

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

VANILSON GOMES PEREIRA

CONTROLE AUTOMÁTICO DE ADIÇÃO DE AlF_3
EM CUBAS DE REDUÇÃO DE ALUMÍNIO,
USANDO LÓGICA FUZZY

DM 34/2005

UFPA/CT/PPGEE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
BELÉM-PARÁ-BRASIL

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

VANILSON GOMES PEREIRA

CONTROLE AUTOMÁTICO DE ADIÇÃO DE AlF_3
EM CUBAS DE REDUÇÃO DE ALUMÍNIO,
USANDO LÓGICA FUZZY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

UFPA/CT/PPGEE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
BELÉM-PARÁ-BRASIL

2005

P436c Pereira, Vanilson Gomes
Controle automático de adição de AlF_3 em cubas de redução de alumínio,
usando lógica fuzzy/Vanilson Gomes Pereira; orientador, Roberto Célio Limão
de Oliveira.-2005
Dissertação(Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2005.
1. Sistemas difusos. 2. Controle automático. 3. Controle de processos-
automação. I. Título.

CDD - 21. ed. 006.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTROLE AUTOMÁTICO DE ADIÇÃO DE AlF_3 EM CUBAS DE REDUÇÃO DE ALUMÍNIO, USANDO LÓGICA FUZZY

AUTOR: VANILSON GOMES PEREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA: / /

BANCA EXAMINADORA:

.....
Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira (UFPA)- Orientador

.....
Prof. Dr. Walter Barra Junior (UFPA)-Membro

.....
Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior(UFPA)-Membro

VISTO:

.....
Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

Coordenador do PPGEE/CT/UFPA

*Dedico esta dissertação a meus pais,
cujo exemplo de honestidade e trabalho
tem sido um norteador para a minha vida,
e para minha namorada, que tem
me dado apoio nos momentos mais difíceis
e mostrado a simplicidade de ter esperança.*

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos para:

- DEUS, por estar presente em todos os momentos de minha vida me inspirando e iluminando meu caminho.
- o professor doutor Roberto Célio Limão de Oliveira, pela orientação e oportunidade de integração em seus projetos;
- a equipe de Automação/Redução da ALBRAS: André Dourado, Fabrício Alves de Oliveira, Nelson Dourado, Vanderley Oliveira Fernandes (que nos ajudou a entender questões relevantes ao processo) e principalmente ao Marcos Castro que esteve acompanhando e contribuindo pela realização deste projeto;
- e... em especial ao colega doutorando Eng. Marcos Vinicius Barreiros Medeiros Branco, pela amizade e pela sua participação no projeto;
- ao Fábio Mendes Soares, integrante da equipe de automação e controle(UFPA), contribuindo na fase de implementação do projeto;
- ao Engenheiro de Processo Handerson Pena e ao Técnico de Processo Giancarlo , pelo auxílio nos tópicos referentes à química de banho e pela suas contribuições durante a entrevista técnica;
- ao Coordenador de Projetos da Redução/Fundição/ALBRAS Eng. Guilherme Epifânio, pela sua visão tecnológica, apoio e incentivo à implantação de novas tecnologias na indústria de produção de alumínio primário.
- a Gerência de Redução e Fundição pela confiança depositada na parceria entre Universidade Federal do Pará e ALBRAS, durante o período de pesquisa;
- a ALBRAS - Alumínio Brasileiro S/A, pela oportunidade de realização deste trabalho;
- aos colegas do Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica da UFPA.

Resumo

Este trabalho descreve um sistema de análise de dados com a finalidade de gerar um sistema de controle utilizando técnica inteligente para adição de fluoreto de alumínio (AlF_3) em fornos de redução de alumínio. O projeto baseia-se nos conceitos de lógica fuzzy, nos quais o conhecimento acumulado pelo especialista do processo é traduzido de maneira qualitativa em um conjunto de regras lingüísticas do tipo SE<condição> ENTÃO<ação>. A utilização desta técnica inteligente para o controle de adição de fluoreto busca representar explicitamente um conhecimento qualitativo, detido pelos operadores de cubas eletrolíticas. Devido o sistema convencional não contemplar as variações dos fenômenos que envolvem a dinâmica do processo, um controlador fuzzy foi implmentado no sistema real para tomadas de decisões, utilizando o modelo mínimo de Mandani. Baseado neste modelo, as variáveis de processo para a entrada do sistema fuzzy, tais como **temperatura de banho** e **percentual de fluoreto** foram manipuladas para estimar a tendência de subida e descida, respectivamente, através do método mínimos quadrados(MMQ). O controlador fuzzy é aplicado para calcular a quantidade de fluoreto de alumínio (AlF_3) a ser adicionado na cuba eletrolítica de forma automática sem a necessidade da intervenção do especialista do processo.

A motivação para o uso de um sistema de controle fuzzy se deve ao fato de não se ter disponível um modelo dinâmico do processo de adição do fluoreto na cuba eletrolítica. Esta falta de modelagem se deve ao fato de grande complexidade dos fenômenos envolvidos em uma cuba que são processos termodinâmicos e eletromagnéticos acoplados.

Abstract

This work describes a data analysis system, which generates an intelligent aluminum fluoride (AlF_3) addition strategy for electrolytic cells. The project is based on Fuzzy logic concepts, wherein the knowledge accumulated by the process specialist is translated in a qualitative manner into a set of linguistic rules such as: IF<condition> THEN<action>. The use of this fuzzy technique for fluoride addition control seeks to explicitly represent an implicit knowledge, retained by the cell operators of the electrolytic cells. Due the conventional system not to contemplate the variations of the phenomena that they involve the dynamics of the process, a controller fuzzy was implemented in the real system for taking of decisions, using the minimum model of Mandani. Based this model, the process variables to input fuzzy system, such as bath temperature and fluoride of aluminum were manipulated to estimate the tendency up and down, through the Method of Least Squares(MLS). The controller fuzzy is applied to calculate the amount of fluoride of aluminum (AlF_3) to be added in the electrolytic cells in an automatic way without the need of the the specialist's of the process intervention.

The use of a fuzzy control system is justified by the fact of not having an available dynamic model for aluminum fluoride addition process in electrolytic cells. This lack of modeling is due to the great complexity of the phenomena involved in a cell, which are thermodynamic and electromagnetic processes linked together.

Conteúdo

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
1 Introdução	1
1.1 Estado da Arte	p. 2
1.2 Organização do Trabalho	p. 3
2 A Indústria do Alumínio	5
2.1 A ALBRAS	p. 5
2.2 A Gerência de Redução	p. 6
2.3 O Setor de Automação da Redução/Fundição	p. 6
2.4 O Controle de Cubas eletrolíticas no Mundo	p. 7
2.4.1 Anodo	p. 7
2.5 Disposição das Cubas	p. 8
2.6 <i>Layout</i> do Barramento	p. 9
2.7 Sistema de Redução do Alumínio	p. 9

2.7.1	Estrutura Física da Cuba	p. 10
2.7.2	Rotina Operacional	p. 11
3	Química de Banho em Cubas de Redução de Alumínio	12
3.1	Composição do Eletrólito	p. 12
3.2	Controle do Balanço Térmico e Balanço de Massa	p. 14
3.3	Consumo de Aditivos	p. 15
3.3.1	Fluoreto de Alumínio	p. 16
3.3.2	Fluoreto de Cálcio	p. 17
3.3.3	Composição da Alumina - Óxido de Alumínio	p. 17
3.3.4	Impurezas na alumina (Na_2O e CaO)	p. 18
3.4	Comportamento das Variáveis de Controle	p. 18
4	Sistemas Fuzzy	21
4.1	Teoria de Conjuntos Fuzzy	p. 21
4.1.1	Conjuntos Fuzzy	p. 21
4.1.2	Variáveis Lingüísticas	p. 23
4.1.3	Operações com Conjuntos Fuzzy	p. 23
4.1.4	Relações e Composições Fuzzy	p. 25
4.1.5	Implicações Fuzzy	p. 26
4.1.6	Modos de Raciocínio	p. 28
4.2	Estrutura de um Sistema Fuzzy	p. 29
4.2.1	Fuzificação das Variáveis	p. 29
4.2.2	Base de Regras Fuzzy	p. 30
4.2.3	Máquina de Inferência Fuzzy	p. 31
4.2.4	Defuzificador	p. 32
5	Estratégia Fuzzy Para Adição de Fluoreto	34
5.1	Composição das Variáveis de Processo	p. 35
5.2	Conjuntos Fuzzy	p. 37
5.2.1	Conjunto Fuzzy para Temperatura de Banho - T_b	p. 38
5.2.2	Conjunto Fuzzy para Fluoreto de Alumínio - $\%AlF_3$	p. 39

5.2.3	Conjunto Fuzzy para Vida de Cuba - V_c	p. 40
5.2.4	Conjunto Fuzzy para Variação do Consumo de Fluoreto - ΔAlF_3	p. 41
5.2.5	Conjuntos Fuzzy para Tendência de Temperatura(T_{tmp}) e Fluoreto de Alumínio(T_{AlF_3})	p. 42
5.2.6	Conjuntos Fuzzy para Fluoreto de Alumínio Adicionado na Cuba - AlF_3A	p. 43
5.3	Implementação do Sistema Fuzzy no Matlab	p. 44
5.3.1	Fuzificação das Entradas	p. 44
5.3.2	Montagem da Base de Regras	p. 45
5.3.3	Aplicação do Operador Fuzzy	p. 46
5.3.4	Operador de Implicação	p. 47
5.3.5	Agregação das Saídas	p. 48
5.3.6	Defuzificação das saídas	p. 48
5.4	Simulações	p. 49
6	Implementação no Sistema Real	51
6.1	Implementação Computacional	p. 51
6.2	Resultados da Adição de Fluoreto de Alumínio	p. 54
6.2.1	Situação 1:	p. 54
6.2.2	Situação 2:	p. 57
6.2.3	Situação 3:	p. 60
6.3	Validação do Sistema	p. 61
7	Conclusão	62
	Apêndice A – Método dos Mínimos Quadrados	63
A.0.1	Tendência de Temperatura(T_{tmp}) e Fluoreto de Alumínio(T_{AlF_3})	p. 63
	Apêndice B – Análise dos dados	65
B.1	Temperatura de Banho	p. 65
B.2	Fluoreto de Alumínio	p. 66
	Referências	68

Lista de Figuras

1	(a) Tecnologia com anodo pré-cozido; (b) Tecnologia com anodo Sodeberg.	p. 8
2	(a) Tecnologia end-to-end; (b) Tecnologia side-by-side.	p. 8
3	(a)Configuração end riser ; (b) Configuração side riser.	p. 9
4	Elementos Constituintes de uma Cuba	p. 10
5	Elementos de uma cuba eletrolítica	p. 13
6	Balanco térmico e balanço de massa da cuba eletrolítica: (a) Ciclo de desbalanceamento causado pelo aumento de energia; (b) Ciclo de desbalanceamento causado pelo aumento de AlF_3	p. 15
7	Perdas térmicas em uma cuba eletrolítica	p. 15
8	Consumo de fluoreto devido a absorção pelo revestimento da cuba eletrolítica	p. 17
9	Comportamento das variáveis de processo: (a) Temperatura de banho; (b) Percentual de fluoreto de alumínio; (c) Fluoreto de alumínio adicionado.	p. 19
10	Variáveis de Controle	p. 20
11	Esquerda:não fuzzy. Direita: fuzzy	p. 23
12	Estrutura de um sistema fuzzy	p. 29
13	Variáveis de processo	p. 36
14	Reta utilizando MMQ(Métodos dos mínimo quadrados): (a) Tendência de subida para Temperatura; (b) Tendência de descida para %Fluoreto de Alumínio; (c) Tendência de descida para Temperatura; (d) Tendência de subida para %Fluoreto de Alumínio	p. 37
15	Conjuntos fuzzy para Temperatura de Banho - T_b	p. 38
16	Conjuntos fuzzy para Fluoreto de Alumínio - $\%AlF_3$	p. 39

17	Conjuntos fuzzy para Vida de Cuba - V_c	p. 40
18	Conjuntos fuzzy para Variação do Consumo de Fluoreto - ΔAlF_3	p. 41
19	Conjuntos fuzzy para a variável lingüística Tendência de Temperatura de Banho -T_{tmp} e Fluoreto de Alumínio- T_{AlF_3}	p. 42
20	Conjuntos fuzzy para a variável lingüística Fluoreto adicionado na cuba	p. 43
21	Tela de Interface do Matlab	p. 45
22	Conjuntos de saída do sistema fuzzy, obtido pela inferência das regras acionadas	p. 48
23	Implicação e agregação: (a) Conjuntos de saída acionados pelo operador de implicação; (b) Agregação dos conjuntos de saída.	p. 49
24	Relatório para adição de fluoreto de alumínio	p. 52
25	Analizador Fuzzy	p. 53
26	Forno 304	p. 56
27	Relatório para adição de fluoreto de alumínio	p. 56
28	Gráfico da cuba 305	p. 58
29	Forno 308	p. 59
30	Forno 308 durante a fase de testes utilizando lógica fuzzy	p. 59
31	Forno 302 fuzzy: análise do gráfico para um longo período de adição	p. 60
32	Reta utilizando MMQ	p. 64

Lista de Tabelas

1	Principais variáveis de entrada e saída do sistema fuzzy	p. 36
2	Variável lingüística: Temperatura de Banho - T_b	p. 38
3	Variável lingüística: Fluoreto de Alumínio - $\%AlF_3$	p. 39
4	Variável lingüística: Vida de Cuba - V_c	p. 40
5	Variável lingüística: Variação do Consumo de Fluoreto para - ΔAlF_3	p. 41
6	Variável lingüística: Tendência de temperatura - T_b	p. 42
7	Variável lingüística: Tendência de fluoreto - T_{AlF_3}	p. 43
8	Variável lingüística: Fluoreto adicionado - AlF_3A	p. 44
9	Combinações dos Conjuntos Fuzzy	p. 46
10	Conjuntos Fuzzy acionados na base de regras	p. 46
11	Conjuntos Fuzzy acionados	p. 49
12	Resultados	p. 50
13	Conjuntos Fuzzy acionados na base de regras para a cuba 304	p. 54
14	Resultados da adição para cuba 304	p. 55
15	Conjuntos Fuzzy acionados na base de regras para a cuba 305	p. 57
16	Resultados da adição para cuba 305	p. 58
17	Período lógica fuzzy - cuba 302	p. 61
18	Período lógica convencional - cuba 302	p. 61
19	Medida de Temperatura	p. 63
20	Período lógica fuzzy - Temperatura	p. 65
21	Período lógica convencional - Temperatura	p. 66
22	Período lógica fuzzy - Fluoreto	p. 66

23 Período lógica convencional - Fluoreto p. 67

Lista de Símbolos

$\%AlF_3$	Percentual de Fluoreto de Alumínio
AlF_3A	Fluoreto Adicionado na Cuba
B	Baixa
ΔAlF_3	Varição do Consumo de Fluoreto
F	Fria
FS	Fluoreto Subindo
FD	Fluoreto Descendo
MA	Muito Alto
MB	Muito Baixo
MeB	Média Baixa
MQ	Muito Quente
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
N	Normal
NG	Negativo Grande
NM	Negativo Médio
NP	Negativo Pequeno
PA	Pouco Alto
PB	Pouco Baixo
PP	Positivo Pequeno
PM	Positivo Médio
PG	Positivo Grande
PQ	Pouco Quente
PF	Pouco Fria
SuperA	Super Alta

TS	Temperatura Subindo
TD	Temperatura Descendo
T_b	Temperatura de Banho
T_{tmp}	Tendência de Temperatura
T_{AlF_3}	Tendência de fluoreto
UltraA	Ultra Alta
V_c	Vida de Cuba

Introdução

O aumento espetacular no consumo do alumínio é prova de que este metal significa para a indústria moderna. O alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não ferrosos. Os vários usos do alumínio estão relacionados com suas características físico/químicas, com destaque para seu baixo peso específico, resistência a corrosão e alta condutibilidade elétrica/térmica, comparado com outros metais de grande consumo.

Estando localizada no município de Barcarena no estado do Pará, a ALBRAS - Alumínio Brasileiro SA, exporta alumínio primário (alumínio obtido a partir da bauxita, minério encontrado na natureza) com grau de pureza em torno de 99,7% para o mundo todo, figurando como a maior deste setor na América Latina.

Construída em setembro de 1978 por meio de um acordo entre os governos do Brasil e do Japão, a ALBRAS é uma associação entre a CVRD - Companhia Vale do Rio Doce e a NAAC - Nippon Amazon Aluminium Company. Implantada inicialmente em duas fases, cada uma com capacidade nominal de 160 mil toneladas/ano, começou a operar em julho de 1985, atingindo plena atividade em 1991. Em 2001 foi realizada a expansão que elevou sua produção anual a mais de 400 mil toneladas.

Dentro do processo de fabricação do alumínio, o controle da química de banhos nas cubas eletrolíticas possui elevada importância, pois é nos mesmos que ocorrem todos os fenômenos químicos e físicos inerentes ao processo. A qualidade do alumínio primário produzido está diretamente ligada à composição deste banho. Para manter a composição do banho, são adicionados, durante o processo, fluoreto de alumínio e fluoreto de cálcio, sendo que o fluoreto de alumínio possui uma concentração maior que os demais aditivos devido este baixar a temperatura de banho e o ponto de fusão para solubilização da alumina.

Na lógica convencional, se calcula a quantidade de fluoreto de alumínio(AlF_3) a ser adicionado no banho, por equações parametrizadas. Apesar do sistema contemplar um modelo matemático baseado

em cálculos estequiométricos, boa parte desses cálculos deixam a desejar em termos de precisão, necessitando sempre da intervenção humana.

Manter a estabilidade da cubas eletrolíticas é um desafio aos engenheiros de processo. Sabe-se que as variações térmicas impactam fortemente na química de banho (balanço térmico) devido a variação do lombo (ledge).

Em um sistema convencional, o operador de processo necessita atuar criticando os valores propostos pelo sistema, devido ao alto grau de oscilação, diminuindo o valor de bateladas quando o percentual de fluoreto atinge níveis muito altos, ou aumentando o valor de bateladas quando o valor proposto pelo sistema de controle é insuficiente para recolocar o percentual de fluoreto dentro de um nível adequado ao processo. Para solucionar este tipo de problema, utilizou-se de técnicas baseado em heurísticas capazes de representar as decisões tomadas por um especialista de processo, diminuindo ao máximo possível a intervenção humana no processo.

Os métodos heurísticos são usados quando várias abordagens de solução de um problema são conhecidas, mas nem sempre há um algoritmo para resolver o problema de modo consistente. Entretanto, para sistemas complexos, onde não há um modelo matemático fenomenológico, os métodos heurísticos são muitos úteis nas tomadas de decisões baseado no conhecimento humano.

A lógica difusa (fuzzy) utilizada para controle pode ser vista como um método heurístico que utiliza a teoria de conjuntos fuzzy e integra a área de inteligência computacional, disciplina associada à construção e à programação de computadores para imitar os processos de raciocínio humano. A aplicação da teoria de conjuntos fuzzy tem encontrado um campo fértil de aplicações em uma ampla gama de situações, inclusive em reduções de alumínio primário.

