

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

Luís Caldas

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO PARA LAMINAÇÃO
A FRIO BASEADO EM SISTEMA INTELIGENTE COM CANCELAMENTO DAS
PERTURBAÇÕES POR FILTRO INVERSO.**

**São Bernardo do Campo
2010**

Luís Caldas

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO PARA LAMINAÇÃO
A FRIO BASEADO EM SISTEMA INTELIGENTE COM CANCELAMENTO DAS
PERTURBAÇÕES POR FILTRO INVERSO.**

Dissertação de mestrado apresentada no Centro
Universitário da FEI para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica, orientado pelo Prof. Dr.
Fabrício Leonardi.

Área de Concentração: Mecânica
Sistemas da Mobilidade -

São Bernardo do Campo
2010

Luís Caldas

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO PARA LAMINAÇÃO
A FRIO BASEADO EM SISTEMA INTELIGENTE COM CANCELAMENTO DAS
PERTURBAÇÕES POR FILTRO INVERSO.**

Trabalho de Dissertação de mestrado – Centro Universitário da FEI

Comissão julgadora

Orientador e Presidente

Examinador (1)

Examinador (2)

São Bernardo do Campo

15 de Dezembro de 2009.

DEDICATÓRIAS

Dedico esse trabalho “in memorium” aos meus pais Rodolpho Caldas Filho e Aurora Caldas.

Dedico esse trabalho à minha digníssima esposa Rosana M.C. Caldas por ter muita paciência durante todo o desenvolvimento desse trabalho e aos meus filhos queridos Luís Claudio, Adriana, Mayra Regina e Kaíque e a minha netinha Giulia.

Dedico o trabalho em especial, “in memorium”, ao meu queridíssimo filho Engenheiro e Professor Marcio Roberto Caldas. Com o desejo de dar o cumprimento a sua vontade que com toda a certeza teria sido por ele realizada.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Deus, por tudo que aconteceu durante o desenvolvimento desse trabalho e o que ainda poderia acontecer.

Gostaríamos de agradecer a Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros pela oportunidade e a bolsa de estudo concedida para o desenvolvimento de todo esse trabalho.

Gostaríamos de agradecer ao amigo e Professor Dr. Marcio Rillo, pela oportunidade concedida, pelo incentivo na sua realização e pelas constantes sugestões e orientações no desenvolvimento desse trabalho.

Gostaríamos de agradecer ao amigo e Professor Dr. Fabrício Leonardi, por sua insistência em me fazer participar do programa de mestrado, por suas orientações, valiosas sugestões, dedicações de tempo e fundamental por sua paciência durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Gostaríamos de agradecer ao Professor Dr. Agenor de Toledo Fleury, pelo incentivo à participação do programa de mestrado, pela condução do programa, pelo apoio e interesse nesse trabalho.

Gostaríamos de agradecer ao Professor Dr. Alessandro La Neve pela sua orientação inicial e pelas sugestões no desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

O objetivo desse trabalho é o projeto de um sistema de controle para laminador a frio, de alto desempenho para a melhoria na qualidade da espessura de saída em produtos planos e laminados. A estrutura de controle proposta, baseada no princípio do BISRA é integrada por dois modelos sendo um controlador adaptativo cuja função de transferência é o inverso da função de transferência da planta e o cancelador fazendo a função de filtro inverso e adaptativo para as perturbações de entrada. O cancelador das perturbações é baseado no controlador Internal Mode Control (IMC) para a rejeição de perturbações, as quais são separadas na saída da planta e injetadas em um filtro adaptativo inverso e subtraídas da entrada da planta para o seu cancelamento. Quanto ao controlador da dinâmica da planta, a operação é feita em malha aberta para o acompanhamento do sinal de referência. Ambos os modelos são adaptados por uma rede neural e nebulosa. Os modelos da planta e do inverso da planta são obtidos numericamente por meio de uma modelagem rede neural nebulosa, baseados no modelo nebuloso Takagi e Sugeno. A sintonia automática das regras nebulosas é realizada usando a estatística multivariada aplicada à base de dados denominada de agrupamentos “cluster”. O desempenho da arquitetura de controle é avaliado, sob às mesmas condições, com o resultado obtido em um projeto de controle de espessura para um laminador cuja arquitetura de controle é baseada em um regulador LQG em malha fechada. O resultado obtido por simulação mostra que o sistema de controle proposto apresenta melhor desempenho do que o projeto com LQG, quanto à precisão de controle, desconsiderando-se o esforço de controle.

Palavras-chave: laminador a frio, rede neural nebulosa; regulador LQG, controle inverso e adaptativo.

ABSTRACT

The objective of this work is the design of a control system for cold rolling mill, high-performance to improve as the thickness of exit and rolled flat products. The proposed control structure based on the principle of BISRA is composed of two models being an adaptive controller whose transfer function is the inverse transfer function of the plant and doing the canceling function one adaptive inverse filter for the disturbance input. The canceling of noise is based on the controller Internal Mode Control (IMC) for the rejection of disturbances, which are separated in the output of the plant and injected into an adaptive inverse filter and removed from the entrance to the plant to its cancellation. The controller of the dynamics of the plant realizes the operation in open loop for following-up the reference signal. Both models are adapted by a neural network and fuzzy. The models of the plant and the inverse of the plant are obtained numerically by means of a fuzzy neural network modeling, fuzzy model based on Takagi and Sugeno. The automatic tuning of fuzzy rules is performed using the multivariate analysis applied to the database named cluster "cluster". The performance of the control architecture is evaluated under the same conditions, with the result obtained in a control design thickness for a mill whose architecture of the control is based on an LQG regulator closed loop. The result obtained by simulation shows that the proposed control system has better performance than the project with LQG, for precision control, ignoring control effort.

Keywords: cold rolling mill, neural fuzzy network; LQG regulator, and adaptive inverse control.

LISTA DE SÍMBOLOS

Operadores Lógicos e Matemáticos

$E [.]$ – Valor esperado de $[.]$.

Σ – Somatória.

Π – Produtória.

ϕ – Função de autocorrelação.

Φ – Transformada da função de correlação cruzada de uma função de correlação.

$*$ – Convolução.

σ – Variância.

σ^2 – Desvio padrão.

AND – Operação lógica E.

OR – Operação lógica OU.

MAX – Valor máximo da função objetivo.

MIN – Valor mínimo da função objetivo.

IF-THEN – Regras nebulosas.

Símbolos usados para os blocos

C – Controlador.

C_{COPY} – Uma cópia ajustada do controlador C.

C(s) – Função de transferência do controlador em tempo contínuo.

C(u) – Função custo.

Fex(s) – Função de transferência do filtro passa-faixa em tempo contínuo.

Fix(s) – Função de transferência do filtro passa-baixa em tempo contínuo.

Hx(s) – Função de transferência do atuador hidráulico em tempo contínuo.

K – Ganho da realimentação.

M – Modelo de Referência.

P – Planta.

\hat{P} – Modelo adaptado à planta P.

\hat{P}^* – Modelo otimizado da planta P.

\hat{P} COPY – Uma cópia ajustada de um modelo adaptada da planta P.

P(s) – Função de transferência da planta em tempo contínuo

P_x – Planta.

LQG-Reg.x - Regulador Linear Quadrático Gaussiano.

LISTA DE ABREVIATURAS E SINAIS

Termos de usados em controle

- FLC** – Controlador lógico nebuloso.
FPB – Filtro passa-baixa.
FPF – Filtro passa-alta.
IMC – Internal Mode Control.
LQG – Linear Quadrático e Gaussiano.
MIMO – Múltiplas entradas e múltiplas saída.
NOISE – Ruído ou perturbação no processo.
SISO – Única entrada e única saída.

Termos usados nos filtros adaptativos

- ANFIS** – Arquitetura híbrida com rede neural e sistema de inferência nebuloso.
APE – Average percentage error (Porcentagem média dos erros).
ARMA – AutoRegressivo Média Móvel.
ARMAX – Auto-regressivo Média Móvel com entradas exógenas.
ARX – Auto-regressivo com entradas exógenas.
BOX-JENKINS – Estrutura de modelo Autoregressivo tipo ARMAX.
BPN – Backpropagation neural (rede neural com aprendizagem supervisionada).
FIR – Filtro com resposta finita ao impulso.
FIS – Sistema de inferência nebulosa.
IIR – Filtro com resposta infinita ao impulso.
MF – Função de pertinência.
MMQ – Método dos mínimos quadrados.
OE – Erro na saída.
WIENER – Filtro adaptativo.

Termos usados na laminação

- | | |
|--------------|-------------------------------------|
| AGC | Controle automático de espessura. |
| BISRA | Princípio do controle do laminador. |

ΔS	Desvio na abertura ou fechamento dos cilindros de trabalho (mm).
Δh	Desvio na espessura final (mm).
E	Constante da mola da cadeira de laminação em (N/m).
F_{ex}	Força devido à excentricidade dos cilindros de apoios (N).
F_{ix}	Força devido à variação na espessura ou dureza do material de entrada (N).
FFF	Princípio baseado no controle antecipado da força de laminação.
gap	Intervalo de abertura entre os cilindros de trabalho do laminador (mm).
H_{out}	Espessura final do material (mm).
H_x	Força do atuador hidráulico (mm).
LF	Laminado a frio.
LQ	Laminado a quente.
MIX	Gama de produtos laminados.
M_n	Módulo de elasticidade da cadeira (Pa).
M_c	Módulo sintonizado da elasticidade da cadeira (Pa).
S	Abertura ou fechamento dos cilindros de laminação (mm).
TANDEM	Uma sucessão de cadeiras de laminação.
x-gap	Abertura/fechamento dos cilindros (mm).
x-force	Força de laminação dos cilindros (N).

Nome dos sinais utilizados na arquitetura de controle

c_K	Resposta ao impulso unitário do controlador linear.
d_K	Resposta desejada na saída do sistema.
e_K	Erro de modelagem da planta.
n_K	Perturbação da planta.
p_K	Resposta ao impulso unitário de um modelo linear de uma planta.
r_K	Referência de entrada.
u_K	Saída do Controlador.
w_K	Perturbação na saída da planta.
\hat{w}_K	Estimativa da perturbação na saída da planta.
x_K	Resposta ao impulso unitário da perturbação no cancelador linear.
y_K	Saída da Planta sem perturbação.
\hat{y}_K	Estimativa da saída da planta sem perturbação.
z_K	Saída do sistema de controle.

OUTRAS ABREVIATURAS

CA - Corrente alternada.

CC - Corrente contínua.

RMS - Valor eficaz.

RMSE - Valor eficaz efetivo

LISTA DE TABELAS

Tabela A –	Total de regras, entrada $x(k)$	61
Tabela B –	Comparativa entre os sinais para excitação de sistema	77

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 –	Arquitetura proposta do sistema de controle de espessura	23
Figura 1.2 –	Gráfico anual da qualidade da espessura no laminador Sendzimir... ..	25
Figura 2.1 –	Sistema clássico de controle	32
Figura 2.2 –	Sistema em tempo discreto com a planta analógica discretizada	33
Figura 2.3 –	Representação simbólica de um filtro adaptativo.....	33
Figura 2.4 –	Estrutura de um filtro linear	34
Figura 2.5 –	Esquema de modelagem da planta sem ruído e perturbação	36
Figura 2.6 –	Modelagem adaptativa de uma planta submetida a ruído e perturbação	37
Figura 2.7 –	Conceito básico do controle inverso e adaptativo	42
Figura 2.8 –	Esquema para formação do modelo inverso sem ruído e perturbação	43
Figura 2.9 –	Esquema para formação do modelo inverso com atraso.....	44
Figura 2.10 –	Método para modelagem inversa da planta com perturbação	46
Figura 2.11a –	Modelo direto da planta com perturbação	47
Figura 2.11b –	Processo de adaptação “fora do processo” do modelo inverso da planta.....	47
Figura 2.12 –	Esquema A com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência	49
Figura 2.13 –	Esquema B com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência	50
Figura 2.14 –	Esquema C com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência	51
Figura 2.15 –	Esquema C com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência uma forma de representação alternativa.....	52
Figura 3.1 –	Modelo nebuloso por Sugeno	55
Figura 3.2 –	Modelo nebuloso por Tsukamoto	55

Figura 3.3 – Modelo Sugeno de 1.a ordem com duas entradas X e Y e uma saída com duas regras	56
Figura 3.4 – Arquitetura para o modelo nebuloso Sugeno onde a normalização do peso é realizada na camada mais alta	58
Figura 3.5 – Diagrama de bloco do “processo”	63
Figura 3.6 – Diagrama de bloco na fase de aprendizagem	64
Figura 3.7 – Diagrama de bloco na fase de aplicação	65
Figura 3.8 – Arquitetura de aprendizagem em processo.....	65
Figura 3.9 – Diagrama do controlador baseado no modelo nebuloso inverso.....	66
Figura 3.10 – Resultado da aplicação agrupamento subtrativo para base de dados	69
Figura 4.1 – Circuito gerador PRBS baseado na seqüência de comprimento máximo.....	75
Figura 5.1 – Arquitetura típica de um processo de laminação a frio	79
Figura 5.2 – Diagrama de causas e efeitos de Ishikawa	82
Figura 5.3 – Curva da força de laminação, abertura dos cilindros de laminação, pela espessura de entrada e dureza do material	88
Figura 5.4 – Os efeitos sobre a força de laminação relativos aos grupos 1 e 2	89
Figura 5.5 – Cadeira de laminação	90
Figura 5.6 – Modelo apresentado por Grimble com o atuador submetido às perturbações.....	91
Figura 5.7 – Diagrama de bode em módulo e fase para o F.P.F da excentricidade nos cilindros de apoios	92
Figura 5.8 – Resposta do F.P.F a uma excitação por um ruído branco	93
Figura 5.9 – Diagrama de bode do F.P.B referente a variação da espessura ou dureza de entrada	94
Figura 5.10 – Resposta do F.P.B. modelado por um ruído branco.....	94
Figura 5.11 – Diagrama de bode em módulo e fase do atuador final para a abertura dos cilindros de trabalho	95
Figura 5.12 – Esquema do regulador LQG.....	96
Figura 5.13 – Diagrama de Bode do sistema em malha fechada.....	97
Figura 5.14 – Simulação em malha aberta (vermelho) e fechada (azul) do controlador LQG submetido às perturbações de entrada	98
Figura 6.1 – Proposta da arquitetura de controle	102

Figura 6.2 –	Esquema do controlador inverso da planta com perturbações	104
Figura 6.3 –	Cancelamento de ruído e perturbação na planta.....	105
Figura 6.4 –	Diagrama de bode em módulo e fase do atuador final para abertura dos cilindros de trabalho	109
Figura 6.5 –	Esquema para a modelagem da planta com perturbação.....	112
Figura 6.6 –	Apresenta a função de correlação cruzada entre as amostras de entrada e saída.....	113
Figura 6.7 –	Mapa de pólos e zeros. a) tempo contínuo b) tempo discreto	116
Figura 6.8 –	Modelagem adaptativa de uma planta submetida a ruído e perturbação	118
Figura 6.9 –	Processo de adaptação do modelo inverso da planta.....	119
Figura 6.10 –	Gráficos entre a entrada desejada, a resposta do ANFIS submetida à entrada desejada e o erro de modelagem diferença entre a entrada e ANFIS para a modelagem da planta.....	120
Figura 6.11 –	Gráficos entre a entrada desejada, a resposta do ANFIS submetida à entrada desejada e o erro de modelagem diferença entre a entrada e ANFIS para a modelagem inversa da planta	121
Figura 6.12 –	Funções nebulosas iniciais e as finais após treinamento.....	121
Figura 6.13 –	Simulação em malha aberta (vermelho) e fechada (azul) do regulador LQG submetido às perturbações de entrada.....	123
Figura 6.14 –	Erro entre entrada e saída do controlador com a resposta do regulador LQG em malha fechada submetidos às perturbações de saída.....	123
Figura 6.15 –	Gráfico de entrada/saída entre o controlador neuro-nebuloso e o comando de entrada submetido às perturbações.....	124
Figura 6.16 –	Resposta do regulador LQG em malha fechada e do controlador neuro-nebuloso submetidos às perturbações de saída	125

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação	19
1.2 Proposta de trabalho (Objetivos)	22
1.3 Justificativa	24
1.4 Metodologia de trabalho	28
2. INTRODUÇÃO AO CONTROLE ADAPTATIVO	32
2.1 Sistema convencional de controle em tempo discreto	32
2.2 Filtros digitais adaptativos lineares e não lineares	33
2.3 Filtro linear e adaptativo	34
2.4 Solução otimizada para filtros adaptativos lineares	35
2.5 Modelagem adaptativa da planta sem perturbação	36
2.6 Modelagem adaptativa da planta com perturbação	36
2.7 Desempenho idealizado na modelagem	38
2.8 Princípio do controle inverso e adaptativo	40
2.9 Modelagem inversa da planta sem perturbação	43
2.10 Modelo de referência	43
2.11 Inverso das plantas com perturbações	44
2.12 Uso de sinais estatísticos de entrada para modelagem de plantas desconhecidas	47
3. REDES NEURAIS SISTEMA DE INFERÊNCIA NEBULOSO	53
3.1 Redes neurais e sistemas de inferência nebulosa na aplicação de filtros adaptativos e não lineares	53
3.1.1 Efeito da Troca de parâmetros	57
3.2 Método dos mínimos quadrados para modelos lineares	58
3.3 Método gradiente descendente	59
3.4 O processo de “retropropagação” para redes adaptativas	59
3.5 Controle pela inversão do modelo nebuloso	59
3.6 Modelo cuja função de pertinência é unitária	60
3.7 Agrupamento para partição das regiões	66
3.7.1 Agrupamento (cluster)	66
4. PROJETO DO SINAL DE MODELAGEM, TEMPO DE AMOSTRAGEM E DURAÇÃO DO EVENTO	70

4.1 Processo de seleção do sinal de modelagem	70
4.2 Fator de pico para sinais multifreqüências	72
4.3 Fator de crista e de tempo.....	72
4.4 Sinais candidatos a sinal de modelagem.....	74
4.5 Apresentação de tabela de fatores de crista e tempo para os sinais candidatos ao sinal de modelagem	77
5. ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE CONTROLES PARA LAMINADORES.....	79
5.1 Composição básica dos componentes do laminador no processo de relaminação a frio.....	79
5.2 A arte dos sistemas de controle de espessura para laminadores.....	79
5.2.1 Sistema de controle da espessura em laminadores	80
5.2.2 Efeitos das perturbações no sistema de controle de um laminador e as formas de compensações usadas pelos controladores convencionais.....	82
5.2.3 Efeito provocado no sistema de controle pela variação na dureza do material laminado	83
5.2.4 Efeito das perturbações pela excentricidade dos cilindros de apoio sobre a força de laminação.....	83
5.3 Influências dos grupos sobre o material a laminar	84
5.3.1 Princípio do medidor de espessura	85
5.4 Desafio na implementação de sistema de controle de espessura de laminador	87
5.5 Seleção do modo de controle da espessura no laminador	90
5.6 Projeto e proposta de trabalho realizado por Grimble (1992).....	90
5.7 Simulação das respostas em malhas fechada e aberta	96
5.8 Comentários	98
6. ESTUDO DE CASO DE UM LAMINADOR A FRIO	100
6.1 Implementação da arquitetura do sistema de controle.....	100
6.1.1 Metodologia de implementação da arquitetura do sistema de controle.....	100
6.2 Problemas no processo de controle do laminador a frio os quais resultam na produção de material fora de conformidade às especificações técnicas.....	101
6.3 Proposta de uma arquitetura de controle baseada em sistemas adaptativos.....	102
6.4 Proposta da arquitetura de controle do laminador.....	102
6.4.1 Funcionamento da arquitetura de controle proposta.....	103
6.4.2 Controlador Inverso	104

6.4.3 Cancelamento das perturbações.....	104
6.5 Preparação para a montagem de uma base de dados, entrada-saída da planta, com a escolha de um sinal de modelagem na obtenção dos modelos adaptativos	106
6.5.1 Tipos de dados para a estimação de parâmetros e validação do modelo.....	107
6.5.2 Tipo de sinal para a implementação do modelo	107
6.6 Sinal de modelagem	107
6.7 Tempo de amostragem	108
6.8 Número de amostras.....	110
6.9 Processo de aquisição de dados provenientes da excitação da planta	110
6.10 Preparação da base de dados para a modelagem da planta	112
6.11 Obtenção dos modelos adaptativos: para a dinâmica da planta e filtro de cancelamento das interferências por uma rede neuro-nebulosa	113
6.12 Descrição do editor da rede neuro-nebulosa “toolbox”	113
6.13 Formalidades de dados e o editor GUI ANFIS: verificação e treinamento	114
6.14 Modelagem da planta com perturbação.....	115
6.15 Restrição de causalidade	117
6.16 Modelagem inversa da planta com perturbação	118
6.17 Avaliações dos sistemas de controle	119
6.18 Resultados da modelagem da planta e do inverso da planta	120
6.19 Avaliação do desempenho da modelagem	122
6.20 Avaliação do desempenho da arquitetura proposta submetida às perturbações do processo de laminação.....	122
6.21 Simulação do regulador LQG para controle e atenuação das perturbações	123
6.22 Simulação da arquitetura de controle proposta para o controle e atenuação das perturbações	124
6.23. Comentários sobre o desenvolvimento do trabalho e trabalhos futuros	125
7. CONCLUSÕES.....	131
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

1. INTRODUÇÃO

Com o incremento tecnológico e as exigências do mercado e os requisitos como alto desempenho dos equipamentos responsáveis pelos processos produtivos e também na qualidade constante do produto, são necessários sistemas de controle muito mais sofisticados que os existentes, principalmente devido às freqüentes trocas na gama ou "mix" dos produtos, como nas produções temporárias e ainda na alta flexibilidade do ambiente produtivo, as que provocam grandes variações nas condições operacionais e por fim no ponto de operação.

Para satisfazer a qualidade do produto e requisitos em um ambiente flexível de produção, é cada vez mais necessário aplicar avançadas técnicas de controle, que tenham capacidade de operar com incertezas e também com não linearidades do sistema, as quais cada vez mais são identificadas e eventualmente tratadas nos processos industriais. Os modelos convencionais, segundo Jamshidi (1997), com abordagens de controles baseados sobre diferentes equações diferenciais são freqüentemente insuficientes para modelar a dinâmica de um processo, principalmente devido à extensão precisa do conhecimento formal sobre como o sistema deverá ser controlado.

Os modelos de processos convencionais apresentam ótimos resultados, quando baseados sob as condições nominais de operações e podem apresentar resultados pobres quando submetidos às pequenas variações nas condições, enfim são modelos que possuem pouca flexibilidade, quanto às variações das condições de operações.

Um grande desafio quando se implementa um controle automático de espessura para laminadores, devido a dois fatores que influenciam no seu desempenho: o primeiro pelas deficiências no material a ser laminado e o segundo pela variabilidade no laminador. Estes fatores agem como perturbações para o sistema de controle sendo:

- O primeiro fator representado pela variação pela resistência à deformação e aumento da dureza do material ou variação da espessura de entrada;
- O segundo fator representado pela excentricidade dos cilindros.

Estas perturbações provocam efeitos na força de laminação as quais agem de maneira oposta levando o sistema de controle de espessura a atuações indevidas e se não identificadas intensificam problema. Devido a esses fatores, se não houver compensação desses na estrutura do sistema de controle, o desempenho do controle ficará comprometido e tornará impossível cumprir as exigências de qualidade.

1.1 Motivação

A motivação principal para a realização deste trabalho foi manifestada pela carência de trabalhos e aplicações de sistemas adaptativos em uma aplicação clássica de controle de um laminador.

Este trabalho é uma contribuição científica para solução dos problemas encontrados nos sistemas de controle de plantas industriais submetidas aos ruídos e perturbações intrínsecos aos processos e presentes nos controles dos laminadores. Uma motivação a mais para a realização deste trabalho foi:

- A experiência e conhecimentos adquiridos *por mais de dez anos de atuação na engenharia de fábrica de uma empresa de relaminação de aços*;
- O desafio de controlar um sistema dinâmico altamente complexo e obter melhores resultados na qualidade do produto relaminado;
- O desafio de fazer uma proposta de solução com nova tecnologia de implementação e que fosse robusta à variação de parâmetros internos e com alta rejeição às perturbações intrínsecas ao processo de laminação.

O desafio dos relaminadores sempre foi produzir materiais relaminados com baixa tolerância na espessura final, com qualidade constante e independente das condições ambientais como umidade, temperatura entre outras. A descrição dos vários sistemas de controles de espessuras para laminadores com soluções baseadas em diferentes princípios, a busca e seleção de um sistema de controle que atenda plenamente às exigências de qualidade o qual o mercado necessita, é uma tarefa que requer alto conhecimento não só de laminação como das formas de atuações dos sistemas de controle. A solução deve também abranger outros dois requisitos como: primeiro, se tecnicamente pode ser implementada no tipo de laminador, em virtude do tipo de acionamento e controle do sistema de abertura e fechamento dos cilindros de apoio; e, segundo se o investimento está dentro dos recursos disponíveis.

Pode-se afirmar segundo Wagner (1996) e constatado em nossas pesquisas, que a maioria dos laminadores instalados usam sistemas de controle da espessura do material baseado no BISRA (British Iron Steel Research Association). Esse princípio do sistema de controle da espessura não responde adequadamente às perturbações do processo de laminação e daí não atende às exigências de qualidade do material. Não fossem as interferências

indesejadas no processo, as quais levam o sistema de controle muitas vezes a ações indesejadas, o controle pelo BISRA poderia controlar perfeitamente a espessura de saída.

Um desvio na espessura desejada da chapa pode ser corrigido de várias formas no laminador

Durante o processo de redução da espessura a frio, a resistência mecânica do material processado ou a sua dureza aumenta de passe a passe (material encruado), isto é, aumento da resistência mecânica em virtude da deformação plástica a frio (RIZZO, 2007) e (MANGELS, 2009). Significa que a específica força entre cilindros (força por unidade de área) deve crescer a intensidade de passe a passe. O resultado é a aplicação de força cada vez maior e chegando a atingir uma faixa de valores nas quais os cilindros são elasticamente deformados, como resultante da alta força aplicada neles. Quando o laminador se encontra nesta condição, nenhuma variação significativa na espessura é alcançada pela simples atuação na posição do “sem-fim”. No entanto alterando a tensão de ré na chapa pode se conseguir uma correção satisfatória no desvio da espessura uma vez que o aumento na tensão de ré resulta na redução na força entre cilindros, ou seja, menor deformação dos cilindros e conseqüentemente alteração na abertura do cilindro. Existem várias formas de alteração na espessura da chapa realizada pela ação dos elementos finais de controle.

Para velhas instalações de laminadores a quente, uma reforma no sistema de acionamento eletro-mecânico é um investimento muito alto. A troca por sistemas hidráulicos não é uma simples reforma e a estimativa do custo supera os dois milhões de dólares por cadeira. Além de ter que parar o equipamento por um tempo longo para instalação, usinagem, instalação elétrica e hidráulica. Muitas empresas com um trem de cadeiras de laminações sob as mesmas circunstâncias optaram pela instalação de sistemas conhecidos como FFF (Force feedforward), cuja estimativa de custo, segundo Wagner (1996) é de um milhão e meio de dólares. Trata-se de um sistema, segundo Wagner (1996), que antecipa a posição do parafuso em cada instante para as cadeiras de laminação sucessivas após a primeira cadeira. Não existe controle na primeira cadeira e nem reações aos erros na força de laminação devido ao atrito ou histerese. Também não responde às forças devido à excentricidade dos cilindros de apoios. A desvantagem desse sistema é inicial, pois o tempo estimado para operação é de seis a nove meses.

Um outro sistema de controle da espessura de laminadores se baseia no processo de controle por fluxo de massa (DAVY, 1994), onde a velocidade de entrada versus espessura de saída é computada e comparada com o desejado fluxo de massa, isto é, a velocidade de saída versus a espessura alvo. Qualquer tendência de erro é detectada e corrigida pelo ajuste nas

pressões dos cilindros ou na força de laminação alterando-se a velocidade de entrada, a fim de manter o fluxo de massa constante.

A empresa Mangels São Bernardo optou na reforma de um laminador quádruplo de 400mm de largura, próprio para laminar materiais de baixa espessura de 0,1 a 1,0 mm, adquirido na indústria Shloemann. É dotado de um sistema de controle automático de espessura, com controle antecipatório “feedforward” e com a monitoração na espessura de saída “follow - up” fazendo parte da malha de controle da força de laminação.

O princípio se baseia na leitura antecipada da espessura inicial do material antes de passar pelos cilindros de laminação e é feita pelo medidor de espessura no lado de entrada. O desvio na espessura, medida em relação a espessura desejada é armazenada, com o propósito de ser utilizada no instante preciso pelo sistema de controle de espessura para efetuar a sua correção. O valor do desvio na espessura medida é mais facilmente armazenado quando a implementação do sistema de controle é digital, mas não impede que sistemas analógicos, executem esta tarefa, com o mesmo propósito.

No sistema digital, o valor medido é movido para um registrador de deslocamento que se move em sincronismo com a velocidade da chapa. A informação do controle chega ao sistema de controle no instante preciso para a ação de controle. Um segundo monitor da espessura é instalado após a cadeira de laminação no lado de saída e permite o controle final da espessura. As correções mais apuradas são levadas a efeito com a informação do lado de saída ao sistema de controle automático chamado de “follow-up” da espessura.

Estas técnicas são particularmente importantes, porque combinam a resposta rápida do método antecipado "feedforward", com a precisão absoluta do método retroalimentação "feedback" no sistema, o qual é virtualmente imune aos efeitos adversos da variação da tensão de ré e as imperfeições da laminação. Aplicações são para laminadores a frio reversíveis com várias cadeiras sucessivas e em linha (“tandem”).

Muitos projetos de sistemas de controle foram apresentados em congressos e alguns instalados em grandes laminadores (ABB, 2000), como é o caso no Brasil nas indústrias como Villares, a qual foi instalada um sistema de controle adaptativo aplicando redes neurais, segundo De Saito (1998).

Um desses inúmeros trabalhos apresentados é que levou ao desenvolvimento desse trabalho, como o trabalho apresentado por Grimble (1992), um exemplo de demonstração no ambiente Matlab. O trabalho de Grimble (1992) serviu então como motivação para o desenvolvimento do nosso trabalho e assim foi desenvolvida uma proposta de arquitetura de controle que atendesse então às exigências do mercado.

O trabalho de Grimble (1992) é somente um exemplo demonstrativo de projeto de um sistema de controle para espessura de laminador por estimação da força de laminação e o modelo matemático adotado para a descrição da planta do sistema apresenta uma função de transferência de segundo grau, e as características da planta são: linear, SISO, estável e de mínima fase.

As perturbações e ruídos apresentados no projeto são somente pela excentricidade dos cilindros de apoio do laminador e pela variação da espessura e resistência à deformação do material. Foram desprezadas outras fontes de perturbações encontradas na laminação a frio, as quais influenciam diretamente na força de laminação, que é o atrito entre o material e os cilindros de trabalho do laminador, variação na rigidez hidráulica dos cilindros hidráulicos, variação da rigidez estrutural da cadeira de laminação. Essas fontes de perturbações contribuem para a geração de não conformidade no material produzido pelo laminador implicando diretamente na qualidade final (RIZZO, 2007). Outros trabalhos com a força de laminação são apresentados em (GOUVEIA et al., 2002), utiliza sistemas inteligentes por redes neurais para a determinação da força de laminação. Uso de redes neurais para a determinação da tensão de escoamento na laminação a quente de tiras de aços (VALLIM; GIORNI; PLAUT, 2009).

1.2 Proposta de trabalho - Objetivos

O objetivo na teoria de controle é fazer com que um dado sistema dinâmico (a “planta”) se comporte de maneira precisa e robusta. Pode-se fazer uma classificação em categorias para a grande variedade de sistemas de controles. Como premissa inicial, qualquer planta pode ter o comportamento dinâmico de forma linear ou não linear e um sistema dinâmico é dito ser linear quando ele obedece ao princípio da superposição e é dito não linear quando isso não ocorre (KAILATH, 1980). Uma planta pode ser SISO (uma única entrada e uma única saída) (SISO), ou MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas). Será tratada nesse trabalho somente uma planta SISO e de mínima-fase.

O objetivo do trabalho é propor e analisar uma arquitetura de controle da espessura do material laminado nos processos de laminações a frio, que tenha um alto desempenho e robustez.

Nessa dissertação, o foco foi a implementação de uma arquitetura de controle para o controle de espessura de saída de um laminador, utilizando-se de redes neuro-nebulosas. O modelo matemático da planta utilizado para a criação dos modelos da planta e do inverso da

planta foi o do projeto de Grimble (1992) para efeito comparativo entre as abordagens de controle. Daí a planta é do tipo SISO e a dinâmica da planta é de mínima fase (com todos os zeros dentro do círculo-unitário no plano-z) (OGATA, 1998), invariante no tempo, e escalar. Será implementada uma arquitetura de controle, com controlador adaptativo para a dinâmica da planta e um filtro adaptativo para cancelamento das perturbações na planta. Fica bastante evidente que a modelagem da planta é bastante precisa, em virtude de uma simplificação do modelo da planta. Os ajustes de parâmetros para adaptação de qualquer modelo serão sempre feitos “fora de operação”.

Nessa dissertação, do ponto de vista de controle serão utilizados alguns esquemas com algoritmos de adaptação para as modelagens da planta e do inverso da planta submetidas às perturbações (WIDROW; WALACH, 1996).

Normalmente nos sistemas de controle tradicionais, tanto a dinâmica do processo como as perturbações são tratadas somente pelo controlador. A proposta desse trabalho é desenvolver uma arquitetura de controle em duas etapas. A figura 1.1 a seguir mostra a arquitetura proposta inicialmente.

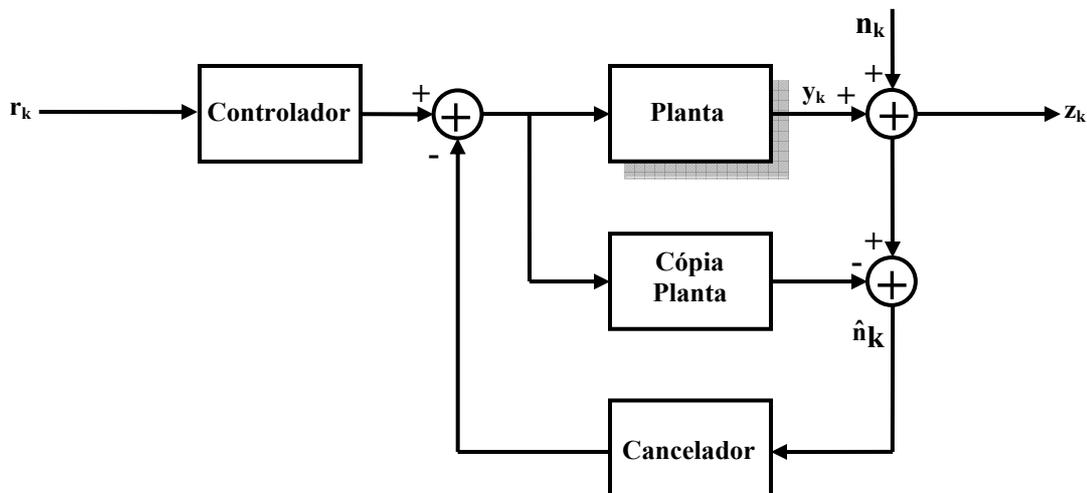


Figura 1.1 – Arquitetura proposta do sistema de controle de espessura.

A etapa um é obter o modelo da planta segundo um esquema de adaptação que produza um modelo casado com a planta. O modelo da planta é aplicado no esquema baseado no IMC (internal mode control), apresentado pelos trabalhos (GARCIA; MORARI, 1982) (GARCIA; MORARI, 1985) e (ECONOMOU; MORARI, 1986) e (RIVERA; MORARI; SKOGESTAD, 1986), onde a cópia da planta permite montar uma malha de realimentação com o valor estimado da perturbação e não com a saída da planta adicionada à perturbação. Se a cópia da planta é bastante precisa o projeto de controle opera efetivamente em malha aberta (PLETT, 1998).

A etapa dois é obter o modelo inverso da planta para duas funções no sistema de controle. A primeira função é usar uma cópia do modelo inverso da planta, livre de perturbação ou isento de perturbação, como o controlador da dinâmica da planta. A segunda função é usar o modelo inverso da planta como um dos blocos do cancelador ou filtro das perturbações.

Os modelos da planta e do inverso da planta serão obtidos “fora de operação”, como será abordado no capítulo quatro desse trabalho.

A contribuição do autor inclui trabalho no campo da laminação e a aplicação do modelo e controle inverso para o cancelamento das perturbações da laminação. São quatro as nossas contribuições, a saber:

1. Dissertar sobre os sistemas de controles de laminadores;
2. Fazer a modelagem e controle inverso de uma planta de um laminador;
3. Realizar o cancelamento das perturbações de laminação “em operação” realizada por um filtro adaptativo e inverso;
4. Controlar a dinâmica do laminador separada do cancelamento das perturbações de laminação.

1.3 Justificativa

Quando se tem um conhecimento do estado da arte dos laminadores e seus sistemas de controles, há então uma grande facilidade para a seleção de um sistema de controle. Atualmente são muitos os trabalhos e estudos publicados, muitas observações e prática. Há muito material técnico publicado conforme (SIEMENS, 1976), (SIEMENS, 1979), (SIEMENS, 1998) e (SIEMENS, 1999), (VOLLMER, 1989) e (VOLLMER, 1996), (MAHFOUF et al., 2006), (LIU, 2002), (FRAYMAN; ROLFE, 2003), (SBARBARO; NEUMERKEL; HUNTS, 2002), (RATH, 2004), (ROSSOMANDO; DENTI; FERREIRA, 2006). É notório que o conhecimento do processo a ser controlado permite uma melhor abordagem quando na seleção ou projeto dos sistemas de controles. Adicionado a esse conhecimento, mais os recursos atualizados de componentes, máquinas e processadores para operação em altíssima velocidade permitem assim, a implementação de novas técnicas e algoritmos sofisticados, como cálculo antecipado da força de laminação, instalado em cinco usinas cuja capacidade produtiva é aproximadamente quarenta e cinco por cento da produção mundial de aço (WAGNER, 1996). O incremento tecnológico impele a aplicação de novas técnicas como, por exemplo, o sistema de controle baseado nas redes neurais, implantado em

laminador na Indústria Villares pela Siemens (SAITO, 1998) ou como na instalação na indústria de laminação Avesta-Sheffield Precision Strip na Suécia, que segundo Bengtsson (2000), após a instalação de um sistema adaptativo em dois laminadores, o desvio de tolerância na espessura foi reduzido a cinquenta por cento conforme a curva da qualidade da espessura à longo prazo apresentada na figura 1.2.



Figura 1.2 – Gráfico ano a ano da qualidade da espessura no laminador Sendzimir 231, instalado na Indústria Avesta-Sheffield (BENGTSSON, 2000).

Diante desses resultados obtidos com a modernização dos sistemas de laminação e conforme a figura 1.2, espera-se, cada vez mais, encontrar a técnica baseada em sistemas adaptativos no sistema de controle. A tendência do mercado é cada vez mais diminuir o nível de tolerância na espessura do material e deverão obrigar os fornecedores, como usinas e relaminadores, a modernizarem suas instalações e a buscarem soluções novas para os velhos problemas da laminação.

Usando o mesmo cenário e tendência da tecnologia na construção de sistemas de controle, a decisão da técnica a ser utilizada para a arquitetura de controle foi pela construção de um sistema de controle adaptativo com o conceito baseado na área da inteligência artificial porque é sinérgica, ao invés de exclusiva e a qual permite a construção de sistemas inteligentes. Esta técnica permite incorporar o conhecimento humano por experiência anterior permite identificar o sistema e reconhecer padrões para a aprendizagem através de treinamento (dados estatísticos obtidos nos processos de laminações) sistema e permite a inferência através da aplicação da lógica de inferência nebulosa. Adapta-se às mudanças no ambiente, enfim se aproxima às não linearidades do processo (redes neurais), daí tudo se resume na implementação de uma arquitetura de controle de espessura de alto desempenho. Para o tratamento dos velhos problemas da laminação (Interferências no processo), problemas conhecidos pelos fornecedores e usuários, buscou-se a implementação de uma técnica baseada

no IMC (internal Mode Control), introduzida em uma arquitetura capaz de tratar as perturbações intrínsecas separadamente do tratamento da dinâmica da planta realizada por um controlador.

