

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Leopoldo José Naves Alves

**CONTROLE NEURO *FUZZY* PARA OTIMIZAÇÃO DE
PROCESSO DE MOAGEM DE CIMENTO**

Belo Horizonte
2013

Leopoldo José Naves Alves

**CONTROLE NEURO *FUZZY* PARA OTIMIZAÇÃO DE
PROCESSO DE MOAGEM DE CIMENTO**

**Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Pontifícia Universidade Católica de Minas
Gerais como requisito parcial para a
obtenção de Mestre em Engenharia Elétrica**

Orientador : Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel

Co-orientador: Dr. Illya Kokshenev

**Belo Horizonte
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

A474c Alves, Leopoldo José Naves
Controle neuro fuzzy para otimização de processo de moagem de cimento /
Leopoldo José Naves Alves. Belo Horizonte, 2013.
103f.: il.

Orientador: Petr Iakovlevitch Ekel
Coorientador: Illya Kokshenev
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

1. Sistemas especialistas (Computação). 2. Redes neurais (Computação). 3.
Sistemas difusos. 4. Cimento - Indústria. I. Ekel, Petr Iakovlevitch. II.
Kokshenev, Illya. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 681.3.091

Leopoldo José Naves Alves

CONTROLE NEURO FUZZY PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE MOAGEM DE CIMENTO

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Prof. Petr Iakovlevitch Ekel, D.Sc. (hábil.), Ph.D. – Orientador
PPGEE, PUC - MG**

**Prof. Ilya Kokshenev, Dr. – Co-orientador
PPGEE, PUC - MG**

**Prof. Eduardo Nunes Gonçalves, Dr. -
CEFET-MG**

**Prof. Roberta Oliveira Parreiras, Dr. – Suplente
PPGEE, PUC - MG**

Belo Horizonte, 06 de Novembro de 2013

*Dedico este trabalho aos meus pais pelo exemplo, suporte e carinho,
à minha esposa companheira de minha vida e a meu filho
a quem devo a grata compleição como ser humano*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel pela dedicação de seu tempo, paciência e exemplo como pessoa e pesquisador.

Agradeço ao apoio do CEFET-MG, meu empregador, pelo suporte ao desenvolvimento do mestrado na PUC – MG.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-MG pela valiosa contribuição ao meu crescimento em termos acadêmicos.

Um muito obrigado à Isabel pela disposição em ajudar com seu enorme senso de responsabilidade e simpatia sem igual.

EPIGRAFE

**Porque a verdade e a certeza da imortalidade do homem,
não só é Fé, senão também ciência.**

**Padre Antonio Vieira no Sermão de Quarta Feira de
Cinza proferido em Roma, na Igreja de S Antônio dos
Portugueses em de 1672.**

RESUMO

O presente trabalho é dedicado à melhoria de eficiência energética no processo de moagem de cimento. O trabalho foi desenvolvido em ambiente de simulação computacional baseado em modelos de processo já considerados na literatura técnica. Uma abordagem de otimização baseada em controle neuro *fuzzy* é implementada e os resultados de sua aplicação são mostrados. A moagem de clínquer é a última etapa do processo de fabricação do cimento sendo a que mais demanda consumo específico de energia, da ordem de 40% do total necessário para a produção. Nesta etapa, as partículas do clínquer e demais aditivos são reduzidas de modo a se obter a mistura e granulometria necessários que tem influencia direta nas características requeridas para o cimento tais como resistência, tempo de pega, demanda de água e outros. Os objetivos de produção para esta etapa do processo são permanecer no ponto nominal de taxa de produção do sistema, atender os requisitos de granulometria necessários, mantendo o consumo específico de energia o mais reduzido possível. A revisão bibliográfica mostra que os trabalhos anteriores foram abrangentes e diversas, com o uso de controle multivariável linear e não linear, controle preditivo, controle não linear por modelo de referência, controle *fuzzy* bem como controle por redes neurais. Estas abordagens estiveram sempre focadas em maximização de produção, o que contribui para a redução do consumo específico, todavia sem levar em conta a granulometria do produto, na maior parte dos casos. Aqueles que levam em conta a granulometria do produto pressupõem a existência de um analisador de granulometria em linha, o que não existe na maior parte das moagens em operação. A contribuição desse trabalho então é o desenvolvimento de uma estratégia que é aderente à instrumentação e controle comumente existentes em moagens permitindo lidar com os objetivos de granulometria, produção e consumo específico simultaneamente. Tal abordagem permitirá a implementação de um nível de otimização em moagens sem a necessidade de investimento em aquisição e instalação de instrumentação adicional.

Palavras chave: Sistemas especialistas. Controle adaptativo. Neuro controle. Controle *fuzzy*. Otimização. Moagem de cimento.

ABSTRACT

The present work is dedicated to improving energy efficiency in the cement milling process. The work was developed in a computer simulation environment based on process models already considered in the technical literature. An optimization approach based on neuro fuzzy control is implemented and the results of its application are demonstrated. The clinker grinding is the last step of the cement manufacturing process, being the most energy consumer its part, drawing 40% of the total energy required for production. At this stage, the clinker particles and other additives are reduced so as to obtain the required mixture and particle size having a direct influence on the characteristics required for cement such as strength, setting time, water demand and others. Production targets for process are to remain at the system nominal production rate meeting the goals of required particle size as well as specific energy consumption as low as possible. Literature review shows that previous studies were comprehensive approaches in the use of intelligent control, control based on multivariable linear and nonlinear strategies, predictive control, nonlinear control with reference model, fuzzy control and neural network control. Such approaches have always focused on maximizing production, which contributes to a reduction in specific consumption, however without regard to the product particle size, in most cases. Those that take into account product particle size assume the existence of an on-line particle size analyzer, which does not exist in most mills in operation. The contribution of this work is the development of a strategy that can be used along with existing commonly instrumentation and control systems at regular cement mills dealing with three goals simultaneously: particle size, production rate and specific consumption. Such an approach will enable to implement an optimization level at milling control system without the need to invest in the acquisition and installation of additional instrumentation.

Key words: Specialist systems. Adaptative control. Neural control. Fuzzy control. Optimization. Finish cement mill,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cimento Portland	29
Figura 2 Processo de fabricação de cimento	30
Figura 3 Distribuição de energia no processo de fabricação de cimento.....	35
Figura 4 Circuito de moagem de cimento	39
Figura 5 Arranjo de um moinho de bolas de dois compartimentos.....	41
Figura 6 Diafragma entre dois compartimentos do moinho	41
Figura 7 Diagrama esquemático do classificador dinâmico a seco e do rotor	43
Figura 8 Diagrama esquemático do separador dinâmico da Polysys	43
Figura 9 Elevador de caçambas.....	44
Figura 10 Diagrama de blocos de modelo da moagem.....	45
Figura 11 Diagrama esquemático do modelo não linear	49
Figura 12 A função da moagem	50
Figura 13 A função de separação	50
Figura 14 Zona de estabilidade para o modelo.....	51
Figura 15 Diagrama de blocos das variáveis externas da moagem de cimento	52
Figura 16 Malhas de controle e instrumentação típicas de um moinho	53
Figura 17 Malhas de controle incorporadas ao circuito de moagem	56
Figura 18 Diagrama de blocos da hierarquia do sistema de controle	60
Figura 19 Estrutura básica do controlador <i>fuzzy</i>	63
Figura 20 Diagrama de blocos da hierarquia do sistema de controle	60
Figura 21 Estrutura de otimização neuro <i>fuzzy</i>	72
Figura 22 Diagrama de blocos da hierarquia do sistema de controle	73
Figura 23 Diagrama de blocos interno da função derivadas	74
Figura 24 Diagrama de blocos interno da quebra	75
Figura 25 Diagrama de blocos interno do controlador <i>fuzzy</i>	77
Figura 26 Parâmetros FIS_1	77
Figura 27 Configuração da variável de entrada eBlaine	78
Figura 28 Configuração da variável de entrada v-sep.....	79
Figura 29 Configuração da variável de saída dv	80
Figura 30 Regras <i>fuzzy</i>	81
Figura 31 Visualização das regras fuzzy	82
Figura 32 Superfície de Controle Obtida.....	83
Figura 33 Diagrama de blocos do controlador da taxa de alimentação	84
Figura 34 Diagrama de blocos da rede neural	85
Figura 35 Diagrama de blocos da primeira camada da rede neural	86
Figura 36 Diagrama de blocos da segunda camada da rede neural.....	87
Figura 37 Diagrama de blocos interno da atualização de parâmetros	88
Figura 38 (a) a (h) Resultados da primeira simulação.....	91
Figura 39 (a) a (h) Resultados da segunda simulação I.....	95
Figura 40 (a) a (h) Resultados da terceira simulação.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Consumo específico por tipo de material	36
Tabela 2 Parâmetros da variável <i>eBlaine</i>	78
Tabela 3 Parâmetros da variável <i>v-sep</i>	79
Tabela 4 Parâmetros da variável <i>dv</i>	80

LISTA DE ABREVIATURAS

CLP	Controlador Lógico programável
D ₆₃	Tamanho nominal de corte (63%) - equação de Rosin-Rammler
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
NRH	<i>Non Linear Receding Horizon</i>
OLE	<i>Object Linking and Embedding</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
RGA	<i>Relative Gain Array</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition System</i>
SMC	Sliding Mode Control
VSS	Variable Structure Systems

LISTA DE SIGLAS

ABCP **Associação Brasileira de Cimento Portland**

ABNT **Associação Brasileira de Normas Técnicas**

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	O Cimento como Material de Construção	29
1.2	O Processo de Fabricação de Cimento	30
1.2.1	<i>Preparação da Matéria Prima</i>	31
1.2.2	<i>Formação do Clínquer</i>	32
1.2.3	<i>A Moagem de Cimento</i>	34
1.2.4	<i>Ensacagem e Expedição</i>	35
1.2.5	<i>Demanda de Energia na Fabricação do Cimento</i>	35
1.3	Importância da Pesquisa	36
1.4	Objetivos	37
1.5	Publicações e Apresentações	38
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	39
2.1	Moagem de Cimento	39
2.1.1	<i>O Moinho de Cimento</i>	40
2.1.2	<i>O Separador Dinâmico</i>	42
2.1.3	<i>O Elevador de Canecas</i>	44
2.2	Modelagem e Simulação da Moagem de Cimento	45
2.2.1	<i>Modelagem Fenomenológica da Moagem de Cimento</i>	45
2.2.2	<i>Modelagem Empírica da Moagem de Cimento</i>	49
2.2.3	<i>Variáveis para Controle da Moagem de Cimento</i>	52
2.3	Controle do Processo da Moagem de Cimento	53
2.3.1	<i>Variáveis de Processo</i>	54
2.3.2	<i>Malhas de Controle</i>	54
2.3.3	<i>Filosofia de Controle</i>	55
2.4	Estado da Arte em Otimização de Controle de Moagens de Cimento	56
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS	60
3.1	Embasamento do Sistema de Otimização Proposto	61
3.1.1	<i>Controle Fuzzy</i>	62
3.1.2	<i>Redes Neurais Artificiais</i>	63
3.2	Estrutura de Otimização	64
3.1.1	<i>Controle de Blaine</i>	65
3.1.2	<i>Predição das Saídas da Moagem</i>	66
3.1.3	<i>Controle de Alimentação Nova do Moinho</i>	69
3.1.4	<i>Predição do Blaine</i>	70

4	IMPLEMENTAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO	71
4.1	O Simulador	71
4.1.1	<i>Implementação da Dinâmica da Moagem (Bloco Derivada)</i>	71
4.1.2	<i>Obtenção da Saída da Moagem (Bloco Integrais)</i>	74
4.1.3	<i>Simulador de Blaine</i>	75
4.1.4	<i>Amostrador de Blaine</i>	76
4.1.5	<i>Bloco Controle de Variações</i>	76
4.2	O Controle.....	76
4.2.1	<i>Controle Fuzzy para o Blaine (Bloco Fuzzy_v)</i>	76
4.2.2	<i>Controle Adaptativo da Alimentação Nova (Bloco Controlador U)</i>	84
4.3	Rede Neural.....	85
4.3.1	<i>Primeira Camada da Rede Neural (Bloco First Layer)</i>	86
4.3.2	<i>Segunda Camada da Rede Neural (Bloco Second Layer)</i>	87
4.3.3	<i>Atualização de Parâmetros (Bloco AP)</i>	88
4.3.4	<i>Atualização de Pesos (Bloco delta W)</i>	89
4.3.5	<i>Atualização de Parâmetros do Controlador Adaptativo (Bloco delta K)</i>	89
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	90
5.1	Condições de Simulação	90
5.2	Resultados da Simulação	91
5.2.1	<i>Primeira Simulação</i>	91
5.2.2	<i>Segunda Simulação</i>	95
5.2.3	<i>Terceira Simulação</i>	99
6	CONCLUSÕES	104
6.1	Conclusões do Trabalho	104
6.2	Proposição para trabalhos futuros	104

1. INTRODUÇÃO

1.1 O Cimento como Material de Construção

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água.

O cimento é chamado hidráulico quando o produto endurecido é estável na presença de água. O tipo de cimento hidráulico mais utilizado nos dias de hoje é o cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland. Este produto apresenta-se como um pó fino que é composto primariamente de silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e ferrites de cálcio (figura 1).

Figura 1 Cimento Portland



Fonte: Bhatti et al., 2004

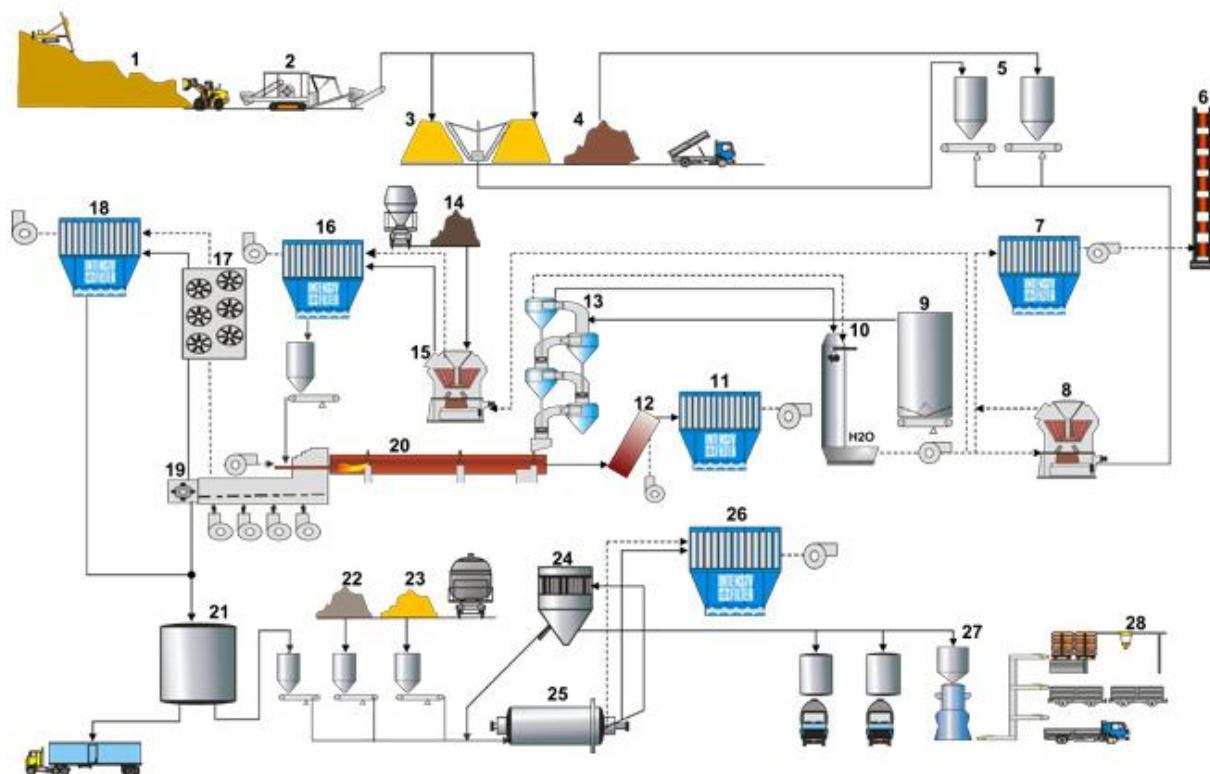
Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra. Graças a essas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água (ABCP – 2013).

A história de seu uso pelo ser humano remonta a períodos remotos (1500 AC) quando a construção de monumentos no Egito antigo utilizava-se uma mistura de gesso calcinado. Em 1756 o inglês John Smeaton conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Resultados semelhantes aos de Smeaton foram obtidos em 1818 pelo francês Vicat mediante a mistura de componentes argilosos e calcários. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland, produto obtido mediante a queima conjunta de pedras calcárias e argila transformando-as num pó fino.

1.2 O Processo de Fabricação de Cimento

As matérias primas para a fabricação, do cimento são constituídas por calcário, argila, minério de ferro e gesso. As características finais do produto são definidas de acordo com as especificações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. A fabricação do cimento envolve as operações unitárias mostradas na figura 2.

Figura 2 Processo de fabricação de cimento



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland - Básico Sobre cimento 2013

1.2.1 Preparação da Matéria Prima

O calcário é a matéria-prima básica, contribui de 85 a 95% na fabricação do clínquer, é constituído basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3) e, dependendo de sua origem geológica, pode conter várias impurezas como magnésio, silício, alumínio e Ferro. A rocha calcária é extraída de jazidas com auxílio de explosivos (operação unitária 1 na figura 2).

Os grandes blocos de pedra fragmentadas obtidos através da explosão são submetidos ao processo de britagem (operação unitária 2 na figura 2), sendo reduzidos ao tamanho de grão menor ou igual a 25 mm. Para melhorar a qualidade do clínquer, o calcário recebe algumas correções complementares de:

- FILITO (argila): incorpora alumínio Al_2O_3 ;
- QUARTZITO (material arenoso): incorpora SiO_2 ;
- MINÉRIO DE FERRO: incorpora Fe_2O_3 .

Os materiais (calcário e aditivos) são então transportados para os silos de matéria prima (operação unitária 5 na figura 2).

Este conjunto de materiais misturados em proporções pré-determinadas de forma adequada de modo a produzir a química desejada para o cimento é enviado para moagem no moinho vertical de rolos (operação unitária 8 na figura 2), onde ocorre a secagem, mistura e pulverização. O produto desta operação é chamado de farinha crua e é armazenado em silos (operação unitária 9 na figura 2). A energia para a secagem do material é obtida pelo aproveitamento dos gases de exaustão do forno objetivando melhorar a eficiência energética da planta de cimento. A pulverização reduz a mistura de matéria prima a partículas com granulometria na faixa de 100 a 150 μm . Isto é necessário para a produção de uma mistura quimicamente homogênea de modo a facilitar a realização das reações químicas no forno.

1.2.2 Formação do Clínquer

Esta etapa é feita na área do forno que conta com as torres de pré-aquecimento, forno propriamente dito e o resfriador (equipamentos 13, 20 e 19 na figura 2).

As torres de pré-aquecimento são responsáveis por remover a umidade ainda restante no material (inferior a 1%) e iniciar a descarbonatação do calcário. Os fornos de maior capacidade e mais modernos contam com torres maiores capazes de completar quase totalmente o processo de descarbonatação. Quanto mais eficaz o pré-aquecimento, mais curtos são os fornos.

Os pré-aquecedores mais comuns são torres de ciclones. Dispostos em elevadas estruturas (que freqüentemente ultrapassam 100 metros de altura), diversos separadores ciclônicos (equipamentos capazes de retirar partículas sólidas de uma corrente de gases) são interligados entre si através de dutos de imersão utilizados para troca térmica que ocorre em torno de 80% entre a farinha alimentada e gases quentes provenientes do forno. Através da seqüência de ciclones fluem os gases quentes provenientes do forno, em contracorrente com a matéria prima. A medida que esta se mistura com o fluxo de gases, ocorre transferência de calor e transferência de massa. Nos primeiros trechos do processo, elimina-se a umidade superficial, enquanto a temperatura permanece próxima à temperatura de ebulição da água. A partir deste ponto, o material sólido contendo apenas umidade intergranular passa a ser aquecido gradativamente. No fim do processo, o material atinge de 700 a 1000 °C, suficiente para a água esteja eliminada e para se iniciarem decomposições químicas da matéria-prima. Na busca de maior produção e redução de custo estudos deram origem a mais um estágio no pré-aquecedor conhecido como calcinador responsável por 60% a 95% da calcinação da farinha crua nos fornos rotativos para cimento baixando a carga térmica na zona de queima e como consequência aumentando da vida útil do revestimento refratário.

Os materiais pré-processados então entram em um forno rotativo (equipamento 20 na figura 2), que é basicamente um cilindro com inclinação descendente, internamente revestido com tijolos refratários, que tem movimento de giro de uma a três revoluções por minuto. O material proveniente das torres de aquecimento entra na parte superior do forno e se move progressivamente para regiões mais quentes, na direção da chama.

A produção da chama é obtida a partir de diferentes combustíveis tais como carvão moído e gás natural. No processo mostrado na figura 2 o combustível é carvão moído que é obtido a partir da moagem de carvão (equipamento 15 na figura 2). Na parte mais quente do forno as matérias primas atingem a temperatura de sinterização em torno de 1400 a 1500 °C.

Uma sucessão de reações químicas complexas vai ocorrendo à medida que a temperatura sobe, convertendo os óxidos de cálcio e silício em silicatos de cálcio que é a constituição básica do cimento. Na parte inferior do forno as matérias primas emergem como uma nova substância nodular chamada clínquer. As quatro maiores fases mineralógicas do clínquer são:

- $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ Silicato tricálcico, também chamado de alita (C_3S) e tem composição de 50 a 70% no cimento
- $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ Silicato dicálcico, também chamado de belita (C_2S) e tem composição de 15 a 30% no cimento;
- $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico, também chamado de aluminato (C_3A) e tem composição de 5 a 10% no cimento;
- $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ Ferro aluminato tetracálcico, também chamado de ferrita (C_4AF) e tem composição de 5 a 15% no cimento.

Os itens acima em parêntesis indicam a notação usada na indústria do cimento para as fases do clínquer. De acordo com (Zhang e Napier-Munn, 1995) a alita, devido a sua natureza reativa é responsável pela característica de desenvolvimento de resistência em médio prazo (1 a 28 dias). Já a belita é conhecida para contribuir principalmente para o desenvolvimento de resistência final (28 dias ou mais). O aluminato é o mais reativo de todas as fases e é responsável pelo desenvolvimento de resistência inicial (1 a 2 dias). A ferrita tem efeito somente na cor do cimento.

Após sair do forno, o clínquer é transferido para um sistema de resfriamento. Há dois principais tipos de resfriadores empregados atualmente. Os fornos mais antigos ainda operantes utilizam resfriadores satélites, cilindros menores solidários ao movimento de rotação do forno, acoplados à carcaça do mesmo. Já os fornos construídos a partir da década de 1980 geralmente são dotados de resfriadores de grelha (equipamento 19 na figura 2), com ventilação forçada, possibilitando maior taxa de transferência de calor entre o clínquer e o ar entrante. Desta forma, se reduz a temperatura de saída do material, recuperando parte da energia associada ao mesmo, aumentando a eficiência do sistema.

Além da eficiência energética, os resfriadores têm suma importância na qualidade do produto. O tempo e o perfil de resfriamento do mesmo são essenciais para a determinação de suas propriedades químicas finais. Lentos processos de resfriamento levam à transformação de silicato tricálcico, instável à alta temperatura, em silicato dicálcico o que diminui a resistência do cimento.

Hoje os resfriadores modernos além de propiciarem uma ótima troca térmica também possibilitam a recuperação de gases quentes que são reutilizados no processo de fabricação, que seriam o ar secundário – auxiliar na combustão na zona de queima; ar terciário – auxiliar na combustão do calcinador; e o ar de excesso – em algumas plantas, na troca de calor do moinho de matéria prima. Após o resfriamento, o clínquer é armazenado em um silo (equipamento 21 na figura 2) aguardando a ultima etapa do processo que é a pulverização na moagem de cimento.

1.2.3 A Moagem de Cimento

Finalmente o clínquer é reduzido a pó em um moinho (moinho de cimento) juntamente com até 5% de gesso. O gesso tem a função de retardar o endurecimento do clínquer, pois este processo seria muito rápido se água fosse adicionada ao clínquer puro. Durante esta fase, diferentes materiais minerais, chamados de adições tais como calcário, pozolana e escória (itens 22 e 23 na figura 2), podem ser adicionados além do gesso. Usadas em variadas proporções, essas adições, que podem ser recursos naturais ou subprodutos industriais, dão ao cimento propriedades específicas como redução de impermeabilidade, resistência a sulfatos e ambientes agressivos, melhor desempenho e acabamento, bem como hidratação e as resistências inicial e final do cimento de acordo com as normas da ABNT.

O equipamento mais comum na moagem de cimento é o moinho de bolas (equipamento 25 na figura 2), um tubo de aço horizontal cheio de bolas de aço. O material alimentado no moinho é moído pelo impacto e moído pelo atrito entre os corpos moedores (bolas). Para aumento de eficiência, a moagem opera em circuito fechado no qual o material que sai do moinho é direcionado a um separador (equipamento 24 na figura 2) e dividido em porções finas e grossas. A fração grossa é retornada para a entrada do moinho e a porção fina é o produto final (cimento).

A taxa de reação inicial do cimento e água é diretamente afetada pela superfície específica do cimento (Metha, 1986). Por isto o processo de moagem tem como objetivo a obtenção de um produto que atenda ao requisito de “finura” que é comumente chamado de *blaine* do cimento.

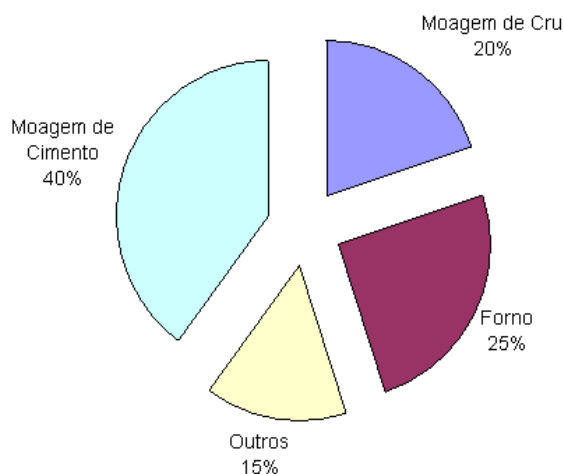
1.2.4 Ensacagem e Expedição

O cimento moído então vai para a etapa de despacho onde a venda é feita por unidades ensacadas ou a granel. No primeiro caso, o cimento passa por uma ou mais linhas de ensaque, seguida por uma operação de paletização de modo a permitir a carga dos caminhões em pallets (itens 27 e 28 na figura 2). No segundo caso, o cimento vai para uma estação com um silo e unidade de pesagem onde é feito o carregamento diretamente no caminhão (item 27 na figura 2).

1.2.5 Demanda de Energia na Fabricação do Cimento

A produção de cimento é um processo que demanda elevado consumo energético. Uma planta de cimento moderna apresenta um consumo específico de energia em torno de 110 a 120 kWh/ton de cimento produzido (Alço, 2001). Apesar das inovações tecnológicas recentes objetivando o aumento da eficiência energética no processo de produção de cimento (uso de pré-aquecedores e pré-calcinadores, separadores dinâmicos de alta eficiência, etc.), o consumo específico tem aumentado tendo em vista produção de cimento mais fino bem como o atendimento a requisitos mais rigorosos de proteção ambiental (Alsop, 2001).