1.1 Estado da Arte

As primeiras aplicações da lógica fuzzy em indústrias de alumínio primário ainda são bastantes recentes em relação as indústrias de eletrônicas e automobilística. Em [1] foi apresentado um método de inferência fuzzy para determinar a temperatura de banho em uma cuba de redução de alumínio primário, no qual, um conjunto de regras fuzzy é usado para inferir a temperatura final. A partir de medidas realizadas através de um termopar imerso no banho eletrolítico, com isto, reduzindo custos na produção do alumínio. Em [2] foi desenvolvido um sistema fuzzy para calcular o percentual de fluoreto de alumínio no banho, obtendo resultados que melhoraram o desempenho das cubas.

Devido às poucas contribuições da lógica fuzzy para o avanço tecnológico em reduções de alumínio primário, outras técnicas, tais como redes neurais artificiais têm sido muito aplicadas para o controle de processo em cubas eletrolíticas. Em [3] foi desenvolvido a implantação de um modelo resistivo para aplicação no controle de voltagem de fornos de Redução de alumínio utilizando uma Rede Neural Artificial, possibilitando o desenvolvimento, simulações e implementação de novas rotinas de controle, sem interferência direta no processo. Dependendo do problema, as técnicas de lógica fuzzy e redes neurais, possuem uma aproximação numérica para sistemas dinâmicos não lineares mais eficazes do que uma modelagem matemática baseada nos fenômenos físicos para plantas de processos industriais muito complexas.

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo (2) é apresentado breve histórico sobre a evolução do alumínio, além de identificar as diferentes áreas da empresa diretamente relacionadas com a produção do alumínio e quais as diferentes tecnologias praticadas no mundo. Na seção (2.7) são descritas as diversas partes e funções da cuba de redução de alumínio, apresentando os objetivos relacionados à operação das cubas.

No capítulo (3) será descrito a composição do eletrólito e seus principais componentes, controle do balanço térmico e balanço de massa, assim como o consumo de aditivos utilizados na cuba eletrolítica e o comportamento das variáveis de processo que mais impactam no controle de química de banho.

No capítulo (4) será abordado os principais tópicos relacionados aos sistemas fuzzy, empregando conceitos da lógica fuzzy, estrutura do sistema fuzzy e aplicações industriais.

A construção do modelo proposto é descrito no capítulo (5), que descreve desde os passos para composição das variáveis de processo à composição dos conjuntos fuzzy, implementação da estrutura de um sistema fuzzy, com definição: da base de regras lingüísticas, das funções de pertinência, do mecanismo de inferência e das interfaces de entrada e de saída.

No capítulo (6), além da descrição da implementação no sistema real, é feita uma análise dos resultados obtidos durante o período de testes, comparando com o período antes da implementação da lógica fuzzy. O modelo é validado através da comparação com os resultados obtidos do controle fuzzy com os resultados provenientes da adição do técnico de processo.

No capítulo (7) são apresentadas as conclusões preliminares sobre as adições de fluoreto utilizando

a lógica fuzzy. Nesse capítulo ainda são mostrados que a estratégia fuzzy atende satisfatoriamente aos objetivos propostos. Recomendações para trabalhos futuros também se encontram neste capítulo.

A Indústria do Alumínio

O Alumínio não é encontrado em estado nativo, sua descoberta está entre os mais recentes achados do reino mineral. Em 1809 *Humphrey Davy* fundiu ferro na presença de alumina, obtendo uma liga de ferro de um novo metal que batizou de "Alumium", mais tarde chamado de "Aluminium".

A bauxita, jazida que dá nome ao minério de alumínio, foi identificada em 1821, na região de Les Baux, no sul da França. Nessa época, o metal alumínio ainda não existia para o mundo civilizado. Isso só ocorreu a partir de 1825, quando ele foi isolado pelo químico *H.C. Oersted*. A primeira obtenção industrial do alumínio por via química foi realizada em 1854, por *Sainte-Claire Deville*. Ele utilizou em seu processo químico cloreto duplo de alumínio e sódio fundido, reduzindo-o com sódio[4]. O processo de Deville foi substituído com sucesso pelo processo eletrolítico por meio de corrente elétrica, descoberto ao mesmo tempo na França por *Paul Louis Toussaint Heroult* e nos Estados Unidos por *Charles Martin Hall*.

A utilização da bauxita na produção de alumínio em escala industrial foi feita pela primeira vez no país durante a 2ª Guerra Mundial, em 1944, pela Elquisa. Em 1950, quando adquiriu a Elquisa, a Alcan Alumínio do Brasil Ltda; tornou-se a primeira empresa multinacional a participar do mercado brasileiro produzindo, além do alumínio primário, produtos transformados.

Este capítulo destina-se a apresentação do processo de fabricação do alumínio. Identificando na ALBRAS as áreas responsáveis por cada etapa do processo, assim como a tecnologia adotada pela empresa para este fim.

2.1 A ALBRAS

A ALBRAS é uma das maiores indústrias metalúrgicas produtoras de alumínio primário do mundo, sendo sua produção voltada aos mercados internacionais. A empresa adotou a tecnologia da Mitsui Alumínio Company, do Japão, para fornos e anodos pré-cozidos.

Nos seus primeiros dez anos de operação a ALBRAS utilizou alumina importada de diversos países como EUA, Suriname e Venezuela. Com a entrada em produção da ALUNORTE - Alumina do Norte SA, em 1995, passou a ter esse insumo fornecido pela empresa vizinha, que utiliza a bauxita de Trombetas, completando o ciclo da produção do alumínio paraense e evitando a importação.

A fabricação de alumínio primário produzido na ALBRAS envolve basicamente três agentes principais: alumina (Al_2O_3), carbono e eletricidade. A realização do processo é feita através de células eletrolíticas, chamadas "cubas", onde a alumina, através de um processo de eletrólise é modificada fisicamente dando origem ao alumínio metálico fundido. Este processo consiste na passagem de uma corrente elétrica de alto valor (baixa tensão elétrica) através da cuba. Com isso é formada uma camada de alumínio fundido que se deposita no fundo da cuba[5].

2.2 A Gerência de Redução

O processo de produção do alumínio envolve diferentes fases. Cada uma destas fases é identificada por uma área dentro do parque industrial. A área do Carbono é responsável pela produção contínua de blocos anódicos, utilizados como pólos positivos na passagem da corrente elétrica. A área de Redução é onde ocorre a eletrólise, dando origem ao alumínio propriamente dito. A área da fundição identifica a última etapa do processo, pois é responsável pela prensagem dos lingotes de alumínio através do estabelecimento da temperatura correta necessária para este fim. A subestação é uma área à parte, responsável pelo suprimento energético da fábrica, fornecendo uma corrente DC na ordem de 180 kA.

2.3 O Setor de Automação da Redução/Fundição

O setor de automação da área de redução/fundição é composto por uma equipe técnica que possui larga experiência em processos industriais. Estes profissionais são responsáveis pela implantação e a manutenção de todo o sistema de controle, levando-se em consideração não somente o software como o hardware ligado ao sistema.

A área de redução, através do setor de automação, possui um sistema para supervisão das reduções (SISRED), que inicialmente foi desenvolvido pela ATAN, uma Empresa Brasileira de Automação. Este sistema integra todas as áreas que compõem o processo de fabricação de alumínio, gerenciando tarefas como : cálculo da quantidade de fluoreto de alumínio(batelada), análise da química de banho, Pureza do metal, miscelânea, troca de anodo, relatório de produção. O SISRED está implementado em módulos funcionais que compartilham um mesmo banco de dados SQL(*Structured Query Language*). Cada um desses módulos trabalham independentemente dos demais, sendo a integração entre eles garantida não só pelo uso da mesma base de dados como também pelas características da arquitetura local e pela intranet.

2.4 O Controle de Cubas eletrolíticas no Mundo

Nas várias plantas do setor espalhadas pelo mundo, são empregadas diferentes tecnologias que visam sempre maior produtividade, aliada a qualidade do produto. Cada uma destas tecnologias é resultado de incessantes estudos e testes de campo. As diferenças básicas entre estas tecnologias podem ser agrupadas em três categorias: quanto ao anodo, quanto à disposição das cubas e quanto ao *layout* do barramento.

2.4.1 Anodo

Quanto ao anodo existem basicamente duas tecnologias de fabricação e utilização. A primeira delas é conhecida como Prebaked Anode ou Anodo Pré-cozido. Esta tecnologia é praticada pela ALBRAS e pela maioria dos produtores mundiais. Consiste em fabricar blocos anódicos a partir de uma pasta formada pela mistura de Coque (derivado do petróleo) e piche sólido, passando posteriormente por uma fase de cozimento até estarem prontos para utilização no processo de eletrólise das cubas eletrolíticas.

A segunda tecnologia é conhecida como *Sodeberg Anode*. Consiste em adicionar periodicamente pasta anódica a uma "grande forma", durante o processo de eletrólise. Assim a cuba possui apenas um anodo que não é trocado por completo, mas sim "reabastecido", quando desgastado. Estas tecnologias são apresentadas nas figuras 1(a) e 1(b).

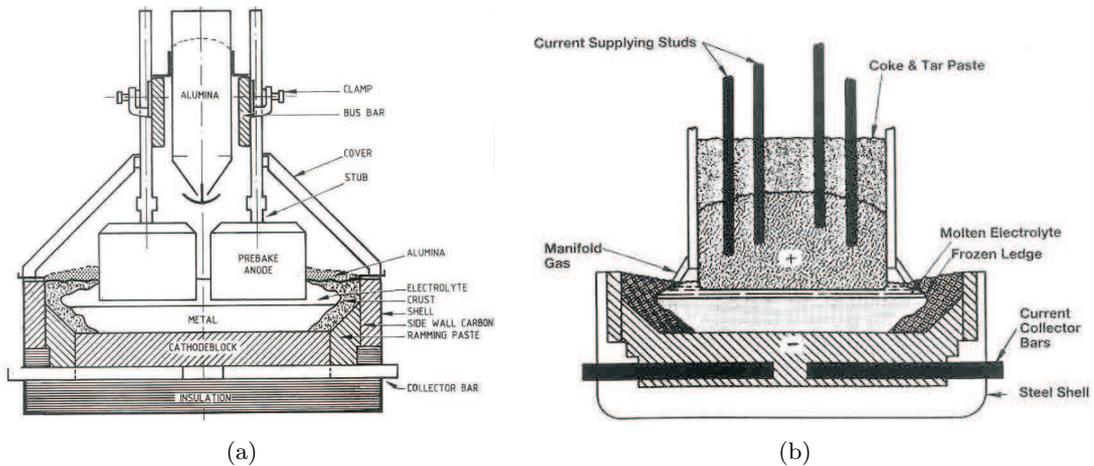


Figura 1 (a) Tecnologia com anodo pré-cozido; (b) Tecnologia com anodo Sodeberg.

2.5 Disposição das Cubas

Quanto à disposição das cubas a tecnologia pode ser classificada primeiramente como *side-by-side* ou lado a lado. Que consiste em agrupar as cubas, uma ao lado da outra. Sendo esta tecnologia a praticada pela ALBRAS. A outra forma é conhecida como *end-to-end* ou fim a fim. Que consiste em posicionar uma cuba após o fim da outra. As duas formas de disposição de cubas são apresentadas na figura

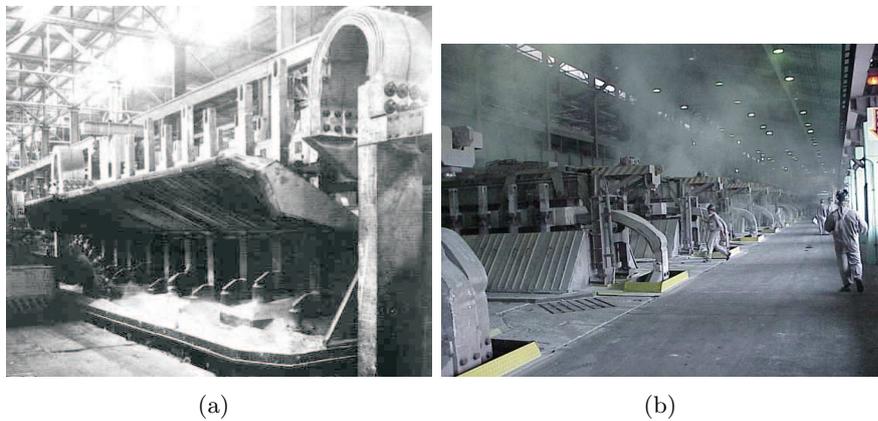


Figura 2 (a) Tecnologia end-to-end; (b) Tecnologia side-by-side.

2.6 *Layout* do Barramento

O layout de barramento recebe duas classificações tecnológicas. A primeira é conhecida como *end riser*. Possui o barramento saindo das extremidades da cuba, sendo a tecnologia adotada pela ALBRAS. A segunda é conhecida como *side riser*. Possui o barramento saindo pela lateral da cuba. Esta tecnologia é capaz de suportar correntes na ordem 300 kA. A figura (3) apresenta a duas formas de disposição para barramentos de cuba.

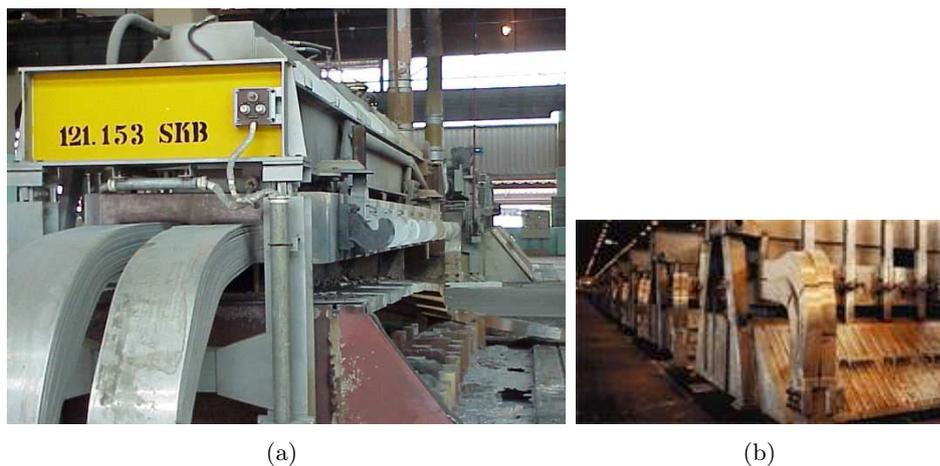


Figura 3 (a) *Configuração end riser* ; (b) *Configuração side riser*.

2.7 Sistema de Redução do Alumínio

O sistema de redução do alumínio está diretamente ligado à operação das cubas eletrolíticas. Dessa forma, é imperioso que exista a formação de um conhecimento mínimo a respeito de sua estrutura, identificando e compreendendo a função das diversas partes que a compõem.

A partir do conhecimento estrutural e funcional da planta é possível entender qual o objetivo do sistema de controle e como este sistema foi incorporado ao processo, identificando os principais problemas inerentes à rotina operacional e quais as soluções adotadas pela empresa.

Este capítulo tem como objetivo de apresentar a cuba, as diversas partes que a compõem, assim como a função de cada uma delas. Serão apresentados também os dois problemas enfrentados pelo sistema de controle.

2.7.1 Estrutura Física da Cuba

Os elementos de interesse direto, citados nos diversos itens deste estudo, são facilmente identificados na figura (4), onde é mostrado um desenho ilustrativo detalhado de uma cuba em corte transversal.

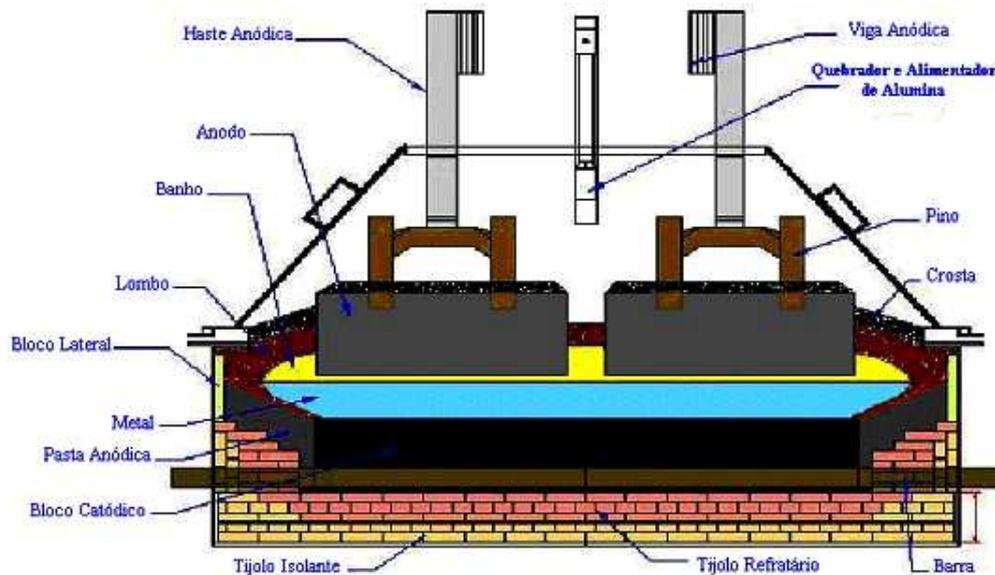


Figura 4 Elementos Constituintes de uma Cuba

Anodo: bloco formado basicamente por coque (derivado do petróleo) e piche sólido. É ligado à haste anódica utilizando pinos que são presos aos anodos através de chumbamento utilizando alumínio fundido;

Bloco Catódico: possui composição semelhante ao anodo, estando situado na parte inferior da cuba;

Viga Anódica: viga metálica pelo qual os anodos de uma cuba estão presos;

Banho: composto formado por Alumina (Al_2F_3), criolita (Na_3AlF_6) fundida e sais fundentes como o fluoreto de alumínio (AlF_3) e o fluoreto de cálcio (CaF_2);

Lombo: parte do banho que se solidifica, sendo muito importante para proteção lateral da cuba contra o "ataque" deste próprio elemento que se encontra em movimento no banho propriamente dito;

Crosta: atua como uma capa termo-protetora, localizada na parte superior externa da cuba;

Quebrador e Alimentador: haste metálica que rompe a crosta, com a finalidade de injetar alumina ao nível correto do banho;

Tijolo Isolante, Refratário e Pasta Anódica: são elementos diretamente ligados à proteção térmica externa inferior da cuba;

Metal: é o alumínio obtido pela quebra da molécula de alumina, através da eletrólise.

2.7.2 Rotina Operacional

Os engenheiros e técnicos de processo envolvidos com a operação e manutenção das cubas estão sempre procurando garantir a produção de uma liga metálica, com composição e teor de pureza de acordo com o exigido pelo mercado externo. Para isso, além de seguirem rigorosamente a um conjunto de procedimentos operacionais, executam exames laboratoriais periódicos, através da amostragem de toda a produção.

Na rotina operacional de uma cuba preocupa-se basicamente em manter o equilíbrio térmico e a química de banho durante a produção do alumínio primário[5].