A proposta do sistema de controle que atenda aos requisitos atualmente exigidos estará sujeito às condições abaixo:

- Variações nas condições de operações;
- Não linearidades do processo;
- Perturbações no processo;
- Incertezas no comportamento dinâmico do sistema.

e que o sistema de controle seja capaz de :

- Incorporar o conhecimento humano dentro de um domínio específico, adquirido por experiência anterior e que possa ser treinado para aprendizagem;
- Adaptar às trocas no ambiente e inferir na tomada de decisão;
- Responder devidamente às não linearidades do processo;
- Aprender, adaptar e sintonizar a sua resposta conforme as condições reais do sistema;
- Ter uma ação preditiva na tomada de decisão;
- Possuir um mecanismo de neutralização das perturbações para evitar uma ação indevida do controlador.

Quanto aos tipos de dificuldades apresentadas no controle da planta, essas podem ser classificadas em três tipos, são elas:

- 1) Regulador, cuja principal objetivo é a resposta transitória e permanente a uma perturbação e a sua pronta recuperação de forma robusta.
- 2) Servo (ou “siga”), onde a principal preocupação é resposta transitória e permanente da planta, a fim de, acompanhar uma dada trajetória.
- 3) Terminal, onde a preocupação é com a habilidade de mover a saída do sistema de um estado para outro, sem se preocupar com a trajetória.

Nos três tipos de controle da planta, existem restrições impostas sobre o sinal de controle e que devem ser propriamente manipuladas pelo controlador. Os problemas tanto do regulador como do servo podem ser considerados similares, sendo que o regulador é um caso particular de controle servo cujo objetivo é acompanhar o sinal de comando de entrada. O controle do tipo Terminal é suficientemente diferente e não será tratado nesse trabalho. Nessa dissertação serão abordados somente problemas de controle do tipo regulador e servo.

Nos sistemas de controles analógicos, clássicos e modernos, para se conseguir um controle preciso e com estabilidade, tanto para o regulador, como para o servo é necessária uma malha de realimentação, a fim de, compensar as perturbações do processo (FRANKLIN; POWELL; EMANI-NAEINI, 1994). E da mesma forma que o sistema convencional, no sistema de controle em tempo discreto será usado um computador digital (FRANKLIN et al., 1990). O tipo de controle regulador ou servo é bastante eficiente quando se conhece total ou parcialmente a dinâmica da planta, entretanto, a dinâmica da planta é raramente muito bem conhecida e pode apresentar alguma dificuldade no controle quando apresenta alguma não linearidade (PLETT, 1998). Segundo Zarate; Gálvez; Helman, (2003) dentre vários modelos do laminador para estudo, o modelo proposto por Alexander (1972) foi o que melhor caracterizou o modelo de um laminador.

Pode-se dizer que existe ainda muito trabalho a ser feito no campo de controle de sistema principalmente para os sistemas não lineares e que ainda estão bem no início dos trabalhos. É certo que, do ponto de vista matemático, mesmo para uma planta linear cuja dinâmica é conhecida não é ainda uma tarefa fácil a construção de um sistema de controle preciso.

Nos laminadores existe uma dificuldade física na colocação de um sensor para a medida direta da abertura dos cilindros de laminação. Para o controle da abertura dos cilindros de laminação, muitos sistemas de controle usam medição indireta, por meio de uma outra variável de controle como, por exemplo, a força de laminação, a posição dos cilindros de apoio. Para o sistema de controle operar com uma variável indireta, não é um problema desde que inclua no sistema, um observador para a estimação dos estados. A estimativa de estados é enviada ao regulador que executa a ação desejada. Uma arquitetura de controle que opera dessa forma é conhecida como LQG, constituída de um regulador linear quadrático e um estimador de estados por meio de um filtro de Kalman.

O trabalho apresentado por Grimble (1992) apresenta esse tipo de regulador em cascata com o filtro de Kalman das estimativas de estados, sendo a variável medida (saída), a força de laminação. É construído um modelo físico constituído pelo atuador hidráulico, cuja

saída é a força de laminação e modelos para as perturbações de entrada e processo. Essas forças exercidas pelas perturbações são somadas à força de laminação. Porém na laminação essas forças têm efeitos contrários sobre o controle da abertura e fechamento dos cilindros de laminação e esses efeitos geram uma dificuldade para o sistema de controle que usa a força de laminação como variável medida. Fica bem evidenciado nos resultados obtidos na saída do sistema de controle do projeto de Grimble (1992), onde a planta é submetida, tanto em malha aberta como em malha fechada, às perturbações pela variação da espessura/resistência à deformação e dureza do material e pela excentricidade dos cilindros do laminador. O resultado obtido em malha fechada foi uma resposta na saída da planta com uma atenuação das perturbações de entrada de cerca dez vezes em relação à mesma resposta da planta operando em malha aberta.

Em malha fechada existem compensações às quais reduzem o efeito das perturbações na força do atuador. Porém quando se fecha a malha de controle para o tratamento das perturbações concomitante com a dinâmica da planta, há a alteração da função de transferência final. Na nossa proposta de trabalho, as perturbações são tratadas isoladamente e fora do controlador da dinâmica do processo. A finalidade é o cancelamento das perturbações na saída da planta sem interferência e vice-versa no controle da dinâmica da planta.

Esse tratamento separado das perturbações tem a propriedade de não interferir na dinâmica do processo e se a planta não é perturbada então não é necessária realimentação para se obter uma saída precisa. O resultado obtido com essa proposta será apresentado graficamente e será avaliado o desempenho como citado na metodologia.

Uma condição é imposta para que o IMC possa operar, a planta deve ser estável, ou ser estabilizada por algum processo de estabilização conhecido ou por alguma forma de estabilização usando métodos tradicionais de controle.

1.4 Metodologia utilizada

A partir de modelos matemáticos da dinâmica do sistema, ou de dados estatísticos de entrada e saída do sistema ou do conhecimento anterior do comportamento dinâmico do processo, ou de nenhum conhecimento sobre a dinâmica do sistema, pode-se implementar um modelo de controle cuja abordagem seja adaptativa.

O campo do controle adaptativo permite entre outras:

- 1) A possibilidade de controlar sistemas com dinâmica complicada, incorporando restrições no projeto de origem prática;
- 2) Grande precisão no controle devido a um esquema melhor de modelagem;
- 3) Robustez quanto à variação dos parâmetros internos da planta;
- 4) Rejeição aos efeitos relativos às perturbações.

Para a parte adaptativa do nosso trabalho, o objetivo é implementar dois modelos a saber: o primeiro um modelo o qual seja uma cópia a mais próxima possível da planta, ou seja, o modelo e a planta produzem uma resposta de saída aproximadamente casada quando submetidos à um impulso de entrada; o segundo adaptar o modelo cuja resposta é o inverso da resposta da planta. Os esquemas de adaptação serão diferentes para obter a cópia da planta e para o modelo inverso da planta.

Para a modelagem da cópia da planta e cópia do inverso da planta, uma base de dados será montada a partir da excitação da planta com um sinal propriamente escolhido para esta tarefa.

Depois de realizada a etapa de obtenção do modelo inverso da planta, uma cópia desse modelo obtido então será inserida no sistema de controle como controlador da dinâmica da planta. Será mostrado que essa arquitetura do controlador opera em malha aberta quando o modelo é bem casado com o inverso da planta.

Depois de obtido o modelo inverso da planta, uma cópia desse modelo é usada para o cancelador das perturbações do processo como um filtro. A arquitetura para o cancelador de perturbações é baseada no IMC e é implementado o filtro das perturbações usando uma cópia do modelo inverso da planta, cuja função, na arquitetura do sistema de controle, é de cancelar as perturbações do sistema.

Para o processo de modelagem serão utilizadas para adaptações dos modelos, as redes neurais com sistema de inferência nebuloso, pois em virtude de sua estrutura ter um comportamento não linear, as redes neurais têm a capacidade de se adaptar quando o sistema apresenta alguma não linearidade. Baseada na arquitetura do modelo de representação nebuloso do tipo (TAKAGI-SUGENO, 1985), o ANFIS, assim chamado, usa um algoritmo híbrido de aprendizagem e pode representar também outros modelos nebulosos como (TSUKAMOTO, 1979), (MANDANI, 1974) e (JANG, SUN; MIZUTANI, 1996). O ANFIS utiliza o algoritmo da minimização do erro pelo método dos mínimos quadrados para identificação dos parâmetros do conseqüente da regra nebulosa. Os sinais do erro se

propagam pela rede por retropropagação (“backpropagation”) onde os parâmetros do antecedente da regra nebulosa são atualizados pelo gradiente descendente.

Apesar de o programa Matlab dispor de uma ferramenta atual eficiente para a adaptação (JANG, 1995), (MATLAB, 1997), a simulação e validação de modelo será obtida pela elaboração de um programa desenvolvido para esta finalidade que dará o suporte técnico para a implementação dos modelos. Esse programa permitirá uma maior flexibilidade e alterações de alguns parâmetros de ajuste para melhor casamento ou adaptação.

Uma classificação e o agrupamento dos dados permitem obter a sintonia do conjunto de variáveis nebulosas. O neural realiza forma automática a classificação dos dados e o agrupamento “cluster” uma ferramenta de análise multivariada de dados a qual realiza o agrupamento e determina os centros de cada agrupamento, as quais serão as partições das variáveis nebulosas. Uma condição necessária para a realização dessa etapa é a normalização do conjunto de dados dentro de uma faixa de valores.

Uma vez obtida as partições das variáveis nebulosas, inicia-se o processo de transformar variáveis exatas em variáveis nebulosas, onde valores de pertinência da regra nebulosa são designados para treinamento em cada conjunto dos classificados agrupamentos. Essa identificação do conjunto de parâmetros usa uma regra híbrida de treinamento através da qual realiza a retropropagação: cálculo do erro de adaptação pelo método dos mínimos quadrados e a determinação dos parâmetros de ajustes dos pesos da rede pelo gradiente descendente.

Após as obtenções dos modelos da planta e do inverso da planta, esses modelos serão validados e em seguida integrados à arquitetura de controle.

Uma validação do modelo é realizada aplicando-se um índice de desempenho da modelagem. Nesse trabalho usamos o índice de desempenho baseado no erro médio percentual APE (average percentual error) (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

Por fim, a arquitetura de controle deve ser avaliada, quanto ao seu desempenho e que para isso será submetida aos sinais de comando e as perturbações, idênticas às utilizadas no projeto de Grimble (1992). O resultado obtido será avaliado com a proposta de projeto de Grimble (1992).

Será aproveitada a mesma forma de avaliação realizada pelo Grimble (1992) da sua arquitetura de controle para avaliar o desempenho da arquitetura proposta e ainda como uma nova contribuição no trabalho.

O projeto de Grimble (1992) é uma proposta de solução para o controle da espessura de um laminador a frio, submetido às perturbações pela variação da espessura de entrada ou

pela excentricidade dos cilindros de apoios. Trata-se de um controlador Linear quadrático Gaussiano LQG para a dinâmica do sistema, com realimentação em cascata por um filtro linear de Kalman para estimativa da variável de estado. É utilizada como variável medida (saída), a força de laminação. A saída do filtro é uma estimativa de estado para o regulador tomar a ação de controle.

No final do trabalho serão mostrados os resultados obtidos das avaliações dos modelos obtidos e do desempenho do sistema de controle através de:

- Índice de desempenho do modelo do controlador;
- Simulações apresentadas as quais mostram o desempenho do sistema de controle submetido à mesma excitação de entrada.

2. INTRODUÇÃO AO CONTROLE ADAPTATIVO.

O objetivo da teoria de controle é controlar um dado sistema dinâmico para que tenha um comportamento preciso e robusto. Os sistemas dinâmicos os quais se desejam controlar são instalações ou processos, os quais serão chamados de “plantas”. Podem ser lineares, as quais obedecem ao princípio da superposição ou não lineares as quais não obedecem ao princípio, segundo Kailath (1980). Uma planta pode ser do tipo SISO, ou seja, uma única entrada e uma única saída ou do tipo MIMO, múltiplas entradas e múltiplas saídas. Nesse trabalho trataremos somente de planta do tipo SISO.

Embora o campo de controle seja bastante amplo, estamos interessados na aplicação do sistema de controle para laminador o qual utiliza um controlador somente para a dinâmica da planta e que seja do tipo regulador e que as interferências indesejáveis sejam tratadas por um cancelador, conforme é feito nas aplicações de áudio (WIDROW, 1975).

2.1 Sistema convencional de controle em tempo discreto.

Um sistema convencional de controle da teoria clássica de controle faz o uso da realimentação, necessária para se obter o controle da planta quando submetida à perturbações. A planta mostrada a seguir na figura 2.1 é controlada por um controlador a qual usa ambos os sinais: $r(t)$ um sinal de comando de entrada ou referência de entrada e $y(t)$ um sinal vindo da saída para a entrada através de um elo de realimentação.

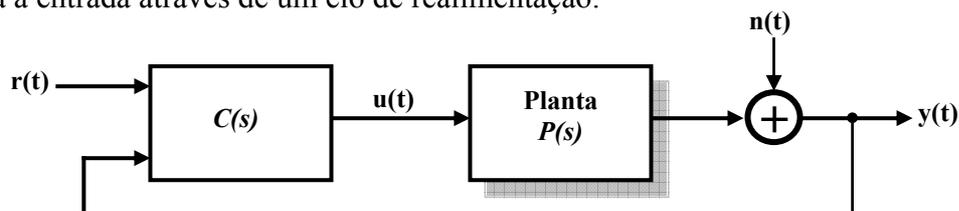


Figura 2.1 - Sistema clássico de controle.

Se o sinal de referência $r(t)$ é constante o controle é do tipo regulador, mas se $r(t)$ varia rapidamente no tempo, o controle é do tipo servo, onde a saída $y(t)$ segue o comando de entrada $r(t)$. No controle tipo servo, para que $y(t)$ acompanhe o sinal de comando da entrada, o controlador precisa dos sinais $r(t)$ e $y(t)$. O controlador responde aos sinais de entrada com um sinal de controle $u(t)$ que aciona a planta. A realimentação de $y(t)$ é utilizada para estabilizar a planta e garantir que o controlador seja suficientemente robusto às perturbações externas e seja capaz de reduzir a zero o erro de saída. O sistema de controle da figura 2.2 usa uma

realimentação unitária e é chamada de “follow-up”, uma vez que, o objetivo é que a saída da planta “siga” o sinal de entrada ou o comando de entrada. Nessa aplicação tanto a dinâmica da planta como as perturbações do processo são tratadas pelo controlador. O uso do computador digital permite a discretização de plantas analógicas e assim transformadas em tempo discreto.

A seguir a figura 2.2 mostra o sistema de controle digital em tempo discreto com as interfaces digitais analógicas e analógicas digitais.

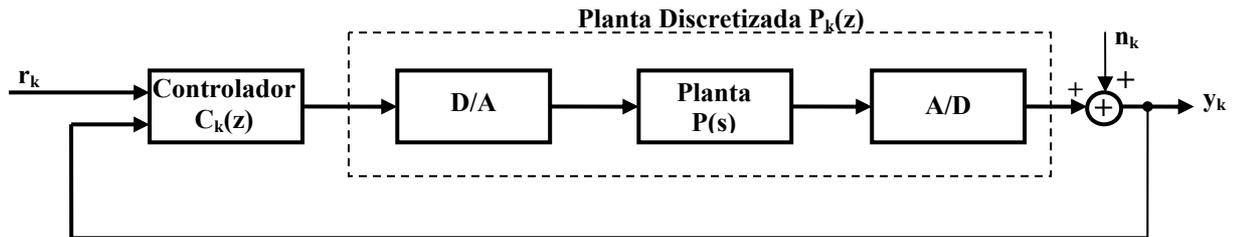


Figura - 2.2 – Sistema em tempo discreto com a planta analógica discretizada.

2.2 Filtros digitais adaptativos lineares e não lineares

Os controles adaptativos (LANDAU; LOZANO; SAAD, 1977) e (OSBURN; WHITAKER; KEZER, 1961) são construídos baseados nos fundamentos da teoria dos filtros adaptativos lineares e não lineares. Serão apresentados alguns conceitos aplicáveis, como mostra a figura a seguir 2.3, a representação de um filtro adaptativo o qual tem uma entrada x_k e uma outra entrada especial chamada de resposta desejada. A resposta desejada d_k especifica a saída desejada do filtro. Um sinal de erro e_k , é utilizado para modificar os parâmetros internos do filtro e é dessa forma que o filtro “aprende” a desempenhar a função.

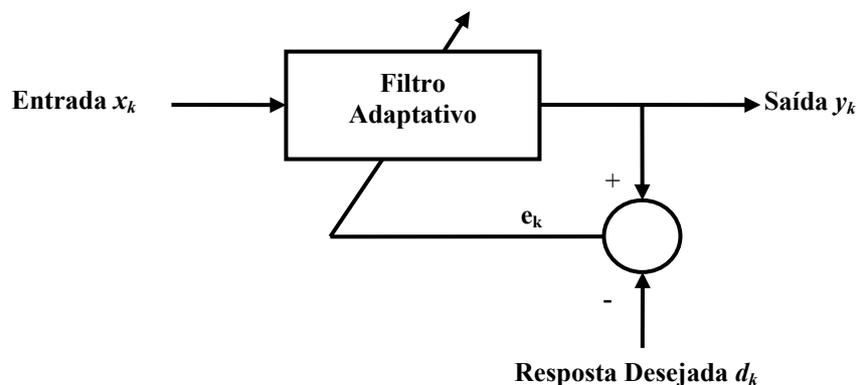


Figura - 2.3 - Representação Simbólica de um filtro adaptativo.

2.3 Filtro linear e adaptativo

A estrutura de um filtro linear é ilustrada na figura 2.4 e consiste de uma linha de atraso com derivação ou “tap” conectado para a entrada e, possivelmente, uma linha de atraso com derivação conectado à saída.

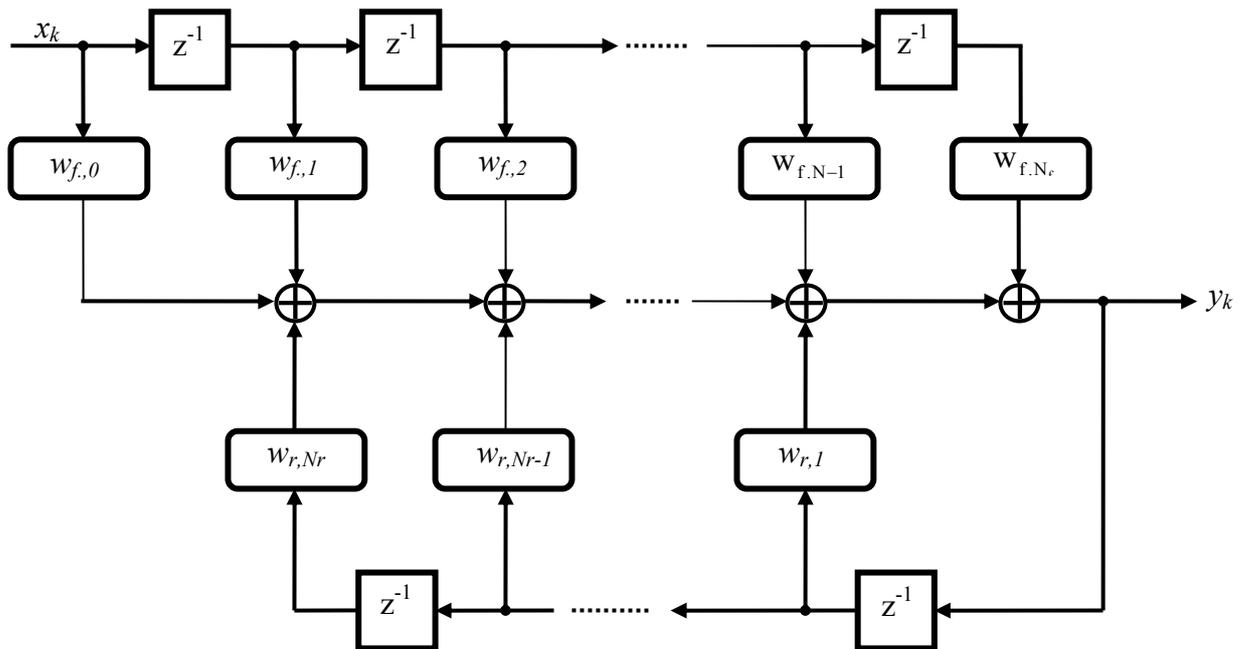


Figura - 2.4 -Estrutura de um filtro linear.

A saída do filtro é calculada pela soma ponderada das entradas com atraso e saída. Os coeficientes do filtro direto e reverso são chamados de pesos. Se os valores dos pesos são fixos, o filtro realiza uma equação da forma:

$$y_k - \sum_{i=1}^{N_r} w_{r,i} y_{k-i} = \sum_{i=0}^{N_f} w_{f,i} x_{k-i} \quad (2.1)$$

Os filtros lineares são básicos: *resposta finita ao impulso* (FIR) e *resposta infinita ao impulso* (IIR). Quando o FIR é excitado por um impulso na sua entrada, a resposta do filtro é diferente de zero por um período finito de tempo. Para o IIR, quando excitado por um impulso na sua entrada, a resposta é diferente de zero por um período infinito de tempo. No FIR todos os pesos $w_{r,i}$ são iguais a zero e no IIR pode ter $w_{r,i}$ diferente de zero. Qualquer sistema linear

e estável pode ser aproximado por um filtro FIR de “comprimento longo”. Os filtros FIR com pesos finitos são sempre estáveis e não é o caso dos filtros IIR.

2.4 Solução otimizada para filtros adaptativos lineares

Uma propriedade do sistema linear e adaptativo é que o *erro médio quadrático* da saída do sistema é quadrático nos pesos. Conforme Plett (1998) essa propriedade afirma que existe uma e somente uma única solução mínima (ótima) quando a função custo é mínima, aplicando o método do gradiente descendente há convergência para a solução. Uma outra propriedade é que a solução pode ser tratada matematicamente, dependendo de certas informações disponíveis sobre as estatísticas da entrada e da resposta desejada e essa solução é conhecida como *solução Wiener*.

Vamos apresentar certas propriedades sem qualquer prova, sendo os detalhes apresentados por Widrow (1996). Seja $(\phi_{xd})_n$ a função de correlação cruzada entre a entrada x_k e a resposta desejada d_k , e $(\phi_{xx})_n$, a função de entrada de autocorrelação, então a solução irrestrita, $W_{\text{ÓTIMO}}(z)$ é:

$$W_{\text{ÓTIMO}}(z) = \frac{\Phi_{xd}(z)}{\Phi_{xx}(z)} \quad (2.2)$$

onde $\Phi_{xd}(z)$ e $\Phi_{xx}(z)$ são as transformadas-z de $(\phi_{xd})_n$ e $(\phi_{xx})_n$, respectivamente. Notar que esta solução permite para o filtro $W_{\text{ÓTIMO}}$ que não seja causal. A solução de Shannon-Bode para filtro ótimo e causal é:

$$W_{\text{CAUSAL}}^{\text{ÓTIMO}}(z) = \frac{\Phi_{xd}(z)}{\Phi_{xx}^+(z) \Phi_{xx}^-(z)} \quad (2.3)$$

onde $\Phi_{xx}(z) = \Phi_{xx}^+(z)\Phi_{xx}^-(z)$ e $\Phi_{xx}^+(z)$ tem todos os pólos e zeros de $\Phi_{xx}(z)$ os quais estão dentro do círculo unitário no plano-z.

2.5 Modelagem adaptativa da planta sem perturbação.

O processo de modelagem adaptativa fica simplificado quando se conhece a dinâmica da planta. Nesse trabalho a planta é considerada: estável, linear e invariante no tempo. Na modelagem do sistema em tempo discreto, obtidas as amostras da saída da planta, um algoritmo de adaptação ajusta automaticamente os parâmetros do controlador, a fim de, produzir uma saída amostrada a qual é um casamento muito próximo da saída da planta. A figura 2.5 a seguir apresenta uma modelagem sem ruído e perturbação.

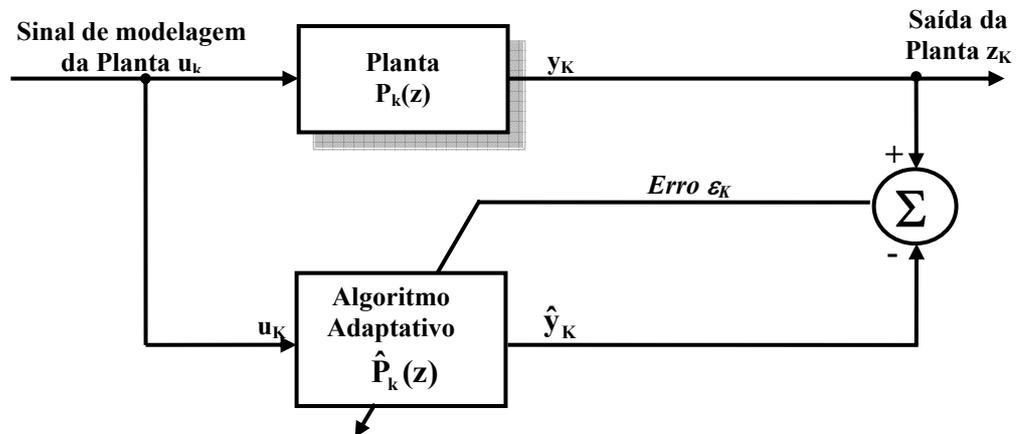


Figura - 2.5 – Esquema de modelagem da planta sem ruído e perturbação.

2.6 Modelagem adaptativa da planta com perturbação.

Quando a planta e o modelo da planta produzem sinais de saídas similares, a resposta ao impulso do modelo adaptativo é uma boa representação da resposta ao impulso da planta Widrow (1996). A seguir é apresentado na figura 2.6 o esquema de modelagem adaptativa de uma planta submetida à perturbação.

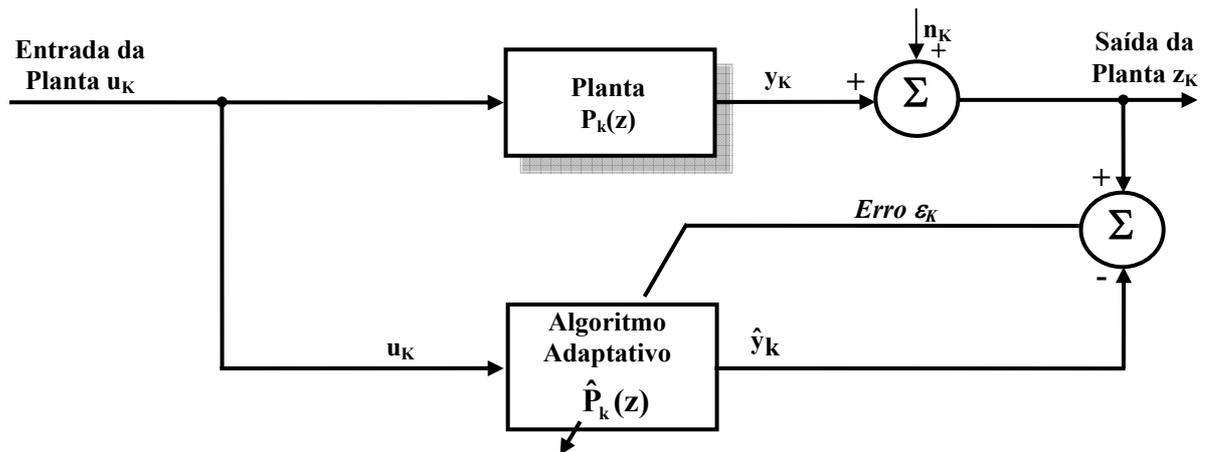


Figura - 2.6 - Modelagem adaptativa de uma planta submetida a ruído e perturbação.

Denominando-se de $P_k(z)$ a transformada-z da planta e $\hat{P}_k(z)$ sendo a transformada-z do modelo da planta e considerando que todos os sinais são amostrados, então o modelo opera somente com as amostras de entrada e saída da planta. Da figura 2.6, a perturbação da planta é representada como uma entrada e como um sinal aditivo aplicado a saída da planta e será referida daqui para frente como perturbação da planta representada por n_k . A resposta dinâmica da planta é dada por y_k e a saída da planta é dada por z_k . Daí pode-se escrever:

$$z_k = y_k + n_k, \quad (2.4)$$

onde k é o índice de tempo discreto.

A função de transferência da planta é $P_k(z)$. Sua resposta ao impulso é um vetor na forma:

$$P = [p_1 p_2 \dots p_3]^T \quad (2.5)$$

As componentes deste vetor têm valores correspondentes aos respectivos impulsos da resposta impulsiva da planta. Sendo a entrada da planta u_k , a resposta dinâmica da saída da planta y_k é a convolução da entrada da planta com a sua resposta ao impulso e pode ser escrito como:

$$y_k = u_k * p_k \quad (2.6)$$

A transformada-z, desta relação, fica:

$$Y(z) = U(z)P_k(z) \quad (2.7)$$

Os parâmetros do modelo são ajustados pelo algoritmo de adaptação a qual provoca um erro ε_k a ser minimizado. A resposta desejada para o modelo adaptativo é z_k e a resposta ao impulso de $\hat{P}_k(z)$ é representada por:

$$\hat{P} = [\hat{p}_{1k} \hat{p}_{2k} \dots \hat{p}_{nk}]^T \quad (2.8)$$

Os filtros adaptativos convergem para aproximar a solução de Wiener quando eles são adaptados, ou seja, quando ocorre a minimização do erro médio quadrático do erro de saída. Os modelos adaptativos podem ser gerados para obter uma representação muito próxima de plantas desconhecidas. A diferença entre $P_k(z)$ e $\hat{P}_k(z)$ será chamada de descasamento. Segundo Widrow (1996), existem três fontes de descasamentos, a saber:

1. Tanto o modelo como a planta tem comprimento infinito na resposta ao impulso;
2. A não adequação do modelo devido ao sinal de entrada da planta não é capaz de excitar persistentemente todos os modos da planta. Esta dificuldade pode ser contornada adicionando um sinal de espectro amplo à entrada da planta. A desvantagem desta adição é a introdução de perturbação adicional à planta do sistema de controle;
3. Ruído nos pesos do modelo devido ao processo adaptativo. Grandes quantidades de dados são utilizadas para o processo adaptativo, a fim de determinar os pesos dos parâmetros de adaptação do modelo. Para que não haja ruído nos pesos, o processo de adaptação não pode ser rápido e deve utilizar uma quantidade infinita de dados em tempo real e uma adaptação infinitamente lenta e longa. Adaptação rápida resulta em ruído nos pesos do P_k .

2.7 Desempenho idealizado na modelagem

A seguinte análise de modelagem adaptativa é mostrada a seguir. Supondo que todos os modos da planta são excitados por um sinal na entrada da planta, o qual é estatisticamente

estacionário. Esse sinal é de excitação persistente segundo Aguirre (2007) e segundo Widrow e Walsh (1996). O processo de adaptação é assumido como convergente e nenhum ruído é presente nos pesos. Para uma entrada u_k comum à planta e ao modelo da planta, \hat{y}_k é a resposta da saída do modelo da planta que é uma estimativa da resposta dinâmica da saída y_k . Quando ocorre a convergência, a função de transferência do modelo adaptativo será $\hat{P}_k(z)$. Pode-se escrever a solução de Wiener para modelo otimizado da planta:

$$\hat{P}^*(z) = \frac{\Phi_{uz}(z)}{\Phi_{uu}(z)}, \quad (2.9)$$

onde $\Phi_{uz}(z)$ é a transformada da função de correlação cruzada da função $\phi_{uz}(k)$,

$$\begin{aligned} \phi_{uz}(k) &= E[u_j z_{j+k}] \\ \Phi_{uz}(z) &= \sum_{K=-\infty}^{\infty} \phi_{uz}(k) z^{-k}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

e onde $\Phi_{uu}(z)$ é a transformada-z da função de autocorrelação $\phi_{uu}(k)$, como segue:

$$\begin{aligned} \phi_{uu}(k) &= E[u_j u_{j+k}] \\ \Phi_{uu}(z) &= \sum_{K=-\infty}^{\infty} \phi_{uu}(k) z^{-k}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

Supondo que a perturbação da planta n_k não é correlacionada com a entrada da planta u_k e com a resposta dinâmica da saída y_k , tais como:

$$\Phi_{uz}(k) = E[u_{j+k} + n_{j+k}] = \phi_{uy}(k), \quad (2.12)$$

Transformando ambos os lados,

$$\Phi_{uz}(z) = \Phi_{uy}(z). \quad (2.13)$$

Substituindo-se na equação x, temos:

$$\hat{P}^*(z) = \frac{\Phi_{uy}(z)}{\Phi_{uu}(z)}, \quad (2.14)$$

A transformada $\Phi_{uy}(z)$ pode ser expressa em termos de $\Phi_{uu}(z)$ e a função de transferência $P_k(z)$. A relação fica:

$$\Phi_{uy}(z) = \Phi_{uu}(z)P_k(z), \quad (2.15)$$

Substituindo-se na expressão y:

$$\hat{P}^*(z) = P_k(z). \quad (2.16)$$

Segundo a expressão 2.16, o modelo da planta é adaptado e converge para a planta mesmo com a presença da perturbação na planta. A convergência ocorre com a minimização do erro de saída, através do método dos mínimos quadrados. O modelo adaptado tem resposta similar à resposta da planta. Este resultado é obtido pela condição imposta “que não há qualquer correlação entre o sinal de entrada da planta e a perturbação da planta”. A resposta desejada na saída do modelo é y_k , mas como esse ponto certamente está indisponível, então o sinal disponível para treinamento no processo adaptativo pode ser a saída da planta z_k . O treinamento de z_k , segundo a expressão 2.14 produz a mesma solução de Wiener, minimização do erro pelo método dos mínimos quadrados se treinasse a saída da planta y_k .

2.8 Princípio do controle inverso e adaptativo

O controle inverso e adaptativo é utilizado em controladores, filtros etc... No passado, há quarenta anos, o controle inverso ganhou desenvolvimento nos laboratórios de Bernard Widrow da universidade de Stanford. Foram feitos trabalhos e estudos sobre o assunto. (WIDROW, 1986), (OLIVER, 1996), (ASTRÖM; WITTENMARK, 1995), (NAZARUDDIN ; WALUYO; HADISUPADMO, 2003), (WIDROW; WALACH, 1996) e (AZIZ; HUSSAIN; MUJTABA, 1988). O controle inverso é um modelo projetado por um filtro adaptativo, cuja função de transferência é a função inversa da função de transferência da planta. Esse modelo quando associado em cascata com a planta do processo, a associação terá uma resposta muito próxima ao sinal de comando na entrada. O controlador sendo adaptativo, se ajusta para otimizar a resposta dinâmica da planta. A realimentação é usada somente no processo de adaptação.

Diferente dos controles convencionais, o controle inverso e adaptativo usa a realimentação não para controlar os sinais fluindo do sistema, mas para controlar os parâmetros das variáveis do sistema, quando adaptação é feita “em operação”. Tanto o controle convencional como o controle adaptativo, ambos usam a realimentação para minimizar o erro de saída da planta. Quando a característica da planta é variável no tempo ou não estacionária, é necessário projetar um controlador que varia os seus parâmetros com a planta com o objetivo de minimizar o erro médio quadrático na saída da planta.

Quando a característica da planta é conhecida, então é possível determinar o melhor controlador, mas quando a planta é desconhecida então, o processo inicial será identificar a planta. Um simples processo para identificação da planta, nesse caso é primeiro montar uma base de dados. Dispondo dos dados os quais contém informações sobre as características da planta, o passo seguinte será estimar as características da planta no tempo através da mineração desses dados e obter um modelo que seja cópia perfeita da planta. Uma alternativa, caso não se disponha dessa base de dados é usar um observador da planta, cuja finalidade é montar essa base de dados para a implementação do modelo e que seja uma cópia perfeita da planta. O controlador da planta será uma cópia do modelo inverso da planta.

Em suma, o princípio do controle inverso e adaptativo é excitar a planta com um sinal produzido pelo controlador cuja função de transferência é o inverso da função de transferência da planta. A figura a seguir 4.2 apresenta uma arquitetura que opera nesse conceito de controle inverso e adaptativo.

O objetivo desse sistema é que a saída da planta acompanhe “siga” ao sinal de comando da entrada. Quando a planta é desconhecida, o processo de adaptação do controlador é realizado por um algoritmo adaptativo o qual recebe um sinal de *erro de adaptação*. A diferença entre a saída da planta e o comando de entrada é que gera o erro de adaptação. A realimentação do erro de adaptação é utilizada para o ajuste dos parâmetros de adaptação do controlador. O processo de adaptação só termina quando se consegue a minimização do erro médio quadrático do erro de adaptação.

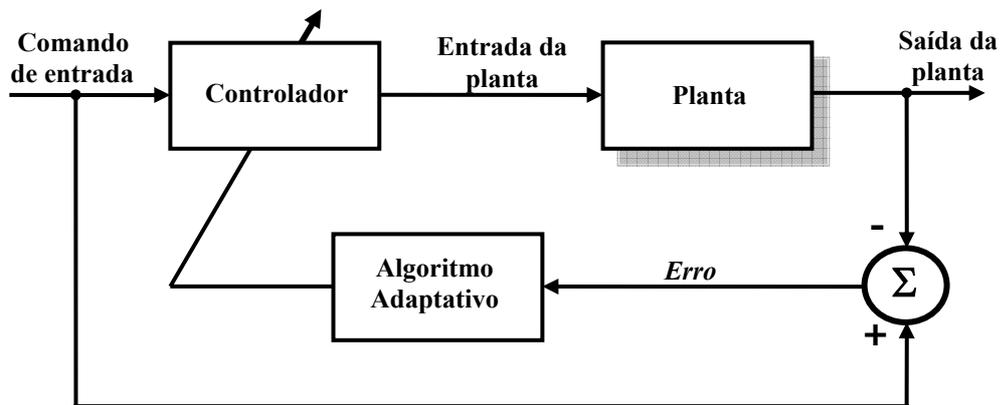


Figura - 2.7 - Conceito básico do controle inverso e adaptativo.

Comparando-se as figuras 2.1 e 2.7, pode-se observar que a minimização do erro médio quadrático é realizada por conceitos distintos. No primeiro caso, a saída da planta é realimentada para a entrada do controlador juntamente com o valor desejado do comando de entrada. Em suma, o controlador usa o sinal de erro diretamente no processo de realimentação para controlar a planta. No segundo caso, o sinal do erro é usado no processo de realimentação para ajustar os parâmetros do controlador. Em suma, o controlador não usa uma realimentação direta do erro para controlar a planta, mas para ajustar os parâmetros do controlador. O primeiro caso o controle é conhecido como retroalimentação “feedback” e o segundo caso o controle é conhecido como antecipatório “feedforward”. Em ambos os casos a realimentação é usada para garantir uma resposta precisa do sistema.

Se o processo de adaptação do controlador resulta num erro de adaptação muito pequeno, então o controlador é muito próximo da função inversa da planta. Quando o controlador é exatamente a função inversa da planta, a cascata do controlador com a planta resultará numa função de transferência cujo ganho é unitário.

Algumas condições nesse trabalho foram restringidas para a implementação do controlador inverso e adaptativo. São elas:

- 1) A planta é linear e estaticamente estacionária e SISO;
- 2) O controlador é linear estaticamente estacionário e tem convergência;
- 3) O sistema é de mínima-fase.

