.3.2 – Propriedades Químicas

As propriedades químicas da alumina afetam mais a pureza do metal e o consumo de matérias primas nos fornos de redução (Albrás). Como por exemplo: quando o teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  (sódio) na alumina está alto, ocorre a queda do teor de Fluoreto de Alumínio ( $\text{AlF}_3$ ) no banho eletrolítico, aumentando o consumo de criolita<sup>1</sup>.

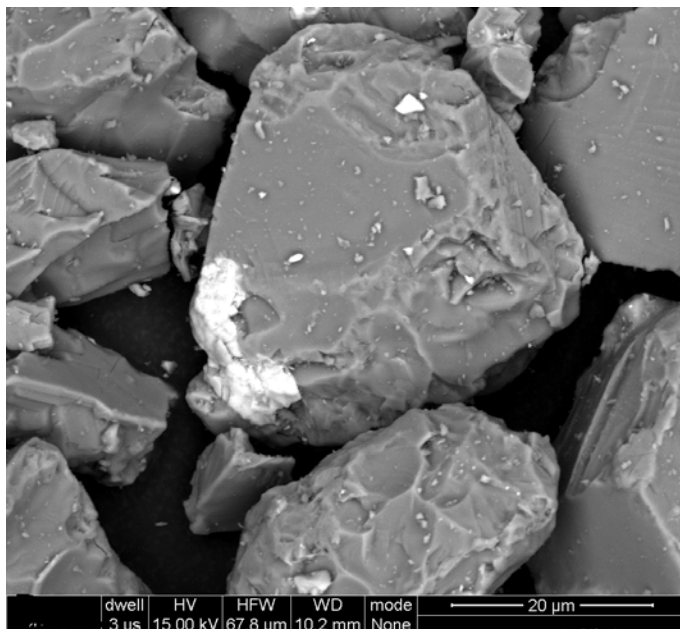
---

<sup>1</sup> Mineral cuja formula  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  é utilizado como fundente em metalurgia do alumínio

## 1.4 – ÁREA SUPERFICIAL DA ALUMINA

A alumina formada pelo processo da calcinação do hidróxido de alumínio. A área superficial da partícula de alumina (SSA, sigla vinda do inglês) é formada pelas irregularidades ou sulcos que na literatura técnica são chamadas de poros. Quanto maior a quantidade de poros maior será a sua área superficial. No caso contrário, quanto menor a quantidade de poros menor será área superficial, indicando que o processo de calcinação não foi eficaz.

Na Figura 1.3, pode-se ver a foto da partícula de alumina, realizado por micrografia.



**Figura 1.3 - Grão de alumina.**

## 1.5 - IMPACTO DA ÁREA SUPERFICIAL NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA(O) ALUMINA/ALUMÍNIO

Após a calcinação da alumina, parte do produto é destinada para o processo seguinte, onde ocorrerá a transformação da alumina em alumínio, através da redução eletrolítica da alumina em um banho de criolita natural ou sintética fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), método conhecido como processo Hall-Héroult.

Para que não haja atrasos na entrega do produto ou custo elevado de produção, a alumina deve estar dentro de certas especificações. A Tabela 1.1 ilustra os impactos da área superficial no processo de transformação da Alumina em alumínio.

Outro importante impacto é no meio ambiente, já que a área superficial afeta a eficiência dos equipamentos destinados à captura do pó em suspensão formado pela produção, transporte e armazenamento da alumina.

**Tabela 1.1 - Parâmetros de produção do alumínio X propriedades da alumina.**

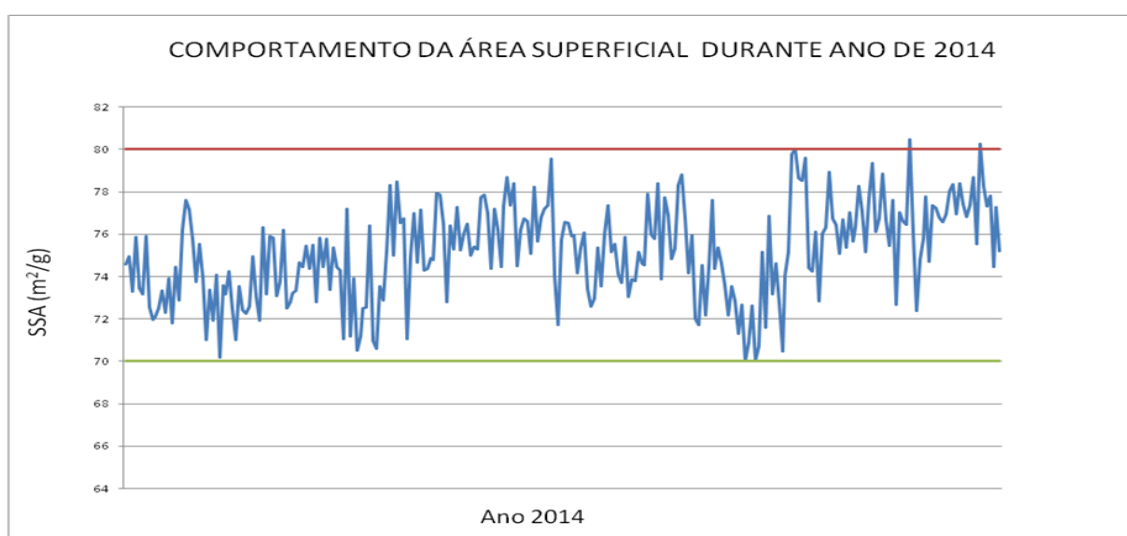
<b>Parâmetros para produção do alumínio</b>	<b>Propriedades associadas da alumina</b>
Boa solubilidade para uma rápida dissolução no banho eletrolítico.	Alumina Alfa, Área superficial (SSA), perda ao fogo (LOI), Decaimento pós fonte (PSD), morfologia da partícula
Pouca emissão de particulado durante transporte e alimentação das células.	-20µm
Consistência do tamanho da partícula e propriedades de escoamento.	PSD, ÂNGULO DE ESCOAMENTO, TEMPO DE ESCOAMENTO, DENSIDADE DO VOLUME, SSA, NA <sub>2</sub> O
Formação de crosta desejada.	ALFA, SSA, LOI
Habilidade de captura do fluoreto.	SSA
Sem segregação em relação ao tamanho da partícula, densidade e impurezas.	PSD
Sem contaminação por umidade.	LOI (RT-300°C), LOI (300 -100°C), GIBISSITA
Sem impurezas.	TODAS AS IMPUREZAS QUÍMICAS
Forças robustas para minimizar a formação de finos.	INDÍCE DE ATRITO. PSD
Boa propriedade de isolamento para cobrir o anodo.	ALFA, SSA, LOI, PSD

## 1.6 - PROBLEMÁTICA DO CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL

Devido à pouca literatura sobre o controle da área superficial da alumina e aliado à complexidade para a formação do tri-hidróxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) de alumina, não existe nenhum modelo matemático que seja capaz de orientar as tomadas de decisão para o seu controle. Outro fator que deve ser levado em consideração é o período de amostragem de 8 horas para medição da área superficial, considerado muito grande, uma vez que, somente em laboratório pode-se determinar a área superficial da alumina, não existindo nenhum instrumento em campo capaz de realizar medição on-line.

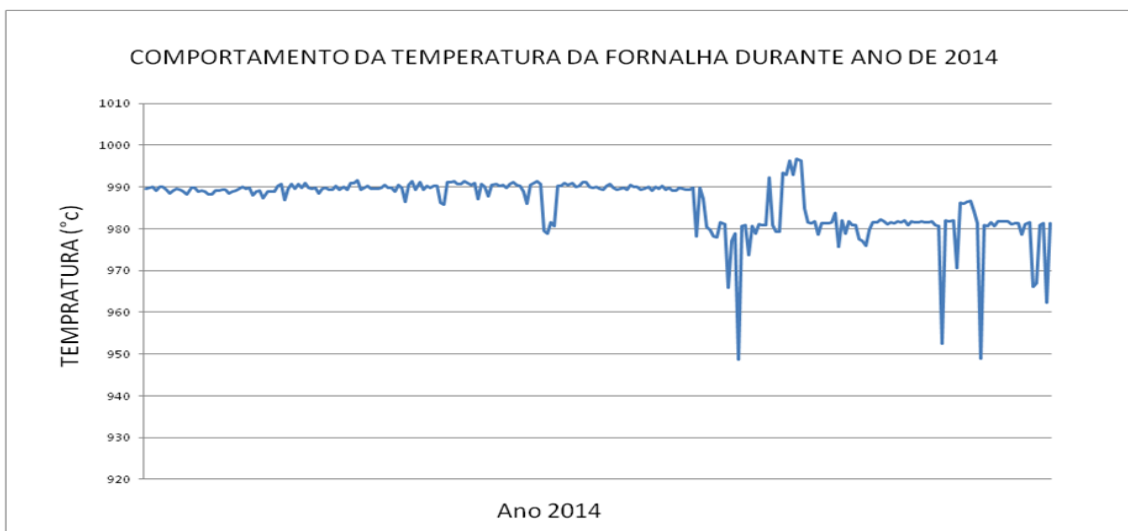
A sensibilidade, em conjunto com o conhecimento do pessoal da área técnica são os fatores fundamentais para se obter uma área superficial dentro das especificações exigidas pelo cliente final. Uma vez que, sendo o forno um circuito fechado, ao se alterar um valor de *setpoint*<sup>2</sup>, todo sistema sofrerá com essa mudança, fazendo com que o ponto de equilíbrio se modifique e afetando a formação da área superficial do grão de alumina.

Atualmente o controle da área superficial da alumina é realizado de forma totalmente empírico, sendo que os ajustes nas variáveis de controle do forno são realizados somente com base na experiência dos especialistas. As Figuras 1.4 a 1.6 mostram o comportamento da área superficial, temperatura e pressão da fornalha ao longo do ano de 2014, respectivamente. As linhas vermelhas e verdes da Figura 1.4 indicam a faixa permitida de variação da área superficial.

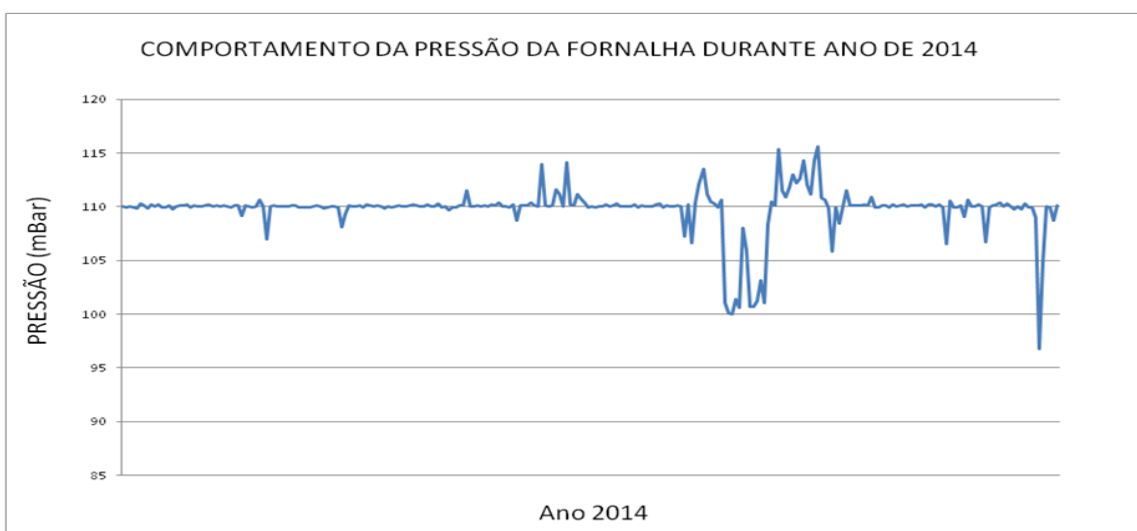


**Figura 1.4** - Comportamento da área superficial durante ano de 2014.

<sup>2</sup> Valor de referência que se deseja obter como saída de um sistema controlado



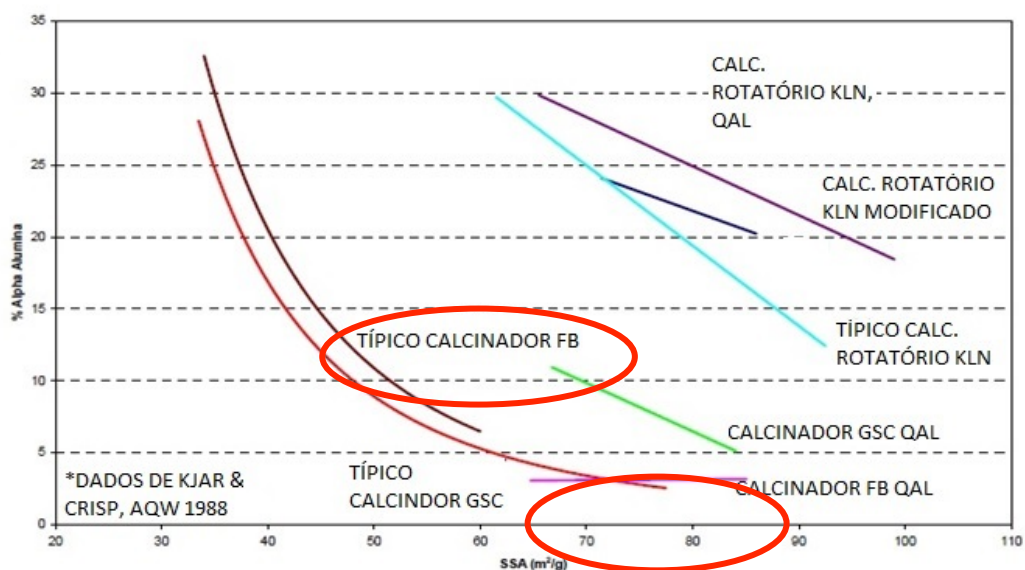
**Figura 1.5** - Comportamento da temperatura da fornalha durante ano de 2014.



**Figura 1.6** - Comportamento da pressão da fornalha durante ano de 2014.

Como pode ser visto na Figura 1.5 o calcinador trabalhou ao longo do ano de 2014 com uma temperatura próxima de 1000°C, sendo este o valor mínimo para iniciar a formação de alumina alfa.

Na Figura 1.7 pode ser visualizado que a porcentagem de alumina alfa esperada para um forno do tipo leito fluidizado (FB – *fluidized belt*) – utilizado na Hydro Alunorte – para os limites especificados de processo que são entre  $70\text{m}^2/\text{g} < \text{SSA} < 80\text{m}^2/\text{g}$  deve ser menor que 5%, conforme destaque em vermelho.



**Figura 1.7 - SSA X Alumina Alfa.**

## 1.7 - MOTIVAÇÕES PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO

No ano de 2014, ocorreram alguns eventos nos calcinadores devido à formação de alumina alfa. Este tipo de alumina é formado quando a temperatura de trabalho do calcinador é superior a 1000°C. Para este tipo de alumina, o calcinador não foi projetado, e isto significa que quando se tem a ocorrência deste material, problemas de fluidização em seu interior – dentro da fornalha - podem provocar instabilidade operacional e, conseqüentemente, a parada do equipamento para a desobstrução e a drenagem deste material. Isto acarreta alto risco de acidente, nesse momento, além de perda de produção devido ao longo período do equipamento parado para realizar os serviços mencionados acima.