Química de Banho em Cubas de Redução de Alumínio

A composição química do eletrólito denominado de *banho eletrolítico*, é fundamental para operação e desempenho das cubas eletrolíticas. O banho é uma mistura de sais fundentes, tendo como o principal ingrediente a criolita (Na_3AlF_6). Além da criolita, são utilizados vários aditivos durante o processo de produção do alumínio metálico com o objetivo de melhorar o desempenho e a composição química e física do banho[6]. Para manter a estabilidade das cubas eletrolíticas é necessário controlar o *Balanço térmico* e o *Balanço de massa*, pois alterações abruptas podem levar a cuba eletrolítica para situações de operações indesejáveis[7].

3.1 Composição do Eletrólito

A composição do eletrólito(banho) utilizado nas indústrias de redução de alumínio primário é formado basicamente por *criolita fundida*(Na_3AlF_6), *fluoreto de alumínio*(AlF_3), *fluoreto de cálcio*(CaF_2) e *óxido de alumínio*(Al_2O_3), denominado de *alumina*. Outros componentes, como *fluoreto de lítio*(LiF) e *fluoreto de magnésio*(MgF_2), são também utilizados como aditivos para o banho eletrolítico em algumas companhias de redução de alumínio primário. O banho não é consumido durante o processo da eletrólise, mas algumas perdas ocorrem, principalmente pela vaporização. A composição do eletrólito usado nas indústrias de reduções eletrolíticas de alumina, em termos percentuais são: 5-13 % fluoreto de alumínio (AlF_3), 3-7 % fluoreto de cálcio (CaF_2) e 1-5 % óxido de alumínio (Al_2O_3). Em alguns casos podem ser utilizados fluoreto de lítio(LiF) e/ou fluoreto de magnésio(MgF_2). Nestes casos a composição do percentual de fluoreto de alumínio fica abaixo de 6-7 % AlF_3 . O excesso ou a pouca concentração de um dos elementos pode levar a cuba a uma situação de instabilidade[8].

Os aditivos utilizados no processo de eletrólise (*Hall-Héroult*) tem a finalidade de baixar a temperatura de líquidos, ou seja, diminuir o ponto de fusão da criolita para solubilização da alumina, permitindo melhor utilização da energia no processo.

A temperatura do eletrólito, denominada de *temperatura de banho* é uma das variáveis mais importantes no controle do processo do alumínio metálico. A leitura de temperatura de banho é feita de forma manual através de termopares digitais. Essa medida de temperatura é realizada conforme a programação de adição dos componentes do banho eletrolítico. Em algumas companhias, essa tarefa é feita a cada 32h. O principal objetivo da medida de temperatura do banho é prevenir com antecedência qualquer distúrbio ou instabilidade nas cubas.

A temperatura de banho para uma cuba em condições normais de operação está em torno de 955°C a 970 °C. Para manter essa estabilidade de operação, frequentemente são adicionados ao banho, aditivos para reduzir a temperatura de banho[9]. Os percentuais dos componentes do banho estão diretamente relacionados à estabilidade do sistema. Manter a composição do eletrólito é um dos principais objetivos do controle da química devido a alta solubilidade da alumina. A Fig.(5), apresenta um desenho esquemático de uma cuba eletrolítica e seus constituintes para produção do alumínio primário.

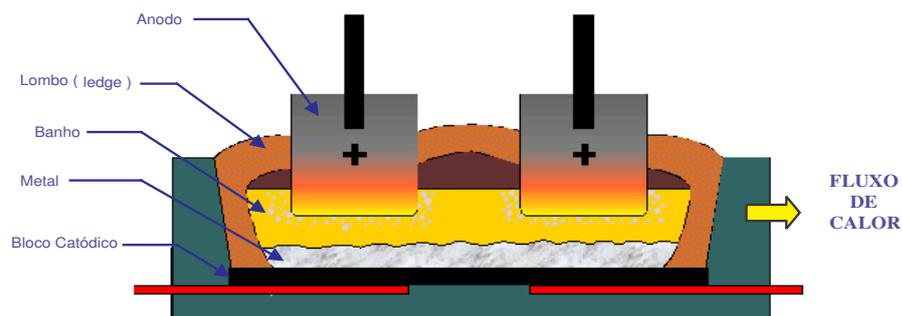


Figura 5 *Elementos de uma cuba eletrolítica*

3.2 Controle do Balanço Térmico e Balanço de Massa

O banho eletrolítico é composto por uma parte líquida *criolita fundida* e uma parte sólida *criolita não fundida* que reveste a lateral e o metal contidos na cuba, denominado de lombo. O banho solidificado controla as perdas de calor pelas paredes laterais da cuba. As mudanças no balanço térmico e no balanço de massa influenciam a estabilidade de uma cuba eletrolítica. O balanço térmico é afetado pela entrada de energia na e as mudanças no balanço térmico afetam a espessura do lombo (*ledge*)[10].

Os aditivos afetam o balanço de massa e conseqüentemente a espessura do lombo. Assim, o balanço térmico e o balanço de massa impactam diretamente na estabilidade da cuba, devido a intrínseca relação causada pelo efeito dinâmico do processo. As figuras 6(a) e 6(b), apresentam um ciclo dos efeitos dinâmicos de como acontecem esses distúrbios em uma cuba eletrolítica. O lombo não é o único responsável pelo controle do fluxo térmico, outras variáveis tais como altura da coluna de metal, altura da coluna de banho, revestimento, temperatura de banho, coluna de banho, distribuição de corrente ao longo da cuba influenciam muito devido a complexidade do processo.

A cobertura, denominada de crosta que envolvem os anodos também controlam a perda de calor da cuba e protege os anodos da oxidação pelo ar. O calor é gerado pela cuba através do efeito Joule no banho e por reações exotérmicas existentes no processo. A energia gerada pelo efeito Joule pode ser regulada através da distância entre anodo e o catodo, denominado de ACD(*anode cathode distance*). Segundo[6], a maior parte da energia fornecida à cuba é perdida na forma de calor para as vizinhanças, sendo que cerca de 35% das perdas ocorrem no topo do anodo, 15% na crosta e 50% nas paredes do catodo. A perda de calor acontece em uma cuba de forma tridimensional conforme apresentado na figura (7).

Qualquer alteração no balanço térmico da cuba provoca alteração na composição química do banho, assim como alteração na composição química provoca alteração no balanço térmico. Nota-se que existe uma interdependência entre o *balanço térmico* na cuba e a atual composição química (*balanço de massa*), influenciando no desempenho operacional das cubas[11].

Em química de banho outras variáveis também influenciam e são especialmente monitoradas para a estabilidade da cuba. Tais variáveis são : temperatura de líquidos(ponto de fusão do banho) e superheat(ΔT), a temperatura de líquidos é determinada pela composição do banho, o superheat é determinado pela diferença entre temperatura de banho e temperatura de líquidos. O superheat controla a espessura do lombo e mantém o calor na cuba para solubilização da alumina.

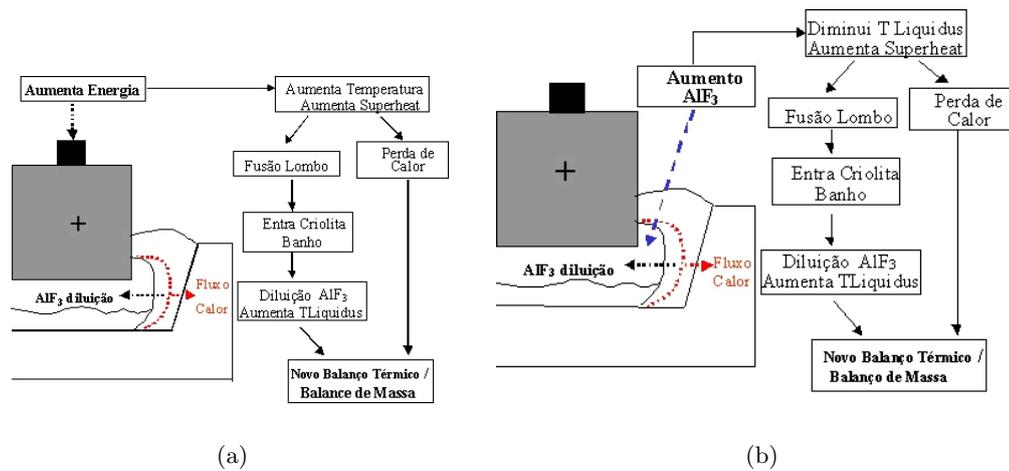


Figura 6 *Balanço térmico e balanço de massa da cuba eletrolítica: (a) Ciclo de desbalanceamento causado pelo aumento de energia; (b) Ciclo de desbalanceamento causado pelo aumento de AlF_3*

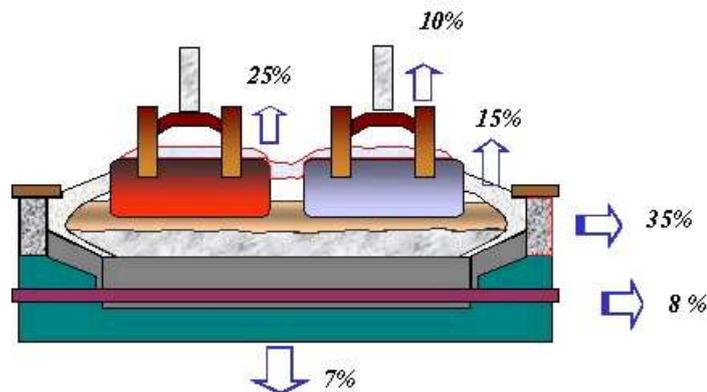


Figura 7 *Perdas térmicas em uma cuba eletrolítica*

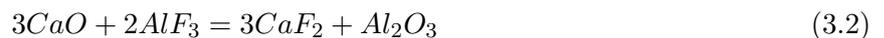
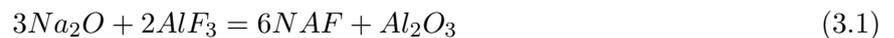
3.3 Consumo de Aditivos

Os aditivos são utilizados no processo de produção do alumínio primário com o propósito de modificar a composição do eletrólito e melhorar a propriedade química e física do eletrólito, aumentando a eficiência de corrente e reduzindo o consumo de energia no processo[9]. De acordo com W. Haupin[9], não há um aditivo ideal que satisfaz todas as condições de operações. Mas pode-se melhorar a eficiência de energia durante o processo modificando a composição dos aditivos.

3.3.1 Fluoreto de Alumínio

Há vários processos que contribuem para o consumo do fluoreto de alumínio adicionado nas cubas eletrolíticas. As adições de AlF_3 baseiam-se nas principais causas:

- adição devido absorção pelo revestimento da cuba[12]. O gráfico (8) mostra o consumo de fluoreto em função do tempo.
- adição devido perdas(vaporização) através da emissão de gases ocasionados pelas reações existentes no processo.
- adição devido aos óxidos de sódio e de cálcio presentes na *alumina* (Al_2O_3), conforme as equações a seguir:



O cálculo do consumo teórico de fluoreto de alumínio para uma tonelada de alumínio metálico é determinado pela seguinte expressão:

$$AlF_3[kg] = A * \%Na_2O + B * \%CaO + C * \%AlF_3 \quad (3.3)$$

Onde A, B e C são constantes e $\%Na_2O$, $\%CaO$ e $\%AlF_3$ representam respectivamente os pesos percentuais de óxido de sódio, óxido de cálcio e fluoreto de Alumínio. O controle da composição do eletrólito representa um desafio nas indústrias de redução de alumínio, devido a intrínseca relação entre balanço térmico e balanço de massa. O controle do *percentual de fluoreto* (AlF_3) apresenta uma complexidade maior que os outros aditivos presentes no banho, pois qualquer alteração no teor altera o balanço térmico da cuba[11].

O fluoreto de alumínio proporciona temperaturas mais baixas nos fornos, menor solubilidade do metal no banho e melhora a eficiência da corrente. Em contrapartida, causa condutividade elétrica, diminui a solubilidade da alumina no banho, aumenta a pressão de vapor e emissão do ácido fluorídrico (HF).

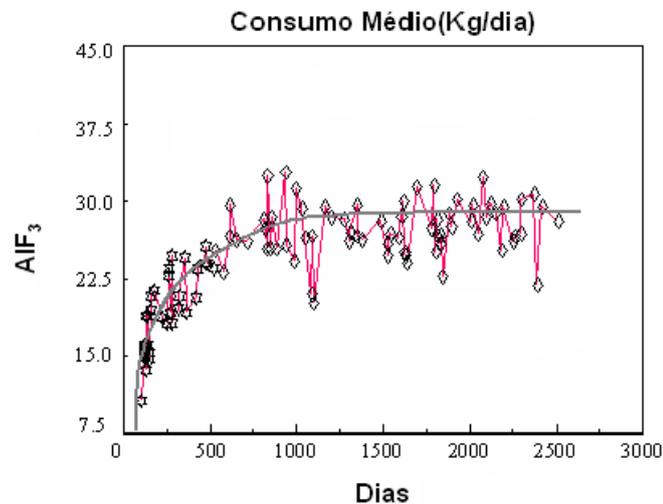


Figura 8 Consumo de fluoreto devido a absorção pelo revestimento da cuba eletrolítica

3.3.2 Fluoreto de Cálcio

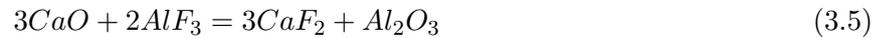
O fluoreto de cálcio (CaF_2) está sempre presente no eletrólito devido a impureza de óxido de cálcio (CaO) na alumina. Este reage com o fluoreto de alumínio dissolvido no eletrólito para formar fluoreto de cálcio. Conforme o tipo da alumina utilizada no processo a concentração poderá variar entre 3-7 % de CaF_2 no eletrólito. Esta concentração é estável porque a taxa de adição de óxido de cálcio é balanceado pela taxa das perdas de cálcio no alumínio produzido e também pelos gases. O fluoreto de cálcio diminui a solubilidade do metal no banho, a temperatura do banho e a pressão do vapor. Tem como desvantagem a diminuição da solubilidade da alumina no banho e a condutividade elétrica[6].

3.3.3 Composição da Alumina - Óxido de Alumínio

A razão principal para a adição regular de fluoreto de alumínio para controle da taxa (percentual) é devido a adição contínua de óxido de sódio no banho através da adição de alumina. A reação entre o fluoreto de alumínio e o óxido de sódio pode ser expresso da seguinte forma:



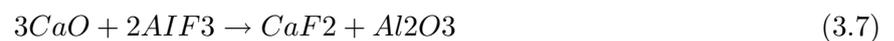
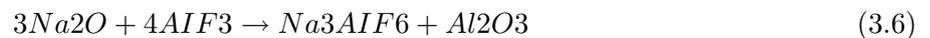
De forma análoga pode-se escrever a reação com o óxido de cálcio:



Baseado nas reações (3.4) e (3.5), pode-se calcular a quantidade necessário de fluoreto de alumínio.

3.3.4 Impurezas na alumina (Na_2O e CaO)

A "soda" e óxido de cálcio entram no sistema através da alumina e reagem no banho eletrolítico removendo o fluoreto de alumínio:



Os percentuais de soda e óxido de cálcio na alumina são determinados em análises realizadas em um Laboratório de Análise Química e podem servir de base para uma estimativa da perda do fluoreto de alumínio no sistema. A influência da soda é sem dúvida mais relevante devido a sua presença em quantidades mais representativas na alumina.

3.4 Comportamento das Variáveis de Controle

Há uma relação entre as variáveis de processo na química de banho. As variáveis temperatura de banho e percentual de fluoreto correspondentes nos gráficos 9(a) e 9(b) possuem uma correlação. Se a variável temperatura aumentar e o fluoreto diminuir ou vice-versa, tem-se que é denominado de correlação inversa. Analizando as variáveis no gráficos 9(a) e 9(b) percebe-se que enquanto uma variável aumenta a outra variável diminui. Este comportamento é acompanhado de uma maneira muito prática nas cubas eletrolíticas.

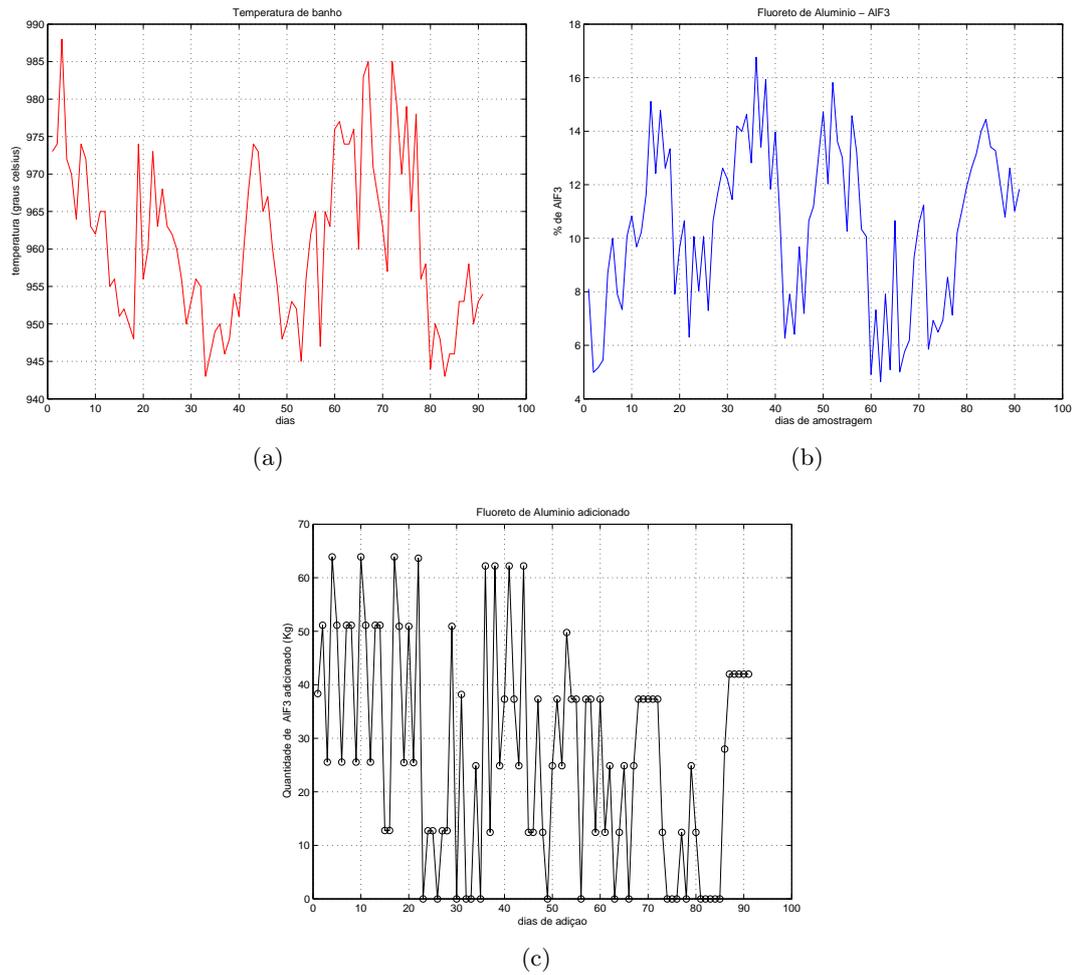


Figura 9 Comportamento das variáveis de processo: (a) Temperatura de banho; (b) Percentual de fluoreto de alumínio; (c) Fluoreto de alumínio adicionado.