Figura 3 Distribuição de energia no processo de fabricação de cimento



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Aproximadamente 1,5 toneladas de matéria prima são requeridas para produzir 1 tonelada de cimento acabado (Jankovic et al., 2004). A estratificação do consumo de energia elétrica mostra que 20% são consumidos na moagem de matéria prima e 40% na moagem de cimento (Jankovic et al., 2004). A figura 3 mostra uma distribuição de consumo de energia típica em uma planta de cimento por áreas de processo.

O processo com maior consumo energético é a moagem de cimento, com uma média de 40% o que significa algo em torno de 44 a 48 kWh/ton de cimento moído. Este valor elevado se justifica tendo em vista que a maior parte da energia suprida pelo motor do moinho se transforma em calor (atrito dos corpos moedores) e som.

Adicionalmente a demanda na moagem cresce hiperbolicamente com o aumento do grau de finura (blaine) das partículas de cimento (Bhatty et al., 2004). A tabela 1 mostra o consumo energético específico em função da granulometria do cimento e da resistência dos concretos e argamassas. Tempos de pega menores e maiores resistências implicam em cimentos com granulometria mais fina do que os cimentos Portland comuns (Souza, 2002).

Tabela 1 Consumo específico por tipo de material

Superfície Blaine (m ² /kg)	Consumo de Energia (kWh/ton)	Resistência de concretos e argamassas (kg/cm ²)			
		1 dia		28 dias	
		Concreto	Argamassa	Concreto	Argamassa
310	26	108	203	451	433
400	55	130	220	489	449
490	76	171	260	555	502

Fonte: Souza, 2002

1.3 Importância da Pesquisa

Dentre todas as aplicações de moagem a seco, aquelas existentes no processo de fabricação de cimento constituem as mais importantes (Jankovic et al., 2004). A estimativa de consumo energético mundial para a produção de cimento é de 1,5% do total de combustível produzido no mundo e 2% da energia elétrica gerada globalmente (Benzer et al., 2001).

O consumo de cimento no mundo foi de 1,72 bilhões de toneladas em 2002 e tem taxa de crescimento de 1% ao ano (Jankovic et al., 2004). Neste panorama aspectos ligados a custo de produção bem como de meio ambiente apontam para a necessidade de aumento de eficiência do processo de moagem a seco.

Os resultados do desenvolvimento do presente projeto contribuirão para o aumento da eficiência energética das empresas do segmento de cimento e possibilitarão uma transferência tecnológica importante para tais empresas, objetivando um aumento da competitividade desse importante segmento da economia do estado de Minas Gerais.

1.4 Objetivos

Levando-se em conta o exposto, o objetivo do presente trabalho é a melhorar a eficiência de um processo industrial que é executado em larga escala no mundo todo, mediante a realização das seguintes etapas:

- Estudo de bibliografia e a escolha de um modelo de processo de moagem que permita simular o sistema de controle otimizado;
- Definição de diretrizes de otimização que atendam os requisitos do sistema de moagem de forma concomitante, a saber: taxa de produção, granulometria do material e minimização de consumo específico;
- Estabelecimento de um modelo de controle otimizante que atenda aos seguintes requisitos básicos:
 - Não necessite de modelo da planta em avanço e apresente baixa sensibilidade à mudança de parâmetros (por exemplo, desgaste de corpos moedores);
 - Tenha habilidade para lidar com a elevada não linearidade exibida pelo processo da moagem, visando garantir estabilidade do controle evitando-se a ocorrência do enchimento extremo do moinho (embuchamento);
 - Seja integrável aos sistemas de controle e supervisão usualmente presentes neste tipo de processo sem a necessidade de aquisição de novos instrumentos sensores e atuadores.
- Pelos motivos expostos no parágrafo, que o sistema de controle otimizante seja factível de ser integrado a sistemas SCADA existentes com o mínimo de alterações de software no nível de controle em plantas existentes (controladores lógico programáveis).

A obtenção dos objetivos acima está associada com a execução das seguintes tarefas:

1. Implementação de modelo de simulação para o processo da moagem de cimento;
2. Estabelecimento de Sistema de Controle Otimizante que atenda aos requisitos gerais enunciados no parágrafo anterior;

3. Desenvolvimento do referido Sistema de Controle Otimizante em ambiente integrado ao modelo de simulação;
4. Adaptação do Sistema de Controle Otimizante para atuar em tempo real
5. Elaboração da interface com o sistema de controle SCADA.

A presente dissertação engloba a resolução das tarefas 1 a 3.

1.5 Publicações e Apresentações

Os resultados da pesquisa foram publicados nos anais do XVI Congresso Internacional e Exposição Sul Americana de Automação, Sistemas e Automação em São Paulo em 2012 (Ekel, P.Ya. e Alves, L., Controle Neuro *Fuzzy* para Moagem de Cimento, Paper 90).

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

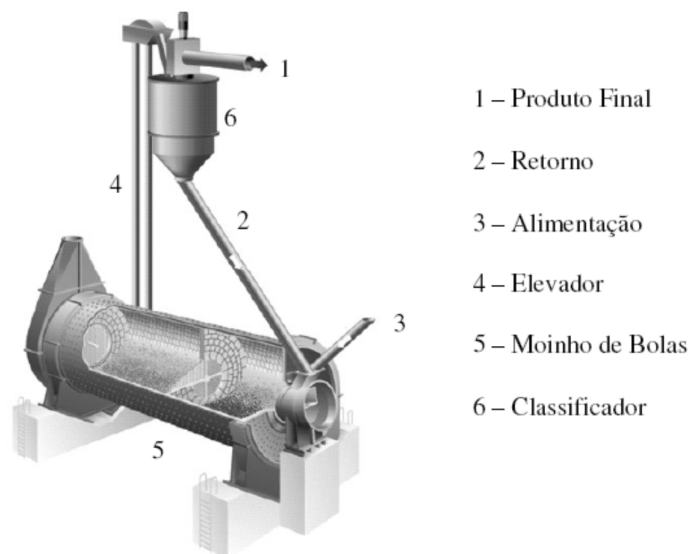
2.1 Moagem de Cimento

Os circuitos de moagem para produção de cimento a partir do clínquer podem ser em circuito aberto e em circuito fechado. A maior parte das moagens em operação tem a configuração em circuito fechado, pois garante a obtenção do produto final dentro da faixa granulométrica necessária.

Uma moagem em circuito fechado consiste do moinho de bolas, um elevador de caçambas para transportar o material moído até o separador e o separador a ar (figura. 4). O material a ser moído (alimentação) é misturado à corrente de retorno e esta mistura é descarregada no interior do moinho de bolas, onde as partículas terão seu tamanho reduzido por meio dos impactos ocasionados pelos corpos moedores.

O produto do moinho é descarregado em um elevador de caçambas, que por sua vez, descarrega o material em um separador, que direciona as partículas finas ao produto final e as partículas grossas para a corrente de retorno de modo a serem moídas novamente.

Figura 4 Circuito de moagem de cimento



Fonte: Carvalho et al., 2006

A configuração em circuito fechado garante que somente as partículas abaixo de determinado tamanho sejam consideradas como produto final. O circuito de moagem mineral tipicamente reduz uma alimentação de 80% de tamanho passante entre 10 a 20 mm para 100% passante em 90 μm .

A qualidade do cimento é medida pela área de superfície ou índice Blaine. A unidade do Blaine é dada em m^2/kg e este índice é determinado pelo teste de permeabilidade. A área de superfície do pó de cimento depende da distribuição de tamanho das partículas de cimento; partícula menor tem área superficial maiores.

Os objetivos a serem alcançados para a operação otimizada de uma moagem de cimento são:

- Maximização de produção de modo a manter a saída da moagem dentro da vazão mássica projetada;
- Minimização de consumo energético que pode ser obtida evitando a moagem excessiva do material (sobre moagem);
- Qualidade do cimento mantendo-se o produto final dentro da faixa granulométrica desejada

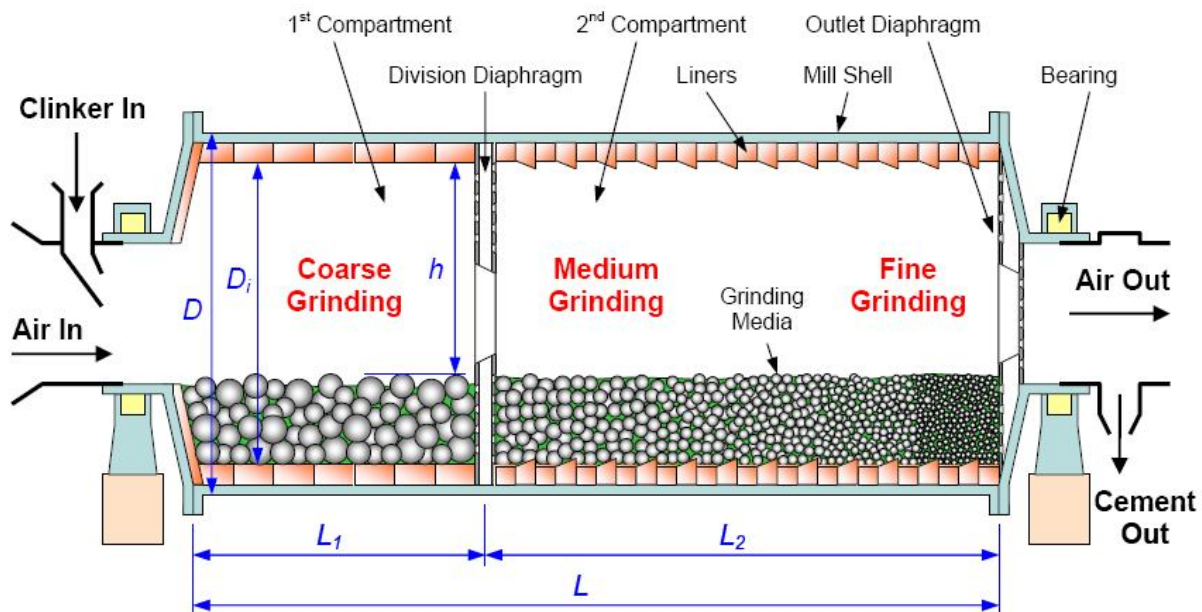
2.1.1 O Moinho de Cimento

Este é o equipamento de maior porte e maior consumidor de energia da moagem. A redução propriamente dita é feita no moinho de bolas, em duas etapas, uma em cada compartimento do moinho, conforme mostrado na figura 5.

O primeiro compartimento recebe o clínquer e aditivos, tem um comprimento menor e nele são colocados corpos moedores (bolas) maiores (80, 60,50 mm) de modo a prover a moagem do clínquer grosso.

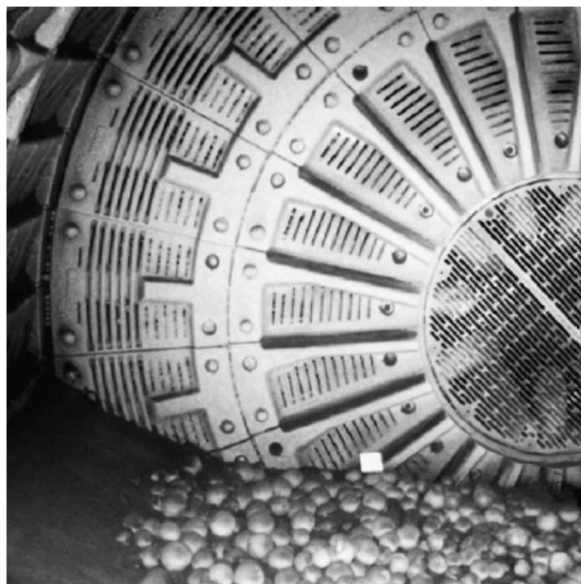
Já a moagem fina é executada no segundo compartimento, onde existem corpos moedores menores (abaixo de 25 mm). Um diafragma (figura 6) separa os dois compartimentos e permite que apenas partículas abaixo de um determinado tamanho passem para o segundo compartimento. O material moído sai do moinho através da grade de descarga, que evita a saída de corpos moedores.

Figura 5 Arranjo de um moinho de bolas de dois compartimentos



Fonte: Wikipédia - 2013)

Figura 6 Diafragma entre dois compartimentos do moinho – Vista do primeiro compartimento



Fonte: Benzer et al. - 2004

2.1.2 O Separador Dinâmico

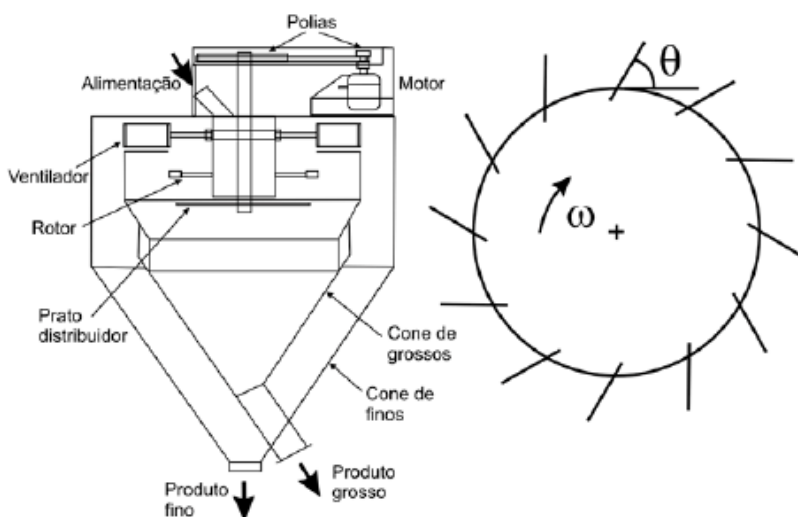
Classificadores (ou separadores) dinâmicos empregados na indústria são classificados de acordo com os mecanismos adotados na separação em três tipos, também denominadas gerações. Nos separadores de primeira geração, a alimentação se dá por meio de um prato distribuidor, cuja frequência de rotações é a mesma do ventilador e das palhetas, de maneira que o fluxo de ar, no separador, não pode ser controlado independentemente. Nesse separador, a ventilação é interna e a separação dos finos da corrente do fluido é realizada dentro do próprio separador, não sendo muito eficiente. Exemplos desse tipo de separador são o Whirlwind[®] da Sturtevant e o separador aerodinâmico da Furlan.

Os separadores de segunda geração se caracterizam pelo uso de ventilação externa, que permite o controle independente do fluxo de ar ao separador. Esses separadores também permitem uma melhor separação dos finos da corrente do fluido pelo uso de pequenos ciclones externos.

Os separadores de terceira geração se diferenciam dos de segunda pelo uso de uma gaiola na qual as palhetas são colocadas. Isso permite um aumento da área efetiva de separação, a qual é, comparativamente, pequena nos separadores de primeira e segunda geração. A alimentação não se dá mais em um prato distribuidor, mas sobre a gaiola. Exemplos desse tipo de separador em uso no Brasil são o SEPOL[®] da Polysius, o Sturtevant SD[®] da Sturtevant e o Presep VTP[®] da PSP Engineering.

Um diagrama esquemático de um separador dinâmico de primeira geração é apresentado na figura 7. A separação de partículas no interior de separadores dinâmicos é o resultado da ação das forças centrífuga, gravitacional e de arraste do fluido (tipicamente o ar). O material que entra através da calha de alimentação é sujeito à ação da força centrífuga, que projeta as partículas grossas do prato dispersor na direção do fluxo de ar. Devido à ação da gravidade, as partículas grossas caem, sendo coletadas no cone de grossos. As partículas finas, por outro lado, são arrastadas pelo fluxo ascendente do fluido produzido pelo ventilador (palhetas fixas). Durante essa separação secundária, partículas grossas ainda remanescentes não são capazes de acompanhar o fluxo de ar enquanto contorna as palhetas (reguláveis) em movimento, caindo, também, para dentro do cone de grossos. Os finos que são capazes de passar com sucesso continuam a se deslocar através do ventilador para dentro do cone dos finos.

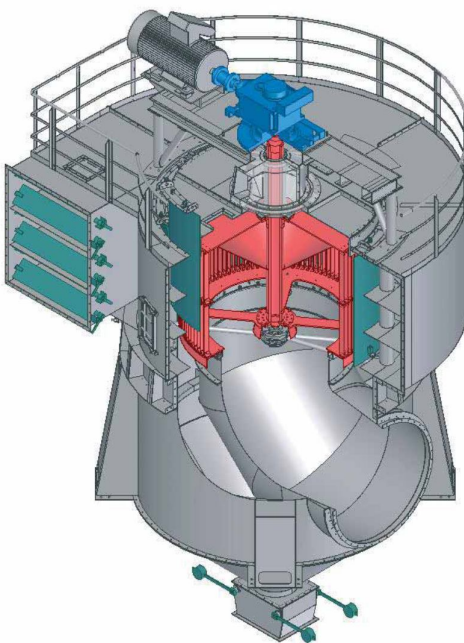
Figura 7 Diagrama esquemático do classificador dinâmico a seco e do rotor



Fonte: Tavares et al. - 2006

O separador dinâmico de terceira geração da Polysius, denominado SEPOL, está mostrado na figura 8.

Figura 8 Diagrama esquemático do separador dinâmico da Polysius (SEPOL)



Fonte: Catálogo Polysius - 2013

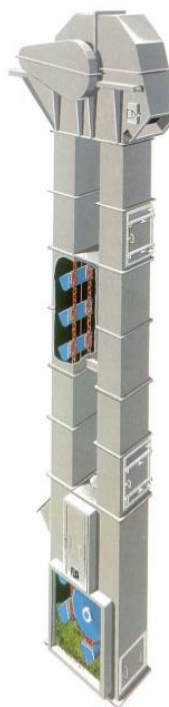
2.1.3 O Elevador de Canecas

Os Elevadores de Canecas, também conhecidos por Caçambas, constituem a forma mais eficaz de elevação de materiais em pó ou grão quando se necessita elevar o produto em forma contínua a grandes alturas (acima de 5 m).

São fabricados com correias ou correntes (estas para materiais de alta densidade e abrasivos). As canecas possuem características que variam conforme as propriedades físicas do produto e do processo, conforme mostrado na figura 9.

A descarga do material pode ser por rotação da caneca ou por força centrífuga na mudança do sentido de deslocamento.

Figura 9 Elevador de caçambas



Fonte: FLSmidt - 2013

Sua utilização visa transportar o material de saída do moinho até o separador dinâmico. A medida da corrente do motor do elevador tradicionalmente é utilizada como informação relativa à vazão mássica de saída do moinho. Em alguns circuitos de moagem adota – se outro elevador de canecas para retornar o rejeito para o moinho. Este procedimento permite efetuar a medição da vazão mássica da carga circulante.

2.2 Modelagem e Simulação da Moagem de Cimento

A modelagem e simulação constituem uma forma de custo reduzido para gerar um ambiente no qual se possa aplicar e testar as estratégias de controle e otimização com o objetivo de aumentar a eficiência de um processo específico. A modelagem pode ser dividida em dois grupos:

- Modelos fenomenológicos baseados nos princípios físicos e químicos (caixa branca)
- Modelos empíricos baseados nas entradas e saídas do processo (caixa preta)

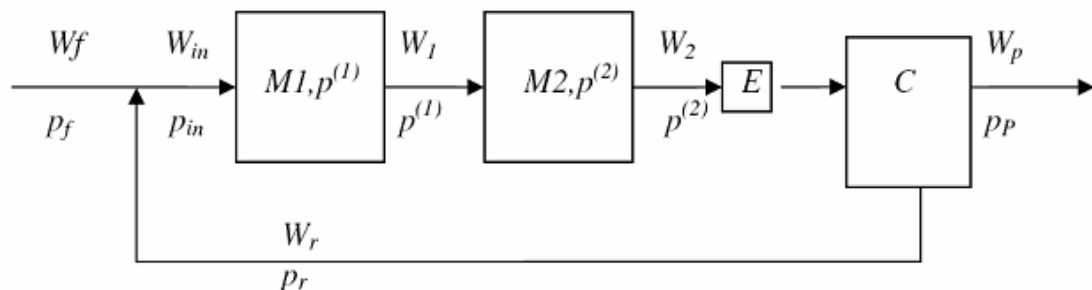
2.2.1 Modelagem Fenomenológica da Moagem de Cimento

A modelagem matemática é baseada em uma representação numérica da moagem (equipamentos e variáveis de processo) e, portanto requer uma compreensão dos conceitos fundamentais do comportamento do sistema modelado. O método de balanço populacional associado a funções de classificação e quebra constitui a abordagem mais utilizada na modelagem fenomenológica de moagens de cimento (Mejeoumov, 2007).

2.2.1.1 Método por Equações Integro-diferenciais

Um modelo recentemente proposto (Carvalho et al., 2006) leva em consideração duas câmaras de moagem $K1$ e $K2$, um elevador de canecas E e o separador dinâmico C , como mostrado na figura 10.

Figura 10 Diagrama de blocos de modelo da moagem



Fonte: Carvalho et al. - 2006

Neste modelo o material novo de alimentação com vazão mássica W_f e granulometria P_f é misturado ao material de retorno com vazão mássica W_r e granulometria P_r . A corrente resultante, que tem vazão mássica W_1 e granulometria P_1 entra na primeira câmara do moinho que tem dentro de seu interior uma massa M_1 com granulometria P_1 . O material é moído e descarregado na segunda câmara a uma vazão mássica W_2 e granulometria P_2 . O produto da segunda câmara com vazão mássica W_2 e granulometria P_2 é descarregado no elevador de canecas que por sua vez alimenta o classificador dinâmico que executa a separação. As partículas ainda grossas são direcionadas ao underflow consistindo o fluxo de retorno ou recirculação. O material mais fino vai para o overflow consistindo do produto final, que tem vazão mássica W_p e granulometria P_p .

O balanço de massas nas câmaras 1 e 2, para cada classe de partículas, pode ser representado por (Carvalho et al., 2006):

$$\frac{dp_i^{(1)}(t)}{dt} = \left[W_f(t)p_{f,i}(t) + W_r(t)p_{r,i}(t) - W_1(t)p_i^{(1)}(t) - s_i(t)M_1(t)p_i^{(1)}(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j(t)M_1(t)p_j^{(1)}(t) - p_i^{(1)}(t)\frac{dM_1(t)}{dt} \right] \frac{1}{M_1(t)}, \quad (1)$$

$$\frac{dp_i^{(2)}(t)}{dt} = \left[W_1(t)p_i^{(1)}(t) + W_2(t)p_i^{(2)}(t) - s_i(t)M_2(t)p_i^{(2)}(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij}s_j(t)M_2(t)p_j^{(2)}(t) - p_i^{(2)}(t)\frac{dM_2(t)}{dt} \right] \frac{1}{M_2(t)}. \quad (2)$$

Nas equações acima, define-se as seguintes funções:

- Função de seleção s_i , que representa a taxa específica de quebra para partículas pertencentes à classe de tamanho i .
- A função de quebra b_{ij} representa a fração do produto da quebra primária proveniente de partículas do intervalo de tamanho j que se distribuem no intervalo de tamanho i .

O balanço de massas nas câmaras 1 e 2 são representados por:

$$\frac{dM_1(t)}{dt} = W_2(t) \sum_{i=1}^N c_i(t)p_i^{(2)}(t) + W_f(t) - W_1(t), \quad (3)$$

$$\frac{dM_2(t)}{dt} = W_1(t) - W_2(t). \quad (4)$$

A distribuição granulométrica da alimentação pode ser caracterizada pela equação de Rosin-Ramler, na qual d_{63} (dado em mm) e λ_{RR} são parâmetros que podem ser ajustados e P é a fração em massa da população de partículas com tamanho menor que dp (King, 2001), definida pela seguinte correlação:

$$P(dp) = 1 - \exp\left(-\left(dp/d_{63}\right)^{\lambda_{RR}}\right). \quad (5)$$

A operação dos classificadores é representada por uma curva de eficiência, também chamada de curva de partição (King, 2001). Esta curva pode ser determinada via amostragens no circuito. Existem na literatura, diversas proposições de modelo de eficiência de um classificador, sendo os mais conhecidos o logístico, o log-normal, o de Lynch e o de Whiten (King, 2001). Em particular, o modelo matemático proposto por Whiten é

$$e = 1 - C \left[\frac{(1 + \beta \beta^* X)(\exp(\alpha) - 1)}{\exp(\alpha \beta^* X) + \exp(\alpha) - 2} \right]. \quad (6)$$

onde X corresponde à alimentação do separador, e é a fração de alimentação que vai para o underflow e C , β e α são parâmetros do modelo.

Estas equações integro diferenciais constituem o modelo que pode ser resolvido por métodos numéricos desde que se tenha uma estimativa inicial para $p1$, $p2$, $M1$ e $M2$.

2.2.1.2 Modelo por Cadeias de Markov

A cadeia de Markov é um caso particular de processo estocástico com estados discretos (o parâmetro, em geral o tempo, pode ser discreto ou contínuo) e apresenta a propriedade de que os estados anteriores são irrelevantes para a predição dos estados seguintes, desde que o estado atual seja conhecido.

Esta teoria foi desenvolvida pelo matemático russo Andrey Markov em 1907 e hoje é utilizada em modelagens de sistemas físicos, de engenharia, biológicos e sistemas sociais tais como dinâmica populacional bem como sistemas de manufaturas. Aplicações especiais foram desenvolvidas nas áreas de comunicação sem fio, projeto de tráfego em internet e engenharia financeira (Mejeuomov, 2007).

A cadeia de Markov adota técnicas probabilísticas na representação dos processos a modelar. Se X é uma variável que pode assumir valores aleatórios y_1, y_2, \dots, y_m , então a definição formal da cadeia de Markov é dada por (Berger, 1993):

$$P(X_{m+1} = y_{m+1} | X_1 = y_1, \dots, X_m = y_m) = P(X_{m+1} = y_{m+1} | X_m = y_m). \quad (7)$$

A expressão acima implica que dados os valores precedentes de y_i da variável X , onde os índices $1, 2, \dots, m$ com m designando o valor atual, a predição do valor futuro y_{m+1} é definido somente pelo último valor (valor presente) da variável X, y_m .

A abordagem discreta dos parâmetros contínuos da moagem é feita em n intervalos finitos, chamados de estados do sistema. O conjunto de estados possíveis f_i formam o espaço de estados do sistema e o conjunto de suas probabilidades formam o vetor $F (n \times 1)$:

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Durante a transição k -ésima entre os intervalos t_k e t_{k-1} o vetor de estados F_k transforma em F_{k+1} . A correlação entre estes dois vetores de estado é a matriz de transição

$$F_{k+1} = P F_k \quad (9)$$

A matriz P é o operador principal do modelo de cadeia de Markov. Ele contém as probabilidades para determinar a possibilidade de um estado individual para transitar para outro. Assim o valor P_{ij} na matriz mostra a probabilidade do estado j transitar para o estado i da seguinte forma:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Os valores P_{ij} , devido às características probabilísticas da matriz devem satisfazer duas condições (Mejeumov, 2007):

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \text{ e } \sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 \text{ para } \forall j. \quad (11)$$

Em seu trabalho de doutorado, Mejeuomov (Mejeuomov,2007) constrói a matriz de moagem, a matriz de classificação e a matriz do modelo do circuito fechado de moagem, apresentando a solução numérica em regime permanente.

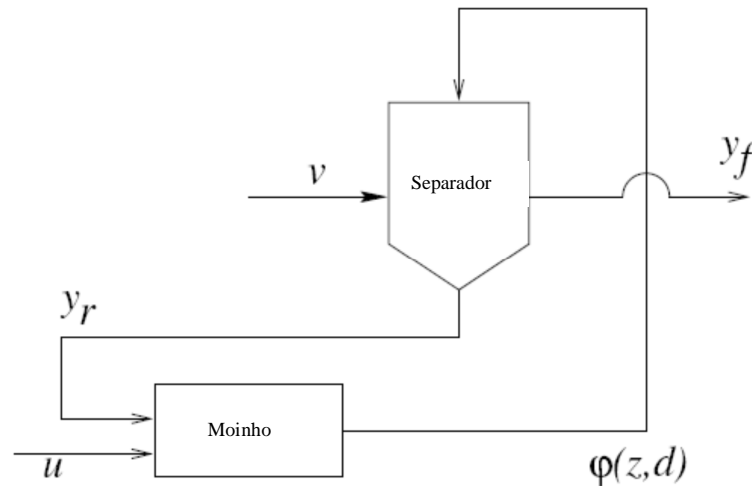
Parte de seu trabalho foi adotada no presente trabalho no que tange a definir um preditor de blaine para uma moagem de cimento.