## 1.8 - OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS

Este trabalho visa a aplicação da lógica *fuzzy* como ferramenta capaz de “extrair” o conhecimento das pessoas envolvidas no processo de calcinação da alumina para melhorar o controle da sua área superficial.

Isso será realizado através do desenvolvimento de um simulador *fuzzy* para orientar as mudanças nos *set points* no controle de temperatura da fornalha e pressão diferencial do calcinador de leito fluidizado da Hydro Alunorte, hoje realizada através da sensibilidade e conhecimento sobre o processo que tem o corpo técnico da Hydro Alunorte.

## 1.9 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, descritos a seguir:

Neste Capítulo 1, de introdução foram discutidas, sucintamente as principais áreas operacionais que compõem a Hydro Alunorte e que fazem parte do processo Bayer. Sucintamente, foram explicados os principais controles do forno calcinador e as dificuldades em se manter a área superficial dentro das especificações dos clientes sem a formação da alumina alfa.

No Capítulo 2, são explicados o funcionamento e as partes que compõem o forno calcinador de leito fluidizado, também se faz menção aos principais controladores que mantêm o forno operando dentro das especificações técnicas.

No Capítulo 3, será mostrada uma breve apresentação da lógica e dos sistemas *fuzzy*. No Capítulo 4, será mostrada a definição dos conjuntos de variáveis utilizados na lógica *fuzzy*, bem como as regras que foram utilizadas no desenvolvimento do sistema *fuzzy*, para a proposição dos *set points* no controle da área superficial da alumina. No Capítulo 5, são mostrados os resultados obtidos nas simulações com o uso do sistema desenvolvido. No Capítulo 6, será apresentada as conclusões deste trabalho e a sugestão de possíveis continuações.

## **CAPÍTULO 2**

### **CALCINAÇÃO**

#### **2.1 - PROCESSO BAYER**

Em 1888 foi desenvolvido pelo químico Karl Josef Bayer um método capaz de extrair hidróxido de alumínio da bauxita. Em homenagem ao criador esse processo passou a se chamar de processo Bayer.

O Processo Bayer consiste de quatro etapas principais: Moagem e armazenamento da polpa, digestão, precipitação e calcinação, sendo elas descritas a seguir:

##### **2.1.1 - MOAGEM E ARMAZENAMENTO DA POLPA**

Antes de iniciar efetivamente o processo químico de refino da alumina, a bauxita sofre uma etapa física de moagem por meio de moinhos semi autógenos (SAG e/ou moinhos de bola), onde normalmente o minério é reduzido a partículas com tamanhos inferiores a 1,5mm. O processo de cominuição<sup>3</sup> tem a finalidade de preparar o minério para iniciar suas transformações, tornando a molécula de  $Al_2O_3$  mais disponível para promover um melhor contato sólido-líquido durante a etapa de digestão, garantindo uma extração mais eficiente da alumina (ALCOA AUSTRÁLIA, 2005). Após esta etapa é adicionado solução quente e concentrada de aluminato de sódio e soda cáustica, essa polpa formada é então bombeada para a próxima etapa, que é a digestão.

##### **2.1.2 - DIGESTÃO**

A polpa de bauxita é bombeada dos tanques de retenção para os vasos digestores, nos quais ocorre o aquecimento sob pressão e o recebimento de novas quantidades do licor cáustico (com temperaturas entre 180°C e 250°C). O objetivo principal dessa etapa é a dissolução da bauxita, formando uma solução de aluminato de sódio ( $Na_2O \cdot Al_2O_3$ ) que passará ainda por processos de sedimentação e filtragem.

---

<sup>3</sup> Ato ou efeito de fragmentar, triturar

A digestão acontece segundo um período de lixiviação de até 5 horas, cuja faixa operacional de pressão (4,0 – 8,0 atm) depende da temperatura de digestão, que costuma variar entre 100°C e 250°C.

Após a digestão, a polpa resultante com a alumina em solução (muitas vezes referida como "licor rico") e outros sólidos de minério não dissolvidos seguem para o processo de redução em uma série de reatores sob pressão, denominados espessadores (ALCOA AUSTRÁLIA, 2005).

### 2.1.3 - PRECIPITAÇÃO

No início da etapa de precipitação, o licor rico oriundo da digestão é resfriado por troca térmica com o licor frio, do qual a alumina foi removida e que é retornado para o início da etapa de digestão. Esse procedimento é importante, uma vez que, além de promover mais uma etapa de integração energética no Processo Bayer, é também uma forma de elevar a supersaturação do licor.

O licor resfriado é alimentado de pequenos cristais de alumina tri-hidratada, dando início a um processo conhecido como “cristalização por semente”, nos quais os cristais agem como núcleos coagulantes para geração de mais alumina hidratada precipitada. Após a alimentação da semente, o licor atravessa uma série de largos vasos precipitadores, onde os cristais se aglomeram e crescem (ALCOA AUSTRÁLIA, 2005).

A reação correspondente a essa etapa do processo é descrita a seguir:



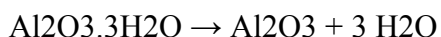
Quando a polpa de hidratos deixa o último vaso precipitador, o hidróxido de alumínio precipitado é separado em diferentes tamanhos por hidrociclones. As partículas mais grossas são transferidas para a etapa de calcinação, enquanto as partículas mais finas são filtradas e enviadas novamente para o início do processo de precipitação como cristais de alimentação (ALCOA AUSTRÁLIA, 2005).

A etapa de precipitação é a responsável direta pela produtividade da refinaria e por importantes parâmetros de qualidade da alumina, tais como teor de sódio, resistência e distribuição de tamanhos de partículas do produto final. Além disso, é esperado um alto rendimento de hidrato por unidade de volume de licor, sendo que o

número de partículas formadas por nucleação deve ser igual à quantidade de partículas removidas do sistema, seja por aglomeração e crescimento ou por dissolução (ALCOA, 2011).

#### **2.1.4 - CALCINAÇÃO**

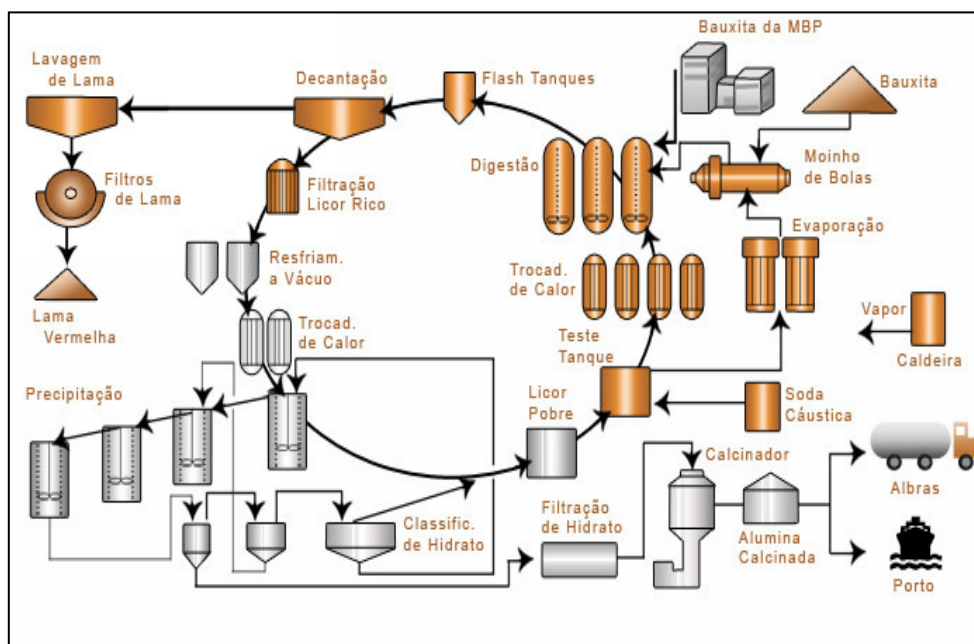
A calcinação é a última etapa do Processo Bayer e consiste basicamente na conversão do hidrato de alumínio em alumina. Na reação apresentada a seguir, observa-se que no processo de calcinação, o hidróxido de alumínio perde a água de cristalização para formação do óxido de alumínio (produto final).



A alumina obtida deve atender às especificações de tamanho de partícula, granulométrica, área superficial, perda por ignição (LOI) e conteúdo de  $\alpha$ -alumina desejada para o tipo que está sendo produzida. Além disso, a quantidade de sódio (principal contaminante da alumina grau metalúrgico) deve ser baixa e a energia empregada na etapa de calcinação deve ser próxima à requerida para a decomposição do hidrato (ALCOA, 2011).

Antes de seguir para os calcinadores, o hidrato recém-chegado do processo de precipitação passa por mais uma etapa de lavagem e filtração. Esta medida reduz a quantidade de sódio solúvel para valores próximos a 0,04%. A torta úmida é então levada a um secador com temperatura próxima a 300°C para remoção da água adsorvida (ALCOA, 2011).

Estas etapas operam de forma contínua e interligadas entre si, conforme pode ser visto na Figura 2.1, isto significa que se uma área não está bem em termos do processo o produto final corre o risco de sair das especificações prejudicando a qualidade do produto final. Outra fonte de alteração são variações na composição ou na qualidade da bauxita, neste caso há a necessidade de se fazer pequenas e específicas modificações na planta visando a manter a qualidade do produto final.



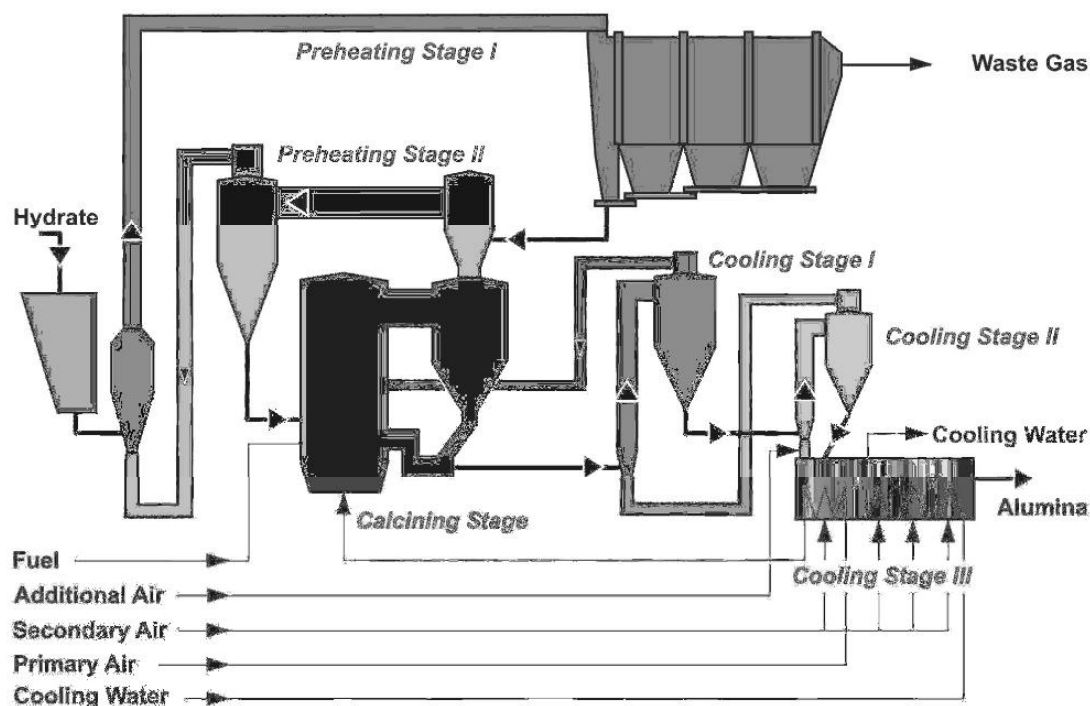
**Figura 2.1 - Processo Bayer.**

## 2.2 - ESTRUTURA DO CALCINADOR

O forno de leito fluidizado é o principal equipamento da área 10, constituído de ciclones, coolers para resfriamento, secadores Venturi, precipitador eletrostático e uma fornalha capaz de trabalhar a uma temperatura máxima de 1200°C. Este equipamento, comumente chamado de calcinador, é o estágio final para a obtenção da alumina. Através da calcinação, consegue-se extrair as moléculas de água contidas no hidrato e transformá-lo no produto final que é a alumina.

A fim de se garantir a segurança operacional, material e das pessoas existem diversos intertravamentos que são acionados automaticamente assim que algum desvio é detectado.

Na Figura 2.2, pode-se observar um diagrama contendo todos os estágios do calcinador (LIGHT METALS, 2009).



**Figura 2.2** - Processo do calcinador.

A seguir a explicação dos estágios do equipamento (LIGHT METALS, 2009).

### 2.2.1 - PRÉ-AQUECIMENTO FASE I

A partir do silo de alimentação de hidrato, que pertence à área 09, o hidrato é descarregado através de uma rosca de alimentação. O alimentador fornece o material para dentro do tubo de Venturi pré-aquecedor da primeira fase de aquecimento. Ali, os sólidos são misturados com o gás residual, que sai da segunda fase de pré-aquecimento. O calor contido no gás residual evapora a umidade da superfície inteira do hidrato.

O hidrato preaquecido é arrastado com o gás residual e transportado para o precipitador eletrostático de dois estágios (ESP). No primeiro estágio os sólidos arrastados são precipitados mecanicamente. O restante dos sólidos entra na segunda fase do ESP, juntamente com o gás residual. O gás residual é finalmente limpo por meio de precipitação eletrostática antes que ele saia do processo para a atmosfera.

Os sólidos precipitados na segunda etapa pela precipitação eletrostática são transportados para o fundo da tremonha<sup>4</sup> e por meio de transportadores helicoidais os sólidos são então alimentados na calha fluidizada

### **2.2.2 - PRÉ AQUECIMENTO FASE II**

O hidrato transportado pela calha fluidizada é então descarregado no elevador pneumático, sendo arrastado através de fluidização para o ciclone de deslocamento de ar. A parte principal dos sólidos descarregados é realizada através de uma selagem de descarga para a parte inferior do tubo de Venturi. O ar de transporte, já sem partículas, é fornecido via deslocamento de ar para os dutos do ciclone de ar secundário e servem como ar de combustão.

O hidrato que entra no pré-aquecedor venturi da segunda fase de pré aquecimento é misturado com o gás residual quente desidratando-o pelo calor contido no gás quente.

No ciclone, o qual está disposto a jusante do tubo de Venturi pré-aquecedor, o fluxo de gás e sólidos serão separados. Do ciclone, a alumina pré-calcinada é entregue no interior do leito fluido da fornalha, através da linha de alimentação de material, e o gás residual que deixa o ciclone é transportado para o primeiro estágio de pré-aquecimento, como já mencionado.

### **2.2.3 - FASE DA CALCINAÇÃO**

Após passar pelas fases de pré-aquecimento I e II, o hidrato parcialmente desidratado segue para a fase da calcinação propriamente dita no forno de leito fluidificado. O calor necessário para calcinação é gerado por combustão direta do combustível no leito de ar.

A geração do calor proveniente da queima de óleo BPF é realizada através de quatro queimadores. 40% do ar necessário para a combustão é introduzido através do soprador de ar primário aplicado diretamente no manifold, localizado na parte de baixo

---

<sup>4</sup> Moega, Reservatório

da fornada, e os outros 60% do ar são adicionados pela lateral da fornalha, através dos sopradores secundários.