Se não for adicionado fluoreto (diminui o % AlF_3) a temperatura de banho sobe, e se for adicionado fluoreto (aumenta o % AlF_3) a temperatura de banho diminui.

O gráfico (9(c)) representa a quantidade de fluoreto adicionado na cuba. Para uma melhor observação do que é feito na prática, o gráfico (10) representa o comportamento dinâmico das variáveis de processo para controle da química de banho.

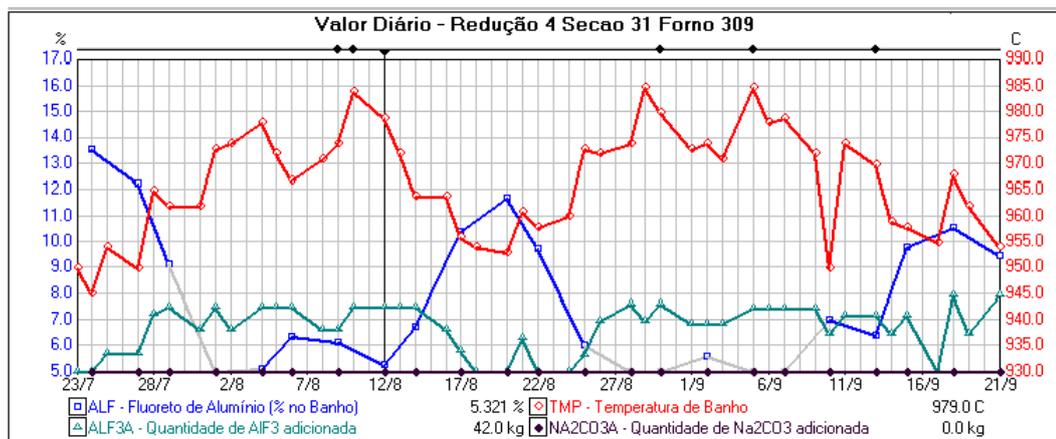


Figura 10 Variáveis de Controle

Sistemas Fuzzy

O conceito de conjuntos fuzzy foi introduzido por Lotfi A. Zadeh (1965). De acordo com Zadeh[13], a teoria dos conjuntos fuzzy é uma generalização da teoria dos conjuntos clássicos. O que Zadeh nos propõe é considerarmos uma função de pertinência que nos forneça o *grau de pertinência* dos diversos números ao conjunto considerado, que possibilita explorar expressões verbais imprecisas/vagas em termos de variáveis lingüísticas. A idéia por trás da lógica fuzzy é transformar o conhecimento heurístico em um conjunto de regras lingüística do tipo SE<condição> ENTÃO<ação>, onde as expressões "condição" e "ação" não são números ou equações exatas, mas são descritas por palavras ou frase como: baixo, alto, muito alto. O modelo lingüístico fuzzy possibilita tratar fenômenos que não podem ser representados via modelagem matemática convencional. Para compreendermos a aplicação da lógica fuzzy em controle de processo para uma planta industrial, abordaremos alguns conceitos básicos para construção do sistema fuzzy.

4.1 Teoria de Conjuntos Fuzzy

4.1.1 Conjuntos Fuzzy

A teoria dos conjuntos clássicos (*crisp sets*) possuem pertinências bem definidas, enquanto que nos conjuntos fuzzy (*fuzzy sets*) as transições acontecem de forma suave. Dado um conjunto A em um universo U , os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Ou seja, o elemento x é verdadeiro ($f_A(x) = 1$), ou falso ($f_A(x) = 0$). Isto pode ser expresso pela função característica $f_A(x)$.

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A; \\ 0 & \text{se } x \notin A. \end{cases} \quad (4.1)$$

Zadeh propôs uma caracterização mais abrangente, generalizando a função característica de tal modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto fuzzy A em um universo U é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x) \rightarrow [0, 1]$, que quantifica o elemento x para o conjunto fuzzy.

Os conjuntos fuzzy podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo U for discreto e finito, o conjunto fuzzy A é normalmente denotado pela expressão:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^m \mu_A(x_i)/x_i \\ A &= \mu_A(x_1)/x_1 + \dots + \mu_A(x_m)/x_m \end{aligned} \tag{4.2}$$

Se o universo U for contínuo, o conjunto fuzzy A é denotado pela expressão:

$$A = \int_U \mu_A(x)/x \tag{4.3}$$

Onde $\mu_A(x_i)$ é conhecido como **função de pertinência** (4.4), no qual mostra o quanto x é compatível com o conjunto A , U é conhecido como o *universo de discurso*. Um elemento x pode acionar mais de um conjunto fuzzy, com diferentes graus de pertinência.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A; \\ 0 & \text{se } x \notin A. \end{cases} \tag{4.4}$$

Um exemplo clássico para tornar compreensível a teoria de conjuntos fuzzy : Se pessoas com alturas entre 1,65m e 1,75m são consideradas de estaturas medianas e, acima de 1,75m, estatura alta. Nestas condições, 1,76m é a estatura de uma pessoa alta, mas 1,74m é a de uma pessoa mediana. Por outro lado, usando o conceito de conjunto fuzzy, as imprecisões quanto ao que seria alto ficariam representados por grau de pertinência.

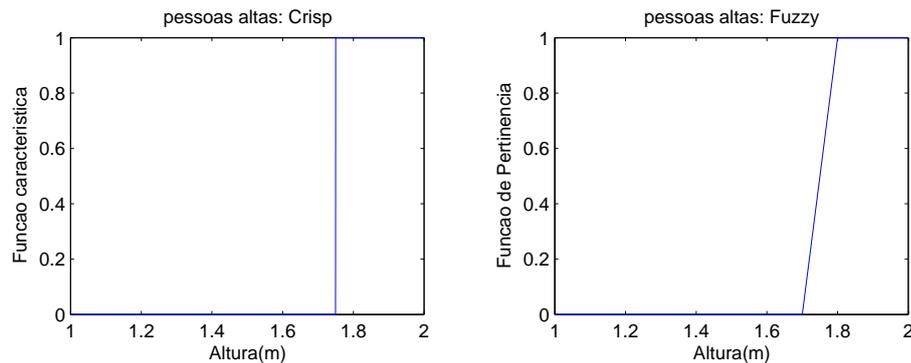


Figura 11 Esquerda:não fuzzy. Direita: fuzzy

4.1.2 Variáveis Lingüísticas

Uma variável lingüística fuzzy é uma variável cujo valor é expresso qualitativamente por um termo lingüístico e quantitativamente por uma função de pertinência. Uma função lingüística é caracterizada por $\{n, T, X, m(n)\}$ onde n é o nome da variável, T é o conjunto de termos lingüísticos de n (*Fria*, *Pouco fria*, *Normal*, *Quente*, *Muito Quente*), X é o domínio (*Universo de Discurso*) de valores de n sobre o qual o significado do termo lingüístico é determinado (a temperatura pode estar, por exemplo, entre 970 e 975 °C) e $m(t)$ é uma função semântica que assinala para cada termo lingüístico $t \in T$ o seu significado, que é um conjunto fuzzy em X (ou seja, $m : T \rightarrow (X)$ onde (X) é o espaço dos conjuntos fuzzy).

4.1.3 Operações com Conjuntos Fuzzy

Seja A e B dois conjuntos fuzzy contidos no universo de discurso U com função de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. A operação teórica dos conjuntos de união, intersecção e complemento para os conjuntos fuzzy são definidas[14] como seguem:

- Igualdade
Se para todo $x \in U$, $\mu_A(x) = \mu_B(x)$, então o conjunto A é igual ao conjunto B .
- Subconjunto
Se para todo $x \in U$, $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$, então o conjunto B contem o conjunto A , isto é, $A \subset B$.
- União

A operação de união entre dois conjuntos fuzzy é semelhante a operação de união entre dois conjuntos clássicos $A \cup B$. A união dos conjuntos fuzzy pode ser escrita em termos das funções de pertinências dos conjuntos A e B , como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.5)$$

- Intersecção

A operação de intersecção entre dois conjuntos fuzzy é semelhante a operação de intersecção entre dois conjuntos clássicos $A \cap B$. A intersecção dos conjuntos fuzzy pode ser escrita em termos das funções de pertinências dos conjuntos A e B , como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.6)$$

- Complementar

O conjunto complementar de A , denotado por \bar{A} , é definido pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.7)$$

- Normas-s

São mapeamento $s : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ combinando as funções de pertinências de dois conjuntos fuzzy A e B , resultando na união $A \cup B$ das funções de pertinências dos conjuntos, isto é:

$$s[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cup B}(x) \quad (4.8)$$

Para que o mapeamento s seja satisfeito para operação de união, ele deve satisfazer as seguintes propriedades:

1. $s[1, 1] = 1, s[a, 0] = a$
2. $s[a, b] = s[b, a]$
3. $s[a, b] \leq s[a', b']$, se $a < a'$ e $b < b'$
4. $s[s[a, b], c] = s[a, s[b, c]]$

- Normas-t

São mapeamento $t : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ combinando as funções de pertinências de dois

conjuntos fuzzy A e B , resultando na união $A \cap B$ das funções de pertinências dos conjuntos, isto é:

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cap B}(x) \quad (4.9)$$

Para que o mapeamento t seja satisfeito para operação de intersecção, ele deve satisfazer as seguintes propriedades:

1. $t[0, 0] = 0, t[a, 1] = a$ (*contorno*)
2. $t[a, b] = t[b, a]$ (*comutatividade*)
3. $t[a, b] \leq t[a', b']$, se $a < a'$ e $b < b'$ (*monotonicidade*)
4. $t[t[a, b], c] = t[a, t[b, c]]$ (*associatividade*)

4.1.4 Relações e Composições Fuzzy

Uma relação descreve a presença ou a ausência de uma associação (ou interação) entre elementos de dois ou mais conjuntos. da mesma forma, dados dois universos U e V , a relação R definida em $U \times V$ é um subconjunto do produto cartesiano dos dois universos, de tal maneira que $R : U \times V \longrightarrow \{0, 1\}$. Ou seja, se algum $x \in U$ e $y \in V$ estiverem relacionados, $R(x, y) = 1$; caso contrário $R(x, y) = 0$. Esta relação $R(U, V)$ pode ser definida pela seguinte função característica[15].

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } (x, y) \in R(U, V); \\ 0 & \text{se em caso contrário.} \end{cases} \quad (4.10)$$

Relações fuzzy generalizam o conceito de relações e representam o grau da associação entre elementos de dois ou mais conjuntos fuzzy.

As operações de união, intersecção e complemento para as relações fuzzy são definidas de forma idêntica às operações com conjuntos fuzzy. Seja duas relações fuzzy $R(x, y)$ e $S(x, y)$ definidas em um mesmo espaço $U \times V$, as funções de pertinência resultantes são:

$$\begin{aligned}
\mu_{R \cap S}(x, y) &= \mu_R(x, y) \star \mu_S(x, y) \\
\mu_{R \cup S}(x, y) &= \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y)
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Onde \star é qualquer t-norma, e \oplus é qualquer t-co-norma.

Sejam U , V e W três *universo de discurso* distintos, R uma relação sobre $U \times V$ e S uma outra relação sobre $V \times W$. Para obtermos a composição $R \circ S$ que relaciona U e W , estende-se, inicialmente, R e S para $U \times V \times W$. Como as relações R e S passaram a ter o mesmo domínio, então podemos determinar a relação entre os universos $U \times W$ pela seguinte expressão:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \sup_{y \in V} [\min\{\mu_R^{ext}(x, y, z), \mu_S^{ext}(x, y, z)\}]
\tag{4.12}$$

Onde

$$\begin{aligned}
\mu_R^{ext}(x, y, z) &= \mu_R(x, y) \\
\mu_S^{ext}(x, y, z) &= \mu_S(y, z)
\end{aligned}
\tag{4.13}$$

Esta operação é conhecida como **extensão cilíndrica** e a composição expressa em (4.11) é denominada de sup-min.

A diferença entre a relação fuzzy e a relação clássica, é que a anterior $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$, assume infinito valores nesse intervalo, enquanto que a posterior $\mu_R(x, y) = 0$ ou 1 . A generalização de uma relação fuzzy para um produto cartesiano *n-dimensional* é direta[16].

4.1.5 Implicações Fuzzy

As regras fuzzy são estruturas condicionais que utilizam-se de métodos heurísticos através de expressões lingüísticas em formas de regras, compostas por uma parte antecedente(condição - SE) e uma

parte conseqüente (conseqüência - ENTÃO), formando uma estrutura do tipo

$$SE \{condição\} ENTÃO \{conseqüência\} \quad (4.14)$$

Sendo que as condições e conseqüências são proposições fuzzy que são contruídas por expressões lingüísticas apresentadas a seguir:

$$x \text{ é Baixo} \quad (4.15)$$

$$y \text{ é Não Alto} \quad (4.16)$$

$$x \text{ é Baixo E } y \text{ é Alto} \quad (4.17)$$

$$x \text{ é Baixo OU } y \text{ é Alto} \quad (4.18)$$

As regras (4.15) e (4.16) definem proposições "imediatas", as regras (4.17) e (4.18), definem proposições fuzzy combinadas[14]. Estas proposições fuzzy correspondem segundo os conectivos **NÃO**, **OU** e **E**, respectivamente em (4.7), (4.8) e (4.9).

- Implicação de Mamdani

A implicação de mamdani define o uso das relações fuzzy R_{MM} e R_{PM} em $U \times V$ como interpretação para a regra $SE \langle pert_1 \rangle ENTÃO \langle pert_2 \rangle$, onde R_{MM} e R_{PM} são definidas como

$$\mu_{Q_{MM}}(x, y) = \min[\mu_{pert_1}(x), \mu_{pert_2}(y)] \quad (4.19)$$

$$\mu_{Q_{PM}}(x, y) = \mu_{pert_1}(x) \cdot \mu_{pert_2}(y) \quad (4.20)$$

Sendo $x \in U$ e $y \in V$

4.1.6 Modos de Raciocínio

Em lógica fuzzy há duas importante regras de inferência fuzzy, denominada de **Modus ponens generalizado (GMP)** e **Modus tollens generalizado (GMT)**. Introduzimos os conjuntos fuzzy A , A' , B e B' , via variáveis linguística[16].

- **Modus Ponens Generalizado**

A inferência modus ponens é usada quando se tem um fato antecedente e deseja-se produzir o consequente. O Modus Ponens Generalizado para lógica fuzzy é apresentado da seguinte forma:

condição 1: x é A'

condição 2: Se x é A ENTÃO y é B

ação: y é B'

- **Modus Tollens Generalizado**

A inferência Modus Tollens é utilizada quando se tem os consequentes e deseja-se produzir os antecedentes. Logo a inferência modus tollens pode ser expressa por:

condição 1: y é B'

condição 2: Se x é A ENTÃO y é B

ação: y é A'

A proposição acima da linha são premissas; e as proposições abaixo da linha são as consequências. Em termos de proposições p e q , Modus ponens e Modus tollens são expressos como, respectivamente.

$$(p \wedge (p \longrightarrow q)) \longrightarrow q \quad (4.21)$$

$$(\bar{q} \wedge (p \longrightarrow q)) \longrightarrow \bar{p} \quad (4.22)$$

4.2 Estrutura de um Sistema Fuzzy

A Estrutura do sistema fuzzy apresentada na figura (12) representa um modelo básico de um sistema aplicado em um processo industrial. A estrutura do sistema fuzzy consiste de quatro fases: **Fuzificação das variáveis**, **base de regras**, **máquina de inferência** e **defuzificação**.

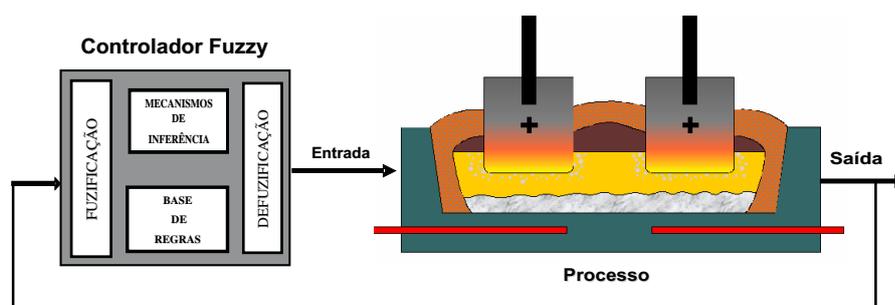


Figura 12 *Estrutura de um sistema fuzzy*

4.2.1 Fuzificação das Variáveis

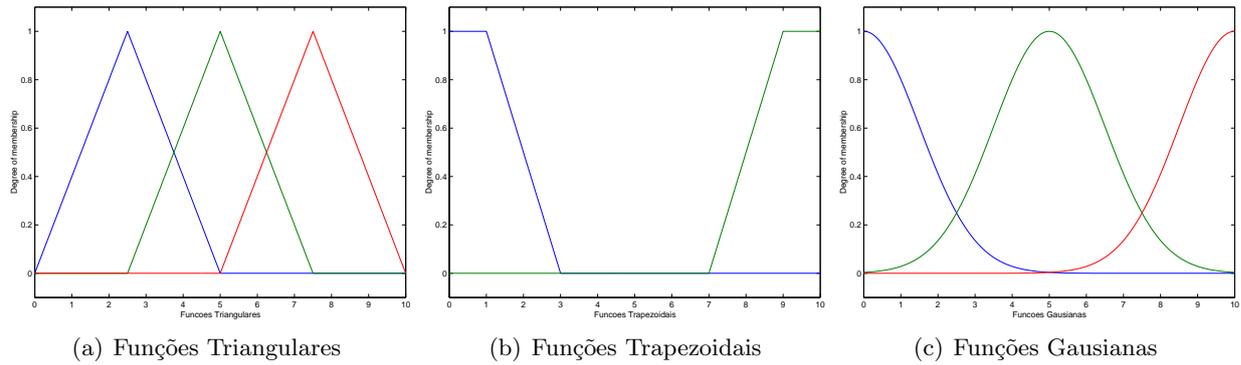
Na fase de fuzificação as variáveis de entrada (variáveis crisp) são convertidas em valores fuzzy através de um mapeamento de números reais $x^* \in U \subset \mathbb{R}^n$ para um conjunto fuzzy $A' \subset U$. A seguir é apresentado alguns passos para fuzificação:

- aquisição dos valores numéricos das variáveis de entrada (*variáveis crisp*), isto é, números reais;
- mapeamento destas variáveis em um **universo de discurso** U ;
- determinação das **funções de pertinências** e as variáveis lingüísticas.

O mapeamento das variáveis (crisp) é caracterizado pela função de pertinência $\mu_A(x) \rightarrow [0, 1]$. Tais funções podem ser classificadas em: *Triangulares* - 13(a), *Trapezoidais* - 13(b) e *Gaussianas* - 13(c). Os tipos de fuzificação mais comuns são: fuzificador singleton (converte um valor real em um conjunto fuzzy singleton), vetor de possibilidades e fuzificação por tabela em memória. A seguir são apresentados três tipos de fuzificadores, mostrando a fuzificação $x^* \in U$ para um conjunto $A' \subset U$.