2.2.2 Modelagem Empírica da Moagem de Cimento

Um modelo não linear que reproduz a evolução da carga em um moinho bem como o comportamento de uma moagem de cimento foi proposto em (Breusegen et al., 1996). Desde então o mesmo tem sido utilizado no desenvolvimento de estratégias de controle avançadas nesta área.

Considera – se o circuito de moagem mostrado na figura 11. O moinho é alimentado com material novo a uma taxa de u [ton/h]. O separador tem uma velocidade rotacional de v [rpm]. A carga circulante tem o valor de y_r [ton/h] e o produto final tem uma vazão y_f [ton/h].

Figura 11 Diagrama esquemático do modelo não linear via variáveis de estado



Fonte: Breusegen et al. - 1999

A planta é descrita pelo seguinte modelo dinâmico com três variáveis de estado:

$$T_f \dot{y}_f = -y_f + (1 - \alpha(z, v, d))\varphi(z, d), \quad (12)$$

$$T_r \dot{y}_r = -y_r + \alpha(z, v, d)\varphi(z, d), \quad (13)$$

$$\dot{z} = \varphi(z, d) + u + y_r, \quad (14)$$

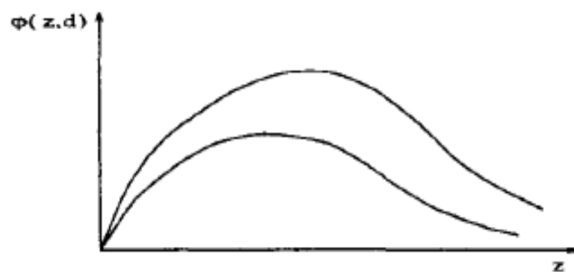
sendo

$$\alpha(z, v, d) = \frac{\varphi^m v^n}{K\alpha + \varphi^m v^n} \quad (15)$$

Onde T_f , T_r [h] são constantes de tempo e $z(t)$ é a quantidade de material dentro do moinho (também chamado de carga do moinho), d representa a dureza do clínquer, $\alpha(z, v, d)$ é a função de separação e $\varphi(z, d)$ é a saída de cimento.

A função de moagem $\varphi(z, d)$ é mostrada na figura 12 para diferentes valores de d é uma função não monotônica da carga do moinho (z). Quando z está muito alto, a eficiência da moagem decresce e acarreta a obstrução do moinho (fenômeno conhecido como *plugging*). Um valor baixo de z também é indesejável, pois isto causa o desgaste prematuro dos corpos moedores.

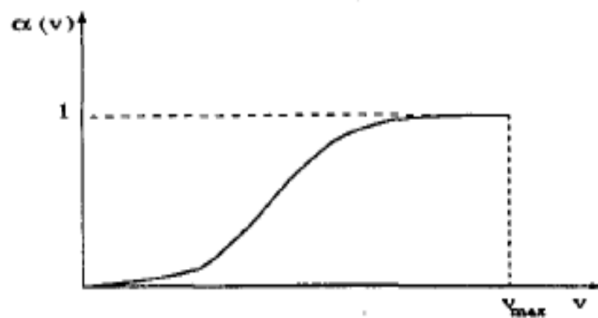
Figura 12 A função da moagem



Fonte: Jadot et al., 1998

A função de classificação $\alpha(v)$ tem características crescente e monotônica com relação à velocidade do separador e está mostrada na figura 13. Seus valores estão restritos a faixa entre 0 e 1.

Figura 13 A função de separação



Fonte: Jadot et al. - 1998

A análise em regime permanente deste sistema, considerando – se a dureza do material constante mostra que a saída de material (cimento) deve ser igual à entrada de material novo:

$$\bar{y}_f = \bar{u}. \quad (16)$$

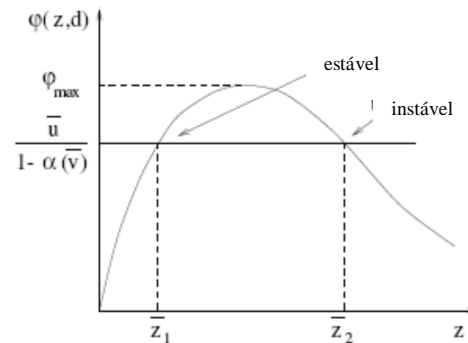
Para esta condição, determina – se os valores em regime permanente do rejeito e saída do moinho são dados por à partir das equações (12) a (14), da seguinte forma:

$$\bar{y}_r = \frac{\alpha(\bar{v})\bar{u}}{1-\alpha(\bar{v})}, \quad (17)$$

$$\varphi(\bar{z}, d) = \frac{\bar{u}}{1-\alpha(\bar{v})}. \quad (18)$$

Tendo em vista a forma da curva da saída do moinho nota – se que se pode ter zero, um ou dois valores em regime permanente, ocasionando uma região de operação estável e outra de operação instável (Jadot et al., 1998) conforme mostrado na figura 14.

Figura 14 Zona de estabilidade para o modelo



Fonte: Jadot et al. - 1998

Os trabalhos relacionados à otimização de processo de moagem de cimento que adotaram este modelo são descritos em outra parte deste trabalho e todos adotaram os mesmos parâmetros para as equações (12) a (15), a saber:

Constantes de tempo: $T_f = 0,3$ horas e $T_r = 0,01$ hora

Dureza relativa do material: $d = 1$

Saída da moagem de cimento $(\varphi(z,d))$

$$\varphi(z, d) = \max\left[0; (-dK_{\varphi 1}z^2 + K_{\varphi 2}z)\right]$$

Onde $K_{\varphi 1} = 0,1116(\text{ton} \cdot \text{h})^{-1}$ e $K_{\varphi 2} = 16,50(\text{h})^{-1}$

Função de Separação $(\alpha(z,v,d))$

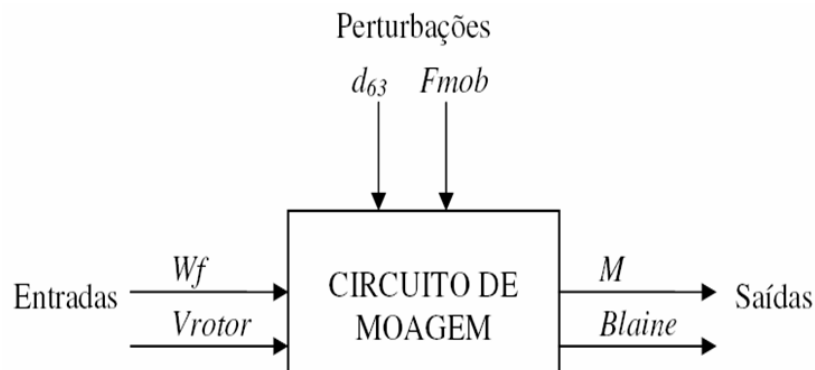
$$K_{\alpha} = (570)^m 170^n \left(\frac{570}{450} - 1\right) (\text{ton/h})^m \text{rpm}^n$$

onde $m = 0,8$ e $n = 0,4$.

2.2.3 Variáveis para Controle da Moagem de Cimento

O circuito de moagem é altamente não linear e susceptível a perturbações de processo, traduzidos pela variação granulométrica (d_{63}) e dureza da matéria prima (F_{mob}). As entradas para o processo são a velocidade do rotor do separador (V_{rotor}) e alimentação do minério novo (W_f). As saídas são respectivamente a vazão de produto (M) e a granulometria do produto (blaine). O diagrama de blocos apresentado na figura 15 mostra o conjunto de variáveis anteriormente descritas.

Figura 15 Diagrama de blocos das variáveis externas da moagem de cimento



Fonte: Carvalho et al. - 1996

As variáveis de entrada bem como as de distúrbio estão fortemente acopladas às variáveis de saída. O grau de acoplamento existente entre as entradas e saídas foi mostrado no trabalho (Carvalho et al., 1996), que apresenta os valores da matriz de ganho estático de uma moagem específica, como mostrado abaixo:

$$\begin{bmatrix} M \\ Blaine \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,589 & 0,411 \\ 0,411 & 0,589 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_f \\ V_{rotor} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

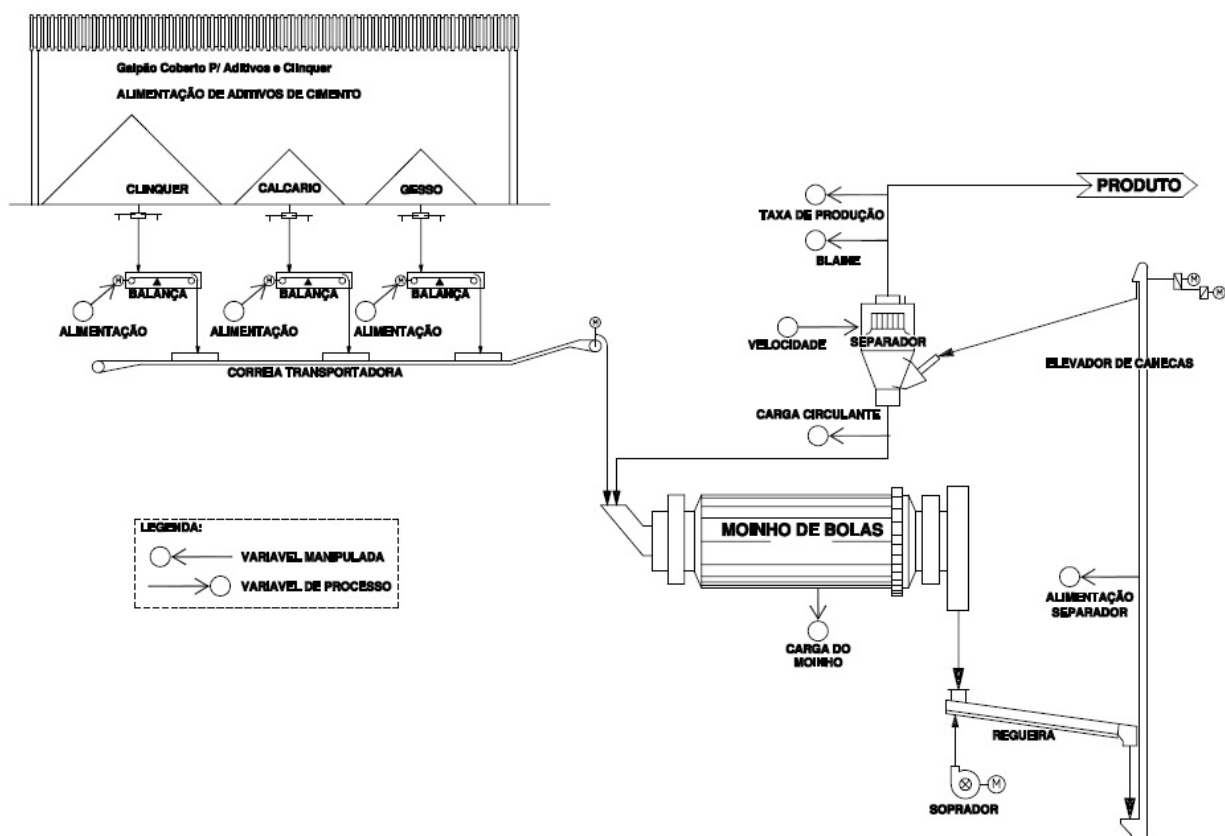
Isto faz com que seja necessária uma abordagem de controle multivariável para manter-se as variáveis de saída dentro de faixas desejáveis.

2.3 Controle do Processo da Moagem de Cimento

A seguir descrevem-se práticas adotadas em circuitos de moagem de cimento, mediante a utilização de instrumentação convencional e sistemas de controle baseados em controladores lógico programáveis (Alsop, 2007).

Em tais sistemas existem malhas de controle regulatórias monovariáveis e não há o objetivo em otimizar quaisquer variáveis de processo. A figura 16 mostra um fluxograma simplificado com as malhas de controle de uma moagem típica, apresentando as variáveis de processo bem como as manipuladas.

Figura 16 Malhas de controle e instrumentação típicas de um moinho de bolas



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

2.3.1 Variáveis de Processo

As operações de cominuição e de separação são independentes, mas estão inter-relacionadas em uma moagem em circuito fechado. As condições ótimas para a moagem têm como variáveis a alimentação do moinho, moabilidade do material e a potencia no motor do moinho. Já a operação de separação depende da taxa de alimentação do separador, fluxo de are da velocidade do separador.

Variáveis Medidas:

- **Potência consumida pelo moinho:** Depende da carga de corpos moedores dentro do moinho. Periodicamente esta carga deve ser completada de modo a se manter o moinho operando em plena carga.
- **Nível de enchimento do moinho:** Monitorado por microfones instalados externamente ao moinho, também chamados de folafones (1 m de cada extremidade do moinho).
- **Taxa de alimentação do separador:** Usualmente é dada pela corrente do elevador de canecas.
- **Carga circulante:** Este tipo de medição eventualmente é feito via medidor de vazão mássica no circuito de retorno da moagem.
- **Qualidade do cimento:** Medida *offline*: Realizada em laboratório via teste de permeabilidade (Blanímetro) na maioria das aplicações ou Medida *online* via refratômetro a laser (raramente adotado).

2.3.2 Malhas de Controle

Controle de Alimentação do Moinho: Malha de controle destinada a manter a alimentação de material novo bem como a proporção entre os diversos componentes (clínquer e aditivos). A variável manipulada é a velocidade do alimentador de cada um dos diversos componentes.

Malha de Controle do Classificador: Determina a granulometria de saída da moagem bem como a carga circulante (retorno para o moinho). A variável manipulada é a velocidade de giro do rotor do separador.

2.3.3 Filosofia de Controle

A filosofia básica é manter uma quantidade estável de material no moinho. A alimentação total é a soma da alimentação de material novo com o retorno do separador. A malha de controle pode ser feita de duas maneiras (Breugesen et al., 1996). A alimentação de material novo depende da carga circulante (sinal do medidor de vazão) ou então do material que deixa o moinho (sinal da corrente do elevador de canecas).

Os sinais de potencia e de ruído do moinho são utilizados de forma complementar, da seguinte forma:

- Um aumento do ruído junto com um decréscimo da potencia consumida significa que o moinho está esvaziando, indicando a necessidade de aumento da alimentação.
- De forma inversa, o aumento da potencia consumida associado a uma diminuição do ruído significa que o moinho está se enchendo, o que reflete excesso de alimentação.

Observa-se que a referência de velocidade para o separador fica em manual, dependente do operador. Com este tipo de filosofia consegue-se garantir a estabilidade operacional bem como a produção dentro de determinados limites de qualidade desde que não ocorram perturbações na granulometria e dureza do material a ser moído.

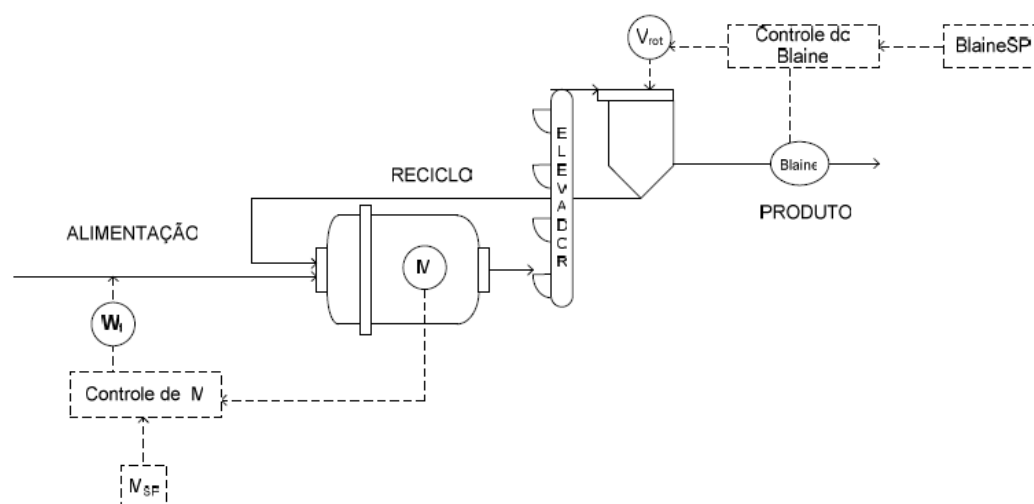
A ocorrência de perturbações na distribuição granulométrica e / ou na dureza do material a ser moído faz com que a relação da carga circulante com a vazão de produto final (saídas do separador) fique constantemente mudando.

Uma estratégia um pouco mais refinada consiste em ajustar a alimentação nova para manter constante a soma das vazões de saída do separador (carga circulante com a vazão de produto final). O tempo de resposta é lento, da ordem de 10 minutos (Breugesen et al., 1996), o que significa que caso ocorra um desvio do *set point* desejado a ação corretiva terá um retardo de 10 minutos ou mais. Uma estratégia alternativa, que também incorpora o aspecto de retardo no tempo de resposta é ajustar a alimentação nova para manter a carga circulante constante.

Estudos foram feitos no sentido de se incluir mais uma malha de controle mediante a manipulação da velocidade do separador com o objetivo de controlar a granulometria (Bolvin et al., 1997; Carvalho et al., 2006 e Ciganek e Kreysa, 2001).

A sugestão apontada em (Carvalho et al., 2006) apresenta uma modelagem dinâmica de um circuito industrial de moagem de cimento incluindo as principais perturbações do sistema. Baseado neste modelo dinâmico, avalia-se propostas de controle com múltiplos controladores PI. A definição das variáveis manipuladas e controladas é feita a partir da determinação da matriz de ganhos relativos RGA (*Relative Gain Array*). Conclui-se pela adoção de um controlador para ajustar a alimentação nova em função da corrente do elevador de canecas e de outro controlador para ajustar a velocidade do separador em função da granulometria de saída (*blaine*), conforme mostrado na figura 17.

Figura 17 Malhas de controle incorporadas ao circuito de moagem em função da matriz RGA



Fonte: Carvalho et al. - 2006

Esta estratégia apresenta a dificuldade de se necessitar de um medidor de granulometria online, que não existe na maioria das plantas de cimento.

2.4 Estado da Arte em Otimização de Controle de Moagens de Cimento

A premissa de se obter alta eficiência no processo acarreta a necessidade de se aplicar um sistema com características otimizantes que possa lidar com a elevada resposta não linear do sistema de moagem. Estudos demonstraram a eficácia de controladores multivariáveis lineares e não lineares bem como uso de Redes Neurais Artificiais (RNA) objetivando aumentar a robustez do sistema de controlado (evitar o fenômeno de *plugging*) bem como a obtenção de máxima produção. A seguir apresenta-se um breve resumo da bibliografia consultada.

Breusegem et al. (1994) propôs um modelo caixa preta multivariável de uma moagem a circuito fechado, conforme descrito no item 2.2.2. Este modelo foi utilizado para formular uma estratégia de controle quadrático – linear. Nesta estratégia, as duas variáveis controladas ou de saída (carga circulante e vazão de cimento) são ajustadas em função de duas variáveis manipuladas ou de entrada (alimentação nova e velocidade do separador). O controle do *blaine* não estava incluído no modelo e deveria ser ajustado por variação manual na velocidade do separador. O resultado de tal estratégia foi reportado como o aumento da estabilidade do sistema como um todo.

Dois anos mais tarde os autores listados acima propuseram uma estratégia que consiste na estratégia anterior mais a incorporação da informação relativa à granulometria da saída mediante um preditor de granulometria em (Breusegem et al., 1996). O resultado de tal estratégia foi reportado como o aumento da estabilidade do sistema como um todo. Observa-se que as duas estratégias discutidas necessitam de sensores de vazão mássica de carga circulante e de saída de cimento, que não são usuais em plantas de cimento.

Uma estratégia de controle baseada em controle não linear preditivo multivariável (Magnietal, 1997) foi proposta dentro do mesmo modelo caixa preta de uma moagem a circuito fechado proposto em (Breusegem et al., 1994). Nesta estratégia, três variáveis controladas ou de saída (carga do moinho, carga circulante e vazão de cimento) são ajustadas em função de duas variáveis manipuladas ou de entrada (alimentação nova e velocidade do separador). O controle do *blaine* não estava incluído no modelo.

Magni et al. (1997) desenvolveram uma estratégia baseada em controle preditivo multivariável demonstrando que puderam obter um sistema robusto no que tange a uma perturbação crítica que é a variação da dureza do material. O modelo da moagem é aquele proposto em (Breugesen et al., 1994). A lei de controle preditiva baseada em Horizonte de Retrocesso Não Linear (*Nonlinear Receding Horizon – NRH*) é usada para controlar o moinho. Os resultados mostrados e reportados foram um aumento da região de estabilidade de operação na presença de distúrbios.

Uma estratégia de controle baseada em controle robusto com realimentação de estados (Jadot et al., 1998) foi proposta dentro do mesmo modelo caixa preta de uma moagem a circuito fechado proposto em (Breusegem et al., 1994). O controlador deve prover estabilidade global de modo a evitar o embuchamento do moinho (*plugging*) regulando a taxa de produção e a carga do moinho pela manipulação da alimentação nova e velocidade do separador. O controle do *blaine* não estava incluído no modelo.

O método de controle não linear e multivariável por modelo de referência foi proposto em (Ofe, 2003). Este trabalho desenvolve o vetor de controle com o objetivo de levar a resposta do sistema para aquela do modelo desejado em um ambiente com ruído. A abordagem é baseada na teoria de Lyapunov e os resultados observados mostraram bom desempenho no rastreamento e estabilidade do sistema. O modelo da moagem é aquele proposto em (Breusegem et al., 1994).

Um novo modelo da dinâmica não linear de uma moagem em circuito fechado foi proposto em (Boulvin et al., 2003). O modelo consiste de um conjunto de equações diferenciais parciais contendo um conjunto de parâmetros desconhecidos. Foi discutido o modelo de parametrização, o projeto de experimentos, a estimativa de parâmetros desconhecidos via dados experimentais bem como a validação do modelo. Baseado neste modelo um simulador para moagem foi desenvolvido. Controladores em cascata foram utilizados para o controle de alimentação nova e um controlador PI adotado para o controle do blaine. O autor reporta que dados experimentais mostram a efetividade deste esquema de controle. Observa-se que esta abordagem necessita de medição online do Blaine.

Martin e McGarel (2001) desenvolveram um modelo em Redes Neurais Artificiais (RNA) para cálculo de mudanças não lineares (ganhos) nos parâmetros do processo de moagem e utilizaram as mudanças calculadas em um modelo de controle preditivo do circuito. O modelo consiste de quatro variáveis controladas ou de saída (blaine, carga do moinho, carga circulante e potencia do motor do moinho) são ajustadas em função de duas variáveis manipuladas ou de entrada (alimentação nova e velocidade do separador). A seção de resultados deste estudo não provê dados numéricos tangíveis e informa que ocorreu aumento de produção com relação a outras estratégias bem como aumento na qualidade do cimento produzido.

Topalov e Kaynac (2004) apresentaram um modelo de redes neurais preditivas baseado na teoria de controle de janelas deslizantes capaz de estimar o erro um passo a frente. O modelo consiste de duas variáveis controladas ou de saída (carga do moinho e vazão de saída) são ajustadas em função de duas variáveis manipuladas ou de entrada (alimentação nova e velocidade do separador). A estratégia desenvolvida assegura uma operação livre de “embuchamento” (*plugging*) do moinho. O controle do blaine não estava incluído no modelo. Os autores reportaram tempos de transição reduzidos com menor magnitude de sobre e subsinais comparados com modelo de rede neural de referência.

Um trabalho com experiência em tempo real em uma moagem de cimento (Fang e Shen, 2009) fez uma abordagem trabalhando com a pressão negativa na câmara de finos do moinho. Foi elaborada uma estratégia de controle *fuzzy* baseada no modelo de Takagi e Sugeno para estabilizar a pressão. O resultado aplicado em uma planta real mostra que se obtêm aspectos benéficos no controle da pressão e ao mesmo tempo controla indiretamente a moagem de cimento.

Prasath et al. (2010) desenvolveram um trabalho de controle preditivo baseado em modelo (*Model Predictive Control - MPC*) para regulação de uma moagem de cimento. Foi utilizado um simulador de moagem desenvolvido pela FLS (FLSmith Automation). Através de respostas a degrau determinou-se a função de transferência para o ponto de operação nominal. O algoritmo de MPC utilizado difere do tradicional, pois adota limitações de software para criar uma função de penalidade quadrática discreta de tal modo que o sistema em malha fechada é menos sensível às incertezas do modelo do que no caso do MPC tradicional que usa uma função de penalidade quadrática. Os resultados mostram um desempenho no controle de variáveis melhor que no caso de uso do MPC tradicional.

Tendo em vista os trabalhos avaliados na bibliografia pesquisada, verificou-se uma oportunidade para pesquisa e desenvolvimento que se mostre prático em termos de aplicação, considerando-se:

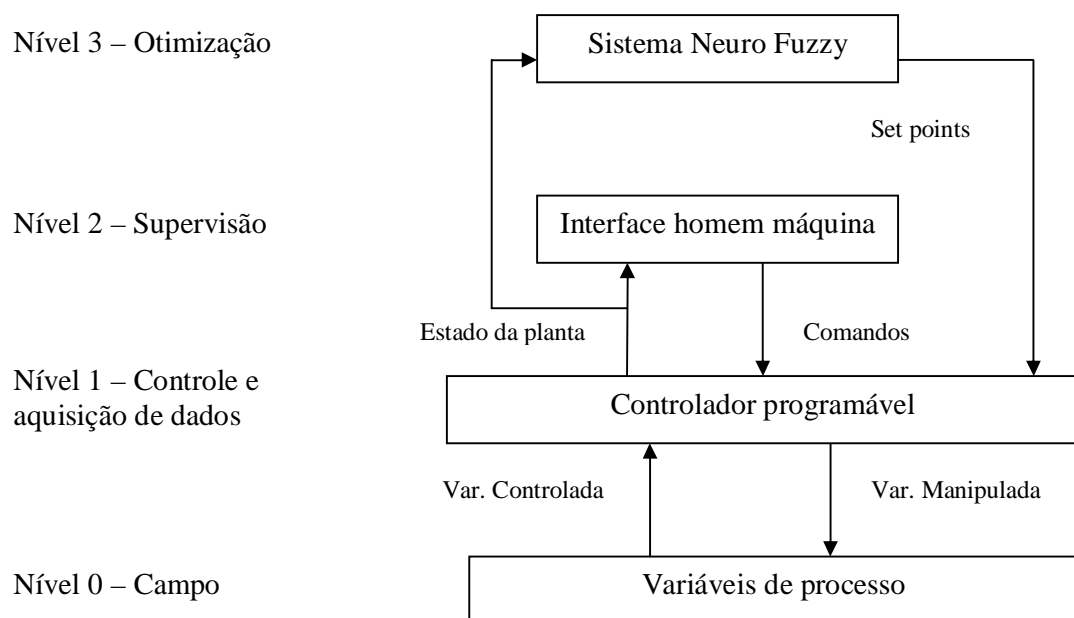
- ✓ Inclusão do objetivo de manter a granulometria dentro da faixa desejada (qualidade) ao mesmo tempo em que se orienta a operação com máxima carga (produção maximizada).
- ✓ Aderência à instrumentação existente em chão de fábrica nas moagens atuais, onde inexistente a instrumentação específica para medição de granulometria *online*. Neste caso a informação se dá mediante a análise de laboratório mediante amostragens a intervalos regulares na saída da moagem de cimento.
- ✓ Obtenção de um sistema de controle que se mostre robusto com relação à mudança de parâmetros do circuito de moagem juntamente com a capacidade de lidar com a elevada não linearidade exibida pela mesma.
- ✓ Teste do sistema otimizador desenvolvido em ambiente de simulação já consagrado pela literatura consultada.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho visa uma futura aplicação direta em plantas existentes tem como premissa adaptar-se à realidade dos sistemas de controle hoje vigente. Isto significa que o nível otimizante deve estar acima dos níveis de controle e supervisão existentes nas plantas e se comunicar com as mesmas via comunicação OPC (*OLE for Process Control*), contemplando a hierarquização apresentada na figura 18.