Devido à intensa mistura de calor no leito fluidizado, a temperatura do forno se ajusta como uma mistura de temperaturas compreendidas entre a temperatura de combustão e a temperatura dos sólidos, e é mantida constante em nível pré-estabelecido nos dois pontos principais:

Na zona mais baixa do forno, entre o *manifold* e a entrada de ar secundário, um leito de alta concentração de sólidos é ajustado, favorecendo a combustão do combustível e aumentando o tempo médio de retenção do material para calcinação.

Na zona superior do forno, a recirculação dos sólidos provoca uma redução contínua na concentração de sólidos até que uma concentração relativamente baixa é atingida. Com este teor de sólidos, os gases quentes entram no ciclone de reciclagem onde ocorre a separação dos sólidos. A alumina quente é separada no ciclone de reciclagem passando através do vaso comunicante e realimentando a fornalha.

A recirculação dos sólidos conduz a uniformização do produto e garante uma estabilização da temperatura dos gases que circulam na fornalha e que são direcionados para os ciclones de reciclagem.

O hidrato já calcinado é retirado através do pote de selagem. Neste pote, há a lança de descarga que tem sua abertura controlada pela pressão diferencial da fornalha. O descarregamento se dá através de retiradas parciais para não afetar o selo formado dentro da fornalha. Feito o descarregamento a alumina é dirigida através de dutos de cama de ar para a fase de refrigeração I e II.

#### **2.2.4 - RESFRIAMENTO FASE I**

A alumina proveniente da fase de calcinação é transportada com o ar pré-aquecido da fase de resfriamento II. O material é arrastado até o primeiro ciclone de resfriamento, onde acontece a separação da parte sólida com o ar transportador. Este ar é encaminhado para ser reutilizado pelo sistema de combustão na fornalha e o sólido é encaminhado para a segunda fase de resfriamento.



### **2.2.5 - RESFRIAMENTO FASE II**

A Alumina descarregada a partir do fundo do primeiro ciclone de resfriamento é transportada para dentro do segundo ciclone de resfriamento. Lá, acontece mais uma separação do sólido com o ar de transporte. O sólido separado forma uma selagem para dentro do *cooler*<sup>5</sup> de leito fluidizado. Neste *cooler*, há a primeira grande troca térmica, e o ar é fornecido através de sopradores denominados de secundários e adicionais.

Ao passar pelo segundo ciclone de refrigeração o material sólido forma um selo, cuja pressão força a alumina a passar pelas câmaras dentro do cooler.

### **2.2.6 - RESFRIAMENTO FASE III**

Nesta fase, a alumina passa pelo *cooler* contendo serpentinas que recirculam água provenientes das torres de resfriamento, para realizar a última troca de calor e garantir um baixo consumo de calor específico para o processo da calcinação. Parte do ar que é utilizado para formar o leito fluidizado é direcionado para formar uma corrente em contra fluxo. Assim, tem-se uma troca de calor entre o ar e a alumina.

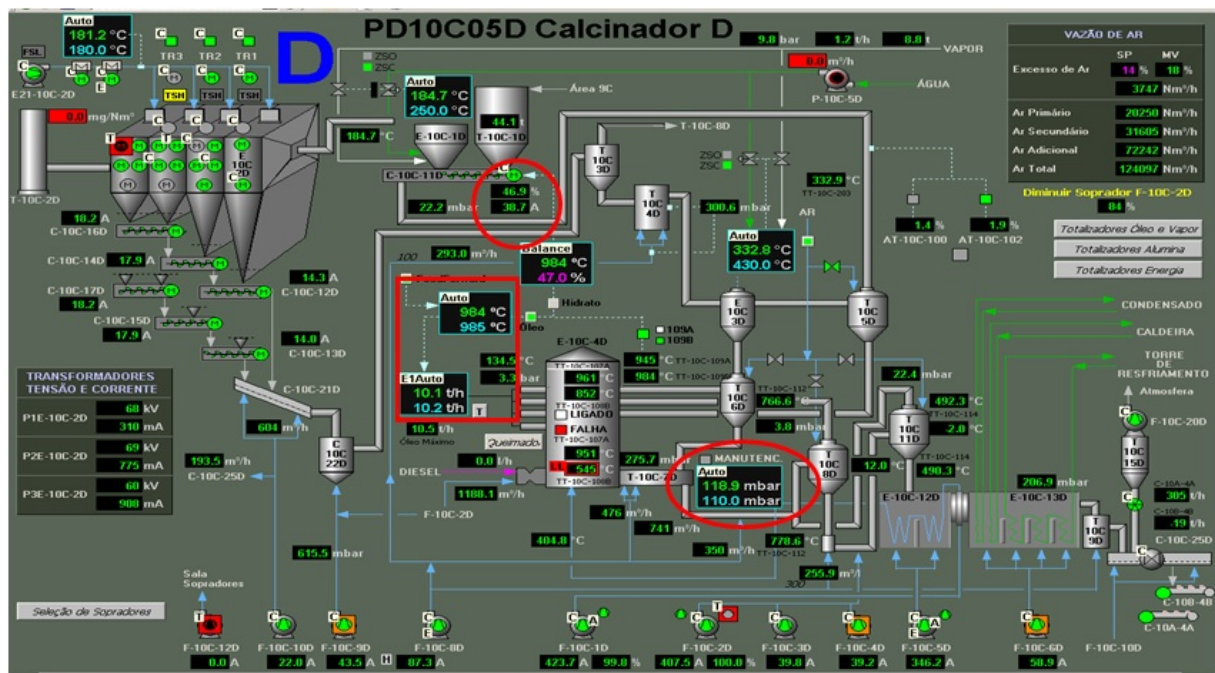
Na saída da última fase de refrigeração, a alumina é descarregada para um transportador pneumático que é direcionado para as correias transportadoras e encaminhado para a área de estocagem de alumina.

## **2.3 - CONTROLES DO CALCINADOR**

Na Figura 2.3, pode-se visualizar a tela do supervisório do forno calcinador da linha 4, localizado na sala de controle. Nela, pode-se identificar os três controles principais deste forno que são utilizados também para manter a área superficial dentro das especificações.

---

<sup>5</sup> Equipamento destinado a reduzir a temperatura da alumina através de troca térmica



**Figura 2.3** - Tela de supervisor do forno calcinador da linha 04.

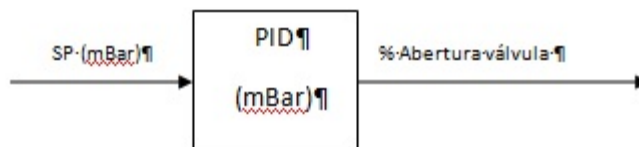
### 2.3.1 - CONTROLE DA QUANTIDADE DE MATERIAL A SER CALCINADO

A variável de controle que determina a quantidade de material que será calcinado é a rotação do motor, cujo eixo está acoplado a uma rosca helicoidal

### 2.3.2 - CONTROLE DA PRESSÃO DA FORNALHA

A variável pressão diferencial da fornalha dita o tempo de residência com que o grão permanece recirculando dentro do forno. A pressão diferencial ajuda na formação do leito e na selagem da fornalha, tendo como consequência a estabilização da temperatura dentro do forno.

O controle da pressão da fornalha tem como finalidade o descarregamento do hidrato já calcinado e tem como variável medida a pressão diferencial da fornalha e o elemento final de controle uma válvula pneumática. A outra função deste controlador é manter os selos dentro da fornalha, evitando assim instabilidade no descarregamento da alumina e temperaturas internas.



**Figura 2.4** - Típico controle da pressão da fornalha.

### 2.3.3 - CONTROLE DA TEMPERATURA DA FORNALHA

A temperatura da fornalha é controlada para em seguida se controlar a vazão de óleo BPF, cuja resposta é mais rápida e é a variável mais fácil de manipular quando há a necessidade de trazer de volta a área superficial para dentro do especificado.

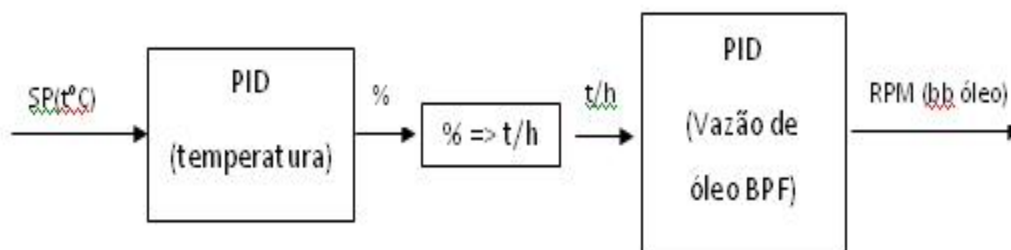
A influência desta variável corresponde a uma “lapidação” do grão de alumina e possui uma ação de controle inverso. Isto é, quanto menor a área superficial, mais polido, o grão de alumina, então neste caso menor deve ser o *set point* de temperatura de controle da fornalha e vice e versa.

O controle de temperatura da fornalha é formado por dois controladores em cascata, sendo o controle *master* o da temperatura da fornalha, recebendo o set point de temperatura, e o controle escravo o da vazão de óleo BPF. A saída deste controlador irá variar a rotação da bomba de óleo BPF conforme a necessidade de se manter a temperatura dentro do set point estabelecido.

Antes que se faça a conexão entre os dois controladores é necessário que seja feita uma transformação de unidade de ‘%’ para ‘t/h’, afim de permitir a compatibilidade das informações a serem controladas entre os dois controladores, conforme pode ser visualizado na Figura 2.5.

Um controle indireto que afeta a eficiência do calcinador é a relação ar/óleo BPF. Em suma, esta relação informa o quanto o calcinador está desperdiçando óleo BPF para aquecer somente ar de fluidização, deixando de utilizar essa quantidade de óleo desperdiçada para calcinação do hidrato. Por procedimento, este valor deve ficar em torno de 1,4%, valor medido pelos analisadores de oxigênio, sendo que caso este valor

atinga o valor de 0,7%, ocorre o intretavamento do forno a fim de proteger o filtro eletrostático de explosões.



**Figura 2.5** - Controlador de temperatura da fornalha.

## CAPÍTULO 3

### SISTEMAS FUZZY

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

A lógica *fuzzy* é uma técnica poderosa para resolver problemas, com ampla aplicabilidade, especialmente nas áreas de controle e de tomada de decisão. Geralmente, a sua aplicação é mais útil para tratar problemas que não são facilmente definidos por modelos matemáticos.

Essa lógica possui a habilidade de extrair conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas, qualitativas, incompletas ou imprecisas. Neste sentido, os sistemas baseados em conjuntos difusos têm a capacidade de raciocínio semelhante à dos humanos.

O comportamento dos sistemas *fuzzy* é representado de uma maneira muito simples permitindo a construção rápida de sistemas compreensíveis, sustentáveis e robustos para o projeto de sistemas de controle ou de tomada de decisão, um exemplo é que a lógica difusa tem sido empregada na administração do mercado de ações e no controle de metrô.

#### 3.2 - CONJUNTOS FUZZY E FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA

A pertinência é uma relação que vincula cada elemento a um conjunto. Em outras palavras, em um conjunto bem definido (lógica clássica), a pertinência ou não pertinência de um elemento  $x$  a um conjunto  $A$  se descreve mediante a função característica  $\mu_A(x)$ , em que:

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

Esta função é chamada função de pertinência ou função característica de  $A$  e está definida para todos os elementos do universo. A função de pertinência faz um

mapeamento de todo o universo  $U$  ao seu conjunto de avaliação dos dois elementos  $\{0, 1\}$  e indica a não pertinência ou pertinência plena de  $x$  no universo  $U$ .

### 3.3 - LÓGICA *FUZZY*

A lógica *fuzzy* pode ser usada para fazer representação do conhecimento, quando um ser humano está resolvendo um problema complexo. Ele primeiro tenta estruturar o conhecimento sobre este problema em conceitos gerais, e depois observa as relações entre esses conceitos (OLIVEIRA, 2003).

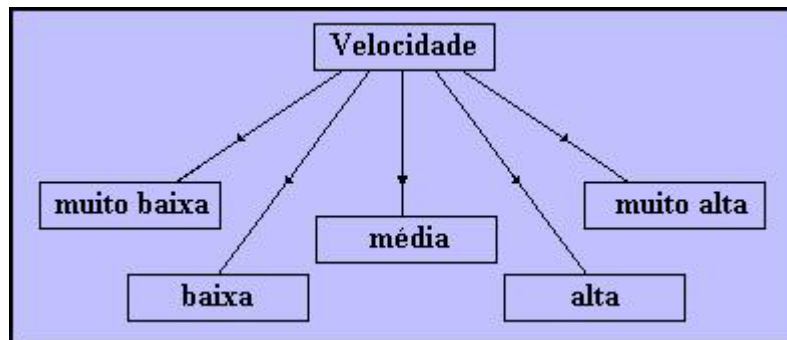
Essa perspectiva essencialmente humana de encarar um problema, geralmente não permite a definição precisa de uma solução, em termos de números exatos, mas conduz a uma classificação ou agregação qualitativa em categorias gerais ou conjuntos de possíveis soluções. A capacidade de classificar de modo impreciso as variáveis de um problema, em termos de conceitos qualitativos em vez de quantitativos, traduz a ideia de uma variável linguística.

Uma variável linguística é definida como uma entidade utilizada para representar, de modo impreciso e, portanto, linguístico, um conceito ou uma variável de um dado problema. Ela admite como valores, apenas expressões linguísticas, como frio, muito grande, aproximadamente, alto, etc. Estes valores contrastam com os valores assumidos por uma variável numérica, que admite apenas valores precisos (Figura 3.1).

A forma de utilização das variáveis linguísticas depende basicamente da definição das propriedades sintáticas e semânticas que vão reger o comportamento do sistema de conhecimento *fuzzy*.

As propriedades sintáticas definem o formato em que serão armazenadas as informações linguísticas *fuzzy*. Elas proporcionam a criação de uma base de conhecimento contendo sentenças estruturadas, sistematizando os processos de armazenamento, busca e processamento dos dados existentes.

As propriedades semânticas vão especificar de que modo é extraído e processado o conhecimento, armazenado na forma de declarações condicionais *fuzzy*, ou regras de produção *fuzzy*, contido na estrutura definida pelas propriedades sintáticas.



**Figura 3.1** - Valores linguísticos da variável velocidade.

### 3.4 - REGRAS FUZZY

A maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento *fuzzy* é a representação por meio de regras de produção *fuzzy*. Uma regra de produção normalmente é formada de duas partes principais:

SE <antecedente> ENTÃO <consequente>

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas (mesmo parcialmente), determinam o processamento do consequente da regra por um mecanismo de inferência fuzzy. Por sua vez, o consequente é composto de um conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados a cada ativação da regra.