Conforme Widrow e Walsh (1996), segundo Plett (1996) e segundo Ogata (1998) um sistema é de mínima-fase quando a sua função de transferência tem todos os zeros dentro do

círculo unitário. A função inversa produzirá pólos também dentro do círculo unitário no plano- z .

Na teoria de controle, um sistema é dito ser de “mínima-fase” se o seu inverso é causal e estável. Ao contrário, um sistema é dito ser de não mínima-fase quando a sua função de transferência tem os zeros localizados do lado direito do semi-plano s ou fora do círculo unitário no plano z . O inverso da função é normalmente instável. Um sistema que é causal e estável e cujo inverso é causal e instável é chamado de “não mínima fase”. Um sistema quando é de “não mínima fase” terá na fase uma contribuição maior do que os sistemas de mínima fase embora a resposta das amplitudes sejam equivalentes segundo Widrow e Walsh (1996) e segundo Ogata (1998).

2.9 Modelagem inversa da planta sem perturbação

Na introdução desse capítulo foi apresentado um controlador inverso cuja configuração é do tipo controle antecipado “feedforward”. A figura a seguir 2.8 apresenta um esquema de como se obter o modelo inverso de $P(z)$ sem ruído e perturbação.

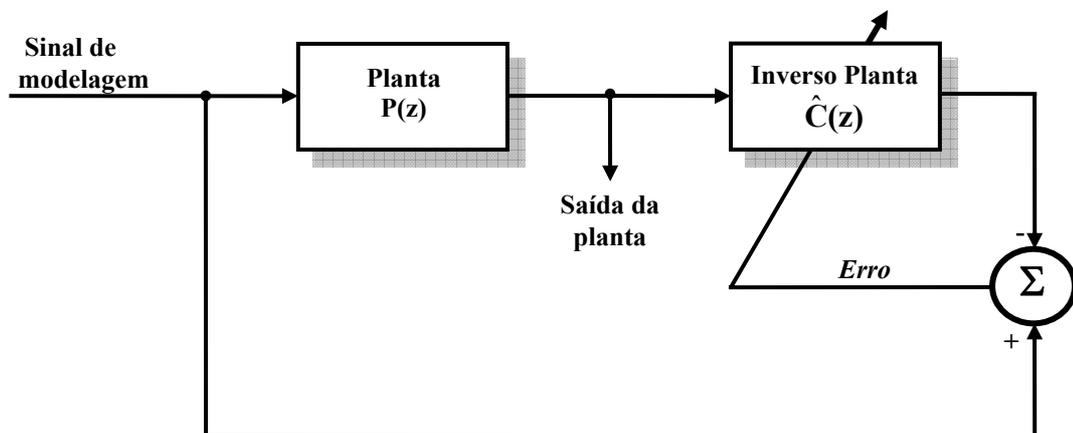


Figura 2.8- Esquema para formação do modelo inverso sem ruído e perturbação.

2.10 Modelo de referência

Um processo adaptativo é apresentado na figura 2.9, para a formação do modelo inverso atrasado $\hat{C}_k(z)$. O objetivo desse processo é obter um controlador $\hat{C}_k(z)$, que em cascata com a planta $P(z)$ resulta num sistema de controle cuja função de transferência final se aproxima da função de transferência $M(z)$ do modelo de referência. O esquema de

modelagem do inverso atrasado é um caso especial, onde o modelo de referência é um simples atraso com a função de transferência z^{-1} . Caso não exista atraso então $M(z)$ é unitário e a resposta na saída será imediata ao comando de entrada. A figura a seguir 2.9 mostra a formação do inverso com atraso.

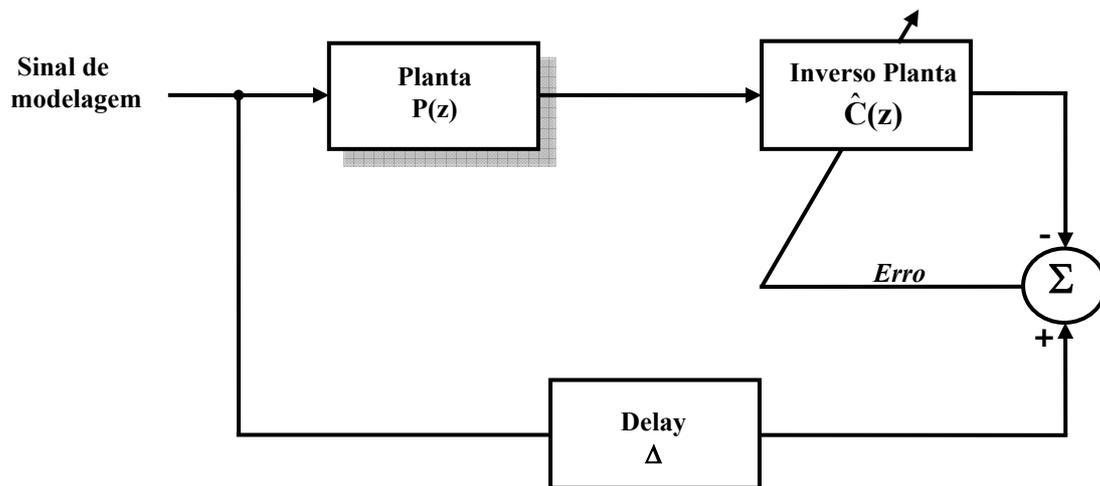


Figura 2.9 - Esquema para formação do modelo inverso com atraso.

2.11 Inverso das plantas com perturbações

O esquema apresentado na figura 2.8, não é um método correto para a formação da modelagem inversa da planta com perturbações, pois não responde muito bem quando submetido às perturbações na entrada. A perturbação no processo de adaptação na formação do inverso $\hat{C}_k(z)$, polariza a solução de Wiener e prevê a formação de um inverso próprio. A solução de Wiener sem perturbação é escrita como:

$$\hat{C}(z) = \frac{M(z)}{P_k(z)} \quad (2.17)$$

A transformada z da correlação cruzada entrada e saída da planta sobre a função de autocorrelação da entrada.

$$\hat{C}(z) = \frac{\Phi_{yd}(z)}{\Phi_{yy}(z)} \quad (2.18)$$

Como a perturbação na saída da planta é z_k , a solução de Wiener pode ser escrita como:

$$\hat{C}(z) = \frac{\Phi_{zd}(z)}{\Phi_{zz}(z)} \quad (2.19)$$

Uma vez a perturbação da planta é n_k não é correlacionada com d_k e z_k , a equação pode ser reescrita como:

$$\hat{C}(z) = \frac{\Phi_{yd}(z)}{\Phi_{yy}(z) + \Phi_{nn}(z)} \quad (2.20)$$

O segundo termo do denominador provoca uma polarização, tal que, para a perturbação da planta, temos:

$$\hat{C}(z) \approx \frac{M(z)}{P_k(z)} \quad (2.21)$$

O esquema de modelagem inversa a seguir, supera essa dificuldade de modelagem do inverso da planta com perturbação e é apresentada na figura 2.10. Um método para modelagem inversa da planta com perturbação pode ser realizado “em operação” (on line). Quando a planta é submetida às perturbações em seu processo de modelagem, então o processo para adaptação de $\hat{P}_k(z)$, deve ser bastante lento para que os ruídos nos pesos sejam pequenos. Um nível baixo nos ruídos dos pesos de $\hat{P}_k(z)$, acarreta também um nível baixo nos ruídos dos pesos de $\hat{C}_k(z)$. A figura 2.10 apresenta o esquema de modelagem inversa da planta com perturbação onde o ajuste nos pesos de $\hat{C}_k(z)$, é realizado “em operação”(on line).

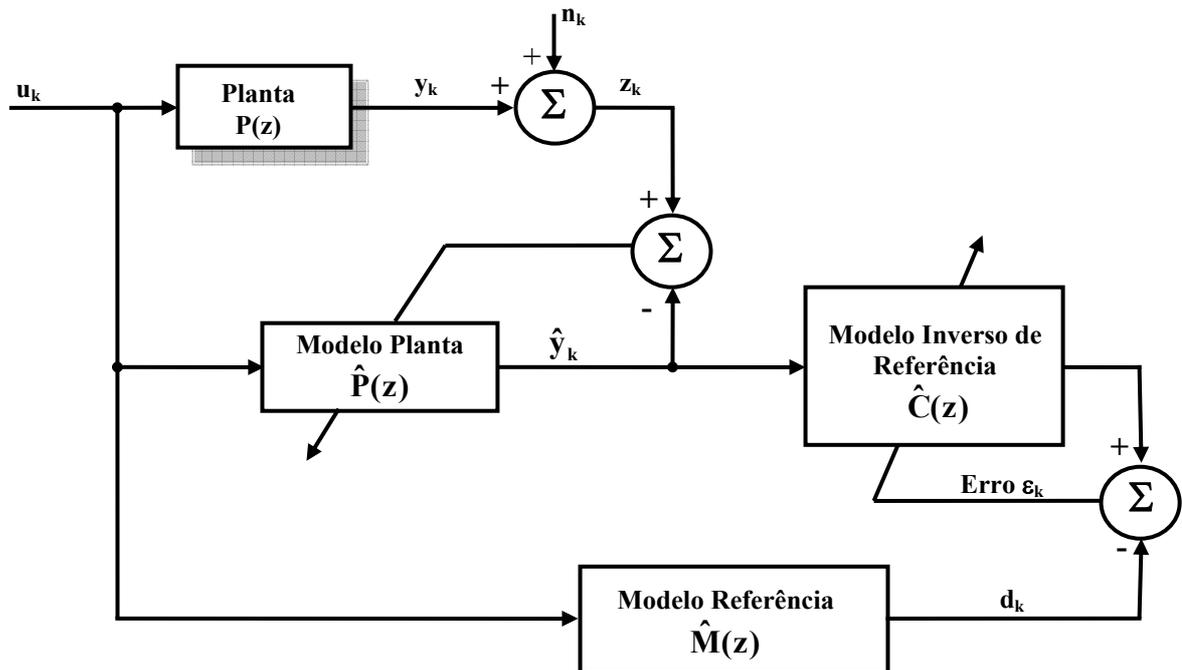


Figura 2.10 - Método para modelagem inversa da planta com perturbação.

No método de modelagem inversa da referência Widrow (1996) o treinamento de cada um dos modelos será feito “fora do processo” e deve ser feito de forma simultânea, pois a operação é contínua e realizada “em operação” (on line). Ao mesmo tempo em que se obtém o modelo da planta $\hat{P}_k(z)$, será também obtido o modelo inverso $\hat{C}_k(z)$ e, portanto, os processos adaptativos simultâneos não permitem a existência de atrasos entre as formações dos modelos da planta e do inverso da planta. Quando ocorrem alterações em $\hat{P}_k(z)$, o processo de adaptação “fora do processo” deve responder instantaneamente e esse muito rápido é porque simultaneamente tem que realizar as alterações nos parâmetros do modelo $\hat{C}_k(z)$.

Conforme a figura a seguir, o processo de adaptação “fora do processo” utiliza-se uma cópia do modelo direto $\hat{P}_k(z)$, o qual recebe o sinal de modelagem e a sua saída e aciona o modelo $\hat{C}_k(z)$. O mesmo sinal é usado para acionar o modelo de referência $M(z)$ que na aplicação se trata de um atraso Δ . O sinal da diferença entre a saída do modelo $\hat{C}_k(z)$ e o modelo de referência é usado para adaptar o modelo $\hat{C}_k(z)$. O processo só termina quando $\hat{C}_k(z)$ estiver adaptado pela minimização do erro médio quadrático do erro de adaptação. O processo para obter $\hat{P}_k(z)$, é apresentado na figura 2.11. O sinal de modelagem pode ser um ruído branco ou sinal de largo espectro, a fim de proporcionar ótimos resultados na adaptação.

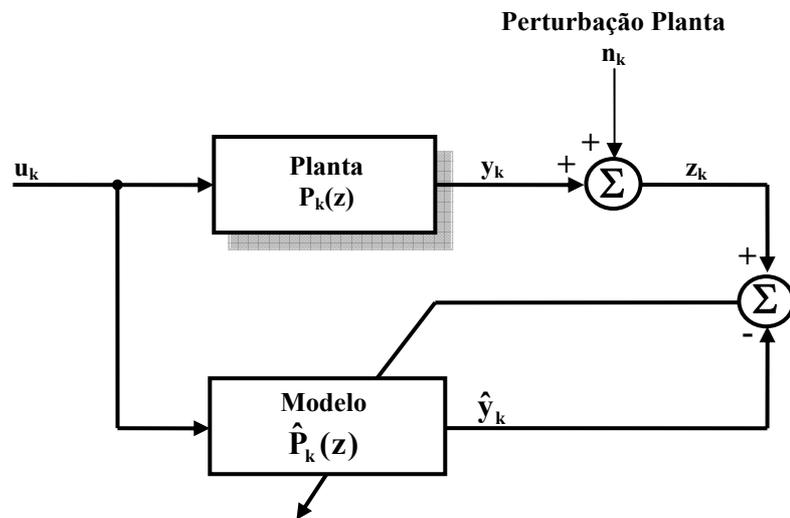


Figura 2.11 - a) Modelo direto da planta com perturbação.

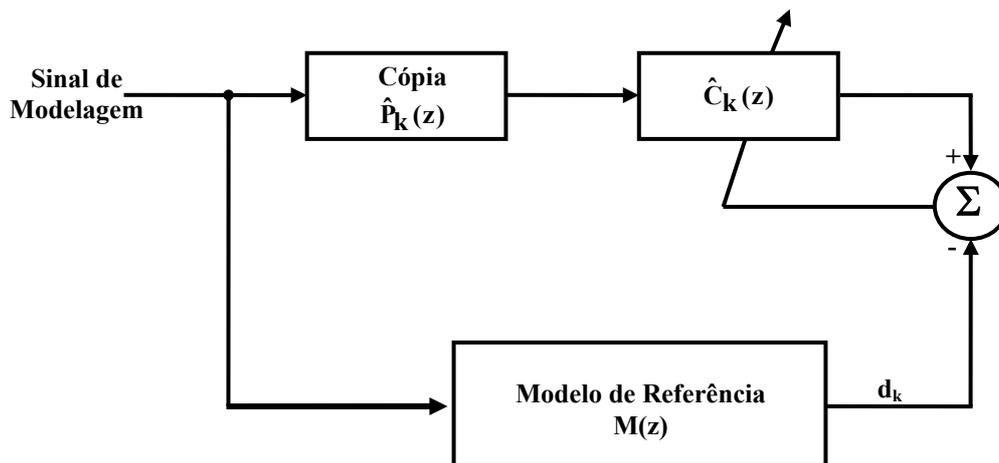


Figura 2.11 - b) Processo de adaptação "fora do processo" do modelo inverso da planta.

2.12 Uso de sinais estatísticos de entrada para modelagem de plantas desconhecidas: Uso de sinal aditivo para cobertura da faixa de frequência - Dither

Para se obter um modelo casado com uma planta desconhecida numa específica faixa de frequências, a entrada da planta u_k necessita ter energia espectral sobre esta faixa de frequências. Segundo Widrow (1996) e Plett (1998) se a entrada da planta tem uma densidade espectral uniforme sobre uma frequência de interesse, então o erro entre o modelo desejado e obtido é pequeno nessa faixa de frequência. Quando na entrada da planta u_k , o sinal não tem densidade espectral uniforme em todas as frequências onde precisa de um bom ajuste para o

casamento do modelo com a planta, então um descasamento será obtido entre o modelo e a planta.

Uma outra dificuldade que aparece no processo de adaptação é quando o sinal da entrada da planta u_k não é estacionário. Segundo Widrow (1996) e Aguirre (2007), os melhores resultados na modelagem de sistemas são obtidos quando a entrada da planta é excitada por um sinal estacionário.

Quando o processo de adaptação é realizado “em operação” (on-line), essa modelagem se torna difícil em função da excitação, pois a saída do controlador pode gerar sinais não estacionários para a planta. Essa dificuldade de adaptação ocorre quando o sinal de entrada da planta u_k não tem conteúdo espectral dinamicamente rico, como por exemplo, um sinal do tipo degrau, o qual permanece constante no nível contínuo por um longo tempo e em seguida alterna para outro valor contínuo por mais um outro longo período de tempo e assim por diante. Embora o sinal seja esporádico e infrequente, nos instantes que ocorrem as comutações dos sinais requerem do sistema de controle adaptativo uma resposta precisa. Devido o sinal apresentar características de um sinal contínuo por um longo tempo, o conteúdo espectral é pobre e, portanto, um péssimo resultado do processo de modelagem (WIDROW; WALASH, 1996).

Segundo Aguirre (2007) um degrau unitário é um sinal persistente e de ordem unitária, em suma, quando um sistema é excitado por um degrau unitário, consegue-se estimar apenas um único parâmetro do sistema, por exemplo, o ganho em corrente contínua do sistema. Quando se utiliza o degrau para identificação de sistemas, então o período transitório é utilizado para essa finalidade. No caso do ruído branco com variância σ^2 esse é um sinal persistentemente excitante em todas as ordens, pois é um sinal que tem densidade de potência espectral nas n distintas frequências.

Certamente o ruído branco serve para contornar a dificuldade de estacionariedade do controlador. O dither¹ representa esse sinal aleatório e será aplicado à entrada da planta. O sinal aditivo para cobertura da faixa de frequência não coberta pelo sinal de modelagem da planta “dither”, doravante chamado de ruído aditivo tem a vantagem de ter controle sobre as suas propriedades estatísticas, mas tem a desvantagem, segundo Widrow (1996), de introduzir ruído ao processo de controle. O objetivo deste trabalho é encontrar um ótimo modelo casado com a planta. O passo seguinte é a escolha do espectro e potência do ruído.

Dither¹ – É um sinal aleatório de espectro largo que é aditivo a um sinal de modelagem, a fim de cobrir a faixa de frequências não excitadas pelo sinal de modelagem.

No caso de laminadores, a planta deve operar com o material que passa pelo “gap” dos cilindros de apoio. A resposta do controlador será devido às: 1) variações da espessura/dureza de entrada, o qual é um sinal de baixa frequência e 2) pela excentricidade dos cilindros de apoio, um sinal periódico de baixa frequência proporcional à rotação dos cilindros. Dessa forma ficam definidas as frequências ou faixa de frequência do sinal a ser aplicada a energia espectral na planta. A seguir, através de esquemas de modelagem propostos por Widrow (1996) três exemplos de esquemas de adaptação “em operação”.

A figura 2.12 mostra o esquema A o qual será usado, nesse trabalho, para a adaptação do modelo da planta “fora de operação” (off-line).

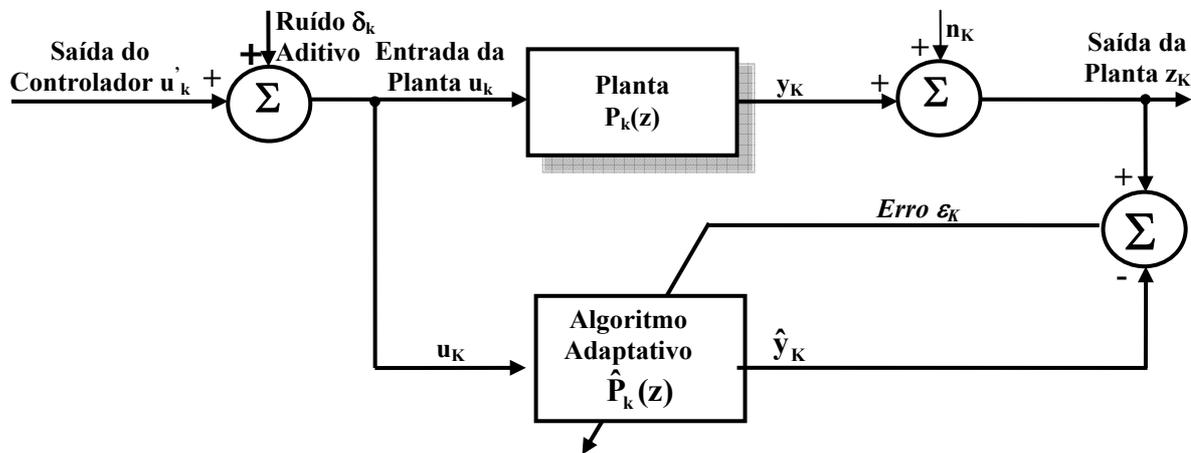


Figura - 2.12 – Esquema A com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência.

O esquema A, segundo Widrow (1996) e conforme a figura 2.12, o ruído aditivo “dither” δ_k é adicionado ao sinal de saída do controlador u'_k , para formar o sinal de entrada da planta u_k . Este esquema é bastante efetivo se o sinal de saída do controlador u'_k for estocástico e estacionário e adicionado ao ruído “dither” o qual cobre o espectro desejado para u_k . Mas se o sinal da saída do controlador não for estacionário, pode afetar o processo de modelagem adaptativa e resultar num modelo descasado, cujo erro médio quadrático será grande. O processo de adaptação só termina no esquema A, quando o erro e_k é mínimo e igual à potência da perturbação na saída da planta. Para o processo de adaptação do modelo realizado “em operação” é muito difícil evitar que a saída do controlador não produza um sinal não estacionário e com a média diferente de zero e daí seguem os esquemas alternativos B e C.

Os esquemas B e C usam o ruído aditivo “dither” exclusivamente para efetuar o processo de modelagem adaptativa da planta. O objetivo é garantir que a entrada da planta receba um sinal conhecido cujas propriedades sejam asseguradas, ou seja, estacionária e estocástica. Como o controlador produz uma saída não estacionária, o procedimento é não

incluir essa saída em todo o processo de modelagem. A figura a seguir 2.13 mostra o esquema de modelagem B.

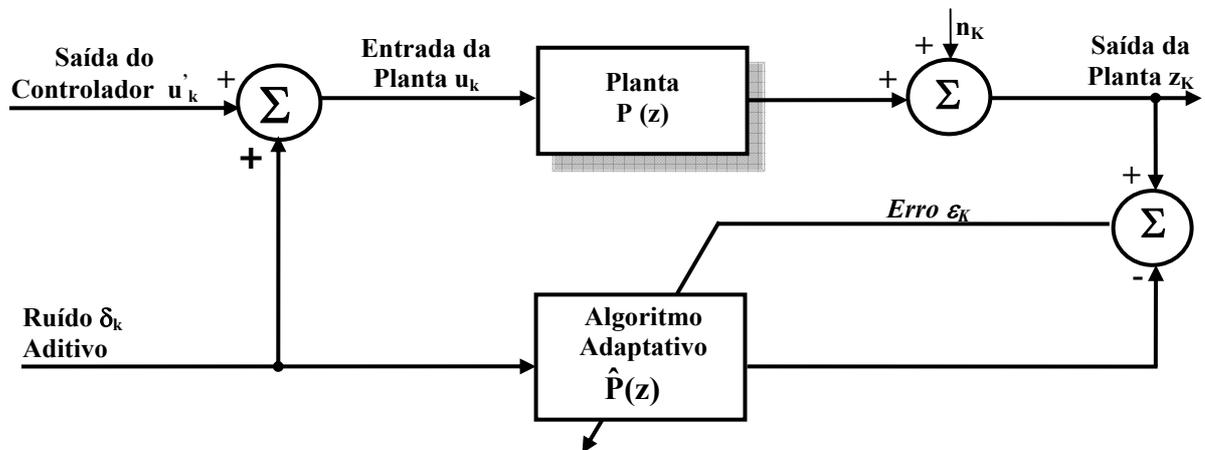


Figura - 2.13 - Esquema B com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência..

Usando o esquema *B*, o ruído aditivo “dither” é adicionado ao sinal da entrada da planta u_k e exclusivamente excita o modelo da planta. No esquema *B* quando o erro médio quadrático é mínimo, pode-se dizer que o erro de adaptação é igual à potência da saída do controlador u'_k após se propagar através na planta e somada à potência da perturbação da planta. Valores significativos no erro ε_k implicam em aumento no ruído nos pesos do modelo adaptativo e conseqüentemente haverá um descasamento. Caso contrário, o esquema *B* seria excelente para modelagem da planta. Para melhorar o esquema *B*, a proposta é o esquema *C*, cuja principal virtude apesar do aumento da complexidade desse esquema é a redução no ruído dos pesos enquanto se efetua o processo de adaptação, na mesma taxa de convergência e com a mesma amplitude do ruído aditivo do esquema *B*. A figura a seguir 2.14 apresenta o esquema *C*.

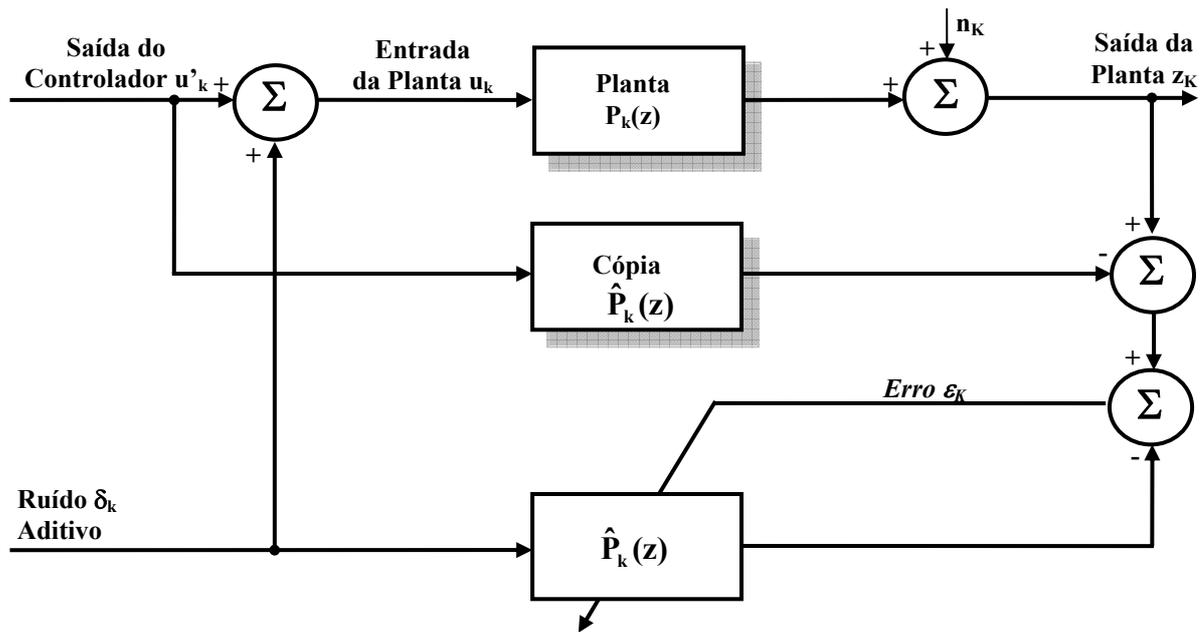


Figura - 2.14 - Esquema C com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência.

O esquema C apresenta todas as qualidades do esquema B sem o ônus do incremento do erro médio quadrático de adaptação. O bloco inferior do diagrama de bloco é um filtro adaptativo. A sua função de transferência é $\hat{P}_k(z)$ e sua resposta ao impulso é o vetor $\hat{P}_k(z)$. Ele desenvolve a mesma solução convergente de minimização do erro de adaptação pelo método dos mínimos quadrados também conhecida como solução de Wiener e a diferença básica dos esquema B é a eliminação do efeito da propagação da saída controlador u'_k na planta. O ruído aditivo “dither” é aplicado somente no modelo $\hat{P}_k(z)$ e sua saída não afeta a solução de Wiener, pois não há correlação com a saída do controlador u'_k . A inclusão do filtro há uma conseqüente minimização do erro médio quadrático do erro de adaptação ε_k . O esquema C pode ser redesenhado como mostrado na figura 2.15 a seguir

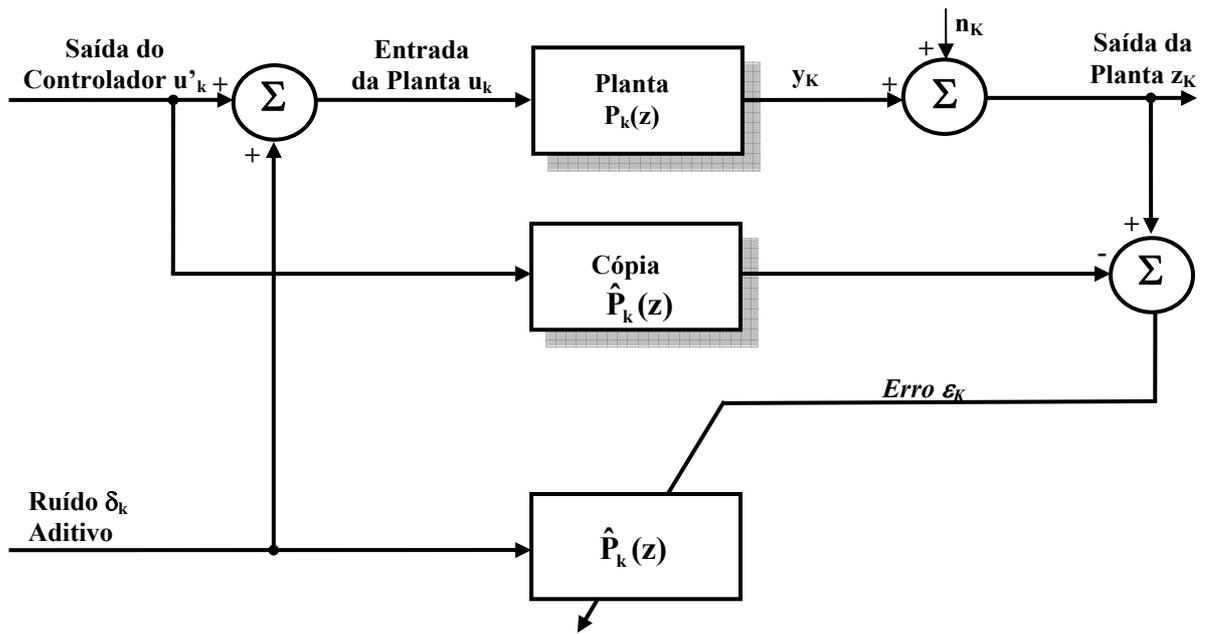


Figura - 2.15 - Esquema C com ruído aditivo para cobertura da faixa de frequência uma forma de representação alternativa .

3. REDES NEURAIIS – ANFIS – SISTEMA DE INFERÊNCIA NEBULOSO.

Nesse capítulo são mostradas as redes neurais combinadas com o sistema de inferência nebuloso para adaptações e modelagens de sistemas. Algumas aplicações das redes neurais na modelagem, por exemplo, das propriedades mecânicas de bobinas a quente (GIORNI; SILVA; SILVEIRA, 2008). São apresentados os modelos nebulosos segundo Takagi-Sugeno, (1985) e segundo Tsukamoto (1979). Para a modelagem da planta o modelo escolhido é o modelo de arquitetura neuro-nebulosa apresentado por Jang (1997), cujo acrônimo é ANFIS, o qual é um sistema adaptativo, neural de inferência nebulosa. É apresentada também a inversão do modelo nebuloso proposto por Babůska e os diagramas de blocos da planta com o modelo nebuloso para treinamento e aprendizagem do modelo invertido da planta. Por fim é apresentada uma ferramenta estatística multivariada por agrupamento para sintonia das funções de pertinências das regras nebulosas.

3.1 Redes neurais e sistemas de inferência nebulosa na aplicação de filtros adaptativos e não lineares.

As redes adaptativas podem ser aplicadas para modelagem, tomada de decisão, controle automático de processos, processamento de sinais, enfim numa grande variedade de aplicações (EVANS; KARWOWSKI; WILHELM, 1989), (MENOZZI; CHOW, 1993), (MCCUSKER, 1990), (FREEMAN; SKAPURA, 1991), (LIN, 1991), (SIMPSON, 1996), (TANAKA, 1993), (NAZARUDDIN; WALUYO; HADISUPADMO, 2003), (GUPTA, NIKIFORUK, 1993) e (JAMSHIDI et al., 1997). As redes adaptativas são equivalentes, segundo Jang, Sun e Mizutani (1997) ao sistema de inferência nebulosa (KOSKO; 1992), (KOSKO, 1997), (KEVIN, 1990), (KASABOV, 1996), (PEDRYCZ, 1989), (ZADEH, 1965), (ZADEH, 1973), (ZADEH, 1975), (DUBOIS; PRADE, 1978), (DUBOIS; PRADE, 1978), (DUBOIS; PRADE, 1980) e (PINHEIRO; GOMIDE, 1999) e (PINHEIRO; GOMIDE, 2000). A arquitetura ANFIS foi proposta por (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997), como uma rede adaptativa baseada no sistema de inferência nebulosa, que identifica um conjunto de parâmetros através de uma regra de aprendizagem híbrida. Através do método do retropropagação e do cálculo da direção do vetor gradiente descendente combinado com o método dos mínimos quadrados, o ANFIS é uma ferramenta bastante efetiva na modelagem de processos (JANG, 1995). A arquitetura do ANFIS encontra facilidades em representar

ambos os modelos nebulosos (SUGENO; TAKAGI, 1985) e (TSUKAMOTO, 1979) em (JANG; SUN; MIZUTANO, 1997). Pode representar o modelo nebuloso (MANDANI, 1974) com certa limitação do ANFIS com relação ao esquema de transformar variáveis nebulosas em variáveis exatas, conhecido como “defuzzificação”.

A rede é composta por nós com funções específicas, onde a regra de aprendizagem do ANFIS é baseada na otimização pelo gradiente descendente e seguindo o mesmo procedimento igual das redes neurais sendo também do tipo antecipado "feedforward". Pode-se descrever o ANFIS, como sendo Sistema de Inferência adaptativo neuro nebulosa. Segundo Jang (1997), o ANFIS tem melhor desempenho, quando a sua arquitetura é equivalente ao modelo nebuloso (SUGENO; TAKAGI, 1985) de *primeira-ordem*. Cabe aqui uma definição sobre o modelo nebuloso (SUGENO; TAKAGI, 1985), conhecido como modelo TSK proposto por Sugeno-Takagi, (1985). O desenvolvimento do modelo foi gerar regras nebulosas a partir de um conjunto de dados. Uma regra típica no modelo nebuloso Sugeno-Takagi (1985) tem a forma:

$$\text{If } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = f(x,y) \quad (3.1)$$

onde A e B são conjuntos nebulosos no antecedente, enquanto $z = f(x,y)$ é uma função exata no conseqüente. De uma maneira geral $f(x,y)$ é polinomial nas variáveis de entrada x e y, mas pode ser uma função, a qual apropriadamente pode descrever a saída do modelo dentro de regiões nebulosas especificadas pelo antecedente da regra. Quando $f(x,y)$ é um polinômio de primeira ordem, o sistema de inferência nebulosa resultante é chamado de modelo nebuloso (SUGENO; TAKAGI, 1985) de primeira ordem. Quando f é constante, o modelo é chamado de modelo nebuloso Sugeno-Takagi (1985) de ordem-zero, o qual pode ser entendido como um caso especial do sistema de inferência nebuloso baseado no modelo Mandani (1974), onde cada regra do conseqüente é especificada pelo nebuloso chamado de singleton¹. Segundo o modelo nebuloso Tsukamoto (1979), o conseqüente de cada regra nebulosa “if-then” é representado por um conjunto nebuloso com uma função de pertinência monotônica. A saída é um valor exato e é definida pela inferência em cada regra. A saída geral é uma média ponderada de saída de cada regra.

As figuras 3.1 a e 3.2, apresentam respectivamente os modelos nebulosos (SUGENO; TAKAGI; KANG, 1988) e (TSUKAMOTO, 1979).

¹**singleton** – Nebuloso singleton é um conjunto nebuloso cuja função de pertinência é igual a 1.

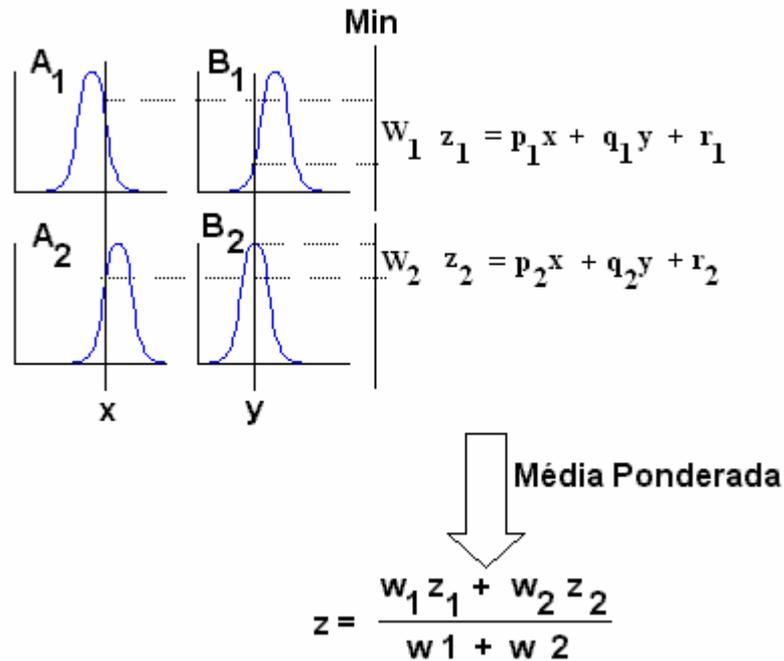


Figura 3.1 - Modelo nebuloso por Sugeno, Takagi e Kang (1988).

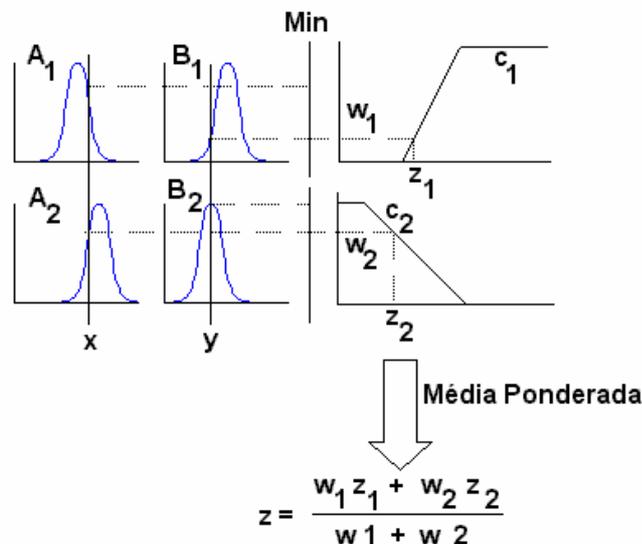


Figura 3.2 - Modelo nebuloso por Tsukamoto (1979).

Na arquitetura ANFIS, cada entrada é assumida ter funções de pertinências associadas. O espaço de entrada é n-dimensional é particionado em regiões nebulosas sobrepostas, cada das quais são governadas por regras nebulosas “*if-then*”, onde a parte premissa define a região nebulosa, e a parte conseqüente especifica a saída dentro dessa região. Consiste em regras nebulosas, as quais são mapeamentos locais ao invés de global. Para demonstração do algoritmo que opera com a arquitetura ANFIS, e de acordo com Jang, Sun e Mizutani (1997),

a figura 3.3 mostra um modelo segundo Sugeno-Takagi (1985) de primeira ordem, com duas entradas, uma saída e duas regras.

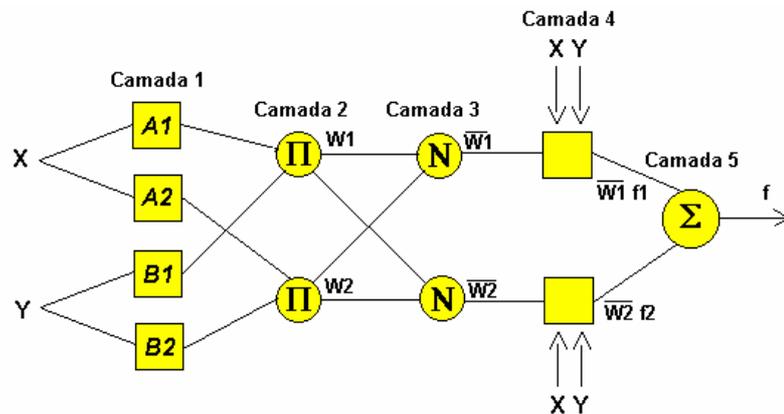


Figura - 3.3 – Modelo Sugeno-Takagi(1985) de 1.a ordem com 02 entradas X e Y e 01 saída com 02 regras.