Os níveis 1 e dois da estrutura hierárquica apresentada usualmente são compostos por sistemas SCADA. O nível 1 é implementado via CLP (Controlador Lógico Programável) efetuando a aquisição de dados, execução de algoritmos de controle bem como o intertravamentos e seqüenciamento da planta. O nível 2 é implementado via sistema supervísório provendo as informações relativas ao estado da planta, alarmes, indicações e registro de variáveis bem como prover a forma de se efetuar o comando dos equipamentos envolvidos.

Figura 18 Diagrama de blocos da hierarquia do sistema de controle, supervisão e otimização



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A premissa acima considera a utilização das medições (sensores e atuadores) conforme descrito no item 2.3.1. Considera-se que a medida de qualidade (*blaine*) seja feita por amostragens em intervalos predeterminados.

Na estratégia de controle formulada, atua-se nas duas variáveis manipuladas de forma independente mediante a ação de controladores implementados com recursos de inteligência artificial.

O nível de otimização proposto pode ser implementado por um microcomputador comercial comum sem requisitos especiais de desempenho e configuração. Atualmente a rede de comunicação mais utilizada é a ethernet, o que evita a necessidade de conversores especiais de comunicação. Em sistemas mais antigos a comunicação é feita via padrão de chão de fábrica tais como *Devicenet*, *modbus* e *profibus*. Neste caso torna-se necessária a utilização de um *gateway* específico.

A completa aderência a uma estrutura hierarquizada permite a adoção de conceito de operação degradada. Na eventual ausência do nível otimizante o nível de controle passa a operar com as malhas conforme descrito no item 2.3.2. Isto significa a produção pode continuar a ser executada, pois o controlador programável continua ativo e assume com o ultimo valor do *set point* existente.

3.1 Embasamento do Sistema de Otimização Proposto

A premissa de se obter alta eficiência no processo acarreta a necessidade de se aplicar um sistema com características otimizantes que possa lidar com a elevada resposta não linear do sistema de moagem. Para tanto deve-se objetivar a maximização da produção de cimento dentro da faixa granulométrica desejada. Com isto evita-se a ocorrência de sobre moagem o que incorre em minimização do consumo de energia no moinho.

No presente trabalho, apresentamos uma alternativa para a inclusão da faixa granulométrica como variável a se otimizar. O sistema proposto possuiu duas funções principais: estabilizar o enchimento do moinho em um valor definido e também controlar o Blaine. Para tal controle são utilizados dois recursos de inteligência computacional: controladores *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais (RNA's).

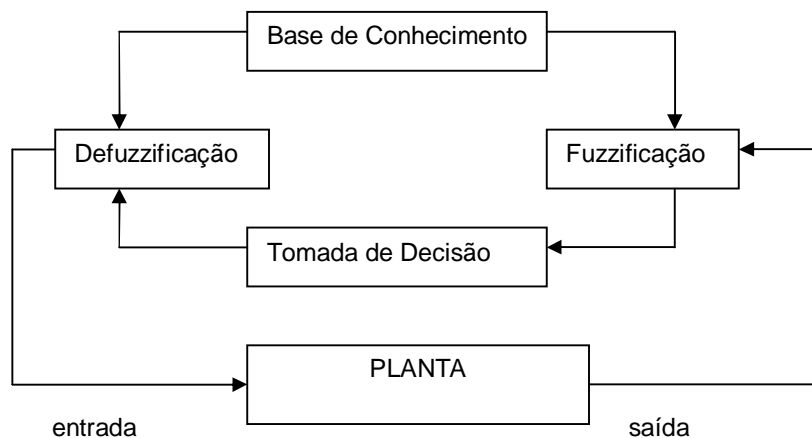
3.1.1 Controle *Fuzzy*

A principal diferença entre os sistemas de controle clássicos e os sistemas baseados em tecnologia *fuzzy* reside no fato que no primeiro necessita-se modelagem matemática detalhada do processo, tarefa extremamente difícil no caso de sistemas complexos e não lineares. No caso da lógica *fuzzy* adota-se um sistema baseado em regras. Estas regras são usualmente da forma se A "se / ou B então C" e são comumente desenvolvidas utilizando-se o conhecimento de especialistas em como controlar o sistema. Neste sentido, um controlador *fuzzy* emula um operador humano e seu conhecimento.

Geralmente um controlador *fuzzy* contem 4 componentes principais (Shaw, 1999), conforme mostrado na figura 19:

- Interface de Fuzzificação: Esta interface transforma os valores discretos oriundos de sensores das grandezas físicas em valores *fuzzy* dentro do universo de discurso predefinidos para cada variável bem como as funções de pertinência contidas na base de conhecimento. Durante esta fase os valores de *blaine* amostrado são transformados em valores de pertinência na faixa de [0,1].
- Base de conhecimento: Representa o modelo do sistema a ser controlado, consistindo de uma base de dados e uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece as definições numéricas necessárias as funções de pertinência utilizadas no conjunto de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza os objetivos de controle e a estratégia de controle utilizadas por especialistas na área.
- Lógica de Tomada de Decisões: Incorporada na estrutura de inferência da base de regras usa implicações *fuzzy* para simular tomada de decisões humanas, gerando ações de controle.
- Interface de Defuzzificação: Necessária para se obter um único valor discreto a ser aplicado na variável manipulada.

Figura 19 Estrutura básica do controlador *fuzzy*



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

3.1.2 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais tem sido reconhecidas como uma potente ferramenta para o desenvolvimento de sistemas de controle industriais inteligentes particularmente em modelagem de sistemas não lineares, previsão e controle adaptativo (Lu, 1996). Elas constituem um modelo computacional inspirado na estrutura e / ou aspectos funcionais de redes neurais biológicas. Neste sentido são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões (Braga et al., 2000). Este tipo de estrutura exibe capacidade de aprendizado quando apresentada a um conjunto de exemplos, extraindo automaticamente as características para representar a informação fornecida.

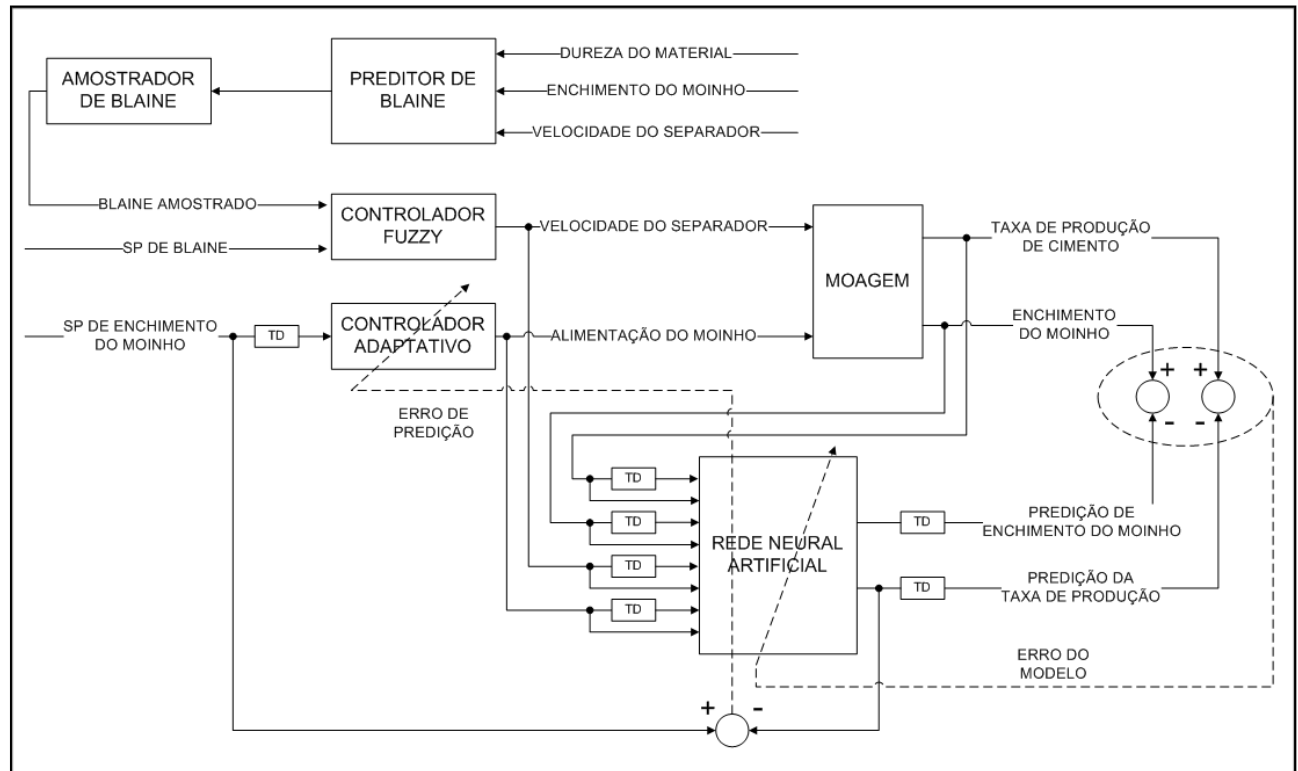
Existem dois tipos de aprendizado que podem ser utilizados para a RNAs, treinamento *offline* e treinamento *online*. No primeiro caso os pesos da RNA são ajustados antes da sua aplicação, utilizando-se dados históricos disponíveis. No segundo caso, utilizam-se as informações que são adquiridas durante o funcionamento do sistema, permitindo que a RNA adapte-se as modificações do ambiente no qual a mesma está inserida. A característica de aprendizado adaptativo das Redes Neurais Artificiais a torna elegível para garantir robustez do sistema em face de variações no processo de moagem já citadas anteriormente.

3.2 Estrutura de Otimização

O sistema proposto é composto da seguinte estrutura, conforme mostrado na figura 20:

- O processo de moagem é simulado pelo modelo caixa preta multivariável apresentado no item 2.2.2.
- Um modelo de redes neurais preditivas baseado na teoria de controle de janelas deslizantes capaz de estimar o enchimento do moinho bem como a taxa de produção da moagem
- Um controlador adaptativo com atualização de parâmetros por redes neurais efetua o controle de enchimento do moinho. O mesmo atua na variável manipulada alimentação nova. Esta abordagem visa garantir a operação com o moinho no máximo da carga possível, o que acarreta máxima alimentação nova possível significando assim o ponto de máxima produção (dentro de uma faixa granulométrica especificada).
- Um controlador *fuzzy* para a granulometria (*blaine*) que gera o *set point* para a velocidade do separador. Este controlador garante que a produção se dê dentro da faixa granulométrica especificada.
- Um preditor de *blaine online*, mediante as informações relativas a dureza do material, enchimento do moinho e velocidade do separador.
- Um amostrador de *blaine* objetivando simular a atividade de amostragem típica de laboratório
- As referencias externas são *set points* de enchimento do moinho e de *blaine* do cimento.

Figura 20 Estrutura de otimização neuro *fuzzy*



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

3.1.1 Controle de *Blaine*

O controle de *blaine* é feito por um controlador *fuzzy* e tem por função definir o valor de *set-point* da velocidade do separador. Ele utiliza como entrada o erro entre o *set-point* de *Blaine* e seu valor atual. A razão da escolha deste tipo de controlador para atuar na correção da velocidade do separador reside no aspecto já mencionado no que tange a permitir a incorporação do conhecimento de especialista, convertendo-o em um algoritmo facilmente implementável e modificável. Adicionalmente permite compatibilizar a janela de tempo necessária para a amostragem em análise de laboratório para os casos de medição de *blaine offline*.

A ocorrência de variabilidade na granulometria e/ou na dureza do material faz com que se modifiquem a saída do separador (*blaine*, produção e carga circulante). A ação do controlador *fuzzy* de modo a prover a correção do corte do separador é feita em pequenos degraus e de forma espaçada.

3.1.2 Predição das Saídas da Moagem

Como mostrado na figura 3.2, uma RNA é utilizada para modelar e prever as saídas futuras (um passo a frente) para o sistema de moagem, como sugerido em (Topalov e Kaynack, 2004).

Utiliza-se como entradas a alimentação nova do moinho, a velocidade do separador, a taxa de produção atual e o enchimento do moinho e gera-se como saídas as previsões dos valores futuros de enchimento do moinho e da taxa de produção.

Foi adotada uma estrutura de rede com duas camadas sendo a primeira com 8 neurônios e a de saída (camada escondida) com 32 neurônios.

A saída do modelo preditivo da moagem então é dada por:

$$Y_f^{prev}(k + 1) = f\left\{\sum_{i=1}^{32} W2_i^{yf}(k) f_H\left[\sum_{j=1}^8 W1_{ij}(K) I_j(k)\right]\right\}, \quad (20)$$

$$Z^{prev}(k + 1) = f\left\{\sum_{i=1}^{32} W2_i^z(k) f_H\left[\sum_{j=1}^8 W1_{ij}(K) I_j(k)\right]\right\}. \quad (21)$$

Onde:

- I é o vetor de entradas da rede
- $W1$ é o vetor de pesos da primeira camada
- $f_H(\cdot)$ é a função de ativação dos nós escondidos.
- $W2$ é o vetor de pesos da segunda camada
- $f(\cdot)$ é a função de ativação linear da dos nós de saída
- $Y_f^{prev}(\cdot)$ é a previsão da taxa de produção de cimento
- $Z^{prev}(\cdot)$ é a previsão do enchimento do moinho

O vetor de entradas apresentado à rede em um instante k consiste da velocidade do separador neste instante bem como no instante anterior ($v(k)$ e $v(k-1)$), taxa de alimentação nova do moinho neste instante bem como no instante anterior ($u(k)$ e $u(k-1)$), produção de cimento neste instante bem como no instante anterior ($y(k)$ e $y(k-1)$) e enchimento do moinho neste instante bem como no instante anterior ($z(k)$ e $z(k-1)$).

A saída da rede corresponde aos valores preditos (instante de tempo $k+1$) para a taxa de produção ($Y_f^{prev}(k + 1)$) e o enchimento do moinho ($Z^{prev}(k + 1)$).

Os erros do modelo são dados por:

$$e_1(k) = Y_f(k) - Y_f^{prev}(k) \quad (22)$$

$$e_2(k) = Z_i(k) - Z^{prev}(k) \quad (23)$$

Onde:

- $e_1(k)$ é o erro de previsão de saída de cimento no instante atual
- $Y_f(k)$ é o valor da saída de cimento no instante atual
- $Y_f^{prev}(k)$ é o valor previsto da saída de cimento no instante atual
- $e_2(k)$ é o erro de enchimento do moinho no instante atual
- $Z_i(k)$ é o enchimento do moinho no instante atual
- $Z^{prev}(k)$ é a previsão do enchimento do moinho no instante atual

Utilizando o erro entre estes valores preditos e os valores reais de operação do moinho são reajustados os pesos da Rede Neural. Adota-se o treinamento por modos deslizantes, considerando-se:

- O tradicional modo de aprendizado via algoritmo *back-propagation*, feito ajustando-se os parâmetros da RNA pelo gradiente do erro em todos os *layers* da rede, possui a desvantagem de baixa velocidade de convergência e a possibilidade de ficar amarrado a um mínimo local.
- Para aplicações durante longos períodos de tempo, a questão de robustez numérica do método é importante e não é garantida no método *back-propagation*.
- O aproveitamento de trabalhos anteriores em sistemas de controle com abordagem em Sistemas de Estruturas Variáveis (*Variable Structure Systems – VSS*) de modo a se obter robustez e estabilidade em ambientes com incerteza de modelo da planta motivaram a adoção de controle de modos deslizantes (*Sliding Mode Control – SMC*) para o treinamento de sistemas computacionais inteligentes (Topalov, 2004).
- Um algoritmo de treinamento online de RNA baseado em estratégia SMC foi proposto por Braga (Braga et al., 2000).

Este método de treinamento atua em duas fases: na primeira, superfícies deslizantes são definidas de modo a reproduzir o comportamento entre entradas e saídas do sistema. Em uma segunda fase, os pesos são ajustados de forma satisfazer as condições de rastreamento e deslizamento nas superfícies.

A definição da superfície de deslizamento para camada de saída da RNA é dada por, considerando-se que $\lambda_1, \lambda_2 > 0$:

$$S_y(k-1) = \Delta e_1(k) + \lambda_1 e_1(k) \quad (24)$$

$$S_z(k-1) = \Delta e_2(k) + \lambda_2 e_2(k) \quad (25)$$

Onde:

$$\Delta e_1(k) = e_1(k) - e_1(k-1) \quad (26)$$

$$\Delta e_2(k) = e_2(k) - e_2(k-1) \quad (27)$$

A definição da superfície de deslizamento para a camada escondida da RNA é dada por, considerando-se que $\lambda_H > 0$ (Braga et al., 2000):

$$S_{iH}(k-1) = \Delta e_{iH}(k) + \lambda_H e_{iH}(k) \quad (28)$$

$$\Delta e_{iH}(k) = e_{iH}(k) - e_{iH}(k-1) \quad (29)$$

onde

$$e_{iH}(k) = f_{H(x_i)} [e_1(k) W 2_i^{Yf}(k) + e_2(k) W 2_i^Z(k)] \quad (30)$$

$$x_i = \sum_{j=1}^n W 1_{if}(k) + e_2(k) I_j(k) \quad (31)$$

$$f_H(x_i) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (32)$$

Logo

$$e_{iH}(k) = [1 - f(x_i)] [e_1(k) W 2_i^{Yf}(k) + e_2(k) W 2_i^Z(k)] \quad (33)$$

A regra de atualização de pesos da camada de saída pode então ser determinada seguindo o método proposto por Braga (Braga et al., 2000), considerando-se α_1 e $\alpha_2 > 0$:

$$\Delta W_{2_i}^{Yf}(k) = \alpha_1 |e_1(k + 1)| f_H(x_i) \text{sign}(S_{Yf}(k)) \quad (34)$$

$$\Delta W_{2_i}^Z(k) = \alpha_2 |e_2(k + 1)| f_H(x_i) \text{sign}(S_Z(k)) \quad (35)$$

A regra de atualização de pesos da camada de escondida do modelo pode então ser determinada por, considerando-se $\beta > 0$:

$$\Delta W_{1_{if}}(k) = \beta |e_{iH}(k + 1)| I_f(k) \text{sign}(S_{iH}(k)). \quad (36)$$

3.1.3 Controle de Alimentação Nova do Moinho

O objetivo do sistema neuro adaptativo é a atuação no controle da alimentação nova do moinho para estabilizar seu enchimento. Ele recebe um *set point* de enchimento do moinho e atua na alimentação nova de modo a cumprir este objetivo.

A ação de controle é dada por (Topalov, 2004):

$$u(k) = u(k-1) + k_{u1}(k)h_{u1}(k) + k_{u2}(k)h_{u2}(k) + k_{u3}(k)h_{u3}(k) \quad (37)$$

$$e(k) = Z^{\text{ref}}(k) - Z(k) \quad (38)$$

$$h_{u1}(k) = e(k) - e(k-1) \quad (39)$$

$$h_{u2}(k) = e(k) \quad (40)$$

$$h_{u3}(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (41)$$

onde:

- $u(k)$ é a taxa de alimentação nova do moinho no instante atual
- $u(k-1)$ é a taxa de alimentação nova do moinho no instante anterior
- k_{u1} , k_{u2} e k_{u3} são os parâmetros do controlador
- $Z^{\text{ref}}(k)$ é o valor de referencia (*set point*) de enchimento do moinho no instante atual
- $Z(k)$ é o valor de enchimento do moinho no instante atual
- $e(k)$ é o erro de enchimento do moinho no instante atual
- $e(k-1)$ é o erro de enchimento do moinho no instante anterior
- $e(k-2)$ é o erro de enchimento do moinho no instante k-2

- $Y_f^{prev}(\cdot)$ é a previsão da taxa de produção de cimento
- $Z^{prev}(\cdot)$ é a previsão do enchimento do moinho

Os parâmetros do controlador são reajustáveis em função da previsão de enchimento do moinho, adotando também o algoritmo de modos deslizantes cuja motivação e formato estão descritos no item anterior.

A superfície de deslizamento do controlador é definida da seguinte forma, considerando-se $\lambda_3 > 0$ (Topalov, 2004):

$$S_u(k) = \Delta e_u(k) + \lambda_3 e_u(k) \quad (42)$$

$$\Delta e_u(k) = e_u(k) - e_u(k-1) \quad (43)$$

A regra de atualização dos parâmetros do controlador pode então ser determinada seguindo o método proposto por Braga (Braga et al., 2000), considerando-se $\alpha_3 > 0$:

$$\Delta K_{um}(k) = \alpha_4 |e_u(k)| h_{um}(k) \text{sign}(S_u(k)) \quad (44)$$

3.1.4 Predição do *Blaine*

Este módulo é um complemento da modelagem da moagem, que à partir do parâmetro dureza do material (d) e das variáveis velocidade do separador e enchimento do moinho efetua a previsão da granulometria de saída da moagem.

Foi adotada a modelagem fenomenológica calculado por cadeias de Markov (Mejeuomov, 2007).

4 IMPLEMENTAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO

Para o desenvolvimento do controlador e utilização dos simuladores de funcionamento da moagem e de *Blaine*, foi utilizado o software MATLAB. Este software utiliza uma linguagem computacional de alto nível (fácil aprendizagem), e possui um ambiente de desenvolvimento que permite uma rápida implementação, visto que ele apresenta várias caixas de ferramentas (*toolbox*) que auxiliam na utilização de modelos e métodos matemáticos em geral.

Uma destas caixas de ferramentas é o Simulink, que é especialmente desenvolvido para auxiliar na modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. A apresentação da implementação do sistema proposto será feita utilizando os blocos implementados neste *toolbox*.

O simulador e o controlador de moagens são divididos em módulos, possuindo respectivamente três e sete módulos. Todos são mostrados na figura 21.

4.1 O Simulador

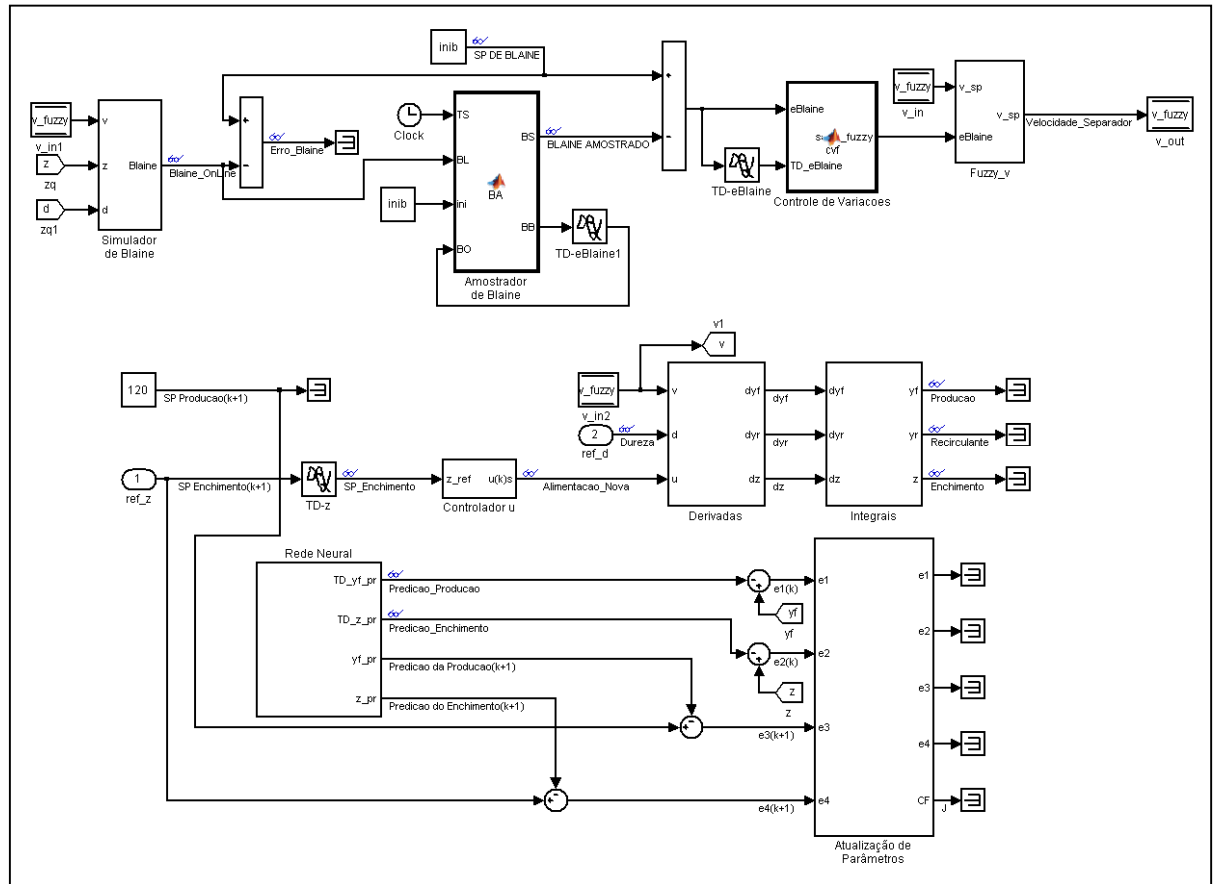
A seguir detalha-se os blocos relativos ao simulador da moagem, contemplando a dinâmica definida e utilizada por diversos autores na literatura de controle otimizado de moagens de cimento (Breugesem et al., 1994).

4.1.1 Implementação da Dinâmica da Moagem (Bloco Derivada)

Recebe os valores da moagem real, a saber:

- Velocidade do separador (v);
- dureza da matéria (d),
- alimentação de material novo (u),
- enchimento do moinho (z),
- carga Circulante (yr),
- produção (saída) (yf).

Figura 21 Diagrama de blocos geral do sistema neuro fuzzy



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Estes valores são incorporados para as equações (2.12) a (2.15), os parâmetros são ajustados conforme abaixo definido:

Constantes de tempo: $T_f = 0,3$ horas e $T_r = 0,01$ hora;

Dureza relativa do material: $d = 1$;

Saída da moagem de cimento ($\varphi(z,d)$)

$$\varphi(z, d) = \max\left[0; (-dK_{\varphi 1}z^2 + K_{\varphi 2}z)\right]$$

Onde $K_{\varphi 1} = 0,1116(\text{ton} \cdot \text{h})^{-1}$ e $K_{\varphi 2} = 16,50(\text{h})^{-1}$

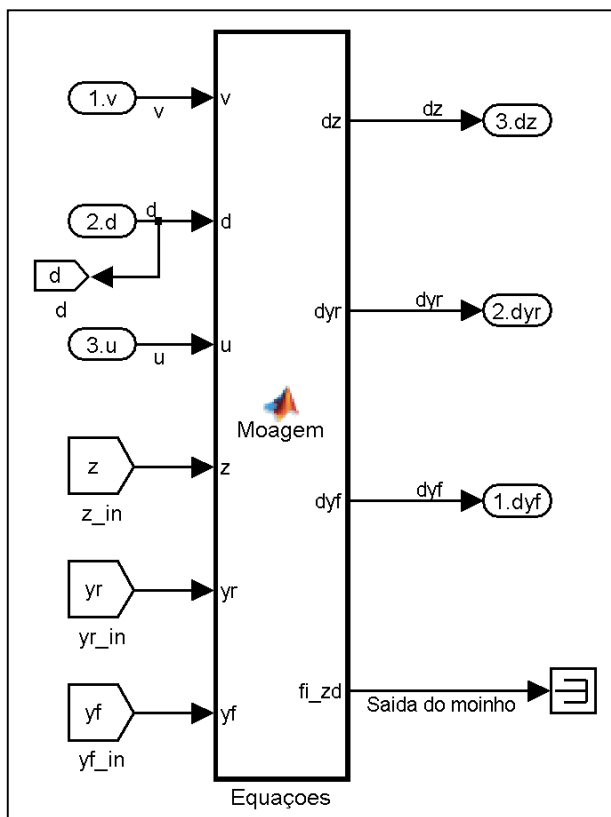
Função de Separação ($\alpha(z,v,d)$)

$$K_{\alpha} = (570)^m 170^n \left(\frac{570}{450} - 1\right) (\text{ton/h})^m \text{rpm}^n$$

onde $m = 0,8$ e $n = 0,4$.