- **Fuzificador Singleton**

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x = x^*; \\ 0 & \text{se } x \neq x^*. \end{cases} \quad (4.23)$$



- **Fuzificador Triangular**

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) \dots \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right) & \text{se } x = |x_i - x_i^*| \leq b_i; \\ 0 & \text{se } x = |x_i - x_i^*| > b_i. \end{cases} \quad (4.24)$$

- **Fuzificador Gaussiano**

$$\mu_{A'}(x) = \exp\left(\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right)^2 \dots \exp\left(\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right)^2 \quad (4.25)$$

4.2.2 Base de Regras Fuzzy

Uma base de regras fuzzy consiste de uma coleção de regras **SE-ENTÃO**, no qual pode ser expressa como:

$$R^{(l)} : \text{SE } x_1 \text{ é } A_1^l \text{ E } \dots \text{ E } x_n \text{ é } A_n^l \text{ ENTÃO } y \text{ é } B^l \quad (4.26)$$

Onde $l=1,2,\dots,M$, A_1^l e B^l são conjuntos fuzzy em $U_i \subset R$ e $U \subset R$, (R representa os conjuntos dos números reais) respectivamente, $\mathbf{x} = \text{col}(u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n$, e $y \in V$. x e y são variáveis lingüísticas. Nesta base de regras está armazenado o conhecimento de um especialista que modela todo o comportamento do sistema fuzzy[14].

4.2.3 Máquina de Inferência Fuzzy

A máquina de inferência fuzzy atua sobre um conjunto de regras na forma (4.26), denominado de base de regras. A construção da máquina é realizado através do mapeamento de entrada (antecedentes) e saída (consequentes) de uma sistema fuzzy. Nesta fase, que denominamos de inferência, ocorrem as operações com os conjuntos fuzzy, nos quais se combinam as variáveis da parte antecedentes das regras ativas, realiza-se a implicação, agrega-se o resultado de todas as regras e aplica-se o modus ponens generalizado. Ou seja, se uma base com m regras fuzzy, os procedimentos são:

- Determinar a pertinência $\mu_{A_1^l \times \dots \times A_n^l}(x_1, \dots, x_n)$ para os conjuntos fuzzy acionados para todas as m regras.
- realizar a inferência fuzzy de $A' \subset U$ para $B' \subset V$ com base em cada regra que constitui a base de regras do sistema fuzzy segundo o modus ponens generalizado, isto é:

$$\mu_{B'}^l(y) = \sup_{x \in U} t[\mu_{A'}(x), \mu_R^l(x, y)] \quad (4.27)$$

A máquina de inferência realiza uma combinação com os m conjuntos fuzzy ativados. Esta combinação é realizada da pela seguinte expressão:

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B_1}(y) \oplus \dots \oplus \mu_{B_n}(y) \quad (4.28)$$

Onde \oplus denota o operador norma-t

- **Máquina de Inferência Produto**

Na máquina de inferência produto utilizamos:

- a) inferência da base de regras individual
- b) Implicação de Mamdani (4.20);
- c) Produto algébrico para todos os operadores t-norma e max para todo operador s-norma. A máquina de inferência produto pode ser representada da seguinte maneira:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^m [\sup_{x \in u} [\mu_{A'}(\mathbf{x}) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x) \mu_{B^l}(y)]] \quad (4.29)$$

- **Máquina de Inferência Mínimo**

Na máquina de inferência mínimo utilizamos:

- a) inferência da base de regras individual
 b) Implicação de Mamdani (4.19);
 c) Produto algébrico para todos os operadores t-norma e min para todo operador s-norma. A máquina de inferência produto pode ser representada da seguinte maneira:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1}^m [\sup_{\mathbf{x} \in u} \min(\mu_{A'}(\mathbf{x}), \mu_{A_1^l}, \dots, \mu_{A_n^l}(x_n), \mu_{B^l}(y))] \quad (4.30)$$

4.2.4 Defuzificador

Na defuzificação os valores fuzzy (domínio fuzzy) das regras inferida são convertidos em um valor numérico real (domínio discreto) que corresponde à saída do sistema. Essa conversão é realizada através do mapeamento, pela seguinte forma $B' \subset V$ para um ponto $y^* \in V$. Existem vários métodos para defuzificação, tais como:

- **Método do Centro de Gravidade (ou centro da área):** calcula o centróide da área correspondente à união dos números fuzzy, que contribuem no resultado (não nulos), abaixo do segmento de linha indicado por seus valores de pertinência. É representado pela fórmula:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \mu_B(y_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_B(y_i)} \quad (4.31)$$

onde \bar{y} é o centro de gravidade resultante, y_i é o centro da função de pertinência individual e $\mu_B(y_i)$ é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado de inferência fuzzy (valores não nulos). Entre as principais vantagens desse método, podem ser citadas: a continuidade em relação à topologia da função de pertinência; Uniformidade de aplicação a conjuntos discretos e contínuos; e Simplicidade de cálculo.

- **Centro do Máximo:** utiliza os valores mais altos das funções de pertinência (pertinência singleton), e não as áreas, como no método anterior. Os valores não nulos são considerados pesos

e o resultado é obtido como um ponto de apoio equilibrado entre eles. O cálculo é realizado pela média ponderada dos máximos, ou seja:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N \mu_M(y_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{i=1}^N \mu_M(y_i)} \quad (4.32)$$

$\mu_M(y_i)$ onde são os pontos, onde ocorrem os máximos (alturas) das funções de pertinência.

- **Média do Máximo:** é representado por:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^M \frac{y_i}{M} \quad (4.33)$$

onde y_i é o i -ésimo elemento, que corresponde ao máximo das funções de pertinência e M é o número total de elementos.

Estratégia Fuzzy Para Adição de Fluoreto

As tomadas de decisões para adição de fluoreto de alumínio nas reduções eletrolíticas é uma tarefa realizada rotineiramente para ajuste da composição do banho eletrolítico e desempenho operacional. Para manter o desempenho e estabilidade das cubas eletrolíticas é necessário atuar no controle do balanço térmico e no balanço de massa [12], manipulando as variáveis de processo. Tais variáveis são utilizadas para determinar o cálculo da quantidade de fluoreto de alumínio a ser adicionado no banho. O cálculo é realizado por equações parametrizadas, protegidas por sigilo industrial, obtidas através da coleta de dados e de aproximações numéricas. Porém, observa-se que em grande parte dos casos a intervenção humana se faz necessária. Isto ocorre porque as equações utilizadas são apenas uma vaga aproximação do processo real. Assim um dos grandes objetivos da estratégia fuzzy para adição de fluoreto é substituir a intervenção humana o máximo possível, criando mecanismos automáticos, que irão substituir as alterações dos técnicos de processo. Neste sentido, foi necessário realizar um processamento numérico nas variáveis já existentes, a fim de que fosse possível representar as observações realizadas pelo homem. O controle de processo baseado em lógica fuzzy não necessita de um modelo analítico para representar a dinâmica do processo, mas do conhecimento de um especialista sobre o mesmo. Assim, um sistema fuzzy tenta reproduzir as ações de controle realizadas pelo especialista.

A aplicação de um controle fuzzy em processos industriais tem crescido bastante, pois utiliza modelos matemáticos complexos que não correspondem muito a realidade dos processos, devido a planta apresentar características não-lineares muito acentuadas. A seguir são apresentadas as estratégias utilizadas para o cálculo da adição de fluoreto baseado em lógica fuzzy, denominados de sistemas fuzzy.

5.1 Composição das Variáveis de Processo

Segundo levantamento realizado junto aos engenheiros de processo responsáveis pelo controle de química de banho, foi verificado que três variáveis possuem relação direta com a quantidade de fluoreto a ser adicionado à cuba. Estas variáveis são capazes de representar o comportamento dinâmico do processo, figurando então como variáveis de entrada para o sistema fuzzy. As variáveis em questão, mostradas no gráfico (13), são: **Temperatura do banho eletrolítico (Vermelho)**, **Percentual de fluoreto no banho (Azul)** e tempo de funcionamento da cuba (também denominado de "vida de cuba"). A variável **Fluoreto adicionado (Verde)** representa a saída do sistema de controle. Na tabela 1 estão representadas outras variáveis que foram manipuladas a partir das variáveis já existentes. A leitura de temperatura do banho eletrolítico é feita de forma manual através de termopares digitais, o percentual de fluoreto presente no banho é obtido através de amostragem e posterior análise laboratorial. Por serem procedimentos que utilizam a mão de obra humana, tornam-se susceptíveis à falhas, o que poderia ocasionar uma tomada de decisão errônea por parte do sistema de controle de adição de fluoreto. A variável **Consumo teórico de fluoreto** (ΔAlF_3) é obtida pela diferença entre o último valor da quantidade de fluoreto adicionado e a quantidade teórica de fluoreto consumido pela cuba, conforme mostrado na equação (5.1). Onde ΔAlF_3 representa variação do consumo de fluoreto, AlF_3A o último valor adicionado à cuba e AlF_3 a quantidade teórica de fluoreto explicada em (3.3.1), equação (3.3).

$$\Delta AlF_3 = AlF_3A - AlF_3(Kg) \quad (5.1)$$

As variáveis **Tendência de Temperatura** e **Fluoreto**, geralmente apresentam-se de forma inversamente proporcional, ou seja, quando uma está com tendência de subida a outra está com tendência de descida e vice-versa. Para obter a tendência são utilizados os três últimos valores de cada uma destas variáveis e através da montagem de uma reta, utilizando-se o **MMQ** (*Método dos Mínimos Quadrados*)(Apêndice A), verifica-se qual a inclinação da reta. Se a inclinação for positiva diz-se que a tendência é de subida, se for negativa diz-se que a tendência é de descida, conforme as figuras (14).

Tabela 1 Principais variáveis de entrada e saída do sistema fuzzy

Símbolo	Variáveis	Valor Mínimo	Valor Máximo	Unidade
1 T_b	Temperatura de banho	930	1200	°C
2 $\%AlF_3$	% Fluoreto de alumínio	0	17	%
3 V_c	Vida de cuba	1	2600	Dias
4 ΔAlF_3	Variação do consumo de fluoreto	-50	50	Kg
5 T_{tmp}	Tendência de temperatura			-
6 T_{AlF_3}	Tendência de fluoreto			-
7 AlF_3A	Fluoreto adicionado na cuba	0	105	Kg

O roteiro padrão para executar a adição de fluoreto é: primeiramente avaliar se as quantidades propostas pelo sistema de controle estão coerentes com as situações observadas pelo técnico de processo e somente após esta avaliação liberar ou modificar o valor de fluoreto adicionado à cuba. As observações são feitas através da janela gráfica, figura 13 onde é possível visualizar a evolução das variáveis dentro de um certo intervalo de tempo[17].

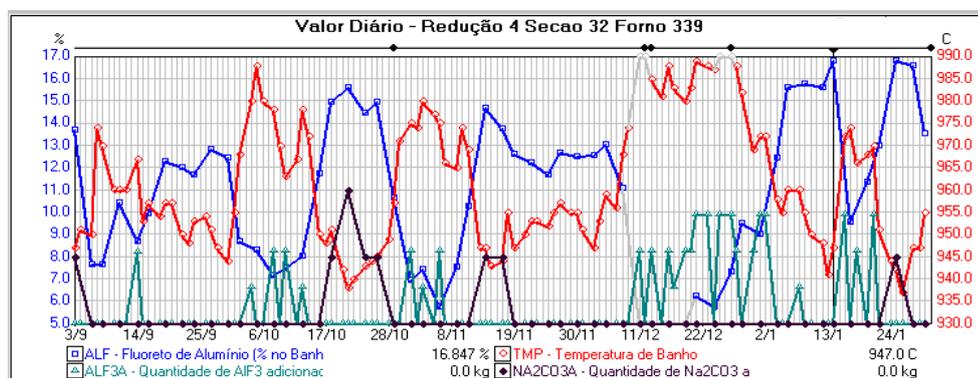


Figura 13 Variáveis de processo

Neste sistema não é levado em consideração as quantidades de fluoreto adicionadas à cuba em adições passadas, sendo esta análise feita de forma visual pelo técnico de processo que critica o valor proposto pelo sistema, dessa forma fez-se uso de um cálculo teórico obtido pela diferença entre o último valor da quantidade de fluoreto adicionado e a quantidade teórica de fluoreto consumida pela cuba, conforme mostrado na equação (5.1).

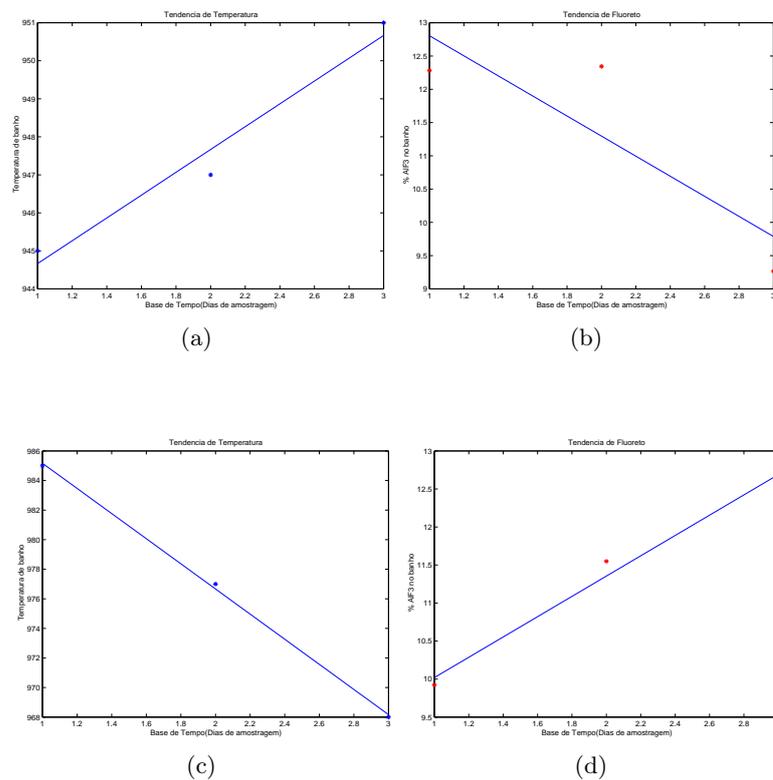


Figura 14 *Reta utilizando MMQ(Métodos dos mínimo quadrados): (a) Tendência de subida para Temperatura; (b) Tendência de descida para %Fluoreto de Alumínio; (c) Tendência de descida para Temperatura; (d) Tendência de subida para %Fluoreto de Alumínio*

5.2 Conjuntos Fuzzy

Os valores linguísticos das variáveis de processo foram definidas conforme a metodologia descrita em (4.1.2). Tais variáveis serão apresentadas em termos de conjuntos fuzzy e suas respectivas funções de pertinência ou qualificadores. Um conjunto fuzzy é caracterizado por sua respectiva função de pertinência. As funções de pertinência relativas a cada conjunto fuzzy foram devidamente determinadas pela observação do comportamento dinâmico de cada variável durante o processo. As variáveis Temperatura de banho, percentual de fluoreto, vida de cuba, e variação do consumo de ΔAlF_3 são todas representadas por *funções trapezoidais*. As variáveis tendência de temperatura e tendência de fluoreto são *funções singleton*. Tais variáveis foram selecionadas pelo projetista com base apenas em um conhecimento qualitativo sobre o comportamento da planta. A seguir são apresentados os conjuntos fuzzy

de cada variável inerente ao processo e posteriormente a implementação de um sistema fuzzy simulado em Matlab[18].

5.2.1 Conjunto Fuzzy para Temperatura de Banho - T_b

Para a variável temperatura foram criados cinco conjuntos fuzzy, representados pelo gráfico (15). A tabela 2 apresenta cada variável linguística e suas respectivas funções de pertinência, com seus valores de mínimo e máximo abrangendo um universo de discurso que varia entre 930 a 1020 °C. Todas as funções de pertinências utilizadas para esta variável foram funções trapezoidais.

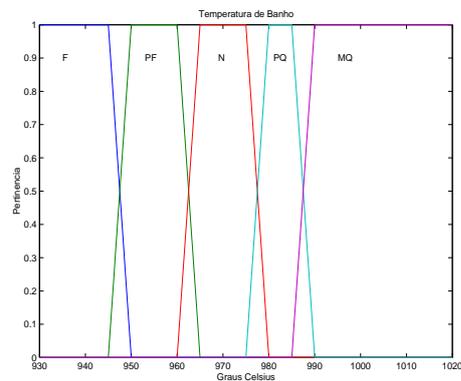


Figura 15 Conjuntos fuzzy para *Temperatura de Banho - T_b*

Tabela 2 Variável linguística: *Temperatura de Banho - T_b*

Temperatura de Banho			
Símbolo	Variáveis Linguísticas	Valor Min.	Valor Max
F	FRIA	930	950
PF	POUCO FRIA	945	965
N	NORMAL	960	980
PQ	POUCO QUENTE	975	990
MQ	MUITO QUENTE	985	1020

5.2.2 Conjunto Fuzzy para Fluoreto de Alumínio - $\%AlF_3$

Para percentual de fluoreto de alumínio foram criados também cinco conjuntos fuzzy, representado pelo gráfico (16). A tabela 3 apresenta cada variável linguística e suas respectivas funções de pertinência, com seus valores de mínimo e máximo abrangendo um universo de discurso que varia 0 a 18%. As funções de pertinências utilizadas para esta variável foram funções trapezoidais.

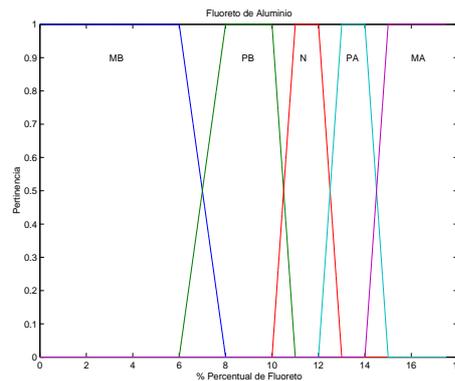


Figura 16 Conjuntos fuzzy para **Fluoreto de Alumínio**- $\%AlF_3$

Tabela 3 Variável linguística: **Fluoreto de Alumínio** - $\%AlF_3$

Fluoreto de Alumínio			
Símbolo	Variáveis Linguísticas	Valor Min.	Valor Max
MB	MUITO BAIXO	0	8
PB	POUCO BAIXO	6	11
N	NORMAL	10	13
PA	POUCO ALTO	12	15
MA	MUITO ALTO	15	18

5.2.3 Conjunto Fuzzy para Vida de Cuba - V_c

foram criados 3 conjuntos, representados pelo gráfico (17). A tabela 4 apresenta cada variável linguística e suas respectivas funções de pertinência, com seus valores de mínimo e máximo abrangendo um universo de discurso que varia 1 a 3000 dias. Também foram utilizadas funções trapezoidais.