Regra 1 : If x é A_1 and y é B_1 , then $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$ (3.2)

Regra 2 : If x é A_2 and y é B_2 , then $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$ (3.3)

Camada 1: Calcula o valor de pertinência para o parâmetro da premissa.

Cada nó i nesta camada é um nó adaptativo com a função nó:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ para } i = 1, 2 \quad (3.4)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ para } i = 3, 4. \quad (3.5)$$

onde x (ou y) é a entrada para o nó i e A_i (ou B_{i-2}) é a *variável lingüística* (tais como “pequeno”, “grande” associado a este nó, onde $O_{1,i}$ é o *grau de pertinência do conjunto nebuloso* A (A_1, A_2, B_1 ou B_2) e especifica o grau para o qual uma dada entrada x (ou y), satisfaz ao *quantificador* A .

3.1.1 Efeitos da Troca de Parâmetros

Aqui a função de pertinência de A , pode ser uma função de pertinência parametrizada e apropriada, tais como a função generalizada do tipo “sino”.

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (3.6)$$

onde $\{a_i, b_i, c_i\}$ são parâmetros do conjunto. Como os valores destes parâmetros se alteram, a função sino varia de acordo, exibindo várias formas de funções de pertinência para o conjunto nebuloso A . Os parâmetros nesta camada são referidos como *parâmetros dos antecedentes*.

Camada 2: Regras de disparo

Cada nó nesta camada é um nó fixo rotulado Π , cuja saída é o produto de todos os sinais que chegam:

$$O_{2,i} = \omega_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), i = 1,2. \quad (3.7)$$

Cada nó de saída representa o peso da “ação” da regra. Em geral, qualquer dos operadores T-norm, que realizam a operação AND, pode ser usado como a função nó nesta camada.

Camada 3: (Normalização) Relação da regra de disparo sobre o total das regras

Cada Nó, nesta camada é um Nó fixo rotulado N . O i ésimo nó, calcula a razão do i ésimo peso da regra em ação pela soma de todos os pesos das regras em ações.

$$O_{3,i} = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, i = 1,2. \quad (3.8)$$

Por conveniência, saídas desta camada são chamadas de **Peso em ação normalizado**.

Camada 4: : Parâmetros dos conseqüentes. Regressões lineares.

Cada nó i nesta camada é um nó adaptativo com a função nó:

$$O_{4,i} = \bar{\omega}_i f_i + \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i). \quad (3.9)$$

onde $\bar{\omega}_i$ é peso normalizado da regra em ação da camada três e $\{p_i, q_i, r_i\}$ é o conjunto de parâmetros deste nó. Parâmetros nesta camada são referidos como *parâmetros dos conseqüentes*.

Camada 5: Saída geral.

O único nó nesta camada é um nó fixo rotulado como soma (Σ), o qual computa a saída geral como a somatória de todos os sinais que chegam:

$$Saída\ geral = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \quad (3.10)$$

Assim se realiza uma rede neural adaptativa que é funcionalmente equivalente ao modelo nebuloso segundo Sugeno-Takagi (1985). Pode-se verificar na estrutura nesta rede adaptativa que não é única, pois se combinam as camadas três e quatro, para se obter uma rede equivalente com somente quatro camadas. A extensão do ANFIS do modelo (SUGENO; TAKAGI, 1985) para o modelo (TSUKAMOTO, 1979) é direta, como mostrada na figura 3.4, onde a saída de cada regra (f_i , $i = 1,2$) é induzida juntamente pela função de pertinência do conseqüente e pelo valor do peso.

Para o sistema de inferência nebulosa modelo (MANDANI, 1975), com a composição max-min, um correspondente ANFIS pode ser construído, se aproximações discretas são usadas para substituir o esquema de transformação das variáveis nebulosas em exatas “defuzzificação” pelo método do centróide. Concentraremos a arquitetura do ANFIS, no modelo nebuloso (SUGENO; TAKAGI, 1985) de primeira ordem, pela transparência e eficiência.

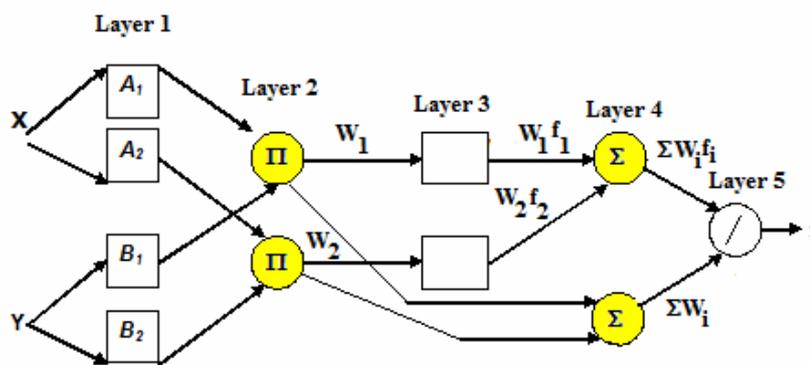


Figura 3.4 - Arquitetura para o modelo nebuloso Sugeno-Takagi (1985) onde a normalização do peso é realizada na camada mais alta (JANG ; SUN; MIZUTANI, 1997).

3.2 Método dos mínimos quadrados para modelos lineares

Antes de se aprofundar na ferramenta de adaptação, uma rede neuro-nebulosa, a arquitetura ANFIS da área da inteligência artificial, deve introduzir uma classe de métodos

padrões para sistemas lineares na identificação de sistemas. Um dos métodos padrões conhecidos é o método dos mínimos quadrados, uma ferramenta matemática muito eficiente que tem sido utilizada para uma grande variedade de aplicações, principalmente em controle adaptativo, processamento de sinais, estatística. Pode ser utilizada em sistemas lineares e não lineares e se mostrou bastante importante na solução de problemas de modelagem nas redes neuro-nebulosas. Nesse trabalho restringiremos à aplicação da ferramenta para sistemas lineares. O método dos mínimos quadrados permite uma melhor adaptação aos dados experimentais no sentido do erro mínimo quadrático. Em suma, a estimação pelos mínimos quadrados é um algoritmo empregado onde a soma dos erros quadráticos é escolhida como uma função objetivo a ser minimizada.

3.3 Método Gradiente Descendente

Uma classe de métodos pode ser aplicada na otimização dos modelos realizados por redes neuro-nebulosas. Segundo Jang, Sun e Mizutani (1997), os algoritmos descendentes, conhecidos como “steepest descent” que é conjugado com o método do gradiente descendente são usados no aprendizado das redes neurais em conjunto com o processo pela realimentação do erro de propagação (retropropagação do erro). Para encontrar o mínimo local de uma função usando o gradiente descendente, são realizados cálculos, proporcionais ao valor *negativo* do gradiente da função no ponto atual. É conhecido como “descida da montanha” e o método só finaliza quando se atinge o ponto mínimo da função.

3.4 O processo de “retropropagação” para redes adaptativas

O procedimento para encontrar o vetor gradiente descendente numa estrutura de rede, segundo Jang (1995), é referido como “retropropagação”, porque o vetor gradiente é calculado na direção oposta (vide seção 4.5.2) ao fluxo da saída de cada nó. Em suma, o uso do vetor gradiente no simples método conhecido como “steepest descent”, é referido como regra de aprendizagem “retropropagação”.

3.5 Controle pela inversão do modelo nebuloso

Segundo Babůska (1998), um modo efetivo para projetar um controlador de processos (linear ou não linear) é implementar o controlador cuja função de transferência é a função inversa da

função de transferência da planta. O controle pelo modelo inverso pode ser aplicado, a uma classe de sistemas que são primeiramente estáveis (ou que podem ser estabilizados) em malha aberta, e que são de mínima fase e causal e cujo inverso é estável. Segundo Economou e Morari (1986) o uso do modelo inverso possui a vantagem do controle em malha aberta, não ter problemas de estabilidade e permitir um perfeito controle com erro na dinâmica igual a zero nos estados transitórios e permanentes. O controlador baseado no modelo nebuloso invertido leva em consideração não linearidades do processo, inclui restrições quanto ao nível de saturação das entradas de controle e outras variáveis do processo. É capaz de controlar o sistema em toda a faixa de operação.

3.6 Modelo cuja função de pertinência é unitária.

Considerando o modelo nebuloso SISO singular, a regra nebulosa considerada é então dada pela seguinte expressão: (BABŮSKA, 1998).

If $y(k)$ é A_1 **and** $y(k-1)$ é A_2 **and****and** $y(k - n_y + 1)$ é A_{n_y} **and** $u(k - n_d + 1)$ é B_1 **and**.....**and** $u(k - n_u - n_d + 2)$ é B_{n_u} **then** $y(k+1)$ é c , onde A_1, \dots, A_{n_y} e B_1, \dots, B_{n_u} , são conjuntos nebulosos, n_d é um atraso da entrada para a saída, onde c é um conjunto nebuloso cuja função de pertinência é igual a um “singleton”. Para o vetor de estado $x(k)$ contendo valores passados da entrada e da saída e o valor atual da saída, isto é, todas as variáveis antecedentes, exceto $u(k - n_d + 1)$:

$$x(k) = [y(k), \dots, y(k - n_y + 1), u(k - n_d), \dots, u(k - n_u - n_d + 2)]^T \quad (3.11)$$

A regra simplificada pode ser escrita por:

$$\text{If } x(k) \text{ é } X \text{ and } u(k - n_d + 1) \text{ é } B \text{ então } y(k+1) \text{ é } c, \quad (3.12)$$

Considere que a regra base tenha todas as combinações possíveis dos conjuntos X e B , o número total de regras é dada por $K = M.N$, onde M é o número de conjuntos nebulosos de X e N é o número de conjuntos nebulosos de B . A total regra base pode ser representada na tabela A, a seguir, para a entrada $u(k - n_d + 1)$, temos:

Tabela A – Total de regras, entrada $x(k)$.

$X(k)$	B_1	B_2	B_n
X_1	C_{11}	C_{12}	C_{1N}
X_2	C_{21}	C_{22}	C_{2N}
X_M	C_{M1}	C_{M2}	C_{MN}

a) Inversão do modelo cuja função de pertinência é unitária

Para o sistema com $n_d = 1$ (único atraso), a saída do sistema pode ser escrita como:

$$y(k) = f(x(k), u(k)), \quad (3.13)$$

entradas do modelo são os estados atuais:

$x(k) = [y(k), \dots, y(k - n_y + 1), u(k-1), \dots, u(k - n_u + 1)]^T$ e a entrada atual é $u(k)$. A saída é a predição da saída do sistema na próxima amostragem $y(k+1)$. O objetivo do algoritmo de controle é computar o controle da variável de entrada $u(k)$, tal que a saída do sistema na próxima amostragem seja igual à referência desejada na saída $r(k+1)$. Isto pode ser alcançado pela inversão do modelo do processo. Dado o estado atual $x(k)$ e a referência de entrada $r(k+1)$, a saída do controle é dada por:

$$u(k) = f^{-1}(x(k), r(k+1)), \quad (3.14)$$

e $r(k+1) = y(k+1)$. A função f^{-1} é a função inversa final. Pode-se escrever que:

$$y(k+1) = f_x(u(k)), \quad (3.15)$$

onde f_x é obtido de um estado particular de x .

Assumindo-se que a ordem do processo seja igual a um, sendo o número de variáveis de estado conhecido e todas as variáveis de estado sejam mensuráveis pode-se escrever que:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad (3.16)$$

onde $\mathbf{x}(k+1)$ é o estado no instante de tempo $(k+1)$, $\mathbf{x}(k)$ é o estado no instante de tempo k , e $u(k)$ é o sinal de controle no instante de tempo k . Assume-se que $u(k)$ é um escalar.

Da mesma forma da equação 3.17 para a ordem do processo igual a dois, em $k+2$, se tem:

$$f(k+2) = f(\mathbf{x}(k+1), u(k+1)) = f(f(\mathbf{x}(k), u(k)), u(k+1)), \quad (3.17)$$

de modo geral, se tem:

$$\mathbf{x}(k+n) = F(\mathbf{x}(k), U), \quad (3.18)$$

onde n é a ordem do processo, F é uma função composta e múltipla de f , e U é a ação de controle de $(k+n-1)$ e igual a $[u(k), u(k+1), \dots, u(k+n-1)]^T$. A equação precedente, diz que dada uma entrada de controle u , no instante k até $(k+n-1)$, o estado do processo moverá de $\mathbf{x}(k)$ até $\mathbf{x}(k+n)$, em exatamente n passos de tempo. Quando o inverso da dinâmica do processo existe, U pode ser expresso, como uma função explícita de $\mathbf{x}(k)$ e $\mathbf{x}(k+n)$:

$$U = G(\mathbf{x}(k), \mathbf{x}(k+n)) \quad (3.19)$$

A equação, quer dizer que existe uma única seqüência de entrada U , especificada pelo mapeamento G , que pode guiar o estado do processo de $\mathbf{x}(k)$ até $\mathbf{x}(k+n)$, em n passos de tempo. O problema é encontrar o mapeamento inverso G , o que nem sempre existe e nem sempre é convergente e nem sempre tem uma forma que seja analiticamente aproximada, pois para sistemas onde a matriz de estados é singular, não existe o inverso e, portanto não se consegue a convergência. Um sistema linear pode ser escrito pelas equações de estado:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k), \quad (3.20)$$

onde \mathbf{A} e \mathbf{B} são matrizes $n \times n$, respectivamente. Para o instante $k+n$:

$$\mathbf{x}(k+n) = \mathbf{A}^n \mathbf{x}(k) + \mathbf{W}U, \quad (3.21)$$

onde $\mathbf{W} = [\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{B}]$ é a matriz de controlabilidade. Se \mathbf{W} é inversível, então o sistema é controlável e U pode ser calculado como:

$$U = W^{-1}[x(k+n) - A^n x(k)], \quad (3.22)$$

Em outras palavras, a controlabilidade no sistema linear é equivalente à condição inversa conforme equação (3.22). A solução mais fácil será invés de se procurar métodos de solução da equação (3.22), será utilizar, uma rede neural adaptativa com $2n$ entradas e com n saídas, a fim de aproximar o mapeamento inverso G , em acordo, para o treinamento genérico dos pares de dados.

$$[x(k)^T, x(k+n)^T; U^T], \quad (3.23)$$

b) Processo para a coleta dos pares de dados entrada-saída para a modelagem do sistema sem perturbação.

O processo de coleta dos dados para posterior modelagem inicia com a figura 3.5. O diagrama de bloco f do processo, a ser modelado é conforme apresentado, onde a saída $x(k+1)$ é uma função do estado atual $x(k)$ e da entrada $u(k)$, onde u é a variável de ação de controle e $x(k)$ e $x(k+1)$ representam os estados, atual e futuro do processo. O instante k é a variável instante de tempo nos sistemas de tempo discreto. A figura 3.5 mostra a representação da planta na forma de um diagrama de bloco do processo.

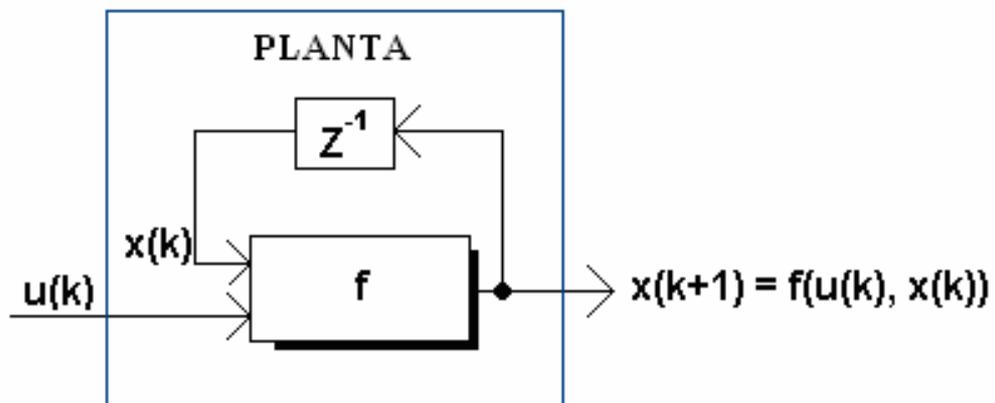


Figura - 3.5 - Diagrama de bloco do “processo”

A primeira etapa para se obter o modelo do processo, para um sistema de primeira ordem é preciso ter presente os dados de entrada e saída do processo, ou seja, $u(k)$, $x(k)$ e $x(k+1)$, o qual $x(k)$ é derivado de $x(k+1)$ como mostrado na figura 3.5.

A segunda etapa corresponde à fase de treinamento, como mostrado na figura 3.6 é obter o modelo equivalente da dinâmica do processo.

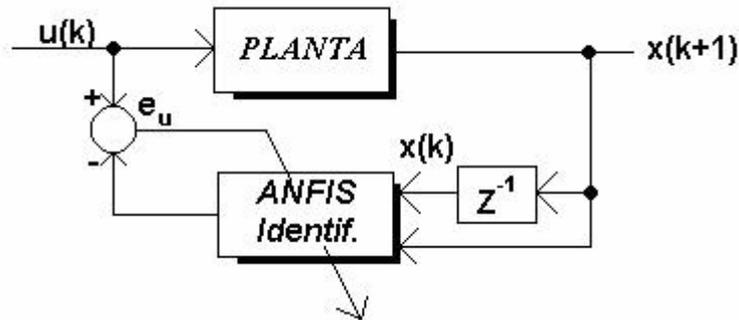


Figura - 3.6 - Diagrama de bloco na fase de aprendizagem.

Para a modelagem da dinâmica do processo, nesse caso, sem perturbação de entrada, implementa-se o bloco adaptativo com duas entradas e uma saída. O processo inicia com a aplicação simultânea da entrada u no sistema e no bloco comparador. A saída $x(k+1)$, no instante $(k+1)$ é uma das entradas do bloco adaptativo e $x(k)$ a outra entrada. A saída do bloco adaptativo \hat{u}_k , é comparada com o sinal $u(k)$. O erro e_u é a diferença entre \hat{u}_k e $u(k)$ e é realimentado para o bloco adaptativo. Esse tipo de realimentação conhecida como antecipada "feedforward", age nos parâmetros de ajuste, de tal forma que o bloco adaptativo vai se ajustando e conseqüentemente minimizando o erro médio quadrático. O processo termina quando o erro médio quadrático e_u for mínimo. O resultado obtido é um modelo com o mapeamento muito próximo ou casado com o inverso da dinâmica do processo.

A fase de aplicação ocorre após o treinamento e é mostrada na figura 3.7. O bloco "ANFIS Controle" é o modelo inverso da planta e é inserido em cascata com a planta do sistema. Se o modelo inverso da planta é casado com o inverso da planta, então a resposta ao impulso do modelo inverso será o inverso da resposta ao impulso dada pela planta do sistema. Se o bloco adaptativo estiver casado com o inverso da planta do sistema, o resultado será o valor de saída $x(k+1)$ igual ao valor desejado de entrada, $x(k+1) = x_d(k+1)$. A saída da planta é um servo do comando de entrada.

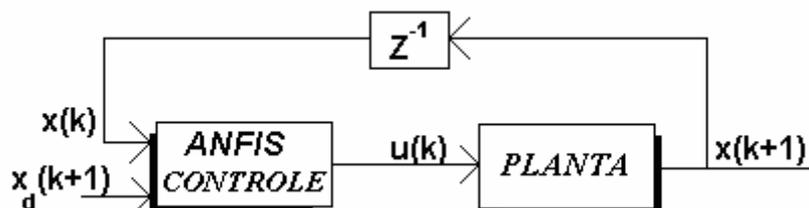


Figura 3.7 - Diagrama de bloco na fase de aplicação.

A figura 3.8, mostra um diagrama de bloco simplificado de um aprendizado inverso em processo “on-line”, com o bloco adaptativo duplicado, mas sem perturbação.

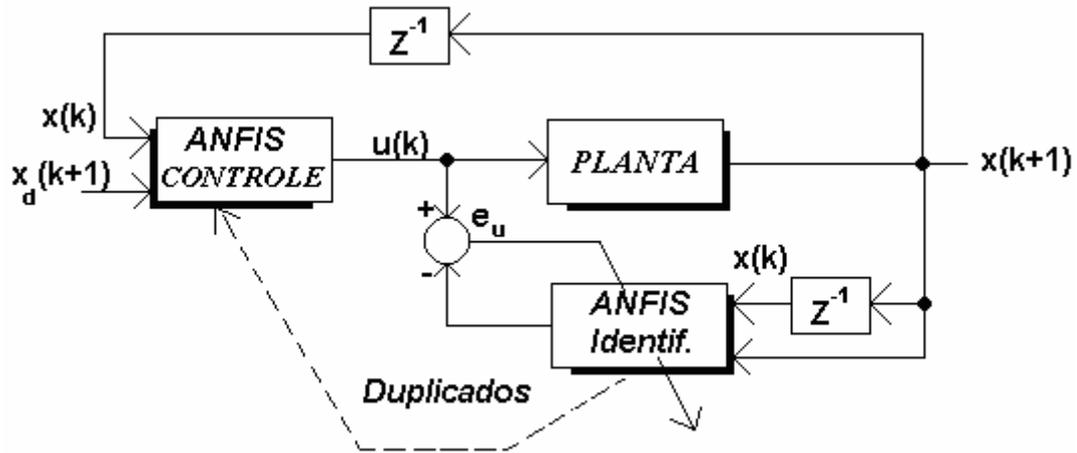


Figura - 3.8 - Arquitetura de aprendizagem em processo.

Esta aplicação, mostrada na figura 3.8, está operando em malha aberta, onde o erro e_u é realimentado para o bloco adaptativo para aprendizagem. Automaticamente os pesos são ajustados para o casamento, até que $u(k) = \hat{u}_k$. Daí, o bloco de controle sendo uma cópia do modelo inverso da planta é inserido em cascata com o sistema.

O objetivo é aplicar um sinal de comando $x_d(k+1)$ no bloco de controle cuja resposta é o inverso da resposta da planta do sistema, ou seja o bloco de controle possui a função de transferência que é o inverso da função de transferência do sistema. O *casamento ocorre quando ocorre* a minimização do erro de adaptação e_u e *temos* $x_d(k+1)$ igual a $x(k+1)$.

Segundo Babůska (1998), o esquema de controle mostrado na figura 3.9, similar ao da figura 3.8, mostra uma operação do controle em malha aberta (KU; ATHANS, 1973), pois não usa o erro entre a referência e a saída do processo. Ou usa o estado atual corrente $x(k)$ do processo ou usa uma estimativa do estado gerada por um observador, onde é usada cada das amostras para atualizar o estado interno x do controlador.

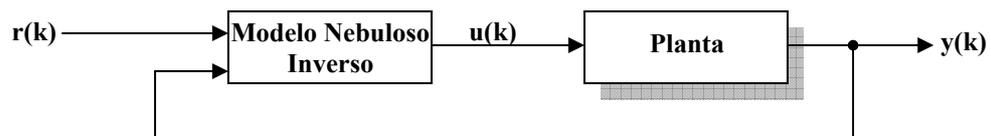


Figura - 3.9 – Diagrama do controlador baseado no modelo nebuloso inverso.

Segundo Babůska (1998) quando o modelo da planta não é casado com a planta há o surgimento de erros estacionários na saída da planta.

Se o processo da figura 3.10, fosse um forno elétrico ou a gás, como energia de aquecimento e um termopar servisse de sensor de temperatura, as variáveis $x_d(k+1)$ e $x(k+1)$, seriam respectivamente, o valor desejado "set-point" e o valor de saída do sistema. Para operar como um regulador, o processo deveria ser implementado em malha fechada em virtude das perturbações.

Não foram introduzidas nos processos descritos nas figuras 3.6 e 3.8, as perturbações de entrada do sistema, que certamente existirão no processo real. Quanto ao atraso z^{-1} , a sua implementação é imediata, pois no mapeamento dos estados do processo existem os valores atuais de estado. Em síntese, dispõe-se de $x(k)$ no instante atual e $x(k+1)$ do instante seguinte. Erros na modelagem e perturbações devem ser compensados pela introdução de realimentação, usando, como exemplo, o esquema IMC "modo interno de controle" conforme Lee (1990).

3.7 Agrupamento para partição das regiões.

O agrupamento (cluster) é uma ferramenta, como mostrada no item a seguir, preparada para a sintonia das regras nebulosas sendo que os centros dos agrupamentos serão os centros das partições nebulosas.

3.7.1 Agrupamento (Cluster).

As técnicas estatísticas de Análise Multivariada, envolvem uma grande multiplicidade de conceitos estatísticos e matemáticos e é uma ferramenta de análise de dados a qual leva em consideração, o comportamento simultâneo de muitas variáveis.

No trabalho de pesquisa experimental, ou por observação, trabalha-se com uma base de dados às quais são descritas exploradas e analisadas. A técnica que é amplamente utilizada nesse tipo de trabalho é chamada de Análise Multivariada (AM), pois aborda um amplo conjunto de métodos e procedimentos que representam mais de uma característica da amostra.

Os processos de agrupamentos podem ser hierárquicos ou não-hierárquicos. No agrupamento hierárquico é estabelecida uma ordem, ou estrutura em forma de árvore, que produz uma seqüência de partições em classes cada vez maiores. Difere do agrupamento não-hierárquico o qual produz diretamente uma partição, com um número fixo de classes.

O processo não-hierárquico (*k-means clustering*), por sua vez, se caracteriza em primeiro lugar, por determinar ou assumir um centro agrupamento e logo em seguida, agrupar

todos os dados ou pontos os quais estão na vizinhança de um valor pré-estabelecido para o centro. São eles os métodos: Limiar seqüencial, Limiar paralelo e o Particionamento otimizador.

O método mais comum, segundo Jain (1999), Zaiane (2002) e Jantsen (1998) é o da classificação hierárquica, na qual os pontos similares são agrupados de acordo com uma classificação e são apresentados em um gráfico com uma estrutura em árvore, conhecida como dendograma.

a) Agrupamento subtrativo nebuloso

O algoritmo agrupamento subtrativo proposto por Jang, Sun e Mizutani (1997) e Jantzen (1998), onde alguns dos dados do conglomerado são considerados candidatos a centros dos agrupamentos. Usando este método, a computação é simplesmente proporcional ao número de dados e independentes da dimensão do problema sob consideração.

O princípio do algoritmo se baseia na seguinte consideração: para uma dada coleção de n dados ou pontos $\{x_1, \dots, x_n\}$, no espaço dimensional M e sem perda de generalidade, se assume que os dados são normalizados (z-scores), dentro do intervalo *hipercubo unitário*. Uma vez que cada dado é candidato a ser um centro do agrupamento, se deve ter ou computar ou calcular uma medida de densidade dos dados. O algoritmo agrupamento subtrativo é baseado na medida da densidade dos pontos no espaço em estudo.

A idéia é encontrar regiões com alta densidade de dados no espaço. O dado com mais alta vizinhança dos dados será o candidato a centro do grupo desses dados. Os dados dentro de um pré-especificado raio nebuloso são então removidos (subtraídos) e o algoritmo agora continua a busca de um novo ponto de mais alta vizinhança. O processo só termina quando todos os pontos foram examinados (JANTSEN, 1998). A medida da densidade de um ponto x é definida como:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{(r_a/2)^2}\right), \quad (3.24)$$

onde r_a é uma constante positiva. Assim, um ponto terá o valor de mais alta densidade se ele tem muitos pontos vizinhos. O raio r_a define a vizinhança e os pontos fora do raio contribuem superficialmente ou somente para a medida da densidade. Após a medida da densidade de cada ponto tem sido calculado, o ponto com a medida de mais alta densidade é selecionado

como o primeiro centro do agrupamento. Faça x_{ci} ser o ponto selecionado e D_{ci} a sua medida da densidade (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997) e a próxima medida de densidade para cada ponto x_i será expressa a seguir, como:

$$D_i = D_i - D_{ci} = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{(r_b / 2)^2}\right) \quad (3.25)$$

onde r_b é uma constante positiva. Os pontos próximos ao primeiro centro x_{ci} do grupo serão significativamente medidas de densidades reduzidas, tal que, os pontos diferentes podem ser selecionados como centro do próximo grupo. A constante r_b define a vizinhança que tem reduções na medida da densidade. A constante r_b é normalmente maior do que r_a para prevenir centros de grupos proximamente espaçados e geralmente r_b é igual a uma vez e meia vez r_a , como sugerido em (TSOUKALAS; UHRIG, 1997). Após a medida de densidade de cada ponto for revista, então o próximo centro do agrupamento de pontos x_{c2} será selecionado e todas as medidas de densidade serão revistas novamente. Este processo é repetido até que, um número suficiente de centros de agrupamentos for gerado. Um sofisticado critério de parada automática pode ser encontrado em (TSOUKALAS; UHRIG, 1997), (BABŮSKA, 1998), (JANTSEN, 1998) o qual determina o número de agrupamentos.

Quando se aplica o agrupamento subtrativo para um conjunto de dados de entrada e saída, cada dos centros dos agrupamentos representa um protótipo que exhibe certas características do sistema a ser modelado. Estes centros dos agrupamentos serão razoavelmente usados como centros para as regras nebulosas, premissa no modelo nebuloso Sugeno e Takagi (1985) de ordem-zero.

Por exemplo, dado um centro x_{ci} na dimensão M , o centro c_i pode ser decomposto em dois vetores p_i e q_i , onde p_i é parte de entrada e contém o primeiro elemento N de c_i ; q_i é a parte de saída e contém o último $M - N$ elementos de c_i . Então dado um vetor x , o grau para o qual a regra i nebulosa é satisfeita é definida segundo Jang, Sun e Mizutoani (1997) por:

$$\mu_i = \exp\left(-\frac{\|x_i - p_i\|^2}{(r_a / 2)^2}\right) \quad (3.26)$$

Após os procedimentos completados um maior refinamento será a aplicação de esquemas de otimização aplicando algoritmo de regressão. A figura 3.10, mostra o resultado

da aplicação do agrupamento subtrativo relativo a um exemplo. O gráfico superior é a função alvo, o inferior são as três partições correspondentes aos agrupamentos e x os centros dos agrupamentos.

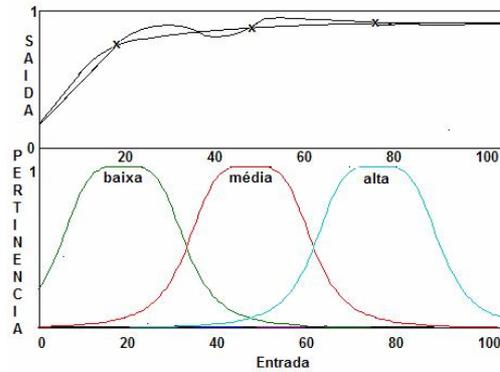


Figura 3.10 - Resultado da aplicação agrupamento subtrativo para base de dados.

4. PROJETO DO SINAL DE MODELAGEM, TEMPO DE AMOSTRAGEM E DURAÇÃO DO EVENTO.

A escolha do sinal de modelagem, tempo de amostragem e a duração do evento é de fundamental importância para o resultado da modelagem de sistemas. Para as suas definições se faz necessária a realização de um projeto do experimento. As restrições quanto ao tipo de ferramenta de regressão a ser aplicada na base de dados para a determinação de parâmetros do sistema, também influi na escolha do tipo de sinal. Após as definições de diversos sinais de modelagem é apresentada, para a seleção do sinal mais apropriado, uma tabela com os sinais candidatos a sinais de modelagem da planta. A escolha do sinal de modelagem apropriado para essa aplicação é feita usando dois critérios, a saber: fator de crista e fator de tempo.

4.1 Processo de seleção do sinal de modelagem

Muitos autores enfatizam o uso de sinais especiais no processo de adaptação (AGUIRRE, 2007), (WIDROW; WALASH, 1996) e (GODFREY, 1993). O sinal deve excitar a planta persistentemente, a fim de excitar todos os modos da dinâmica da planta. A escolha do sinal é um ponto muito importante e necessita da realização de um projeto do experimento. A seqüência dos passos a seguir permite a implementação do projeto do experimento. A partir da função de transferência do sistema, a abordagem utilizada para a modelagem será paramétrica, pois combina a informação disponível de todas as frequências dentro de somente poucos parâmetros. A energia será concentrada naquelas frequências onde há maiores contribuições para o conhecimento sobre os parâmetros. Os pares de pontos de entrada e saída devem ser coletados pela aplicação do sinal de excitação persistente na planta. O projeto do experimento segue os seguintes requisitos:

- Definição do tipo de sinal de excitação para o tipo de sistema;
- Escolha do período de amostragem;
- Projeto do filtro anti-falseamento;
- Duração do experimento.

a) Definição do tipo de sinal – Quantos aos sinais para excitação do sistema, a fim de estimar os parâmetros, muitos sinais com características próprias são possíveis de utilização. Da tabela comparativa dos sinais apropriados para a estimação de parâmetros (GODFREY,

1993), o tipo de sinal de excitação ou perturbação do sistema deve ter limitações caso o método de estimação usado seja do tipo agrupamento (cluster) nebuloso. De acordo com Godfrey (1993) os tipos de sinais de excitação PRBS (sinal binário pseudo-aleatório) não são apropriados para estimação de parâmetros porque apresentam somente dois níveis de amplitude.

A justificativa para esta limitação é que o sinal deve excitar o sistema na plenitude da faixa de atuação das variáveis considerando ambas: amplitude e frequência. O sinal PRBS é binário e, portanto não é aceitável como um excitador universal, pois contém somente dois níveis de amplitude e não se aplica à montagem de um conjunto de dados entrada e saída cuja aplicação será realizada por agrupamento (cluster).

O tipo de sinal mais apropriado para a estimação de parâmetros, é extraído da tabela comparativa segundo dois critérios, a saber: fator de crista e fator de tempo. Também é levada em consideração, a relação sinal ruído do sinal. Segundo Godfrey (1993) um sinal bem apropriado para excitação da planta se trata do sinal multisenoidal, por apresentar potência espectral em várias frequências distintas e não se limitar a dois níveis de amplitude. Outro sinal apropriado, mas com restrições no tempo é um sinal degrau com amplitude aleatória e largura aleatória. Um ruído branco de pequena amplitude deve ser aditivo, a fim de garantir a excitação da dinâmica do sistema (AGUIRRE, 2007).

Uma solução em dois passos sendo o primeiro a escolha da amplitude espectral proporcional ao desvio padrão do ruído referente à saída e segundo pela compressão do sinal obtido no primeiro passo.

b) Intervalos uniformes de amostragens para os dados - O período de amostragem é outro item importante na coleção de dados. O intervalo de tempo entre as sucessivas amostras de dados deve ser uniforme. A fim de que um sinal amostrado retenha algumas das características fundamentais do sinal original, é necessário que o tempo de amostragem seja suficientemente curto (AGUIRRE, 2007).

Na prática, segundo Aguirre (2007) a frequência de amostragem é normalmente escolhida entre cinco vezes e dez vezes a frequência de interesse contida nos dados, e não apenas duas vezes maior (chamada de frequência de Nyquist, como exigido pelo teorema de Shannon).

c) Projeto do filtro antifalseamento - O teorema de Shannon diz que um sinal que não contenha componentes de frequência acima de $1/(2T_s)$, onde T_s é o tempo de amostragem,

pode ser unicamente determinado, a partir de sinal intervalado por T_s . Quando o intervalo de amostragem dos dados é muito curto a estimação de parâmetros pela matriz de regressão pode tender a se tornar linearmente dependente. É muito comum o uso de filtros antifalseamento “anti-aliasing”, a fim de cortar frequências acima de $1/(2T_s)$ (AGUIRRE, 2007).

d) Duração do experimento - A duração do experimento ou o número de amostras, ou o comprimento da seqüência é também um item importante. A preocupação é quando a coleção de dados é demasiada, ocorrendo o chamado superamostrado “overfitting”, onde a base de dados apresenta redundâncias, implica normalmente em cancelamentos de pólos e zeros do sistema. Se for um sinal multisenoidal, o comprimento da seqüência deve ser especificado e o número de amostras deve ser relacionado com o tempo de amostragem do sinal para o comprimento máximo, ou seja, para um período completo de cada senóide.

A somatória de cada período individual do sinal senoidal é a duração máxima do experimento e o número de amostras é a relação entre o período do experimento sobre o tempo de amostragem.

4.2 Fator de pico para sinais multifrequências.

“Os sinais binários multifrequências contém certa porcentagem da potência total do sinal em harmônicas específicas e uma baixa relação entre a amplitude pico-pico e a potência total do sinal, porque eles são binários” (GODFREY, 1993). Segundo Godfrey (1993), uma alternativa é gerar sinal não binário e de multifrequência o qual é a soma das harmônicas especificadas. A principal vantagem desta abordagem é prevenir que ocorram grandes picos intercalados por sinais de baixos picos de amplitudes. O fator de pico é definido por:

$$u_{\text{pico}} = \frac{u_{\text{max}} - u_{\text{min}}}{2\sqrt{2}} \quad (4.1)$$

onde u_{max} , u_{min} e u_{rms} são respectivamente, o máximo e mínimo e valores RMS do sinal multifrequência $u(t)$.

4.3 Fator de crista e de tempo

O fator de crista é um parâmetro o qual especifica a quantidade de energia do sinal, em determinada frequência é aplicada ao sistema. Segundo Godfrey (1993) é necessário

comprimir o sinal, a fim de injetar maior energia no sistema para o mesmo valor de pico da excitação. Um sinal de excitação com alto valor de pico, mas com baixo fator de crista, injeta menos energia ao sistema que um outro sinal com o mesmo valor de pico, mas com mais baixo fator de crista. O fator de crista pode ser definido por:

$$C_r = \frac{u_{\text{pico}}}{u_{\text{rmse}}} \quad (4.2)$$

onde $u_{\text{pico}} = \max(|u(t)|)$. O valor u_{rmse} é o valor efetivo do sinal e pode ser escrito como:

$$u_{\text{rmse}} = U_{\text{rms}} \sqrt{\frac{P_{\text{interesse}}}{P_{\text{total}}}} \quad (4.3)$$

onde $P_{\text{interesse}}$ é a potência nas frequências de interesses e P_{total} a potência do sinal completo.

O fator de tempo não é suficiente para comparar diferentes sinais de excitações, pois não incorpora a influência da forma da amplitude espectral do sinal em relação a um sinal de espectro largo, como o ruído branco.

Para quantificar a qualidade do sinal de excitação, um outro fator é definido para medir a forma da amplitude espectral ou a densidade de potência do sinal. Para medir a distribuição de potência do sinal na frequência de interesse, o fator de tempo permite a quantificação e seleção do sinal, juntamente com o fator de crista.

Para um sinal que apresenta uma desigualdade na distribuição de potência em relação ao ruído branco cuja densidade de potência é uniforme em todas as frequências, então os pontos de medida da resposta em frequência do sistema serão pobremente medidos. O fator de tempo pode ser definido por:

$$f_t = 0.5 C_r^2 \left\{ \frac{u_{\text{pico}}^2}{|U(k)|^2} \right\} \quad (4.4)$$

Simplificando o critério de quantificação da qualidade do sinal. Segundo Godfrey (1993), um sinal é ótimo candidato a sinal de modelagem, quando o espectro de potência é plano com mínimo fator de crista. A próxima seção apresenta sinais candidatos a sinal de

modelagem e serão analisados segundo esses dois critérios, a saber: fator de crista e fator de tempo.