Na figura 22 está representada a estrutura interna do simulador da Moagem.

Figura 22 Diagrama de blocos interno da função derivadas



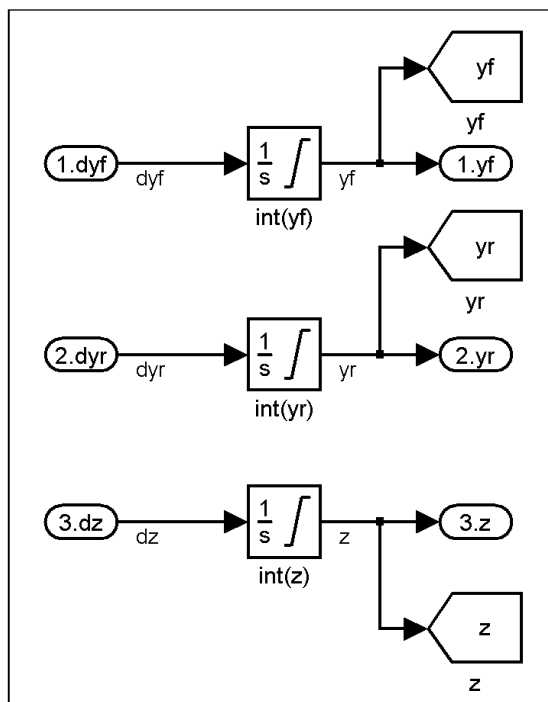
Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A parametrização interna do circuito da moagem está mostrada no final deste trabalho.

4.1.2 Obtenção da Saída da Moagem (Bloco Integrais)

Este bloco recebe as taxas de variação calculadas no bloco anterior (Derivadas) e integra esses valores para obter produção de cimento, carga circulante e o enchimento do moinho em um determinado instante de tempo. Tal arranjo está mostrado na figura 23.

Figura 23 Diagrama de blocos interno da função integral



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

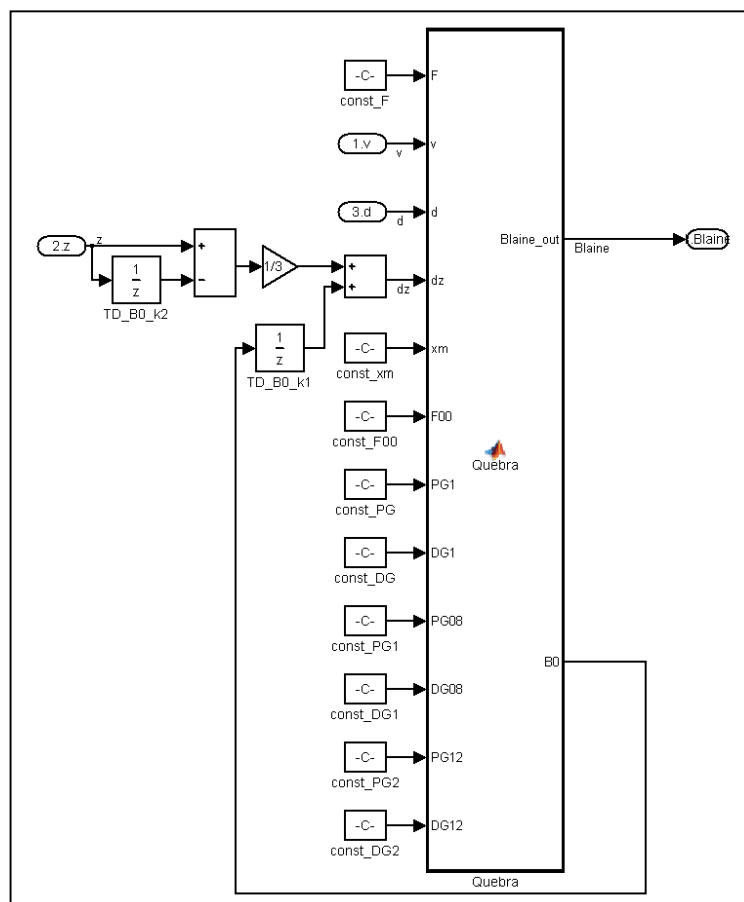
4.1.3 Simulador de Blaine

Adotando o procedimento indicado no trabalho de Mejeoumov (2007), foi definido o Bloco de Quebra de Material. Este bloco simula o comportamento interno do moinho e utilizando a curva específica do separador da linha de moagem faz a predição do valor de finura (Blaine) do cimento produzido.

Como a dureza do material, a velocidade do separador e o enchimento do moinho influenciam diretamente na finura, estes foram inseridos como parâmetros da equação citada anteriormente a fim de aproximar os valores obtidos da realidade.

Este bloco tem o seu diagrama de blocos interno mostrado na figura 24 abaixo. A programação do mesmo foi feita utilizando-se programação no Matlab, que está mostrada no final deste trabalho.

Figura 24 Diagrama de blocos interno da quebra



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

4.1.4 Amostrador de Blaine

Este bloco visa simular o comportamento de um laboratório no que tange a tempo entre as medições. Para as simulações, foi configurado um tempo de 30 minutos entre as medições. Esta adequação foi feita devido ao fato de quase nenhuma planta de moagem de cimento possuir um medidor *on-line* de finura do cimento.

A parametrização deste bloco foi feita utilizando-se programação no Matlab, mostrada no final deste trabalho.

4.1.5 Bloco Controle de Variações

Este bloco visa controlar o envio do erro entre o *set-point* e o valor atual lido pelo laboratório simulado, para o controlador *Fuzzy* e cria uma histerese de atuação.

Esta medida foi tomada para evitar a atuação desnecessária do controlador. A programação deste bloco foi feita utilizando-se programação no Matlab, mostrada no final deste trabalho.

4.2 O Controle

A seguir detalha-se a implementação dos controladores deste processo, a saber:

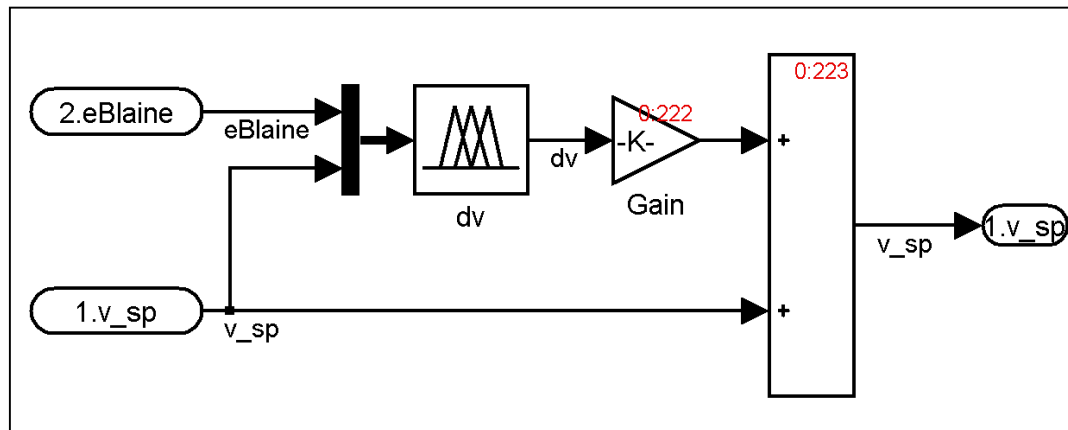
- Controlador *fuzzy* para o blaine
- Controlador adaptativo para o enchimento do moinho

4.2.1 Controle *Fuzzy* para o Blaine (Bloco *Fuzzy_v*)

O bloco “*Fuzzy_v*” atua no controle da velocidade do separador a fim de manter o *set-point* de finura do cimento, sendo que este *set-point* pode ser reajustado a qualquer hora para atender às necessidades da produção.

Este bloco tem o seu diagrama de blocos interno mostrado na figura 25.

Figura 25 Diagrama de blocos interno do controlador fuzzy



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

As variáveis de entrada são:

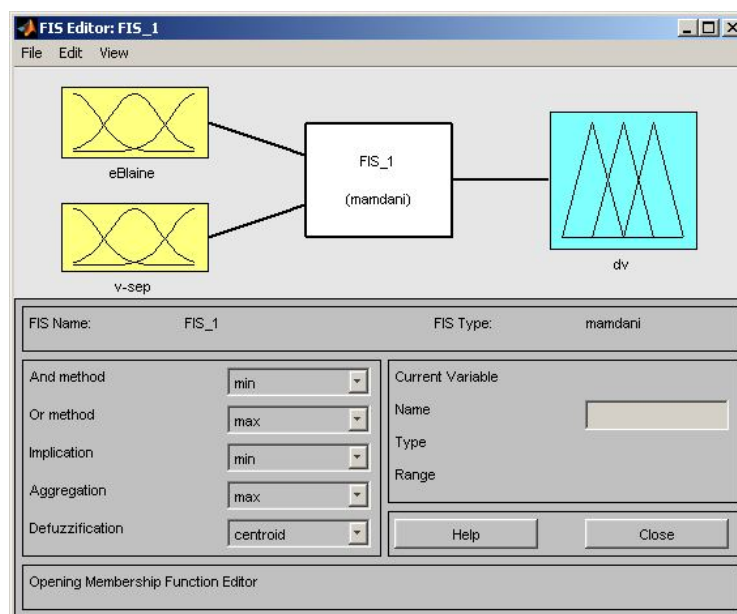
- eBlaine (erro entre o *set-point* e valor atual da finura do cimento);
- v_sep (velocidade atual do separador).

A variável de saída do controlador é:

- dv(variação na velocidade do separador).

Adotou-se uma estrutura de controlador com a forma proposta por Mandami, conforme mostrado na figura 26:

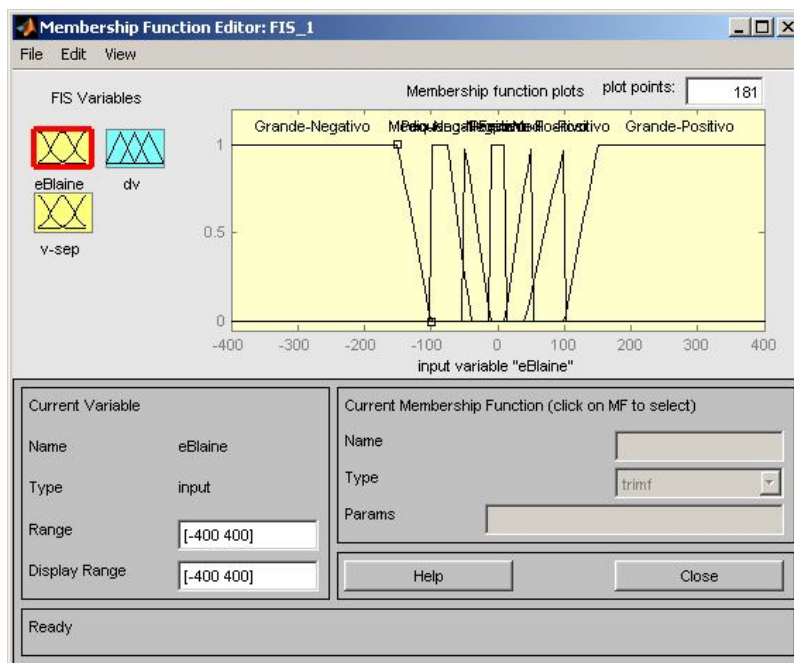
Figura 26 Parâmetros FIS_1



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A variável de entrada eBlaine, após a verificação do seu intervalo de valores máximos e mínimos, teve este intervalo dividido entre sete funções de pertinência, tendo em vista ter um bom controle do espaço de entrada sem utilizar um número muito grande de funções. Esta divisão está mostrada na figura 27.

Figura 27 Configuração da variável de entrada eBlaine



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Os parâmetros definidos para a variável eBlaine estão mostrados na tabela 2.

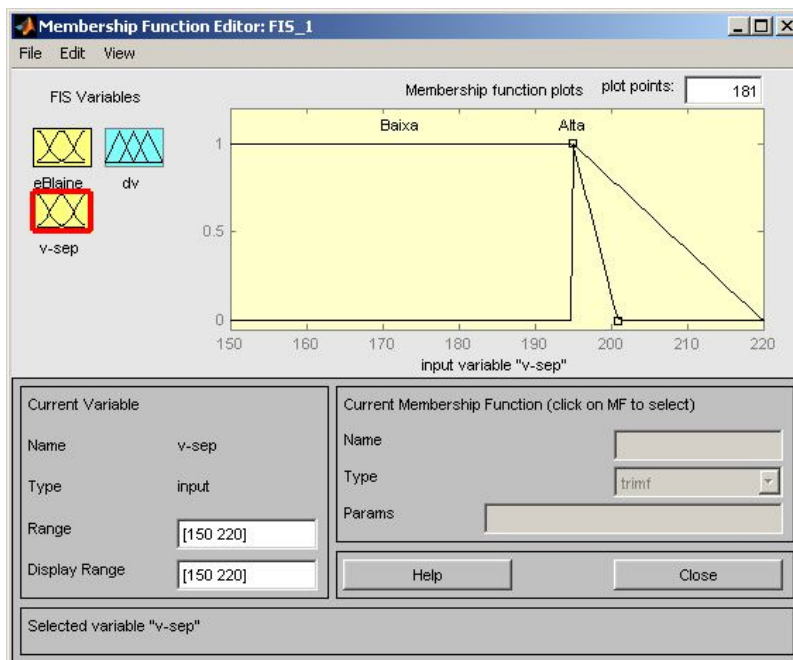
Tabela 2 Parâmetros da variável eBlaine

Função de Pertinência	Tipo	Parâmetros
Grande - Negativo	Trapezoidal	(-580 -420 -150 - 100)
Médio - Negativo	Trapezoidal	(-102 -102 -75 -40)
Pequeno - Negativo	Triangular	(-50 -50 -10)
Faixa	Trapezoidal	(-10 -10 10 10)
Pequeno- Positivo	Triangular	(10 50 50)
Médio - Positivo	Trapezoidal	(40 100 102 102)
Grande - Positivo	Trapezoidal	(100 150 420 580)

Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A variável de entrada v_sep teve seu intervalo de valores de entrada dividido entre duas funções de pertinência, conforme mostrado na figura 28.

Figura 28 Configuração da variável de entrada v_sep



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Os parâmetros definidos para a variável v_sep estão mostrados na tabela 3.

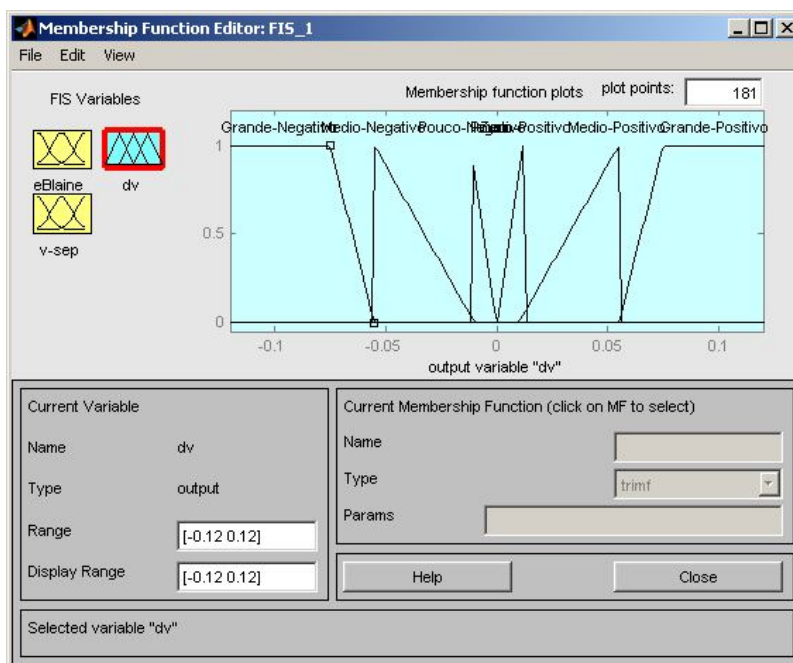
Tabela 3 Parâmetros da variável v_sep

Função de Pertinência	Tipo	Parâmetros
Baixa	Trapezoidal	(120 120.1 195 201)
Alta	Triangular	(195 195 220)

Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A variável de saída *dv*, teve seu intervalo de valores de saída dividido entre seis funções de pertinência. Esta divisão permitiu um controle rápido e preciso da taxa de variação da velocidade do separador. O intervalo destes valores deve ser reajustado de acordo com o separador e para isto deve ser feita uma análise de seu comportamento. Esta divisão é mostrada na figura 29.

Figura 29 Configuração da variável de saída *dv*



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Os parâmetros definidos para a variável *dv* estão mostrados na tabela 4.

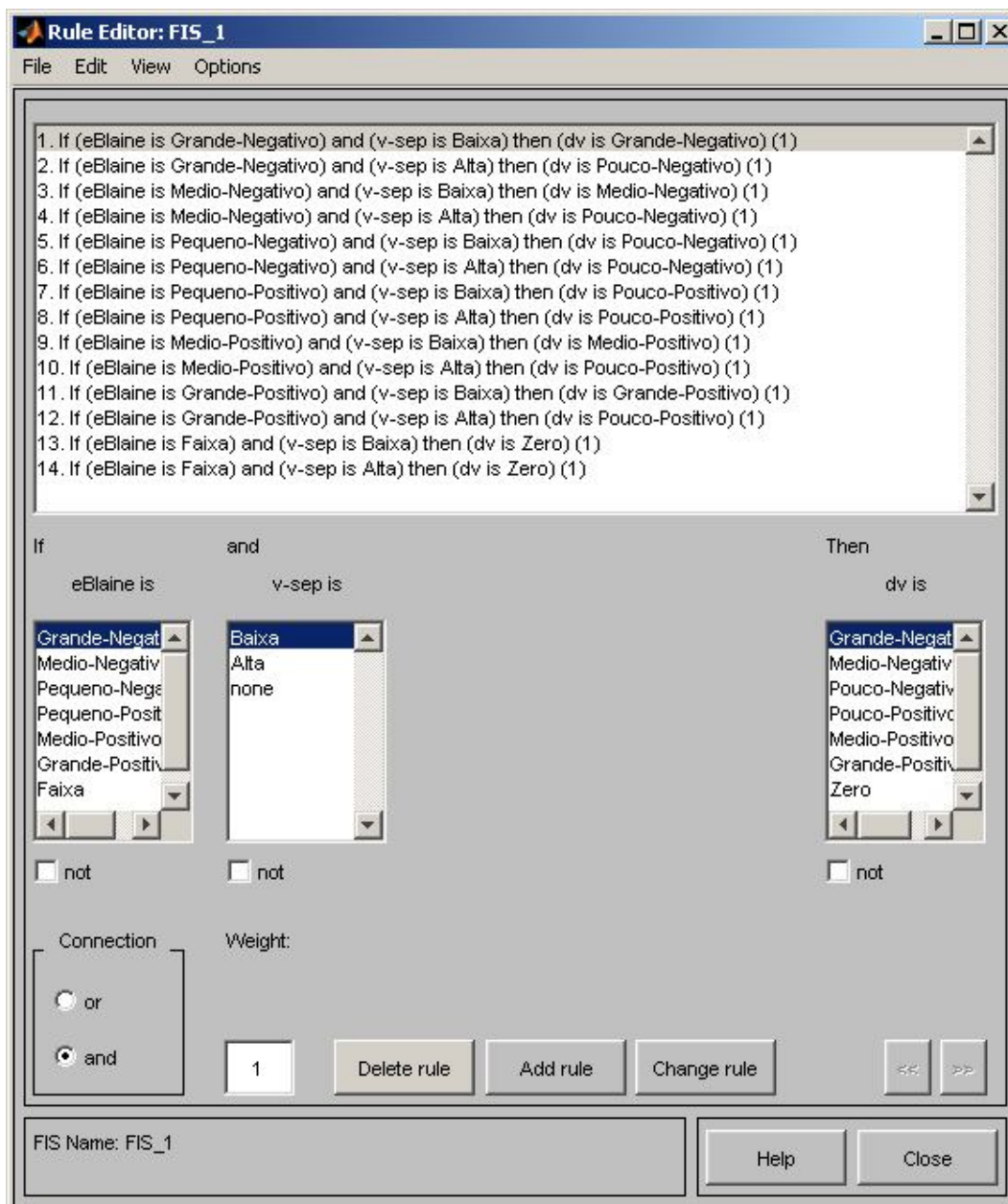
Tabela 4 Parâmetros da variável *dv*

Função de Pertinência	Tipo	Parâmetros
Grande - Negativo	Trapezoidal	(-0.18 -0.15 -0.075 - 0.055)
Médio - Negativo	Triangular	(-0.055 -0.055 -0.01)
Pouco - Negativo	Triangular	(-0.012 -0.012 0)
Pouco – Positivo	Triangular	(0 0.012 0.012)
Médio - Positivo	Triangular	(0.01 0.055 0.055)
Grande - Positivo	Trapezoidal	(0.055 0.075 0.15 0.18)

Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

As regras *fuzzy* para o controlador são mostradas na figura 30:

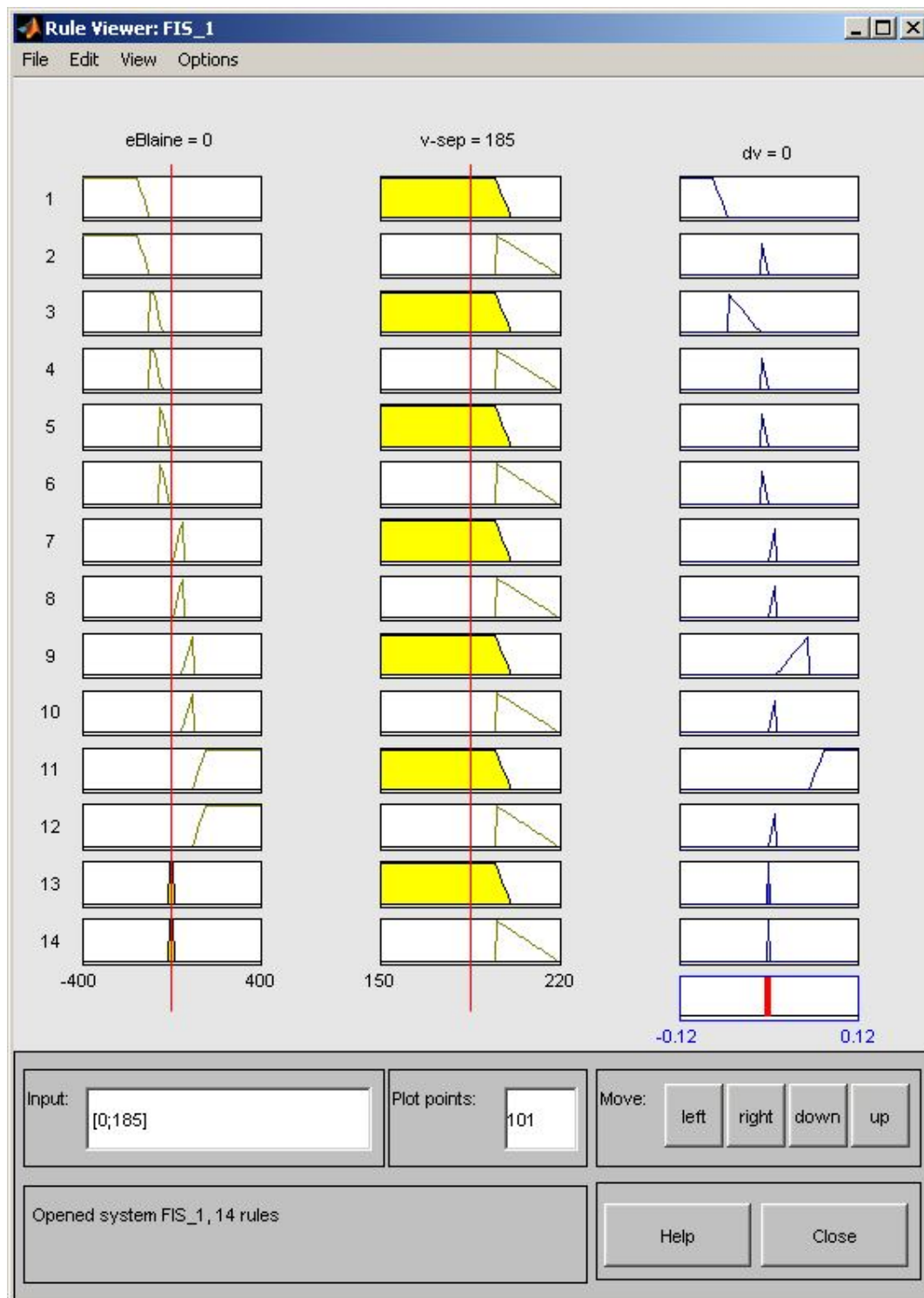
Figura 30 Regras *fuzzy*



Fonte: Elaborada pelo autor- 2013

A visualização das regras *fuzzy* para o controlador são mostradas na figura 31:

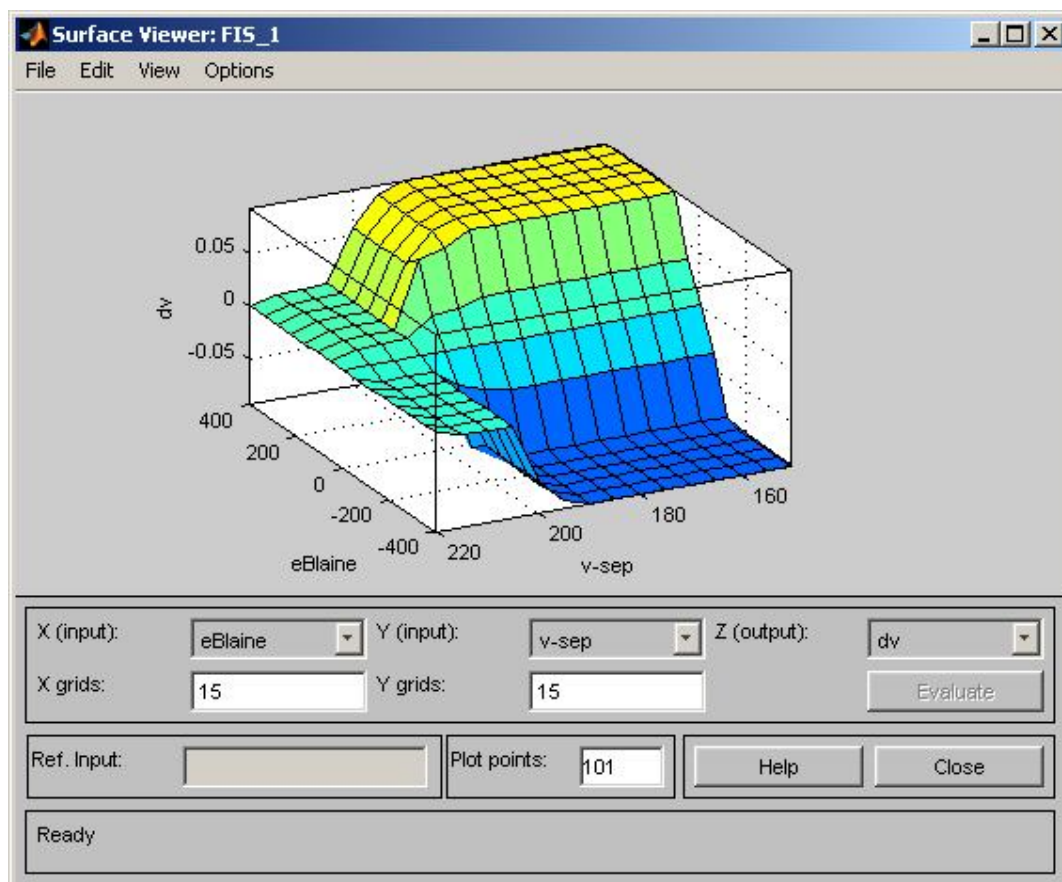
Figura 31 Visualização das regras *fuzzy*



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

As variáveis de entrada bem como as regras *fuzzy* ajustadas acarretaram a superfície de controle mostrada na figura 32:

Figura 32 Superfície de controle obtida



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

4.2.2 Controle Adaptativo da Alimentação Nova (Bloco Controlador U)

Este bloco é controlado adaptativamente pela Rede Neural, atuando na taxa de alimentação nova do moinho, levando em consideração o enchimento e o *set-point* do mesmo (estes parâmetros são muito importantes, pois com eles é possível a análise do comportamento do moinho, prevenindo seu entupimento).