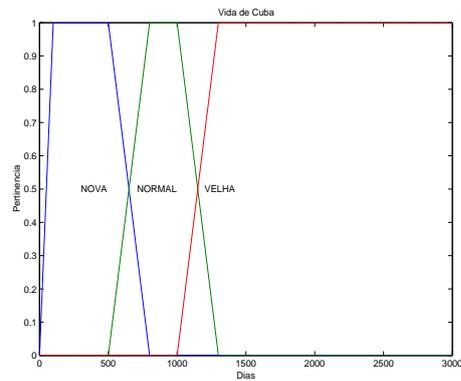


Figura 17 Conjuntos fuzzy para *Vida de Cuba* - V_c

Tabela 4 Variável linguística: *Vida de Cuba* - V_c

Vida de Cuba		
Variáveis Linguísticas	Valor Min.	Valor Max
NOVA	0	800
NORMAL	500	1300
VELHA	1000	3000

5.2.4 Conjunto Fuzzy para Variação do Consumo de Fluoreto - ΔAlF_3

O procedimento utilizado para composição desta variável está descrito na seção (5.1). Baseado nos cálculos teóricos, equação (5.1), o consumo teórico de fluoreto de alumínio por uma cuba, está entre uma faixa de controle, no qual, a cada cálculo de adição há uma compensação para (\pm). Em termos de conjuntos fuzzy foram criados seis conjuntos representado pela figura (18). A tabela 5 apresenta cada variável linguística e suas respectivas funções de pertinência, com seus valores de mínimo e máximo abrangendo um universo de discurso que varia entre -70 a 70Kg.

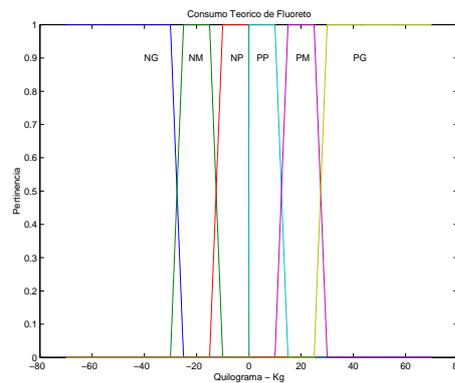


Figura 18 Conjuntos fuzzy para Variação do Consumo de Fluoreto- ΔAlF_3

Tabela 5 Variável linguística: Variação do Consumo de Fluoreto para - ΔAlF_3

Variação do Consumo de Fluoreto			
Símbolo	Variáveis Linguísticas	Valor Min.	Valor Max
NG	NEGATIVO GRANDE	-70	-25
NM	NEGATIVO MEDIA	-30	-10
NP	NEGATIVO PEQUENO	-15	0
PP	POSITIVO PEQUENO	0	15
PM	POSITIVO MÉDIO	10	30
PG	POSITIVO GRANDE	25	70

5.2.5 Conjuntos Fuzzy para Tendência de Temperatura (T_{tmp}) e Fluoreto de Alumínio (T_{AlF_3})

Os conjuntos tendências de temperatura e de fluoreto são apresentados na figura (19), onde foram utilizados singleton fuzzy para identificar as tendências de subida ou de descida para ambos conjuntos. As tabelas (6) e (7), apresentam as variáveis linguísticas e o método utilizado para o cálculo das tendências.

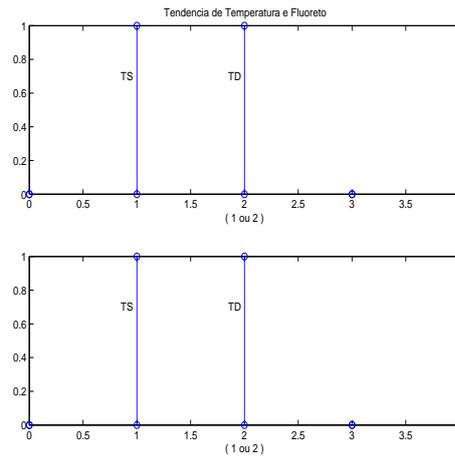


Figura 19 Conjuntos fuzzy para a variável linguística *Tendência de Temperatura de Banho - T_{tmp}* e *Fluoreto de Alumínio- T_{AlF_3}*

Tabela 6 Variável linguística: *Tendência de temperatura - T_b*

Tendência de Temperatura		
Símbolo	Variável Linguística	Método
TS	SUBIDA	MMQ
TD	DESCIDA	MMQ

Tabela 7 Variável lingüística: Tendência de fluoreto - T_{AlF_3}

Tendência de Fluoreto		
Símbolo	Variável Linguística	Método
FS	SUBIDA	MMQ
FD	DESCIDA	MMQ

5.2.6 Conjuntos Fuzzy para Fluoreto de Alumínio Adicionado na Cuba - AlF_3A

A variável representa a parte consequente(saída) de uma regra de controle para um sistema fuzzy. Todas as ações para a saída do sistema depende particularmente desta variável. Foram criados dez conjuntos fuzzy representado pela figura (20). A tabela (8) apresenta cada variável linguística e suas respectivas funções de pertinência, com seus valores de mínimo e máximo abrangendo um universo de discurso que varia entre 0 a 105Kg. Os valores centralizados nas funções de pertinências dos conjuntos fuzzy, apresentados na Fig.(20), estão centralizados com valores múltiplos de 12kg. Cada múltiplo corresponde um determinado valor em batelada. Ou seja, 12kg corresponde 1 batelada, o próximo múltiplo 24kg corresponde 2 batelada e assim sucessivamente para os demais valores correspondes centralizados nas funções de pertinências.

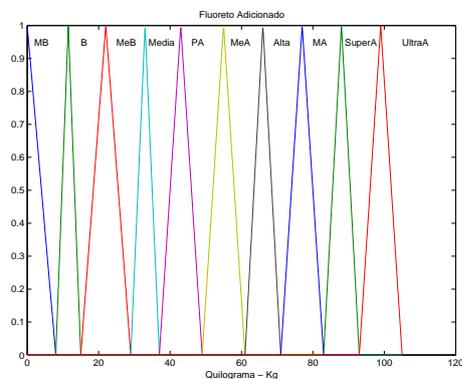
Figura 20 Conjuntos fuzzy para a variável lingüística **Fluoreto adicionado na cuba**

Tabela 8 Variável lingüística: Fluoreto adicionado - AlF_3A

Adição de Fluoreto de Alumínio			
Símbolo	Variáveis Linguísticas	Valor Min.	Valor Max
MB	MUITO BAIXA	0	8
B	BAIXA	8	15
MeB	MÉDIA BAIXA	15	29
MÉDIA	MÉDIA	29	37
PA	POUCO ALTA	37	49
MeA	MÉDIA ALTA	49	61
ALTA	ALTA	61	71
MA	MUITO ALTA	71	83
SUPERA	SUPER ALTA	83	93
ULTRAA	ULTRA ALTA	93	105

5.3 Implementação do Sistema Fuzzy no Matlab

A implementação do algoritmo fuzzy diretamente em uma planta industrial de fabricação de alumínio primário foi antecedida por uma etapa de simulação via Matlab (Matrix Laboratory) for Windows, que é um ambiente computacional para visualização e computação numérica de alta performance, com o objetivo de garantir a eficiência do algoritmo[18]. Para isso foi desenvolvida uma tela de interface gráfica, conforme mostrado na figura (21), onde é possível carregar os valores de entrada e executar a adição de fluoreto para trinta cubas diferentes. Na mesma tela é possível ter acesso às regras acionadas e aos valores de pertinência associados às variáveis de entrada de cada cuba. A visualização desta tela procurou manter o layout já utilizado pelos operadores, por isso apenas 3 das 6 variáveis de entrada são mostradas na tela, seguidas da respectiva saída calculada pelo sistema fuzzy. A estrutura básica para o modelo inclui os seguintes componentes: Fuzificador, Base de Regras, Máquina Inferência e Defuzificador.

5.3.1 Fuzificação das Entradas

O processo de fuzificação das entradas consiste em estabelecer o grau de pertinência ligado a cada conjunto fuzzy. É comum as entradas serem um número não fuzzy, com limites bem definidos no



Figura 21 Tela de Interface do Matlab

universo de discurso da variável de entrada. As variáveis de 1 a 6 na tabela 1 são utilizadas como entrada para o sistema. Conforme o valor numérico fuzzificado, este pode estar com um ou mais valores de pertinência das variáveis de entrada fuzzy.

5.3.2 Montagem da Base de Regras

A base de regras é uma composição das variáveis de entrada e saída do sistema fuzzy. Como é possível observar na tabela 9, foi criado um número elevado de conjuntos fuzzy, resultando em um grande número de combinações que deveriam ser ajustadas uma a uma de acordo com o conhecimento do especialista. Dessa forma foram obtidas 1800 combinações diferentes entre as variáveis de entrada, as quais deveriam ser projetadas as respectivas 1800 saídas, a partir dos dez conjuntos fuzzy de saídas. A contabilização destas regras foi obtida da seguinte forma:

Seria impraticável que as 1800 saídas da base de regras fossem obtidas através de entrevistas técnicas, dessa forma foi realizada uma busca estatística ao banco de dados da ALBRAS, sendo estas buscas realizadas em dois período de coletas de dados: Abril/2004 à Janeiro/2005 e Março/2005 à Maio/2005.

Tabela 9 *Combinações dos Conjuntos Fuzzy*

Variáveis Linguísticas						
Variáveis	T_b	$\%AlF_3$	V_c	ΔAlF_3	T_{tmp}	T_{AlF_3}
Conjuntos	5	5	3	6	2	2
TOTAL DE COMBINAÇÕES						1800

Nesta busca verifica-se qual o conjunto fuzzy pertencente a cada valor de entrada, contabilizando-se a respectiva saída. Este procedimento é adotado devido a adição de fluoreto ser um processo subjetivo, ou seja, cada operador toma uma decisão, alterando ou não o valor proposto pelo sistema, dessa forma utiliza-se como saída "correta" aquela que ocorrer em um número maior de vezes durante o intervalo de um ano, sendo este trabalhoso procedimento realizado por computador.

5.3.3 Aplicação do Operador Fuzzy

Aplicar um operador fuzzy em cada regra significa definir se os antecedentes (premissas), ou seja, se os conjuntos de valores de entrada deverão ocorrer simultaneamente ou distintamente (Operador **AND**(*min*) ou **OR**(*max*) respectivamente). O operador utilizado no trabalho foi o operador mínimo(*Mandani*). Utilizando as variáveis de entrada mostra-se a seguir um exemplo do uso deste operador:

Tabela 10 *Conjuntos Fuzzy acionados na base de regras*

Variáveis	Valores Crisp	Descrição dos Conjuntos Fuzzy
T_b	978 °C	40% NORMAL e 60% POUCO QUENTE
$\%AlF_3$	12.7	30% NORMAL e 70% POUCO ALTO
V_c	300	100% NOVA
ΔAlF_3	56	100% PG
T_{tmp}	1	Tendência de descida
T_{AlF_3}	1	Tendência de subida

As quatro regras abaixo exemplificam a aplicação do operador AND(min) e as pertinências de cada conjunto fuzzy acionados para formação das regras a partir da base de conhecimento.

- **REGRA 1:** $\min [0.4, 0.3, 1, 1, 1, 1] = 0.30$
- **REGRA 2:** $\min [0.4, 0.7, 1, 1, 1, 1] = 0.40$
- **REGRA 3:** $\min [0.6, 0.3, 1, 1, 1, 1] = 0.30$
- **REGRA 4:** $\min [0.6, 0.7, 1, 1, 1, 1] = 0.60$

5.3.4 Operador de Implicação

A implicação ocorre para cada regra, conforme o operador aplicado (seção 5.3.3) sendo que a entrada para o método de implicação é um número, dado pelo antecedente(premissas), e a saída é um conjunto fuzzy (consequente). O operador atua sobre cada conjunto acionado(antecedentes) de uma regra ou paralelamente em um conjunto de regras, escolhendo um valor numérico entre o intervalo [0 1], que posteriormente atuará sobre o conjunto de saída truncando o conjunto em um valor estabelecido pela implicação da regra acionada. A figura (22) mostra os conjuntos de saída truncado pelo operador de implicação para 4 regras acionadas.

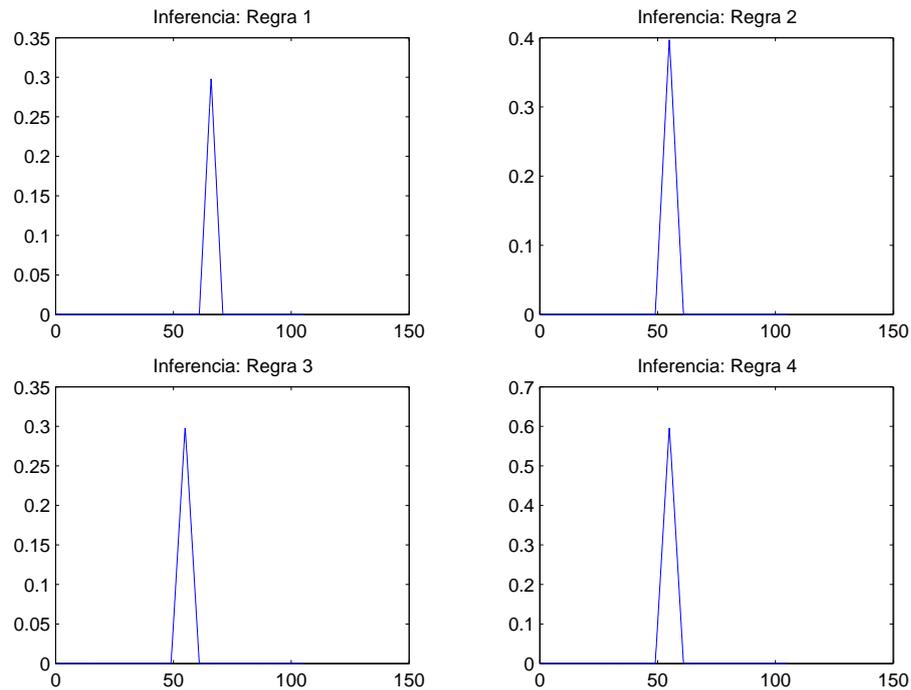


Figura 22 Conjuntos de saída do sistema fuzzy, obtido pela inferência das regras acionadas

5.3.5 Agregação das Saídas

Agregar as saídas significa somar ou calcular o valor máximo ponto a ponto entre a saída de cada regra. Na figura (23(a)) observa-se o resultado da implicação de 4 regras ativadas. Aplicando o operador Max sobre as regras ativadas, obtem-se a agregação representada na figura (23(b)).

5.3.6 Defuzificação das saídas

Na defuzificação os valores fuzzy são transformados em valores numéricos reais que correspondem à saída do sistema. Existem vários métodos para defuzificar a saída do sistema fuzzy, sendo o centróide, equação 4.31 (centro de gravidade) o método utilizado neste trabalho. Neste processo, acha-se a área sob cada função de pertinência tendo como máximo, o valor do índice de pertinência associado, figura 23(b). A resposta da lógica, nesse caso, é o centro de gravidade da área formada pela união dos quatro triângulos encontrados. O valor numérico fornecido representa a quantidade de fluoreto de alumínio(Kg) adicionado em uma cuba eletrolítica.

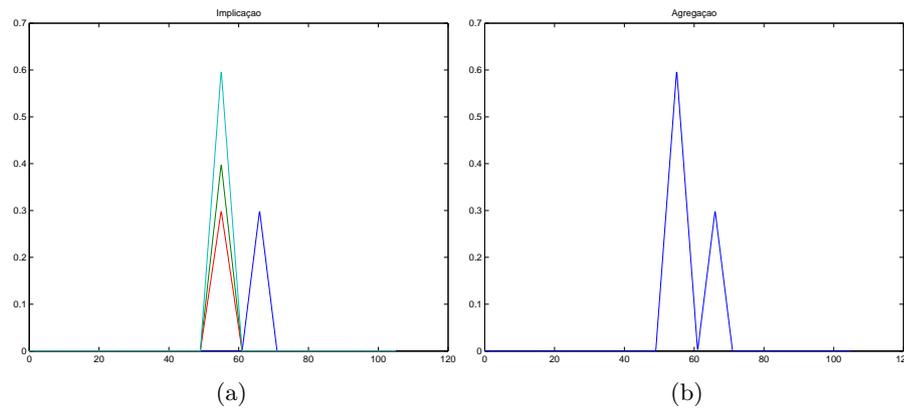


Figura 23 *Implicação e agregação: (a) Conjuntos de saída acionados pelo operador de implicação; (b) Agregação dos conjuntos de saída.*

5.4 Simulações

Na programação de adição de fluoreto (cálculo dos valores de saída) foram realizados cálculo para um conjunto de 30 cubas. Pode-se dizer que cada uma destas cubas encontra-se em um estado operacional em relação as variáveis de processo, dessa forma é possível simular várias situações, previstas na base de regras, ao mesmo tempo. Como seria demasiadamente longo detalhar os resultados das 30 cubas serão descritos apenas alguns resultados, mostrando-se as regras ativadas e os respectivos valores de saída[17].

Tomando-se como exemplo a cuba 117 da simulação, observa-se que foi acionada apenas uma regra (regra:282):

Tabela 11 *Conjuntos Fuzzy acionados*

Variáveis	Grau de Pertinência	Descrição dos Conjuntos Fuzzy
T_b	[0 0 1 0 0]	100% NORMAL
$\%AlF_3$	[0 1 0 0 0]	100% BAIXO
V_c	[1 0 0]	100% NOVA
ΔAlF_3	[0 0 0 0 0 0.65]	65% PG
T_{tmp}	[1 0]	Tendência de descida
T_{AlF_3}	[0 1]	Tendência de subida

- **REGRA 282:**

Se Temperatura é **NORMAL** e Fluoreto é **BAIXO** e Vida é **NOVA** e Variação do Consumo é **POSITIVA GRANDE** (PG) e Tendência de Temperatura é de **DESCIDA** e Tendência de Fluoreto é de **SUBIDA**, **ENTÃO** acionar o conjunto 3 (conjunto triangular centrado em 48 Kg).

Conforme visualizado na figura (21), a regra 282 gerou um resultado qualitativamente idêntico ao resultado esperado (48,9 Kg). Deve-se ressaltar que este valor em quilos ainda passara por uma espécie de filtro, uma vez que, o valor realmente adicionado à cuba é dado em bateladas.

O exemplo abaixo descreve a conversão de quilograma para batelada:

- Valor calculado: 52 Kg
- Valor da batelada: 12 Kg
- Valor realmente adicionado: 4 bateladas de 12 Kg (48 Kg)
- Tolerância: metade do valor da batelada

Observa-se então que existe uma certa tolerância em relação ao erro gerado pelo sistema fuzzy. Na tabela abaixo seguem alguns exemplo de outras situações onde apesar de ter havido erro, em quilos, entre o valor calculado e o valor desejado para a adição, consegue-se adicionar o valor correto em bateladas.