4.4 Sinais candidatos a sinal de modelagem

Nessa seção são apresentados os sinais candidatos a sinal de modelagem da planta, a sua descrição e especificação técnica, bem como os seus fatores de tempo e de crista.

a) Degraus Senoidais (Stepped sine)

Definição: Um sinal puramente senoidal cuja frequência é alterada entre medidas:

$$u(t) = 2A \sin 2\pi f t \quad (4.5)$$

Propriedades: Fator de crista igual a $\sqrt{2}$ e fator de tempo igual a 1,0.

b) Senoidal varredura (Chirp)

Definição: Um sinal de teste onde a frequência é variada para cima e para baixo durante o período de medida e é repetida para ser periódica.

$$u(t) = 2A \sin \left\{ \left[(at + b) t \right] \right\}, \text{ para } 0 \leq t \leq T, \text{ onde } T \text{ é o período.} \quad (4.6)$$

$$a = (\pi(f_2 - f_1))/T, \quad b = \pi f_1 \text{ e } f_1 \text{ e } f_2 \text{ são: mais baixa e mais alta frequência.} \quad (4.7)$$

Propriedades: Fator de crista igual a 1,45 e fator de tempo entre 1,5 e 4.

c) Multisenoidal

Definição: É um sinal que representa a soma de um número de harmônicas relacionadas senoidalmente com amplitudes programadas. As fases das componentes das frequências podem ser alteradas para reduzir o fator de crista do sinal, segundo Schroeder (1970).

$$u(t) = \sum_{k=1}^F 2A \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (4.8)$$

onde f_k é um múltiplo de $1/T$ com T período do multisenso.

Propriedades: Fator de crista típico entre 1,45 a 2,0 e fator de tempo entre 1,0 e 1,5.

d) Ruído periódico

Definição: Uma seqüência finita de ruído é periodicamente repetida até os transientes forem amortecidos. Uma nova seqüência é repetida durante o procedimento de coletas dos pontos.

Propriedades: Fator de crista tipicamente igual a 3 e o fator de tempo 4,5.

e) Seqüência binária de comprimento máximo - MLBS.

Definição: Esta é um sinal periódico com uma função de autocorrelação o qual é uma aproximação do pulso de Dirac para uma dada freqüência e comprimento do registrador. O MLBS é a seqüência de comprimento mais longo período e a mais curta correlação do comprimento. O espectro é o mais plano possível. Tal seqüência pode ser gerada por um registrador de deslocamento. A figura a seguir 4.1 mostra a geração da seqüência binária de comprimento máximo implementada com um registrador de deslocamento.

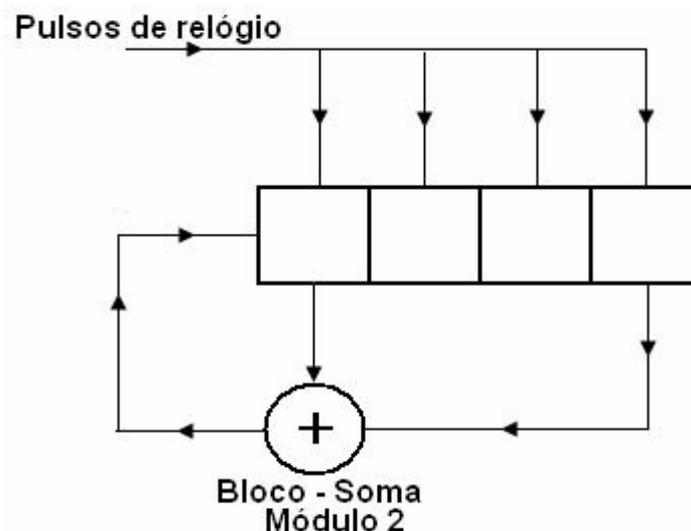


Figura 4.1 - Circuito gerador PRBS baseado na seqüência de comprimento máximo.

A escolha da realimentação determinará se a seqüência com o período máximo é gerada. O parâmetro R é o comprimento do registrador em bits. O período máximo é calculado por:

$$T_{\max} = (2^R - 1)T_{\text{clock}} \quad (4.9)$$

Propriedades: O fator de crista é igual a 1 e o mínimo fator de tempo é igual a 1.

e) Sinal de seqüência binária e de multifreqüência MFBS.

Definição: é um sinal periódico, onde o sinal pode alterar num equidistante e discreto conjunto de pontos no tempo. A amplitude espectral da seqüência pode ser otimizada escolhendo uma seqüência de chaveamento tal que a energia seja concentrada nas freqüências de interesse.

Propriedades: O fator de crista mínimo é 1.1 a 1.2 e o fator de tempo 2 a 4.

f) Impulso ou impacto.

Definição: A resposta ao impulso é medida diretamente no domínio do tempo excitando com um pulso de duração curta.

$$u(t) = \begin{cases} A \rightarrow (0 \leq t < T_1) \\ 0 \rightarrow (T_1 < t \leq T) \end{cases} \quad (4.10)$$

Propriedades: O fator de crista mínimo é $\sqrt{T/T_1}$ e o fator de tempo (T/T_1) .

g) Rajada aleatória.

Definição: É uma seqüência de ruído descrita conforme a seguir.

$$u(t) = w(t)r(t) \quad (4.11)$$

onde $r(t)$ é uma variável aleatória e $w(t)$ é uma função janela, descrita como:

$$w(t) = \begin{cases} 1 \rightarrow (0 \leq t < T_1) \\ 0 \rightarrow (T_1 < t \leq T) \end{cases} \quad (4.12)$$

Propriedades: O fator de crista mínimo é $3\sqrt{T/T_1}$ e o fator de tempo é $4,5 T/T_1$.

h) Ruído Aleatório

Definição: É uma seqüência de ruído, onde o espectro de potência pode ser influenciado pelo filtro digital (BROWN; CARBON; RAMSEY, 1977).

Propriedades: O fator de crista mínimo é 3 e o fator de tempo é 4,5.

4.5 Apresentação de tabela de fatores de crista e tempo para os sinais candidatos ao sinal de modelagem

Na tabela B, a seguir são apresentadas as propriedades mais importantes dos sinais que permitem serem comparados entre si. Uma descrição de cada um dos sinais pode ser encontrada em (GODFREY, 1993). Pode-se observar que duas classes de sinais podem ser distinguidas: a primeira sendo uma classe determinística e a segunda uma classe estocástica. A principal vantagem dos sinais determinísticos é que suas amplitudes espectrais são constantes durante todo o experimento e que não ocorre com os sinais estocásticos. Na classe de sinais determinísticos, o sinal multisenoidal é um sinal banda larga o qual permite a geração de uma amplitude arbitrária e espectral com muitos fatores baixos de tempo e de crista. A escolha dos sinais passa por dois fatores: fator de crista e fator de tempo. O sinal é ótimo quando o sinal apresenta um espectro plano de potência com o mínimo de fator de crista.

Tabela B – Comparativa com os sinais para excitação de sistema.

Sinal	Fator de Crista	Fator de Tempo	Nivelamento pela média	Arbitrária Amplitude Espectral
Seno degrau	$\sqrt{2}$	1,0	-	Sim
Varredura Senoidal	1,45	1,5 – 4,0	-	Não
Multiseno	1,7	1,5	-	Sim
Schroeder Otimizado	1,45	1,0	-	Sim
Ruído Periódico	3,0	4,5	Necessário	Não
MLBS	1,0	1,0	-	Não
MFBS	1,1	2,0 – 4,0	-	Sim
Impulso	$\sqrt{T/T_1}$	T/T_1	Aviso	Não
Rajada aleatória	$3\sqrt{T/T_1}$	$4,5(T/T_1)$	Aviso	Não
Ruído aleatório	3	4,5	Necessário	Não

A conclusão pode ser generalizada para todos os sinais determinísticos os quais são mais adequados do que os estocásticos por apresentarem erros de medidas menores em função do fator de tempo. No caso da necessidade de excitação de sistemas por sinais com arbitrária amplitude espectral então o sinal multisenoidal torna-se obviamente superior, pois dá uma completa liberdade para o projetista de escolher a amplitude espectral.

5. ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE CONTROLES PARA LAMINADORES

Nessa seção é apresentada uma revisão bibliográfica dos sistemas de controle dos laminadores. São discutidas as causas e efeitos das perturbações do sistema de controle baseado no BISRA, durante o processo de laminação. A seção mostra uma composição didática de um laminador e apresenta a arte dos sistemas de controle. Também é apresentada uma classificação segundo Grimbale (1992) e segundo outros autores (RIZZO, 2007) em dois grupos para materiais fora de conformidade. No final da seção é apresentada uma solução comparativa malha aberta e fechada de um sistema de controle realizado por Grimbale (1992) submetido às perturbações do processo de laminação. O resultado em malha fechada mostra uma redução de 20dB nas perturbações em relação ao sistema em malha aberta.

5.1 Composição básica dos componentes do laminador no processo de laminação a frio.

A composição básica de um laminador do tipo reversível, utilizado muito por relaminadores, quanto aos dispositivos constituintes para um processo de relaminação é a seguinte: primeiro a cadeira de laminação, onde se alojam os cilindros de apoio e trabalho; segundo os bobinadores e desbobinadores, onde se enrolam e desenrolam o material laminado; terceiro o desbobinador adicional de entrada para o primeiro passe de laminação e quarto outros equipamentos adicionais de usos secundários e destinados às medições. Na figura 5.1, é mostrada uma arquitetura típica de um processo de laminação a frio (RATH, G., 2004).

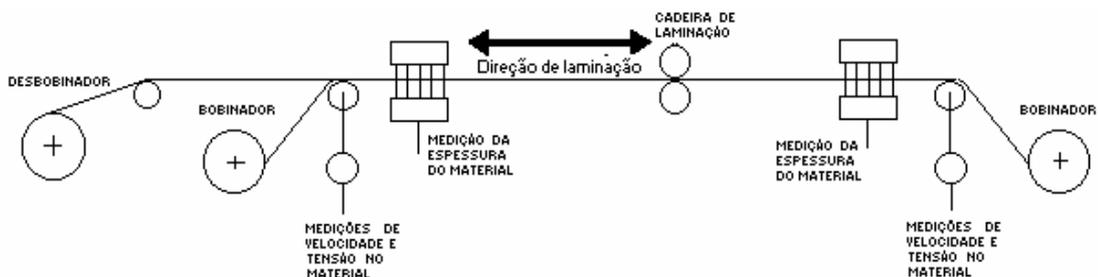


Figura 5.1 - Arquitetura típica de um processo de laminação a frio (RATH, 2004).

5.2 A arte dos sistemas de controle de espessura para laminadores.

A arte dos sistemas de controles de espessura para laminadores tem o objetivo de apresentar os tipos de controles de espessura utilizados no processo de laminação, pelos laminadores e relaminadores desde os primeiros controles utilizados nos sistemas mecânicos com acionamentos a motor e coroa para ajuste do “sem fim”, como nos acionamentos ainda modernos que utilizam controles hidráulicos a servoválvula e por fim, os controles híbridos composto de motor e coroa com ajuste fino da posição final dos cilindros de apoio feito por uma servoválvula de curso pequeno.

Foram considerados os acionamentos para laminadores a frio, cuja carga de laminação é bastante grande chegando a exigir pressões da ordem de trezentos bares e com força de até duzentas toneladas.

Nesse trabalho, foram estudadas muitas propostas de técnicas de sistemas de controle de espessuras de vários fabricantes e as quais apresentam vantagens e desvantagens umas sobre as outras. Para os sistemas de controles convencionais de mercado será apresentada na seção 5.2.4 uma classificação e descrição quanto ao tipo e princípio utilizado.

5.2.1 Sistema de controle da espessura em laminadores.

Segundo Grimble (1992), a produção de materiais fora da espessura desejada nos processos de laminação tem muitas causas e podem ser classificadas em dois grupos principais.

Grupo 1: Não conformidades ou deficiências no material.

Neste primeiro grupo, as deficiências no material de entrada são razões para provocar não conformidade ou diferença na espessura final. São na maioria das vezes relativas aos materiais fora da espessura desejada e algumas vezes os materiais apresentam problemas nas suas propriedades mecânicas entre outras. Podemos dizer que as deficiências no material se apresentam no processo de laminação é devido à:

- Variação da resistência à deformação do material e da dureza do material;
- Espessura do material de entrada abaixo da espessura desejada;

- Variação no alongamento na chapa de entrada. Esse efeito é provocado na laminação quando se lamina o material com forças diferenciadas nas regiões transversais do material;
- Variação no coeficiente de atrito entre o material a ser laminado e os cilindros de laminação. É função da lubrificação ou da refrigeração do material com a velocidade de laminação.

Grupo 2: Variabilidade no processo devido ao laminador.

Neste segundo grupo, as variações no laminador são as razões que podem provocar diferenças na espessura final e , portanto produzir material fora de conformidade (espessura indesejada). Podemos dizer que as deficiências no laminador se apresentam no processo de laminação são devido à:

- Excentricidade dos cilindros de laminações BUR (back-up roll).
- Diminuição no nível de óleo no cilindro atuador;
- Variação da rigidez estrutural da cadeira;
- Variação da rigidez hidráulica do sistema de acionamento dos cilindros de laminação.
- Limitação da resposta em frequência da servoválvula;
- Variação na película de óleo nos mancais variando com troca na velocidade e dureza do cilindro;
- Expansão do cilindro com a temperatura e sem uniformidade por má refrigeração dos cilindros durante o processo de laminação;
- Desgastes dos cilindros e imprecisões no perfil do cilindro.

Para melhor caracterização das causas (fatores 1 e 2) e efeitos na espessura de saída do material, a seguir apresentamos a figura 5,2 com o diagrama de Ishikawa.

DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO DE ISHIKAWA

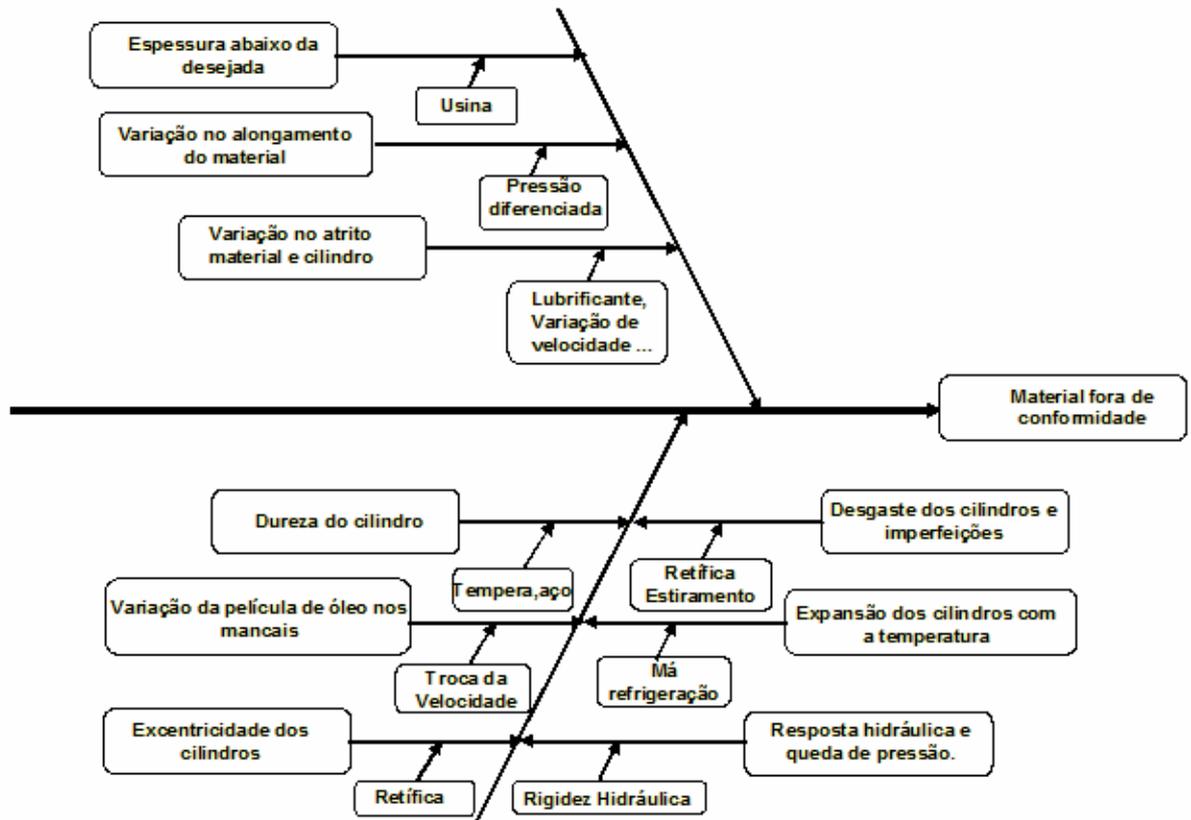


Figura 5.2 – Diagrama de causa e efeito de Ishikawa.

5.2.2 Efeitos das perturbações no sistema de controle de um laminador e as formas de compensações usadas pelos controladores convencionais.

Nesse trabalho, o estudo é para um laminador a frio e a perturbação a ser considerada devido ao grupo I é somente a relativa à resistência à deformação do material, que em muitas literaturas essa perturbação é relativa à variação da dureza do material. E devido ao grupo II a perturbação a ser considerada é relativa à excentricidade dos cilindros de laminações. Como o sistema de controle se comporta no processo de laminação a frio, quando é submetido às essas perturbações e os efeitos produzidos na força de laminação e conseqüentemente no material devido às ações indevidas do sistema de controle.

5.2.3 Efeito provocado no sistema de controle pela variação na resistência à deformação plástica do material e variação na dureza do material laminado.

A variação na resistência à deformação plástica e na dureza do material se torna mais presente, quando está sendo laminado sobre uma única cadeia em um laminador reversível. Neste caso, a troca na dureza do material, não é somente de passe para passe, mas também dentro de cada passe e é devido às deformações plásticas que vai sofrendo o material ao longo do comprimento (GINZBURG, 1984), (SIEMENS, 1976), (SIEMENS, 1979), (SIEMENS, 1998) e (CASTRO et al., 2005). O material vai encruando durante o processo de laminação, pois ocorre no material uma reordenação dos planos cristalinos e das suas estruturas moleculares (CASTRO et al., 2005).

5.2.4 Efeito das perturbações pela excentricidade dos cilindros de apoio sobre a força de laminação.

As excentricidades dos cilindros de apoio são as maiores responsáveis pela presença das perturbações na força de laminação (WALKER; DAVIES, 1987), (PATULA, 1978) e (GRIMBLE, 1992). Nesse trabalho foi possível mostrar graficamente como, a variação na abertura do cilindro na presença da excentricidade dos cilindros implica na força de laminação.

Considerações: De acordo com Grimble (1992), existem dois caminhos básicos no qual o efeito provocado pela excentricidade dos cilindros de apoio pode ser minimizado:

1. Estimar as variações de baixa frequência na força de laminação e usar uma realimentação para o controle destas estimativas, a fim de manter o nível de referência da força. Uma variação na espessura devido à excentricidade dos cilindros não deve intensificar pelo sistema de controle com uma diminuição na força de laminação.
2. Estimar as variações de baixa frequência na força de laminação e as variações devido à excentricidade dos cilindros de laminação. A estimativa da excentricidade é usada para excitar o sistema de aperto dos cilindros de laminação, sem-fim ou hidráulico, na direção oposta às variações da excentricidade dos cilindros. Desta forma, a força de laminação e a espessura podem ser mantidas constantes.

Alguns dos sistemas tradicionais de controle usam o espaço de estados para o projeto do sistema de controle. A necessidade de um observador depende do acesso às variáveis de estados para realizar a realimentação através de ganhos ajustáveis. É o caso da força de laminação para estimar a abertura dos cilindros. Como é impraticável instalar um sensor embaixo dos cilindros para medida direta da abertura, é necessário o uso da força de laminação para a estimação de estados. O estimador calcula a variável de estado que não é acessível no processo de laminação e envia ao regulador que executa a ação de controle.

O sistema de controle é constituído de um regulador e um observador. No caso o regulador recebe uma estimativa da variável de estado e executa a ação de saída. O filtro de estimativas de estados no projeto de Grimble (1992) é realizado por um filtro de Kalman.

5.3 Influências dos grupos sobre o material a laminar.

Segundo Grimble (1992) a não conformidade do material por influência do *primeiro grupo*: é porque age sobre a força de laminação entre os cilindros de trabalho e consequentemente sobre a cadeira de laminação, a qual se comporta fisicamente como uma mola conhecida como a elasticidade da cadeira, enfim se a relação de rigidez for pequena entre a cadeira de laminação e o material aplicado, implica que haverá uma maior influência dos fatores do *primeiro grupo*, ou seja, produção de material fora de conformidade ou simplesmente fora da espessura desejada.

Em suma, uma tendência de aumento na espessura está associada com o aumento na força de laminação devido a aos fatores do primeiro grupo. Muitos projetos de sistemas de controle os quais atuam somente sob a influência do *primeiro grupo* foram construídos (SIEMENS 1976, 1979, 1998 e 1999).

Ainda segundo Grimble (1992) a não conformidade do material por influência do *segundo grupo*: é porque age sobre a janela “gap” do cilindro e consequentemente sobre a força de laminação. Quanto mais alta for a relação de rigidez entre a cadeira e o material, maior será a influência dos fatores do *segundo grupo* sobre o material fora de espessura desejada. Consequentemente, um aumento na espessura é associado com uma diminuição na força de laminação devido a estes fatores.

O fato que estes dois grupos de fatores acarretam no sistema de controle ações em direções opostas e muito difíceis de identificar e separar quando o problema é devido a um dos grupos. Muitos projetistas deram uma abordagem estocástica para o controle em busca da solução do problema (GRIMBLE, 1992).

5.3.1 Princípio do medidor de espessura.

A medida da espessura é uma especialidade de alguns fabricantes desse equipamento e segue alguns princípios de medições, como usado pela onde um posicionador eletrônico (VOLLMER, 1989) com ponta de diamante é apoiado sobre um sistema mecânico, o qual acompanha o movimento da chapa sendo laminado e realiza a medição e também o medidor baseado na emissão de raio gama numa faixa lateral da chapa (MITCHELL, 1989).

Um controle da espessura convencional segue o princípio baseado na ação de controle pela medição do desvio na espessura, também conhecido como “AGC” Automatic Gauge Control. As ações de controle pelo desvio da espessura são baseadas no “British Iron and Steel Research Association” – Princípio do medidor de desvio na espessura, o BISRA (DAVY, 1994).

Este princípio é baseado no efeito da elasticidade da cadeira de laminação provocado pela variação na espessura desejada. Um desvio na espessura desejada, ou incremento ou decremento provoca respectivamente, um aumento ou uma diminuição na força de laminação.

Este efeito provocado na força de laminação pode ser utilizado como um sinal para o controle do “gap” atual, para corrigir a abertura dos cilindros e assim corrigir a espessura final.

Numa situação ideal, a cadeira de laminação pode ser representada como uma mola rígida (CHOI; JOHNSON; GRIMBLE, 1994). A espessura de saída pode ser dada por:

$$h_{out} = S + E(f) \quad (5.1)$$

onde S é a posição inicial do “gap”, e E(f) é a constante da mola e f é a força de laminação. A linearização sobre o nominal h_{out} , S e f temos:

$$\Delta h = \Delta S + \frac{\Delta E}{\Delta f} \Delta f = \Delta S + \frac{1}{M_n} \Delta f \quad (5.2)$$

onde M_n é o modulo de elasticidade da cadeira. Se a acomodação do “gap” está sob perfeito controle, onde:

$$\Delta S = 0, \text{ então } \Delta h = \frac{1}{M_n} \Delta f \quad (5.3)$$

Pode ser observado que um aumento ou diminuição na espessura desejada, Δh , resulta num aumento ou diminuição na força de laminação, Δf . As medidas da força de laminação podem ser utilizadas para corrigir erros na espessura desejada. O princípio do desvio da espessura utiliza a correlação das pequenas trocas para calcular a troca no “gap” atual.

Assim, se $\Delta h \neq 0$, então para se obter $\Delta h = 0$ é necessário:

$$\Delta h = 0 = \Delta S + \frac{1}{M_n} \Delta f \quad (5.4)$$

E conseqüentemente

$$\Delta S = -\frac{1}{M_n} \Delta f \quad (5.5)$$

onde Δf é a medida da troca da força de laminação. Assim:

- 1) Se $\Delta h > 0$ então $\Delta f > 0$ e $\Delta s < 0$ necessário fechar o “gap”.
- 2) Se $\Delta h < 0$ então $\Delta f < 0$ e $\Delta s > 0$ necessário abrir o “gap”.

A implementação do princípio da espessura conhecido como compensação da mola do laminador leva a forma da compensação sintonizada:

$$\Delta S = -\frac{1}{M_c} \Delta f \quad (5.6)$$

onde M_c é sintonizado igual ao módulo M_n da cadeira. Assim, o sistema de controle regula a espessura de saída respondendo às trocas na espessura de entrada e variações na resistência à deformação plástica e na dureza do material laminado.

O princípio do desvio na espessura usa a força de laminação como parâmetro de controle, a fim de compensar às trocas na espessura desejada devido à elasticidade da cadeira e opera adequadamente quando há troca na espessura desejada ou na resistência à deformação plástica e na dureza de entrada, mas encontra problemas para compensar, o desvio na espessura desejada devido às deficiências apresentadas no segundo grupo (CHOI; JOHNSON; GRIMBLE, 1994).

5.4 Desafio na implementação de um sistema de controle de espessura para laminador.

Segundo Rath (2004) é um grande desafio para os engenheiros de projetos de sistemas de controle quando a aplicação é de um sistema de controle de espessuras para laminadores. O laminador é um equipamento industrial de alta produção de aço laminado e cujo sistema de controle serve didaticamente como um excelente exemplo de aplicação. O laminador como um exemplo didático, pode ser considerado como um clássico exemplo na área de controle. O engenheiro de controle deve se preocupar com uma série de fatores a serem controlados, como:

- 1) tempo de transporte;
- 2) perturbações de entrada e do processo de laminação;
- 3) dificuldades físicas nos circuitos de realimentação quando se deseja a medição direta da variável a ser controlada.
- 4) outros.

As empresas fabricantes de sistemas de controle para a laminação estão sempre inovando as técnicas e, a busca é sempre pelo aumento no desempenho e conseqüentemente na qualidade final do produto (EDWARDS, 1987), (FERGUSON, 1986), (SBARBARO; NEUMERKEL; HUNTS, 1993) (FRAYMAN, 1999), (FRAYMAN; ROLFE, 2003), (GARIMELLLA; SRINIVASAN, 1994), (MORNAS; PANTÉ, 2005), (CALDAS; LEONARDI; BELFIORE, 2008) e (CALDAS; LEONARDI; BELFIORE, 2009). Cada vez mais o mercado impulsiona esses fabricantes com a exigência de produtos laminados cuja tolerância na espessura desejada é cada vez mais estreita, segundo Usiminas (2005) e segundo a Armco (2005). Surgem idéias de arquiteturas de controle das mais variadas, mas com um único objetivo de controlar a dinâmica da planta do sistema e rejeitar os efeitos das perturbações de entrada, como vistos nas publicações (HASEGAWA; TAKI, 1991), (GONÇALVES; HELMAN, 1998), (ALEXANDER, 1972), (FRESHWATER, 1996), (CALDAS; LA NEVE, 1999), (CALDAS; LA NEVE, 2000), (FRAYMAN, 1999), (FRAYMAN; ROLFE, 2003), (GINZBURG, 1984), (CHOI; JOHNSON; GRIMBLE, 1994), (WAGNER, 1996), (KONDO et al, 1986), (LIU, 2002) e (MAHFOUF et al., 2005).

Muito embora a dinâmica do sistema seja amplamente conhecida assim como as perturbações de entrada, (GRIMBLE, 1992), (RATH, 2004), (WAGNER, 1996) e (ABB, 2000), (FRAYMAN; ROLFE, 2003), (SUZUKI, 1980), (MAHFOUF, ET AL., 2006),

(WIEDEMER, 1974), (ZÁRATE, 2006) e (LIU; YI, ZHAO, 2002) e como citado por Zárate, Gálvez e Helman (2003), não existe modelo de laminador que seja perfeito, mas muitos trabalhos apontam para o modelo (ALEXANDER, 1972), como o modelo que mais se aproxima de uma planta de laminação. Não faz parte desse trabalho o desenvolvimento ou pesquisa do melhor modelo para laminador e nem qualquer abordagem ou discussão sobre modelagem de laminadores.

É sempre um desafio buscar um novo conceito de sistema de controle. Esse conhecimento é incrementado principalmente quando se dispõe de acesso às novas tecnologias. A figura 5.2 a seguir, mostra a dificuldade do controle quando a realimentação é feita pela força de laminação, e fica sujeita às forças exercidas pela excentricidade dos cilindros de trabalho e pela variação ou na espessura de entrada ou na resistência à deformação plástica e na dureza do material laminado.

Observando-se o gráfico da força de laminação, espessura e abertura da janela dos cilindros de laminação na figura 5.3, o valor h_0 é a espessura de entrada do produto a ser laminado e h_1 é a espessura de saída desejada e S_1 e F_0 é respectivamente a abertura necessária dos cilindros e a força de laminação necessária. O sistema de controle opera no ponto A.

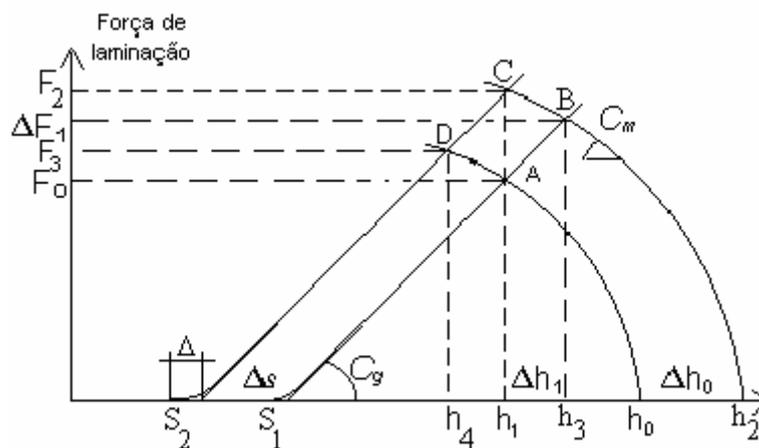


Figura 5.3 - Curva da força de laminação, abertura dos cilindros de laminação, pela espessura de entrada e resistência à deformação plástica e na dureza do material (GYNSBURGH, 1984).

Quando ocorre uma variação na espessura de entrada de Δh_0 , a espessura de entrada passa a ser h_2 , mantendo-se a abertura dos cilindros constante, há um incremento na força de laminação de ΔF_1 , que pela curva passamos a operar no ponto B. A espessura de saída passa a ser h_3 que necessita ser corrigida e a ação de controle mantendo-se a abertura dos cilindros constante é incrementar a força de laminação para F_2 . O efeito é o mesmo quando se varia a resistência à deformação plástica e na dureza do material.

A seguir, vamos entender como age o controle quando a força de perturbação é pela excentricidade dos cilindros de trabalho. O efeito agora é na abertura dos cilindros, sendo S_1 a abertura inicial, se a abertura dos cilindros varia de ΔS , passando de S_1 para S_2 , este incremento é negativo diminuindo o “gap” entre os cilindros. Pela curva no ponto A e mantendo-se a resistência à deformação plástica e na dureza ou espessura de entrada há um incremento na força de laminação, passando o controle a operar no ponto D e a espessura de entrada passa a ser h_4 . A ação de controle deveria diminuir a força de laminação para trazer o ponto de operação novamente para A. Porém se a realimentação é pela força de laminação a qual incrementa pela variação ΔS então a ação de controle será aumentar a força de laminação.

Como o controle consegue distinguir se deve incrementar ou decrementar a força de laminação se os efeitos provocados são de aumento da força de laminação?

Esses efeitos se tiverem uma única ação levará o controle a um erro na espessura desejada e, portanto um problema de qualidade no produto relaminado. A figura 5.4 mostra os diversos efeitos provocados sobre a força de laminação.

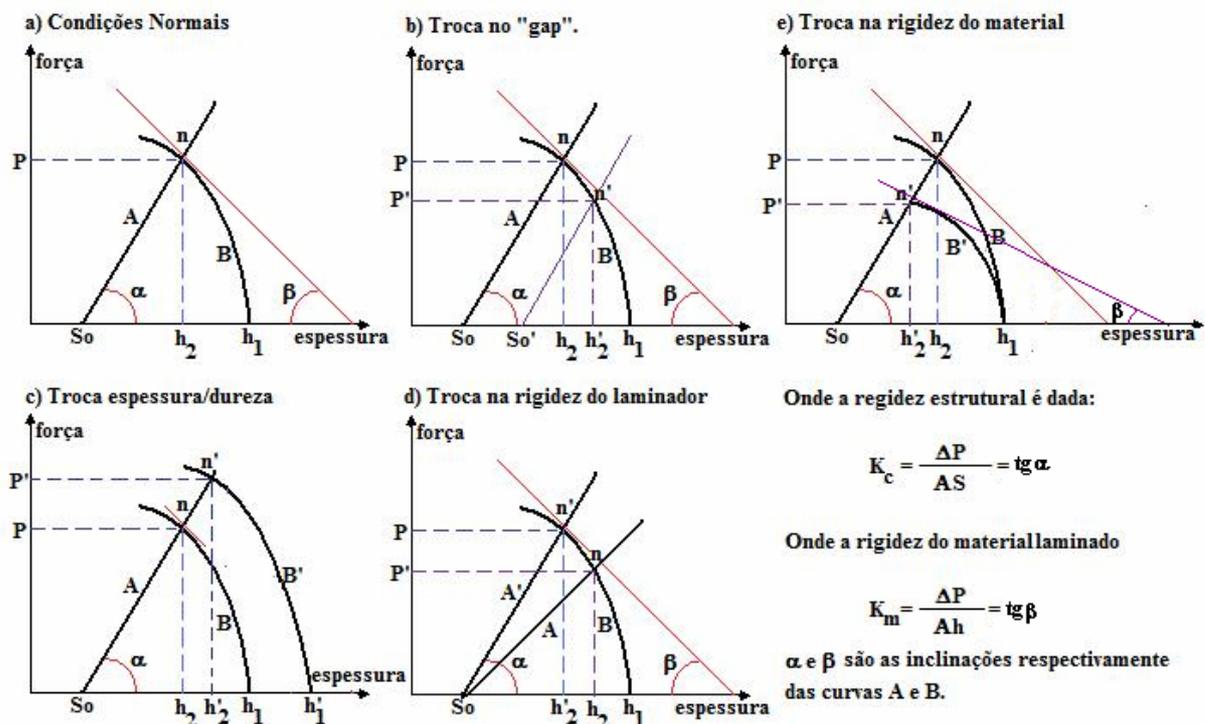


Figura 5.4 – Os efeitos sobre a força de laminação relativos aos grupos um e dois. (GYNSBURGH, 1984)

5.5 Seleção do modo de controle da espessura no laminador.

O desempenho do sistema de controle está condicionado à forma como o sistema de controle controla a abertura e fechamento dos cilindros. São dois modos básicos que implicam no controle da abertura ou fechamento dos cilindros, denominado de “gap”. São eles: primeiro a posição dos cilindros (“gap position”) e segundo a força de laminação. O modo de seleção depende da operação e nos laminadores é possível a escolha da variável de controle antes de cada passe da laminação.

5.6 Projeto e proposta de trabalho realizado por Grimble (1992).

O projeto do sistema de controle de um laminador, realizado por Grimble (1992) e simulado no Matlab, é apresentado a seguir. O projeto é feito usando inicialmente uma planta do tipo SISO (uma única entrada e única saída) e depois MIMO (múltiplas entradas e múltiplas saídas). O projeto apresentado por Grimble (1992), mostra um sistema de controle da espessura de uma viga I. Embora o projeto seja MIMO para dois eixos, estamos apresentando somente um eixo e, portanto a planta estudada será somente do tipo SISO. A figura 5.5 mostra uma cadeia de laminação.

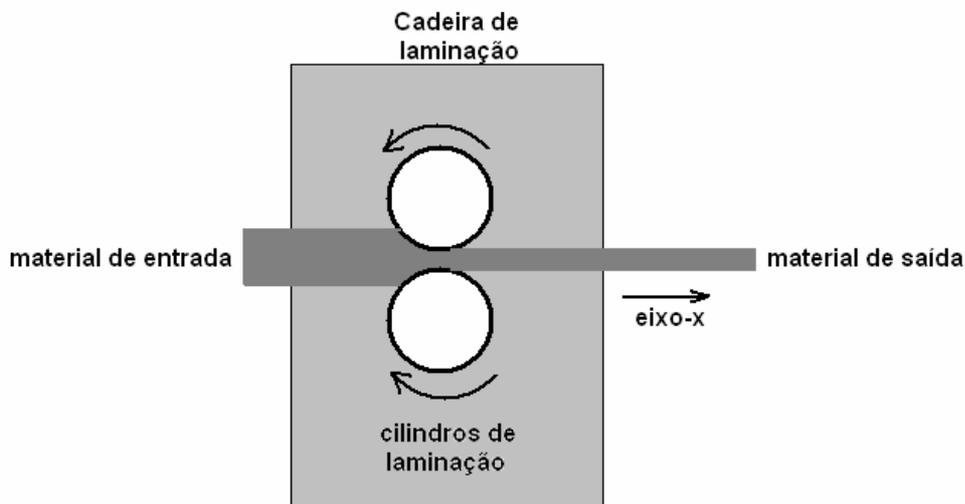


Figura 5.5 - Cadeira de laminação

A forma de saída do material é plana e é obtida pela passagem do material embaixo de dois cilindros acionados por um motor. A abertura e fechamento dos cilindros, conhecido como “gap” é movimentada por um atuador hidráulico e controlada pelo sistema AGC de

controle. A proposta é manter a espessura final dentro das tolerâncias permitidas. A variação da espessura é função dos grupos um e dois, vistos na seção 5.2.1 desse trabalho.

Um modelo em malha aberta do eixo-x é mostrado na figura 5.6, sendo a planta representada por H_x . A função F_{ex} representa o efeito da força provocada pela excentricidade dos cilindros de apoios e F_{ix} representa o efeito da força provocada pela variação na espessura/resistência à deformação plástica e na dureza do material de entrada. Essas forças F_{ex} e F_{ix} são de efeitos conhecidos e foram modeladas por Grimble (1992), pela aplicação de um ruído branco representado por w_{ex} e w_{ix} excitando respectivamente F_{ex} e F_{ix} , um filtro passa-faixa e um filtro passa-baixa respectivamente. Uma realimentação pode ser usada para conter os efeitos das perturbações. A medição do “gap” dos cilindros não pode ser feita diretamente, então o uso da força de laminação como variável será usada para a estimação de estado pelo estimador.

A seguir a figura 5.6, apresenta o modelo proposto por Grimble (1992) para a força hidráulica e as forças devido às perturbações pela excentricidade dos cilindros e pela variação da resistência à deformação plástica e na dureza/espessura de entrada do material.

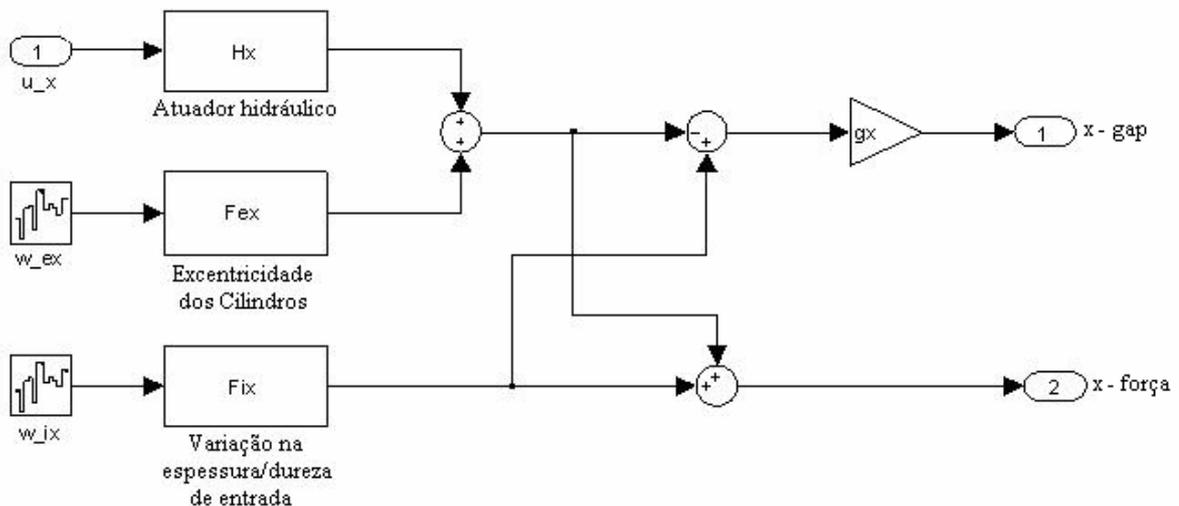


Figura 5.6 - Modelo apresentado com o atuador submetido às perturbações (GRIMBLE, 1992).