A ação de controle é dada por (Topalov, 2004):

$$u(k) = u(k-1) + k_{u1}(k)h_{u1}(k) + k_{u2}(k)h_{u2}(k) + k_{u3}(k)h_{u3}(k) \quad (45)$$

onde

$$e_2(k) = Z^{\text{ref}}(k) - Z(k) \quad (46)$$

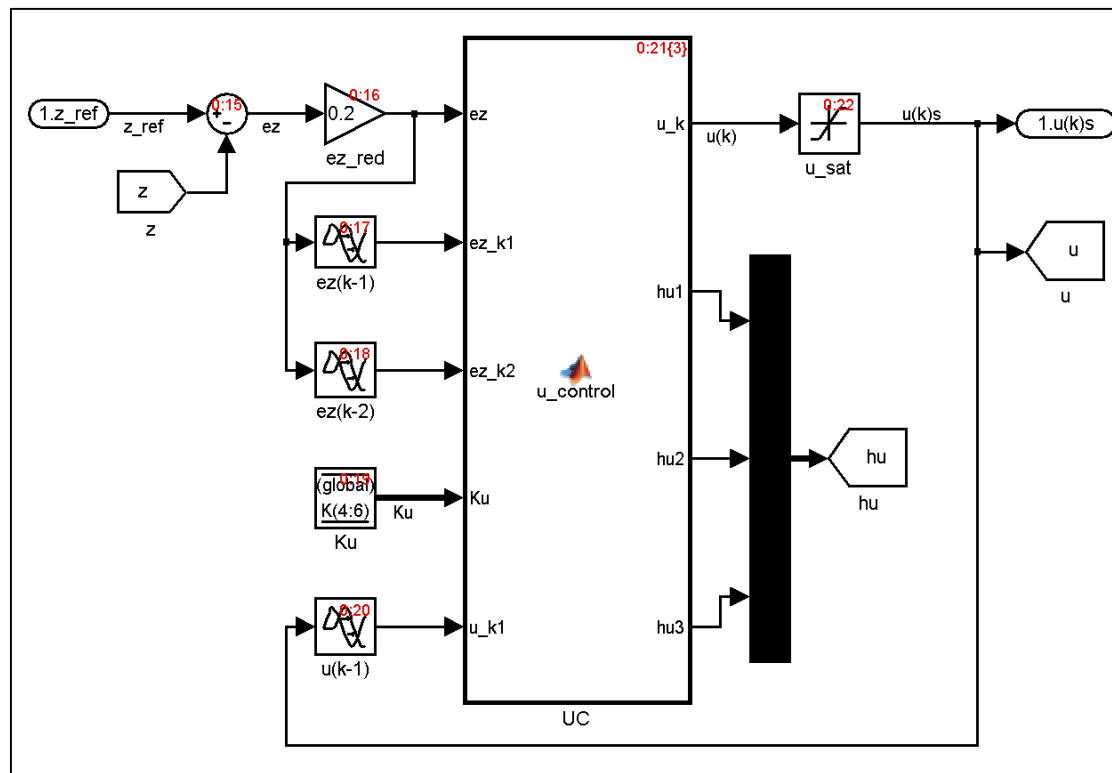
$$h_{u1}(k) = e_2(k) - e_2(k-1) \quad (47)$$

$$h_{u2}(k) = e_2(k) \quad (48)$$

$$h_{u3}(k) = e_2(k) - 2e_2(k-1) + e_2(k-2) \quad (49)$$

O diagrama de blocos deste controlador é mostrado na figura 33.

Figura 33 Diagrama de blocos do controlador adaptativo da taxa de alimentação



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

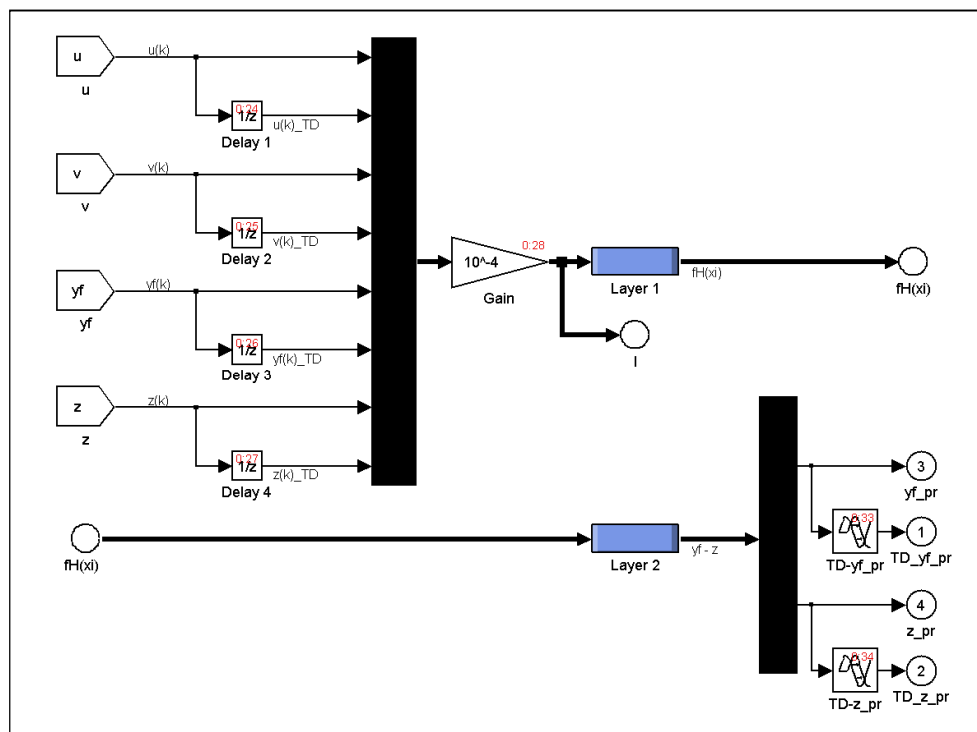
4.3 Rede Neural

Este bloco é responsável pela aprendizagem do comportamento da moagem e a partir deste conhecimento, prever seu comportamento no futuro, tendo como entrada valores atuais e passados das variáveis:

- taxa de alimentação nova do moinho (u);
- velocidade do separador (v);
- taxa de produção de cimento (y_f);
- carga no moinho (z).

O diagrama de blocos desta Rede é mostrado na figura 34.

Figura 34 Diagrama de blocos da rede neural

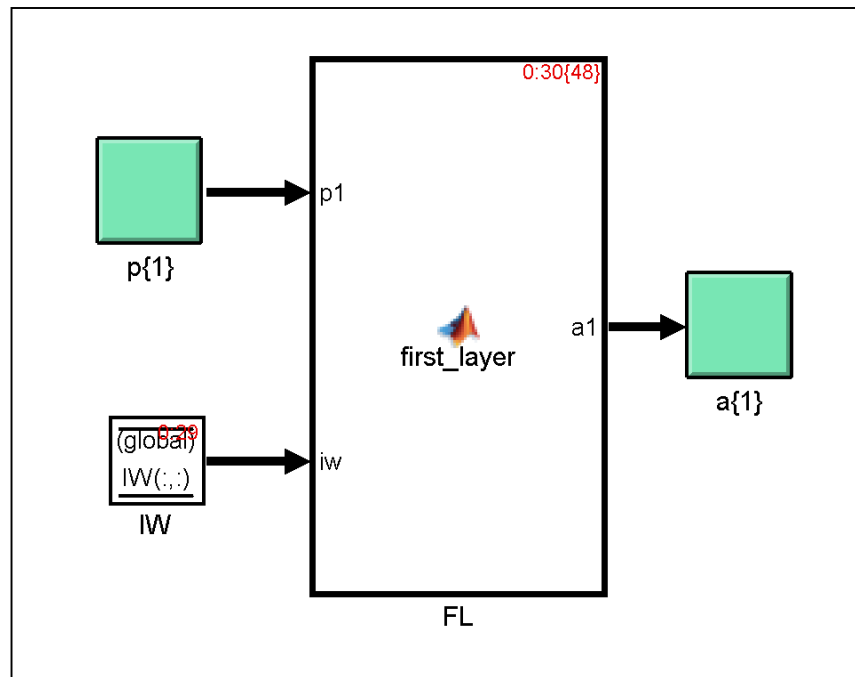


Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

4.3.1 Primeira Camada da Rede Neural (Bloco *First Layer*)

O diagrama de blocos desta camada é mostrado na figura 35.

Figura 35 Diagrama de blocos da primeira camada da rede neural



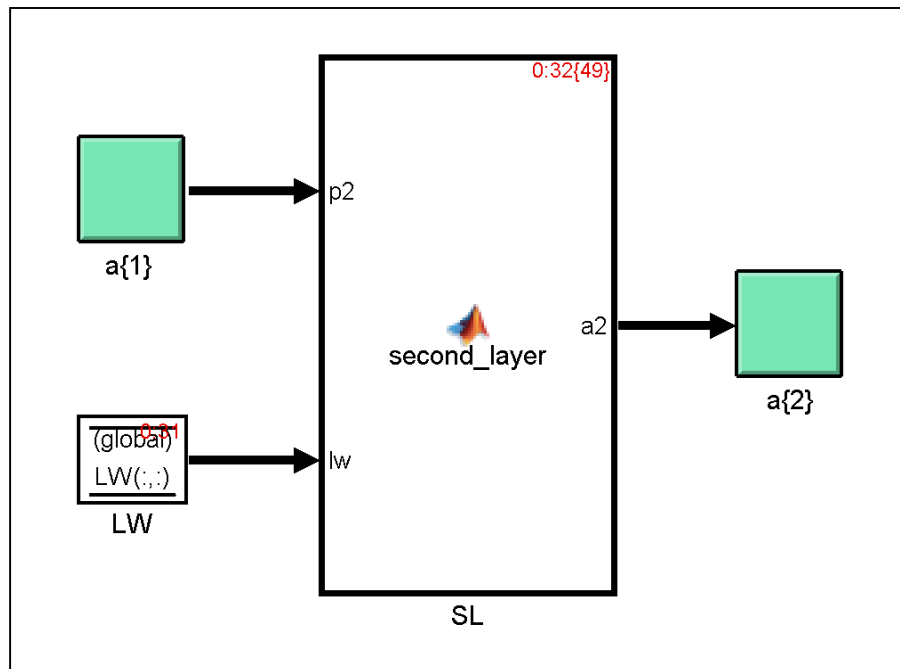
Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A implementação do processamento deste bloco é mostrada no final deste trabalho.

4.3.2 Segunda Camada da Rede Neural (Bloco *Second Layer*)

O diagrama de blocos desta camada é mostrado na figura 36.

Figura 36 Diagrama de blocos da segunda camada da rede neural



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A implementação do processamento deste bloco é mostrada no final deste trabalho.

4.3.4 Atualização de Pesos (Bloco delta W)

Este bloco é responsável pela atualização dos pesos de conexão entre neurônios da Rede Neural. Para tal, leva em consideração os erros entre os valores atuais e os preditos e os erros entre os valores de *set-point* e os preditos para a próxima iteração. Este bloco está mostrado na figura 37.

A implementação do processamento deste bloco é mostrada no final deste trabalho.

4.3.5 Atualização de Parâmetros do Controlador Adaptativo (Bloco delta K)

Este bloco é responsável pela atualização dos parâmetros do controlador da taxa de alimentação nova do moinho. Este bloco é mostrado na figura 37.

A implementação do processamento deste bloco é mostrada no final deste trabalho.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Condições de Simulação

Na simulação foi adotado um período de amostragem $T_e=0,3$ min. As simulações foram iniciadas com pesos da RNA e parâmetros do controlador adaptativo selecionados aleatoriamente. Os *set points* originais são de $z = 55$ tons e blaine de 3.920.

As seguintes perturbações foram introduzidas no sistema:

- A dureza d do material novo tem uma variação de 50% e muda de seu valor nominal de 1 para 1,5 no intervalo de tempo de 211 a 240 minutos;
- O *set point* do enchimento do moinho (z) varia de 65 a 70ton/h durante o período de 67 a 270 min.

A primeira simulação considera que o controlador de blaine está desligado e é mostrada na figura 36(a) a (g). Pode-se verificar que as respostas nominais a variação de *set point* de enchimento bem como na dureza correspondem à realidade.

A segunda simulação considera que o controlador de blaine está ligado e é mostrada nas figuras 37(a) a (g). As respostas correspondem ao esperado em termos da dinâmica da moagem sem ocorrência de instabilidade. Observa-se uma correção gradativa do blaine, em função da amostra do mesmo mediante a atuação na velocidade do separador.

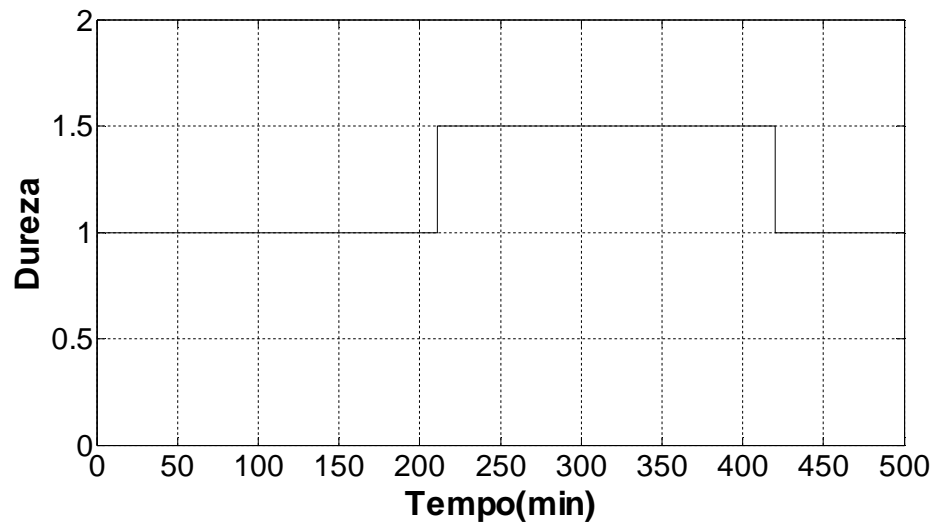
A terceira simulação considera o trabalho de Topalov (Topalov, 2004), onde existe uma RNA para efetuar o modelamento da moagem de cimento e um controlador adaptativo que controla a velocidade do separador e a taxa de alimentação de material novo objetivando maximizar a produção. Os resultados são apresentados e comparados com a metodologia adotada nesta dissertação.

5.2 Resultados da Simulação

5.2.1 Primeira Simulação

Na figura 38(a) verifica-se o aumento em degrau da dureza em $T= 211$ e o retorno ao valor inicial também em degrau em $T=240$ minutos.

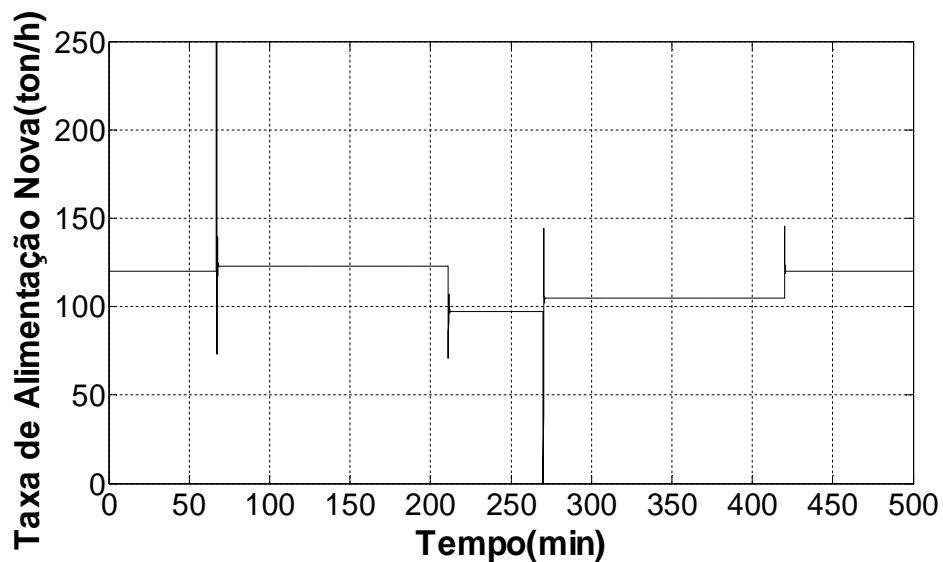
Figura 38(a) Dureza do material



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A taxa de alimentação nova deve variar de modo a compensar o efeito da dureza, conforme mostrado na figura 38(b):

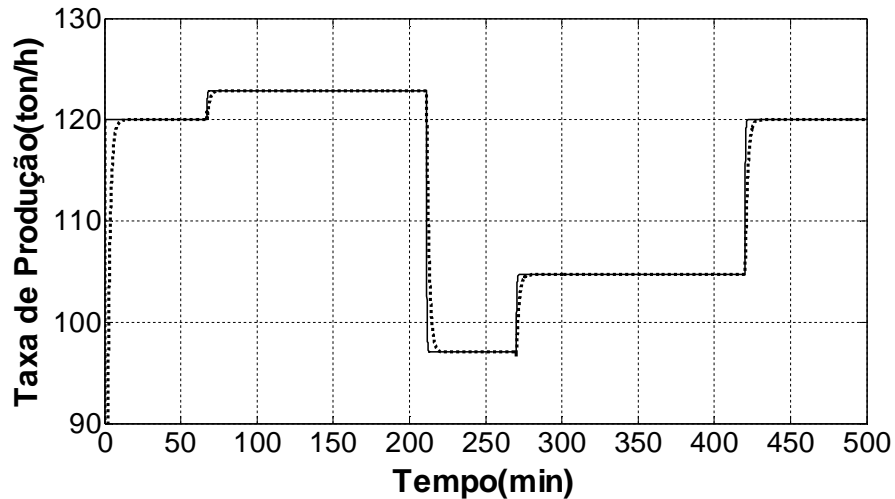
Figura 38(b) Taxa de alimentação nova



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

O aumento no set point de enchimento do moinho causa uma aumento na produção devido ao aumento de alimentação nova. O aumento na dureza do material faz com que a produção decresça, já que se necessita maior trabalho de moagem.

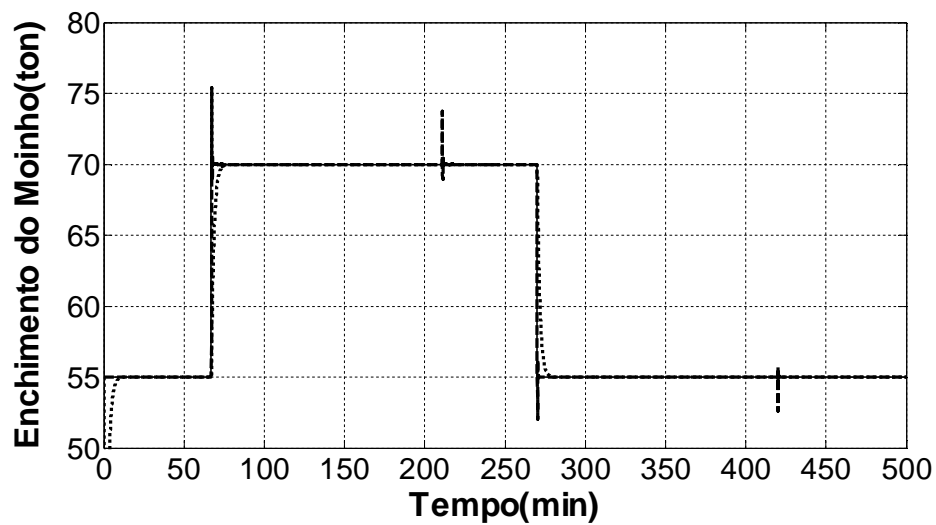
**Figura 38(c) Taxa de produção – linha contínua
Predição da produção - linha tracejada**



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

O set point do enchimento do moinho teve aumento em degrau em $T=67$ min e o retorno ao valor inicial também em degrau em $T=270$ minutos. A resposta do sistema (linha tracejada) mostra que o controlador responde bem tanto para a perturbação de *set point* como para a perturbação de dureza do material, como pode ser observado na figura 38(d).

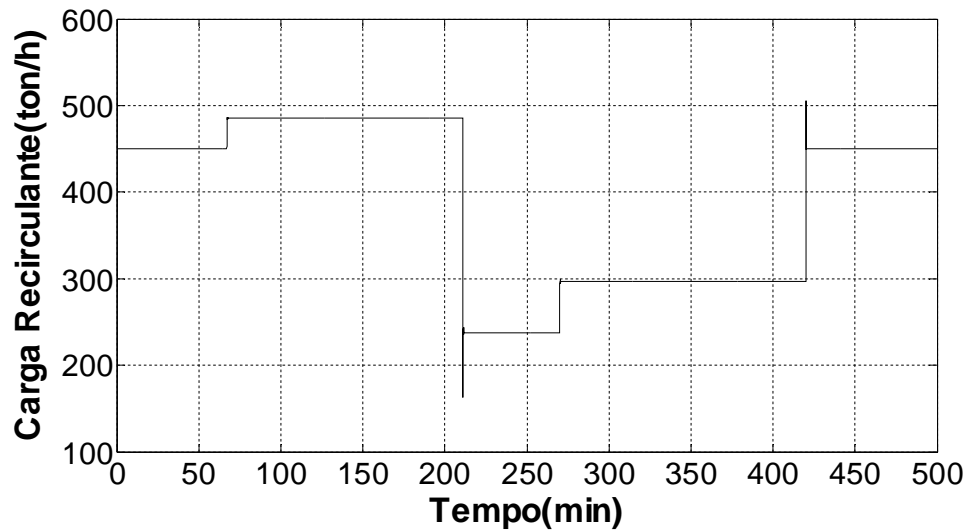
Figura 38(d) Set-point enchimento moinho - linha contínua, Enchimento do moinho - linha tracejada, Predição enchimento do moinho - linha pontilhada



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A carga circulante aumenta quando o set point de enchimento do moinho aumenta e reduz quando a dureza de material aumenta, conforme mostrado a figura 38(e):

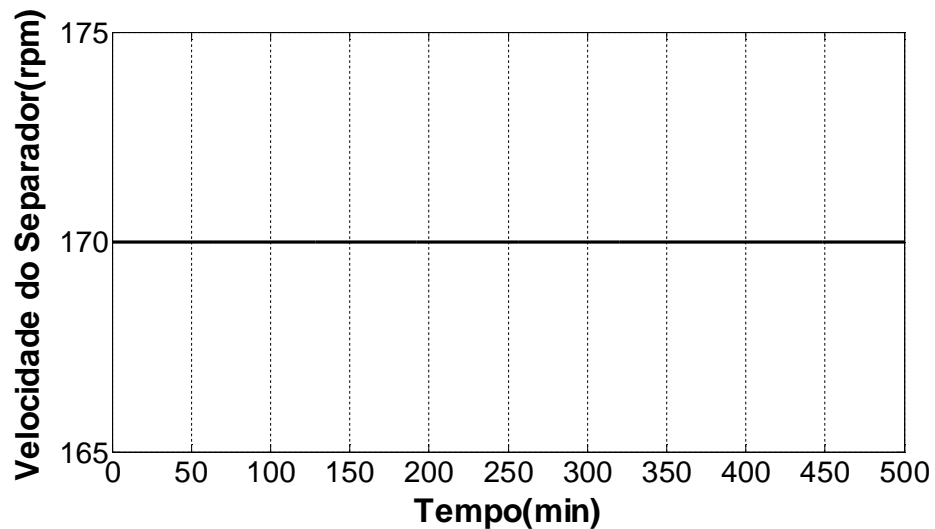
Figura 38 (e)Carga circulante



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A velocidade do separador, apresentada na figura 38(f), ficou inalterada (controle de Blaine desligado).

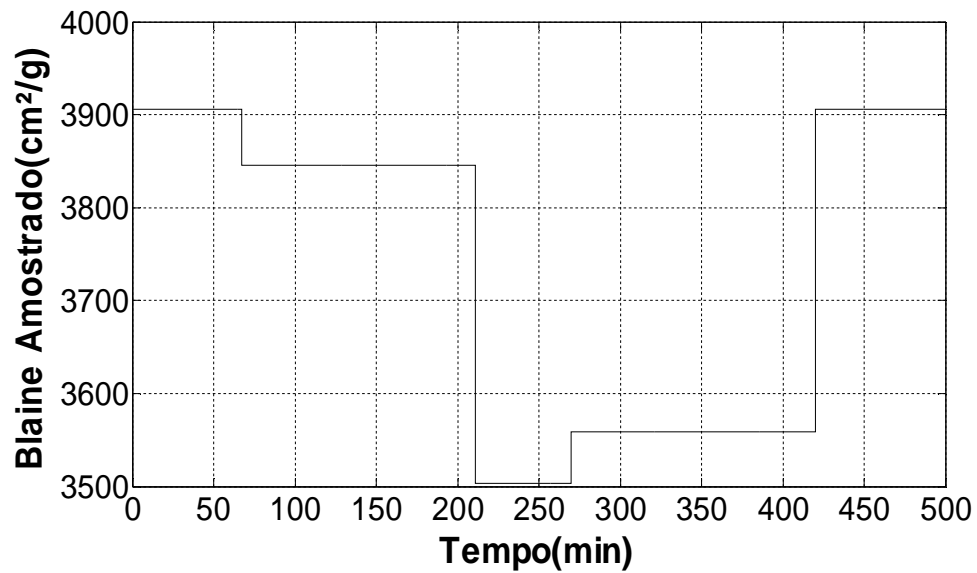
Figura 38 (f) Velocidade do separador



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

O Blaine amostrado variou enormemente dada a ausencia de controle do mesmo durante o disturbio como pode ser observado na figura 38(g) e 38(h).O valor do blaine oscilou em função da resposta do circuito de moagem às perturbações ocorridas.