As regras de controle englobam o conhecimento do sistema e os objetivos do controle. Cada regra tem um estado do sistema em sua premissa e uma ação de controle sugerida em sua conclusão. As regras de controle difusas conectam os valores de entrada com as propriedades da saída do modelo. Elas estão expressas como proposições condicionais, podendo ser um grupo de proposições ligadas por um conectivo 'E' conforme pode ser visto a seguir:

Se [Estado do processo\_1] e [Estado do processo\_2] Então [Ação de controle]

As regras de controle *fuzzys* são declarativas e não sequenciais, o que significa que a ordem em que se expressam não é importante. Como uma medida preventiva para a manutenção do controlador, é recomendável agrupar as regras de acordo com as

variáveis de suas premissas. A quantidade de regras que requer um controlador *fuzzy* é encontrada multiplicando-se o número de valores *fuzzy* difusos das variáveis de entrada. Deste modo, as regras cobrirão todas as possíveis combinações provenientes das distintas entradas. Por exemplo, para um sistema com duas variáveis de entrada, a primeira com 3 valores *fuzzy* difusos e segunda com dois termos existem  $3 \times 2 = 6$  combinações de entrada e, portanto, 6 regras de controle, como ilustrado a seguir:

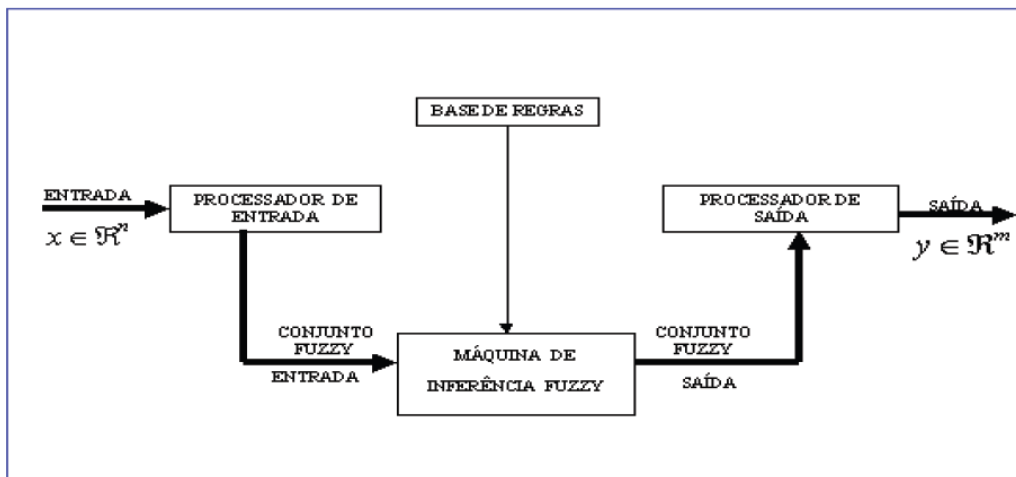
Se Temperatura é fria E Pressão é alta Então Ação da válvula é positiva pequena.  
Se Temperatura é fria E Pressão é média Então Ação da válvula é positiva normal.  
Se Temperatura é fria E Pressão é baixa Então Ação da válvula é positiva grande.  
Se Temperatura é média E Pressão é alta Então Ação da válvula é não operar.  
Se Temperatura é média E Pressão é média Então Ação da válvula é não operar.  
Se Temperatura é média E Pressão é baixa Então Ação da válvula é positiva.

Em alguns casos, é possível utilizar menos regras, mas não é recomendável fazê-lo, caso elas representem conhecimento. Se alguma regra de conhecimento for eliminada, remove-se conhecimento do sistema. A exceção é quando a regra a ser desprezada representa uma situação que não corresponde na prática.

### **3.5 - ARQUITETURAS DE UM SISTEMA FUZZY**

A Figura 3.2 mostra o fluxo dos dados por meio de um sistema difuso. As entradas do sistema submetem-se a três transformações para tornarem-se saídas do sistema. Primeiro, um processo de fuzificação que usa funções de pertinência pré-definidas mapeia cada entrada do sistema em um ou mais graus de pertinência. Então, as regras, da base de regras, são avaliadas combinando graus de pertinência para formar as saídas. E, por último, o processo de defuzificação calcula as saídas do sistema, baseando-se nas funções de pertinência (FERREIRA, 2012).





**Figura 3.2** - Fluxo de dados de um sistema fuzzy.

Fonte: AGUADO e CANTANHEDE (2011).

Há dois tipos de sistemas *fuzzy*, que são explicados sucintamente a seguir.

– **Sistemas *fuzzy* do tipo Mamdani** (ANDRADE e JACQUES, 2002):

Este sistema tem como base o trabalho pioneiro de Mamdani, publicado em 1973 (MAMDANI, 1973). Nesse sistema fuzzy, cada regra é uma proposição condicional fuzzy, e diferentes relações fuzzy no universo dos conjuntos podem ser dela derivadas.

A implementação de cada regra é feita mediante a definição de operadores para o processamento do antecedente da regra e da função de implicação que irá definir o seu conseqüente. A ação do controlador fuzzy é definida pela agregação das regras que compõem o algoritmo, mediante o uso do conectivo “ou”, o qual pode ser implementado por diferentes operadores. Esta agregação resulta no conjunto fuzzy que define a saída do controlador.

A saída efetiva do controlador é então obtida por meio de um processo de defuzzificação aplicado ao conjunto de saídas. As diferentes possibilidades para a implementação dos conectores das regras, das funções de implicação e do processo de defuzzificação são amplamente discutidas na literatura.

No sistema *fuzzy* do tipo Mamdani, as entradas do sistema submetem-se a três transformações para tornarem-se saídas do sistema. Primeiro, um processo de

fuzzificação que usa funções de pertinência pré-definidas mapeia cada entrada do sistema em um ou mais graus de pertinência. Então, as regras, da base de regras, são avaliadas combinando graus de pertinência para formar as saídas. E, por último, o processo de defuzzificação calcula as saídas do sistema, baseando-se nas funções de pertinência (FERREIRA, 2012).

– **Sistemas fuzzy do tipo Sugeno** (ANDRADE e JACQUES, 2002):

O controlador de Sugeno (TAKAGI e SUGENO, 1983) o consequente de cada regra é definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada.

O resultado de cada regra é, portanto, um valor numérico (não um conjunto fuzzy), que assume como peso o valor da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra. Essa determinação dispensa, portanto, a definição de uma função de implicação específica. A resposta final do controlador é obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais. Isto é, neste tipo de controlador não há o processo de defuzzificação. Para que o valor da pertinência pode também ser definido como um valor constante, que pode ser interpretado como um conjunto fuzzy com a característica especial de apresentar um único valor com pertinência igual a um e todos os demais com pertinência zero. Este tipo de conjunto fuzzy é denominado singleton, e o seu emprego permite a definição de regras com valores de saída que representam uma classificação da resposta do controlador, sem alterar a forma simplificada da determinação da resposta final do controlador.

Neste trabalho adotou-se o sistema *fuzzy* do tipo Mamdani

### **3.5.1 - PROCESSADOR DE ENTRADA (FUZIFICAÇÃO)**

O primeiro estágio para o processamento da lógica fuzzy é a fuzzificação, neste estágio as entradas são modeladas pela teoria dos conjuntos fuzzy. Nesta etapa, justifica-se a importância da presença dos especialistas no fenômeno a ser modelado, pois as funções de pertinência são formuladas para cada conjunto fuzzy envolvido.

### **3.5.2 - MÁQUINAS DE INFERÊNCIA**

Nesta etapa as proposições são traduzidas matematicamente por meio das técnicas da teoria de conjuntos *fuzzy*. Onde o raciocínio aproximativo é utilizado para se obter conclusões imprecisas a partir de premissas imprecisas.

Existem algumas diferentes classificações com relação às máquinas de inferência de um sistema difuso. Driankov propõe a classificação em dois grandes grupos: as de inferência baseada em composição e as baseadas em regras individuais. Para o primeiro caso, combinam-se todas as regras da base e faz-se uma única inferência, enquanto que para o segundo é feita a inferência regra a regra, aplicando-se normas ao final do processo para que se obtenha um valor único de saída. Neste trabalho, adotou-se uma máquina de inferência do 2º grupo.

### **3.5.3 - PROCESSADOR DE SAÍDA (DEFUZZIFICAÇÃO)**

A saída da máquina de inferência é uma informação fuzzy, mesmo para uma entrada real, então para que se tenha uma informação de controle é necessário que as informações qualitativas sejam convertidas em informações quantitativas.

Os métodos mais utilizados para que essa conversão ocorra são: centro de gravidade, média ponderada dos centros e defuzzificação pelo máximo (WANG, 1997). Neste trabalho adotou-se a média ponderada dos centros.

## **CAPÍTULO 4**

### **SISTEMA FUZZY PARA CONTROLE DA ÁREA SUPERFICIAL**

#### **4.1 - INTRODUÇÃO**

O controle da área superficial é influenciado por diversos fatores dentre eles, o tempo de residência da partícula dentro da fornalha, a quantidade de hidróxido de alumina (alumina) que o forno está recebendo, a temperatura com que a fornalha está trabalhando, a má formação do grão na fase da precipitação e a variabilidade da temperatura ao longo do tempo.

Devido a inexistência de instrumentos capazes de fazer medições on line da área superficial, faz-se necessário o uso de coletas manuais periódicas em campo a cada turno, acarretando em um atraso de transporte nas informações de medições de 8 horas. As medições são realizadas em laboratório e são levadas em consideração quanto a rapidez nas tomadas de decisões

Conforme dito anteriormente, na Hydro Alunorte o controle da área superficial é realizado através da mudança do ponto de operação da temperatura e pressão da fornalha. Hoje, isto se faz de forma empírica o que leva o forno calcinador a trabalhar em pontos próximos a temperatura de formação da chamada alumina alfa, podendo tornar a operacionalidade instável.

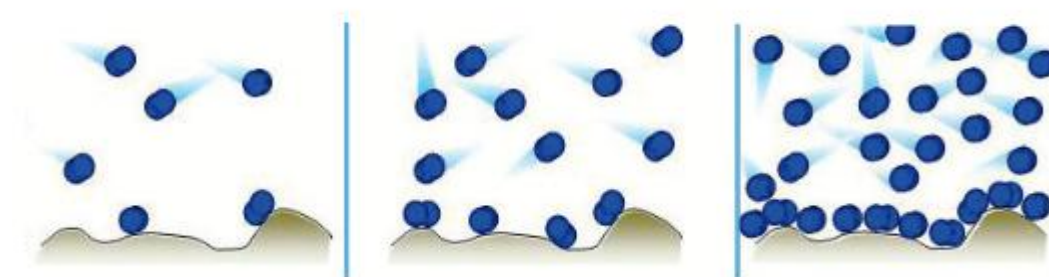
#### **4.2 - MÉTODO DE OBTENÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL**

A medição da área superficial é realizada por equipamentos laboratoriais, que empregam o processo químico da adsorção<sup>6</sup> física. O equipamento para análise de área superficial realiza medidas de área superficial específica através da determinação do volume de gás adsorvido fisicamente na superfície da amostra. O procedimento experimental utiliza gás de nitrogênio devido a sua facilidade de obtenção em estado puro e por apresentar interação relativamente alta com a grande maioria dos sólidos.

---

<sup>6</sup> É a adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida

Devido ao fenômeno de adsorção física estar relacionado a forças de interação molecular fracas entre o adsorbato — moléculas de gás — e adsorvente — superfície sólida da amostra —, as medidas no equipamento são realizadas em temperatura de nitrogênio líquido a fim de se obter valores detectáveis de adsorção. Ele é também o meio experimental pelo qual se pode quantificar a área de superfície de um sólido, o seu tamanho de poro e volume de poros distribuição, conforme pode ser visto na Figura 4.1, (MONOSORB, 2007).



**Figura 4.1** - Ilustração da medição da área superficial.

#### **4.3 - DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA**

A proposta deste trabalho é desenvolver uma estratégia de controle inteligente para executar a tarefa do especialista ou engenheiro de processo na escolha do *set point* de temperatura e pressão para o controle da fornalha

As variáveis de entrada foram divididas em duas categorias denominadas de:

- Variáveis de pré-calcinação: Variáveis do grão de hidrato, provenientes da formação pelo processo Bayer e da quantidade de material proveniente da produção do forno, sendo elas:
  - Granulometria do hidrato (#325): Variável de entrada para o forno. Com ela pode-se monitorar o tamanho do grão que irá “alimentar” o forno;
  - Rotação da rosca de alimentação do forno: variável que indica se o forno está operando, se em carga reduzida ou em plena carga.

- Variáveis de pós-calцинаção: Variáveis do grão da alumina, provenientes do processo de calcinação, sendo elas:
  - Índice de atrito: Variável de saída do forno, produto final, com ela pode-se monitorar o quanto a partícula está quebradiça;
  - Área superficial: Indica a morfologia do grão formado;
  - Tendência da área superficial: Verifica-se se a área superficial está com tendência crescente ou decrescente.

As variáveis de saídas serão:

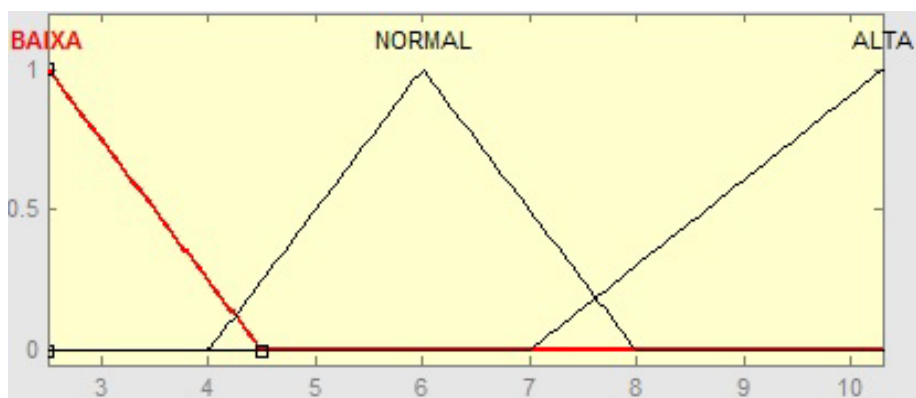
- Temperatura da fornalha: A temperatura age na área superficial do grão de forma a abrir ou fechar mais os poros nelas existente. Isto é, as duas variáveis agem de forma inversamente proporcional;
- Pressão da fornalha: Esta variável é utilizada para controlar o tempo de residência do grão dentro da fornalha, aumentando ou diminuindo o tempo de exposição da partícula à temperatura.

#### **4.4 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FUZZY**

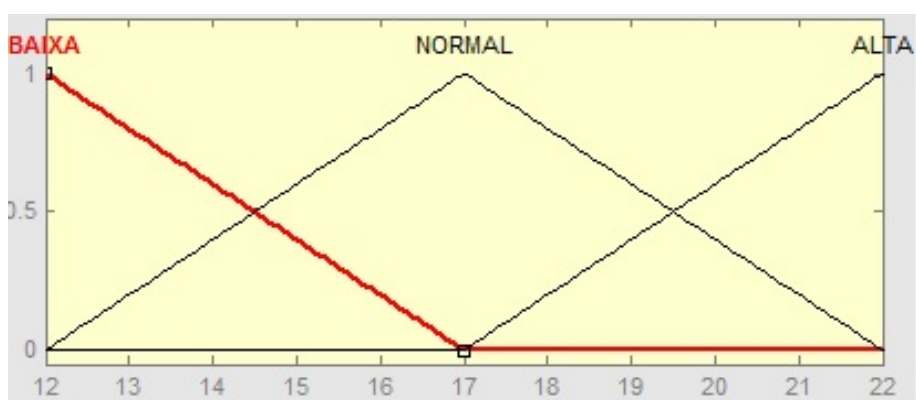
O sistema *fuzzy* escolhido será o do tipo Mamdani com 162 regras e a defuzzificação do tipo centro dos máximos, Para simplificar todos os conjuntos foram do tipo triangular, menos o conjunto da rotação que foi utilizado um trapezoidal;

##### **4.4.1 - DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA**

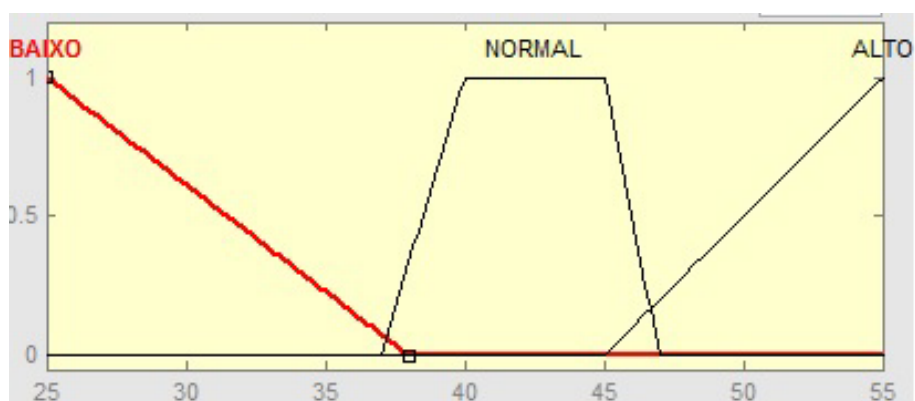
As Figuras 4.2 a 4.8 mostram a configuração dos conjuntos das variáveis de entrada e saída do sistema.