Do diagrama de bloco se pode escrever que:

$$x \text{ gap} = g_x [F_{ix}.w_{ix} - (H_x.u_x + F_{ex}.w_{ex})] \quad (5.7)$$

$$x \text{ force} = F_{ix}.w_{ix} + (H_x.u_x + F_{ex}.w_{ex}) \quad (5.8)$$

As considerações sobre a excentricidade e a razão da sua influência no sistema de controle do laminador, permitem afirmar, que a perturbação pela excentricidade dos cilindros

de apoios é aproximadamente periódica e a sua frequência é função da velocidade de laminação e especificamente da rotação dos cilindros de apoios. O modelo razoável de aproximação, segundo Grimble (1992), para esta perturbação é um filtro passa-faixa de segunda ordem excitado por um sinal ruído branco. A função de transferência, do filtro passa-faixa, de acordo com alguns parâmetros práticos (GRIMBLE, 1992) em (MATLAB, 1996), pode ser escrita como:

$$F_{ex}(s) = \frac{3 \cdot 10^4 s}{s^2 + 0.125s + 36} \cdot w_{ex} \quad (5.9)$$

onde F_{ex} é a componente da força devido a excentricidade.

A resposta em frequência e fase da função excentricidade é apresentada na figura 5.7. Pode-se verificar que o filtro passa-faixa (F.P.F) tem uma frequência de corte entre 0,1 e 10 rad/s. Caso ocorra um aumento na espessura de entrada devido a excentricidade então, a força de laminação é incrementada neste ponto. O incremento da força deve resultar uma ação do regulador LQR (Regulador Linear Quadrático), a qual diminua a espessura de saída. Esta ação provocará na força de laminação uma redução, afim de, obter a espessura desejada na saída.

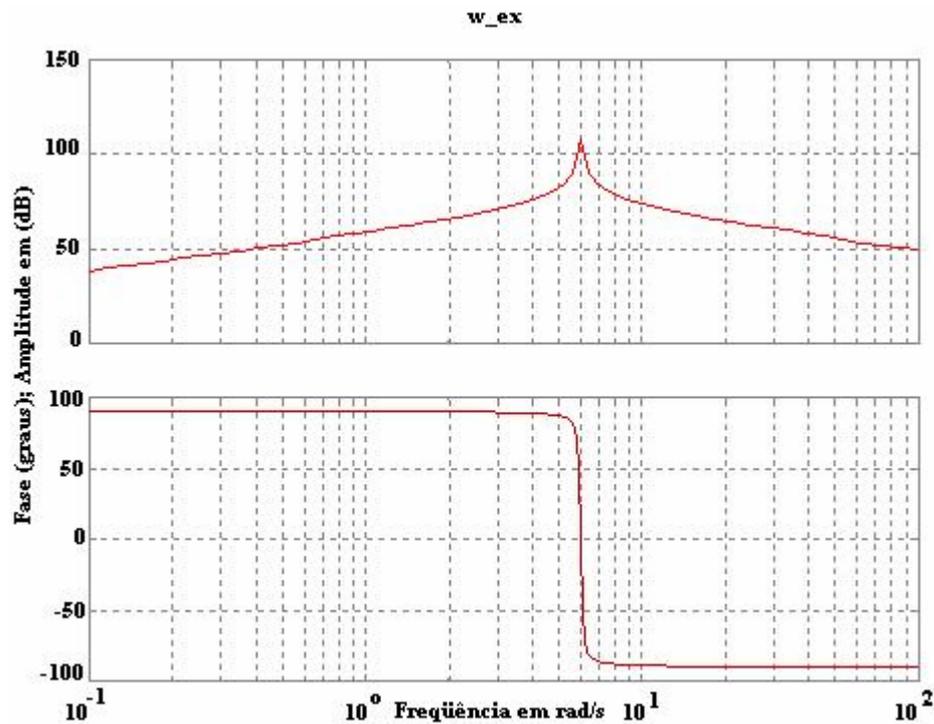


Figura 5.7 - Diagrama de bode em módulo e fase para o F.P.F da excentricidade nos cilindros de apoios.

A seguir, apresentada na figura 5.8 a resposta temporal do F.P.F., excitada por um sinal ruído branco

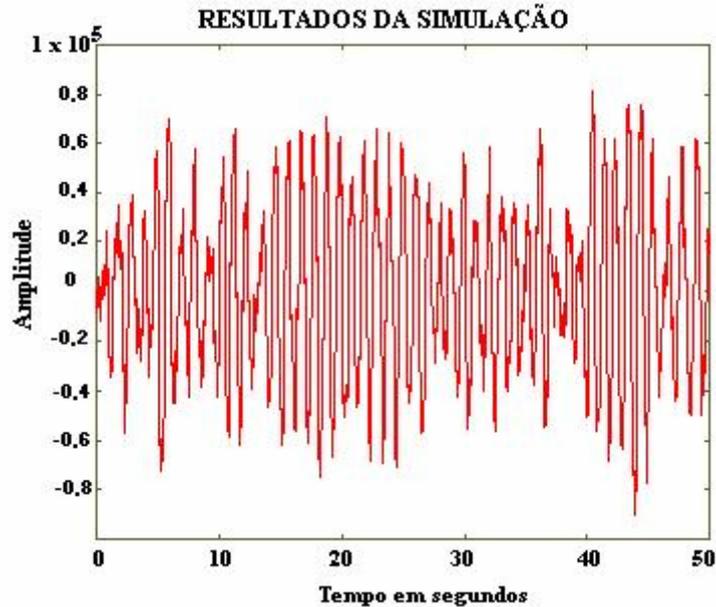


Figura 5.8 - Resposta do F.P.F a uma excitação por um ruído branco.

A espessura/resistência à deformação plástica e na dureza do material de entrada, segundo Grimble (1992), é modelada por um filtro passa-baixa (F.P.B), excitado por um sinal ruído branco.

A função de transferência do filtro F.P.B. segundo Grimble (1992), é descrita como:

$$F_{ix}(s) = \frac{10^4}{s + 0.05} \cdot w_{ix} \quad (5.10)$$

A resposta em frequência do bloco F.P.B. é apresentada na figura 5.9. Caso ocorra um aumento na espessura de entrada, esta perturbação varia a espessura de saída e conseqüentemente a força de laminação. O regulador LQR executa a ação de controle com o aumento da força de laminação e a espessura de saída retorna ao valor desejado.

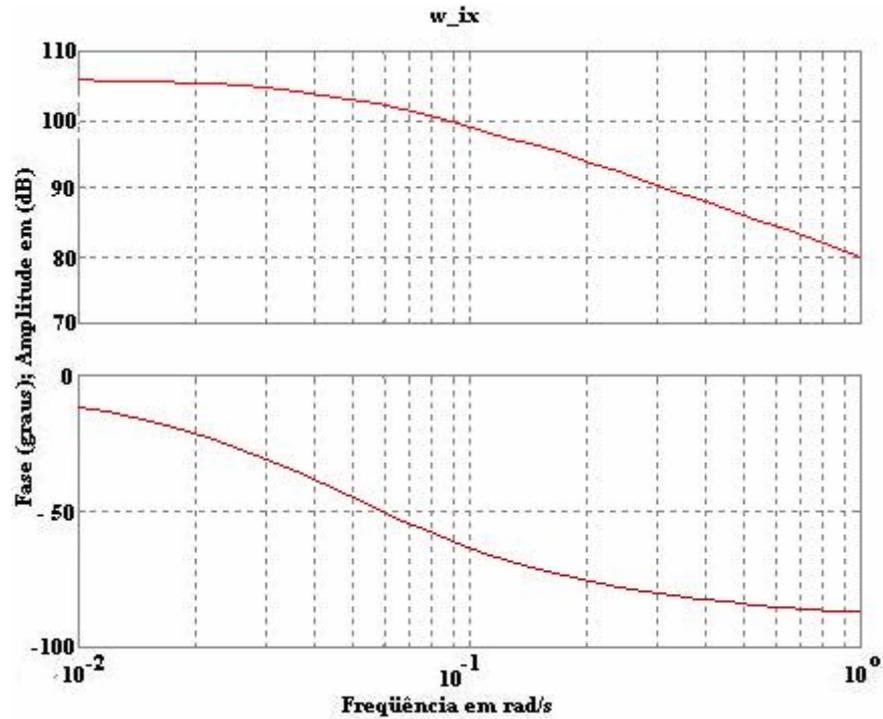


Figura - 5.9 - Diagrama de bode do F.P.B referente a variação da espessura ou dureza de entrada.

A seguir, é apresentada a figura 5.10, a resposta temporal do F.P.B, excitada por um sinal ruído branco.

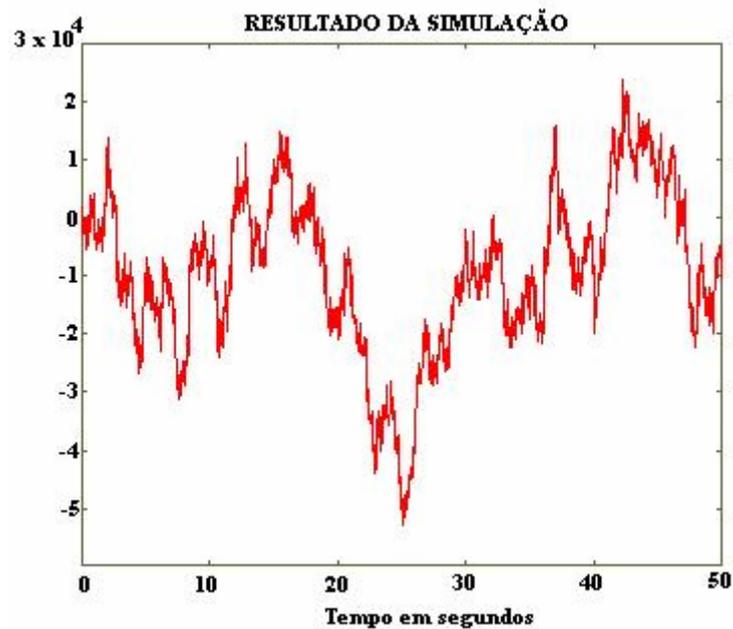


Figura 5.10 - Resposta do F.P.B. modelado por um ruído branco.

O elemento final é o pistão hidráulico acionado pelo regulador e é responsável pela movimentação dos cilindros de apoios. Entre o pistão hidráulico e o controlador, temos um circuito de acionamento da servoválvula responsável por controlar hidráulicamente o pistão

hidráulico. Para fins de projeto foi considerado somente um único elemento hidráulico responsável pelo sistema de atuação no laminador. Algumas outras considerações devem ser feitas, como o tempo de resposta da servoválvula, pois existe um atraso na resposta devido ao tempo que o carretel interno leva para se dirigir à posição necessária. A pressão na saída da servoválvula é devido à aplicação de uma determinada pressão de trabalho. O atuador hidráulico realiza a movimentação mecânica da abertura dos cilindros e com isso a correção desejada para restabelecimento da espessura desejada. A força exercida por esse pistão hidráulico reflete sobre a parte estrutural da cadeira de laminação e é medida por duas células de cargas, situadas em cada um dos lados da estrutura da cadeira e servirão como sinais ou média dos sinais, de medição para o sistema de controle.

Considerando-se o conjunto pistão hidráulico e a servoválvula como um único componente, a função de transferência em tempo contínuo é dada por H_x . A função de transferência desse componente atuador, segundo Grimble (1992) é aproximada por um sistema de *segunda ordem*, o qual é mostrado a seguir.

$$H_x(s) = \frac{2.4 \cdot 10^8}{s^2 + 72s + 90^2} \quad (5.12)$$

A resposta em frequência é apresentada na figura 5.11.

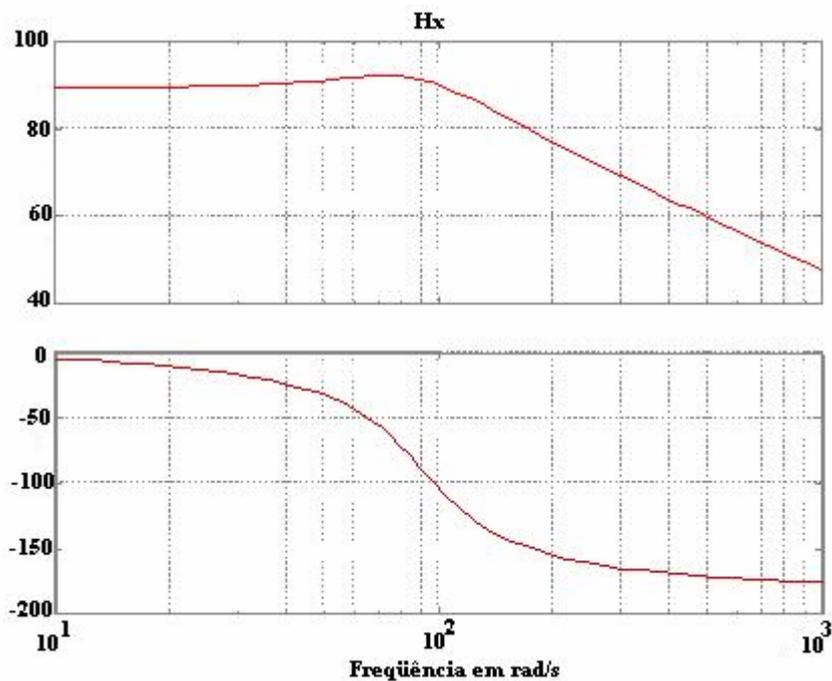


Figura 5.11 - Diagrama de bode em módulo e fase do atuador final para abertura dos cilindros de trabalho.

Pode-se observar que a faixa relevante da resposta em frequência do atuador hidráulico é de 10 a 1.000 rad/s e, portanto, a preocupação de que este sistema possa responder as influências das perturbações, devido à excentricidade e espessura/resistência à deformação plástica e na dureza de entrada, sem dúvida alguma procede. A busca de solução para rejeição destes efeitos, não só melhorará a qualidade final do produto, bem como, conservará melhor o equipamento.

5.7 Simulação das respostas em malhas fechada e aberta.

A proposta de Grimble (1992) foi projetar um sistema de controle em malha fechada composto de um regulador LQR em cascata com filtro de estimativas de estados das variáveis. Tanto a dinâmica da planta como as perturbações de entrada, são tratadas por este controlador. O projeto se resume em gerar o comando para o atuador $u = -K\hat{x}$, onde \hat{x} é um valor estimado do *estado* x , derivado das medições da força de laminação f . A figura a seguir 5.12 mostra o regulador LQG. Deve-se projetar o ganho K de realimentação de estado e um filtro de Kalman da *estimativa de* x . A figura 5.12 mostra o esquema do regulador LQG.

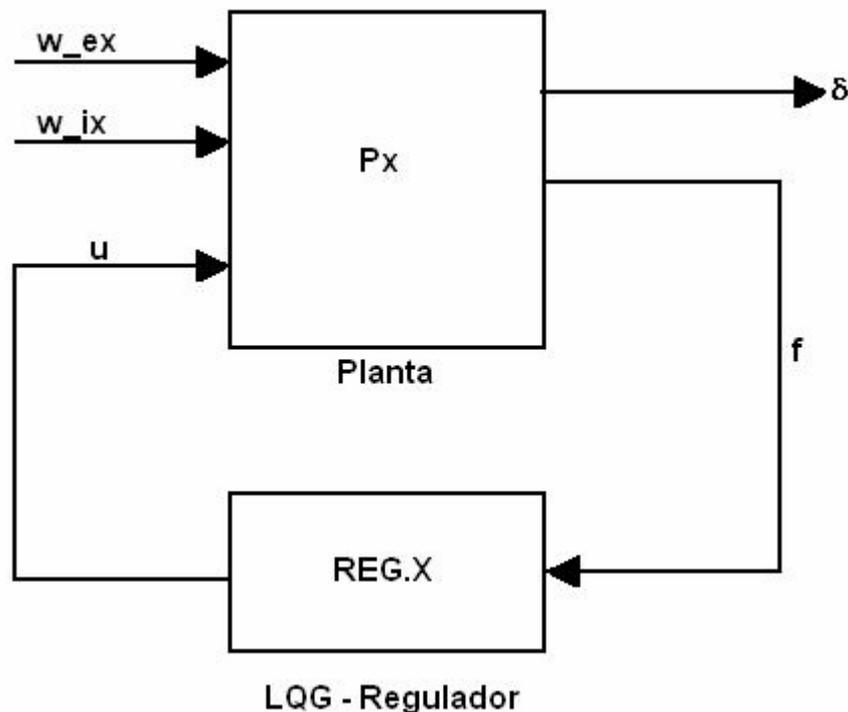


Figura - 5.12 - Esquema do regulador LQG.

O ganho K de realimentação de estado é calculado, segundo Grimble (1992), minimizando a função custo a seguir:

$$C(u) = \int_0^{\infty} (\delta(t)^2 + \beta u(t)^2) dt. \quad (5.13)$$

A fase *zero grau* (0°) na baixa frequência, o regulador aplica realimentação positiva (incrementando a força de laminação), a fim de, reduzir o desvio positivo de espessura devido ao aumento na espessura/dureza de entrada (perturbação de baixa-frequência).

A fase *menos cento e oitenta graus* (-180) próxima da frequência da excentricidade de *seis rad/s*, o regulador aplica uma realimentação negativa (decrementando a força de laminação). O resultado devido a ação de controle é que a espessura de saída cai a um valor residual. A figura 5.13 mostra o diagrama de Bode da resposta do regulador em frequência e fase.

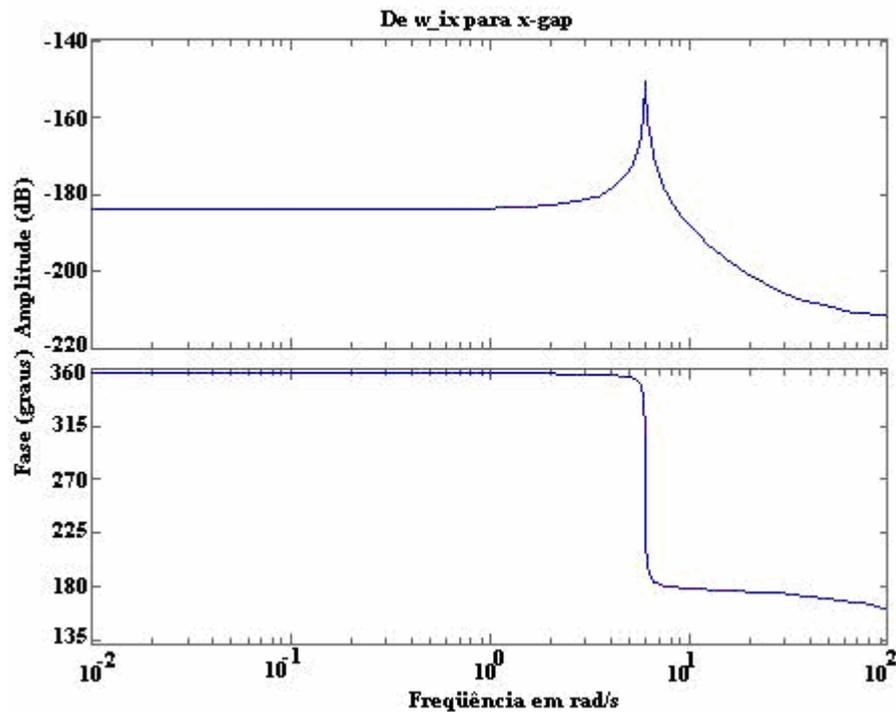


Figura - 5.13 - Diagrama de Bode do sistema em malha fechada.

A figura 5.14 compara a resposta temporal da planta em malha aberta e fechada por unidade-covariança, submetida às perturbações excitadas pelo ruído branco.

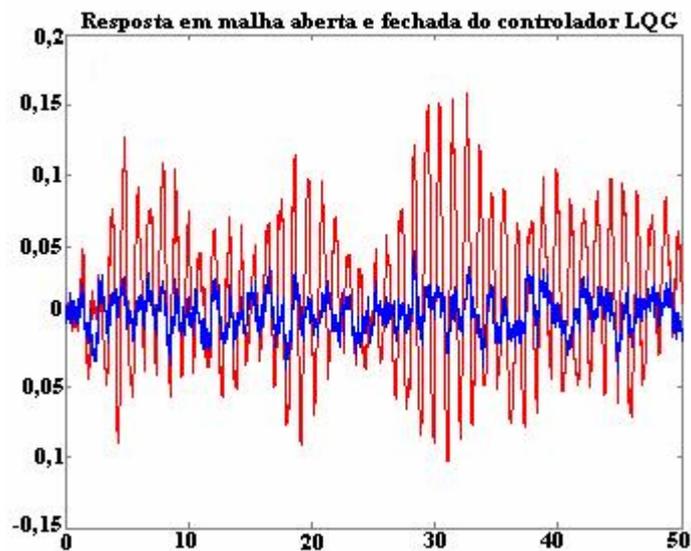


Figura 5.14 - Simulação em malha aberta (vermelho) e fechada (azul) do controlador LQG submetido às perturbações de entrada.

5.8 Comentários.

O projeto proposto por Grimble (1992), um controlador composto de um regulador LQR em cascata com filtro por estimativa da variável de estado, é uma solução particular para aquele laminador, com determinadas perturbações. O resultado do projeto em malha fechada apresenta na simulação uma atenuação das perturbações de dez vezes em relação ao sistema operando em malha aberta. O desempenho do sistema em malha fechada foi melhorado em relação ao sistema em malha aberta, mas não houve outras simulações para validação completa do projeto.

Em nenhum instante, como é comum na laminação, foi alterado, a condição de entrada, como troca dos cilindros de laminação, alteração da amplitude das perturbações ou por excentricidade dos cilindros ou pela resistência à deformação plástica e na dureza/espessura de entrada, alteração da velocidade de laminação, aplicação de aceleração ou desaceleração dos motores, enfim a alteração dos parâmetros para análise da robustez do controlador. Fica evidente que o sistema não pode operar em malha aberta, pois a resposta será desastrosa com a impressão total das perturbações sobre o material laminado. Em virtude de o estudo ser baseado no modelo utilizado de Grimble (1992) e para a laminação a frio foram desconsideradas algumas perturbações intrínsecas pelos efeitos não significativos provocados no sistema de controle.

Nesse capítulo, de acordo com a análise realizada no projeto demonstrado, as informações dos efeitos provocados pelas perturbações na planta, bem como as suas

representações das respostas em frequências servem como condições de entrada para o desenvolvimento do cancelador das perturbações na arquitetura proposta. Pode-se concluir que o projeto feito por Grimble (1992) pode ser melhorado, com ajustes adaptativos dos parâmetros da função custo, principalmente com a implantação do sistema de controle em um laminador real e com a formação de uma base de dados.

6. ESTUDO DE CASO DE UM LAMINADOR A FRIO.

O objetivo nesse capítulo é realizar o estudo de caso e apresentar a solução para um sistema de controle de espessura de um laminador a frio. A planta alvo é de um laminador a frio, do tipo quádruplo e cujas características da planta são do tipo linear, estável e SISO. A proposta de solução para o sistema de controle, se resume na aplicação dos conceitos de controle adaptativo para o controle da dinâmica da planta. Quanto as perturbações e ruídos do processo, essas serão tratadas separadamente da dinâmica da planta e vice-versa. Para o desenvolvimento dos modelos, a aplicação do ANFIS para a aproximação e determinação dos parâmetros dos modelos da planta e do filtro de cancelamento das perturbações.

6.1 Implementação da arquitetura do sistema de controle.

Para a realização da proposta de controlar com alto desempenho, a espessura de saída de um laminador a frio, a partir das dificuldades encontradas pelo sistema de controle em razão das interferências no processo é apresentada a seguir, uma metodologia para o desenvolvimento da solução e análise dos resultados.

6.1.1 Metodologia de implementação da arquitetura do sistema de controle.

Os itens apresentados a seguir, descrevem a metodologia para a implementação da arquitetura de controle para o laminador a frio. O item inicial faz uma descrição da dificuldade do sistema de controle de espessura de laminadores a frio, em vista das interferências do processo de laminação. Os itens a seguir mostram o desenvolvimento passo a passo até a proposta de solução. São eles:

- a. Problemas no processo de controle do laminador a frio os quais resultam na produção de material fora de conformidade às especificações técnicas;
- b. Proposta de uma arquitetura de controle baseada em sistemas adaptativos;
- c. Preparação e montagem de uma base de dados, entrada-saída da planta, com a escolha de um sinal de modelagem na obtenção dos modelos adaptativos;
- d. Obtenção dos modelos adaptativos: primeiro para a dinâmica da planta e segundo para o filtro de cancelamento das interferências no processo através de uma rede neuro-nebulosa;
- e. Simulação da arquitetura de controle submetido a diversos esforços de controle.

Cada um dos itens descritos acima será desenvolvido separadamente e na seqüência conforme a seguir.

6.2. Problemas no processo de controle do laminador a frio os quais resultam na produção de material fora de conformidade às especificações técnicas.

Conforme apresentado no capítulo cinco desse trabalho, seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3, as fontes de perturbações no processo de laminação provocam ações indevidas para o controlador baseado no princípio BISRA.

São varias dificuldades para o sistema de controle de espessura do laminador, como apresentadas no capítulo 5, seção 5.2.3 desse trabalho, sendo a seguir:

- Tempo de transporte;
- Dificuldade física de alocar sensor para a medida do “gap”;
- Perturbações devido a fatores do grupo um e grupo dois.

Uma vez que não é possível realizar a medida direta da abertura ou fechamento dos cilindros, o sistema de controle da espessura de um laminador a frio em processo pode laminar o material utilizando-se como variável medida a força de laminação. Algumas implicações podem surgir em virtude dessa opção de controle para o laminador. O efeito provocado na força de laminação, segundo Grimble (1992) leva a ações do controlador as quais intensificam o erro quando a perturbação é devida a fatores do segundo grupo, como excentricidade do cilindro, rigidez da cadeira de laminação (GYZBURGH, 1984).

Este princípio (DAVY, 1994) é baseado no efeito da elasticidade da cadeira de laminação provocado pela variação na espessura desejada. Um desvio na espessura desejada, ou incremento ou decremento provoca respectivamente, um aumento ou uma diminuição na força de laminação. Este efeito provocado na força de laminação pode ser utilizado como um sinal para o controle do “gap” atual, para corrigir a abertura dos cilindros e assim corrigir a espessura final. Em síntese, temos:

- 1) Se $\Delta h > 0$ então $\Delta f > 0$ e $\Delta s < 0$ necessário fechar o “gap”.
- 2) Se $\Delta h < 0$ então $\Delta f < 0$ e $\Delta s > 0$ necessário abrir o “gap”.

Quando, por exemplo, a razão do aumento da força de laminação é provocada por fatores do grupo dois, como a excentricidade dos cilindros, este aumento da força ocorre pelo fechamento dos cilindros ou a diminuição do “gap”, a ação corretiva é abrir os cilindros de trabalho ou aumentar o “gap”.

Para um laminador cujo sistema de controle de espessura é baseado simplesmente no princípio do BISRA e o qual não é previsto qualquer mecanismo para o tratamento das perturbações o resultado é a produção de materiais fora de conformidade.

6.3. Proposta de uma arquitetura de controle baseada em sistemas adaptativos.

Nesse trabalho, o objetivo é apresentar uma arquitetura baseada em sistemas adaptativos para o sistema de controle de espessura de um laminador. Para adaptação de modelos da planta e do inverso da planta, algumas considerações sobre o tipo de planta, estabilidade, número de pólos e zeros da planta e a sua causalidade devem ser inicialmente definidas.

6.4 Proposta da arquitetura de controle do laminador.

Para a modelagem do controlador e cancelador considerou-se que a planta é :

- Do tipo SISO (uma entrada e uma saída);
- Estável, linear e invariante no tempo;
- De mínima fase;
- Causal.

Os itens descritos não são restrições, pois caso a planta não fosse estável, essa não é uma restrição, pois a planta deve ser estabilizada por realimentação. Se a planta for de não mínima fase, ou seja não causal, essa não é uma restrição, pois a arquitetura está preparada para operar com um modelo de referência e ajuste do atraso. Pode ser invariante no tempo, pois essa é a função do controle adaptativo.

Na figura 6.1 é apresentada a proposta de arquitetura do sistema integrado de controle, para a dinâmica da planta e as perturbações no processo, conforme Widrow (1996). Esta solução apresentada por Widrow (1996) é muito semelhante ao IMC. O esquema proposto por Widrow (1996) e o IMC é que a perturbação aparece na entrada da planta.

Quando $\hat{P}_k(z)$ casa com $P_k(z)$ a componente na saída da planta é somente à perturbação n_k . A minimização ocorre pela adaptação de $C_k(z)$.

- $\hat{P}_k(z)$ converge para $P_k(z)$ sem qualquer polarização;
- $z^{-1}C(z)$ é obtido de $\hat{P}_k(z)$ para o cancelamento da perturbação.

A arquitetura mostra que a perturbação n_k é separada e isolada para o treinamento do filtro dado por $z^{-1}C(z)$. Como o bloco $z^{-1}C(z)$ foi inserido em cascata com o bloco $\hat{P}_k(z)$, no processo “fora de operação” (“off-line”), a modelagem obtida de $C_k(z)$ será o modelo inverso de $\hat{P}_k(z)$. Uma cópia do modelo $C_k(z)$ é realimentada para a entrada do processo, a fim de cancelar a perturbação na entrada.

6.4.2 Controlador Inverso.

Em suma, o princípio do controle inverso e adaptativo é excitar a planta com um sinal produzido pelo controlador cuja função de transferência é o inverso da função de transferência da planta.. O objetivo desse sistema é que a saída da planta acompanhe “siga” ao sinal de comando da entrada. Quando o controlador é exatamente a função inversa da planta, a cascata entre o controlador e a planta resultará numa função de transferência unitária. A figura 6.2 apresenta uma arquitetura que opera nesse conceito de controle inverso.

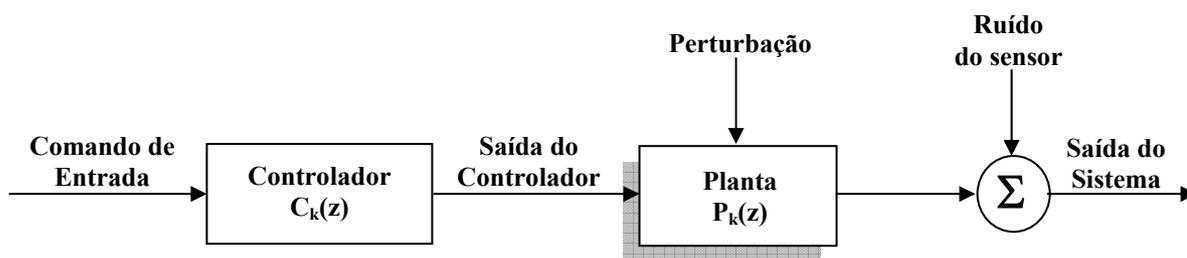


Figura 6.2 – Esquema do controlador inverso da planta com perturbações.

6.4.3 Cancelamento das perturbações.

Um problema para o controle inverso e adaptativo é a presença de ruído e perturbações na planta quando se opera em malha aberta e não há uma malha de realimentação da saída da planta para a entrada do controlador. O comportamento do sistema submetido a essas

perturbações indesejáveis e sem qualquer filtro para rejeição do efeito dessas perturbações poderá trazer conseqüências desastrosas ao processo.

Uma solução convencional para o controle da dinâmica submetido às perturbações do processo é fechar a malha com uma realimentação da saída para a entrada daí o controlador tem dupla finalidade o controle da dinâmica da planta e concomitantemente a rejeição das perturbações. Esta forma de sistema de controle Pode-se dizer, segundo Widrow e Walsh (1996) que a função de transferência do sistema fica invariavelmente alterada da função de transferência da planta,.

Vários métodos de cancelamento das perturbações da planta foram propostos (WIDROW; WALASH, 1996), (GLOVER, 1975) e (GRIFFITHS, 1979) e o esquema básico apresentado na figura 6.3 usa o modelo da planta, livre de perturbações, como estimador das perturbações e o modelo inverso da planta como filtro cancelador para rejeição das perturbações.

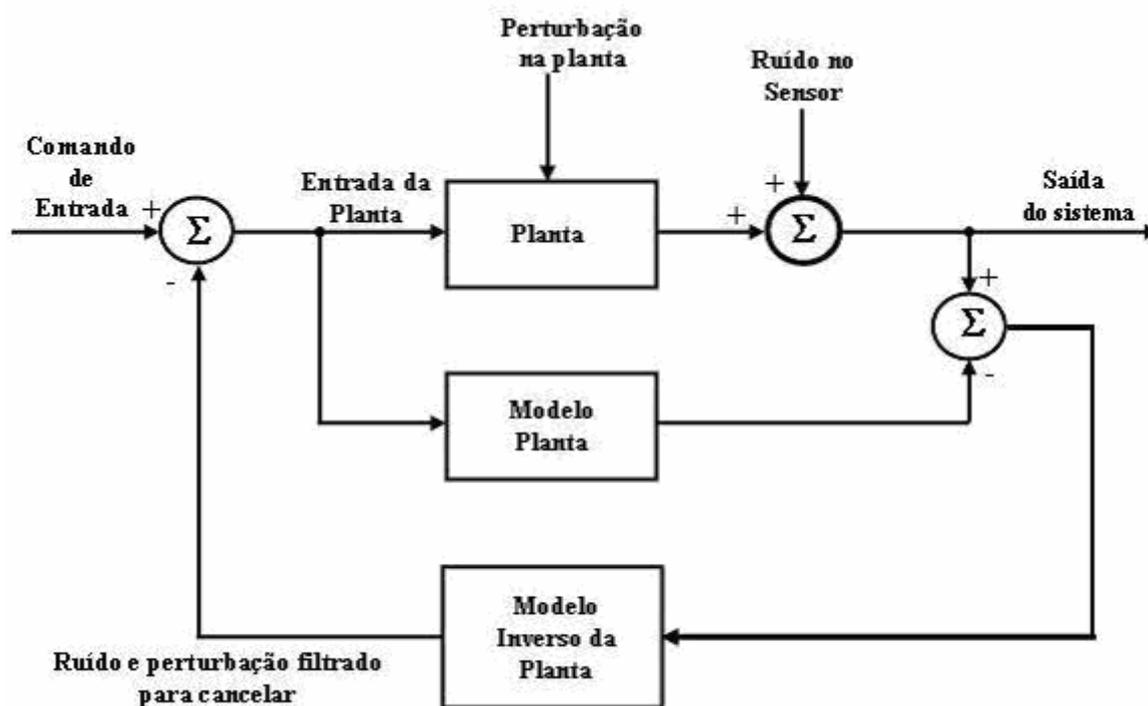


Figura 6.3 - Cancelamento de ruído e perturbação na planta.

O sinal de perturbação da planta é frequentemente representado por um ruído aditivo na entrada da planta. O ruído devido ao sensor é normalmente representado por um ruído aditivo na saída da planta. No sistema da figura 6.3, sem perda de generalidade, pode-se observar que, as perturbações na planta são colocadas como um único sinal e na saída da planta. Um sinal de entrada excita ambas a planta e o modelo da planta, o qual é livre de perturbação. Supondo que a diferença entre o modelo da planta e a planta é desprezível, ou

seja, o modelo da planta é uma cópia precisa da planta, então a diferença entre a saída da planta e a saída do modelo da planta será a própria perturbação da planta. Essa diferença é utilizada para excitar o modelo inverso da planta, a fim de gerar um ruído filtrado o qual será subtraído da entrada da planta. O efeito produzido, segundo Widrow (1996) é o cancelamento ou rejeição da perturbação na saída da planta. Esse esquema de controle é apresentado por alguns autores (GARCIA; MORARI, 1982), (ECONOMOU; MORARI, 1986) e (RIVERA; MORARI; SKOGESTAD, 1986).

Na prática, e de acordo com Widrow (1996), quando os modelos da planta e inverso da planta são modelos quase perfeitos, a função de transferência do ponto de entrada do ruído do sensor na planta até o ponto de saída da planta é próxima a zero.

O resultado dessa afirmativa é que a perturbação na planta será altamente atenuada na saída da planta. A parte fundamental desse processo é que a resposta dinâmica da planta é essencialmente inalterada mesmo enquanto o ruído e a perturbação na planta estão sendo cancelados pelo processo de realimentação do cancelador. Quando os modelos da planta e do inverso da planta são perfeitos, pode-se dizer que a arquitetura de controle da figura 6.3 não precisa de uma realimentação para o controle da dinâmica do sistema. Conforme Widrow (1996), quando o modelo da planta dinamicamente responder como a planta, o ganho resultante será igual a zero.

6.5 Preparação para a montagem de uma base de dados, entrada-saída da planta, com a escolha de um sinal de modelagem na obtenção dos modelos adaptativos.

A preparação de uma base de dados inicia com a escolha do tipo de modelagem não paramétrica. Os parâmetros serão extraídos de uma base de dados. Sendo os dados obtidos da planta através de uma excitação persistente na planta, como abordado no capítulo quatro desse trabalho, extraem-se dessa forma os parâmetros do sistema. O passo inicial deve-se fazer as escolhas do sinal de modelagem para excitar persistentemente a planta, do tempo de amostragem e do número de amostras a serem coletadas da planta do laminador a frio para a obtenção da base de dados.

Em suma, a obtenção dos modelos adaptativos da planta do laminador é a etapa seguinte após obter o conjunto de dados de entrada e saída às quais representam consistentemente a dinâmica da planta. O modelo da dinâmica da planta será extraído dessa base de dados e se a adaptação do modelo é casada com a planta o resultado é uma resposta ao impulso do modelo muito próximo da resposta ao impulso da planta.

6.5.1 Tipos de dados para a estimação de parâmetros e validação do modelo.

A fim de estimar e validar o modelo, o conjunto de dados será independente. O conjunto de dados usa os dados intercalados para estimar o modelo e validar o modelo. Os dados da base de dados são usados metade para a estimação dos parâmetros e a outra metade para validação do modelo.

6.5.2 Tipo de sinal para a implementação do modelo.

A planta do laminador é do tipo SISO e uma excitação persistente realizada no domínio do tempo com a aplicação de um sinal de modelagem do tipo multisenoidal, adicionado a um sinal de ruído branco indicado no capítulo quatro e seção 4.24 desse trabalho, são gerados os dados da base de dados para estimação dos parâmetros do sistema. Em suma, dessa base de dados é montada uma tabela com as variáveis de entrada e saída respectivamente $u(k)$ e $x(k)$ e assim outras variáveis são extraídas dessa base de dados para compor a tabela como $\{u(k), x(k), u(k+1)$ e $x(k+1)\}$. Essas variáveis são necessárias para a adaptação e validação do modelo extraído. A fim de medir a relação entre as variáveis de entrada e saída pode-se realizar a correlação cruzada.

Para a montagem dessa base de dados como foi abordado, deve-se fazer um projeto do experimento conforme as condições descritas no capítulo quatro e nas seções 4.3 e 4.4. Deve-se escolher:

- Sinal de modelagem;
- Tempo de amostragem;
- Número de amostras.