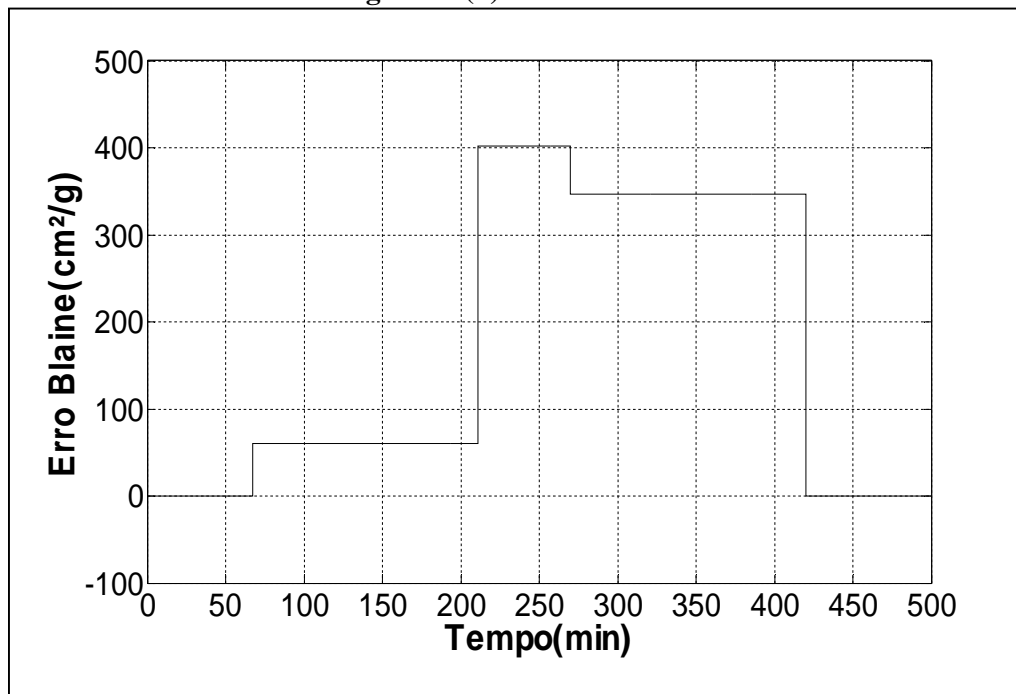
Figura 38(g) Blaine amostrador



Fonte:

Elaborada pelo autor - 2013

Figura 38(h) Erro do Blaine



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

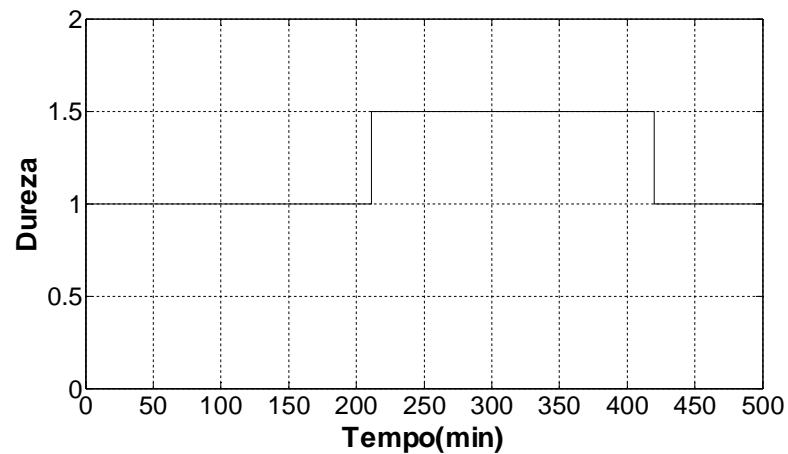
Adicionalmente as mudanças não causam instabilidade no circuito de moagem.

5.2.2 Segunda Simulação

A segunda simulação considera que o controlador de blaine está ligado e é mostrada nas figuras 39(a) a (h). As respostas correspondem ao esperado em termos da dinâmica da moagem sem ocorrência de instabilidade. Observa-se uma correção gradativa do blaine, em função da amostra do mesmo mediante a atuação na velocidade do separador.

Na figura 39(a) verifica-se o aumento em degrau da dureza em $T= 211$ e o retorno ao valor inicial também em degrau em $T=240$ minutos.

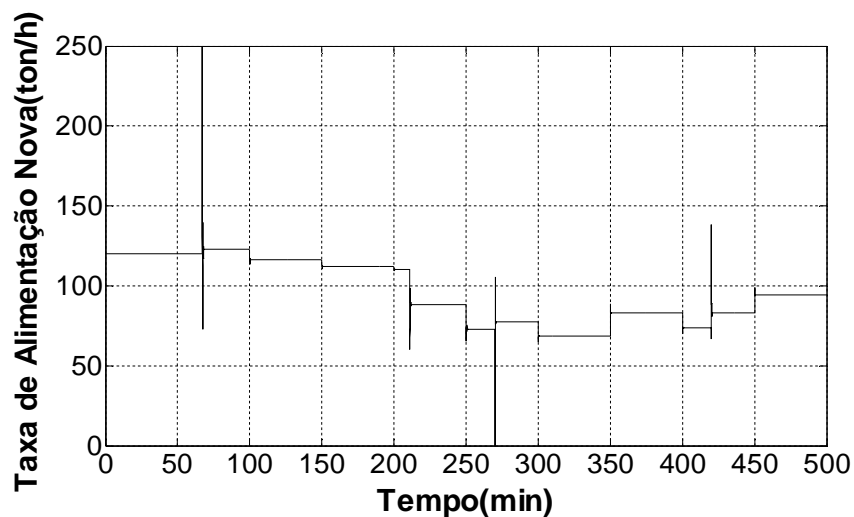
Figura 39(a) Dureza do material



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A taxa de alimentação nova varia mais rápido em função do efeito de compensação do controlador de blaine conforme mostrado na figura 37(b).

Figura 39(b) Taxa de alimentação nova – Elaborada pelo autor

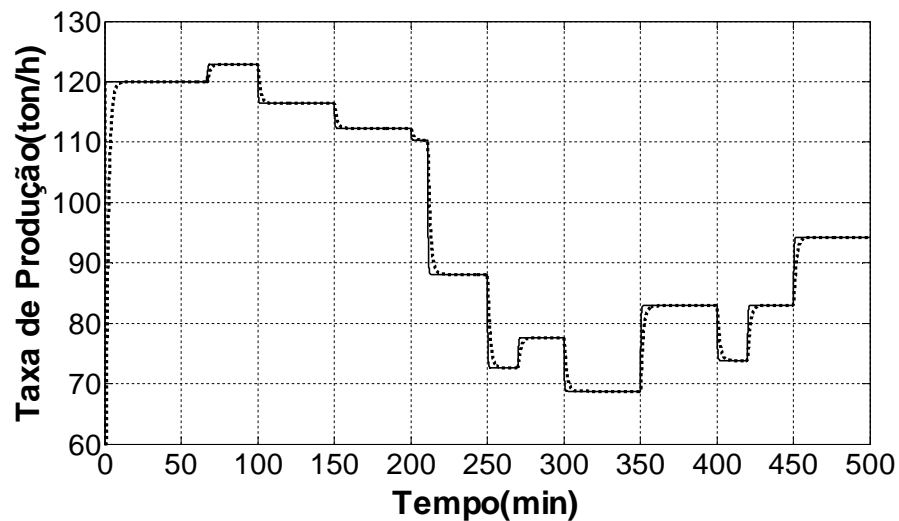


Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

O aumento na dureza do material faz com que a produção oscile mais e a média é menor que no caso anterior conforme verificado na figura 39(c). Tal ocorrência é necessária para manter a granulometria dentro de faixas aceitáveis.

Figura 39(c) Taxa de produção – linha contínua

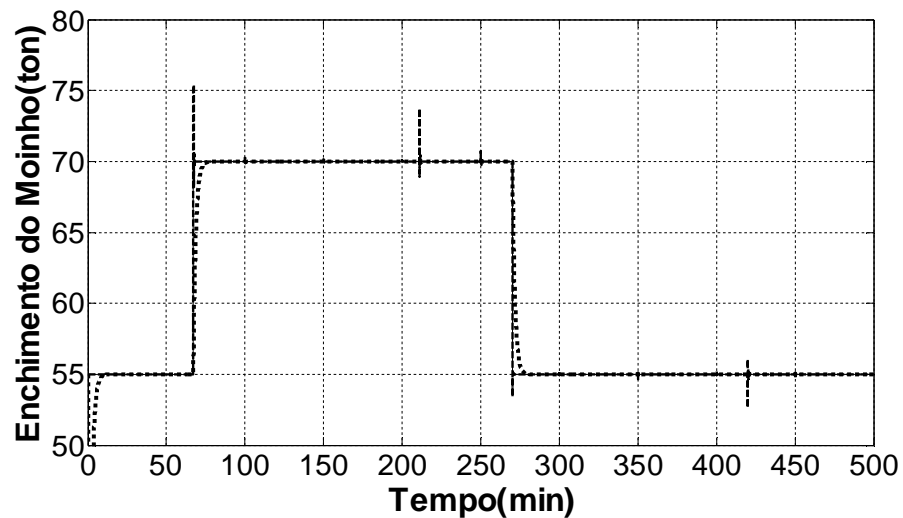
Predição da produção - linha tracejada



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Tendo em vista o aumento da carga circulante, apresentado na figura 37(e), o enchimento do moinho tende a aumentar, da mesma forma que no caso anterior, como observado na figura 39(d).

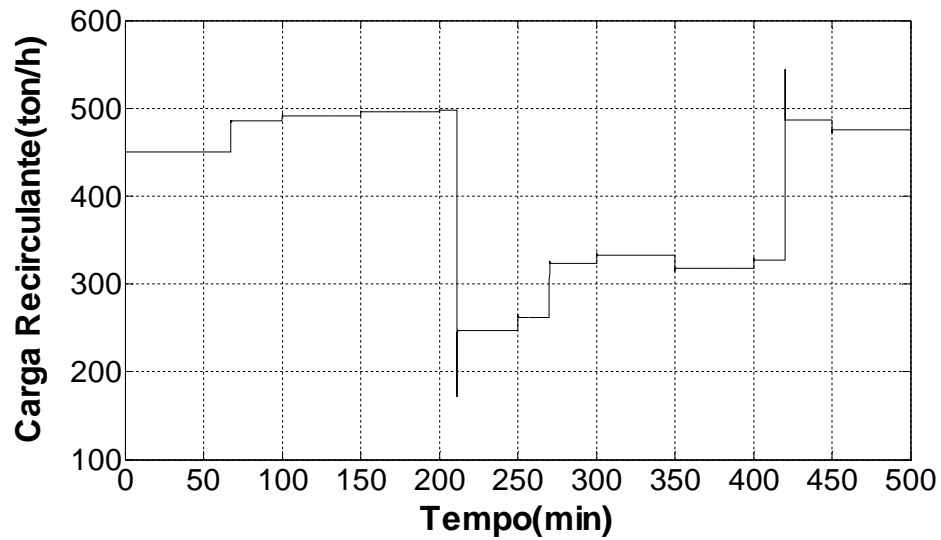
Figura 39(d) Set-point enchimento moinho - linha contínua, Enchimento do moinho - linha tracejada, Predição enchimento do moinho - linha pontilhada



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A carga circulante deve variar de modo a compensar o efeito da dureza, porem oscila mais que no caso anterior, conforme mostrado na figura 39(e):

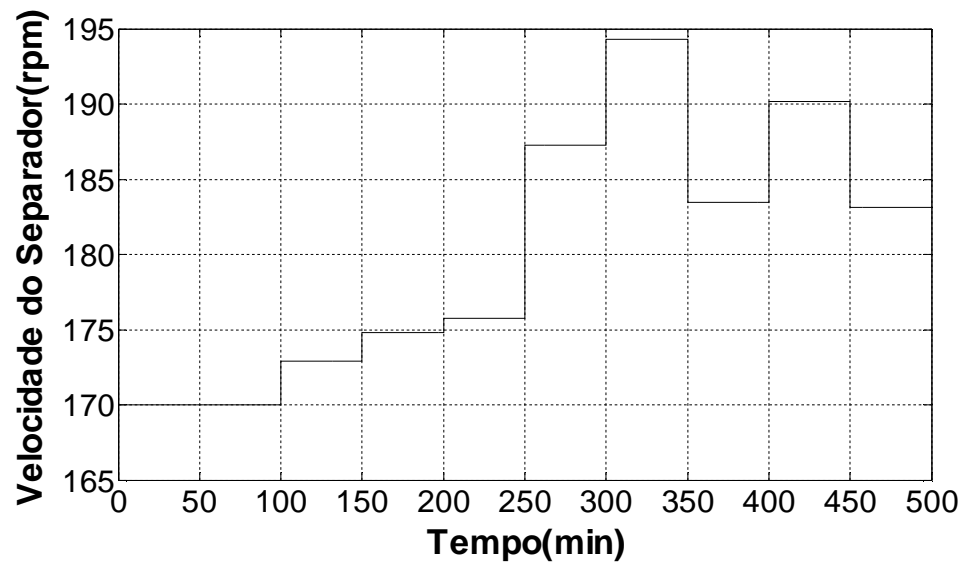
Figura 39(e) Carga circulante



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A velocidade do separador foi alterada sobremaneira de modo a evitar-se oscilações na granulometria (Blaine), como pode ser visto na figura 39(f).

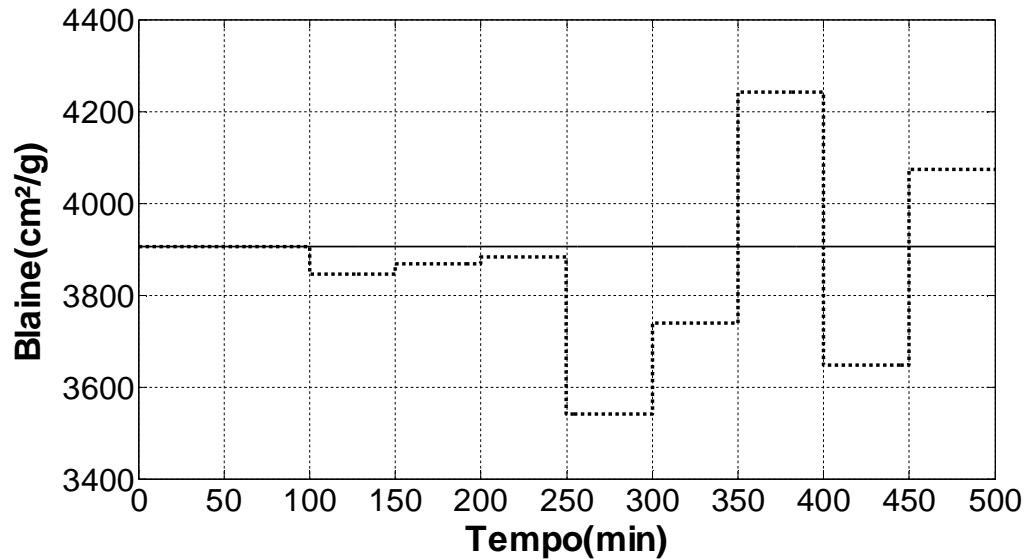
Figura 39(f) Velocidade do separador – Elaborada pelo autor



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

O Blaine apresentou oscilações bem mais reduzida graças à ação de controle do controlador fuzzy, como pode ser observado nas figuras 39(g) e (h).

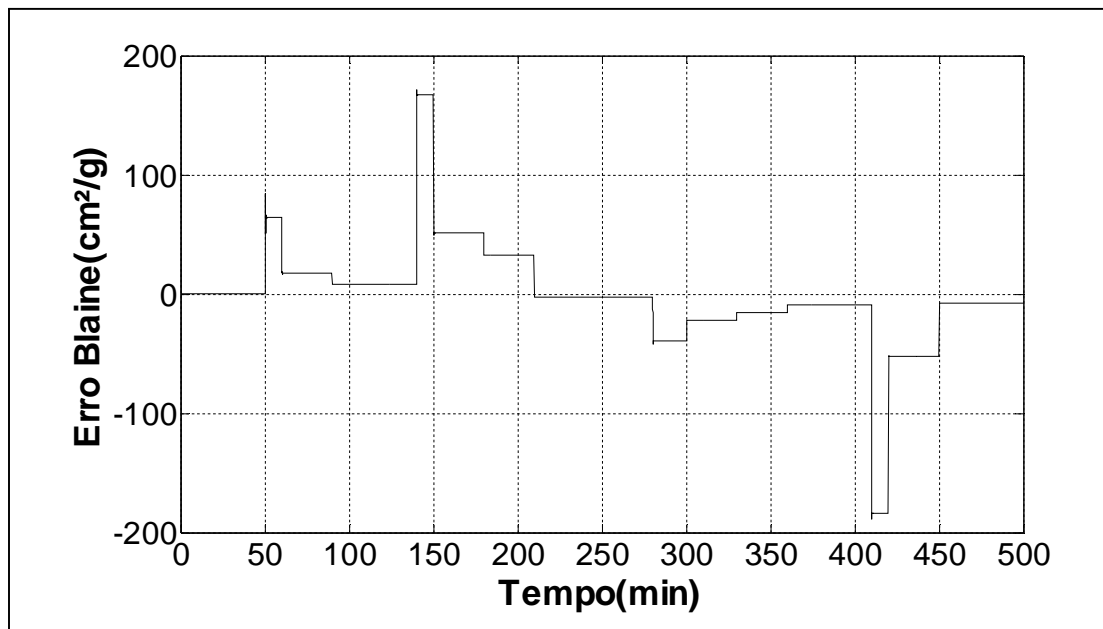
Figura 39(g) Blaine amostrado



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A figura 39(h) mostra o erro de blaine no cimento produzido.

Figura 39(h) Erro de blaine na produção



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

5.2.3 Terceira Simulação

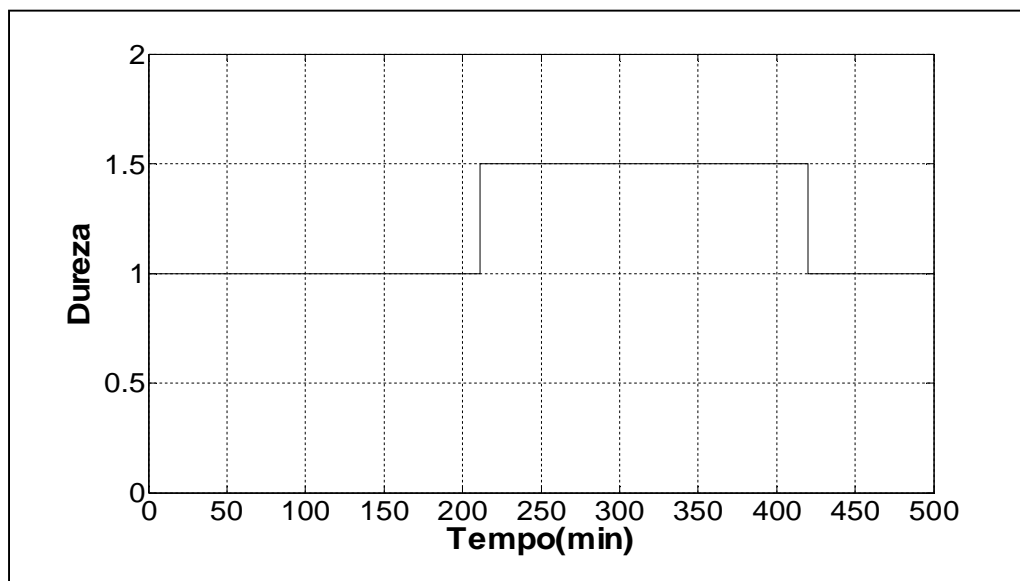
A terceira simulação considera que não existe o controle de blaine e a estrutura é aquela sugerida por Topalov (Topalov, 2004). O resultado é mostrado nas figuras 40(a) a (h).

As respostas correspondem ao esperado em termos da dinâmica da moagem sem ocorrência de instabilidade.

Comparando-se esta solução com a proposta neste trabalho observa-se uma resposta melhor no que tange à produção porém com um custo elevado em termos de erros de Blaine, o que do ponto de vista de qualidade é comprometedor.

Na figura 40(a) verifica-se o aumento em degrau da dureza em $T=211$ e o retorno ao valor inicial também em degrau em $T=240$ minutos.

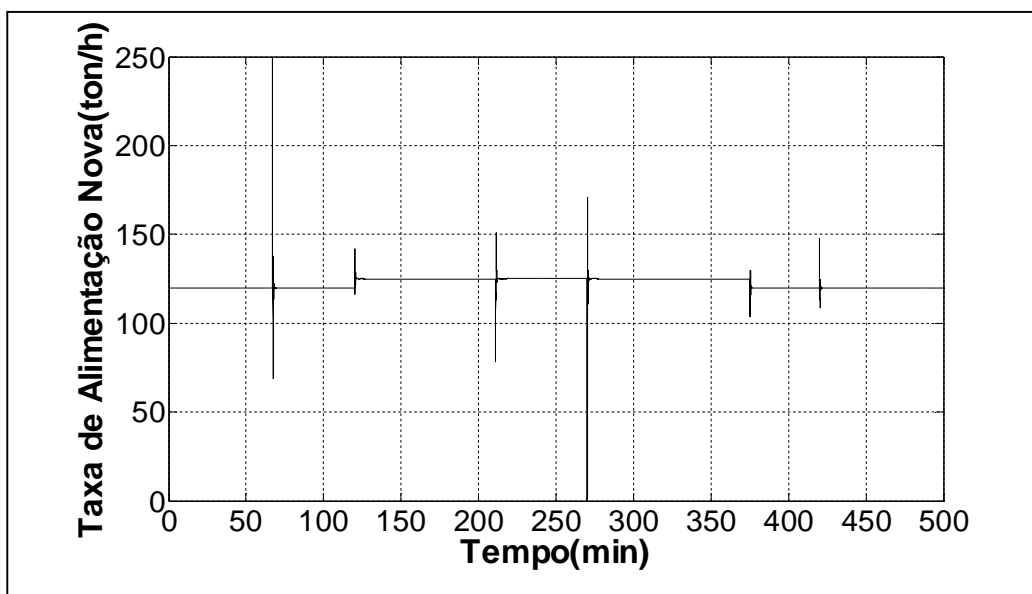
Figura 40(a) Dureza do material



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A taxa de alimentação nova responde às perturbações introduzidas (com o objetivo de maximizar a produção somente) conforme mostrado na figura 40(b).

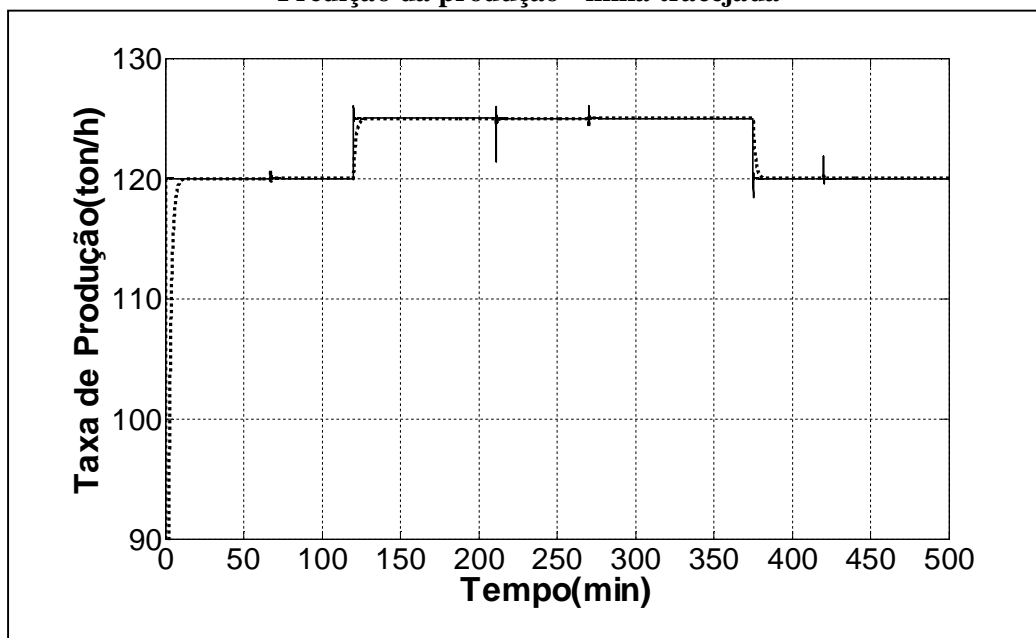
Figura 40(b) Taxa de alimentação nova



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A taxa de produção se mostra a maior de todas as simulações conforme verificado na figura 40(c).

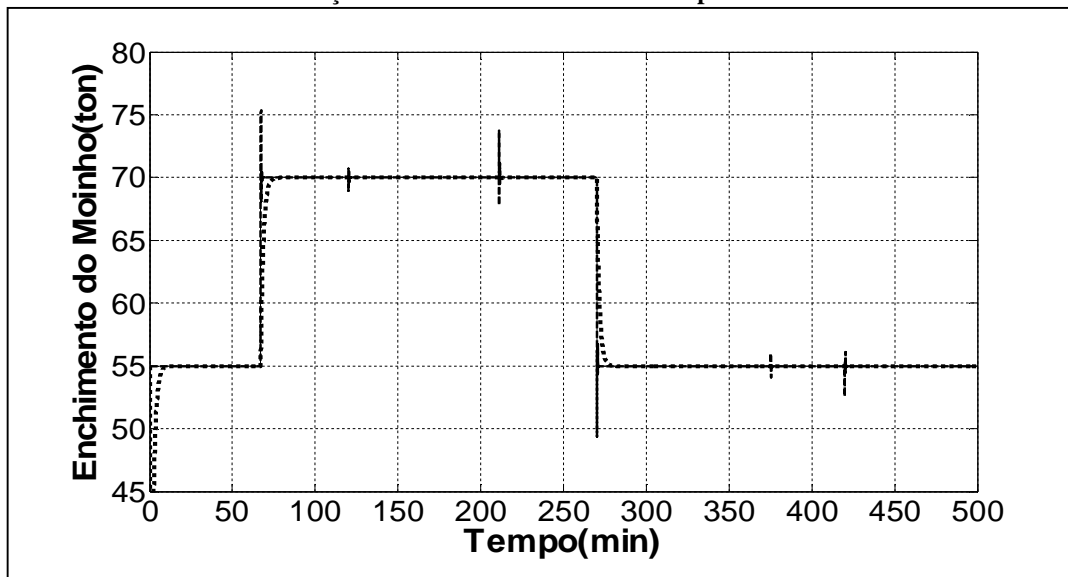
**Figura 40(c) Taxa de produção – linha contínua
Predição da produção - linha tracejada**



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Tendo em vista o aumento da carga circulante, apresentado na figura 5.3(e), o enchimento do moinho tende a aumentar, da mesma forma que nos casos anteriores, como observado na figura 40(d).