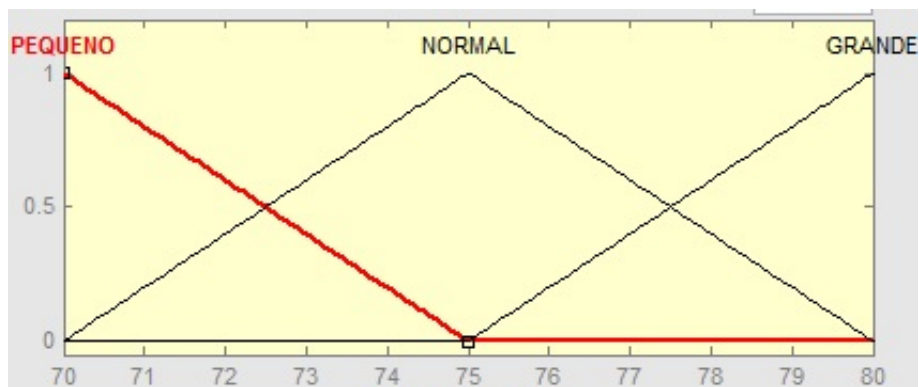
**Figura 4.2** - Conjunto de entrada – #325 granulometria do hidrato.



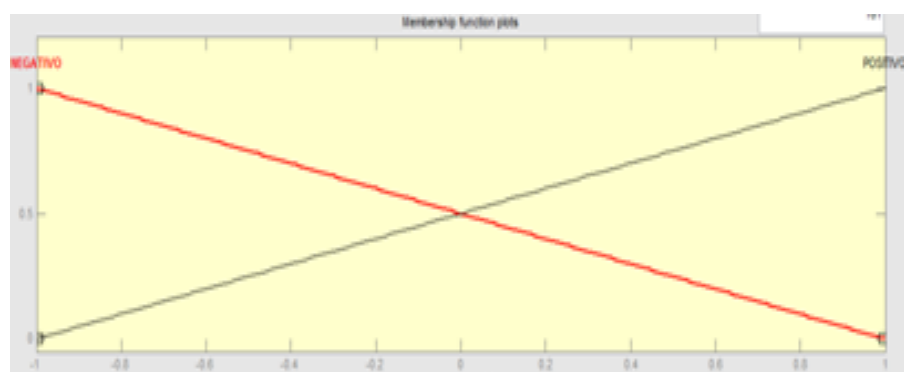
**Figura 4.3** - Conjunto de entrada - IA índice de atrito.



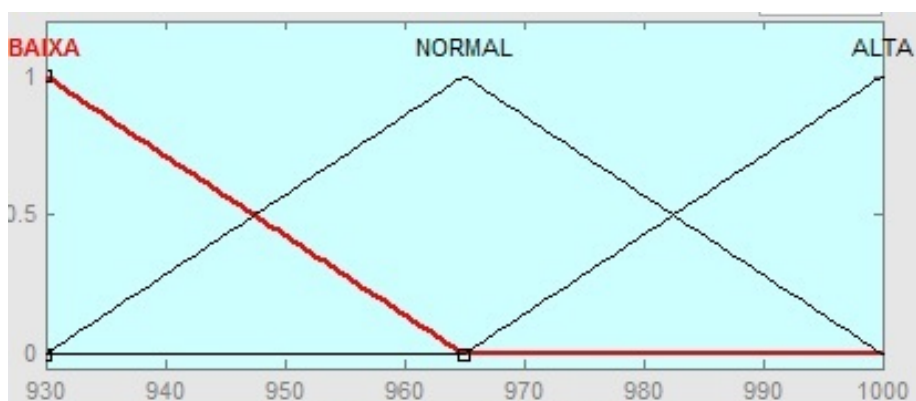
**Figura 4.4** - Conjunto de entrada – Rotação da rosca de alimentação do forno.



**Figura 4.5** - Conjunto de entrada – SSA área superficial.

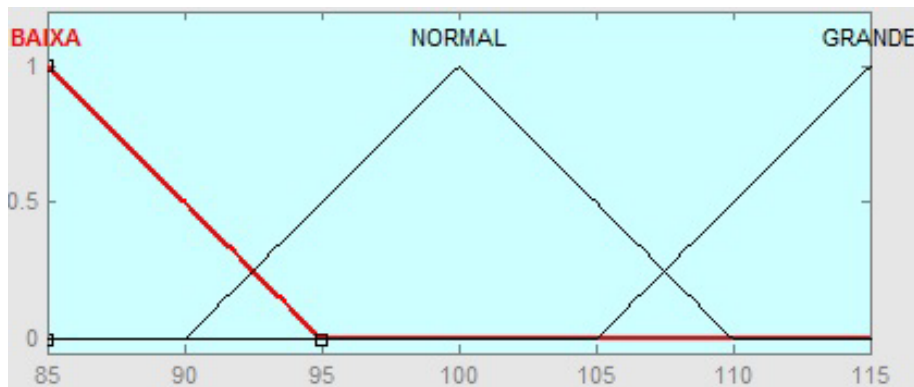


**Figura 4.6** - Conjunto de entrada – Tendência da área superficial.



**Figura 4.7** - Conjunto de saída - Temperatura da fornalha.





**Figura 4.8** - Conjunto de saída - Pressão da fornalha.

#### 4.4.2 - CRIAÇÃO DAS BASES DE REGRAS FUZZY

A quantidade de regras que um sistema fuzzy terá depende do universo dos conjuntos criados para as variáveis de entrada e será dado pela Eq. (4.1).

$$N\Phi = (N_{SSA} * N_{dSSA} * N_{IA} * N_{ROT} * N_{\#325}) \quad (4.1)$$

Utilizando a equação, verifica-se a quantidade de regras utilizadas.

$$N\Phi = (3 * 2 * 3 * 3 * 3) \Rightarrow N\Phi = 162 \text{ regras}$$

As regras foram obtidas baseadas nos conhecimentos dos especialistas e são mostradas no Anexo 1.

#### 4.5 - TÉCNICA DO *LOOK UP TABLE*

É uma ferramenta matemática empregada tanto para criar uma base de regras quanto para verificação da consistência da base de regras criada heurísticamente pelos especialistas. Mais detalhes desta técnica podem ser encontrados em WANG (1997).

Para este trabalho, utilizou-se uma base de dados coletados no período de Janeiro a Dezembro de 2014, para criação das regras podendo ser visto as regras criadas por esta técnica na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Comparação entre regras dos especialistas e as criadas pelo *Look up table*.

Nº DA REGRA	SE		Variáveis de entrada			ENTÃO - Variáveis de saída			
	IA	SSA	dSSA	Rotação	#325	REGRAS ESPECIALISTAS		LOOK UP TABLE	
						Temperatura	Pressão	Temperatura	Pressão
23	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	BAIXA	ALTA	ALTA
35	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL	ALTA
89	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
106	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA	NORMAL	ALTA
143	ALTA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	NORMAL	NORMAL	ALTA

## CAPÍTULO 5

### SIMULAÇÃO DO SISTEMA FUZZY

#### 5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão visto os resultados da aplicação do simulador fuzzy proposto neste trabalho. Será também mostrada as divergências geradas pelos resultados através das bases de regras criadas pelos especialistas com as bases de regras criadas pela técnica do *look up table*.

Para a simulação, dois calcinadores foram escolhidos, ambos com a mesma capacidade produtiva, quantidade de equipamentos e mesmo modo de operação, diferindo somente os tempos de suas manutenções aos que os mesmos foram submetidos.

Para a simulação foram utilizados dados laboratoriais coletados no período de 01/01/2014 até 01/01/2015 tanto das variáveis de entrada quanto das variáveis de saída, sendo necessário eliminar dados considerados inválidos para a simulação por se tratar de períodos de paradas do forno calcinador, para isto utilizou-se como regra: as temperaturas da fornalha abaixo de 940°C foram consideradas como forno parado, sendo eliminadas todas as variáveis daquele período correspondente.

Valores de temperatura e pressão da fornalha também foram coletados, para a realização de comparações de comportamento entre a operação real do forno com os resultados da simulação.

Os primeiros calcinadores a serem submetido aos testes foram os calcinadores das linhas 4 e 6, cujos tags<sup>7</sup> são: calcinador ‘D’ e calcinador ‘F’, sendo suas manutenções realizadas em Junho de 2013 e o outro em junho de 2014.

---

<sup>7</sup> Nome, apelido do equipamento, destinado a facilitar seu local de instalação

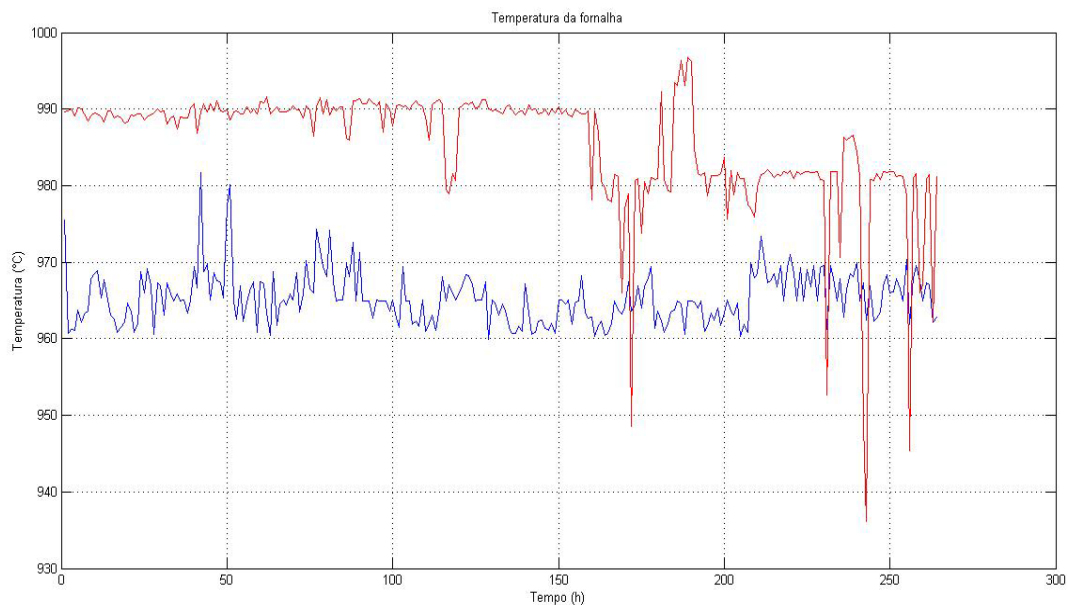
## 5.2 - ESTUDOS DE CASOS

Nesta seção, são apresentadas as simulações realizadas utilizando as regras feitas pelos especialistas e as regras obtidas pela técnica do *look up table*, de como seria o comportamento da temperatura e pressão da fornalha respectivamente, sendo o traçado vermelho os dados reais e o traçado azul os valores simulados.

### 5.2.1 - CALCINADOR 'D'

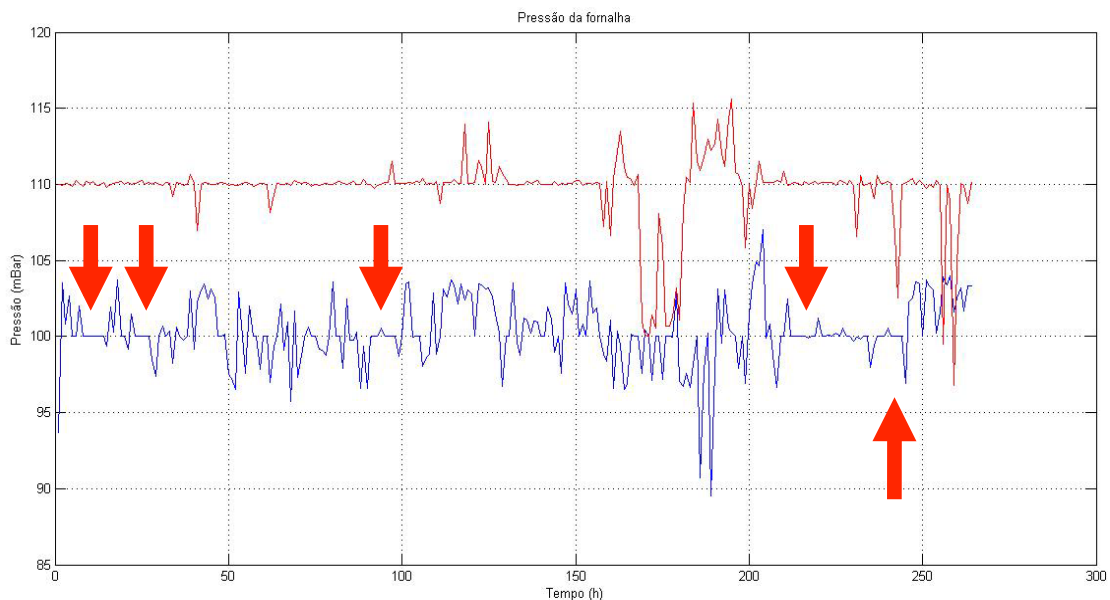
#### 5.2.1.1 - UTILIZANDO REGRAS DOS ESPECIALISTAS

Para a temperatura podemos verificar na Figura 5.1 que há vários pontos que a temperatura sugerida pelo simulador acompanha a tendência da temperatura real e limitada a uma faixa de trabalho entre 960° C a 980° C. Entretanto percebe-se que o sistema *fuzzy* com as regras indicadas pelos próprios especialistas (operadores) propõe valores de *setpoint* de temperatura mais distantes da zona de produção da alumina alfa, o que é desejável.