6.6 Sinal de Modelagem.

Conforme os critérios fator de crista e fator de tempo para a quantificação da qualidade do sinal candidato a sinal de modelagem e da restrição aos dados obtidos através da aplicação de sinais binários para a modelagem de sistemas, segundo Godfrey (1993), o sinal escolhido deve obedecer aos seguintes requisitos. Deve ser:

- Estacionário e de média nula;
- Determinístico, pois o conteúdo espectral deve ser constante durante o experimento;
- Multifreqüências, pois deve excitar todas as ordens do sistema. Pode ser adicionado ao sinal um ruído branco, a fim de cobrir todas as ordens do sistema;
- Multiníveis para determinação da função de pertinência por agrupamento “cluster”;
- Compactado, a fim de injetar mais energia no sistema e ter um baixo fator de crista;
- Plano na distribuição de potência em todas as freqüências e ter um baixo fator de tempo.

Conforme a tabela B, apresentada no capítulo quatro, seção 4.5, entre os vários sinais candidatos ao sinal de modelagem da planta, o sinal escolhido para modelagem da planta é um sinal multisenoidal, pois apresenta todas as condições descritas nos requisitos acima. Um sinal aditivo é usado para a cobertura de todas as ordens do sistema (WIDROW; WALASH, 1996).

6.7 Tempo de amostragem.

A variável medida da saída do sistema é a força de laminação e deve ser coletada em intervalos de tempos discretos. O tempo de amostragem é um requisito muito importante, pois as amostras coletadas devem conter propriedades e características do sistema amostrado. Segundo Aguirre (2007), a freqüência de amostragem deve também obedecer a certos requisitos na sua escolha. Deve ser projetada para:

- Não conter componentes de freqüências do sinal abaixo da freqüência de Nyquist, a fim de evitar o falseamento do sinal e ser apropriada para trazer características do sinal amostrado;
- Evitar o cancelamento de pólos e zeros da função de transferência, quando o banco de dados é montado com excesso de dados que sejam redundantes para a estimação de parâmetros;
- Excitar o sistema quando se conhece a priori a planta, com uma freqüência de amostragem superior à freqüência de interesse do sistema a ser estimado. Utiliza-se

na prática, segundo Aguirre (2007) uma frequência de entrada de cinco a dez vezes maiores do que a frequência de interesse.

Nesse trabalho o modelo da planta e a sua resposta em frequência são conhecidos e definidos respectivamente na expressão (5.12) e na figura 5.10 do capítulo cinco, seção 5.6 desse trabalho no modelo apresentado por Grimble (1992). A seguir a função de transferência da planta é:

$$H_x(s) = \frac{2.4 \cdot 10^8}{s^2 + 72s + 90^2} \quad (6.3)$$

e a curva de resposta em frequência é apresentada na figura 6.4.

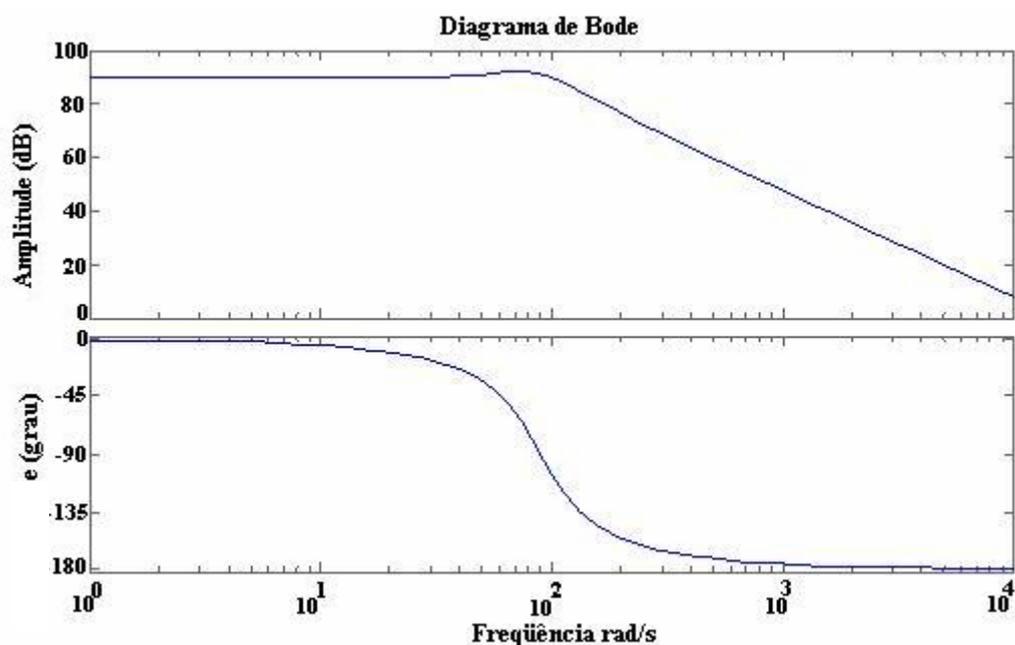


Figura 6.4 - Diagrama de bode em módulo e fase do atuador final para abertura dos cilindros de trabalho.

Frequência rad/s

Da figura 6.4 mostra que a frequência de corte da planta está em torno de 100 rad/s. A frequência de interesse varia de 0 a 16 Hz. A frequência de amostragem, segundo Aguirre (2007) deve ser de cinco a dez vezes a frequência de interesse, ou seja, de 80 Hz a 160 Hz. A frequência escolhida é de 100 Hz, ou seja, amostragem em intervalos discretos de tempos de 0,01s por amostra.

6.8 Número de Amostras.

O número de amostras deve ser suficiente para a modelagem e validação do modelo. Para que não ocorra superamostragem e a fim de evitar redundâncias as quais induzem os cancelamentos de pólos e zeros na função de transferência do sistema, pois um tempo de amostragem extremamente curto pode gerar esse problema. O número de pontos coletados para a coleta, por exemplo, quando a frequência de interesse é de 16 Hz e a frequência de amostragem de 100 Hz é igual a 6 pontos e para as demais frequências abaixo de 16 Hz até zero, o número de pontos então cresce conforme a expressão a seguir.

$$\text{Número de pontos} = \sum_{i=1}^n 100/n \quad (6.4)$$

onde n é a frequência de interesse e $n_{\text{MAX}} = 16$.

Por exemplo, quando a frequência de interesse for de 1 Hz, o número de pontos será igual a 100. O número de pontos para a modelagem e validação do modelo, segundo a expressão (6.4) e n sendo um número inteiro será igual aproximadamente 334 pontos. Repetindo esse evento, conforme a expressão (6.5), a seguir se obtém um total de 801 pontos, sendo 400 para a obtenção do modelo e 400 para validação do modelo.

$$\text{Número de Pontos} = \sum_{i=0,5}^n 100/n \quad (6.5)$$

6.9 Processo de aquisição de dados provenientes da excitação da planta.

Para que a modelagem seja efetiva é necessário que exista uma correlação significativa entre as variáveis de entrada e saída do modelo (AGUIRRE, 2007). Uma outra suposição para justificar a implementação do modelo é que as variáveis $y(k)$ e $u(k)$ respectivamente, saída e entrada de um modelo são de causa e efeito. O sinal $u(k)$, sinal de modelagem é uma causa de $y(k)$ saída da planta. A variável medida é a força de laminação, pois fisicamente é muito difícil a introdução de um sensor de medida de abertura dos cilindros de laminação. A variável de saída $z(k)$ é a saída da força de laminação para o atuador da planta.

A figura 6.2, apresenta o esquema utilizado com a planta, a fim de montar a base de dados. Para dar ao projeto um caráter experimental, será introduzido na planta o ruído do sensor de medida da variável força de laminação e a perturbação do processo. O sinal de perturbação da planta é freqüentemente representado por um ruído aditivo na entrada da planta. O ruído devido ao sensor é normalmente representado por um ruído aditivo na saída da planta. No sistema da figura 6.2 como se pode observar, as perturbações na planta são colocadas como um único sinal na saída da planta. A perturbação do sistema considerada nesse projeto é devida somente à excentricidade dos cilindros. São excluídas as perturbações do processo, devido à:

- Atrito entre o material e os cilindros de trabalhos;
- Variação na película de óleo nos mancais variando com troca na velocidade de laminação;
- Ovalização dos cilindros de apoios;
- Dureza do cilindro;
- Expansão do cilindro com a temperatura e sem uniformidade por má refrigeração dos cilindros durante o processo de laminação;
- Desgastes dos cilindros e imprecisões no perfil do cilindro;
- Outros.

O sinal de modelagem tem que excitar persistentemente a planta. Segundo Widrow (1996), somente o sinal de modelagem é incapaz de realizar a cobertura de todo o espectro de freqüência. Para suprimir esta deficiência, um sinal de espectro largo é aditivo ao sinal de modelagem. O processo de adição de um sinal de espectro largo é adicionar um ruído aleatório conhecido como “dither”. Esse sinal aditivo faz a cobertura do espectro de freqüência para o sinal de modelagem e excita a planta nas freqüências as quais ainda não foram excitadas. A figura 6.5, a seguir mostra o esquema de modelagem da planta com adição do ruído aditivo e das perturbações e ruído do processo de laminação.

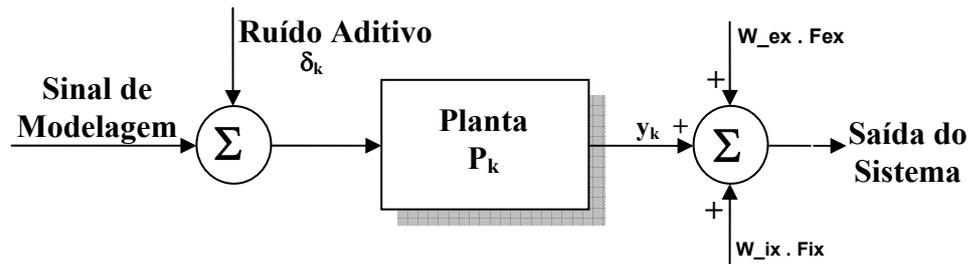


Figura 6.5 – Esquema para a modelagem da planta com perturbação.

6.10 Preparação da base de dados para a modelagem da planta.

Uma vez coletados os pares de dados entrada e saída desse determinado experimento, deve-se submeter estes dados à uma adequação antes de serem utilizados pelos algoritmos de estimação de parâmetros. Esta preparação dos dados permitirá eliminar:

- Trechos de dados corrompidos;
- Tendências indesejáveis;
- Perturbações de baixa frequência;
- Valores não estacionários;

Uma vez os dados estão preparados para a estimação dos parâmetros do modelo, a primeira condição é de que exista uma correlação significativa entre as variáveis de entrada e saída, conforme mostrado a seguir, pela correlação cruzada entre os sinais $u(t)$ e $y(t)$.

$$\tau_{u,y}(\tau,t) = E[u(t)y^*(t + \tau)] \quad (6.6)$$

$$\tau_{u,y}(\tau,t) = \lim \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t)y(t+\tau)dt \quad (6.7)$$

Como o processo é real e ergódico, então $y^*(t) = y(t)$.

A figura 6.7 mostra o gráfico da correlação cruzada das amostras de entrada e saída. Observar que os limites estão dentro -0,4 a +0,2 e o atraso fica em zero.

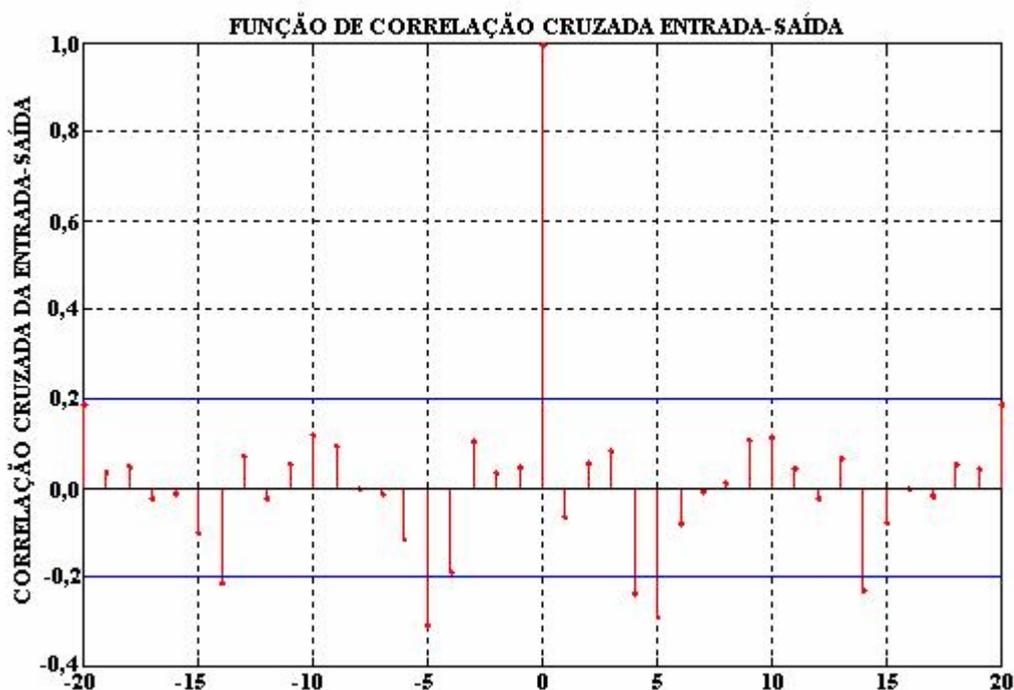


Figura 6.6 – Apresenta a função de correlação cruzada entre as amostras de entrada e saída.

6.11 Obtenção dos modelos adaptativos: primeiro para a dinâmica da planta e segundo para o filtro de cancelamento das interferências no processo através de uma rede neuro-nebulosa.

Esta etapa é a obtenção dos modelos do controlador da planta e do cancelador de perturbações da planta, conforme apresentados na arquitetura proposta. Como tratado no capítulo três desse trabalho, a ferramenta de adaptação será o ANFIS (Adaptive neural fuzzy inference system), uma rede neural com sistema de inferência nebulosa.

6.12 Descrição do editor da rede neuro-nebulosa “toolbox”.

Segundo Matlab (1996), a estrutura básica do tipo de sistema de inferência nebulosa apresentada no capítulo três desse trabalho é um modelo que mapeia as características de entrada para as funções de pertinências, as funções de pertinências para as regras, as regras para um conjunto de características de saída, as características de saída para funções de pertinências de saída, e a funções de pertinências de saída para uma saída de valor único ou de uma decisão relacionada com a saída. Em muitos casos, se consideram fixas apenas as funções de pertinências ou são escolhidas de forma arbitrária.

Em muitos casos se aplica a inferência nebulosa para modelagem de sistemas cuja estrutura é uma regra única essencialmente pré-determinada pela interpretação do usuário, das características das variáveis no modelo. Esta ferramenta, a qual usa o editor ANFIS aplica técnicas de inferência nebulosa para modelagem de dados. Em vez de olhar apenas os dados para escolher os parâmetros das funções de pertinências, se escolhem os parâmetros das funções de pertinência automaticamente usando o aplicativo.

A partir desta ferramenta é possível:

- Carregar dados (formação, testes e verificação);
- Plotar os dados no gráfico;
- Gerar um modelo FIS inicial ou carga FIS um modelo inicial, usando as opções na parte da FIS;
- Visualizar o modelo de estrutura FIS após um modelo inicial é gerado ou carregado;
- Escolher o modelo FIS método de otimização de parâmetros: retropropagação ou uma mistura de retropropagação e mínimos quadrados (método híbrido);
- Escolher o número de épocas de treinamento e o erro de treinamento no modelo FIS;
- Visualizar o resultado do modelo FIS versus a treinamento, validação e saída de dados, clicando no botão Teste.

6.13 Formalidades de dados e o editor GUI ANFIS: Verificação e Treinamento.

Para começar a treinar um FIS usando o editor ANFIS, primeiro é necessário ter um conjunto de dados que contenha uns desejados pares de dados de entradas/saídas do sistema alvo a ser modelado. A ferramenta permite ter um opcional conjunto de dados de teste, que pode verificar a capacidade de generalização do sistema resultante de inferência nebulosa, e/ou uma verificação dos dados que ajuda a definir se ocorreu uma superamostragem “overfitting” do modelo durante o treinamento. A ferramenta permite a utilização de um conjunto de dados de teste e verificação do conjunto de dados para validação do modelo

A superamostragem é contabilizada pelo teste do FIS treinado pelos dados de treinamento contra os dados de validação para a verificação. A seguir se escolhem os parâmetros da função de pertinência que devem ser associados com a verificação de mínimo erro, no caso do erro indicar uma superamostragem do modelo.

6.14 Modelagem da planta com perturbação.

No capítulo dois na seção 2.6 é mostrado o esquema de modelagem da planta com perturbação. Esse esquema permite que haja convergência do modelo com a planta mesmo submetida à perturbações, pois não existe qualquer correlação entre o sinal de modelagem, planta e perturbações. A seguir, segundo Widrow (1996) é necessário verificar a causalidade da planta. Se a planta é de mínima fase então todos os zeros estão dentro do círculo unitário e se é causal todos os pólos estão dentro do círculo unitário. Então o inverso será estável.

Nesse trabalho, considerou-se a planta de mínima fase e estável. A planta do laminador especificada no projeto por Grimble (1992) e cuja função de transferência é apresentada a seguir:

$$F(s) = \frac{240}{s^2 + 72s + 90^2} \quad (6.8)$$

e transformando-se a função de transferência $F(s)$ para o complexo plano- z $P_k(z)$, temos:

$$P_k(z) = \frac{0.008974 z + 0.007019}{z^2 - 0.947 z + 0.4868} \quad (6.9)$$

Analisando os pólos e zeros da expressão $P_k(z)$, temos:

a) Tempo Contínuo

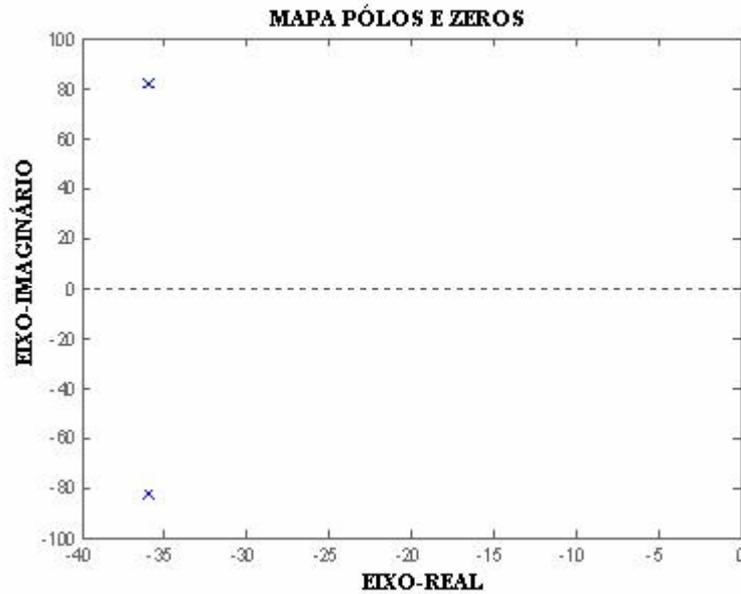
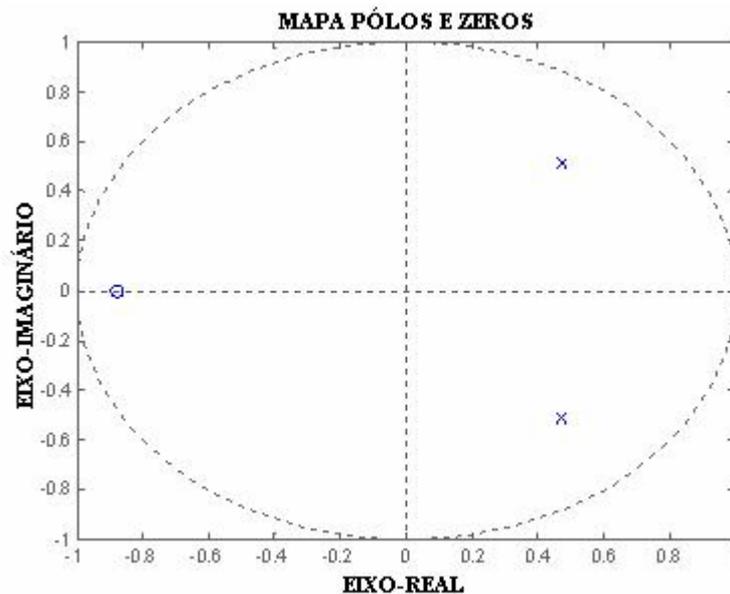


Figura 6.7 – Mapa de pólos e zeros a) tempo contínuo b) tempo discreto.

b) Tempo discreto



No plano z , a localização dos pólos e zeros, sendo o zero $z_0 = -0,007822$ e os pólos $z_{p1} = 0,4735 + 0,5124i$ e $z_{p2} = 0,4735 - 0,5124i$, conforme figura 6.7. Pode-se concluir que a planta é de mínima-fase, pois os pólos e zeros estão todos dentro do círculo unitário no plano- z , então o inverso será estável. Para uma planta causal e estável, ambos os pólos estão dentro do círculo unitário no plano complexo z . Se ela é de mínima fase o seu zero também está dentro do círculo unitário. A recíproca dessa planta é um inverso perfeito, então $C_k(z) = 1/P_k(z)$ e é dado por:

$$C_k(z) = \frac{z^2 - 0,947z + 0,4868}{0,008974z + 0,007019} \quad (6.10)$$

Transformando-se $C_k(z)$, temos:

$$C_k(z) = \frac{0,008974z^{-1} + 0,007019z^{-2}}{1 - 0,947z^{-1} + 0,4868z^{-2}} \quad (6.11)$$

Pode-se escrever que:

$$C_k(z) = z^{-1} \frac{0,008974 + 0,007019z^{-1}}{1 - 0,947z^{-1} + 0,4868z^{-2}} \quad (6.12)$$

Verificando-se a causalidade de $C_k(z)$, a função de transferência pode ser expandida por divisão longa, de acordo:

$$C_k(z) = z^{-1}(111 - 192z^{-1} + 204z^{-2} - 160z^{-3} + 125z^{-4} - 98z^{-5} + 69z^{-6} - 54z^{-7} + 42z^{-8} - 33z^{-9} + \dots + 26z^{-10} - 20z^{-11} + 16z^{-12} - 12z^{-13} + 9z^{-14} + 7z^{-15} + \dots). \quad (6.13)$$

6.15 Restrição de causalidade.

Da equação de $P_k(z)$ a expressão (6.9), o número de pólos é maior do que o número de zeros, ou seja, a ordem do numerador é inferior à ordem do denominador, assim o sistema é realizável. Caso não fosse, o sistema não seria realizável, pois o controle dependeria de valores futuros do erro para calcular o valor atual. Para qualquer planta de mínima fase o atraso $\Delta = 0$, exceto quando a planta tem mais pólos do que zeros, então o atraso $\Delta = 1$, ou seja, quando uma planta analógica é discretizada e apresenta na sua função de transferência, maior número de pólos do que zeros, então a resposta ao impulso inicia após um atraso, ou seja, depois de um período de amostra.

Quando a planta e o modelo da planta produzem sinais de saídas similares, a resposta ao impulso do modelo adaptativo é uma boa representação da resposta ao impulso da planta Widrow (1996). A seguir é apresentado na figura 6.8 o esquema de modelagem adaptativa de uma planta submetida à perturbação.

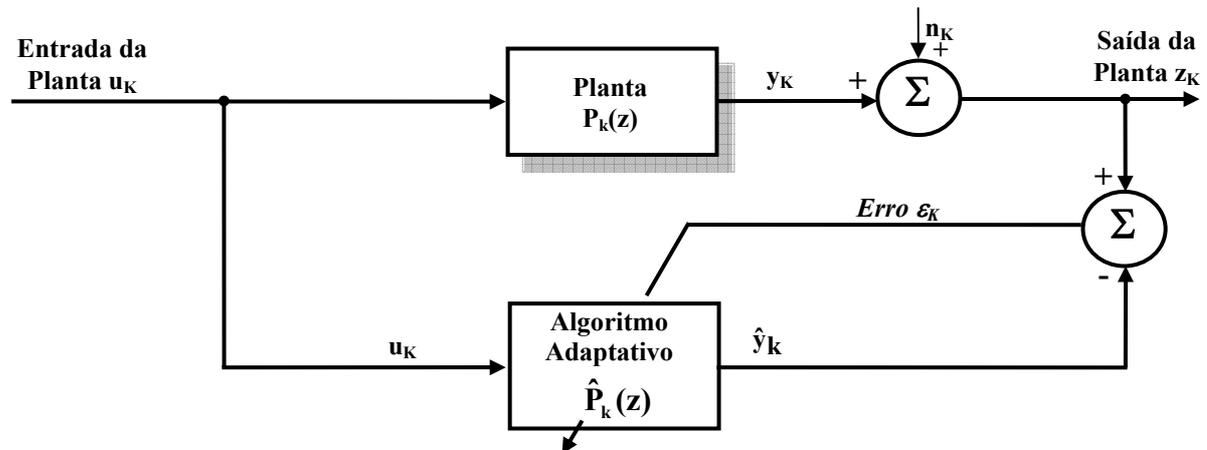


Figura 6.8 - Modelagem adaptativa de uma planta submetida a ruído e perturbação.

6.16 Modelagem inversa da planta com perturbação.

Como a planta $P_k(z)$ é estável, pois os pólos estão dentro do círculo unitário no plano- z , $C_k(z)$ é causal, evidenciado pela expansão em (6.13). Referindo-se a figura 6.8, um filtro adaptativo cuja resposta ao impulso seja infinitamente longa pode ser realizável para $C_k(z)$. Se a resposta ao impulso for finita, mas muito longa então a diferença entre $C_k(z)$ e $\hat{C}_k(z)$ será desprezível. O termo z^{-1} que multiplica toda a expansão indica que a resposta do inverso da planta $C_k(z)$ não pode ser imediata e daí não há resposta instantânea ao comando de entrada. O atraso de z^{-1} da ordem de 0,01s não pode ser encarado como um grande atraso na resposta de $C_k(z)$, mas a introdução desse pequeno atraso terá que ser utilizado na formação do inverso $\hat{C}_k(z)$. Segundo o capítulo dois, na seção 2.10, o inverso da planta deve ser obtido de uma planta livre de perturbações para que o modelo de adaptação não seja adaptado a um inverso próprio e não apresente uma polarização conforme indicado na expressão (2.21). Para evitar que o modelo inverso da planta não seja perfeitamente casado com a função inversa da planta, um modelo cujas características são idênticas às características da planta deve ser utilizado no lugar da planta real. A figura a seguir 6.9 mostra a formação do inverso da planta.

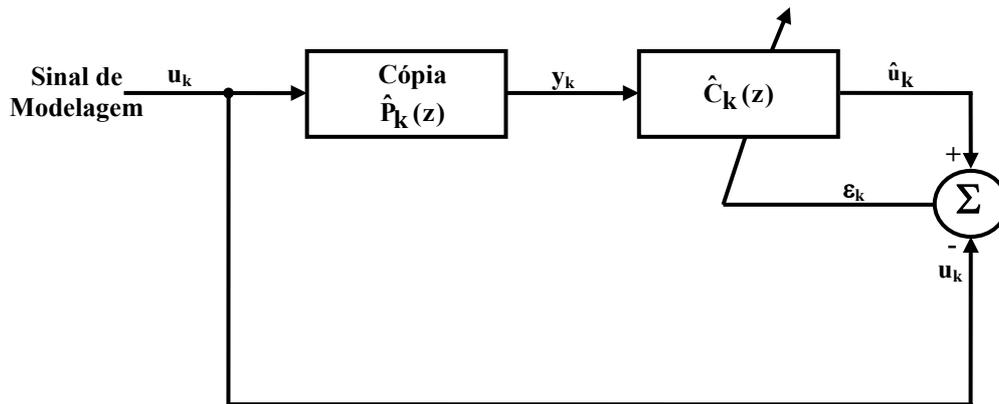


Figura 6.9 Processo de adaptação do modelo inverso da planta.

Uma questão fundamental nessa proposição é se existe problema no modelo inverso obtido através de uma cópia do modelo da planta. E caso essa cópia do modelo não fosse precisamente casada ?

Segundo Widrow (1996), O erro do sistema $E(z)$ é a somatória de quatro componentes :

1. Perturbação no sistema;
2. Ruído Dither filtrado através do sistema físico;
3. Erro do sistema em virtude do truncamento de $\hat{P}_k(z)$ e/ou $\hat{C}_k(z)$;
4. Erro dinâmico do sistema.

Dos quatro erros somente os erros devido aos itens dois, três e quatro são mais significativos, pois o erro devido à perturbação no sistema é independente do ajuste de parâmetros do sistema de controle. A minimização dos erros significativos para adaptação do modelo, se resume segundo Widrow (1996) à escolha da constante de tempo de treinamento para aprendizagem para o sistema em geral e ter conhecimento sobre a taxa de troca das características da planta.

6.17. Avaliações dos sistemas de controle.

Nessa seção, são apresentados os resultados da modelagem da planta e do inverso da planta para o controlador e cancelador das perturbações. Também são apresentados, os modelos nebulosos com as regras iniciais e finais, os erros de modelagens e as simulações do modelo do controlador submetido a sinais aleatórios (MATLAB, 1996). Será também apresentado o índice de desempenho APE (average percentage error) para a validação do

modelo adaptado, sendo os dados utilizados para a verificação do modelo obtidos da base de dados para modelagem da planta.

Será realizada a avaliação do desempenho da arquitetura proposta e da metodologia empregada no projeto do controlador LQG para a aplicação no laminador a frio, sendo que as duas arquiteturas devem operar sob as condições impostas pelo modelo de Grimble (1992).

6.18 Resultados da Modelagem da planta e do Inverso da Planta.

O resultado da modelagem da planta é apresentado na figura 6.10 a seguir, onde são apresentados os gráficos da entrada, da resposta do ANFIS e do erro de adaptação, a qual é a diferença entre a entrada desejada e a resposta do ANFIS.

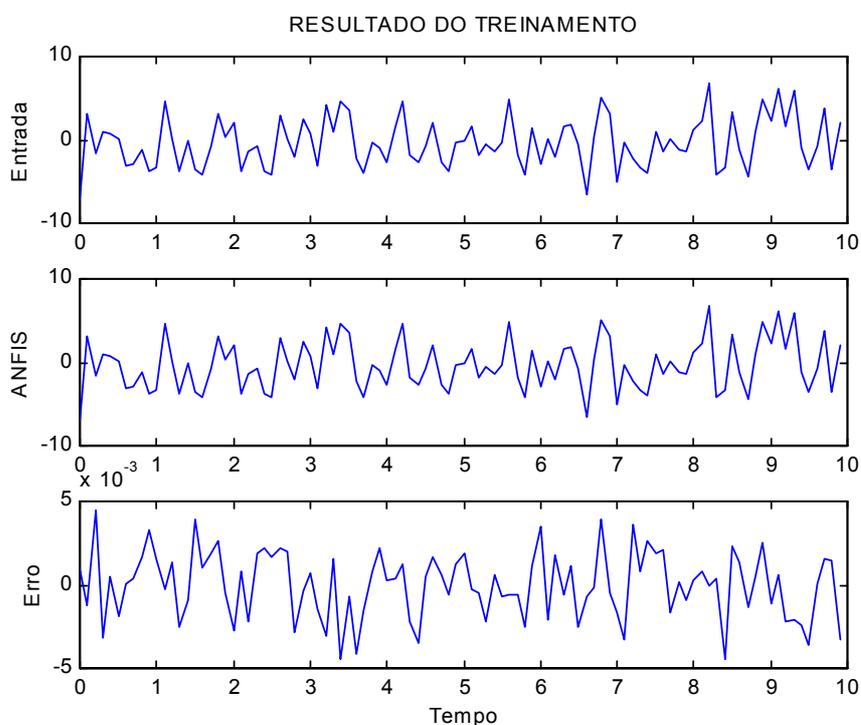


Figura 6.10 – Gráficos entre a entrada desejada, a resposta do ANFIS submetida à entrada desejada e o erro de modelagem diferença entre a entrada e ANFIS para a modelagem da planta.

O resultado da modelagem inversa da planta é apresentado na figura 6.11 a seguir, onde são apresentados dois gráficos sendo um gráfico de entrada e saída desejada com a resposta do ANFIS e outro gráfico do erro de adaptação apresentando a diferença entre a entrada desejada e a resposta do ANFIS.

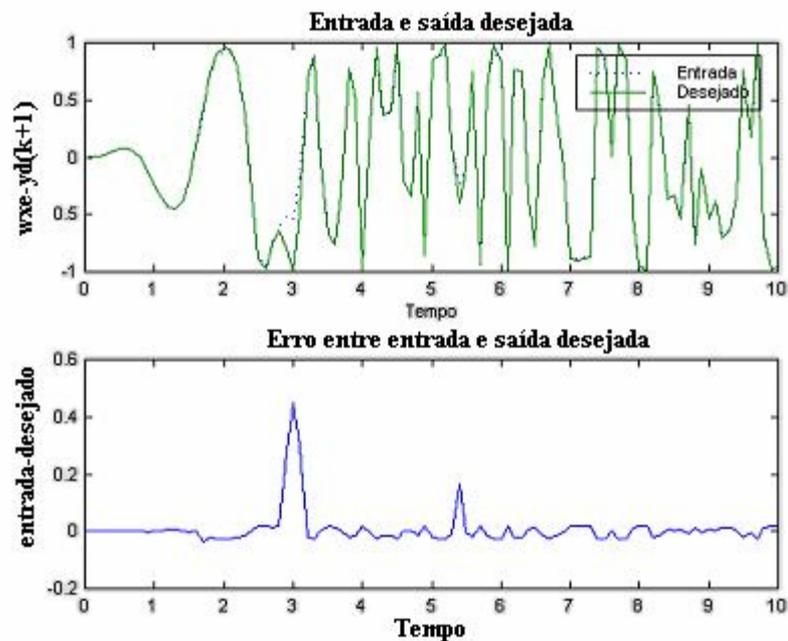


Figura 6.11 – Gráficos entre a entrada desejada, a resposta do ANFIS submetida à entrada desejada e o erro de modelagem diferença entre a entrada e ANFIS para a modelagem inversa da planta.

O resultado da modelagem inversa da planta é apresentado na figura 6.12 a seguir, onde são apresentados os gráficos das regras iniciais e finais.

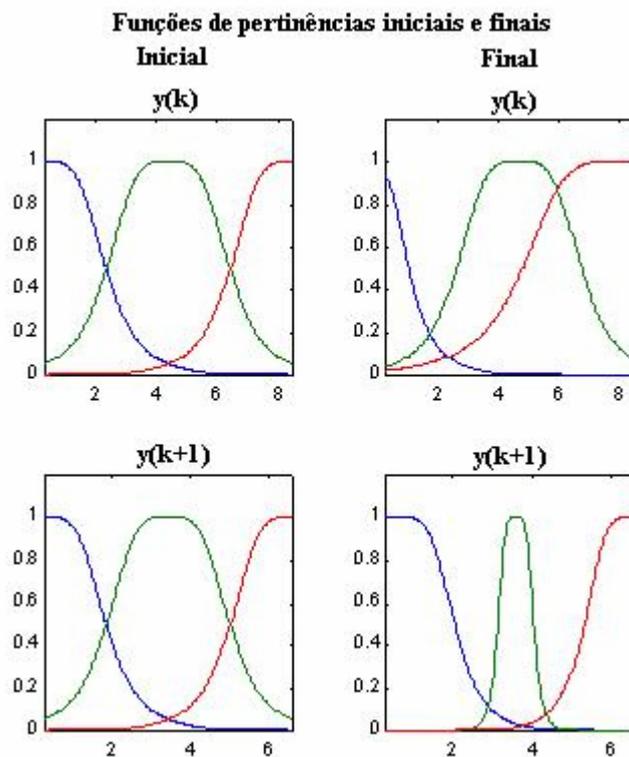


Figura 6.12 - Funções nebulosas iniciais e as finais após treinamento.

6.19 Avaliação do desempenho da modelagem.

Segundo Jang (1996), o índice de desempenho APE (average percentage error) é usado para a validação do modelo adaptado. Os dados que serão utilizados para a verificação do modelo foram obtidos da base de dados para modelagem da planta.

O índice de desempenho utilizado é definido como:

$$APE = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^p \frac{|T(i) - O(i)|}{|T(i)|} \cdot 100\% \quad (6.14)$$

em que P é o número de pares de dados, e T(i) e O(i) são as i ésimas saídas desejadas e objetivadas ou alvos, respectivamente para a modelagem. O valor do índice de desempenho 400 amostras apresentou um percentual de erro médio de $APE = 0,209\%$ para a modelagem inversa. O que indica um excelente desempenho do modelador inverso da planta.

6.20 Avaliação do desempenho da arquitetura proposta submetida às perturbações do processo de laminação.

Para a avaliação do desempenho da arquitetura de controle, o sistema será submetido às mesmas entradas e condições que o trabalho apresentado por Grimble (1992). Ou seja, os sinais exógenos serão os mesmos para uniformizar a avaliação.

A seqüência de ensaios será conforme a seguir:

- O controlador será sintonizado de forma a produzir esforços de controle similares ao do projeto de Grimble (1992);
- O controlador submetido à excitação de entrada de referência aleatória, sem adição de perturbações;
- O controlador submetido à excitação de entrada de referência aleatória, com adição de perturbações.

6.21 Simulação do regulador LQG para controle e atenuação das perturbações.

A figura 6.13 mostra o resultado da simulação realizada no regulador LQG, submetido às perturbações devido a excentricidade dos cilindros de apoio de um laminador e pela variação da espessura/dureza do material de entrada.

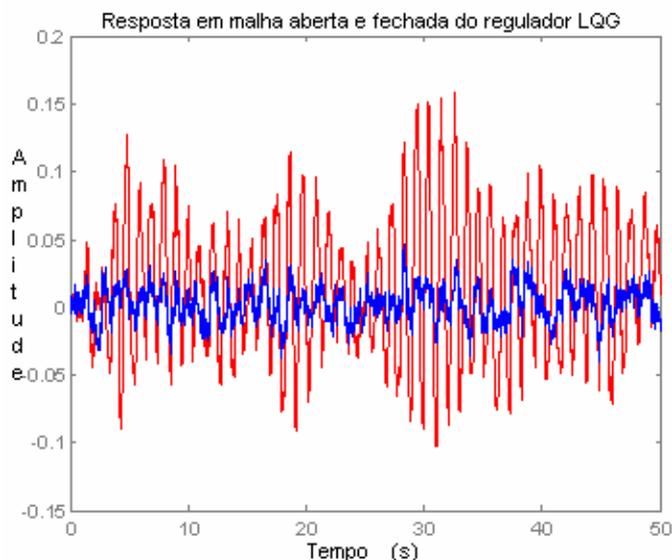


Figura 6.13 - Simulação em malha aberta (vermelho) e fechada (azul) do regulador LQG submetido às perturbações de entrada.

A figura 6.14 a seguir mostra o erro entre a entrada e saída do sistema de controle com a resposta em malha fechada com regulador LQG submetidos às perturbações de saída.

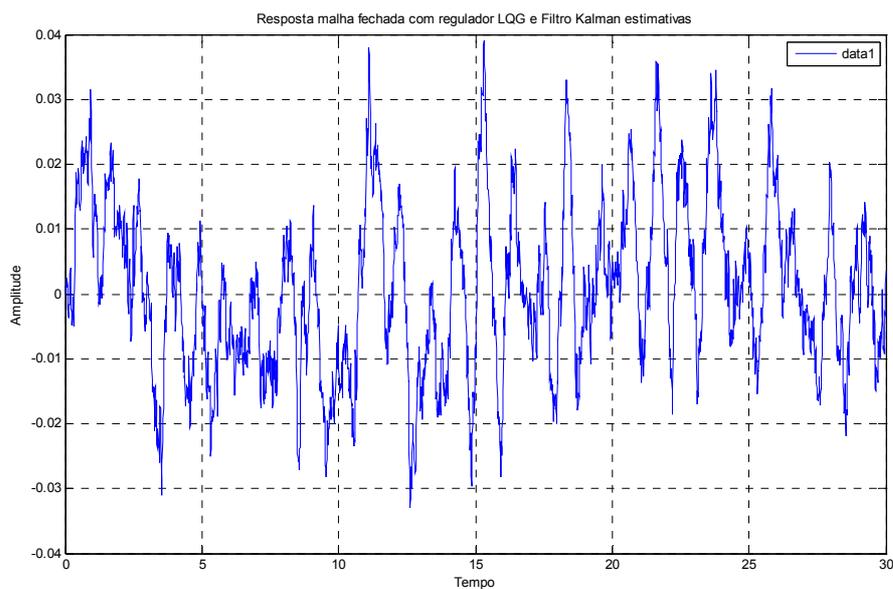


Figura - 6.14 – Erro entre entrada e saída do regulador com a resposta do regulador LQG em malha fechada submetidos às perturbações de saída.