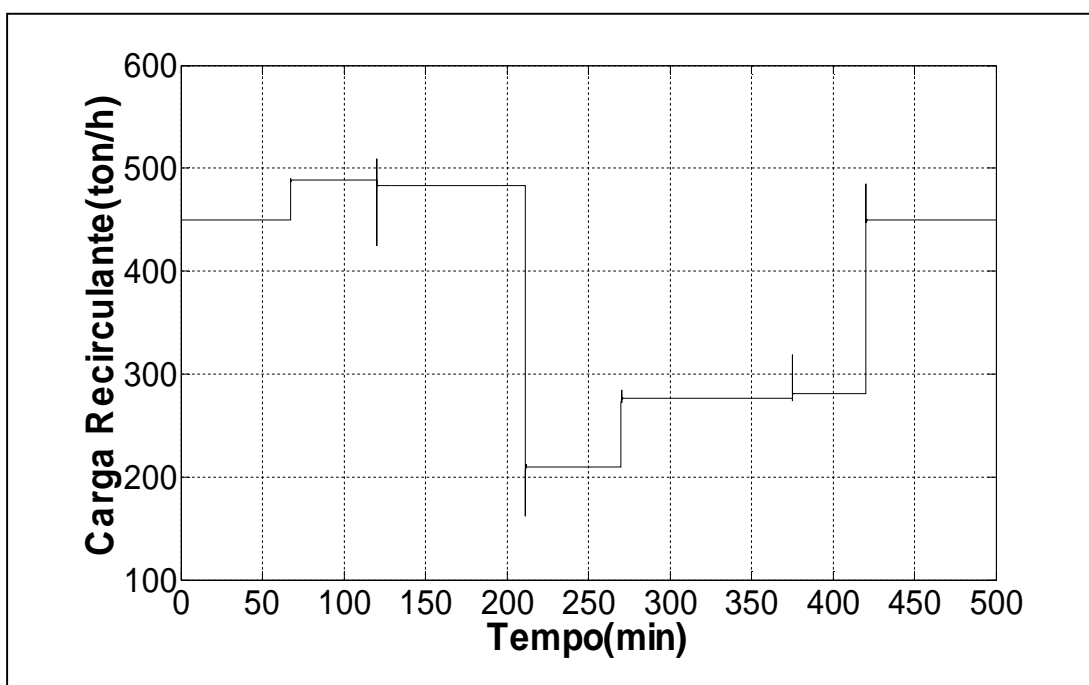
Figura 40(d) Set-point enchimento moinho - linha contínua, Enchimento do moinho - linha tracejada, Predição enchimento do moinho - linha pontilhada



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A carga circulante deve variar de modo a compensar o efeito da dureza, porem oscila mais que nos casos anteriores, conforme mostrado na figura 40(e):

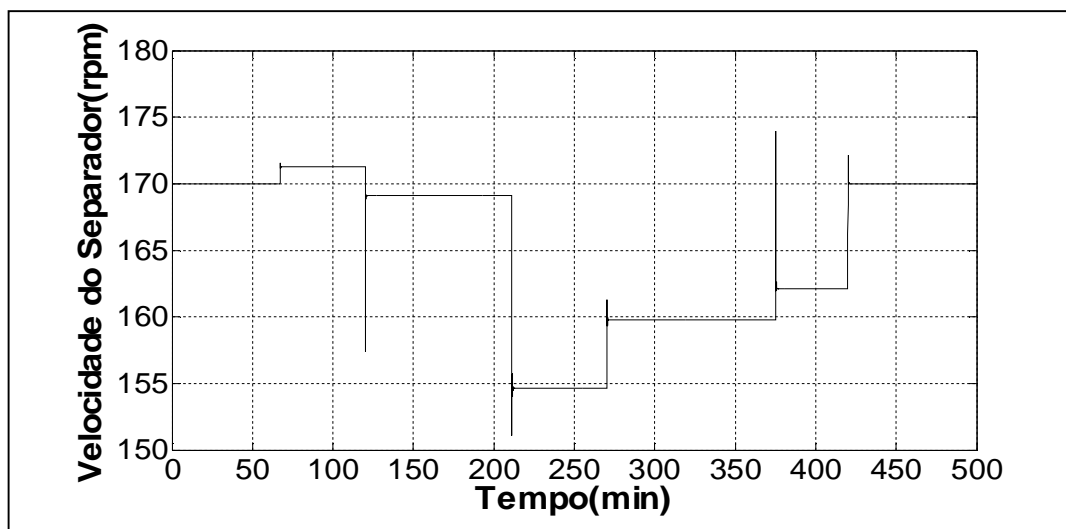
Figura 40(e) Carga circulante



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

A velocidade do separador foi alterada de maneira muito pronunciada de modo a evitar-se oscilações na produção, como pode ser visto na figura 40(f).

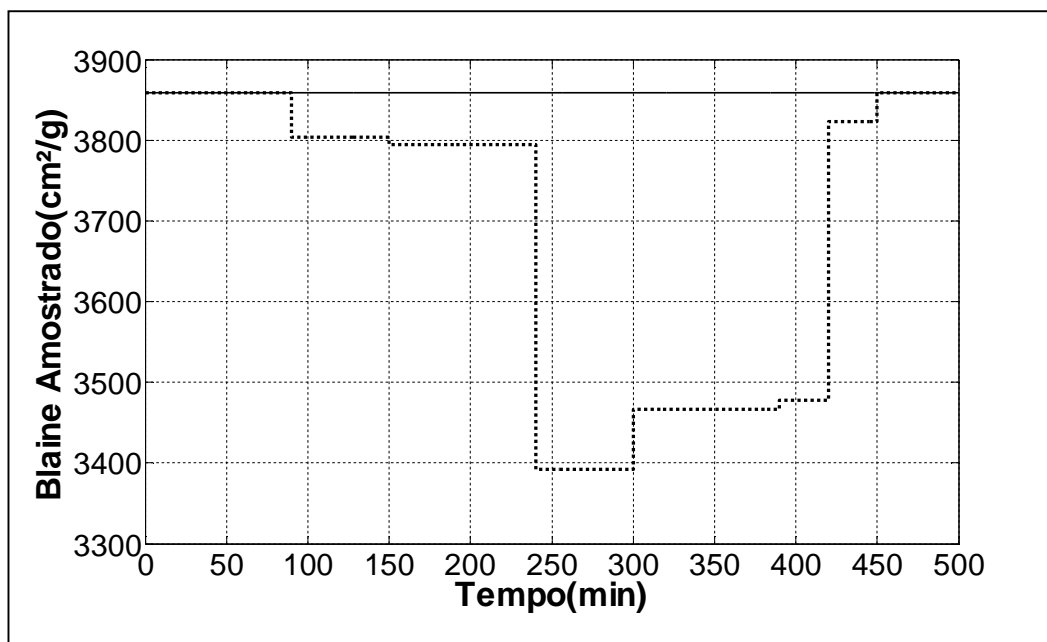
Figura 40(f) Velocidade do separador



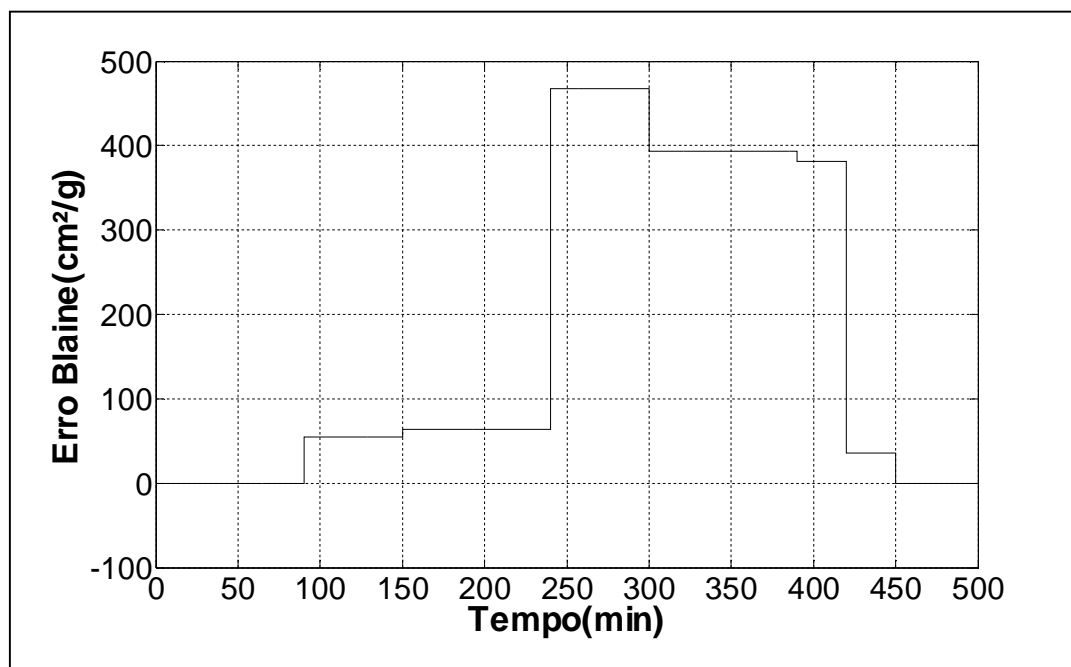
Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

O Blaine apresentou oscilações extremamente elevadas, devido à ausência de um controle desta variável, como pode ser observado nas figuras 40(g) e (h).

Figura 40(g) Blaine amostrado



Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

Figura 40(h) Erro de blaine na produção

Fonte: Elaborada pelo autor - 2013

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões do Trabalho

Foi efetuada uma nova proposição para controle *neurofuzzy* de uma moagem de cimento. Esta proposição apresenta como vantagens:

- Não necessita de modelo da planta em avanço, pois a Rede Neural apresenta boas características de aprendizado online. Isto permite lidar com as incertezas existentes em uma modelagem convencional e também com a mudança de parâmetros (por exemplo, desgaste de corpos moedores).
- A abordagem de controle de blaine permite tratar de forma otimizada a qualidade do produto final (blaine) evitando-se a sobre moagem, acarretando então uma redução do consumo de energia específico da moagem, mantendo-se a carga máxima possível no moinho.
- O grau de robustez demonstrado pelo sistema garante a estabilidade do controle evitando-se a ocorrência do enchimento extremo do moinho (embuchamento).
- A adoção de realimentação do valor real do blaine por amostragem permite a utilização deste sistema na maior parte das moagens existentes, pois é incomum a existência de medidores online para esta variável.

6.2 Proposição para trabalhos futuros

As pesquisas futuras, que estão diretamente relacionadas à esta linha de trabalho, podem ser associadas com as seguintes direções:

- Desenvolvimento de procedimentos para a alimentação da base de conhecimento com regras específicas para correção de receita de mistura com base em análise de laboratório;
- Implantação e ajustes em uma moagem real, removendo o simulador e efetuando interface com o sistema de controle e supervisão da mesma.

Além disto, o presente trabalho tem aplicação a processos similares possibilitando sua adaptação para :

- Moagens de cimento com moinhos verticais bem como moagem de cru, o que ampliaria o escopo de trabalho em processos cimenteiros;
- Moagens em processos minerais onde a cominuição se processa junto com água e a separação é feita por hidrociclones.

REFERÊNCIAS

- ALSOP, P. A. **Cement plant operations handbook: for dry process plants**. Trade ship Publications Limited, Hung Chen, Herman H Tseng, 2007.
- AUSTIN, L. G.; LUCKEI, P. T.; WIGHTMAN, D. Steady state simulation of a cement milling circuit. **International Journal of Mineral Processing**.v. 2, p. 127-150, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico Sobre cimento**. disponível em <http://www.abcp.org.br/conteudo>. Acessado em 12/11/2012.
- BHATTY, J.; MILLER, F.; KOSMATKA, S. Innovation in Portland cement manufacturing. **SP400**. Portland Cement Association, Skokie, II, 2004.
- BENZER, H.; ERGUM, L.; ONER, M.; LYNCH, A. J. Simulation of open circuit clinker grinding. **Minerals Engineering**. v. 14, n. 7, p. 701-710, 2001.
- BERREDO, R.C.; CANHA, L.N.; EKEL, P.Ya.; FERREIRA, L.C.A.; MACIEL, M.V.C. Experimental design and models of power system optimization and control. **WSEAS Transactions on Systems and Control**, v. 3, n. 1, p. 40-49, 2008.
- BOULVIN, M.; RENOTTE, C.; WOUVER, A. Modeling and control of cement grinding process. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 11, n. 5, 2003.
- BOULVIN, M.; RENOTTE, C.; WOULVER, A.; REMY, M.; TARASIEWICZ, S.; CESARr, P. Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process. **Proceedings of European Control Conference, Brussels, Belgium, Paper TH-E-H4**, 1997.
- BRAGA, Antonio de Pádua, CARVALHO, A. P.L., LUDERMIR, T.B. **Redes Neurais Artificiais – Teoria e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2000.
- BREUGESSEN, L. Von ; CHEN, L.; BASTIN, V.; WERTZ, V.;WERBROUK C. de Piemont. An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit. **IEEE Trans. Ind. Appl.**,V. 32, p 670– 677,1996.
- BREUGESSEN, L. Von.;CHEN, L.;BASTIN, V.; WERTZ, V.;WERBROUK, C. de Piemont. Multivariable linear quadratic control of a cement mill: an industrial application. **Contr. Eng. Practice**2, p. 605 -611, 1994.
- CARVALHO, R. M.; TAVARES, L. M. M.; SOUZA, M. B.; LIMA, E. L. Simulação e controle de um circuito de moagem de cimento. **Anais do IX Encontro de Modelagem Computacional** , Belo Horizonte, 2006.
- CIGANEK,C.; KREYSA,K. Two parameter control systems for a cement grinding process. **Tradução Zement – Kelk – Gips**, p. 202 – 206, 1991.
- EFE, M. O.. Multivariable nonlinear model reference control of cement mills. **Transactions of Institute of Measurements and Control**, vol. 25, n. 5, p. 373 – 385, 2003.

- EKEL, P.Ya.. Methods of decision making in fuzzy environment and their applications. **Nonlinear Analysis, Theory, Methods & Applications**, n. 47, p. 979-990, 2001.
- EKEL, P.Ya. e ALVES, Leopoldo. Controle NeuroFuzzy para Moagem de Cimento. **Anais do XVI Congresso Internacional e Exposição Sul Americana de Automação Sistemas e Instrumentação**, São Paulo, Paper 90, 2012.
- EKEL,P.Ya.. Fuzzy sets and models of decision making. **International Journal of Computers and Mathematics with Applications**, n. 44,p. 863-875,2002.
- FANG, X.; SHEN, T. The negative pressure control of Ball Mill Based on T-S Fuzzy. **Model.Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics**, Shenyang, China, 2009.
- JADOT,F; BASTIN, G; WERTZ, V.; MAGNI,L. Global State Feedback Stabilization of Cement Mills. **Proceedings to the 37th IEEE Conference on Decision and Control**, 1998.
- JANKOVIC, Alex; VALERY, Walter; DAVIS, Eugene. Cement Grinding Optimization. **Minerals Engineering** , n. 17, p. 1075 – 1081, 2004.
- KING, R. P. **Modeling and simulation of Mineral Processing Systems**. Butterworth – Heinemann; 2001.
- LIU, Yi, SPENCER, Steven. Dynamic simulation of grinding circuits. **Minerals Engineering**, n. 17, p. 1189 – 1198, 2004.
- LU, Y. Z.. **Industrial Intelligent Control – Fundamentals and Applications**. John Wiley & Sons Ltd. 1996.
- LYNCH, A. J. **Mineral Crushing and Grinding Circuits, their simulation, optimization, design and control**. Elsevier, 1997.
- MAGNI, L.; BASTIN, G.; WERTZ, V. Multivariable predictive control of cement mills. **IEEE International Conference on Control Applications**, p. 48 – 50, 1997.
- MAGNI, L.; BASTIN, G.; WERTZ, V.. **Multivariable nonlinear predictive control of cement mills. IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.**, No 7, p. 502-508, 1997.
- MARTIN, G.; MCGAREL,S.. Nonlinear mill control. **ISA Transactions**, n 40, p. 369-379, 2001.
- MEJEOUMOV, Gelb Gennadieivich. **Improved Cement Quality and Grinding Efficiency by means of closed mill circuit modeling**. Doctor of Philosophy dissertation presented at Texas A&M University, 2007.
- PRASATH, G.; RECKE, B.; CHIDAMBARAM, M.. Application of Soft Constrained MPC to a Cement Mill Circuit. **Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems**, Leuven, Belgium, 2010.
- SHAW, Ian S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 3. Ed. São Paulo: Edgard Blucher ,1999.

SOUZA, V. C. G.. **Modelagem Matemática e Simulação do Circuito de Moagem de Cimento**. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2002.

TAVARES, L.M.M.; CUNHA, E. R.; ALMEIDA, S. L.. Influência de Variáveis operacionais no desempenho de classificador aerodinâmico. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, n. 60, p. 497-503, 2007.

TOPALOV, A. V.; KAYNAK, O. Neural Network modeling and control of cement mills using variable structure system theory based on line learning mechanism. **Journal of Process Control**, n. 14, p. 581-589, 2003.

TOPALOV, A. V.; KAUYNAC, O. Neural Adaptive modeling and control of cement a cement mill using sliding mode learning mechanism, **IIE Journal on SMC**, v.31, n3, 2004.

ZHANG, Y and NAPIER – MUMNN, T. Effects of Particle size distribution, surface area and chemical composition on Portland cement strength. **Powder Technology**, n. 83, p. 245-252, 1995.

ZIMMERMANN, H.J. **Fuzzy Set Theory and Its Application**. Kluwer Academic Publish

ANEXOS

1 Simulador da Moagem

```
function [dz,dyr,dyf,fi_zd] = Moagem(v,d,u,z,yr,yf)
m=0.8;
n=4;
Tf=0.3;
Tr=0.01;
fi_zd=max(0,((-d*0.1116*(z^2))+(16.5*z)));
K_alfa=(570^m)*(170^n)*((570/450)-1);
alfa_zdv=((fi_zd^m)*(v^n))/(K_alfa+((fi_zd^m)*(v^n)));

dz=-fi_zd+u+yr;
dyf=(-yf+(1-alfa_zdv)*fi_zd)/Tf;
dyr=(-yr+(alfa_zdv*fi_zd))/Tr;
```

2 Amostrador de Blaine

```
function [BS,BB] = BA(TS,BL,ini,BO)
it=6:6:96;
tam=length(it);
fori=1:tam,
if(TS==it(i))
    BS=BL;
    BB=BL;
break;
else
    BS=BO;
    BB=BO;
end
end
```

3 Cálculo do Valor aproximado do Blaine do Cimento

```

function [Blaine_out,B0] =
Quebra(F,v,d,dz,xm,F00,PG1,DG1,PG08,DG08,PG12,DG12)
% Modelo de Cadeia de Markov de um Moinho em Circuito Fechado
PG=zeros(41,41);
DG=zeros(41,41);
% Carrega a matriz de acordo com a dureza
if(d==1)
    PG=PG1;
    DG=DG1;
end
if(d==0.8)
    PG=PG08;
    DG=DG08;
end
if(d==1.2)
    PG=PG12;
    DG=DG12;
end
%Peneira
x_exp=F(:,1)'; %Peneiras Experimentais
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Variação do perfil de separação de acordo com a velocidade
x50=90.42-(0.342*v); % (minimo:v-150) (maximo:v-230)
Fie=0.01*Separador(F,x50);% Curva do Grau de Eficiência(CGE) do
separador
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Dimensionando os valores CGE com os valores das peneiras
experimentais

Fie=[Fie(1) Fie]; % Um ponto extra à esquerda com o mesmo valor do
primeiro ponto Fie(1)
% Abscissa de CGE se estende para fora da primeira peneira
computacional (para a esquerda)
xe_or=[0.001 x_exp]; % Usando peneiras experimentais
nefi=length(xe_or); % Número de peneiras experimentais para o CGE
% PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO
B3_B0=0.0075; % Alvo de erro no cálculo da diferença entre B3 e B0
x50_e=32.96; %Tamanho de corte experimental(x50) pela interpolação de
CGE
B0=dz; % (minimo:40*v-4000) (minimo:45*v-3900)
% Parâmetros da grade da peneira computacional 'xm'
nm=41; % Número de peneiras computacionais,(nm+1) dá a maior peneira
% Parâmetros da matriz de Moagem
BpitR=53.655; % Tempo de referência no índice de potência da matriz
de Moagem; unidades do fluxo de alimentação

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Deslocando a curva CGE, usando diferentes tamanhos de corte, x50
% CGE do separador Fie na grade de peneiras computacionais - Fi
Fi=zeros(nm,1); % Zerando novamente o vetor CGE, definido pelas
matrizes computacionais
xe=xe_or*x50/x50_e; % Normalização do tamanho de corte experimental,
x50_e, e transição para um novo tamanho de corte definido por x50
for i=1:nm % Ciclo para as peneiras computacionais
for j=1:nefi-1 % Ciclo para as peneiras experimentais CGE
ifxm(i)<=xe(j+1)

```

```

ifxm(i)>=xe(j)
Fi(i)=Fie(j)+(Fie(j+1)-Fie(j))*(xm(i)-xe(j))/(xe(j+1)-xe(j));
end
end
ifxm(i)>xe(nefi) % Peneiras computacionais acima das peneiras
experimentais
Fi(i)=0; % Probabilidade de pedras grandes se tornarem produto fino =
0%
end
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Matriz de Classificação
C2=zeros(nm,nm);
for i=1:nm
for j=1:nm
C2(i,j)=0;
if i==j; C2(i,j)=Fi(i); end% Diagonal da matriz CGE
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% Cálculos principais
% Na primeira iteração, com o moinho vazio
f0=(B0*F00); % Distribuição diferencial do tamanho de partículas da
alimentação nova no circuito [ton]
B1=B0; %(u)Fluxo de alimentação no moinho vazio; posteriormente -
vazão
istop=0; % Contador de iterações
I=eye(nm);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
f2=PG(:,1);
f3=PG(:,1);
fpit=PG(:,1);
Blc=PG(2,1);
B3c=PG(2,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
while (abs(abs(B3c)-B0)/B0) > B3_B0
ifistop> 200; break; end; % 200 iterações no máximo
if(istop==0)
f1=(PG*(DG.^(BpitR/B1))/PG)*f0; %Ação de Moagem; BpitR/B1 = Relação
do tempo de residência da alimentação
else
f1=(PG*(DG.^(BpitR/Blc))/PG)*fpit; % Ação de Moagem; BpitR/B1 =
Relação do tempo de residência da alimentação
end
end
% Vazão de referência sobre a vazão atual = Tempo atual sobre o tempo
de referência
f3=C2*f1; % Classificação; Finos PSD [ton]
f2=(I-C2)*f1; % Classification; Recirculação PSD [ton]
fpit=f0+f2; % Entrada nova para o moinho PSD [ton]
Blc=sum(fpit);
B3c=sum(f3);
istop=istop+1; % Contador
end
rho=3054.9; % Densidade do cimento para o cálculo do Blaine, [kg/m^3]
% Valor do Blaine usando o PSD do produtos de Finos
Blaine=0;

```

```

fori=1:nm,
Blaine=Blaine+6*abs(f3(i))*log(xm(i+1)/xm(i))/(abs(B3c)*rho*(xm(i+1)-
xm(i))*1e-6);% [m^2/kg] = [ton] /([ton]*[kg/m^3]*[m]*?m-to-m)
end
Blaine_out=Blaine*10; %conversão para cm2/kg
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
function [S] = Separador(F,d50c)
D=F(:,1);
C=0.7;
Cs=C*100;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
x=D./d50c;
% PARTE 1: Escolha dos valores dos parâmetros
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Parâmetro alfa =A(1)
%comanda os grosseiros (aumentar alfa significa trazer a curva mais
para %a esquerda (torná-la mais perpendicular ao eixo x)
A=2.0;
%Parâmetro beta =B(i)
%comanda os finos e acomoda o efeito de fishhook
%comanda pico para baixo (diminuindo) ou para cima (aumentando)
B=1.25;
%Parâmetro beta asterisco =Ba(j)
% comanda pico para esquerda ou direita
% aumentar ba significa trazer a curva mais para a esquerda
% tb comanda pico para baixo ou para cima
Ba=1.6;
%PARTE 2: Modelagem da curva de partição
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
S=(Cs.*((1+(B*Ba.*x))*(exp(A)-1))./(exp(A*Ba.*x)+exp(A)-2)))';

```

4 Controle de Variações

```

functionsaida_fuzzy = cvf(eBlaine,TD_eBlaine)
if((eBlaine-TD_eBlaine==0)|| (eBlaine==0))
disparar=0;
else
disparar=1;
end
if(disparar==0)
erro_saida=0;
else
erro_saida=eBlaine;
end
saida_fuzzy=erro_saida;

```

5 Atualização de Pesos da rede Neural

```

function [eu_k1,ev_k1,eiH,IW1,LW1,cf]=delta_W(e1,TD_e1,e2,TD_e2,e3,
e4,I,fH_xi,TD_eiH,IW,LW)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Alfa
alfa_1=5*(10^-4);
alfa_2=5*(10^-4);
beta= 5*(10^-4);
% Lambda
lambda_3=1;
lambda_4=1;
lambda_H=1;
%
W1=zeros(32,8);
W2=zeros(2,32);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SMC-Pesos de Saída
Syf=(e1-TD_e1)+lambda_3*e1;
if(Syf==0)
    SI_Syf=1;
else
    SI_Syf=Syf/abs(Syf);
end
Sz= (e2-TD_e2)+lambda_4*e2;
if(Sz==0)
    SI_Sz=1;
else
    SI_Sz=Sz/abs(Sz);
end

% Atualização dos Pesos de Saída
W2(1,:)=alfa_1*abs(e1)*SI_Syf*fH_xi;
W2(2,:)=alfa_2*abs(e2)*SI_Sz*fH_xi;
LW1=LW+W2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SMC- Pesos de Entrada
eiH=((1-fH_xi).*fH_xi).*((e1*LW(1,:))+(e2*LW(2,:)))';
SiH=(eiH-TD_eiH)+(lambda_H*eiH);
if(sum(SiH)==0)
    SI_SiH=ones(size(eiH));
else
    SI_SiH=SiH/abs(SiH);
end

% Atualização dos Pesos de Entrada
for i=1:32,
    W1(i,1:8)=(beta*abs(eiH(i)).*SI_SiH(i)).*I;
end
IW1=IW+W1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Delta K
dyf_du=sum(LW(1,:)).*(1-fH_xi).*fH_xi.*IW(:,1));
dyf_dv=sum(LW(1,:)).*(1-fH_xi).*fH_xi.*IW(:,3));
dz_du= sum(LW(2,:)).*(1-fH_xi).*fH_xi.*IW(:,1));
dz_dv= sum(LW(2,:)).*(1-fH_xi).*fH_xi.*IW(:,3));
eu_k1=(-(dyf_du*e3)-(dz_du*e4));
ev_k1=(-(dyf_dv*e3)-(dz_dv*e4));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Função de Custo
cf=((e3^2)+(e4^2))/2;

```

6 Atualização Parâmetros do Controlador Adaptativo

```

function [Ku1,Ku2,Ku3,Eu,Kv1,Kv2,Kv3,Ev]=delta_K(u,eu,TD_Eu,Ku,hu,v,
ev,TD_Ev,Kv,hv)
% Delta W
% Alfa
alfa_3=8*(10^-4);
alfa_4=8*(10^-3);
% Lambda
lambda_1=1;
lambda_2=1;
%
ho=5*(10^-2);
% SMC
Ev=ev+(ho*v);
Eu=eu+(ho*u);
dEv=Ev-TD_Ev;
dEu=Eu-TD_Eu;
Sv=dEv+(lambda_1*Ev);
if(Sv==0)
    SI_Sv=1;
else
    SI_Sv=Sv/abs(Sv);
end
Su=dEu+(lambda_2*Eu);
if(Su==0)
    SI_Su=1;
else
    SI_Su=Su/abs(Su);
end

% Atualização dos Parâmetros do controlador
Ku1=Ku(1)+(alfa_4*abs(Eu)*hu(1)*SI_Su);
Ku2=Ku(2)+(alfa_4*abs(Eu)*hu(2)*SI_Su);
Ku3=Ku(3)+(alfa_4*abs(Eu)*hu(3)*SI_Su);

```

7 Implementação do Processamento da Primeira Camada da Rede Neural

```
function a1 = first_layer(p1,iw)
    a1=logsigw(iw*p1);
```

```
function x=logsigw(x)
    x=1./(1+exp(-x));
```

8 Implementação do Processamento da Segunda Camada da Rede Neural

```
function a2 = second_layer(p2,lw)
    a2=(lw*p2);
```