**Figura 5.1** - Resultado da simulação para a temperatura com as regras dos especialistas.

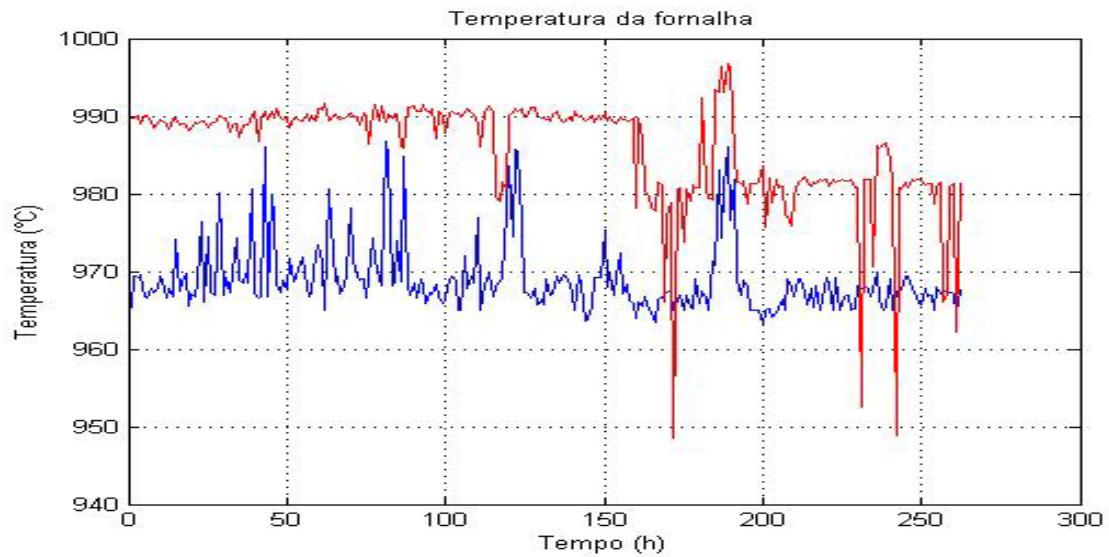
Para a pressão nota-se conforme pode ser visto na Figura 5.2 os destaques em vermelho indicam que a pressão simulada ficou fixa em vários pontos em 100mBar o que significa que algumas regras precisam ser ajustadas. Porém, verifica-se que a pressão sugerida pelo simulador acompanha a tendência da pressão medida e fica limitada a uma faixa de 100mBar a 105mBar.



**Figura 5.2** - Resultado da simulação para a pressão com as regras dos especialistas.

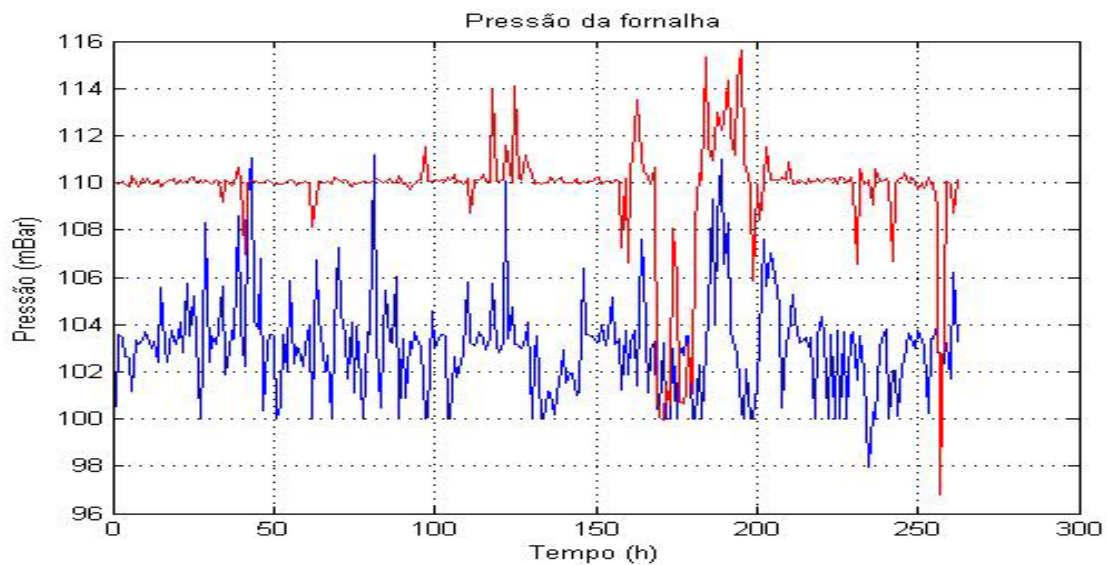
#### 5.2.1.2 - UTILIZANDO REGRAS DO LOOK UP TABLE

Para a temperatura podemos verificar na Figura 5.3 que há uma tendência de acompanhar a temperatura medida com ajuste de *set point*, sendo que faixa de trabalho mudou com relação a apresentada na Figura 5.1, esta fixa entre 970°C a 980°C com picos de 985°C. Com estes valores de temperatura, a qualidade da produção de alumina é melhor e a operação do calcinador mais segura.



**Figura 5.3** - Resultado da simulação para a temperatura com as regras ativadas pelo *look up table*.

Para pressão verifica-se na Figura 5.4 que os pontos fixos foram eliminados e a pressão tende a acompanhar o valor medido, pode-se verificar também que há uma maior variação dos resultados com relação a apresentada na Figura 5.2, sendo está na faixa de 100mBar a 106mBar com picos de 110mBar.

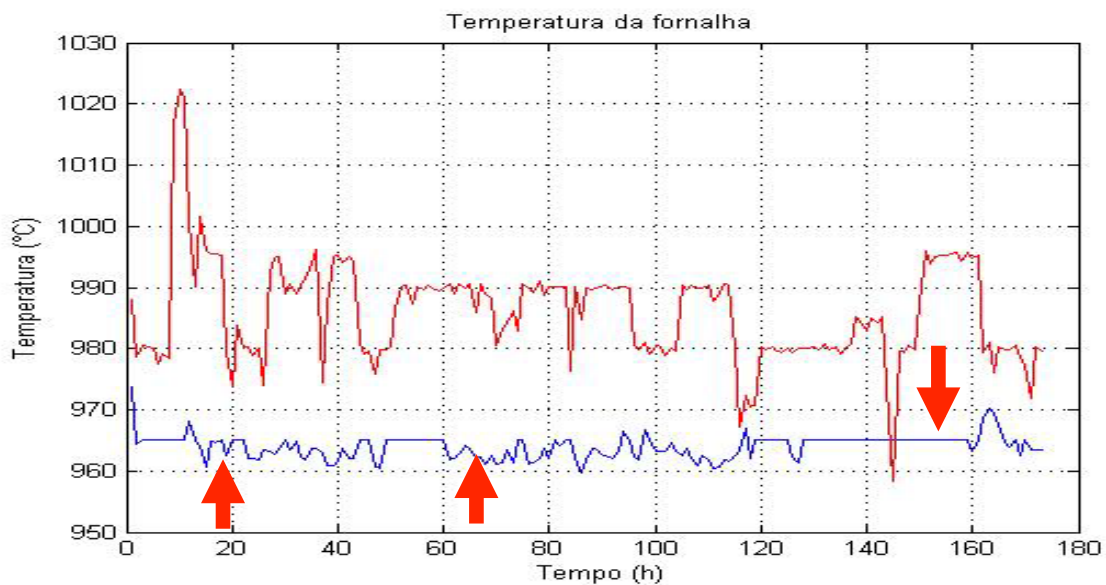


**Figura 5.4** - Resultado da simulação para a pressão com as regras ativadas pelo *look up table*.

## 5.2.2 - CALCINADOR 'F'

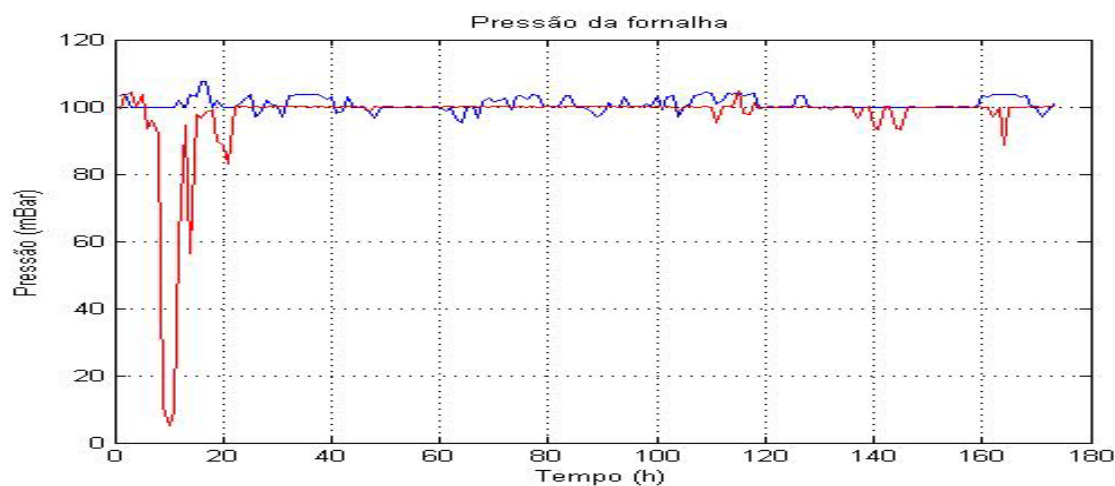
### 5.2.2.1 - UTILIZANDO REGRAS DOS ESPECIALISTAS

Para a temperatura nota-se conforme pode ser visto na Figura 5.5 os destaques em vermelho indicam que a temperatura simulada ficou fixa em vários pontos em 965°C o que significa que algumas regras precisam ser ajustadas. O valor simulado da temperatura não acompanha a tendência dos valores reais, mas com a faixa de trabalho fica entre 960°C a 970°C tendo picos de 985°C, a produção é melhorada e a operação do calcinador torna-se mais segura em comparação com os valores medidos em situações reais.



**Figura 5.5** - Resultado da simulação para a temperatura com as regras dos especialistas.

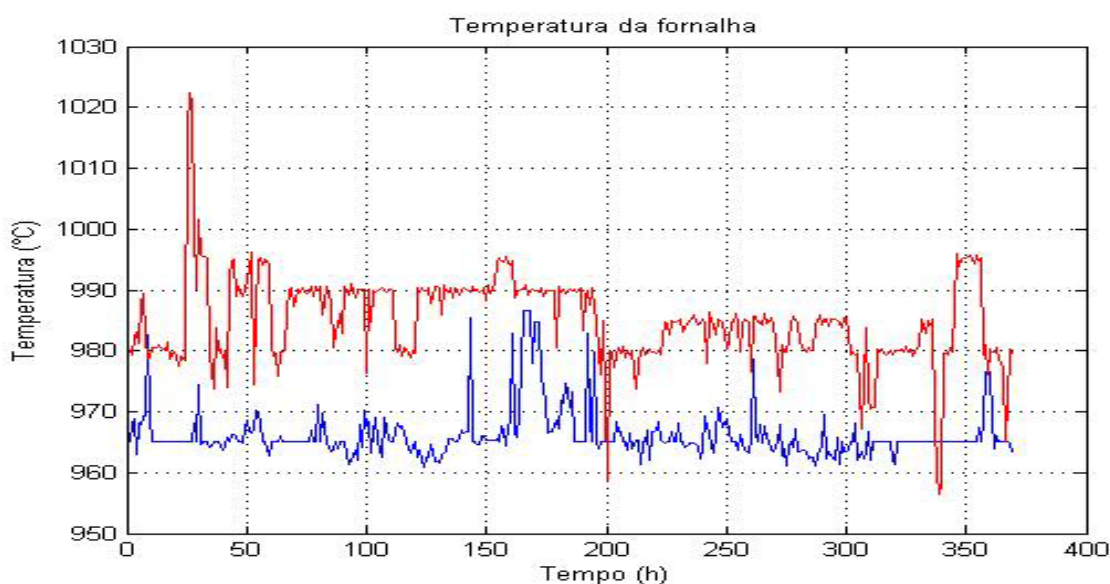
Para a pressão nota-se conforme pode ser visto na Figura 5.6 que mesmos que os valores simulados fiquem fixos em vários pontos em 100mBar, mesmos acompanham a tendência dos valores reais indicando a necessidade de ajuste nas regras. Os valores transitam na faixa de 100mBar.



**Figura 5.6** - Resultado da simulação para a pressão com as regras dos especialistas.

### 5.2.2.2 - UTILIZANDO REGRAS DO LOOK UP TABLE

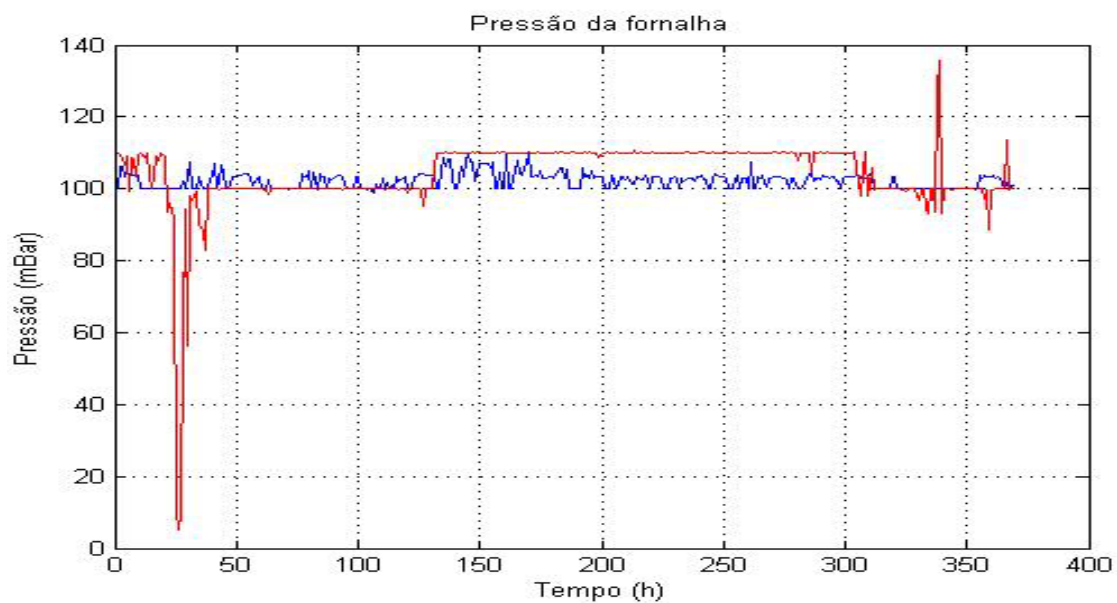
Para a temperatura podemos verificar na Figura 5.7 que houve diminuição dos pontos fixos, há uma tendência de acompanhar a temperatura real, não apresentando alteração na faixa de trabalho em relação à simulação anterior (base de regras do especialista). Isto também representa um melhor desempenho na produção do calcinador e uma maior segurança na operação.



**Figura 5.7** - Resultado da simulação para a temperatura com as regras ativadas pelo *look up table*.



Para a pressão nota-se conforme visto na Figura 5.8 que basicamente houve pouca alteração dos valores simulados, podendo-se chegar à conclusão que as regras tanto dos especialistas como do look up table estão correspondendo. Não houve também alteração na faixa de trabalho, ficando os valores da pressão transitando em torno de 100mBar.



**Figura 5.8** - Resultado da simulação para a pressão com as regras ativadas pelo *look up table*.

Os resultados mostrados acima, conclui-se que tanto o sistema *fuzzy* com regras exclusivamente propostas pelos especialistas, quanto a que possui regras ajustadas pela técnica do *look up table*, propõem valores de *setpoint* de temperatura e pressão que favorecem uma melhora na qualidade da alumina produzida e uma operação do calcinador mais segura. Entretanto o sistema *fuzzy* ajustado pela técnica do *look up table*, mostrou desempenho melhor, isto se deve ao fato desta técnica ajustar algumas regras existente com base em dados reais medidos.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 6.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho atingiu plenamente os objetivos propostos. Embora o trabalho tenha se limitado a simulações, pode-se verificar que os *set point's* sugeridos após a aplicação da técnica do *look up table* acompanharam mais os dados medidos na operação do calcinador.