6.22 Simulação da arquitetura de controle proposta para o controle e atenuação das perturbações.

Utilizando o sistema de controle com o controlador modo inverso e cancelador baseado no IMC, mostrado na figura 6.15 apresenta o seguinte resultado.

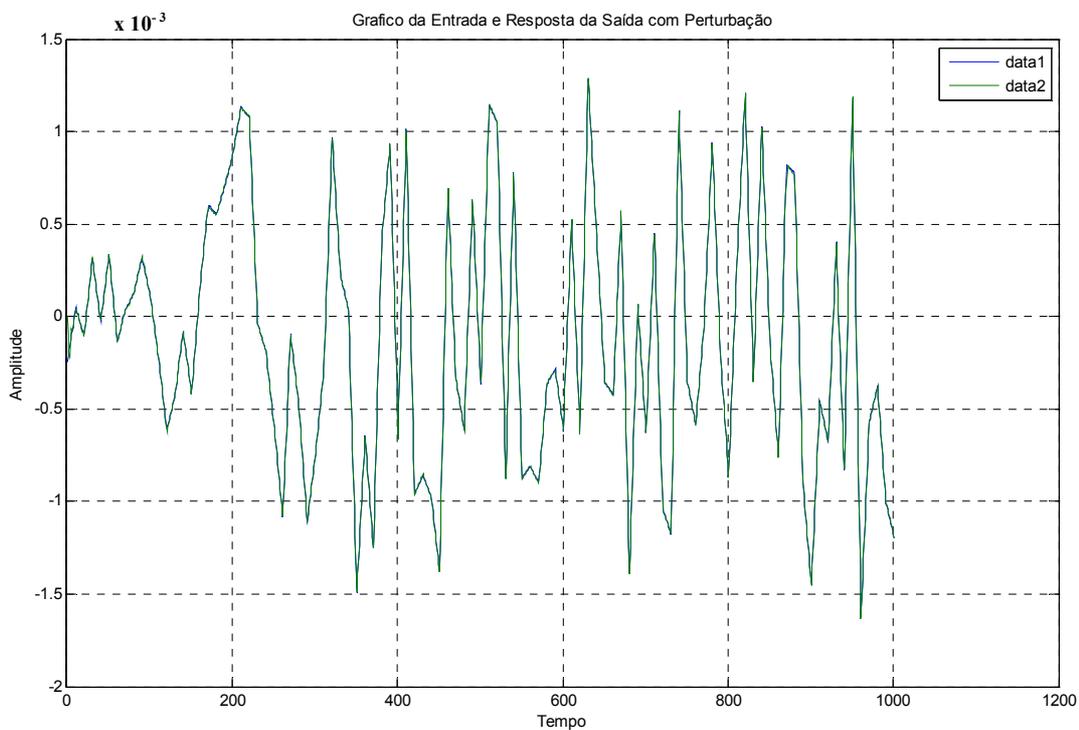


Figura - 6.15 – Gráfico de entrada/saída entre o controlador neuro-fuzzy e o comando de entrada submetido às perturbações.

A figura 6.16 mostra o erro entre a entrada e saída com a resposta do regulador LQG, cor vermelha e o controlador neuro-nebuloso, cor azul.

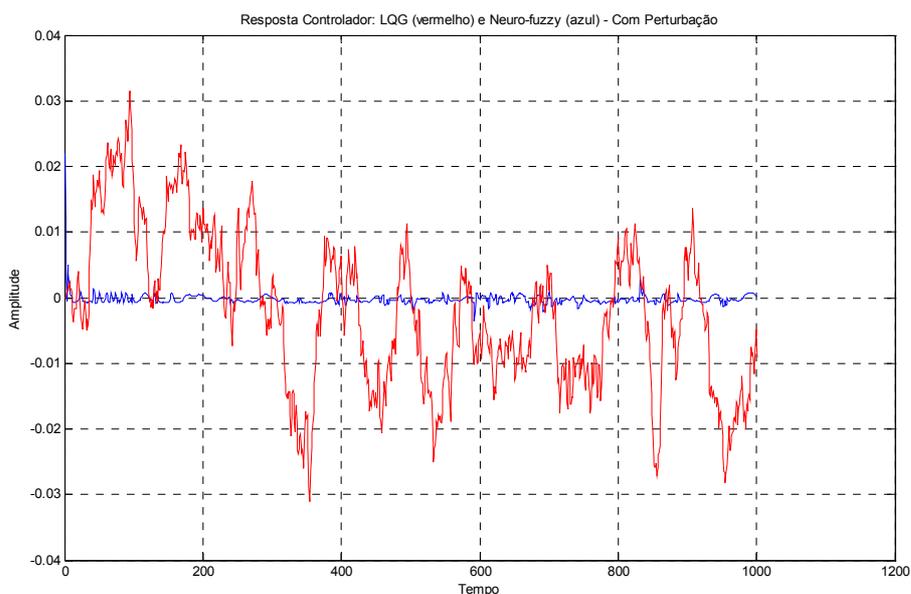


Figura - 6.16 – Resposta do regulador LQG em malha fechada e do controlador neuro-nebuloso submetidos às perturbações de saída.

6.23 Comentários sobre o desenvolvimento do trabalho e trabalhos futuros.

O presente trabalho, controle automático da espessura de um laminador a frio, pode ser fundamentado em diversas disciplinas, a saber:

- Área de laminação onde se exige altos investimentos e pesquisas de sistemas de controle, além de uma vasta revisão bibliográfica para atingir a fronteira do conhecimento;
- Área de controle clássico, com ênfase em controle inverso e adaptativo;
- Área de filtros e algoritmos adaptativos com ênfase nas publicações de (WIDROW, 1996) sobre o assunto;
- Área de inteligência artificial com ênfase na rede neural e lógica nebulosa;
- Área de processamento de sinais com ênfase no estudo de sinais candidatos a sinais para estimação e identificações de sistemas;
- Área de sistemas lineares com ênfase em estimação e identificação de sistemas.

A preocupação inicial quando na revisão bibliográfica da laminação foi se basear em informações as quais apresentavam resultados reais da implantação do sistema de controle.

Muitos dos sistemas instalados não continham informações da arquitetura de controle, embora dispusessem do tipo de princípio utilizado. Existem muitas soluções que são variações no princípio do BISRA com muitos pedidos patentes para os sistemas de controles propostos.

Pouquíssimas instalações comportam um sistema de controle adaptativo e pouquíssimos trabalhos acadêmicos para laminadores a frio com ênfase em controle adaptativo. Uma grande motivação foi produzida após a experiência adquirida num trabalho de dez anos na engenharia de fábrica da empresa de relaminação de aços e da escassez de trabalhos sobre o assunto na área de laminação. Praticamente esses motivos forçaram a elaboração desse trabalho. O objetivo foi construir uma arquitetura de controle adaptativo de alto desempenho para laminador a frio.

A construção de um sistema de controle usando o conceito de adaptação, após a apresentação dos resultados pela empresa de laminação Avesta situada na Suécia, em minha opinião, deverá ser uma tendência natural em face das exigências do mercado, pois com a alta flexibilidade nos processos produtivos, cada vez mais serão necessários circuitos que suportem as grandes variações e respostas rápidas e precisas.

Foi fundamental nesse trabalho, a pesquisa sobre os tipos de sistemas de controle de espessuras para entender as dificuldades do sistema de controle em função do tipo de perturbação. Dentre todos os artigos técnicos publicados nessa área e os mais relevantes, referenciados no capítulo cinco, desse trabalho foram muito importantes na decisão e execução do trabalho. Além desses a motivação foi acentuada pelo trabalho de Grimble (1992). Dentre todas os itens que provocaram uma forte motivação teve também o desafio de implementar o controlador utilizando-se o modelo inverso da planta. Como o assunto não é de domínio geral, mas é muito citado por autores, tivemos algum trabalho em buscar as melhores referências para apoio e suporte.

O projeto completo de Grimble (1992) foi para dois eixos de laminação, pois o produto final era uma viga I. O trabalho foi limitado para um eixo somente, pois com todo o desafio já enfrentado nesse trabalho, era um pouco demasiado incrementar o sistema para MIMO e daí a decisão para SISO.

A proposta foi projetar um sistema de controle de espessura para laminador a frio e implementar uma arquitetura de controle de alto desempenho, com um o controlador, cuja função de transferência é a função inversa da função de transferência da planta com a finalidade de operar com a planta em malha aberta, respondendo ao sinal de comando e concomitante com a planta aplicando esse sinal na saída para atuação no sistema hidráulico do AGC.

Na arquitetura de controle proposta, as perturbações, são tratadas em malha fechada, mas implementada de forma separada do controlador, cuja configuração é baseada no IMC. O objetivo dessa configuração foi cancelar a perturbação na entrada da planta de forma que a saída acompanhe precisamente ao comando de entrada.

Para se obter os modelos casados da planta e do inverso da planta, uma base de dados consistente deve ser montada e os dados devem ser obtidos de forma experimental. Nesse trabalho a primeira providência foi montar essa base de dados sólida para extração dos modelos. Pesquisando muitas publicações e livros na área de estimações de parâmetros e identificação de sistema, alguns requisitos são de extrema importância para excitação persistente da planta. Os requisitos recomendam para seleção de sinais candidatos à excitadores da planta, para a escolha da frequência de amostragem e da duração do evento, um projeto do experimento.

Do projeto do experimento foi importante escolher um sinal com propriedades estatísticas para a excitação da planta, cujas propriedades permitiram evitar a introdução de ruídos nos pesos e causar conseqüentemente uma polarização implicando na imprecisão do modelo apesar da adição do sinal para a cobertura da faixa de frequência e ter características de um sinal aleatório.

Muitos pesquisadores montam a sua base de dados com sinal de excitação da planta do tipo PRBS (sinal binário pseudo-aleatório), mas certamente porque é um sinal estocástico e muito usado na identificação de sistemas, mas que é limitado por ser binário e, portanto somente dois níveis. Um sinal com as mesmas propriedades do PRBS, mas de multiníveis é melhor para excitação permanente da dinâmica da planta quando a ferramenta utilizada é multivariada por agrupamentos (cluster) para sintonização das funções de pertinências das variáveis nebulosas aplicadas com o ANFIS.

A aplicação do sinal para a excitação da dinâmica da planta foi um dos requisitos mais importantes nas obtenções dos modelos. Desse trabalho vimos que o fator de crista e o fator de tempo são dois importantes parâmetros na escolha do sinal para modelagem. A densidade de energia espectral na faixa de frequência de operação também é um ponto importante para a excitação da dinâmica da planta, bem como, a quantidade de amostras e a duração do experimento. Enfim, deve-se implementar um projeto experimento para a formação da base de dados que tem como origem, o sinal de excitação, frequência de amostragem e duração do experimento.

Uma preocupação foi com o tempo de adaptação, uma definição precisa desse parâmetro pode evitar dificuldades, os quais resultam num modelo impreciso, em virtude do ruído nos pesos ou ruídos nos parâmetros de adaptação causados pela adaptação muito rápida.

Quando se conhece a planta a ser modelada tudo fica mais fácil, pois se conhece a fase do sistema e existe o conhecimento se a planta é estável, linear e invariante no tempo, se o sistema é SISO ou MIMO enfim informações importantes para o sistema de adaptação.

Quando não existe muita ou nenhuma informação sobre o sistema a ser controlado, a tarefa fica mais complicada, e se agrava caso o projetista tente implementar a estrutura de controle e adaptar os parâmetros “em operação”. Se o sistema não é de mínima fase, ou seja, alguns dos pólos de sua função de transferência estão fora do círculo unitário, implica que o inverso será instável. Vimos nesse trabalho, uma implementação para esse caso com a introdução do modelo de referência para solucionar esse problema, pois se sabe que o sistema de fase não mínima não responde imediatamente às variações do comando de entrada devido a atrasos na sua função de transferência. São sistemas, por exemplo, que apresentam tempo de transporte entre a medição e a ação. Um outro fator que ajudou na implementação da solução conhecida como de Wiener, onde a adaptação ocorre com a minimização pelo método dos mínimos quadrados ou a de Shannon-Bode sobre a causalidade do sistema de fase não mínima foi que a planta é causal. No caso de sistemas analógicos, onde a planta é discretizada implica intrinsecamente nessa transformação num atraso de uma amostra. Em virtude disso é necessário introduzir no elo de realimentação em cascata com o filtro $C_k(z)$ um atraso z^{-1} , o qual pode até ser desnecessário, quando tempo de amostragem for muito curto.

Como os processos produtivos embora sejam razoavelmente conhecidos, através de diversos trabalhos publicados em congressos e revistas especializadas e mesmo assim ainda não são plenamente dominados e consolidados pelos pesquisadores, é possível através dos dados iniciais, extraídos experimentalmente ou por simulação da resposta da função de transferência do sistema, obter um modelo casado com a dinâmica da planta e cuja resposta ao impulso do modelo seja a mesma resposta ao impulso da planta.

Na fase de adaptação dos modelos da planta e inverso da planta, não houve dificuldade na de interação entre os modelos, pois a adaptação de cada um deles realizada separadamente através da ferramenta de aproximação conhecida como ANFIS. Como os modelos obtidos são quase que perfeitamente casados aos modelos da planta e do inverso da planta, o desempenho do controlador e do cancelador dentro da arquitetura de controle resultou em alto desempenho.

Os métodos para a adaptação dos modelos da planta foram cuidadosamente estudados, em vista das perturbações de entrada do processo. Não é uma simples tarefa a modelagem de sistemas, podem incorrer em problemas, como foi discutido no capítulo dois desse trabalho. Muitas de nossas simulações não foram bem sucedidas em virtude das perturbações do processo. Quando os modelos obtidos não eram cópias exatas das plantas, uma polarização se estabelecia e um erro do tipo estático foi verificado na saída do sistema. Nesse trabalho as obtenções dos modelos da planta e do inverso da planta, foram obtidas “fora de operação”. A proposta de solução apresentada inicialmente por Widrow (1996), baseada no IMC permitiu a implementação do sistema de controle onde a dinâmica da planta é tratada separadamente do controle das perturbações, como se fossem duas arquiteturas separadas e esse foi um ponto importante para a modelagem do controlador e do cancelador.

Para os modelos da planta e do inverso da planta, algumas publicações de (WIDROW, 1996) puderam orientar qual o melhor esquema de modelagem da planta mesmo sujeita às perturbações de entrada, a fim de evitar polarizações as quais poderiam resultar em erros estáticos quando operação dentro da arquitetura. Para a modelagem inversa, o esquema de modelagem é alterado do processo para se obter o modelo da planta, pois o esquema prevê o uso de uma cópia do modelo da planta livre de perturbação para não incorrer no erro estático. Algumas modelagens usando a planta para obter o modelo inverso apresentaram nas simulações esse erro estático na saída.

O processo de adaptação usando redes neurais combinadas com sistema de inferência nebulosa num processo “fora de operação”, onde as redes se mostraram excelentes aproximadores e permitiram excelentes resultados pela solução da minimização do erro de adaptação pelo método dos mínimos quadrados.

A aplicação do ANFIS, como aproximador é um processo que busca encontrar o ótimo global da função. De acordo com o valor desejado na saída comparado com o valor obtido pelo ANFIS, aplicando-se o método dos mínimos quadrados é gerado um erro. Como o processo no ANFIS é recursivo, o erro provoca um novo cálculo do gradiente descendente e por realimentação são ajustados os diversos pesos nas camadas da rede neural. Essa recorrência conhecida como retropropagação na rede permite que se encontre o ótimo global. O ANFIS é baseado no cálculo do gradiente descendente conjugado com o método de cálculo do erro de saída pelo método dos mínimos quadrados.

Um laminador é um equipamento de milhões de dólares, constituídos de grandes periféricos como redutores, motores, medidores de espessuras, lubrificadores e outros equipamentos de alto valor agregado, todos fabricados com tecnologia muito sofisticada e que

não poderão sofrer qualquer dano físico para o desempenho futuro e continuidade da sua função. Enfim um acidente além de custar muito caro a sua recuperação tem um agravante do equipamento ficar parado por um longo tempo e muitas vezes não ter de imediato um substituto, por se tratar de equipamentos caros e específicos e não de séries produtivas e nem de estoques.

Mas ficou bastante claro que quando os modelos não eram perfeitos, a resposta do sistema em virtude das perturbações foi tremendamente desastrosa e daí a recomendação de adaptação “fora de operação” para não arriscar o equipamento.

Reconhecemos nesse trabalho que o modelo de Grimble (1992) é muito simples e um modelo de segunda ordem. As perturbações do processo são apenas relativas às excentricidades dos cilindros de laminação e da variação da espessura/resistência à deformação. Outros modelos mais abrangentes poderão ser implementados dentro dessa metodologia utilizada. O estudo dos modelos bem como a aplicação com os sistemas de controles adaptativos, implementados com redes neurais poderão ser um trabalho futuro.

Os próximos trabalhos sob nosso ponto de vista é a implementação de sistemas MIMO e do tipo não linear, pois não tem tantos trabalhos publicados e será um grande desafio o desenvolvimento das técnicas de controle inverso, embora já tenha publicações nesse sentido (WIDROW; WALASH, 1996), mas não aplicadas aos laminadores.

7. CONCLUSÕES.

O objetivo desse trabalho foi realizar um estudo de caso e apresentar a solução para um sistema de controle de espessura de um laminador a frio. Com uma proposta cuja abordagem foi diferenciada das arquiteturas de controles convencionais, o sistema de controle usou uma planta alvo utilizada no projeto de Grimble (1992) de um laminador a frio, do tipo quádruplo e cujas características da planta são do tipo linear, estável e SISO. A proposta de solução para o sistema de controle, se resumiu na aplicação dos conceitos de controle adaptativo para o controle da dinâmica da planta. Quanto as perturbações e ruídos do processo, essas foram tratadas separadamente da dinâmica da planta e vice-versa. O desenvolvimento dos modelos com a aplicação do ANFIS para a aproximação e determinação dos parâmetros dos modelos da planta e do filtro de cancelamento das perturbações.

O resultado da modelagem adequada mostrou que as perturbações foram atenuadas cerca de 30 dB pela arquitetura proposta. Nesta simulação do controlador neuro-nebuloso, como a simulação do regulador LQG em malha fechada e a simulação do controlador em malha aberta, todas foram submetidas às mesmas perturbações, representadas pela excentricidade dos cilindros de laminação e concomitantemente pela variação da resistência à deformação plástica do material e dureza e a espessura de entrada do material submetida aos mesmos comandos de entrada. O resultado gráfico permitiu verificar o desempenho do sistema de controle proposto quanto à precisão e imunidade às perturbações. De acordo com as figuras apresentadas 6.12 e 6.13, verificou-se que essas figuras mostraram a precisão do controlador neuro-nebuloso, em relação ao regulador LQG proposto por Grimble (1992).

Resumindo-se, pode-se concluir sobre a implementação e operação da arquitetura de controle adaptativo:

- Pode ser aplicada em plantas estabilizadas por realimentação;
- A modelagem se torna mais complicada quando não se conhece a priori a planta;
- Precisão de controle depende da qualidade da modelagem;
- Com cancelador se obtém maior robustez às perturbações;
- Facilidade na análise. pois os modelos são implementados separadamente cancelador e controlador da planta;
- Apresenta um tipo de polarização quando os modelos são bastante imperfeitos.

- Adaptação pode ser realizada “em operação”;
- Pode ser utilizado em plantas de não mínima fase, pois se adapta bem com modelo de referência.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB **High-tech for thin sheet modernization of a tandem cold rolling mill.** Boletim emitido pela ABB solutions for metals industries – Disponível em http://www05.abb.com/global/scot/scot227.nsf/\arcelor_final.pdf, 2000.

AGUIRRE, L.A. **Introdução à Identificação de Sistemas.** Editora. UFMG – 3.a edição, 2007.

ALEXANDER, J.M. **On the theory of Rolling.** Proceedings R. Sociedade Londres A, 326, p. 535 a 563, 1972.

ARMCO **Armco liderança no setor de aços relaminados.** Notícias emitida pela Armco, http://www.armco.com/novo/pt/noticias_view.php?id=54, 2005. Acesso ao link 24 Dez. 2009.

ASTRÖM, K.; WITTENMARK, B. **Adaptive control.** Addison-Wesley, Reading, MA, 2.a edição, 1995.

AZIZ, N.; HUSSAIN, M.A.; MUJTABA, I.M. **Performance of Neural Network Inverse-Model-Based Control (NN-IMBC) - Strategy Versus Conventional Dual Mode Control (DMC) Strategy in Batch Reactors.** Computing & Chemical Engineering, Vol. 24, Issues 2 – 7, p.573 a 580, 1988.

BABŮSKA, R. **Fuzzy Modeling for Control.** International series in intelligent technologies Kluwer Academic Publishers, Londres, 1998.

BENGTSSON, G., **Improved AGC control in cold rolling using learning technology.** First Control Systems AB, Suécia, 2000.
http://www.firstcontrol.se/INFO_Improved_AGC_Control.pdf. Acesso em 24 Dez. 2009.

BROWN, D.; CARBON, G; RAMSEY, K. **Survey of excitation techniques applicable to the testing of automotive structures.** International Automotive Eng. Congress and Exposition, Cobo Hall, Detroit, Fevereiro, 1977.

CALDAS, L.; LA NEVE, A. **A high performance thickness control architecture for flat sheet rolling mills.** IV IEEE Conferência de Aplicações Industriais, Induscon 2000, Vol.1, p.103, 2000.

CALDAS, L.; LA NEVE, A. **Uma alternativa de controle com a implementação de uma arquitetura baseada no controle adaptativo inverso modelada por neuro fuzzy.** Sociedade Brasileira de Automação Inteligente SBAI 99, 1999.

CALDAS, L.; LEONARDI, F.; BELFIORE, P.P. **Aplicação da técnica de mineração de dados para a tomada de decisão em processos industriais envolvendo laminador a frio.** XV Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP, Bauru, 2008.

CALDAS, L.; LEONARDI, F.; BELFIORE, P.P. **Applications of fuzzy cluster means for decision making in Industrial Process.** In. 20° International Congresso of Mechanical Engineering. COBEM 2009, Gramado, R.S. Proceedings of 20° International Congresso of Mechanical Engineering, 2009.

CASTRO, S. F.; GALLEGO, J.; LANDGRAF, F.J.G.; KESTENBACH, H.J. **Estudo da Laminação de Encruamento em Aços - Elétricos semi-processados: correlação com os fatores de Taylor.** ABM – 60° Congresso Anual, BH. Jul. 2005.

CHOI, S.G.; JOHNSON, M.A.; GRIMBLE, M.J. **Polynomial LQG control of back-up roll eccentricity gauge variations in cold rolling mills.** Automatica, Journal of IFAC, vol. 30 Issues 6, p.975 a 992, 1994.

DAVY, MC. **Control and Automation Sheffield.** Folheto com apresentação dos tipos de controle automático de espessuras. Inglaterra, 1994.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Operations on fuzzy numbers.** International Journal Systems SCI, 1978.

DUBOIS, D.; PRADE H. **Fuzzy Sets and Systems, Theory and Applications.** Academic Press, 1980.

ECONOMOU, C.G.; MORARI, M. **Internal model control - Multiloop design.** Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 25 (2), p. 411 a 419, Abril, 1986.

EDWARDS, W.J. **Roll eccentricity control for strip rolling mills.** IFAC 10th. Triennial World Congress, p.200 a 211, 1987.

EVANS, G.W.; KARWOWSKI, E.; WILHELM, M.R. **Applications of Fuzzy Set Methodologies in Industrial Engineering.** Elsevier Science, Serie Advances in Industrial Engineering. USA, pp.336, 1989.

FERGUSON, J.J. **Modern hot strip-mill thickness control.** Industrial Application IEEE Transactions on industry applications, Vol. IA-22, Issue 5, p.934 a 940, 1986.

FRANKLIN, G.F.; POWELL, J.D.; EMANI-NAEINI, A. **Feedback Control of dynamic Systems.** 2.a edição, Addison-Wesley Longman Publishing Company, Inc., 1993.

FRAYMAN, Y. **Fuzzy neural networks for control of dynamics systems.** PhD em Ciência da Computação e Sistemas de Informações, Deakin University, Abr. 1999.

FRAYMAN, Y.; ROLFE, B. **Eccentricity and hardness control in cold rolling mills with a dynamically constructed neural controller.** Proceedings of the Fourth International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials: IPPM, Japão, 2003.

FREEMAN, J.A.; SKAPURA, D.M. **Neural Networks, Algorithms, Applications and Programming Techniques.** Addison Whesley Longman Publisher Co, Inc., 1991.

FRESHWATER, I.J. **Simplified Theories of Flat Rolling-I. The Calculation of Roll Pressure, roll Force and roll Torque.** International Journal Mechanical Sciences, p. 483, 1996.

FRESHWATER, I.J. **Simplified Theories of Flat Rolling-II. The Comparison of calculated and experimental.** International Journal Mechanical Sciences, 1996.

GARCIA, C.E.; MORARI, M. **Internal model control - A unifying review and some new results.** Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 21 (2) p.308 a 323, Abr. 1982.

GARCIA, C.E.; MORARI, M. **Internal model control - Design procedure for multivariable systems.** Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, Abr. 1985.

GARCIA, C.E.; MORARI, M. **Internal model control - Multivariable control law computation and tuning guidelines.** Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, Abr. 1985.

GARIMELLA, S.S.; SRINIVASAN, K. **Application of repetitive control to eccentricity compensation in rolling.** Journal of dynamic systems measuring and control, Vol. 3, p.2904 a 2908, 1994.

GINZBURG, V.B. **Dynamic characteristics of automatic gage control system with hydraulic actuators.** Iron and Steel Engineer 61, pág.57 a 65, 1984.

GIORNI, A.A.;SILVA, M.R.S.;SILVEIRA,J.H.D. **Aplicação de redes neurais no modelamento matemático de propriedades mecânicas bobinas a quente.** 45.o Seminário de Laminação. Processos e produtos laminados e revestidos. Ipojuca – Porto de Galinhas, PE, p.21 a 24, Out. 2008.

GIORNI, A.A.; VALLIM, S.S.; PLAUT, L.R. **Aplicação de rede neural para cálculo da tensão de escoamento na laminação de tiras a quente de aços c-Mn¹.** 46.o Seminário de Laminação – Processos e produtos laminados e revestidos, Santos. Out. 2009.

GODFREY, K. **Perturbation Signals for System Identification.** Prentice Hall International series in Acoustics, Speech and Signal Processing, 1993.

GONÇALVES, R.; HELMAN, H **Controle da Espessura de Saída de Tiras Laminadas Utilizando a Lógica Nebulosa.** RBCM-J. of the Braz. Coc. Mechanical Sciences, V.XX,- n.4, p.645 a 655, Dez. 1998.

GOUVEIA, M.R. et al. **Aplicação de inteligência computacional na determinação da força de laminação.** Seminário de Automação de Processos da ABM, Vitória, 2002.

GRIMBLE, M. J.; JOHNSON A.M. **Optimal Control and Stochastic Estimation Teory and Applications.** Prentice Hall, 1992, pág. 975 a 988.

GUPTA, M.M.; NIKIFORUK, P.N. **Modeling and Control of Flexibile Space Strutures Using Neural Networks.** Wescanex 93.apos; Communications; Computers and Power in the Modern Environment.apos; Conference Proceedings., IEE, Vol.,Issue,p.291 a 298, 1993.

HASEGAWA, A.; TAKI, F. **Development of Fuzzy Set theory-based Shape control system for cold strip mill.** Nippon Steel, Tokyo, Japão, n.49, p.59 a 62, 1991.

JAIN, A.K.; MURTY, M.N; FLYNN P.J. **Data Clustering a Review** ACM Computing Surveys, Vol.31, p.264 a 323, Set.1999.

JAMSHIDI, M.; AMINZADEH, F. **Soft Computing.** USA - Prentice Hall, 1997.

JAMSHIDI, M. et al. **Applications of Fuzzy Logic Towards High Machine Intelligence Quotient Systems.** Prentice Hall, 1997.

JANG, J.S.R.; GULLEY, N. **Fuzzy logic Toolbox Mathworks Inc.** Matlab, Jan. 1995.

JANG, J.S.R.; SUN, C.T.; MIZUTANI, E. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing.** NJ – Prentice Hall, 1997.

JANTZEN, J. **Neurofuzzy Modeling.** Technical Report n.98. Technical University of Denmark, n.98-H-874 (nfmmod), Out. 1998.

KASABOV, N.K. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering.** A Bradford Book, 1996.

KAILATH, T. **Linear Systems.** Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1980.

KEVIN, S. **Designing with fuzzy logic.** Spectrum IEEE, Vol.27, Issue 11, p.42 a 44, 105, Nov. 1990.

KONDO, K. et al. **A New Automatic gauge control System for a reversing cold mill.** Technical Report. ISIJ Meeting October, Annual Reviews in Control, Vol.24, p.55 a 66, 2000.

KOSKO, B. **Neural Networks and Fuzzy Systems.** NJ, Prentice Hall, 1992.

KOSKO, B. **Fuzzy Engineering.** NJ, Prentice Hall, 1997.

KU, R; ATHANS, M. **On the Adaptive Control of linear systems using the open-loop feedback optimal approach.** IEEE Transactions on Automatic Control. Vol.18, Issue 5, p.489 a 493, Out.1973. Versão corrente: Jan. 2003.

LANDAU, I.D.; LOZANO, R.; SAAD, M.M. **Adaptive Control (Communications and Control Engineering).** Springer, 1979.

LEE, C.C. **Fuzzy Logic in Control Systems: fuzzy logic controller.I** IEEE Transactions on Systems, Man. and Cybernetics, Vol.20, Issue 2, p.404 a 418, Mar/Abr. 1990. Versão corrente: Ago. 2002.

LIN, C.T.; LEE, C.S.G. **Neural Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision System.** IEEE Transactions on Computer, Vol.40, Issue 12, p.1320 a 1336. Dez. 1991. Versão corrente: Ago. 2002.

LIU, J.A. **Design and Analysis of Intelligent Fuzzy Tension Controllers for Rolling Mills.** Electrical Engineering Waterloo, Ontario, Canada, 2002

LIU, X.; YI, J.; ZHAO, D. **Adaptive Inverse Control System Based on Least Squares Support Vector Machines.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol.3498, ISNN 2005.

MAHFOUF, M. et al. **Roll Speed and Roll Gap Control with Neural Network Compensation.** ISIJ International, Iron and Steel Institute of Japan, 2006.

MANDANI, E.H. et al. **Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant.** Proceeding of IEEE, Vol.121, n.12, p.1585 a 1588, 1974.

MANGELS **Glossário técnico** <http://www.mangels.com.br>. Acesso feito em Out. 2009.

MATLAB M. **Versão do estudante** Makron Books, 1997.

MATLAB M. **Control System Toolbox - User's Guide.** Dez. 1996.

MATLAB, M. **Simulink, Modeling Simulations Implementations Using Simulink.** Dez. 1996.

MCCUSKER, T. **Neural Networks and Fuzzy Logic, Tools of Promise for Controls.** Control Engineering, p.84 a 85, Mai. 1990.

MENOZZI, A.; CHOW, M.Y. **Design Methodology for na Inteligent Controller Using Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks.** IECON'93 Havaí, 1993.

MITCHELL, J.F. **On line non-contact thickness measuring of flat rolled metals.** Conference record of the 1989 IEEE Industry Application Society Annual Meeting 1989, Vol. 2, p.1481 a 1489, Out. 1989. Versão corrente: Ago. 2002.

MORNAS, J.P.; PANTÉ, J. **Gauge regulation for flat cold rolled products.** Transaction Iron and Steel Institute Japan, 11(4), p.785-786, 1999.

NAZARUDDIN, Y.; WALUYO, J.; HADISUPADMO, S. **Inverse Learning Control Using Neuro-Fuzzy Approach for a Process Mini-Plant**. IEEE Computer Society, International Conference on Physics and Control PHYCON'93, Vol.1, p.274 a 252, Ago. 2003.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno** – 3.a ed., Prentice Hall, R.J., 1998.

OLIVER, C.D. **Neural Networks Based Nonlinear Adaptive Inverse Controls Algorithms**. Stanford University, Set. 1996.

OSBURN, P.V.; WHITAKER, H.P.; KEZER, A. **New developments in the design of model reference adaptive control systems**. Institute of Aeronautical Sciences, ISA Paper 61-39, 1961.

PATULA, E.L. **A possible mechanism for causing eccentricity in sleeved backup rolls on colding mills**. LOG n.9038937 ASME Journal of Engineering for industry, Vol.14, p.429 a 441, 1978.

PEDRYCZ, W. **Fuzzy Control and Fuzzy Systems**. John Wiley & Sons, 2.a ed. ISBN: 0-86380-081-5, N.Y. USA, 1989.

PINHEIRO, C.A.M.; GOMIDE, F.A.C. **Design and Tuning of fuzzy control system to nonlinear process**. IV Conferência de Aplicações Industriais, Induscon 2000, Vol.1, p.123, 2000.

PINHEIRO, C.A.M.; GOMIDE, F.A.C. **On the equivalence between basic fuzzy and classical control**. 08/1999, Científico Internacional, IFSA'99, 8.o International Fuzzy System Association World Congress, Vol,2, p.594 a 597, Taipei, TAYWAN(FORMOSA), 1999.

PLETT, G.L. **Adaptive inverse control of plants with disturbances**. Stanford University, Stanford, PhD. Thesis, Maio, 1998.

RATH, G. **Model Based Thickness Control of the Cold Strip Rolling Process**. PhD. Thesis - Department of Automation, University of Leoben, Austria, 2004.

RIVERA, D.E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. **Internal model control - PID controller design**. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 1986 25(1), p.252 a 265, Jan. 1986.

RIZZO, E.M.S. **Processos de laminação dos aços: uma introdução**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 2007

ROSSOMANDO, F.G.; DENTI, J.F.; FERREIRA, E.F. **Modelling and Control of a Hot Rolling Mill**. ISSN: 0327-0793, Latin American Applied Research, Bahia Blanca, Argentina, Vol.36, p.199 a 204, 2006.

SAITO, W.; RIESS, M. **Inteligência artificial, um salto tecnológico na automação de plantas siderúrgicas**. M & M - Metalurgia & Materiais, ABM, Mar. 1998.

SBARBARO-HOFERS, D.; NEUMERKEL, D.; HUNTS, K. **Neural Control of a Steel Rolling Mill**. IEEE Control System Magazine, ISSN: 0272-1708, Vol.13, Issue 3, p.69 a 75, 1993. Versão corrente: Ago. 2002.

SCHROEDER, M.R. **Syntesis of low-peak factor signals and binary sequences with low autocorrelation**. IEEE. Transactions. Inf. Theory, IT 16, p.85 a 89, 1970.

SIEMENS **Electrical Equipment and Automation for single stand mills. Solutions for Metals, Mining and More**. Siemens AG Industrial and Building Group, Cold Rolling Mills, Processing Lines, 1976.

SIEMENS **Electrical Equipment and Automation for Cold Strip Tandem Mills. Solutions for Metals Mining and More**. Siemens AG Industrial and Building Group, Cold Rolling Mills, Processing Lines, 1979.

SIEMENS **New Thickness Control Mode Based on Mass Flow Principle Increases Cold Rolling Accuracy – Ideas for Steel** Siemens AG Industrial and Building Group, Cold Rolling Mills, Processing Lines, 1998.

SIEMENS **New thickness control mode based on mass flow principle increases cold rolling mill. Ideas for steel**. Boletim da Siemens – Aplicação de sistemas de controle de espessura para laminadores a frio, 1999.

SIMPSON, P.K. **Neural Networks Applications**. IEEE Technology Update Series. IEEE Press, 1996.

SUGENO, M.; KANG, G. **Structure Identification of Fuzzy Model**. Source: Fuzzy Sets and Systems, Elsevier, North-Holland, Inc. Amsterdam, Holanda. ISSN:0165-0114, Vol.28, Issue 2, p.15 a 33, Out. 1988.

SUZUKI, A. **Recent Progress in the Rolling Mills, Part I.** 57/58 Seminário Nishiyama Memorial, Nogyo Kaikan (Okayama and at Nokyo Hall), Japão, Vol.24, p.228 a 249, Mar. 1980.

TAKAGI, T; SUGENO, M. **Fuzzy identification of systems and its applications to modeling control.** IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, Vol. 15, No.1, p.116 a 132, 1985.

TANAKA, K et al. **Application of Neuro-Fuzzy Hybrid Control System to Tank Level Control.** 2.a IEEE International Conference on Fuzzy System, 1993, USA, São Francisco, Vol.1, p.618 a 623, Mar. 1993. Versão corrente: Ago. 2002.

TSOUKALAS, L.H.; UHRIG, R.E. **Fuzzy and Neural Approaches in Engineering.** John Wiley & Sons Inc., 1997.

TSUKAMOTO, Y. **An approach to fuzzy reasoning method.** Editores M.M. Gupta, R.K. Ragade and R.R. Yager, Advanced in fuzzy set theory and applications, Amsterdan, Holanda, p.137 a 149, 1979.

USIMINAS – **Boletim – Laminação a frio celebra 40 anos.** Assessoria de imprensa da Usiminas, 2005 .

VOLLMER, F. **Medição contínua de espessura de fitas laminadas a frio.** Palestra proferida na primeira expocosa, Dez. 1989.

VOLLMER, F. **Medição da planicidade em laminadores a frio.** Application Note, 1996.

WAGNER, F. **Force Feed Forward Automatic Gage Control System Overview.** Steel Technology. http://www.hatch.in/Technologies/Articles/FFF_ECCENT_PAPER.pdf. Acesso em Out. 2009, revisado em Mar. 1996.

WALKER, M.J.A; DAVIES, K.F. **Measuring of backup roll eccentricity.** Iron and Steelmaker, KR Barnes et al., p.27 a 33, Out. 1987.

WIDROW, B.; WALACH, E. **Adaptive Inverse Control.** Prentice Hall Information & System Sciences Series, ISBN 0-13-005968-4, 1996.

WIDROW, B. et al. **Adaptive noise cancelling : principles and applications.** Proceedings. Of the IEEE, Vol.63, Issue 12, p.1692 a 1716, Dez. 1975.

WIDROW, B. **Adaptive Inverse Control.** IFAC Adaptive System in Control and Signal Processing, Lund, Sweden, p.1 a 5, 1986.

WIEDEMER, K. **Significance of Mill Stand Stiffness in Relation to Rolling Accuray.** Metals Technology, Abr. 1974.

ZADEH, L.A. **Fuzzy Sets.** Information and Control 8, p.338 a 353, 1965.

ZADEH, L.A. **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process.** IEEE Transactions on System, Man. And Cybernetics, Vol. SMC-3, p.28 a 44, 1973.

ZADEH L.A. **The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning.** III, Information Sciences, 9:1, p.43 a 80, 1975.

ZAIANE O.R. **Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases.** Computing Science, University of Alberta, Conference, 2002.

ZÁRATE, E. L. **Predictive Model for the cold rolling mill process through sensitivity factors via neural networks.** J.of the Braz. Soc. of Mechanical. Sciences. & Engineer, Vol. XXVIII, No. 1/111, Jan-Mar, 2006.

ZÁRATE, E.L.; GÁLVEZ, J.M.; HELMAN, H. **Representação e Controle de laminadores tandem baseado em funções de sensibilidade obtidos através de redes neurais.** SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 14, n.2, Junho, 2003.