Tabela 12 *Resultados*

	Cuba 1	Cuba 2	Cuba 3
Valor calculado pelo sistema de controle anterior (kg)	0	38	48
Valor calculado pelo sistema fuzzy (kg)	2.6	32	47
Valor calculado pelo sistema de controle anterior (Bateladas)	0	3	4
Valor calculado pelo sistema fuzzy (Bateladas)	0	3	4
Erro (kg)	2.6(Aceitável)	6(Aceitável)	1(Aceitável)

Implementação no Sistema Real

A nova estratégia de controle para adição de fluoreto baseado na lógica fuzzy, foi analisada na (seção 5.4) com um enfoque teórico, contemplando o comportamento da dinâmica das variáveis de processo, obtendo resultados aceitáveis durante a simulação[17]. Porém, quando uma nova lógica de controle de adição de fluoreto é implementada, na prática, muitos efeitos sobre as variáveis de entrada do sistema podem ser influenciadas devido à complexidade dos fenômenos que ocorrem na cuba através dos efeitos termodinâmicos e eletromagnéticos acoplados. Devido essas perturbações no sistema, é possível analisarmos através da implementação do sistema real, o quanto à lógica agregou o conhecimento humano e a evolução dessas variáveis de processo durante a operação das cubas eletrolíticas.

6.1 Implementação Computacional

O algoritmo fuzzy foi desenvolvido em linguagem Pascal Orientado a Objetos, usando a ferramenta de desenvolvimento Delphi, versão 5.0. O código fonte do algoritmo foi inserido no sistema anterior(SISRED), sem alteração da interface gráfica principal e a rotina de trabalho dos especialistas de processo.

Na programação de adição de fluoreto de alumínio(cálculo dos valores de saída), o cálculo é realizado rotineiramente para um conjunto de 30 cubas. Pode-se dizer que cada uma destas cubas encontra-se em um determinado ponto de operação. Com a implementação do algoritmo fuzzy no sistema de supervisão de redução(SISRED), possibilitou ativar a lógica em qualquer um dos 960 fornos da fábrica.

Na fase de testes para adição de fluoreto de alumínio foram ativadas dez cubas, localizadas na Redução IV, seção 31, nos fornos 301-310. O forno 301 estava com vida inferior a 180 dias, sendo controlado quimicamente pelos engenheiros de processo. Esta fase denominada de controle de acidez não é controlada pelo sistema de controle fuzzy, somente após os 180 dias de operação o controle é automaticamente ativado.

A figura (24), representa o formato do relatório utilizado na programação de adição de fluoreto de alumínio (AlF_3). Os dados mostrados no relatório informam ao usuário a quantidade de fluoreto de alumínio, convertido em bateladas, sendo 1 batelada = 11 kg, porcentagem de fluoreto de alumínio (AlF_3) calculado e a temperatura de cada forno da seção, onde está sendo realizada a programação, que calcula a média, o desvio padrão e a porcentagem de faixa.

Programação de Adição										
Redução IV			Seção 31			<input type="checkbox"/> * - Diferença de AlF_3 maior que 2,0% na faixa de 1,0% a 16,0% ** - Forno com vida inferior a 180 dias				
Data da Amostragem			29/07/2005 14:29			F - Adição Baseada no Fuzzy				
Data da TMP/Adição			29/07/2005							
Turno			3							
Fornos	% AlF_3 Calc	TMP	Fornos	CaF ₂			AlF ₃		DeltaT	Vida
				Saco	%	BAT.	%	BAT./Kg		
301 **	9,0	969	301	0	5,4	0	5,9	0	-3,5	138
302	10,1 *	963	302 (F)	0	4,9	1	7,7	3	-7,2	426
303	10,3 *	962	303 (F)	0	5,3	0	7,7	3	-7,7	1459
304	9,9	964	304 (F)	0	5,1	0	11,2	1	5,7	405
305	8,6 *	971	305 (F)	0	5,1	0	5,8	2	-1,9	391
306	11,1	958	306 (F)	0	4,8	2	9,5	2	-7,5	966
307	6,8 *	980	307 (F)	0	4,4	5	4,8	4	5,2	692
308	6,8	980	308 (F)	0	4,9	2	-0,5	4		1506
309	10,3	962	309 (F)	0	5,6	0	9,2	3	-2,9	1494
310	13,1	948	310 (F)	0	4,8	3	13,1	0	-2,4	299
311	11,5	956	311	0	4,9	2	10,6	4	-5,6	591
312	9,0	969	312	0	5,5	0	8,2	5>6	1,4	1107
313	10,3	962	313	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
314	10,3 *	962	314	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
315	6,6	981	315	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
316	11,3	957	316	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
317	8,8	970	317	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
318	10,7	960	318	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
319	9,0	964	319	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
320	10,3	962	320	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
321	10,3 *	962	321	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
322	6,6	981	322	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
323	11,3	957	323	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
324	8,8	970	324	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
325	10,7	960	325	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
326	9,0	964	326	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
327	10,3	962	327	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
328	10,3 *	962	328	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
329	6,6	981	329	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
330	11,3	957	330	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
331	8,8	970	331	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
332	10,7	960	332	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
333	9,0	964	333	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
334	10,3	962	334	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
335	10,3 *	962	335	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
336	6,6	981	336	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
337	11,3	957	337	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
338	8,8	970	338	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
339	10,7	960	339	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
340	9,0	964	340	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
341	10,3	962	341	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
342	10,3 *	962	342	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
343	6,6	981	343	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
344	11,3	957	344	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
345	8,8	970	345	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
346	10,7	960	346	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
347	9,0	964	347	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
348	10,3	962	348	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
349	10,3 *	962	349	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
350	6,6	981	350	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
351	11,3	957	351	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
352	8,8	970	352	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
353	10,7	960	353	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
354	9,0	964	354	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
355	10,3	962	355	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
356	10,3 *	962	356	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
357	6,6	981	357	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
358	11,3	957	358	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
359	8,8	970	359	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
360	10,7	960	360	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
361	9,0	964	361	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
362	10,3	962	362	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
363	10,3 *	962	363	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
364	6,6	981	364	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
365	11,3	957	365	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
366	8,8	970	366	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
367	10,7	960	367	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
368	9,0	964	368	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
369	10,3	962	369	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
370	10,3 *	962	370	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
371	6,6	981	371	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
372	11,3	957	372	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
373	8,8	970	373	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
374	10,7	960	374	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
375	9,0	964	375	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
376	10,3	962	376	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
377	10,3 *	962	377	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
378	6,6	981	378	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
379	11,3	957	379	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
380	8,8	970	380	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
381	10,7	960	381	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
382	9,0	964	382	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
383	10,3	962	383	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
384	10,3 *	962	384	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
385	6,6	981	385	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
386	11,3	957	386	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
387	8,8	970	387	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
388	10,7	960	388	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
389	9,0	964	389	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
390	10,3	962	390	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
391	10,3 *	962	391	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
392	6,6	981	392	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
393	11,3	957	393	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
394	8,8	970	394	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
395	10,7	960	395	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
396	9,0	964	396	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
397	10,3	962	397	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
398	10,3 *	962	398	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
399	6,6	981	399	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
400	11,3	957	400	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
401	8,8	970	401	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
402	10,7	960	402	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
403	9,0	964	403	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
404	10,3	962	404	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
405	10,3 *	962	405	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
406	6,6	981	406	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
407	11,3	957	407	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
408	8,8	970	408	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
409	10,7	960	409	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
410	9,0	964	410	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
411	10,3	962	411	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
412	10,3 *	962	412	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
413	6,6	981	413	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
414	11,3	957	414	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
415	8,8	970	415	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
416	10,7	960	416	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
417	9,0	964	417	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
418	10,3	962	418	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
419	10,3 *	962	419	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
420	6,6	981	420	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
421	11,3	957	421	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
422	8,8	970	422	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
423	10,7	960	423	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
424	9,0	964	424	0	5,5	0	8,0	5>6	1,4	1107
425	10,3	962	425	0	4,7	4	8,7	5	-6,1	509
426	10,3 *	962	426	0	4,9	1	8,3	5>3	-6,7	557
427	6,6	981	427	0	5,1	0	5,8	5>6	9,0	551
428	11,3	957	428	0	4,8	2	10,3	5	-5,8	383
429	8,8	970	429	0	5,0	1	7,9	5>6	0,8	812
430	10,7	960	430	0	5,4	0	9,4	5	-4,8	288
431	9,0	964	43							

Com a implementação da lógica fuzzy surgiu a necessidade de uma ferramenta para análise de fluoreto de alumínio adicionado nas cubas, ilustrada na figura (25), que disponibiliza o valor de pertinência de cada conjunto, as regras acionadas e a respectiva saída defuzificada. Esta ferramenta além de possibilitar o acompanhamento das decisões efetuadas pelo sistema fuzzy também possibilita à análise histórica das decisões, pois permite a escolha de uma data onde já foi executada a adição de fluoreto.

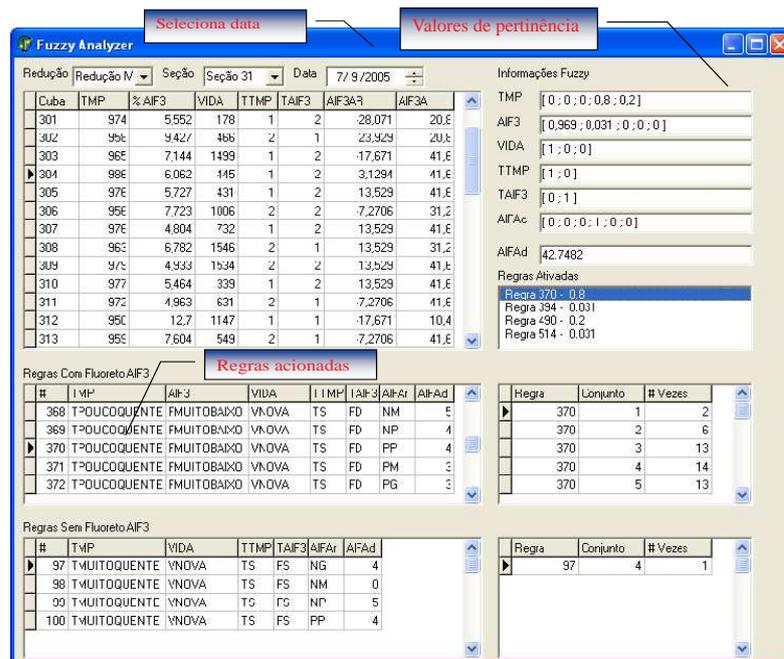


Figura 25 Analisador Fuzzy

6.2 Resultados da Adição de Fluoreto de Alumínio

Os resultados proposto pelo sistema fuzzy durante a fase de testes nas cubas eletrolíticas, serão apresentados em três situações distintas. Seria demasiadamente longo e repetitivo detalhar os resultados para todas as dez cubas. A seguir são apresentadas algumas regras que ativaram em uma determinada condição de operação e seus respectivos valores de saída, comparação dos resultados proposto pelo sistema anterior (SISRED) com o sistema fuzzy e o comportamento dinâmico das variáveis de processo ao longo das adições de fluoreto de alumínio[17].

6.2.1 Situação 1:

A tabela (13) apresenta os valores reais de entrada do sistema, valores de pertinência para as variáveis e a descrição dos conjuntos fuzzy ativados na base de regras. As regras acionadas(206 e 207), propõem ações para não adicionar fluoreto. Nas mesmas condições, o cálculo realizado pelo sistemas anterior (SISRED) também propôs pela suspensão da adição. A tabela (14) apresenta os resultados comparando a saída do sistema fuzzy com a saída do sistema anterior. Percebe-se que a lógica fuzzy agregou as características desejadas pelo sistema. Porém, muitas mudanças podem acontecer abruptamente com o excesso ou a falta de fluoreto. O controle dessas variáveis, principalmente o fluoreto de alumínio mantém a estabilidade térmica das cubas. Uma cuba com o estado de operação "NOVA" consome pouco fluoreto. Este comportamento pode ser melhor compreendido analisando o gráfico (8), que representa o consumo de fluoreto ao longo da vida de cuba (dias).

Tabela 13 *Conjuntos Fuzzy acionados na base de regras para a cuba 304*

Variáveis	Valores Crisp	Grau de Pertinência	Descrição dos Conjuntos Fuzzy
T_b	951 °C	[0 1 0 0 0]	100% PF
$\%AlF_3$	13.23	[0 0 0 1 0]	100% PA
V_c	395	[1 0 0]	100% NOVA
ΔAlF_3	-14.047	[0 0 0.81 0.19 0 0 0]	81% NM e 19% NP
T_{tmp}	1	[0 1]	TD
T_{AlF_3}	1	[1 0]	FS

Tabela 14 *Resultados da adição para cuba 304*

	Cuba 304
Valor calculado pelo sistema de controle anterior (kg)	0
Valor calculado pelo sistema fuzzy (kg)	2.6
Valor calculado pelo sistema de controle anterior (Bateladas)	0
Valor calculado pelo sistema fuzzy (Bateladas)	0
Erro(kg)	2.6(Aceitável)

Abaixo estão apresentadas as regras acionadas para a cuba 304, conforme a disposição das variáveis nas tabelas (13 , 14), utilizando o Método de Inferência Mínimo de *Mamdani*:

- **REGRA 206:**

Se Temperatura é **POUCO FRIA** e Fluoreto é **POUCO ALTO** e Vida é **NOVA** e Variação do Consumo é **NEGATIVO MÉDIA (NM)** e Tendência de Temperatura é de **DESCIDA** e Tendência de Fluoreto é de **SUBIDA**, **ENTÃO** acionar o conjunto 1 (conjunto triangular centrado em 0).

- **REGRA 207:**

Se Temperatura é **POUCO FRIA** e Fluoreto é **POUCO ALTO** e Vida é **NOVA** e Variação do Consumo é **NEGATIVO PEQUENO (NP)** e Tendência de Temperatura é de **DESCIDA** e Tendência de Fluoreto é de **SUBIDA**, **ENTÃO** acionar o conjunto 1 (conjunto triangular centrado em 0).

A figura (26) apresenta os resultados obtidos para cuba 304 durante o período da fase testes. O gráfico está dividido em duas regiões definida pela data em que o sistema fuzzy começou a funcionar. Observa-se na região mais a direita a partir da linha vertical preta (lógica fuzzy) que o nível de oscilação das variáveis temperatura (linha vermelha) e percentual de fluoreto (linha azul) foi reduzido. Este era um dos principais resultados esperados com a atuação da lógica fuzzy, podendo ser traduzido pela engenharia de processo como uma condição de operação mais segura.

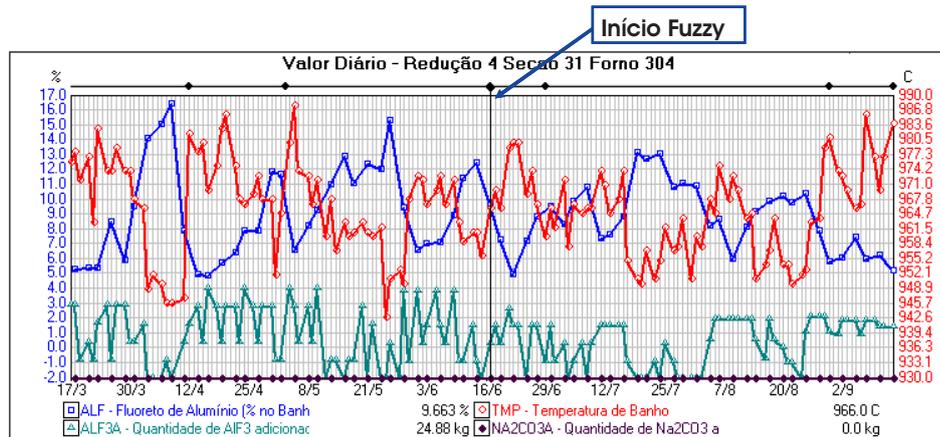


Figura 26 Forno 304

Analisando o relatório, ilustrado na figura (27), visualizamos uma outra situação em que a cuba 304 conseguiu agregar as características desejadas pela operação, propondo 3 bateladas. Estas características, foram obtidas após à intervenção do operador na cuba 312, no qual modificou o valor proposto pelo sistema de controle antigo(não fuzzy) de 5 bateladas para 3 bateladas.

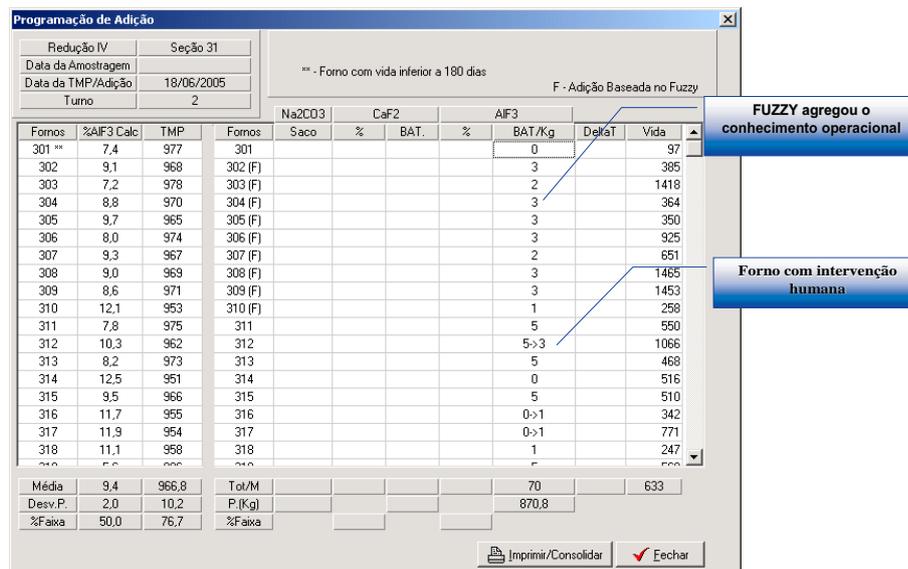


Figura 27 Relatório para adição de fluoreto de alumínio

6.2.2 Situação 2:

Na tabela (15) demonstra os valores de entrada de cada variável utilizada no controle do processo. Nesta situação apenas uma regra foi ativada (244), tendo como saída o quarto conjunto fuzzy centralizado em 42 Kg. A tabela (16) compara os resultados de saída proposto pelo sistema fuzzy e o sistema anterior, com uma margem de erro de uma batelada. Analisando graficamente o comportamento das variáveis temperatura de banho (linha vermelha) e percentual de fluoreto (linha azul), ilustrada na figura (28), sinalizadas pela seta preta, ambas as variáveis com tendência de subida, por algum efeito não químico, mas físico. Por esta situação a quantidade de fluoreto proposto pelo sistema anterior poderia elevar o percentual de fluoreto a valores indesejáveis, apesar do percentual estar em um nível muito baixo, espera-se que o fluoreto suba, devido o efeito (inércia) das adições passadas. A quantidade proposta pela estratégia fuzzy, manteve a subida do fluoreto sem elevar para percentuais indesejáveis, mantendo a temperatura de banho a valores desejáveis para solubilização da alumina no processo.