Conforme pode ser visto, a temperatura de operação da fornalha conseguiu operar em pontos mais baixos do que está atualmente aplicado, o que indica que poderá se ganhar também na diminuição da formação da alumina alfa, tão prejudicial à operacionalidade do forno calcinador.

A simplicidade e o caráter inédito da estratégia de simulação das variáveis de controle do calcinador levam o autor a acreditar que a metodologia *fuzzy* se tornará uma ferramenta a mais para auxiliar nos trabalhos da Hydro Alunorte.

#### 6.2 - SUGESTÕES

Implementação prática do sistema fuzzy proposto em uma ou mais plantas reais, através da automatização da inserção do set point através da criação de um link entre o sistema de automação da Hydro Alunorte e o PI (Plant Information System), sistema historiador da OsiSoft® que armazena e mostra dados em tempo real com o aplicativo, através de planilhas do Excel.

## REFERÊNCIAS

- AGUADO, Alexandre Garcia; Cantanhede, Marco André – Lógica Fuzzy (2011).
- ANDRADE, Michelle e Jacques, Maria Alice Prudêncio. “ESTUDO COMPARATIVO DE CONTROLADORES DE MAMDANI E SUGENO PARA CONTROLE DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES ISOLADAS”. Programa de Pós-Graduação em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Maio de 2007.
- ALCOA. Alumina & Produtos Químicos, Processo de Produção. Aluminum Company of America – ALCOA [S.I.], 2011. Disponível em: [http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom\\_page/mercados\\_alumina\\_processo.asp](http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/mercados_alumina_processo.asp). Acesso em: 14 Fevereiro 2012.
- ALCOA AUSTRÁLIA. Environmental Review and Management Programme. Wagerup Unit Three Project Environment & Health Manager, Alcoa World Alumina Australia. Austrália: ENVIRON, pp. 53 – 69, 2005.
- LANA, J. J. “Dispositivo de Ajuste Carga - Frequência para Regulação de Velocidade Secundária Adaptativa com Supervisão por Lógica Fuzzy”. Monografia de Especialização, Universidade federal do Pará, Pará, Brasil, Maio, 2006.
- FERREIRA, T. F. “Sistemas P-Fuzzy Modificados para Dinâmicas Populacionais: Modelagens e Simulações”. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, Abril de 2012.
- FILHO, E. L. G. “Modelagem e Simulação de Calcinadores de Hidróxido de Alumínio em Leito Fluidizado” Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Abril de 2012.
- MAMDANI, E.H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. IEEE (Control and Science), v.121(12), p.1585-1588, 1974.
- MIRANDA, P./ Junior, M. B. V./ Kronbauer, D. “Sistema de Controle Difuso de Mamdani Aplicações: Pêndulo Invertido e outras” Monografia Graduação, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, Brasil, Dezembro de 2003.

MISSALLA, Michael/ Jarzembowski, Jan/ Bligh Roger/ Schmidt, Hans Werner  
“Increased availability and optimization of calciner performance due to automation”.  
Light Metal, TMS (The Minerals, Metals, Materials Society), 2009.

MONOSORB, Rapid Surface Analyser. “Catálogo do Instrumento” April 2007.

OLIVEIRA, S.R. Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações. Editora Manole  
Ltda, 2003.

SIMÕES, M.G., Controle e modelagem Fuzzy.

WANG, LX, A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall International Inc,  
1997.

## ANEXO 1

**Tabela A1.1 - Regras do sistema fuzzy.**

N° DA REGRA	SE Variáveis de entrada					ENTÃO - Variáveis de saída	
	IA	SSA	dSSA	Rotação	#325	Temperatura	Pressão
1	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	BAIXA	NORMAL
2	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	BAIXA	NORMAL
3	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	BAIXA	BAIXA
4	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	BAIXA	NORMAL
5	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	BAIXA	NORMAL
6	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
7	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	BAIXO
8	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	BAIXO
9	BAIXA	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	BAIXA
10	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	BAIXA	NORMAL
11	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	BAIXA	NORMAL
12	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	ALTA	BAIXA	BAIXA
13	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	BAIXA	NORMAL
14	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	BAIXA	NORMAL
15	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
16	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
17	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
18	BAIXA	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	BAIXA
19	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
20	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
21	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
22	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	NORMAL
23	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	BAIXA
24	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
25	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
26	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
27	BAIXA	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	BAIXA
28	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
29	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
30	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA

31	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	NORMAL
32	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	BAIXA
33	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
34	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
35	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	NORMAL
36	BAIXA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	BAIXA
37	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	BAIXA	NORMAL
38	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	BAIXA	NORMAL
39	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	BAIXA	BAIXA
40	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	BAIXA	NORMAL
41	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL
42	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
43	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	BAIXA	NORMAL
44	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	NORMAL
45	BAIXA	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	BAIXA
46	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
47	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
48	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
49	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	ALTA
50	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL
51	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	NORMAL
52	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	NORMAL
53	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	NORMAL
54	BAIXA	GRANDE	POSITIVO	ALTA	ALTA	ALTA	NORMAL
55	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	BAIXA
56	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
57	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
58	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	BAIXA
59	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	BAIXA
60	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
61	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
62	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	NORMAL
63	NORMAL	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	NORMAL

64	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	BAIXA
65	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
66	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
67	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	BAIXA
68	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	BAIXA
69	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
70	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
71	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	NORMAL
72	NORMAL	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	NORMAL
73	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	BAIXA	NORMAL
74	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	BAIXA	NORMAL
75	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	BAIXA	NORMAL
76	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	NORMAL
77	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL
78	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	NORMAL
79	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	ALTA
80	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	NORMAL	ALTA
81	NORMAL	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	ALTA	NORMAL	ALTA
82	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	NORMAL
83	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
84	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
85	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	BAIXA	ALTA
86	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	BAIXA	ALTA
87	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	ALTA	BAIXA	NORMAL
88	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	NORMAL
89	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	BAIXA
90	NORMAL	NORMAL	POSITIVO	ALTA	ALTA	ALTA	BAIXA
91	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	ALTA
92	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	NORMAL
93	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	NORMAL
94	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	ALTA	NORMAL
95	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	ALTA	NORMAL
96	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	NORMAL
97	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA

98	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	ALTA
99	NORMAL	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	ALTA	ALTA	NORMAL
100	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	ALTA
101	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	ALTA
102	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	ALTA
103	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	ALTA	ALTA
104	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	ALTA	ALTA
105	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	NORMAL
106	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA
107	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	ALTA
108	NORMAL	GRANDE	POSITIVO	ALTA	ALTA	ALTA	NORMAL
109	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	BAIXA
110	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
111	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
112	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	NORMAL
113	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL
114	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	NORMAL
115	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	NORMAL
116	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	BAIXA
117	ALTA	PEQUENO	NEGATIVO	ALTA	ALTA	ALTA	BAIXA
118	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	BAIXA
119	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	BAIXA
120	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	BAIXA
121	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	NORMAL
122	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL
123	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	NORMAL	ALTA	NORMAL	BAIXA
124	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	BAIXA
125	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	BAIXA
126	ALTA	PEQUENO	POSITIVO	ALTA	ALTA	ALTA	BAIXA
127	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	NORMAL	ALTA
128	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	NORMAL	ALTA
129	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	NORMAL
130	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	NORMAL	ALTA
131	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	NORMAL	ALTA



132	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	ALTA	NORMAL
133	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	NORMAL	ALTA
134	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	NORMAL
135	ALTA	NORMAL	NEGATIVO	ALTA	ALTA	ALTA	NORMAL
136	ALTA	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	ALTA	NORMAL
137	ALTA	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	ALTA	NORMAL
138	ALTA	NORMAL	POSITIVO	BAIXA	ALTA	NORMAL	NORMAL
139	ALTA	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	ALTA	NORMAL
140	ALTA	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	ALTA	NORMAL
141	ALTA	NORMAL	POSITIVO	NORMAL	ALTA	ALTA	BAIXO
142	ALTA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA
143	ALTA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	NORMAL
144	ALTA	NORMAL	POSITIVO	ALTA	ALTA	ALTA	NORMAL
145	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	BAIXA	ALTA	NORMAL
146	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	NORMAL	ALTA	BAIXO
147	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	BAIXA	ALTA	ALTA	BAIXO
148	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	BAIXA	ALTA	NORMAL
149	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	NORMAL	ALTA	NORMAL
150	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	NORMAL	ALTA	ALTA	BAIXO
151	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA
152	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	ALTA
153	ALTA	GRANDE	NEGATIVO	ALTA	ALTA	ALTA	NORMAL
154	ALTA	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	BAIXA	ALTA	NORMAL
155	ALTA	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	NORMAL	ALTA	NORMAL
156	ALTA	GRANDE	POSITIVO	BAIXA	ALTA	ALTA	BAIXO
157	ALTA	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	BAIXA	ALTA	NORMAL
158	ALTA	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	NORMAL	ALTA	NORMAL
159	ALTA	GRANDE	POSITIVO	NORMAL	ALTA	ALTA	NORMAL
160	ALTA	GRANDE	POSITIVO	ALTA	BAIXA	ALTA	ALTA
161	ALTA	GRANDE	POSITIVO	ALTA	NORMAL	ALTA	ALTA
162	ALTA	GRANDE	POSITIVO	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA

## ANEXO 2

### CÓDIGO FONTE UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DAS REGRAS ATIVADAS PELO MÉTODO DO LOOK UP TABLE

```
% Construção da base de regras do tipo look up table
% Referencia Wang

% Definindo Equação da reta
clc;clear;

rtn = @(dx,dy,x,b) (-dy/dx)*x+b;
rtp = @(dx,dy,x,b) (dy/dx)*x+b;

% Construção da pertinencia de IA

Figura(1)
% IA BAIXA
b=17/5; k =1;
for x = 12:.1:17
    baixaIA = rtn(5,1,x,b);
    BAIXA_IA(k)= baixaIA;
    k = k+1;
end
plot([12:.1:17],BAIXA_IA); hold on;

% IA MEDIA
b= -12/5;k = 1
for x = 12:.1:17
    mediaIA1 = rtp(5,1,x,b);
    MEDIA_IA(k) = mediaIA1;
    k = k+1;
end

b = 22/5;
for x = 17.1:.1:22
    mediaIA2 = rtn(5,1,x,b);
    MEDIA_IA(k) = mediaIA2;
    k = k+1;
end
plot(12:.1:22,MEDIA_IA, 'r');

% IA ALTA
b = -17/5; k = 1;
for x = 17:.1:22
    altaIA = rtp(5,1,x,b);
    ALTA_IA(k) = altaIA;
    k = k+1;
end
plot(17:.1:22,ALTA_IA, 'k');

xlabel('range de IA')
```

```

ylabel('pertinencia IA'); grid

% Construção da pertinencia de SSA

Figura(2)
% SSA BAIXA
b=75/5; k =1;
for x = 70:.1:75
    baixaSSA = rtn(5,1,x,b);
    BAIXA_SSA(k)= baixaSSA;
    k = k+1;
end
plot([70:.1:75],BAIXA_SSA); hold on;

% SSA MEDIA

b= -70/5;k = 1
for x = 70:.1:75
    mediaSSA1 = rtn(5,1,x,b);
    MEDIA_SSA(k) = mediaSSA1;
    k = k+1;
end

b = 80/5;
for x = 75.1:.1:80
    mediaSSA2 = rtn(5,1,x,b);
    MEDIA_SSA(k) = mediaSSA2;
    k = k+1;
end
plot(70:.1:80,MEDIA_SSA,'r');

% SSA ALTA

b = -75/5; k = 1;
for x = 75:.1:80
    altaSSA = rtn(5,1,x,b);
    ALTA_SSA(k) = altaSSA;
    k = k+1;
end
plot(75:.1:80,ALTA_SSA,'k');

xlabel('range de SSA')
ylabel('pertinencia SSA'); grid

% Construção da pertinencia de dSSA

Figura(3)
% dSSA Negativo
b=0.5; k =1;
for x = -1:.1:1
    negdSSA = rtn(2,1,x,b);
    NEGATIVO_dSSA(k)= negdSSA;
    k = k+1;
end
plot([-1:.1:1],NEGATIVO_dSSA,'r'); hold on;

% dSSA Positivo

b= 0.5; k =1;
for x = -1:.1:1

```

```

        posdSSA = rtp(2,1,x,b);
        POSITIVO_dSSA(k)= posdSSA;
        k = k+1;
end
plot([-1:.1:1],POSITIVO_dSSA); hold on;

xlabel('range de dSSA')
ylabel('pertinencia dSSA'); grid

% Construção da pertinencia de Rotação

Figura(4)

% Rotação BAIXA
b=38/13; k =1;
for x = 25:.1:38
    baixoROT = rtn(13,1,x,b);
    BAIXO_ROTACAO(k)= baixoROT;
    k = k+1;
end
plot([25:.1:38],BAIXO_ROTACAO,'r'); hold on;

% ROTACA NORMAL

b= -37/3; k =1;
for x = 37:.1:40
    normalROT1 = rtp(3,1,x,b);
    NORMAL_ROTACAO(k)= normalROT1;
    k = k+1;
end

for x = 40.1:.1:45
    normalROT2 = 1;
    NORMAL_ROTACAO(k)= normalROT2;
    k = k+1;
end

b= 47/2;
for x = 45.1:.1:47
    normalROT3 = rtn(2,1,x,b);
    NORMAL_ROTACAO(k)= normalROT3;
    k = k+1;
end

plot([37:.1:47],NORMAL_ROTACAO,'k'); hold on;

% Rotação ALTA

b= -45/10; k =1;
for x = 45:.1:55
    altaROT = rtp(10,1,x,b);
    ALTA_ROTACAO(k)= altaROT;
    k = k+1;
end
plot([45:.1:55],ALTA_ROTACAO,'b'); hold on;

xlabel('range de ROTAÇÃO')
ylabel('pertinencia ROTAÇÃO'); grid

% Construção da pertinencia de mesh #325

```

```

Figura(5)
% #325 BAIXA
b= 4.5/2; k =1;
for x = 2.5:.1:4.5
    baixaMESH = rtn(2,1,x,b);
    BAIXA_MESH(k)= baixaMESH;
    k = k+1;
end
plot([2.5:.1:4.5],BAIXA_MESH); hold on;

% #325 MEDIA

b= -4/2;k = 1
for x = 4:.1:6
    mediaMESH1 = rtp(2,1,x,b);
    MEDIA_MESH(k) = mediaMESH1;
    k = k+1;
end

b = 8/2;
for x = 6.1:.1:8
    mediaMESH2 = rtn(2,1,x,b);
    MEDIA_MESH(k) = mediaMESH2;
    k = k+1;
end
plot(4:.1:8,MEDIA_MESH,'k');

% #325 ALTA

b = -7/3.3; k = 1;
for x = 7:.1:10.3
    altaMESH = rtp(3.3,1,x,b);
    ALTA_MESH(k) = altaMESH;
    k = k+1;
end
plot(7:.1:10.3,ALTA_MESH,'r');

xlabel('range de MESH 325')
ylabel('pertinencia MESH 325'); grid

% DEFINIÇÃO DAS PERTINENCIAS DE SAIDA

Figura(6)
% TEMPERATURA BAIXA

b= 965/35; k =1;
for x = 930:.1:965
    baixaTEMPERATURA = rtn(35,1,x,b);
    BAIXA_TEMPERATURA(k)= baixaTEMPERATURA;
    k = k+1;
end
plot([930:.1:965],BAIXA_TEMPERATURA); hold on;

% TEMPERATURA MEDIA

b= -930/35;k = 1
for x = 930:.1:965
    mediaTEMPERATURA1 = rtp(35,1,x,b);
    MEDIA_TEMPERATURA(k) = mediaTEMPERATURA1;

```

```

        k = k+1;
end

b = 1000/35;
for x = 965:.1:1000
    mediaTEMPERATURA2 = rtn(35,1,x,b);
    MEDIA_TEMPERATURA(k) = mediaTEMPERATURA2;
    k = k+1;
end
plot(930:.1:1000,MEDIA_TEMPERATURA,'k');

% TEMPERATURA ALTA

b = -965/35; k = 1;
for x = 965:.1:1000
    altaTEMPERATURA = rtp(35,1,x,b);
    ALTA_TEMPERATURA(k) = altaTEMPERATURA;
    k = k+1;
end
plot(965:.1:1000,ALTA_TEMPERATURA,'r');

xlabel('range de TEMPERATURA')
ylabel('pertinencia TEMPERATURA'); grid

Figura(7)
% PRESSÃO BAIXA

b= 95/10; k =1;
for x = 85:.1:95
    baixaPRESSAO = rtn(10,1,x,b);
    BAIXA_PRESSAO(k)= baixaPRESSAO;
    k = k+1;
end
plot([85:.1:95],BAIXA_PRESSAO); hold on;

% PRESSÃO NORMAL

b= -90/10;k = 1
for x = 90:.1:100
    mediaPRESSAO1 = rtp(10,1,x,b);
    NORMAL_PRESSAO(k) = mediaPRESSAO1;
    k = k+1;
end

b = 110/10;
for x = 100.1:.1:110
    mediaPRESSAO2 = rtn(10,1,x,b);
    NORMAL_PRESSAO(k) = mediaPRESSAO2;
    k = k+1;
end
plot(90:.1:110,NORMAL_PRESSAO,'k');

% PRESSÃO ALTA

b = -105/10; k = 1;
for x = 105:.1:115
    altaPRESSAO = rtp(10,1,x,b);
    ALTA_PRESSAO(k) = altaPRESSAO;
    k = k+1;
end

```

```

plot(105:.1:115,ALTA_PRESSAO,'r');

xlabel('range de PRESSÃO')
ylabel('pertinencia PRESSÃO'); grid

% Carregar os dados reais

Dadospteste2

% Definição das pertinencias para cada dado real

% PARA A ENTRADA IA

for k = 1:length(IA)
    iia1 = IA(k);
% baixa
    ubaixaIA = rtn(5,1,iia1,17/5);
    if ubaixaIA <= 0; ubaixaIA = 0; end
    if ubaixaIA >= 1; ubaixaIA = 1; end

    B_IA(k) = ubaixaIA;

% Media
    if (iia1 <= 17)
        umediaIA = rtp(5,1,iia1,-12/5);
    elseif (iia1 > 17)
        umediaIA = rtn(5,1,iia1,22/5);
    end

    if umediaIA <= 0; umediaIA = 0; end
    if umediaIA >= 1; umediaIA = 1; end

    M_IA(k) = umediaIA;

% Alta
    ualtaIA = rtp(5,1,iia1,-17/5);
    if ualtaIA <= 0; ualtaIA = 0; end
    if ualtaIA >= 1; ualtaIA = 1; end

    A_IA(k) = ualtaIA;

end

PertIA = [B_IA', M_IA', A_IA']

% PARA A ENTRADA SSA

for k = 1:length(SSA)
    ssa1 = SSA(k);
% baixa
    ubaixaSSA = rtn(5,1,ssa1,75/5);
    if ubaixaSSA <= 0; ubaixaSSA = 0; end
    if ubaixaSSA >= 1; ubaixaSSA = 1; end

    B_SSA(k) = ubaixaSSA;

% Media
    if (ssa1 <= 75)

```

```

    umediaSSA = rtp(5,1,ssa1,-70/5);
elseif (ssa1 > 75)
    umediaSSA = rtn(5,1,ssa1,80/5);
end
    if umediaSSA <= 0; umediaSSA = 0; end
    if umediaSSA >= 1; umediaSSA = 1; end

    M_SSA(k) = umediaSSA;

% Alta
    ualtaSSA = rtp(5,1,ssa1,-75/5);
    if ualtaSSA <= 0; ualtaSSA = 0; end
    if ualtaSSA >= 1; ualtaSSA = 1; end

    A_SSA(k) = ualtaSSA;

end

PertSSA = [B_SSA', M_SSA', A_SSA' SSA]

% PARA A ENTRADA dSSA

for k = 1:length(dSSA)
    dssa1 = dSSA(k);
% NEGATIVO
    unegdSSA = rtn(2,1,dssa1,.5);
    if unegdSSA <= 0; unegdSSA = 0; end
    if unegdSSA >= 1; unegdSSA = 1; end

    NEG_dSSA(k) = unegdSSA;

% POSITIVO
    uposdSSA = rtp(2,1,dssa1,.5);
    if uposdSSA <= 0; uposdSSA = 0; end
    if uposdSSA >= 1; uposdSSA = 1; end

    POS_dSSA(k) = uposdSSA;

end

PertdSSA = [NEG_dSSA', POS_dSSA', dSSA]

% PARA A ENTRADA ROTAÇÃO

for k = 1:length(ROT)
    rot1 = ROT(k);
% baixa
    ubaixoROT = rtn(13,1,rot1,38/13);
    if ubaixoROT <= 0; ubaixoROT = 0; end
    if ubaixoROT >= 1; ubaixoROT = 1; end

    B_ROT(k) = ubaixoROT;

% Media

if (rot1 <= 40)
    unormalROT = rtp(3,1,rot1,-37/3);
elseif (rot1 > 40)&&(rot1<=45)
    unormalROT = 1;
elseif (rot1 > 45)

```



```

    unormalROT = rtn(2,1,rot1,47/2);
end
    if unormalROT <= 0; unormalROT = 0; end
    if unormalROT >= 1; unormalROT = 1; end

    NORMAL_ROT(k) = unormalROT;

% Alta
    ualtaROT = rtp(10,1,rot1,-45/10);
    if ualtaROT <= 0; ualtaROT = 0; end
    if ualtaROT >= 1; ualtaROT = 1; end

    A_ROT(k) = ualtaROT;

end

PertROT = [B_ROT', NORMAL_ROT', A_ROT', ROT]

% PARA A ENTRADA MESH 325

for k = 1:length(M325)
    mesh1 = M325(k);
% baixa
    ubaixoMESH = rtn(2,1,mesh1,4.5/2);
    if ubaixoMESH <= 0; ubaixoMESH = 0; end
    if ubaixoMESH >= 1; ubaixoMESH = 1; end

    B_MESH(k) = ubaixoMESH;

% Media
    if (mesh1 <= 6)
        umediaMESH = rtp(2,1,mesh1,-4/2);
    elseif (mesh1 > 6)
        umediaMESH = rtn(2,1,mesh1,8/2);
    end
    if umediaMESH <= 0; umediaMESH = 0; end
    if umediaMESH >= 1; umediaMESH = 1; end

    NORMAL_MESH(k) = umediaMESH;

% Alta
    ualtaMESH = rtp(3.3,1,mesh1,-7/3);
    if ualtaMESH <= 0; ualtaMESH = 0; end
    if ualtaMESH >= 1; ualtaMESH = 1; end

    A_MESH(k) = ualtaMESH;

end

PertMESH = [B_MESH', NORMAL_MESH', A_MESH', M325]

% PARA A SAIDA TEMPERATURA

for k = 1:length(T)
    temp1 = T(k);
% baixa
    ubaixaT = rtn(35,1,temp1,965/35);
    if ubaixaT <= 0; ubaixaT = 0; end
    if ubaixaT >= 1; ubaixaT = 1; end

```

```

    B_T(k) = ubaixaT;

% Media

if (temp1 <= 965)
    umediaT = rtp(35,1,temp1,-930/35);
elseif(temp1 > 965)
    umediaT = rtn(35,1,temp1,1000/35);
end
    if umediaT <= 0; umediaT = 0; end
    if umediaT >= 1; umediaT = 1; end

    NORMAL_T(k) = umediaT;

% Alta
    ualtaT = rtp(35,1,temp1,-965/35);
    if ualtaT <= 0; ualtaT = 0; end
    if ualtaT >= 1; ualtaT = 1; end

    A_T(k) = ualtaT;

end

PertT = [B_T', NORMAL_T', A_T', T]

% PARA A SAIDA PRESSÃO

for k = 1:length(P)
    pre1 = P(k);
% baixa
    ubaixaP = rtn(10,1,pre1,95/10);
    if ubaixaP <= 0; ubaixaP = 0; end
    if ubaixaP >= 1; ubaixaP = 1; end

    B_P(k) = ubaixaP;

% Media

if (pre1 <= 100)
    umediaP = rtp(10,1,pre1,-90/10);
elseif(pre1 > 100)
    umediaP = rtn(10,1,pre1,110/10);
end
    if umediaP <= 0; umediaP = 0; end
    if umediaP >= 1; umediaP = 1; end

    NORMAL_P(k) = umediaP;

% Alta
    ualtaP = rtp(10,1,pre1,-105/10);
    if ualtaP <= 0; ualtaP = 0; end
    if ualtaP >= 1; ualtaP = 1; end

    A_P(k) = ualtaP;

end

PertP = [B_P', NORMAL_P', A_P', P]

```

```

% Verificação das regras acionadas

% ENTRADAS

% PARA IA
char REGRA_IA{};
for k = 1:length(IA)
    if (PertIA(k,1) > PertIA(k,2) > PertIA(k,3)); rr = PertIA(k,1);
result = 'BAIXA';end
    if (PertIA(k,2) > PertIA(k,1) > PertIA(k,3)); rr = PertIA(k,2);
result = 'NORMAL';end
    if (PertIA(k,3) > PertIA(k,2) > PertIA(k,1)); rr = PertIA(k,3);
result = 'ALTA'; end
    REGRA_IA(k,1) = {result};
    pPertIA(k,1) = rr;
end

% PARA SSA
char REGRA_SSA{};
for k = 1:length(SSA)
    if (PertSSA(k,1) > PertSSA(k,2) > PertSSA(k,3)); rr =
PertSSA(k,1); result = 'BAIXA';end
    if (PertSSA(k,2) > PertSSA(k,1) > PertSSA(k,3)); rr =
PertSSA(k,2); result = 'NORMAL';end
    if (PertSSA(k,3) > PertSSA(k,2) > PertSSA(k,1)); rr =
PertSSA(k,3); result = 'ALTA'; end
    REGRA_SSA(k,1) = {result};
    pPertSSA(k,1) = rr;
end

% PARA dSSA
char REGRA_dSSA{};
for k = 1:length(dSSA)
    if (PertdSSA(k,1) > PertdSSA(k,2)); rr = PertdSSA(k,1); result
= 'NEGATIVO';end
    if (PertdSSA(k,2) > PertdSSA(k,1)); rr = PertdSSA(k,2); result
= 'POSITIVO';end
    REGRA_dSSA(k,1) = {result};
    pPertdSSA(k,1) = rr;
end

% PARA ROTAÇÃO
char REGRA_ROT{};
for k = 1:length(ROT)
    if (PertROT(k,1) > PertROT(k,2) > PertROT(k,3)); rr =
PertROT(k,1); result = 'BAIXO';end
    if (PertROT(k,2) > PertROT(k,1) > PertROT(k,3)); rr =
PertROT(k,2); result = 'NORMAL';end
    if (PertROT(k,3) > PertROT(k,2) > PertROT(k,1)); rr =
PertROT(k,3); result = 'ALTO'; end
    REGRA_ROT(k,1) = {result};
    pPertROT(k,1) = rr;
end

% PARA MESH 325
char REGRA_MESH{};
for k = 1:length(M325)
    if (PertMESH(k,1) > PertMESH(k,2) > PertMESH(k,3)); rr =
PertMESH(k,1); result = 'BAIXA';end

```

```

        if (PertMESH(k,2) > PertMESH(k,1) > PertMESH(k,3)); rr =
PertMESH(k,2); result = 'NORMAL';end
        if (PertMESH(k,3) > PertMESH(k,2) > PertMESH(k,1)); rr =
PertMESH(k,3); result = 'ALTA'; end
        REGRA_MESH(k,1) = {result};
        pPertMESH(k,1) = rr;
end

% SAIDAS

% TEMPERATURA
char REGRA_T{};
for k = 1:length(T)
    if (PertT(k,1) > PertT(k,2) > PertT(k,3)); rr = PertT(k,1);
result = 'BAIXA';end
    if (PertT(k,2) > PertT(k,1) > PertT(k,3)); rr = PertT(k,2);
result = 'NORMAL';end
    if (PertT(k,3) > PertT(k,2) > PertT(k,1)); rr = PertT(k,3);
result = 'ALTA'; end
    REGRA_T(k,1) = {result};
    pPertT(k,1) = rr;
end

% PRESSÃO
char REGRA_P{};
for k = 1:length(P)
    if (PertP(k,1) > PertP(k,2) > PertP(k,3)); rr = PertP(k,1);
result = 'BAIXA';end
    if (PertP(k,2) > PertP(k,1) > PertP(k,3)); rr = PertP(k,2);
result = 'NORMAL';end
    if (PertP(k,3) > PertP(k,2) > PertP(k,1)); rr = PertP(k,3);
result = 'ALTA'; end
    REGRA_P(k,1) = {result};
    pPertP(k,1) = rr;
end

% OPERADORES SE E ENTÃO

char SE{};
char ENTÃO{};
for k = 1:length(P)
    SE(k,1) = {'SE'};
    ENTÃO(k,1) = {'ENTÃO'};
end

% CONSTRUINDO TODAS AS REGRAS ATIVADAS
display('SE IA e SSA e dSSA e ROT e #325 ENTÃO Temperatura e
Pressão ')
REGRAS = [SE, REGRA_IA, REGRA_SSA, REGRA_dSSA, REGRA_ROT,
REGRA_MESH, ENTÃO, REGRA_T, REGRA_P ]

% Técnica para resolução de regras conflitantes

RC =
pPertIA.*pPertSSA.*pPertdSSA.*pPertROT.*pPertMESH.*pPertT.*pPertP

```

### ANEXO 3

#### PROGRAMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*

```
% Programa para a chamada de dados e simulação de um forno da área
da
% calcinação na Alunorte
% desenvolvido por: Msc. Renan Landau Paiva de Medeiros
%                      Eng. Hugo Costa
% Dissertação de Mestrado Hugo Costa

% Realização da leitura de dados

clc; clear;

Dadospteste2      % chamada do arquivo (.m)

SSA_FORNO = readfis('SSA_FORNO_look.fis');

ent = [IA SSA dSSA ROT M325];
saida = evalfis(ent,SSA_FORNO);

Figura(1) % Plot da Temperatura
Temperatura = saida(:,1);
plot([1:length(IA)],Temperatura); hold on;
plot([1:length(IA)],T,'r');
xlabel('Tempo (h)')
ylabel('Temperatura (°C)')
Title('Temperatura da fornalha'); grid;
MediaTemperatura = sum(Temperatura/(length(Temperatura)))

Figura(2) % Plot da Pressão
Pressao = saida(:,2);
plot([1:length(IA)],Pressao); hold on;
plot([1:length(IA)],P,'r');
xlabel('Tempo (h)')
ylabel('Pressão (mBar)')
Title('Pressão da fornalha'); grid;
MediaPressao = sum(Pressao/(length(Pressao)))
```