Tabela 15 Conjuntos Fuzzy acionados na base de regras para a cuba 305

Variáveis	Valores Crisp	Grau de Pertinência	Descrição dos Conjuntos Fuzzy
T_b	971 °C	[0 0 1 0 0]	100% N
% AlF_3	5.84	[1 0 0 0 0]	100% MB
V_c	391	[1 0 0]	100% NOVA
ΔAlF_3	9.49	[0 0 0 1 0 0]	100% PP
T_{tmp}	1	[1 0]	TS
T_{AlF_3}	1	[1 0]	FS

Tabela 16 Resultados da adição para cuba 305

Cuba 305	
Valor calculado pelo sistema de controle anterior (kg)	55
Valor calculado pelo sistema fuzzy (kg)	43
Valor calculado pelo sistema de controle anterior (Bateladas)	5
Valor calculado pelo sistema fuzzy (Bateladas)	4
Erro(kg)	12(1 batelada)

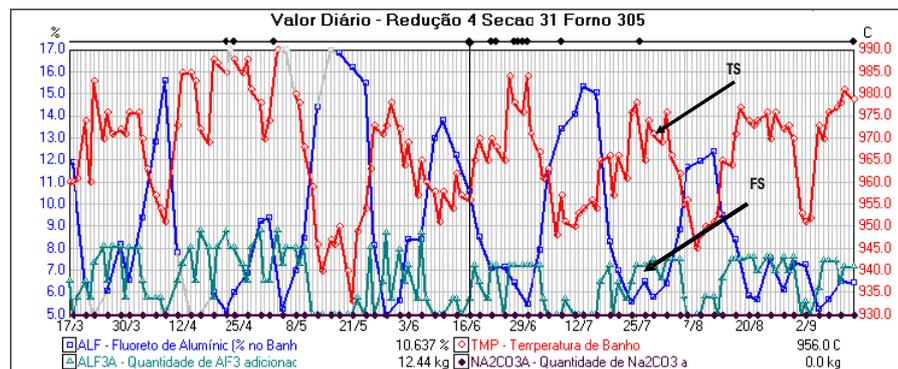


Figura 28 Gráfico da cuba 305

Abaixo está apresentada a regra acionada para a cuba 305 utilizando o método de inferência mínimo de *Mamdani*:

- **REGRA 244:**

Se Temperatura é **NORMAL** e Fluoreto é **MUITO BAIXO** e Vida é **NOVA** e Variação do Consumo é **POSITIVO PEQUENO (PP)** e Tendência de Temperatura é de **SUBIDA** e Tendência de Fluoreto é de **SUBIDA**, **ENTÃO** acionar o conjunto 5 (conjunto triangular centrado em 42 Kg).

Analisando a cuba 308, o círculo à esquerda mostra que uma alta alimentação (curva verde) resultou em uma subida muito grande do percentual de fluoreto (flecha). O segundo círculo mostra que alimentações menores porém mais frequentes causam menores oscilações nos valores de percentual de fluoreto.

Durante a fase de teste a cuba 308, gráfico (30), houve um período de instabilidade, por algum motivo nas reações existentes na química de banho (eletrólito). Durante este período de instabilidade do fluoreto a temperatura de banho manteve-se em uma região de operação sem comprometer a estabilidade do processo. Percebemos que as adições realizadas pelo sistema fuzzy recuperaram gradativamente a tendência de subida do fluoreto.

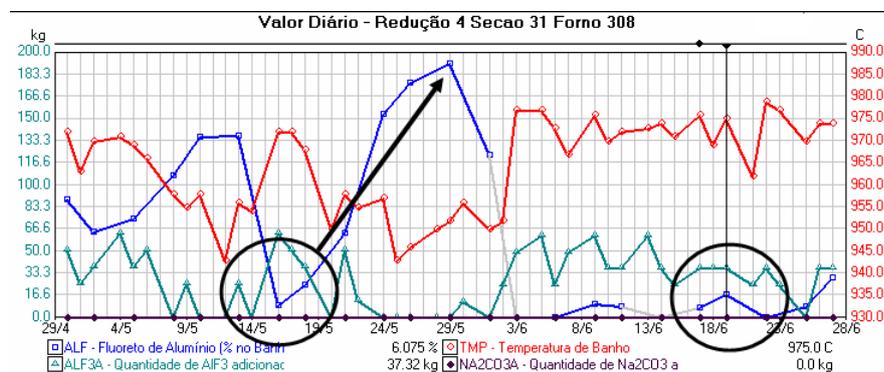


Figura 29 Forno 308

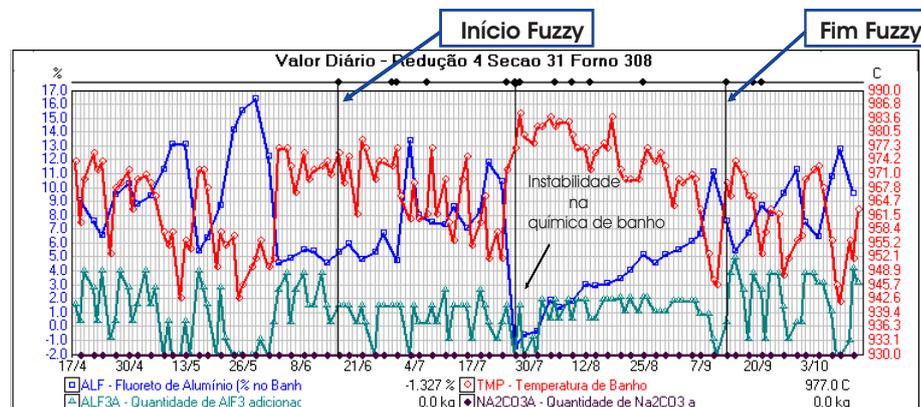


Figura 30 Forno 308 durante a fase de testes utilizando lógica fuzzy

6.2.3 Situação 3:

Os resultados apresentados no gráfico (31), pode ser melhor compreendido fazendo uma comparação entre os períodos de atuação da lógica fuzzy com o período não fuzzy (proposta do SISRED). É importante notar que as adições realizadas pelo sistema fuzzy, mantem as variáveis fluoreto de alumínio e temperatura de banho menos oscilatória em relação ao período da lógica convencional. Isto deve-se ao fato das adições serem menores e regulares durante as programações de fluoreto. Durante o período anterior a lógica fuzzy, percebemos que o excesso ou a falta de fluoreto no banho, provocou fortes oscilações na temperatura devido a relação existente entre as variáveis. As tabelas (17, 18) apresentam a média e o desvio padrão entre os períodos utilizando a lógica fuzzy e a lógica convencional. Nota-se que a média de temperatura no período fuzzy está com uma variação de seis graus acima do período não fuzzy. Isto é uma resposta da estabilidade da temperatura sem sofrer grandes alterações durante o processo. O fluoreto de alumínio manteve a média abaixo do desejado, devido as baixas adições como foi relatado acima. Porém, o desvio padrão durante esse período não se afastou muito da média em relação ao período não fuzzy. Isto quer dizer que quanto menor o desvio padrão menor é a oscilação da variável durante o processo.

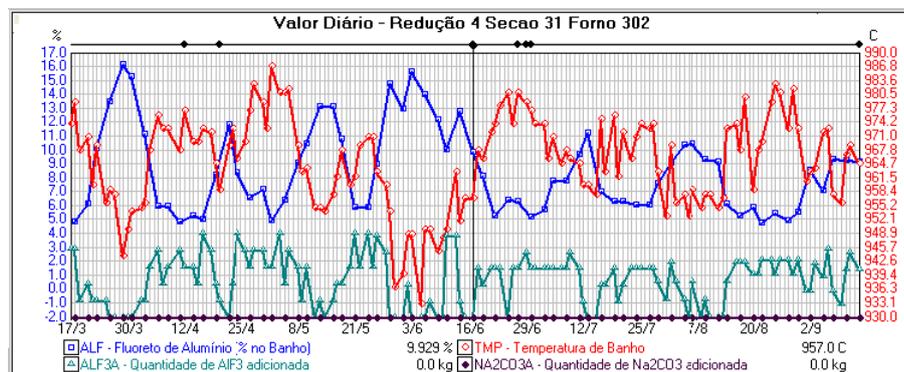


Figura 31 Forno 302 fuzzy: análise do gráfico para um longo período de adição

Tabela 17 *Período lógica fuzzy - cuba 302*

	Temperatura de banho	Fluoreto de Alumínio
Média	968 °C	7.5
Desvio Padrão	8.15	1.87

Tabela 18 *Período lógica convencional - cuba 302*

	Temperatura de banho	Fluoreto de Alumínio
Média	962 °C	10.4
Desvio Padrão	10.63	3.48

6.3 Validação do Sistema

A validação do sistema foi realizada a partir da implementação da lógica simulada em 10 fornos de uma redução, aos quais os operadores foram orientados a somente intervir em casos de extrema necessidade, ou seja, se a lógica estivesse provocando situações indesejáveis ao processo. Porém deve-se ressaltar que segundo especialistas da área de redução a validação de uma nova lógica de adição de fluoreto deve passar por um período razoável de testes de pelo menos 7 meses. Os fornos utilizados para teste passaram aproximadamente dois meses operando com a nova lógica. O apêndice (B) demonstra a média e o desvio padrão para os restantes das cubas no qual foi implementado o sistema fuzzy.

Conclusão

Os resultados apresentados utilizando a estratégia fuzzy atende de forma satisfatória aos objetivos propostos, uma vez que conseguiu agregar ao sistema automatizado as intervenções ou modificações realizadas pelo técnico de processo a respeito do valor sugerido pelo sistema de adição de fluoreto atual. Este resultado positivo permitirá que os técnicos direcionem suas ocupações para melhoria do processo em vez de sempre estarem preocupados em analisar, criticar e modificar os resultados sugeridos pelo sistema atual. Além de agregar o conhecimento humano, observamos que a estratégia fuzzy já indicou melhora na estabilidade do sistema, pois, conforme mostrado no capítulo anterior (6), os valores de temperatura e percentual de fluoreto atingiram valores de amplitude menores. Porém, em termos de redução de alumínio, segundo alguns experientes profissionais da área, só é possível ter-se avaliada a eficácia de uma nova estratégia, com certo grau de confiabilidade, após pelo menos sete meses de uso.

Como propostas de desenvolvimentos de trabalhos futuros pode-se indicar:

- Atualização do Banco de Regras em um período mais confiável;
- Levar em consideração o histórico do forno ;
- Estabelecer uma faixa de AlF_3 para evitar os períodos sem adição;
- Desenvolvimento de uma rotina que compense os valores fuzzy não efetivamente adicionados devido ao arredondamento sofrido quando é feita a conversão de quilos para bateladas.

APÊNDICE A – Método dos Mínimos Quadrados

A.0.1 Tendência de Temperatura(T_{tmp}) e Fluoreto de Alumínio(T_{AlF_3})

É obtido a partir dos N (atualmente N=3) pontos, encontrando-se a reta que melhor se ajusta a estes pontos.

Exemplo A.0.1. Dada a tabela de pontos (X_i, Y_i) , mostrada abaixo encontrar a reta que melhor se ajusta aos mesmos:

Tabela 19 Medida de Temperatura

X_i	912	928	935
Y_i	1	2	3

Solução:

Passo 1. Executar o somatório dos valores de X_i :

$$SX = 912 + 928 + 935 = 2775$$

Passo 2. Executar o somatório dos valores ao quadrado de X_i :

$$EXQ = (912)^2 + (928)^2 + (935)^2 = 2567153 \quad (\text{A.1})$$

Passo 3. Executar o somatório dos valores de Y_i :

$$SY = 1 + 2 + 3 = 6 \quad (\text{A.2})$$

Passo 4. Executar o somatório do produto entre os valores X_i e Y_i

$$SXY = (8 * 1) + (11 * 2) + (14 * 3) = 5573 \quad (\text{A.3})$$

Passo 5: Calcular os coeficientes da reta

$$\text{coeficiente linear} \rightarrow b = \frac{SY - NA}{SX} \quad (\text{A.4})$$

NA = Número de pontos utilizados (NA=3)

$$\text{coeficiente angular} \rightarrow a = \frac{SXY - SXQ * b}{SX} \quad (\text{A.5})$$

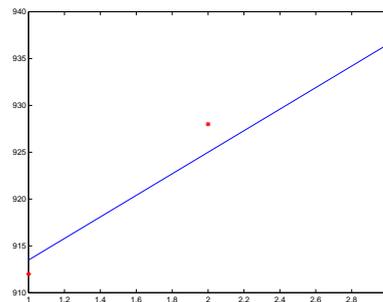


Figura 32 Reta utilizando MMQ

Assim, a resposta do vetor de tendência de fluoreto ou tendência de temperatura, que funciona de forma análoga, será:

Tendência de SUBIDA: caso a inclinação da reta seja para cima ($a > 0$);

Tendência de DESCIDA: caso a inclinação da reta seja para baixo ($a < 0$);

APÊNDICE B – Análise dos dados

B.1 Temperatura de Banho

As tabelas (20) e (21), apresentam uma análise estatística dos dados para a variável temperatura de banho, calculando a média e o desvio padrão nos períodos fuzzy e não fuzzy. Percebe-se que a média de temperatura de banho no período fuzzy está a cima da média em relação ao período não fuzzy. Para o processo essa pequena variação manteve-se em uma região de operação sem comprometer a estabilidade térmica da cubas. Quanto ao desvio padrão, a maioria das cubas no período fuzzy, manteve o desvio menor em relação ao desvio do período não fuzzy. Isto significa dizer que quanto menor for o desvio em relação a média, menos dispersos encontra-se os valores de temperatura em relação aos valores médios de temperatura.

Tabela 20 *Período lógica fuzzy - Temperatura*

Forno	Média	Desvio Padrão
301	966.7761194 °C	8.091935558
303	966.358209	8.404006066
304	965.4029851	9.128808382
305	965.6865672	10.14173638
306	967.9552239	13.51030228
307	966.8656716	10.31165202
308	970.5223881	9.29704777
309	965.9402985	10.33804477
310	964.9850746	11.83535092

Tabela 21 *Período lógica convencional - Temperatura*

Forno	Média	Desvio Padrão
301	964.9009009 °C	9.903126187
303	964.233871	8.646733366
304	965.2177419	9.884339658
305	963.8870968	13.36675264
306	966.9112903	9.723002729
307	964.7983871	8.966042387
308	963.4274194	10.43226186
309	963.0564516	8.716214606
310	961.5967742	9.766309565

B.2 Fluoreto de Alumínio

As tabelas (22) e (23), apresentam os cálculos da média e desvio padrão para a variável fluoreto de alumínio nos períodos fuzzy e não fuzzy. Observa-se que todas as cubas onde foi implementado o sistema fuzzy, a média de fluoreto de alumínio está abaixo da média em relação ao período não fuzzy. Isto deve-se a fato das adições de fluoreto serem inferiores em relação as adições realizadas pelo sistema convencional e criticadas pelo técnico de processo.

Tabela 22 *Período lógica fuzzy - Fluoreto*

Forno	Média	Desvio Padrão
301	7,450647144	2,595775107
303	7,50744117	2,773823029
304	8,828882316	2,180075718
305	8,53985292	2,98032498
306	7,839176458	3,145964093
307	8,107676436	2,975026842
308	5,612294111	3,435540386
309	8,445058893	3,361150243
310	8,756029452	3,547332607

Tabela 23 *Período lógica convencional - Fluoreto*

Forno	Média	Desvio Padrão
301	10,61014006	3,046219151
303	10,33982258	2,809707834
304	10,07606454	3,268124881
305	10,617371	3,751192312
306	9,56887096	3,053094648
307	9,915516107	2,90338339
308	9,768419354	3,550839611
309	9,827258041	3,032062286
310	9,99130642	3,42711416

Referências

- [1] Zeng, S., *Fuzzy Inference Of Temperature For Aluminum Production*, Nacional Natural Science Foundation of China, 1996.
- [2] Meghlaoui, A., Aljabri, N., *Aluminum Fluoride Control Strategy Improvement*, Light Metals - The Mineral, Metal and Materials Society, 2003.
- [3] Branco, M. V. B. M.; Castro, M.; Oliveira, R. C. L.; Ribeiro, M. R. B.; Pereira, V. G. *Neural Model of Electric Resistance in Reduction Cells of Aluminum to be Applied on the Process Control*, paper in (CD-Rom) VI Internacional Conference on Industrial Applications - Joinville - Brazil, 2004 .
- [4] *Fundamentos do Alumínio e suas Aplicações*, Revista ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Janeiro, 2004.
- [5] Branco, M. V. B. M., *Modelo Neural da Resistência Elétrica das Cubas Eletrolíticas Aplicado em Processo de Controle*, Dissertação de Mestrado, PPGEE/DEEC/UFPa, Dezembro, 2004.
- [6] Grjotheim, K.; Kvande, H., *Introduction to Aluminium Electrolysis - Understanding the Hall-Héroult Process*, 2nd Edition, Aluminium - Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [7] Haupin, W.; Kvande, H., *Mathematical Model of Fluoride Evolution from Hall-Héroult Cells*, Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 1993, 257-263.
- [8] Solheim, A.; Rolseth, S.; Skybakmoen, E.; Støfen, L., *Liquidus Temperature and Alumina Solubility in the System $Na_3AlF_3 - AlF_3 - CaF_2 - MgF_2$* , Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 1995.
- [9] Haupin, W., *Bath Properties: and how they effect cell operation*, Trondheim, The International Course on Process Metallurgy of Aluminium, 1996.
- [10] Rieck, T.; Ifert, M.; White, P.; Rodrigo, R.; Kelchtermans, R., *Increased Current Efficiency and Reduced Energy Consumption at the TRIMET Smelter Essen using 9 Box Matrix Control*. Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 2003.

-
- [11] Dias, H. P., *Determinação Teor AlF_3 no Banho Utilizando Temperatura*, VIII Seminário Internacional de Tecnologia da Indústria do Alumínio, São Paulo, 2002.
- [12] Hyland, M. M.; Patterson, E. C.; Stevens-Mcfadden; Welch, B. J., *Aluminium Fluoride Consumption and Control in Smelting Cells*, paper 189 in (CD-Rom)VI International Conference on Molten Slags. Fluxes and Salts Conference, Stockholm, Sweden - Helsinki, Finland, 2000.
- [13] Zadeh, L. A., *Fuzzy sets*, Information and Control, Vol.8, 1965, No.3; pp. 338-353.
- [14] Wang, Li-Xin. *A Course in Fuzzy Systems and Control*, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [15] Mendel, J. M., *Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial*, Proc. IEEE, Vol.83, 1995; pp. 345-377.
- [16] Lee, C. C., *Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - part I and II*. IEEE Transactions on Systems, Vol.20, 1990, No. 2; pp. 404-418,419-435.
- [17] Pereira, V. G.; Branco, M. V. B. M.; Oliveira, R. C. L.; Castro, M.; Soares, F. , *Adição de AlF_3 em Cubas de Alumínio Utilizando Lógica Fuzzy*, paper in (CD-Rom) VII Simpósio de Automação Inteligente - São Luís - Brazil, 2005 .
- [18] The Math Works, Inc. (1998). *Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB*. - User's Guide. The Math Works, Inc.
- [19] Alton, T. T.; Tom, R. A.; Luke, T., *Lithium-Modified Low Ration Electrolyte Chemistry For Improved Performance In Modern Reduction Cells*, Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 1992.
- [20] Fiona, J. S. M.; Geoffrey, P. B.; Paul, C. A., Welch, B. J., *Application Of Advanced Process Control To Aluminium Reduction Cells*, Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 2001.
- [21] Utigard, T. A., *Why "best" pots operate between 955 and 970* , Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 1999.
- [22] Peter, M. E., *Control Of Bath Temperature*, Light Metals - The Minerals, Metals and Materials Society, 2003.